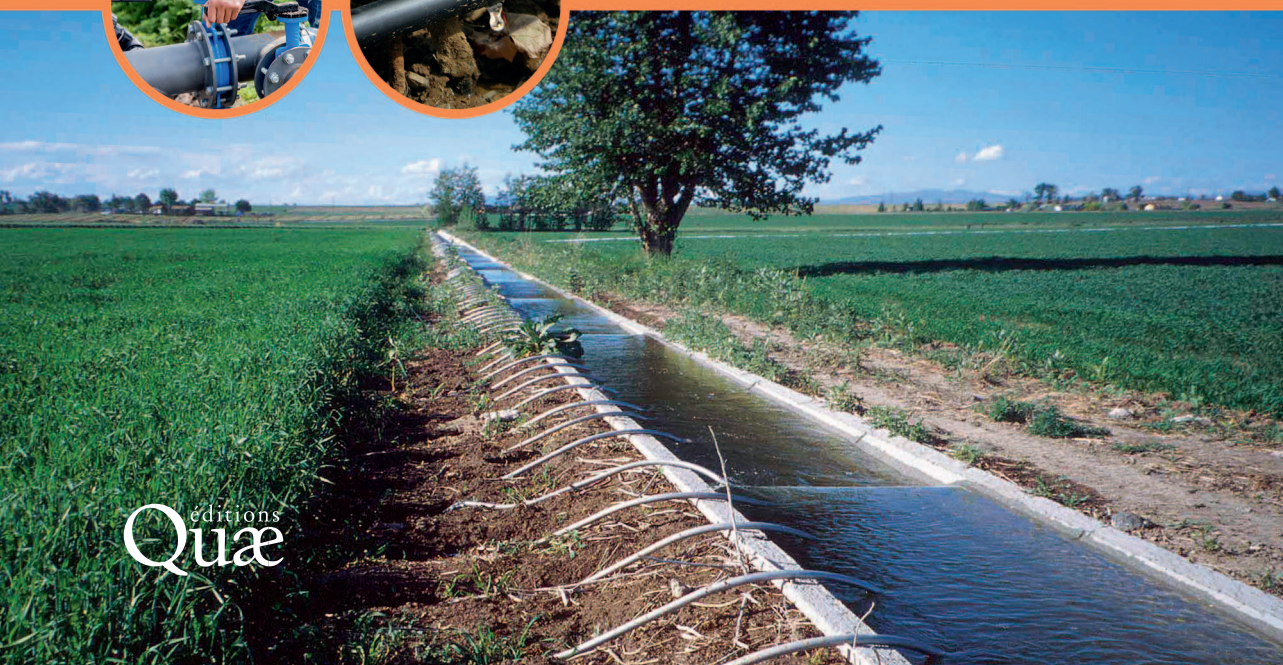




4^e édition

GUIDE PRATIQUE DE L'IRRIGATION

Claire Wittling et Pierre Ruelle
Coordinateurs



éditions
Quæ

Guide pratique de l'irrigation

Dans la collection *Matière à débattre et décider* des Éditions Quæ

*Quelles agricultures irriguées demain ?
Répondre aux enjeux de sécurité alimentaire et du développement durable*
Sami Bouarfa, François Brelle, Caroline Coulon (coord.)
2020, 212 p.

Pour citer cet ouvrage : Wittling C, Ruelle P. (coord.), 2022. *Guide pratique de l'irrigation* (4^e éd.), Versailles, Éditions Quæ, 352 p.,

DOI : 10.35690/978-2-7592-3246-8

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-BY-NC-ND 4.0.



Lien vers le complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex
www.quae.com
www.quae-open.com

ISBN papier : 978-2-7592-3245-1
ISBN (PDF) : 978-2-7592-3246-8
ISBN (ePub) : 978-2-7592-3247-5

© Éditions Quæ, 2022

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

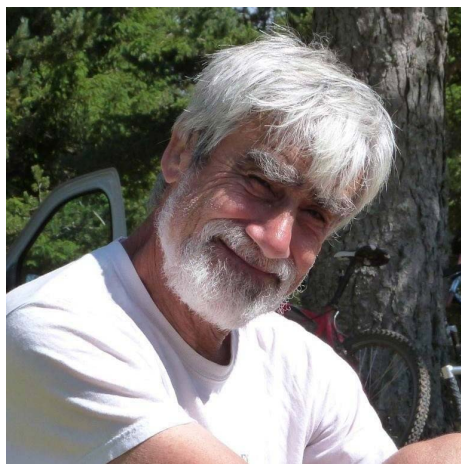
Coordonné par Claire Wittling
et Pierre Ruelle

Guide pratique de l'irrigation

4^e édition

Éditions Quæ

*Nous dédions cet ouvrage à notre collègue Jacques Granier
qui nous a quittés trop tôt... un infatigable marcheur, cycliste,
expérimentateur, modélisateur qui ne se départait jamais
de son sourire et de son humour.*



Sommaire

Préface	7
---------	---

CHAPITRE 1

GESTION STRATÉGIQUE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE ET DE L'EXPLOITATION AGRICOLE	8
---	---

Adaptation à la disponibilité de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire	8
Gestion des prélèvements d'eau à usage agricole : les organismes uniques de gestion collective	13
Projets de territoires pour la gestion de l'eau	16
Collectifs d'irrigants et gestion des réseaux collectifs	17
Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole	18
Des outils pour demain	22
Références bibliographiques	25

CHAPITRE 2

GESTION TACTIQUE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE	26
---	----

L'irrigation, un outil pour satisfaire les besoins en eau des plantes	26
L'irrigation, un outil à raisonner avec précision	36
Exemples de conduite d'irrigation en fonction des objectifs	60
Moyens de communication et de diffusion des informations	63
Fiches outils	67
Références bibliographiques	74

CHAPITRE 3

INSTALLATIONS DE POMPAGE	76
--------------------------	----

Notions d'hydraulique pour les stations de pompage	76
Caractéristiques hydrauliques des pompes	79
Configuration d'une station de pompage	85
Moteurs	98
Régulation, automatismes, supervision	100
Installation d'une station de pompage	105

CHAPITRE 4

IRRIGATION PAR ASPERSION	119
Les couvertures d'asperseurs	120
L'enrouleur	133
Le pivot (rampe pivotante)	158

CHAPITRE 5

IRRIGATION LOCALISÉE OU MICRO-IRRIGATION	192
Principes de fonctionnement	192
Les distributeurs	197
La filtration	207
L'automatisation	213
Conception et dimensionnement d'une installation	218
L'entretien du réseau	228
La fertilisation en irrigation localisée, ou fertigation	232

CHAPITRE 6

IRRIGATION GRAVITAIRE	244
Principes et notions de base	244
Les équipements d'irrigation gravitaire	249
La conduite de l'irrigation	263
La mesure des débits et l'évaluation des doses	269
Évaluation de la qualité de l'irrigation	276

CHAPITRE 7

EFFICIENCE DE L'IRRIGATION EN EAU ET EN ÉNERGIE	280
Préambule : l'efficacité en eau et en énergie	280
Comment améliorer l'efficacité en eau ?	291
Comment améliorer l'efficacité énergétique ?	318
Références bibliographiques	347
 Liste des auteurs	 350

Préface

Les effets du changement climatique, qui a trop longtemps été perçu comme une théorie scientifique, se font maintenant sentir chaque année sur le terrain au détriment de notre agriculture : grêle, sécheresse, inondations, gel. Il impose de manière encore plus impérieuse l'irrigation, qui constitue un des moyens d'atténuer ces effets, voire de les surmonter, de prendre en compte la durabilité des milieux et des ressources, tout en contribuant à l'enjeu majeur de la sécurité alimentaire. Au-delà de l'apport classique d'eau permettant d'optimiser la qualité et la quantité de la production agricole, l'apport d'eau aux surfaces cultivées peut servir d'autres besoins : elle peut par exemple permettre de sauvegarder des cultures pérennes, qui jusqu'à présent pouvaient être cultivées sans eau, d'une vague de chaleur particulièrement sévère. Elle peut aussi sauver une récolte suite à une floraison précoce suivie d'un gel. À cela s'ajoute que l'eau est maintenant considérée dans tous les pays comme une ressource précieuse qui, au-delà de l'irrigation, sert plusieurs usages, domestiques, industriels et biodiversité des milieux aquatiques. Dans tous ces usages, des efforts considérables sont faits pour éviter les excès, les gaspillages ou les pertes dans les réseaux de distribution. L'irrigation ne fait pas exception et, sous l'impulsion de la recherche, des progrès très significatifs ont été faits ces dernières années pour apporter la juste quantité à la plante.

L'AFEID est un lieu d'échanges et de débats sur l'eau agricole, l'irrigation et le drainage. Elle rassemble chercheurs, ingénieurs, experts et agriculteurs. L'association contribue au développement et à la diffusion des connaissances et des bonnes pratiques en matière de gestion de l'eau et des sols en France et à l'international et répondre ainsi aux enjeux. Il était donc important et pertinent qu'elle mette à jour son guide pratique de l'irrigation. Cette quatrième édition propose à tous les acteurs et praticiens de l'irrigation (et de la gestion de l'eau) des éléments actualisés d'analyse et d'aide à la décision sur :

- la gestion et la conduite de l'irrigation, depuis l'échelle du territoire jusqu'à la parcelle ;
- les notions de base en hydraulique et les stations de pompage ;
- les différentes techniques d'irrigation (aspersion, localisée, de surface) ;
- l'efficacité de l'irrigation en eau et en énergie.

Ce guide rassemble les connaissances de base concernant l'ensemble de ces sujets et de nombreuses informations pratiques pour les mettre en œuvre et continuer à construire des réponses pour l'avenir. Il comporte des compléments numériques, en lien avec l'ouvrage, accessibles sur un site dédié. Sous la coordination de l'AFEID, il a été élaboré en étroite collaboration entre des organismes de recherche, de développement et des instituts techniques.

Notre pari est que cet ouvrage, qui s'adresse à l'ensemble des acteurs de l'irrigation et de la gestion de l'eau, agriculteurs, conseillers de développement, ingénieurs, techniciens, constitue une référence précieuse dans la pratique de leurs missions.

Que tous ceux qui ont d'une manière ou d'une autre prêté leur concours à la présentation et à la réalisation de cet ouvrage soient chaleureusement remerciés.

Bruno Grawitz,

Société du canal de Provence, président de l'Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage (AFEID)

GESTION STRATÉGIQUE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE ET DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

François Dubocs, *Patrice Garin, Delphine Leenhardt, Sébastien Loubier,*
*Sylvie Morardet, Pierre Ruelle*¹

Adaptation à la disponibilité de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire

La disponibilité des ressources en eau est un élément clé pour l'irrigation. Elle dépend des conditions physiques rencontrées sur un territoire (qui correspond en général du point de vue hydrologique à un bassin versant ou à un groupe de bassins versants). C'est à cette échelle qu'il convient de l'appréhender. En accord avec la Directive-Cadre européenne sur l'eau et la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA) de 2006, des volumes (maximum) prélevables sont définis dans les zones à déficit hydrique structurel, ou zones de répartition des eaux (ZRE). Ces volumes incluent évidemment l'ensemble des différents usages, dont l'irrigation.

Pour répondre à un besoin sur des territoires où la situation était jugée critique, une méthodologie spécifique a été élaborée pour appréhender l'agriculture irriguée à l'échelle d'un territoire, identifier des adaptations possibles et les alternatives dans le cas de situations de déficits structurels de la ressource en eau. Mais il convient de remarquer qu'elle peut être utilisée pour aborder d'autres problématiques liées à l'irrigation.

Cette méthodologie a en particulier été mise en œuvre sous des formes différentes lors de plusieurs études en France : Drôme, Beauce, Adour-Garonne, Alpes de Haute-Provence, etc. (Bouarfa *et al.*, 2011 ; Rucheton *et al.*, 2015). Elle s'appuie sur une démarche participative et sur la modélisation.

La démarche participative

Elle est articulée autour de deux principes :

- la coconstruction avec l'ensemble des acteurs d'une représentation de l'agriculture de la zone, en préalable à la modélisation ;
- la participation des parties prenantes à la définition de scénarios d'évolution de l'agriculture et à l'analyse des résultats des simulations pour caractériser leur impact.

¹ Pour chaque chapitre, les membres du groupe de rédaction apparaissant en gras ont coordonné et rédigé les documents de base.

L'implication de l'ensemble des acteurs est indispensable pour comprendre et prendre en compte les interactions des systèmes agricoles aux différentes échelles : exploitations, territoire, filières. Il convient de remarquer que l'exploitation est un niveau clé pour les prises de décision et leur cohérence du point de vue à la fois technique et économique. Il est incontournable pour appréhender le rôle et les impacts de l'agriculture irriguée sur un territoire, mais les filières ont souvent une rétroaction importante sur les choix possibles, bien que leurs bassins de collecte dépassent habituellement le territoire d'étude.

Les modes d'intervention de la mise en place de la démarche participative sont en général de deux ordres :

- des réunions d'information ouvertes qui ont un objectif d'échanges avec l'ensemble des acteurs et la prise en compte des demandes locales pertinentes ; elles permettent aussi au cours et en fin d'études des restituer les avancées et les résultats des travaux ;
- des ateliers avec des agriculteurs volontaires et « référents » des différents systèmes de production, ainsi que des techniciens des différents organismes intervenant sur la zone d'étude et la profession agricole. Ils permettent de discuter et de valider les résultats intermédiaires, les représentations et les caractérisations des systèmes agricoles sur les différentes fractions du territoire.

Il est intéressant, lorsque cela est possible (compte tenu du temps nécessaire et donc des coûts de telles simulations), de considérer plusieurs campagnes agricoles (avec des situations climatiques représentatives) pour les différentes exploitations types. Cela permet de caractériser les pratiques des agriculteurs, leurs marges de manœuvre et les adaptations en fonction de différents contextes et contraintes, les arbitrages entre cultures (notamment en cas de restrictions de volumes prélevables). Les contraintes et les alternatives possibles sont ainsi mieux prises en compte. L'identification des points de blocage conduit à identifier les améliorations et aménagements nécessaires pour les dépasser et leurs coûts.

La situation de référence : exploitations types et agriculture du territoire

Il s'agit dans une première étape de construire une représentation de l'agriculture du territoire (en tenant compte de la délimitation des bassins versants et sous-bassins éventuels) et de disposer ainsi d'informations pour modéliser un état de référence à l'échelle du territoire partagé avec les acteurs. Cette phase requiert l'accès aux bases de données existantes et la réalisation de séries d'entretiens avec des agriculteurs représentatifs des différents systèmes de production et des opérateurs des filières agricoles. Il est ainsi nécessaire de mobiliser, en tenant compte de la délimitation des bassins versants et sous-bassins versants éventuels :

- les données statistiques du Recensement agricole (RA) et du Registre parcellaire graphique du territoire (RPG), lorsqu'ils existent ;
- des données statistiques nationales (indices des prix, charges de structure) ;
- des données technico-économiques issues d'enquêtes auprès d'exploitations représentatives, de références auprès d'organisations professionnelles agricoles (référentiel technico-économique, données pédologiques) ;
- des séries de données climatiques des stations météorologiques couvrant le gradient éventuel de la zone ;
- des données statistiques sur les valeurs ajoutées des filières et les informations issues d'entretiens d'opérateurs des filières agro-industrielles ;

- des données de prélèvement d'eau pour l'irrigation (Direction départementale des territoires et organes gestionnaires de réseaux collectifs)² ;
- des données sur les pratiques d'irrigation et le matériel utilisé en lien avec les cultures concernées.

Les analyses statistiques des données du RA et du RPG³ permettent de construire une typologie des exploitations irriguées. Il est indispensable de disposer d'une évaluation fiable des prélèvements en eau agricole, sur au moins une année récente, pour valider la modélisation des exploitations irriguées. Une typologie des exploitations non irriguées peut aussi être utile pour appréhender l'impact de l'irrigation, l'importance relative des productions irriguées pour les filières et les alternatives possibles en cas de réductions des volumes prélevables. Les exploitations types, leurs caractéristiques et leurs effectifs sont validés lors des ateliers et auprès d'experts locaux, parallèlement à leur confrontation aux données statistiques des différentes bases de données.

L'analyse des filières requiert en parallèle l'évaluation des flux de matières premières et de produits élaborés traités issus du territoire en volume et en valeur. Cela permet d'accéder au poids économique de chaque filière et de la valeur ajoutée. Ces informations sont utiles pour caractériser les filières et leur pérennité.

Le modèle agrégé de l'agriculture irriguée

Il est nécessaire de disposer d'une représentation dynamique du territoire pour prendre en compte l'effet des variations interannuelles du climat (qui ont un effet majeur sur l'irrigation) et évaluer les impacts de différents scénarios de disponibilité en eau et des adaptations des exploitations. Pour cela, il faut modéliser à la fois la demande en eau des cultures et leur rendement sur les exploitations types et leur fonctionnement technico-économique.

Pour aborder le premier point, il est fait appel à un modèle de culture⁴ simulant les pratiques réelles des agriculteurs. Ce modèle fournit des résultats sur les rendements et les consommations en eau d'irrigation selon le type de sol, le climat et la conduite de l'irrigation de l'exploitation type concernée. Les pratiques d'irrigation sont ainsi prises en compte en fonction des objectifs de rendement (en lien avec les variétés, dates de semis, types de sols, etc.) et du niveau d'équipement qui peut impacter les apports sur une partie de la sole irriguée ou d'autres aspects comme l'efficacité due au vent par exemple. Ces points sont souvent importants pour le maïs.

Un simulateur de fonctionnement technico-économique⁵, basé sur l'agrégation des intrants consommés et des produits de l'ensemble des cultures d'un assolement, est ensuite mobilisé pour les différentes exploitations types. Il s'appuie sur les itinéraires identifiés lors des enquêtes précédentes, en intégrant les charges de structures et les primes. Des scénarios de prix peuvent aussi être pris en compte.

Il fournit des indicateurs à l'échelle des exploitations types et des valeurs agrégées au niveau du territoire (en tenant compte des effectifs de chaque type), pour ce qui concerne l'excédent brut d'exploitation (EBE), le volume d'eau d'irrigation consommé ainsi que le produit brut et la valeur ajoutée pour les filières.

2 Il arrive que des études « Volumes prélevables » issues de différents bureaux d'études ne précisent pas les différentes ressources en eau impactées par les réductions envisagées, en particulier lorsque les ressources sont à la fois souterraines et de surface. Assez fréquemment, les ressources en eau sont issues de différentes rivières ou fleuves ou même, pour partie, de transferts d'un bassin versant voisin, et il est primordial d'en tenir compte.

3 Le RPG fournit des informations clés traitées de manière statistique et anonymes (mais sa pérennité n'est pas assurée).

4 Le modèle Pilote (Mailhol *et al.*, 2011 ; 2018) utilisé avec une interface permettant de fournir des résultats à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire pour les différentes cultures a été repris par le logiciel Optirrig (voir fiche chapitre 2, p. 70).

5 De tels simulateurs sont dérivés du logiciel Olympe (Attonaty *et al.*, 2005 ; Penot et Dehevels, 2007).

On notera que d'autres modèles de programmation mathématique intégrant les risques climatiques et économiques peuvent aussi être utilisés. Ils se fondent alors sur une combinaison optimale des activités pour chaque exploitation type dans un contexte donné, et non pas sur les pratiques des agriculteurs.

Classiquement, les indicateurs sont comparés pour différentes situations de disponibilité en eau : une situation de référence S0 sans réduction et une situation S1 avec un volume réduit d'eau alloué (le plus souvent en été de juin à septembre). Ces deux situations sont modélisées dans deux situations climatiques types (année moyenne et année sèche, définies à partir d'une série climatique) et avec des hypothèses de prix. Habituellement, des arbitrages de l'allocation de l'eau disponible entre cultures (stratégies de court terme) validées en atelier sont intégrés aux simulations, mais les modifications des systèmes de production (stratégies de moyen terme) sont plus difficiles à aborder.

La mise en œuvre d'une telle méthodologie permet de caractériser les marges de manœuvre éventuelles sur le territoire après une validation de la situation actuelle de référence S0 avec les acteurs, et de caractériser l'impact d'une réduction du volume prélevable. Les simulations peuvent préciser les alternatives lorsqu'elles existent et contribuer à évaluer l'intérêt de mesures pour accompagner les adaptations des différents types d'exploitations irrigantes.

Du fait que la méthode repose sur une caractérisation précise de l'agriculture du territoire et sur une évaluation technico-économique, elle conduit à appréhender clairement les effets des réductions de l'accès à l'eau et donc les conditions de l'adaptation à la ressource en eau, en mettant en évidence la vulnérabilité de certaines activités et exploitations agricoles.

L'estimation de la valorisation de l'eau par l'agriculture rend possibles des comparaisons avec d'autres activités économiques (tourisme par exemple) en tenant compte du coût des aménagements ainsi que des investissements éventuels (retenues collinaires, transferts d'eau entre bassins ou équipements spécifiques pour le développement des activités du territoire). Enfin, l'appropriation des résultats par les acteurs locaux est réelle du fait de l'approche participative mise en œuvre.

Exemple du cas de la Drôme des collines

Sur ce territoire au nord de Valence, 8 types d'exploitations ont été identifiés, avec les effectifs correspondants et leurs caractéristiques, en distinguant les exploitations qui sont concernées par les restrictions d'accès à l'eau et les volumes correspondants.

La figure 1.1 présente, pour chaque exploitation type, la surface irriguée (SI), avec les cultures correspondantes (en distinguant le maïs des autres céréales et oléoprotéagineux, COP) ainsi que les cultures en sec et le volume d'eau d'irrigation utilisé en année moyenne (sur la période 2000-2012) en l'absence de restriction. Le tableau précise les effectifs des différents types d'exploitations, la main-d'œuvre moyenne (unité de travailleur humain, UTH, ou équivalent temps plein, ETP) et le cheptel moyen (selon les cas ; bovins, caprins ou volailles).

En cas de diminution des allocations d'eau à l'agriculture de 40 % (situation envisagée par l'étude hydrologique), des simulations des adaptations jugées nécessaires à court terme par les agriculteurs (réduction des surfaces irriguées avec maintien des apports) ont été réalisées. Comme le montre la figure 1.2, elles font apparaître une réduction de l'EBE sur le territoire de 13 % en année moyenne, mais de 41 % en année sèche, liées à la réduction du volume d'eau prélevé.

Ces évaluations permettent d'appréhender les impacts et d'orienter les investissements éventuels à réaliser ainsi que des comparaisons avec d'autres activités économiques du territoire.

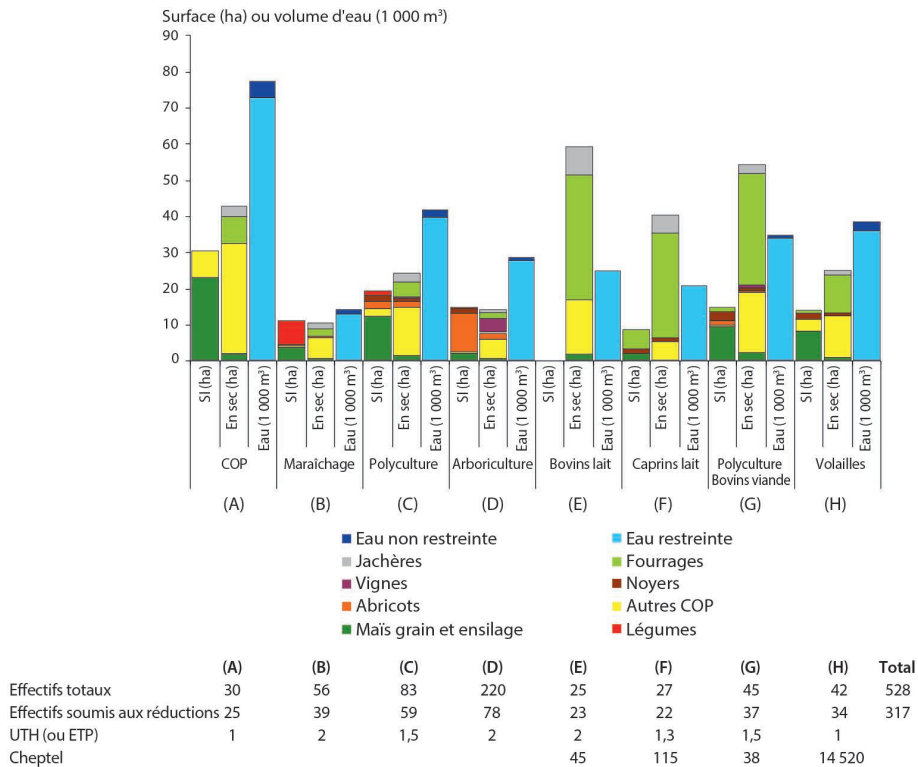


Figure 1.1. Assolement et volumes prélevés pour les exploitations types irriguées pour une année climatique moyenne (2010) en Drôme des collines (Rucheton et al., 2015).

SI : surface irriguée ; COP : céréales et oléoprotéagineux ; UTH : unité de travailleur humain ; ETP : équivalent temps plein (attention, cette signification du symbole ETP est celle utilisée dans une approche économique. Par contre, ETP est aussi utilisé dans les approches agroclimatiques avec une signification différente ; voir chapitre 2).

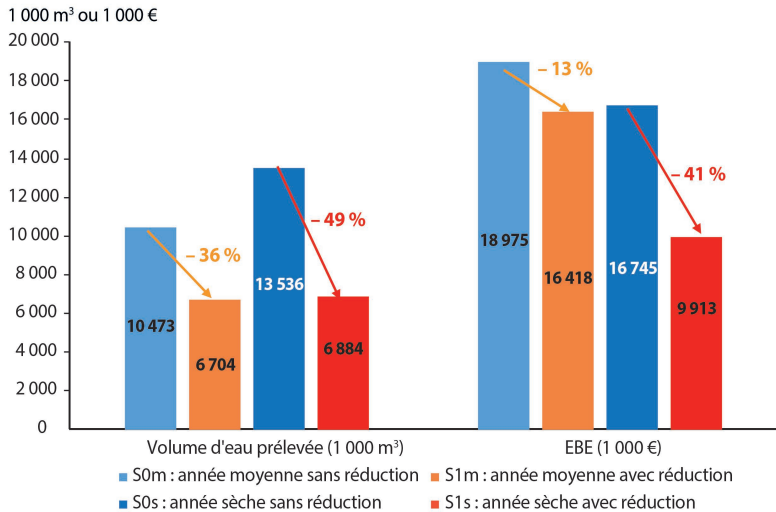


Figure 1.2. Structuration de la consommation en eau et impact sur l'EBE pour le territoire soumis à réduction des prélèvements.

Gestion des prélèvements d'eau à usage agricole : les organismes uniques de gestion collective

Le contexte national et les objectifs généraux de gestion de l'eau

Les prélèvements d'eau pour l'ensemble de l'activité agricole en France sont de l'ordre de 5 milliards de m³/an. La consommation nette de l'agriculture après restitution au milieu avoisine 60 % des prélèvements totaux, soit environ 3 milliards de m³/an (OCDE, 2010).

Rapportée à la ressource totale disponible en France, qui est en moyenne de 175 milliards de m³/an, la consommation d'eau pour l'irrigation peut sembler modérée (Prud'Homme et Tuffnell, 2020). Toutefois, elle est concentrée sur trois mois qui coïncident généralement avec les périodes d'étiage des cours d'eau et, sauf cas exceptionnel telle la plaine de la Crau, cette eau n'est pas restituée au milieu naturel comme c'est le cas pour la majeure partie des prélèvements pour l'eau potable, ceux pour l'énergie ou l'industrie. En outre, la situation géographique est contrastée : l'irrigation en métropole est essentiellement localisée dans le centre et dans le sud, et les tensions sont particulièrement fortes dans le quart sud-ouest qui est dépourvu de ressource souterraine à grande inertie ou de ressources estivales abondantes.

Ainsi, depuis les années 2000, une trentaine de départements prennent systématiquement chaque année des arrêtés de restriction des usages de l'eau.

L'ensemble de ces éléments justifie l'attention particulière portée par les pouvoirs publics à la gestion des prélèvements d'eau, notamment agricoles, et montre qu'il n'est plus envisageable de continuer de gérer les aspects quantitatifs en utilisant les modalités de gestion de crise normalement réservées aux épisodes climatiques exceptionnels.

Tout comme les autres prélèvements en eau, les prélèvements agricoles doivent respecter un principe fondamental : la compatibilité avec l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en eau, inscrit dans le Code de l'environnement (article L. 211-1) et décliné dans chacun des six grands districts hydrographiques par les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) révisés en 2016.

Au terme de la Directive-Cadre sur l'eau (DCE) de 2000, le bon état des masses d'eau souterraines nécessite explicitement le bon état qualitatif et quantitatif, les deux aspects étant liés. S'agissant des masses d'eau superficielles, la DCE impose le bon état écologique et le bon état chimique. Ces derniers nécessitent l'existence d'un débit suffisant destiné à la préservation de la biodiversité des rivières. Aussi les Sdage fixent, en un réseau de points stratégiques, des niveaux (pour les nappes) ou des débits objectifs d'étiage (DOE) dont le respect doit être assuré huit années sur dix.

D'une façon générale, l'objectif retenu est celui d'une atteinte du bon état des masses d'eau à échéance 2021, voire 2027.

Les outils réglementaires institués par le Code de l'environnement

Le Code de l'environnement pose le principe selon lequel l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation (article L. 210-1) et confère à l'État la mission d'encadrer les activités de prélèvements. Cette mission est exercée par les préfets de département.

Le Code de l'environnement prévoit également la possibilité, pour le préfet coordonnateur de bassin, de classer les bassins présentant une insuffisance des ressources par rapport aux besoins, autres qu'exceptionnels, en « zones de répartition des eaux » (ZRE).

En 2008, une réforme visant à résorber les déficits quantitatifs en matière de prélèvements d'eau a été introduite. Dans tous les bassins en déficit quantitatif, il a été demandé aux préfets de déterminer le volume prélevable, tous usages confondus, garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants et donc le respect huit années sur dix des DOE, et de réviser les autorisations de prélèvements pour que le volume total autorisé soit au plus égal au volume prélevable.

Pour les bassins où les déficits sont particulièrement liés aux prélèvements agricoles, la loi sur l'eau du 30 décembre 2006 a également introduit dans le Code de l'environnement (article L. 211-3-6°) une disposition permettant de créer des organismes uniques pour la gestion collective des prélèvements d'irrigation (OUGC).

Qu'est-ce qu'un OUGC ?

Un OUGC est une structure qui a en charge la gestion et la répartition des volumes d'eau prélevés à usage agricole sur un territoire. Cet organisme sera le détenteur de l'autorisation globale de prélèvements pour le compte de l'ensemble des irrigants du périmètre de gestion, et ce, quelle que soit la ressource prélevée (eau de surface, nappe, réserves, barrages). De ce fait, les demandes d'autorisation individuelles ne pourront plus se faire.

Le volume prélevable pour l'irrigation est alloué par le préfet à l'organisme unique auquel il revient d'établir chaque année la répartition de ce volume entre l'ensemble des irrigants.

Quand mettre en place un OUGC ?

Les OUGC sont mis en place dans les bassins où le déficit en eau est surtout lié à l'activité agricole. Leur mise en place est fortement recommandée au niveau des zones de répartition des eaux (ZRE), territoires qui présentent une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins (article R. 211-71 du Code de l'environnement). Elles sont classées comme telles afin de « faciliter la conciliation des intérêts des différents utilisateurs de l'eau dans les zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins ». En ZRE, en cas d'absence de demande collective, l'État peut désigner ou créer un organisme unique sur un périmètre qu'il aura désigné.

Objectifs de la mise en place d'un OUGC

Les OUGC ont pour but la mise en place d'une gestion collective et durable du volume prélevable alloué à la profession agricole (circulaire du 3 août 2010 définissant le volume prélevable). En effet, avant la mise en place d'un OUGC, les autorisations de prélèvement des irrigants étaient individuelles. L'objectif de ce mode de gestion est d'aller progressivement vers l'abandon des autorisations de prélèvement individuelles au profit d'une autorisation unique de prélèvement (AUP) détenue par l'OUGC et qui concerne l'ensemble des prélèvements d'irrigation. Ce dispositif doit permettre de bâtir une gestion collective structurée conduisant à une meilleure répartition qu'actuellement entre irrigants d'une ressource disponible mais limitée. L'objectif est de garantir le bon fonctionnement des milieux aquatiques.

Quels sont les critères de désignation d'un OUGC ?

Peuvent être désignés comme OUGC :

- les regroupements d'exploitants irrigants ;
- les chambres d'agriculture et les établissements inter-chambre d'agriculture ;
- les collectivités territoriales et les organismes de droits privés.

Les demandes se font auprès du préfet du département qui recueille l'avis du conseil général, de la chambre d'agriculture et de l'agence de l'eau avant d'arrêter un périmètre de gestion et d'y désigner l'organisme.

D'après la circulaire de 2008, l'organisme désigné doit remplir un certain nombre de critères. En effet, la structure juridique porteuse de ces missions doit être une personne morale ayant une « légitimité interne », autrement dit une structure ayant une capacité juridique à agir comme une organisation unique pour rassembler les irrigants du territoire concerné, recueillir et traiter leurs besoins en eau. Elle doit aussi faire preuve d'une « légitimité externe », c'est-à-dire qu'elle doit pouvoir prouver la reconnaissance par les partenaires institutionnels qui agissent sur le même territoire comme acteurs légitimes. De plus, la délimitation des périmètres des OUGC doit être basée sur une cohérence hydrographique et/ou hydrogéologique et non sur des limites administratives.

En juillet 2014, à l'échelle nationale, deux tiers des structures juridiques porteuses de ces missions étaient des chambres d'agriculture. Le tiers restant correspond à des associations loi 1901, des coopératives, des établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) ou des collectivités territoriales.

Fonctionnement de l'OUGC

Une fois désigné, l'OUGC élabore un dossier de demande d'autorisation de prélèvement pluriannuel (minimum 3 ans, maximum 15 ans) et unique pour l'ensemble du périmètre. Celui-ci comporte une étude d'incidence ou une étude d'impact pour mesurer l'impact sur l'eau et les milieux aquatiques des prélèvements envisagés et le premier plan annuel de répartition du volume prélevable entre les irrigants. Une fois l'autorisation obtenue et le volume total prélevable attribué, l'OUGC met en place son propre règlement.

Une fois toutes ces démarches effectuées, la campagne annuelle peut commencer. Elle se déroule en six étapes clés :

- les irrigants transmettent à l'OUGC leurs besoins en eau ;
- en fonction de ces besoins, l'OUGC élabore un plan de répartition du volume prélevable entre les irrigants ;
- ce plan est soumis à la préfecture ;
- la préfecture délibère et décide ou non de le valider ;
- la préfecture distribue des notifications individuelles du volume attribué à chacun des irrigants ;
- en fin de campagne, l'OUGC établit un bilan de la situation annuelle qu'il transmet à la préfecture.

Les OUGC gèrent donc une autorisation volumétrique pluriannuelle destinée aux prélèvements agricoles de son périmètre (volumes sous-sectorisés par masses d'eau) et sont chargés annuellement de l'allocation des volumes aux irrigants.

Quels changements pour les préleveurs irrigants ?

La mise en place des autorisations uniques de prélèvement *via* les OUGC entraîne des modifications pour les irrigants :

- il n'est plus possible d'accéder à l'autorisation de prélèvement sans faire appel à l'OUGC du bassin concerné ;
- seuls les prélèvements réguliers et déclarés auprès de l'OUGC peuvent bénéficier d'une allocation de volume pour l'irrigation ;
- à l'issue d'une période de transition, les volumes prélevés doivent converger avec les volumes prélevables garantissant le bon fonctionnement des milieux, ce qui se traduit par une baisse des prélèvements ;
- théoriquement, les bassins en OUGC ne devraient pas se retrouver en situation de crise plus de deux années sur dix.

Parallèlement à la mise en place des OUGC, il est donc important, dans les zones en déficit quantitatif où les volumes actuellement prélevés sont bien supérieurs aux volumes prélevables, de mettre en place des actions permettant de réduire la pression sur la ressource : modernisation/restructuration des réseaux d'irrigation pour améliorer l'efficacité de l'eau, adaptation des assolements, création de retenues de substitution.

À plus long terme, le principal défi à relever sera de faire converger une offre en eau en diminution lors de l'étiage (dont la durée a tendance à s'allonger) avec une demande qui par endroits n'est pas satisfaite et va encore augmenter du fait du changement climatique.

Toutes les informations et procédures concernant les demandes de prélèvements peuvent être obtenues en contactant la chambre d'agriculture de chaque département et la Direction départementale des territoires (service Eau).

Il est cependant nécessaire de noter, ainsi que le souligne un rapport se fondant sur l'étude de 15 OUGC (Cinotti *et al.*, 2020), qu'il existe des conditions très différentes selon les bassins fluviaux. Ainsi, dans le cas de Rhône-Méditerranée-Corse, la pratique de l'irrigation est ancienne et des aménagements hydrauliques importants existent, contrairement à l'Adour-Garonne, dont des retenues sont encore à l'état de projet. L'importance de l'irrigation est aussi évidemment un facteur clé : faible en Seine-Normandie mais plus marquée en Loire-Bretagne, avec des prélèvements réglementés dans la nappe de Beauce. Il en est résulté des difficultés plus ou moins grandes pour la mise en place et le fonctionnement des OUGC. Des recommandations sont faites pour faire évoluer les OUGC, en particulier pour mieux prendre en compte l'ensemble des usages de l'eau. Des structures dédiées spécifiquement à ce dernier point (et avec lesquelles sont appelées à interagir les OUGC), les projets territoriaux de gestion de l'eau, sont présentées dans la section suivante.

Projets de territoires pour la gestion de l'eau

Élaborer un projet de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) est une des propositions de l'État en réponse aux oppositions croissantes et parfois très virulentes d'une frange de la population à la construction d'ouvrages de stockage ou de transfert d'eau pour l'irrigation. L'instruction du gouvernement du 4 juin 2015 (NOR : DEVL1508139J) en définit le concept. Suite au rapport de mission du préfet P.-E. Bisch (rapport CGEDD n° 011865-01 de mai 2018) sur les difficultés de leur émergence, l'instruction du gouvernement du 7 juin 2019 (NOR : TREL1904750J) précise certaines modalités et

leviers à mobiliser. Elle définit ainsi un PTGE comme « une démarche reposant sur une approche globale et coconstruite de la ressource en eau sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique. Il aboutit à un engagement de l'ensemble des usagers d'un territoire (eau potable, agriculture, industries, navigation, énergie, pêches, usages récréatifs, etc.) permettant d'atteindre, dans la durée, un équilibre entre besoins et ressources disponibles en respectant la bonne fonctionnalité des écosystèmes aquatiques, en anticipant le changement climatique et en s'y adaptant. Il s'agit de mobiliser à l'échelle du territoire des solutions privilégiant les synergies entre les bénéfices socio-économiques et les externalités positives environnementales, dans une perspective de développement durable du territoire. Le PTGE doit intégrer l'enjeu de préservation de la qualité des eaux (réductions des pollutions diffuses et ponctuelles) ».

Il est recommandé un portage par le président de la Commission locale de l'eau (CLE), d'un Établissement public territorial de bassin (EPTB) ou d'un Établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau (Épage) lorsqu'ils existent sur le territoire, afin d'asseoir la légitimité du projet. Il est proposé aussi d'avoir recours à un garant indépendant pour s'assurer du respect des principes de coconstruction entre toutes les parties prenantes à chaque phase. Le projet comporte un diagnostic territorial, puis un programme d'actions favorisant d'abord les économies d'eau pour atteindre dans la durée un équilibre entre besoins et ressources ainsi que la réduction des risques de pollutions, et si besoin un projet de stockage ou de transfert d'eau. Le préfet coordinateur a la responsabilité de valider ce diagnostic et de se prononcer sur le programme d'actions et les volumes associés. Cependant, cette approbation préfectorale du PTGE ne vaut pas autorisation réglementaire de chacune de ces actions ni assurance de leur financement.

Les options envisagées dans le PTGE doivent faire l'objet d'analyses économiques et financières systématiques, pour lequel un guide pratique a été édité en 2019.

Un complément numérique en présentera les principaux éléments et des exemples de mises en œuvre de ce guide d'analyses économiques et financières.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Collectifs d'irrigants et gestion des réseaux collectifs

L'irrigation en France se fait très majoritairement à partir d'accès individuels à la ressource. L'irrigation individuelle s'est développée à partir des années 1960 lorsque l'accès au progrès technologique fut plus aisé. Avant cette période, c'est au travers du développement de réseaux collectifs d'irrigation, de réseaux de canaux, que s'est développée l'irrigation. À partir de 1865, les gestionnaires de ces réseaux collectifs ont progressivement pris la forme d'associations syndicales autorisées (ASA). Ces ASA ont la particularité d'être des établissements publics gérés par les propriétaires fonciers, l'État se contentant de veiller à la légalité des actes et à la sécurité des ouvrages. L'autre période de développement important de l'irrigation collective commence dans les années 1960 avec d'abord la création de sociétés d'aménagement régional (SAR) puis, dès la fin des années 1970, la création d'ASA d'irrigation sous pression. Même s'il est difficile d'estimer leur importance relative, les ASA gravitaires anciennes et celles sous pression, plus récentes, représenteraient la moitié de l'irrigation réalisée à partir de réseaux collectifs, les SAR de l'ordre de 20 % et le reste regroupant un ensemble hétéroclite de structures (CUMA, réseaux communaux, syndicats intercommunaux, associations loi 1901, etc.).

Un complément numérique explique comment sont gérés ces réseaux collectifs, quelles sont les règles de partage de la ressource en eau, de partage des dépenses (la tarification), la manière dont les décisions sont prises, les enjeux liés à l'entretien du réseau, leur insertion dans la politique globale de gestion de l'eau et les nouveaux défis qui sont les leurs.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole

La décision d'irriguer ne dépend pas uniquement des paramètres agronomiques au niveau des cultures. Les choix stratégiques, faits au niveau de l'exploitation agricole avant la campagne, sont souvent déterminants. La gestion de l'irrigation doit intégrer l'ensemble des moyens disponibles et des contraintes de l'exploitation. Une analyse de la démarche à mettre en œuvre à cette échelle est donc nécessaire. Elle conduit à recenser et à préciser la place des différents outils de maîtrise de l'irrigation.

Contexte

Bien que des situations intermédiaires existent, on distingue classiquement deux grands types de systèmes de production en fonction des charges et de la place de l'irrigation pour les cultures concernées. Selon ces grands types de système de production, une démarche très différente est mise en œuvre.

Systèmes de grandes cultures	Systèmes de cultures à produit brut élevé
<ul style="list-style-type: none"> – Les charges d'irrigation représentent 15 à 30 % du produit brut. – En général, systèmes d'irrigation par aspersion. 	<ul style="list-style-type: none"> – Les charges d'irrigation représentent moins de 15 % du produit brut. – Tous systèmes d'irrigation, en particulier micro-irrigation et irrigation localisée.

Objectif

L'objectif général de production est économique (sécurisation des rendements, implantation de cultures à fortes valeurs ajoutées), en tenant compte de la nécessaire préservation du milieu naturel.

Systèmes de grandes cultures	Systèmes de cultures à produit brut élevé
<ul style="list-style-type: none"> – Maximiser la marge nette de l'assolement sur le moyen terme, en intégrant les variations climatiques interannuelles. 	<ul style="list-style-type: none"> – Maximiser le produit brut annuel.
<ul style="list-style-type: none"> → Nécessité de définir (avant la campagne) une stratégie qui consiste à harmoniser les moyens pour atteindre les objectifs. → Des choix tactiques (pendant la campagne) ajusteront la stratégie aux aléas annuels. 	<ul style="list-style-type: none"> → Prédominance de règles tactiques (pilotage des irrigations) = moyens employés pour obtenir le résultat voulu.

Démarche

Analyse des contraintes

Systèmes de grandes cultures	Systèmes de cultures à produit brut élevé
Climat	
<ul style="list-style-type: none"> – Calculer le déficit hydrique annuel et périodique en termes de probabilité, compte tenu de la réserve en eau du sol. – Calculer les besoins en eau d'irrigation pour obtenir le rendement potentiel. 	<ul style="list-style-type: none"> – Calculer le déficit hydrique correspondant à une année sèche, compte tenu de la réserve en eau du sol.
Ressource en eau d'irrigation	
<ul style="list-style-type: none"> – Définir sa fiabilité et ses caractéristiques (volume, débit). 	<ul style="list-style-type: none"> – Garantir un niveau de ressource permettant de faire face aux sécheresses exceptionnelles.
Moyens d'arrosage	
<ul style="list-style-type: none"> – Préciser les conditions de leur mise en œuvre : contraintes topographiques de la surface irriguée, organisation du travail, et la conformité de leurs performances selon les besoins périodiques (contrôle du fonctionnement de l'installation). 	<ul style="list-style-type: none"> – Garantir un taux d'équipement permettant de couvrir les besoins de pointe et prévoir les automatismes assurant la performance et l'économie de main-d'œuvre.
Potentiel agronomique	
<ul style="list-style-type: none"> – Préciser les conditions de leur mise en œuvre : organisation du travail, et la conformité de leurs performances selon les besoins périodiques (contrôle du fonctionnement de l'installation). 	<ul style="list-style-type: none"> – Garantir les performances des autres facteurs de production que l'eau. – Connaître le mode d'action des différents facteurs sur la qualité des produits.
Économie	
<ul style="list-style-type: none"> – Évaluer les différents éléments constitutifs du produit et du coût des cultures irriguées et des cultures « en sec » qu'elles remplacent : prix, aides compensatoires (surface irriguée éligible), charges proportionnelles, charges de structure liées à l'irrigation. 	<ul style="list-style-type: none"> – Réaliser une analyse de gestion : prix et, selon la qualité, charges, etc., et une analyse des marchés.

Décisions

Systèmes de grandes cultures	Systèmes de cultures à produit brut élevé
Stratégies prédominantes (optimisation)	
<ul style="list-style-type: none"> – Choisir l'assolement : espèces irriguées et surface irriguée. – Affecter des volumes et débits à chacune des cultures. Fixer le niveau de risque acceptable, par rapport à une probabilité de déficit hydrique. – Calendrier prévisionnel d'irrigation intégrant les besoins en eau des cultures, la gestion du matériel et de la main-d'œuvre. 	
Tactiques (pilotage de l'irrigation)	
<ul style="list-style-type: none"> – Mise en œuvre de la stratégie. – Adaptation de la stratégie en fonction des événements climatiques et culturaux de l'année. <p>Attention : les hypothèses retenues pour élaborer les stratégies doivent être validées grâce à des outils. En ce sens, des observations annuelles peuvent modifier les stratégies (processus d'apprentissage continu).</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Ajustement du couple dose/fréquence ; automatisation des contrôles. <p>Attention : ne pas confondre besoin en eau de la culture et besoin en eau d'irrigation (éviter la sur-irrigation).</p>

Tableau 1.1. Les outils de conduite de l'irrigation.

Nature des outils	Description des outils ¹	Adaptation aux systèmes ²	
		GC ³	HPB ⁴
Analyse des contraintes			
Contexte régional et accès à la ressource en eau	Voir chapitre 1, p. 8-12	x	x
Étude fréquentielle climatique		x	x
Connaissance des sols de l'exploitation		x	x
Étude fréquentielle hydraulique		x	x
Calcul d'équipements		x	x
Et au niveau de la parcelle :			
dose réelle apportée		x	x
uniformité d'arrosage		x	x
Étude économiques		x	x
Aide à la prise de décisions			
Stratégiques (avant la campagne d'irrigation) : optimisation, simulation	Voir chapitre 1, p. 21-22	x	
Prévision d'assolement			
Gestion prévisionnelle des moyens d'arrosage et des tours d'eau		x	
Tactiques (pendant la campagne d'irrigation) : conduite d'irrigation et ajustement de la stratégie			
Mesure de l'état hydrique du sol :	Voir chapitre 2, p. 39-48	x	x
Humidimétrie neutronique			
Sondes capacitives		□	□
Sondes réflectométriques		□	□
Gravimétrie		□	□
Tensiométrie		x	x
Mesure sur les végétaux :	Voir chapitre 2, p. 48-57		
Approche visuelle			□
Potentiel hydrique foliaire			□
Conductance stomatique			□
Variation de diamètre d'organe			□
Flux de sève			□
Mesures atmosphériques		Voir chapitre 2, p. 57	□
Approches spatialisées	Voir chapitre 2, p. 58-60	□	
Services : avertissements irrigation	Voir chapitre 2, p. 63-65	x	x
Fiches outils logiciels	Voir chapitre 2, p. 67-73	x	x

¹ Des fiches descriptives présentent les outils aux pages mentionnées dans cette colonne.² X : important ; □ : utilisation plus restreinte.³ Grandes cultures.⁴ Cultures à haut produit brut.

Outils de conduite de l'irrigation intégrant les contraintes de l'exploitation agricole

Les fiches descriptives suivantes ont été établies par les concepteurs de l'outil, des compléments et mises à jour sont accessibles dans les annexes numériques.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Asalée®	
Concepteurs	Arvalis-Institut du végétal
Distributeur	Outil diffusé par Arvalis via des organismes de développement (plateforme web)
Contact	Alice Valles. Arvalis-Institut du végétal, Station Inter-Instituts, 6 chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège. Tél. : 05 62 71 79 39 E-mail : a.valles@arvalis.fr
Objectif	Asalée est un outil d'aide au choix d'assolement. Il permet de comparer différentes stratégies d'assolement en termes de résultat économique, de qualification du risque et de consommation en eau. Pour qualifier ces risques, il prend en compte l'incertitude climatique, économique (prix) et d'accès à l'eau. Les stratégies d'assolement sont construites par les utilisateurs.
Public visé	Organismes de conseil ; agriculteurs, irrigants en priorité.
Cultures concernées	Toutes grandes cultures (céréales à paille, maïs, sorgho, oléoprotéagineux) et quelques cultures spéciales (semences maïs, semences betterave).
Données nécessaires	Type de ressource en eau d'irrigation, volume et débit disponible sur une exploitation, types de matériels d'irrigation. Scénario d'assolement, liste de cultures candidates avec leur date de semis et leurs stratégies de conduite d'irrigation. Des aides au référencement météorologique, pédologique, de rendement potentiel et de prix des productions, des charges en intrants, mécanisation, main-d'œuvre et autres charges d'exploitation sont intégrées à l'outil.
Informations fournies par le produit	Marge nette et variabilité à l'échelle de l'exploitation, d'un îlot de culture et d'une culture, variabilité de rendement d'une culture. Fréquence d'atteinte d'un objectif de revenu. Consommation en eau d'irrigation et variabilité pour les mêmes échelles de travail. Temps de travail lié à l'irrigation et hors irrigation.
Support de diffusion et description du service	Asalée est accessible en ligne. Asalée est utilisé par des conseillers en relation directe avec des groupes d'agriculteurs pour étudier différentes stratégies d'adaptation à différents types de contraintes portant sur la ressource en eau ou sur le contexte économique. L'outil peut également être utilisé à l'échelle de l'exploitation comme élément de diagnostic. Les sorties de l'outil seront alors directement consultables par les agriculteurs.
Principes de fonctionnement	Asalée s'appuie sur le moteur de calcul du bilan hydrique Irré-LIS® pour évaluer les besoins en eau d'irrigation et la consommation en eau réelle des cultures. Ce bilan est fonction des types de sol sélectionnés, caractérisés par un réservoir utile et facilement utilisable, et de scénarios climatiques et d'alimentation hydrique (volume, débit, conduite de l'irrigation). Des fonctions de réponse à l'eau permettent ensuite de calculer pour chacune des cultures les pertes de rendement selon le niveau d'alimentation hydrique. Les marges nettes de chacune des cultures sont calculées pour chacun des scénarios de prix (jusqu'à 500), de climat (jusqu'à 20), de stratégie d'irrigation et de charges. La variabilité observée est mise en relation avec un objectif de revenu fixé par l'utilisateur.
Avantages	Pas d'optimisation pour éviter d'obtenir des « solutions » parfois irréalistes, prise en charge de scénarios propres aux agriculteurs. Analyse du risque de chacun des scénarios d'assolement. Lien avec de nombreuses bases de données et références Arvalis (sol, variétés, climat, etc.), interface graphique disponible en ligne avec facilité de saisie, de lecture. Outil applicable dans l'ensemble des contextes irrigués de grandes cultures français. Possibilité de simuler des années climatiques extrêmes (sécheresse, températures élevées).
Limites	Ne prend pas en compte en charge les stratégies d'assolement avec double culture (cultures dérobées). Asalée ne génère pas d'incertitude climatique mais réutilise des climats passés. Il peut utiliser également les scénarios du GIEC.
Extension actuelle du produit	En 2018, Asalée dans sa phase de conception a été utilisé sur le bassin de la Boutonne (Charente-Maritime) comme outil de simulation et de diagnostic d'exploitation. Les fourrages sont en cours d'intégration dans l'outil (2021).
Prix/disponibilité	Actuellement utilisé en R&D, selon demandes.

FIVE-CoRe	Farm Irrigation Volumes Estimation according Constraint and Requirements
Concepteur	Cirad
Contacts	J.-L. Chopart, L. Le Mézo, M. Mézino. Cirad, 7 chemin de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre. Tél. : 02 62 49 27 64 E-mail : chopart@orange.fr, lemezo@cirad.fr, mezino@cirad.fr
Objectif	FIVE-CoRe est un outil de simulation élaboré pour estimer les consommations en eau d'irrigation en fonction des contraintes et des besoins. L'outil est capable de modéliser la consommation en eau d'irrigation pour des champs ou des exploitations. Il intègre les principaux critères (besoins en eau des cultures, pratiques d'irrigation, contraintes techniques) déterminant cette consommation optimale sous contraintes.
Public visé	Chercheurs et techniciens spécialisés en gestion de l'eau. Application à des fins d'études des besoins en eau.
Cultures concernées	Toutes les cultures paramétrées par des coefficients culturaux.
Données nécessaires	ETP (mm), température moyenne (°C) et pluviométrie (mm) journalières. Coefficients culturaux, réserve utile, racine (front racinaire, croissance racinaire), fréquence et efficacité de l'irrigation, taux de remplissage de la réserve utile et seuil de déclenchement de l'irrigation. Calendrier de jours sans eau.
Informations fournies par le produit	Bilan hydrique : tous les termes en journaliers et cumulables par décade, mois ou année. Les consommations moyennes en eau d'irrigation en m ³ par jour, par décade et par an. Les besoins de pointe décadaires en l/s.
Support de diffusion et description du service	Le logiciel fonctionne dans l'environnement Windows 95 ou 98, il nécessite Excel 97.
Principes de fonctionnement	Le jour où l'irrigation est possible, la dose est calculée par des algorithmes faisant appel à différents paramètres : stock hydrique du jour estimé par le modèle PROBE (Chopart et Siband, 1988 ; Chopart et Vauclin 1990), ou stock initial, pluies, besoins en eau de la culture, débit disponible, périodicité des apports d'eau, niveaux haut et bas de remplissage du réservoir en eau du sol. Le bilan hydrique est réalisé chaque jour sur l'ensemble de la période de simulation. Les COI (consommation optimale en eau d'irrigation) sont calculés par fraction de parcelle et synthétisés en fonction de la demande.
Extension actuelle du produit	Produit disponible en français et en anglais.
Avantages	Modèle simple de bilan hydrique. Facilité d'utilisation sur PC.
Limites	Base de données météo accessible et couvrant la zone d'étude. Modèle de bilan hydrique à réservoir. Maîtrise des concepts de base de gestion de l'eau, d'irrigation et des probabilités. Nécessite Excel 97.
Prix	Gratuit si collaboration scientifique.

Des outils pour demain

Faciliter la gestion de l'eau sur un territoire

Les systèmes irrigués sont largement concernés dans les problèmes de pénurie d'eau en période d'été, à la fois comme responsables et comme victimes de cet état de fait. La question de la pénurie d'eau et du partage de la ressource se traite au niveau territorial, le plus souvent au niveau d'un bassin versant qui est le territoire naturel de la gestion de la ressource en eau. Néanmoins, le territoire de gestion de l'eau est un système complexe, siège d'une diversité et d'une multiplicité d'interactions

entre ressources, entre acteurs et entre ressources et acteurs, par le biais de nombreux processus dynamiques, tant biophysiques que décisionnels. La diversité d'acteurs fait que, même si l'enjeu de pénurie d'eau est un enjeu majeur, d'autres enjeux sont aussi d'importance pour les acteurs de ces territoires et que des visions pour le territoire coexistent, voire s'affrontent. Dans ces conditions, faciliter la gestion de l'eau au sein d'un territoire nécessite un outillage important pour représenter la complexité de ces situations de gestion de l'eau et leur dynamique, et pour amener les acteurs de ces territoires à construire et évaluer des alternatives pour leur territoire dans un climat apaisé. Des travaux ont été développés, notamment dans le cadre de l'unité mixte technologique Eau, pour cela et sont présentés dans cette section.

Représenter la complexité des situations et leur dynamique

Maelia (Gaudou *et al.*, 2013) est une plateforme de simulation multi-agent qui permet de modéliser les processus à l'origine des crises de gestion quantitative de l'eau au travers de trois modules en interaction : l'un simule la circulation de l'eau dans les différents « compartiments » du territoire (rivières, nappes souterraines, sol, etc.) ; un autre les opérations techniques de chaque agriculteur sur son exploitation (semis, irrigation, récolte, etc.) ; enfin un troisième module représente les décisions de gestion de l'eau (lâchers, restrictions, etc.). Ces trois modules interagissent dans l'espace (de la parcelle au territoire) et à plusieurs pas de temps (du jour à l'année), de sorte que Maelia est en mesure de proposer une modélisation à des résolutions spatiales et temporelles fines, avec une approche d'exhaustivité. Ainsi, par exemple, sur un bassin tel que celui de l'Aveyron aval-Lère (835 km²), la décision d'environ 1 150 agriculteurs est simulée chaque jour et concerne 15 225 parcelles.

Maelia a été développée pour permettre d'évaluer, à l'échelle du territoire, les impacts environnementaux, économiques et sociaux de scénarios de changements combinés de normes de gestion de l'eau, d'activités agricoles ou de contextes. Elle a été implémentée sur plusieurs bassins versants du sud-ouest de la France présentant des problèmes de pénurie d'eau en période d'étiage : Aveyron aval-Lère, Tarn aval, Adour amont et Arrats.

Construire, simuler et évaluer des alternatives pour les territoires

Dans les territoires irrigués avec des enjeux de pénurie d'eau en période d'étiage, la discussion autour de scénarios de changement est nécessaire mais peut être conflictuelle. Pour amener les acteurs à échanger de manière pacifiée, plusieurs étapes sont nécessaires et ont fait l'objet de développement de méthodes appropriées.

Construire des scénarios

Pour discuter de scénarios, une option *a priori* favorable est de définir les scénarios de manière participative. C'est ce qui a été fait sur l'Aveyron aval-Lère par Murgue *et al.* (2015). Deux groupes distincts ont été constitués du fait de la situation de conflit existante (gestionnaires de l'eau et environnementalistes d'une part, et profession agricole d'autre part) et un atelier participatif a été organisé avec chacun d'eux. Cet atelier s'est déroulé en quatre étapes :

- discussion générale sur l'objectif et la méthodologie de l'atelier ;
- session de *brainstorming* pour identifier et sélectionner les idées de changement ;
- session de spécification des idées de changement sélectionnées, l'objectif étant de répondre aux questions suivantes : quel élément est modifié (ex. : culture, pratique) ? Où (ex. : sur quel type de sol) ? Par quoi est-ce remplacé ?

- et définition de seuils d'acceptabilité pour les changements envisagés (ex. : surface maximale au sein de chaque exploitation).

Si cette approche de coconstruction de scénarios favorise l'acceptabilité, elle peut conduire à des scénarios se révélant peu efficaces au regard de l'enjeu à traiter. C'est pourquoi, sur ce bassin, une autre approche a été menée par Allain *et al.* (2016) : sur la base d'une série d'entretiens individuels, le chercheur a identifié les leviers envisagés par les acteurs pour agir sur le problème de déséquilibre hydrique chronique, puis a construit des scénarios jouant sur ces leviers (systèmes de culture, mais aussi outils de pilotage et ressources en eau) de manière radicale. Ces scénarios ont été présentés à un ensemble d'acteurs, réunis lors d'un atelier collectif, et ceux-ci ont sélectionné quatre scénarios qui leur semblaient intéressants en enseignements potentiels.

Identifier critères et indicateurs d'évaluation des scénarios

Pour juger et comparer les scénarios, ceux-ci doivent être qualifiés par des critères (qualitatifs et relativement englobants) et des indicateurs (variables souvent quantitatives permettant de spécifier les critères). Dans la démarche proposée par Allain *et al.* (2016), un ensemble de critères a été défini par analyse d'une campagne de 16 entretiens individuels et validé lors d'une réunion collective rassemblant la plupart des personnes interrogées ; un jeu d'indicateurs a ensuite été construit pour spécifier les critères retenus en interrogeant successivement différents experts ou groupes d'experts.

Simuler des scénarios

La quantification des impacts des scénarios se fait souvent par simulation à l'aide d'un modèle.

Dans le cadre d'un projet visant à permettre aux OUGC d'évaluer soit des plans de répartitions entre préleveurs irrigants d'un périmètre élémentaire le volume prélevable autorisé défini par l'État, soit les règles pour adapter cette répartition en cas de limitation ou de suspension provisoire des usages, une interface, appelée Simult'eau, a été développée pour faciliter la simulation de scénarios par la plateforme Maelia (Lacroix *et al.*, 2018).

Évaluer des scénarios

L'évaluation des scénarios peut être analytique. Il s'agit alors de comprendre et de décrire les effets des scénarios en étudiant un ensemble d'indicateurs, souvent quantitatifs et simulés par un modèle.

Mais l'évaluation des scénarios peut aussi avoir une fonction délibérative en amenant les différents acteurs du territoire à déployer des argumentaires pour se positionner sur la question posée. Dans ce cas, le recours à un modèle de simulation reste utile pour quantifier un certain nombre d'indicateurs, mais il peut s'avérer insuffisant, et le recours à l'expertise est alors indispensable pour estimer la valeur des variables indicatrices non simulées par le modèle.

Dans le cas d'étude du bassin Aveyron aval-Lère, les scénarios ont été simulés avec Maelia, permettant ainsi la qualification des scénarios selon 28 indicateurs concernant les prélèvements en eau, l'hydrologie, le stockage de l'eau, la production agricole et l'efficacité de l'eau. L'évaluation des scénarios a ensuite été faite de manière analytique par les chercheurs. Puis sept ateliers participatifs ont permis aux acteurs du territoire de juger ces scénarios en utilisant les indicateurs de leur choix (parmi les 28 simulés ou sinon en utilisant leur propre expertise). Ces ateliers, menés par groupes d'acteurs homogènes, ont permis de produire une matrice de délibération (KerbabelTM) qui a été analysée sous différents angles (comparaison entre scénarios, groupes d'acteurs et critères) et soumise à discussion lors d'une

journée collective de restitution (Allain *et al.*, 2018). Cette journée a permis l'ouverture, dans un climat pacifié, de plusieurs pistes vers de nouveaux scénarios relativement consensuels dont il convient désormais d'évaluer l'efficacité.

Références bibliographiques

- Allain S, Plumecocq G, Leenhardt D, 2016. La structuration d'une évaluation multicritère pour comparer des scénarios territoriaux de gestion de l'eau. Analyse réflexive sur une démarche de recherche ingénierique. In : *Aborder les problèmes d'environnement comme des situations de gestion ? Atelier de recherche*, Strasbourg, 12-13 décembre 2016.
- Allain S, Ndong G.O, Lardy R, Leenhardt D, 2018. Integrated assessment of four strategies for solving water imbalance in an agricultural landscape. *Agron Sustain Dev*, 38 (60). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0529-z>
- Attonaty J.-M., Le Bars M., Allaya M., Le Grusse P, 2005. *Olympe : manuel d'utilisation*, Montpellier, Ciheam-IAM.
- Bouarfa S, Brunel L, Granier J, Mailhol J.-C., Morardet S, Ruelle P, 2011. Évaluation en partenariat des stratégies d'irrigation en cas de restriction des prélèvements dans la nappe de Beauce (France). *Cahiers Agriculture*, 20, 124-129.
- Cinotti B, Galtier B, Granger Y, 2020. Bilan du dispositif des organismes uniques de gestion collective (OUGC) des prélèvements d'eau pour l'irrigation. Rapport interministériel CGAER n° 19089 et GEDD n° 13017-01. <https://agriculture.gouv.fr/bilan-du-dispositif-des-organismes-uniques-de-gestion-collective-ougc-des-prelevements-deau-pour>
- Gaudou B, Sibertin-Blanc C, Therond O, Amblard F, Arcangeli J.-P, Balestrat M. *et al.*, 2013. The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. *MABS 2013 14th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation*, Saint Paul, Minnesota, USA, 6-7 mai. <http://maelia-platform.inra.fr>
- Lacroix B, Lardy R, Murgue C, Eza U, Leenhardt D, 2018. SIMULTEAU : un outil pour la gestion collective de la ressource en eau par les Organismes Uniques. *Phloème : 1^{re} Biennales de l'innovation céréalière*, Paris, 24-25 janvier 2018.
- Mailhol J.-C., Ruelle P, Walser S, Schütze N, Dejean C, 2011. Analysis of AET and yield prediction under surface and buried drip irrigation systems using the crop model PILOTE and Hydrus-2D. *Agricultural Water Management*, 98, 1033-1044.
- Mailhol J.-C., Albasha R, Cheviron B, Lopez J.-M., Ruelle P, Dejean C, 2018. The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices: Application in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management*, 204, 162-179.
- Murgue C, Therond O, Leenhardt D, 2015. Towards sustainable water and agricultural land management: participatory design of spatial distributions of cropping systems in a water-deficit basin. *Land Use Policy*, 45, 52-63.
- Penot E, Deheuvels O. (eds), 2007. *Modélisation économique des exploitations agricoles : modélisation, simulation et aide à la décision avec le logiciel Olympe*, L'Harmattan, 182 p.
- OCDE, 2010. *Gestion durable des ressources en eau dans le secteur agricole*, Études de l'OCDE sur l'eau, Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264083592-fr>
- Prud'Homme L, Tuffnell F, 2020. Rapport d'information déposé par la mission d'information sur la gestion des conflits d'usage en situation de pénurie d'eau, au nom de la Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire. Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire. http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b3061_rapport-information#
- Rucheton G, Morardet S, Ruelle P, Fusillier J.-L., Fabre J., 2015. L'adaptation de l'agriculture à la disponibilité de la ressource en eau. Le cas de la Drôme des Collines. *Notes et études socio-économiques*, (39), 57-82. <https://agriculture.gouv.fr/notes-et-etudes-socio-economiques-ndeg39>

GESTION TACTIQUE DE L'IRRIGATION À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE

Alain Bouthier, *Cyril Dejean, François Dubocs, Jean-Vincent Heckenroth,*
Alice Ract Madoux, *Pierre Ruelle, Nicolas Urruty*

L'irrigation, un outil pour satisfaire les besoins en eau des plantes

Le rôle de l'eau et le fonctionnement hydrique des plantes

L'eau est un élément indispensable à la vie. Dans la nutrition et le développement de tous les êtres vivants, des plantes en particulier, le rôle de l'eau est, en effet, fondamental. Elle est à la fois un constituant des végétaux, mais aussi le véhicule qui leur apporte les éléments indispensables à leur croissance et leur survie. Elle assure de multiples rôles dont l'absorption des minéraux dissous dans l'eau du sol, la rigidification et l'élongation cellulaire, mais aussi la régulation de leur température grâce à la transpiration et au refroidissement de l'air assuré par le passage des gouttes d'eau de l'état liquide à l'état gazeux. Enfin, le transport d'eau dans la plante permet l'ouverture des stomates (les pores des plantes) au niveau des feuilles et l'absorption du gaz carbonique dans l'air (figure 2.1). Ce CO_2 constitue la matière première de la photosynthèse. L'ouverture des stomates provoque une perte d'eau par transpiration, « impôt obligatoire à payer » pour que la plante assimile du carbone et produise de la biomasse. En conditions de stress hydrique, les stomates se ferment (régulation stomatique), ce qui limite les pertes d'eau et permet la survie de la plante mais réduit la photosynthèse.

L'activité photosynthétique des végétaux est donc particulièrement dépendante de la qualité des échanges d'eau qui s'opèrent au sein du continuum sol-plante-atmosphère lors du processus de transpiration. L'étude des processus physiques à l'origine de ces échanges montre que ces flux d'eau s'expliquent par des différences d'état énergétique, ou différences de potentiel hydrique (Ψ), entre les compartiments sol, plante et atmosphère. Le potentiel hydrique se définit par l'état de liaison de l'eau à un compartiment (sol, plante ou atmosphère) et se mesure en unités de pression (MPa). L'eau étant retenue au sein des différents compartiments par des forces de capillarité, osmotiques ou électriques, le potentiel hydrique s'exprime négativement. Plus ce potentiel est négatif, plus la force de rétention d'eau dans le compartiment est grande et plus ce compartiment exerce une tension importante pour conserver l'eau.

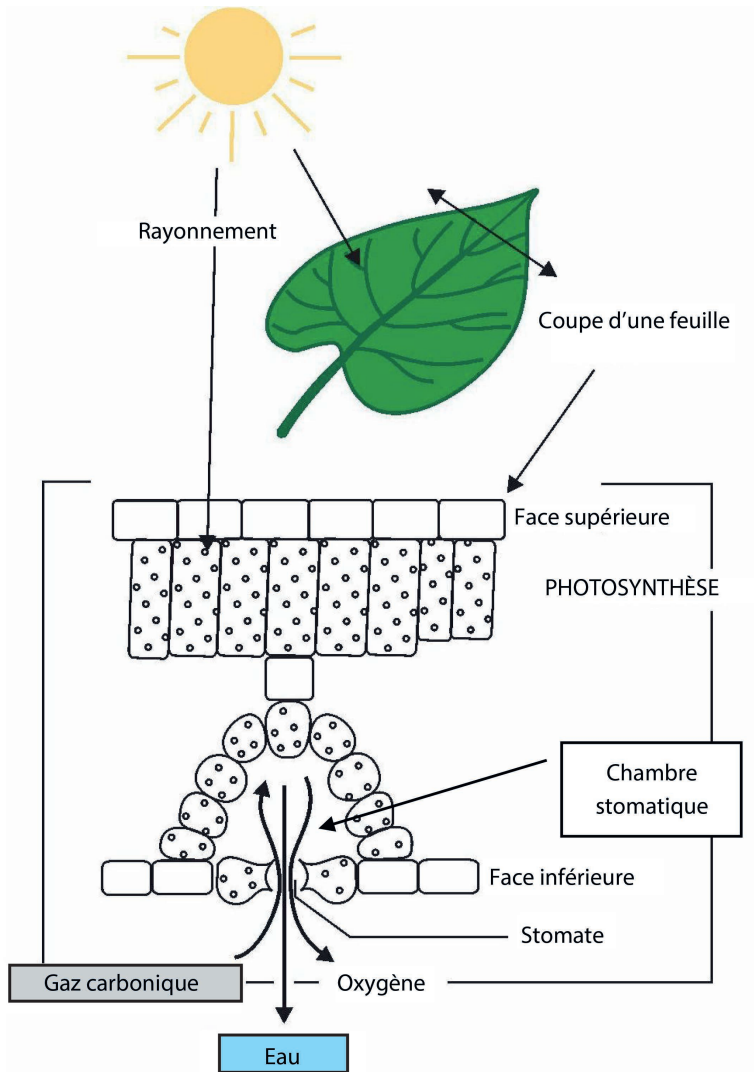


Figure 2.1. Échanges gazeux au niveau des stomates d'une feuille (d'après Dutuit et al., 1994).

Au sein du continuum sol-plante-atmosphère, ce sont donc les différences de potentiel hydrique entre compartiments qui renseignent sur le sens des échanges hydriques. Ce phénomène est illustré par la figure 2.2, en situation favorable : sol avec de l'eau disponible à une période de la journée où les conditions climatiques restent modérées. L'eau pénètre dans les racines car le potentiel hydrique des racines ($\Psi_{\text{racines}} \approx -0,2 \text{ MPa}$) est plus faible que celui d'un sol humide ($\Psi_{\text{sol}} \approx -0,05 \text{ MPa}$) ; l'eau monte ensuite vers les feuilles car le potentiel hydrique des feuilles ($\Psi_{\text{feuilles}} \approx -0,7 \text{ MPa}$) est plus faible que celui des racines ; enfin, l'eau quitte la plante en s'évaporant dans l'atmosphère car le potentiel hydrique de l'air ($\Psi_{\text{air}} \approx -50 \text{ MPa}$) est plus faible que celui des feuilles. Pour ce passage de l'état liquide à l'état gazeux, l'énergie nécessaire (chaleur latente de vaporisation) est fournie par le soleil. En raison de la cohésion des molécules d'eau entre elles, la transpiration au niveau des feuilles crée une force de tension, force motrice, qui se répercute à l'ensemble de la colonne d'eau et entraîne l'absorption d'eau par les racines.

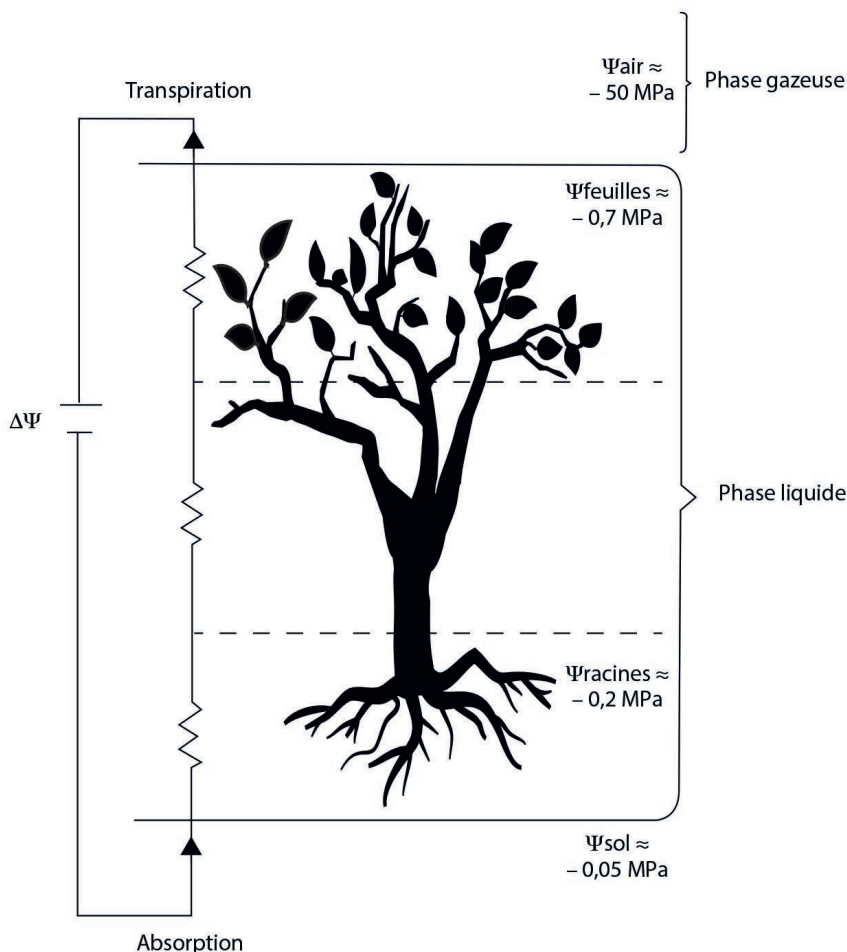


Figure 2.2. Représentation schématique de la circulation de l'eau entre le sol, la plante et l'air dans des conditions données de gradient de potentiel hydrique Ψ (d'après Tyree, 1997).

Les valeurs de potentiel indiquées dans la figure 2.2 correspondent à une situation type. Elles peuvent varier fortement avec l'humidité du sol et les conditions météorologiques (qui évoluent aussi au cours d'une journée). Le sol a évidemment des valeurs de potentiel hydrique plus élevées lorsqu'il est bien rechargé en eau, et plus faibles en cours de dessèchement (voir section « L'eau dans le sol », p. 29). Il en est de même pour l'atmosphère, en condition très humide le potentiel hydrique croît ($\Psi_{\text{air}} = -1,4$ MPa pour une humidité relative HR = 99 % à 25 °C), mais pour un temps chaud et sec il diminue fortement ($\Psi_{\text{air}} = -95$ MPa pour HR = 50 % à 25 °C). En ce qui concerne le potentiel hydrique des feuilles, il s'abaisse au cours de la journée et, pour les plantes cultivées, il est compris entre -0,1 et -3 MPa environ (pour un maïs irrigué, -0,2 MPa le matin, -2 MPa à midi par exemple) (Daudet et Cruziat, 2021).

La représentation utilisée s'inspire d'un modèle simplifié, en faisant une analogie entre le transfert de sève à travers la plante et le transfert du courant dans les circuits électriques (analogie « ohmique »). Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer certains phénomènes lorsque le potentiel hydrique de l'air varie fortement ou devient très négatif (mobilisation de l'eau des différentes parties d'un végétal en complément du transfert par les vaisseaux du xylème et phénomènes de cavitation dans les vaisseaux).

L'eau dans le sol

Pour assurer sa transpiration et sa photosynthèse, la plante consomme des quantités importantes d'eau dans le sol. Au cours du temps, la quantité d'eau dans un horizon de sol varie donc selon le bilan des flux en entrée (pluie, irrigation, remontées capillaires) et des flux en sortie (drainage, ruissellement, transpiration par les plantes, évaporation du sol) (figure 2.3).

En fonction de la nature du sol (texture, porosité, taux de cailloux, etc.) et de la quantité d'eau présente dans le sol, cette eau est plus ou moins disponible pour les plantes en raison des forces de tension qui la relient au substrat. Plus l'eau est présente, plus le potentiel hydrique du sol est élevé et plus l'eau circule facilement vers les plantes, l'atmosphère ou les horizons profonds. En revanche, plus l'eau se raréfie, plus elle est retenue fermement sur les fractions solides du sol et plus le potentiel hydrique du sol baisse. Les plantes ont alors de plus en plus de difficulté à récupérer cette eau, leurs stomates se ferment partiellement pour réguler leur potentiel hydrique et la transpiration est réduite pour éviter le flétrissement de la plante.

Pour évaluer la fraction d'eau mobilisable par les plantes dans un sol, les agronomes ont représenté le sol comme un réservoir au sein duquel l'eau est plus ou moins facilement utilisable selon la quantité d'eau présente (figure 2.4). La quantité d'eau disponible pour les plantes est ainsi définie comme l'amplitude entre deux bornes :

- une borne haute, dite « capacité au champ » (CC), qui représente l'humidité du sol après ressuyage. À cette humidité correspond la quantité d'eau maximale que le sol peut stocker et rendre accessible aux plantes ($\Psi_{\text{sol}} \approx -0,01 \text{ MPa}$ $\text{pF}^{(6)} = 2$) ;
- une borne basse, dite « point de flétrissement permanent » (PFP), qui correspond à la capacité maximale de succion par la plante ($\Psi_{\text{sol}} \approx -1,5 \text{ MPa}$, $\text{pF} = 4,2$).

Cette quantité d'eau que le sol peut stocker entre le point à la capacité au champ et le point de flétrissement permanent est appelée réservoir utilisable (RU). La notion de réservoir facilement utilisable (RFU) est également employée pour désigner la partie du réservoir que la plante peut utiliser sans contrainte (de 50 à 70 % du réservoir utilisable en fonction de la granulométrie, de la profondeur et de la pierrosité du sol). Le rapport RFU/RU est d'autant plus faible que les sols présentent des textures argileuses et des couches de sols profondes.

Au-delà du réservoir facilement utilisable, le réservoir de survie (RS) désigne la fraction d'eau que les plantes peuvent utiliser mais en régulant l'ouverture de leurs stomates et leur activité photosynthétique. En effet, lorsque l'humidité du sol se réduit, le potentiel hydrique du sol baisse également en raison des forces d'adhésion des molécules d'eau sur les particules de sol. Le potentiel hydrique du sol se rapproche donc de celui des racines. Afin de diminuer la tension dans la colonne d'eau et de conserver un potentiel hydrique acceptable, la plante est obligée de réguler l'ouverture de ses stomates. Cette régulation est un processus adaptatif nécessaire à la survie de la plante. Elle a l'inconvénient de réduire la photosynthèse et d'entraîner l'échauffement de la feuille.

Le réservoir utilisable d'un sol étant difficile à évaluer en plein champ, des formules de pédotransfert (FTP) ont été élaborées à partir de mesures en laboratoire. Ces FTP permettent ainsi d'estimer la capacité au champ et le point de flétrissement permanent d'un sol à partir de paramètres facilement mesurables, comme la composition granulométrique, la teneur en matière organique ou encore la capacité d'échange cationique des sols. En France, les FTP les plus utilisées par les pédologues et les agronomes sont celles proposées par l'INRAE à partir de la base de données Solhydro (Bruand *et al.*, 2004). D'autres méthodes existent comme celle proposée par Arvalis-Institut du végétal à partir du triangle des textures (figure 2.5).

6 Le pF est une ancienne grandeur classiquement utilisée en agronomie, $\text{pF} = \log_{10}(-\Psi)$, Ψ exprimé en hectopascal.

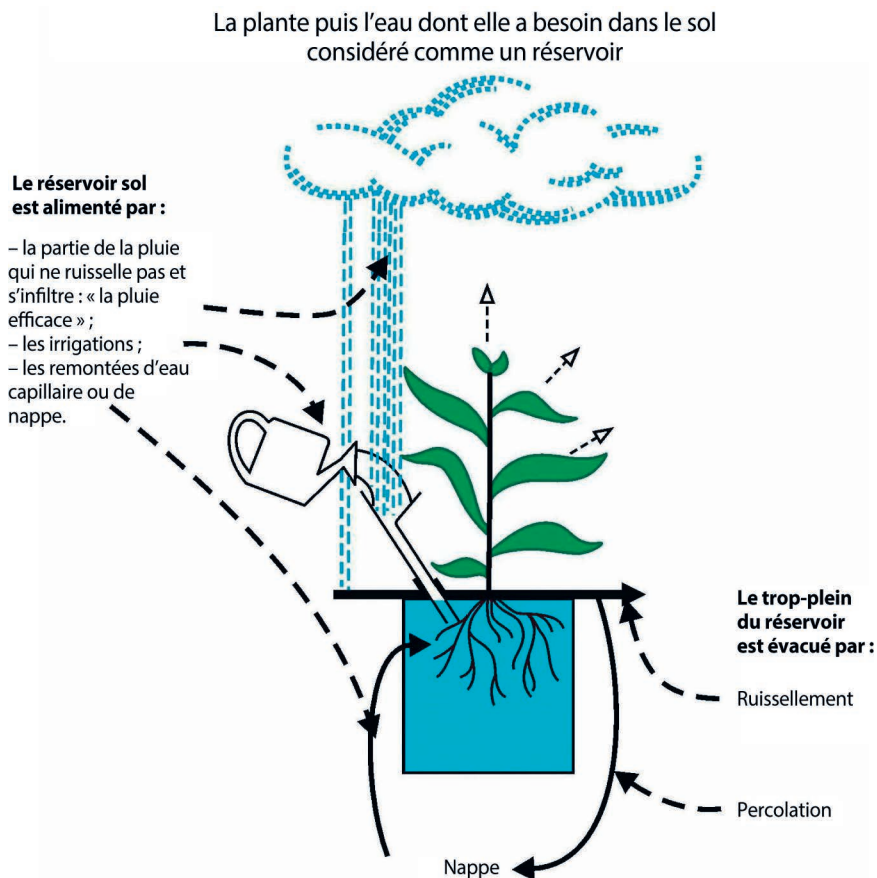


Figure 2.3. Représentation schématique du sol et des flux d'eau en entrée/sortie.

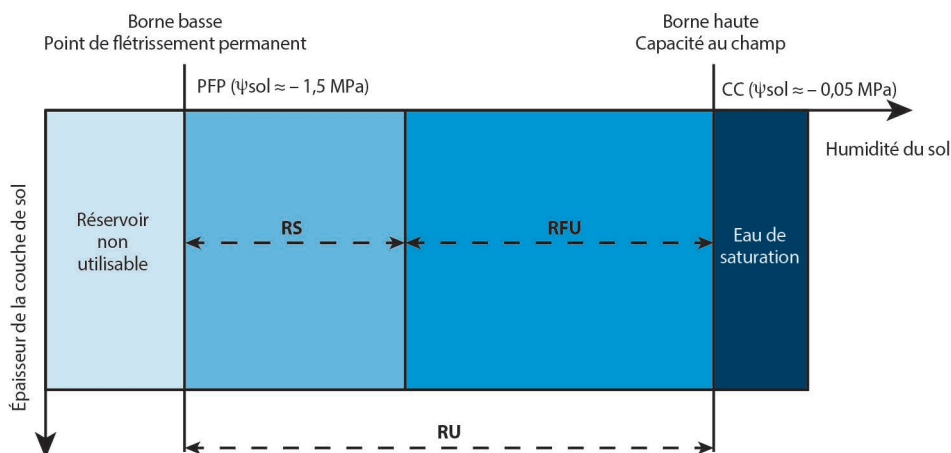


Figure 2.4. Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes.

PFP : point de flétrissement permanent ; CC : capacité au champ ; RS : réservoir de survie ou réservoir difficilement utilisable (RDU) ; RFU : réservoir facilement utilisable ; RU : réservoir utile (RFU + RS).

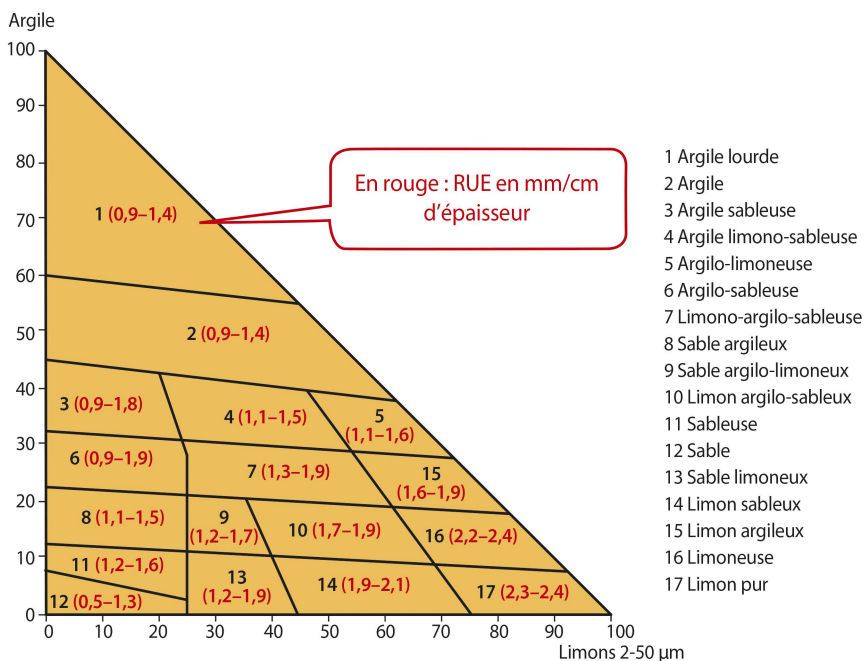


Figure 2.5. Estimation du réservoir utilisable des sols selon le triangle des textures du Geppa (utilisable sur l'ensemble du territoire français) (d'après Arvalis, 2018).

Geppa : Groupement d'étude de pédologie pure et appliquée.

Les plantes n'utilisant que l'eau à proximité de leurs racines, une partie seulement du réservoir utilisable est accessible lorsqu'elles sont jeunes (figure 2.6). En croissant, elles ont accès à des horizons plus profonds et donc à une partie plus importante du RU. C'est pourquoi, par exemple, des plantiers de vigne sont plus sensibles à la sécheresse que des vignes installées depuis plusieurs années.

Au sein d'une même parcelle agricole, le réservoir utilisable peut varier de manière importante en fonction des différences de profondeur, de granulométrie, de pierrosité, de tassement, etc. Dans le cas de sols caillouteux, le réservoir utilisable est réduit en fonction de la quantité et du type de cailloux⁷. La disponibilité de l'eau au sein des différents horizons peut également être impactée négativement par des défauts de structure : un sol compacté pénalise l'alimentation hydrique de la culture en réduisant la quantité d'eau que le sol peut stocker d'environ 10 à 30 % selon la sévérité du tassement. La compaction limite également la capacité des racines à explorer le sol en profondeur.

Cette approche conceptuelle du sol basée sur le réservoir utile pour représenter le volume d'eau disponible pour les plantes ayant le mérite d'être simple, elle a connu un grand succès en agronomie au cours des soixante dernières années. Pourtant, de nombreuses questions restent d'actualité, notamment sur l'estimation des différentes grandeurs qui la constituent et sur leur évolution dans le temps. En effet, ce concept nécessite de simplifier le sol en quelques horizons dont les propriétés texturales et structurales sont définies et stables dans le temps. Or ces propriétés peuvent évoluer, en particulier la structure, sous l'effet des précipitations, de la température, du système de culture et des pratiques

⁷ La contribution des cailloux au réservoir utilisable est très variable selon leur nature : quasi nulle pour des cailloux de type silex, quartz, granites non altérés, mais significative pour des cailloux calcaires.

culturelles, ce qui modifie la capacité au champ des sols au cours du temps. Cette approche du sol comme un réservoir qui se remplit et se vide exclut ainsi une partie de la dynamique de l'eau au sein du sol, notamment des flux latéraux et des remontées capillaires. Une bonne estimation du réservoir utile dépend donc d'une bonne prise en compte de l'hétérogénéité du sol (latéralement et verticalement), de la prise en compte des cailloux pour estimer leur participation au stockage de l'eau (notamment dans le cas des sols calcaires), mais aussi de leur impact sur le système racinaire des plantes.

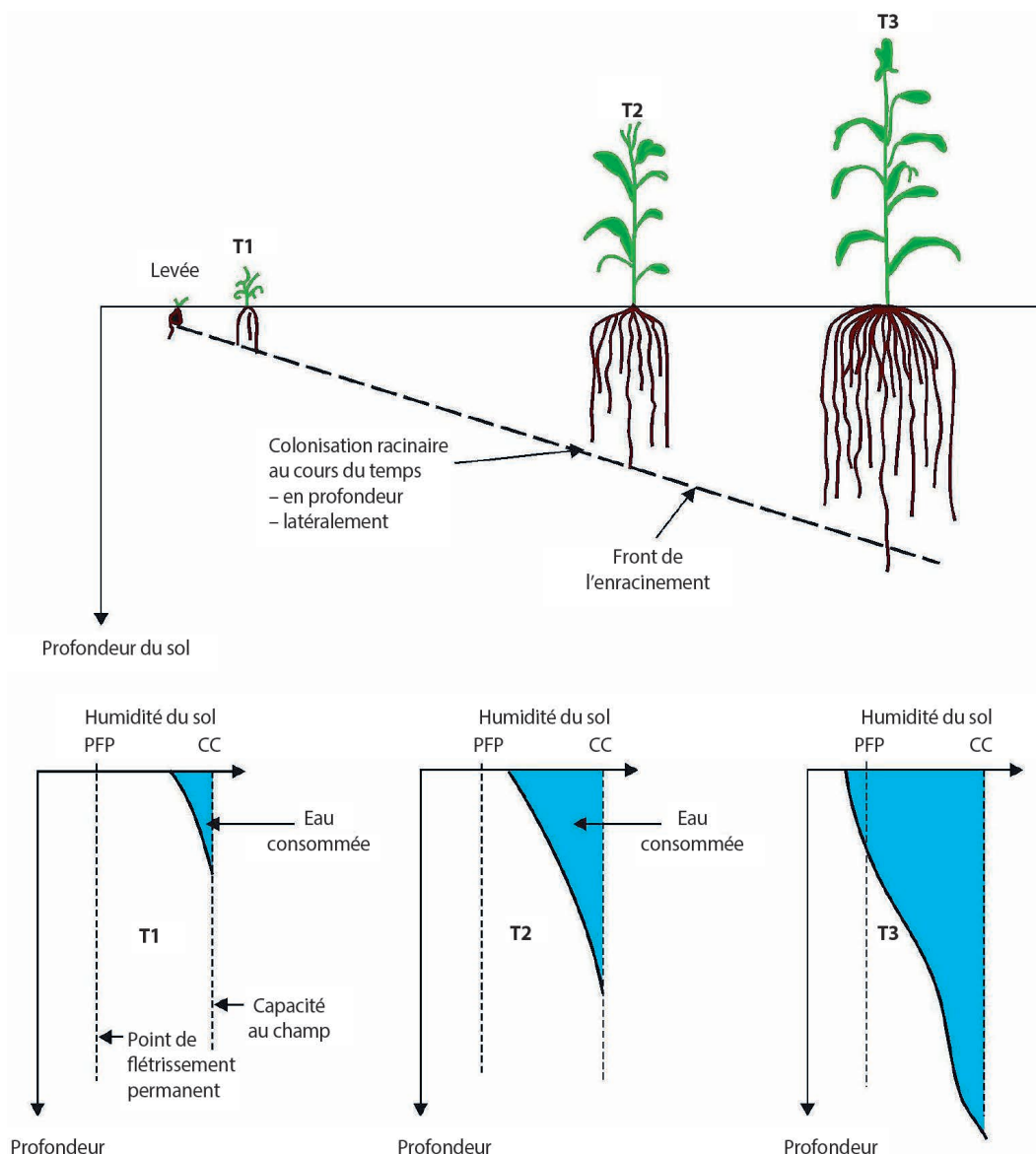


Figure 2.6. Les réservoirs utilisables en eau du sol et leur utilisation par les plantes selon le développement racinaire.

PFP : point de flétrissement permanent ; CC : capacité au champ.

La demande en eau de l'atmosphère

En sortie du continuum sol-plante-atmosphère, l'eau est transpirée par la plante et évaporée par le sol sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Cette demande en eau, imposée par l'atmosphère et exprimée en millimètre par jour, est appelée évapotranspiration. Elle varie en fonction de différents paramètres météorologiques (température, humidité, vent, etc.), mais aussi en fonction du stade de développement de la plante et de l'eau disponible dans le sol (figure 2.7). Pour suivre cette demande en eau au cours du temps, les bioclimatologues et les agronomes ont construit trois notions importantes : l'évapotranspiration de référence (ET_{ref} ou ETP)⁸, l'évapotranspiration maximale (ETM) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

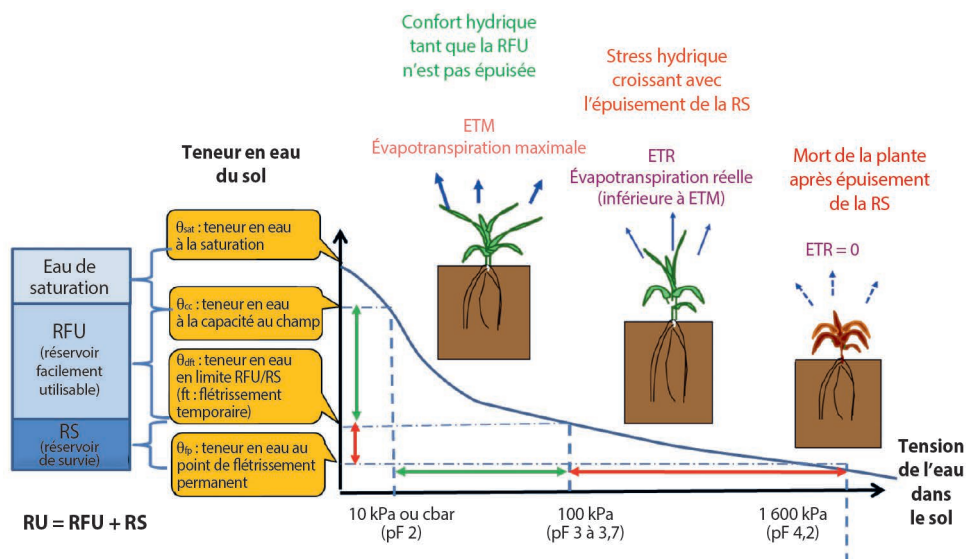


Figure 2.7. Fonctionnement hydrique de la plante en fonction de l'eau disponible dans le réservoir sol (d'après Arvalis, 2018).

L'évapotranspiration de référence correspond à « l'évaporation d'une pelouse⁹ rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau ». Initialement mesurée en plein champ par des lysimètres, elle est aujourd'hui obtenue à partir de formules mathématiques faisant intervenir plusieurs paramètres météorologiques tels que le rayonnement, la température, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent. Les formules de Penman et Penman-Monteith sont les plus utilisées¹⁰.

Pour préciser les demandes en eau de chaque plante au cours du temps, l'évapotranspiration maximale (ETM) est utilisée. Elle est une correction de l'ETP en fonction du couvert végétal et de son stade

8 Aussi appelée ET_0 dans les pays anglo-saxons, le sigle ETP est fréquemment utilisé en France à la place de ET_{ref} , car il correspond à l'ancienne dénomination « évapotranspiration potentielle ». Afin de tenir compte de l'usage, ETP sera utilisé par simplification dans cet ouvrage, tout en attirant l'attention du lecteur sur le fait que ce terme a successivement désigné plusieurs grandeurs différentes : la quantité d'eau évaporée par une culture basse n'ayant pas subi de restriction hydrique, la demande évaporative de l'atmosphère ou encore l'évapotranspiration calculée pour une culture bien alimentée en eau. À ne pas confondre avec la notion d'équivalent temps plein, également notée ETP (voir section « Le modèle agrégé de l'agriculture irriguée », p. 10-12).

9 En France, l'espèce retenue est la fétuque ; les pays anglo-saxons utilisent la luzerne et d'autres espèces sont utilisées en fonction des contextes climatiques.

10 Pour plus de détails sur ces différences de formules, nous renvoyons le lecteur vers les compléments numériques.

de développement. En effet, une culture peu couvrante transpire moins qu'une culture pleinement développée. Des coefficients culturaux (K_c) ont donc été déterminés pour différentes plantes cultivées et différents stades phénologiques à travers de nombreuses expérimentations agronomiques (voir section « Les outils agroclimatiques basés sur le bilan hydrique du sol », p. 36-39). Au cours du temps, l'ETM se calcule par la formule suivante :

$$ETM = K_c \times ETP$$

Enfin, l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau réellement évaporée par une couverture végétale donnée, en prenant en compte la transpiration de la végétation et l'évaporation du sol. Au niveau du sol, les pertes en eau peuvent en effet être importantes lorsque la culture a une surface foliaire très faible, mais ces pertes deviennent négligeables lorsque la surface foliaire recouvre complètement le sol. L'ETR est donc plus ou moins proche de l'ETM en fonction des conditions météorologiques et d'humidité du sol (figure 2.7) :

- lorsque les prélèvements de la culture se font dans le RFU, la plante est en confort hydrique et $ETR = ETM$;
- lorsque le RFU est vide, la culture puise dans le RS et $ETR < ETM$.

L'écart entre l'ETR et l'ETM permet de caractériser l'intensité de sécheresse subie par la culture *via* le coefficient K_s :

$$ETR = K_s \times ETM$$

Lorsque l'eau est disponible sans contrainte, $K_s = 1$, mais si l'eau est plus difficile à mobiliser, alors K_s diminue de façon linéaire jusqu'à zéro, point où l'évapotranspiration est nulle et la plante meurt (figure 2.8).

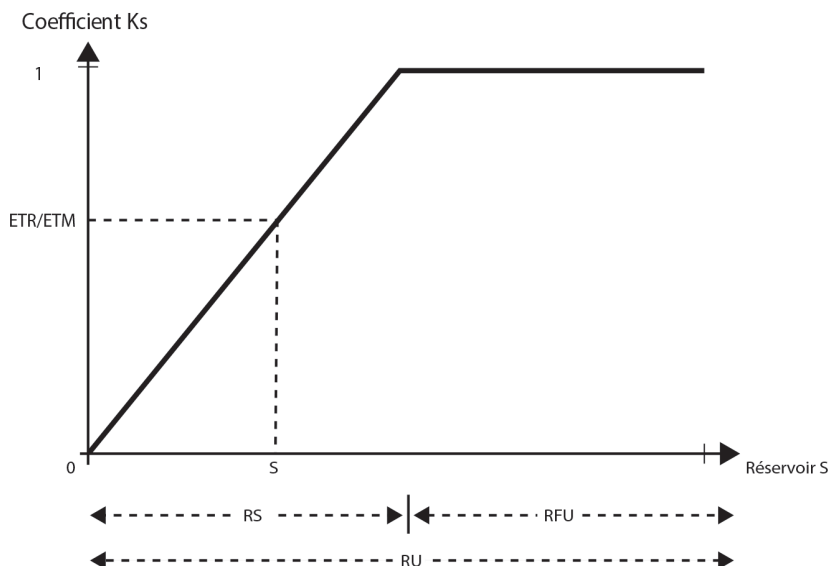


Figure 2.8. Évolution du coefficient de sécheresse K_s (ETR/ETM) en fonction de la quantité S d'eau disponible dans le sol.

RFU : réservoir facilement utilisable ; RS : réservoir de survie ; RU : réservoir utile.

Les effets d'une contrainte hydrique sur les plantes

Les effets d'une contrainte hydrique sur les végétaux sont visibles plus ou moins rapidement selon la capacité des plantes à réguler cette contrainte grâce à l'ouverture/fermeture des stomates. Les effets d'un manque d'eau sur les organes productifs (grains, fruits, bulbes, tubercules, racines, etc.) varient donc selon les espèces, mais également selon la période du cycle cultural. Il existe ainsi :

- des périodes sensibles au cours desquelles la production de matière sèche est affectée ;
- des périodes critiques centrées sur la phase de reproduction au cours desquelles tout déficit hydrique peut provoquer des phénomènes irréversibles (défauts de fécondation, avortements, etc.). Il faut être particulièrement vigilant pendant ces phases. La figure 2.9 illustre le cas du maïs, à titre d'exemple.

Le manque d'eau dans l'air, caractérisé par une faible humidité relative (HR), peut également être problématique pour les végétaux, puisque le potentiel hydrique de l'air peut s'abaisser à des valeurs extrêmement basses par rapport à celles des différentes parties des végétaux et du sol. Il en résulte des forces de tension très importantes dans le continuum sol-plante-atmosphère qui peuvent conduire à des phénomènes de cavitation, c'est-à-dire à des ruptures brutales de la continuité des colonnes d'eau dans les vaisseaux du xylème. Ces phénomènes s'expliquent par l'entrée de microbulles d'air dans la colonne d'eau et ont pour conséquence l'embolie gazeuse. La présence d'air dans le conduit empêche alors le passage de l'eau et fragilise donc la plante pour la transpiration et la photosynthèse. Cet état peut provoquer le dessèchement irréversible des feuilles, ainsi que parfois celui des petits rameaux des arbres, voire de branches entières. La relation entre le potentiel hydrique et les seuils de cavitation des végétaux (50 % de perte de conductivité par exemple) a été largement étudiée ces dernières années et utilisée pour caractériser la vulnérabilité des végétaux et de leurs organes à la cavitation (Froux, 2002).

Il faut toutefois signaler que, dans certains cas, des périodes de limitation de l'alimentation hydrique peuvent être bénéfiques à la production, comme pour certaines plantes à parfum (thym, sauge officinale, menthe poivrée) dont la production de composés volatils est affectée positivement par le manque d'eau (Despinasse, 2015).

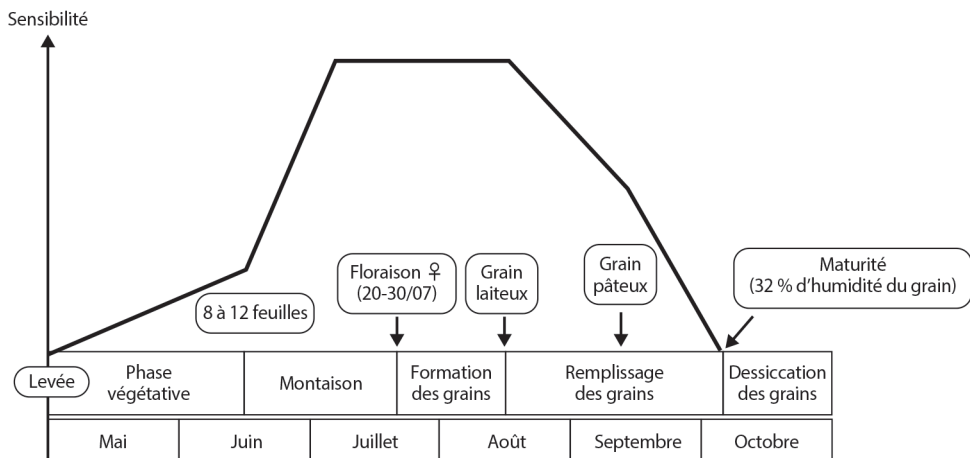


Figure 2.9. Sensibilité du maïs grain au stress hydrique selon les phases du cycle (source : Arvalis, 2017).

L'irrigation, un outil à raisonner avec précision

Afin de maximiser les bénéfices apportés par l'irrigation tout en réduisant les pertes d'eau et certains risques environnementaux (lixiviation de nitrates, tassement du sol au moment des interventions culturales et de la récolte), le déclenchement des irrigations doit être raisonné au plus près des besoins des cultures et de manière à ce que les plantes aient utilisé au mieux l'eau disponible dans le sol.

Si la conduite de la culture requiert des périodes de restriction hydrique pour maximiser le rendement et/ou la qualité, le pilotage de l'irrigation devra permettre d'obtenir le niveau de stress hydrique acceptable pendant les périodes souhaitées. Il est donc important de noter que dans ce but, les réserves hydriques du sol ne doivent être que partiellement reconstituées lors des irrigations. La mobilisation progressive des réserves difficilement mobilisables se fait alors avec une réduction de l'évapotranspiration qui devient inférieure à l'ETM.

Si la disponibilité en eau est limitée, le pilotage de l'irrigation aura pour rôle d'assurer un appoint prioritaire sur la période de plus forte sensibilité au stress hydrique. Pour gérer le rationnement avec des outils de pilotage, des seuils de déclenchement plus élevés qu'en irrigation optimale devront être définis en vue d'épuiser le RFU du sol pendant la période voulue.

En s'appuyant sur les notions présentées dans la partie précédente, le pilotage de l'irrigation est réalisé en utilisant différentes approches :

- les outils agroclimatiques ;
- les méthodes indirectes de mesure dans le sol ;
- les méthodes directes de mesure sur les plantes ;
- les méthodes basées sur les images spatiales.

Les outils agroclimatiques basés sur le bilan hydrique du sol

Le bilan hydrique permet d'estimer et de suivre au cours du temps l'état des réserves en eau du sol et de piloter les apports d'eau d'irrigation. Ces derniers sont déclenchés selon les besoins en eau des plantes et selon les différentes contraintes propres à chaque agriculteur : sol, climat, matériel et ressource disponible.

Le suivi des stades phénologiques, du bilan hydrique et de l'état du sol sont les fondements de ces approches agroclimatiques. Le principe du bilan hydrique consiste à estimer l'état des réserves en eau à une date donnée (S_n) à partir de l'état des réserves à une date antérieure (S_{n-1}) et du bilan des entrées et sorties dans le réservoir du sol exploité par les racines.

Les entrées sont constituées par :

- P , la pluie ;
- Re^{11} , le ruissellement en provenance d'une zone plus élevée ;
- I , l'irrigation ;
- R_m , les remontées capillaires.

Les sorties sont liées à :

- ETR , l'évapotranspiration réelle de la culture ;
- R_s , le ruissellement sortant de la zone étudiée ;
- D , le drainage en dessous de la zone accessible aux racines.

¹¹ Le ruissellement R peut correspondre à un gain ou une perte suivant la topographie de la parcelle. Les gains sont affectés du signe + et les pertes du signe -.

Certains termes étant difficiles à estimer, R_e et R_m sont souvent négligés et R_s est regroupé avec D . Le bilan hydrique S se calcule ainsi au cours du temps selon la formule :

$$S_n = S_{n-1} + P + I - ETR - D$$

Le calcul de l'ETR est réalisé à partir de l'ETP, en tenant compte des coefficients culturaux (K_c) et de sécheresse (K_s). Les coefficients culturaux (K_c) des principales espèces cultivées ont été estimés dans différentes conditions expérimentales (espèce, variété, sol et conditions culturales, climat et rythme d'irrigation). La courbe des coefficients culturaux est fonction du développement de la culture (figure 2.10). La précision de ces courbes et des coefficients K_c est estimée de l'ordre de 10 à 15 % et il faut s'assurer que les coefficients culturaux sont adaptés à la formule d'ETP utilisée (Penman ou Penman-Monteith).

Le suivi des précipitations est bien sûr très important et peut être réalisé soit sur la base de mesures *in situ* via un pluviomètre (figure 2.11), soit sur la base de données approchée par modélisation ou par interpolation d'une station météo proche. De la même manière, la mesure des apports d'irrigation est indispensable, soit sur la base des diagnostics de fonctionnement des équipements (asperseurs, organes de distribution en goutte-à-goutte, etc.), soit *via* des compteurs volumétriques. Enfin, l'estimation du drainage est généralement faite en admettant que dès que le réservoir utile est plein, l'excédent est drainé ou ruisselé. Il existe deux cas pour le ruissellement, celui provoqué par saturation en eau du sol qui peut être rapproché du drainage, mais aussi celui provoqué par une pluviométrie horaire supérieure à la capacité d'infiltration du sol (orage violent, ou certains systèmes d'irrigation).

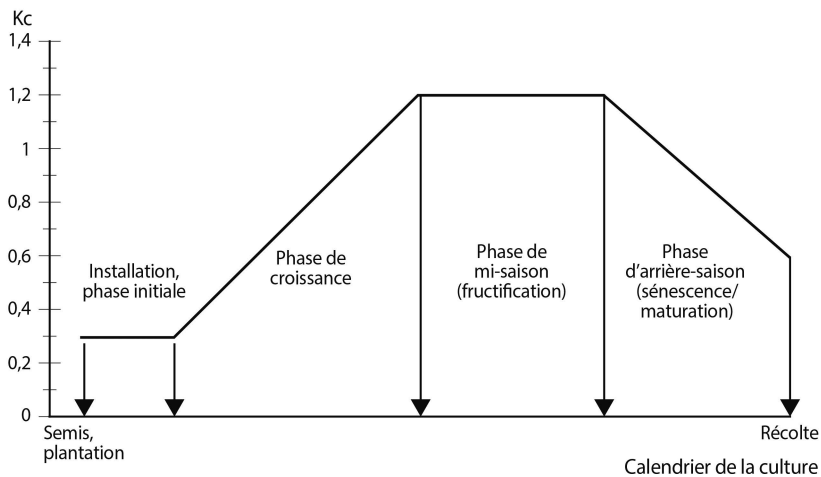


Figure 2.10. Forme générale de la courbe des coefficients culturaux K_c .

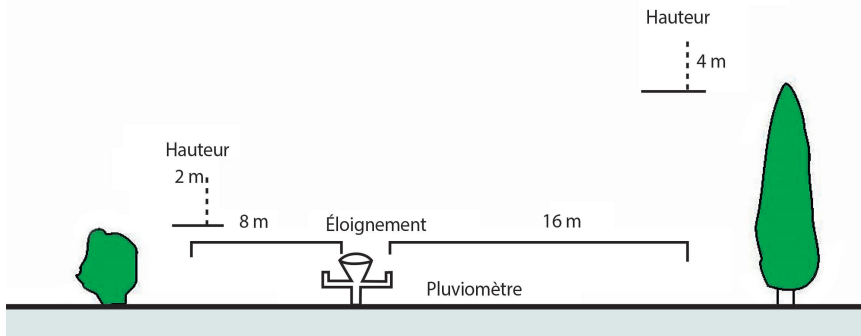


Figure 2.11. Installation d'un pluviomètre (d'après FNSEA-Météo-France, 1986).

Le bilan hydrique ainsi formulé est une représentation grossière de la réalité. Il ne demande qu'un nombre limité de données et sa grande facilité de mise en œuvre permet de simuler aisément plusieurs bilans hydriques pour mieux représenter la variabilité entre parcelles. Sur de longues périodes en régime restrictif ($ETR < ETM$), il est « autocorrecteur » dans le sens où si une erreur entraîne une surestimation de la consommation en eau, il en résultera une diminution plus rapide des réserves et donc pour la période suivante un abaissement de la consommation hydrique corrigeant les effets de l'erreur initiale. Il constitue un outil efficace pour juger de l'équilibre entre « moyens et objectifs de production » pour les choix d'assolement avant la campagne d'irrigation. Il permet ainsi d'élaborer une gestion prévisionnelle de la sole irriguée : choix de modes de conduite plus ou moins restrictifs, élaboration de calendriers d'irrigation des différentes productions avec analyse des différents régimes hydriques. Enfin, lors de l'utilisation en temps réel pour le pilotage de l'irrigation, il constitue un premier « garde-fou » contre des apports inutiles conduisant à des pertes d'eau par percolation (et éventuellement des pollutions).

Pour établir des bilans hydriques à la parcelle en vue du pilotage tactique de l'irrigation, de nombreux logiciels plus ou moins élaborés ont été développés. La mise en œuvre de ces outils nécessite de disposer, d'une part, de données météorologiques et, d'autre part, de données agronomiques. Les données météorologiques concernent la pluie (mesurée de préférence sur le champ) et l'ETP (ETref) du poste météorologique le plus proche (ou le plus représentatif). Les données agronomiques concernent le sol (RU, RFU), la plante (espèce, coefficients culturaux) et l'itinéraire technique (date de semis). L'utilisateur a le plus souvent la possibilité de mettre à jour en temps réel l'évolution de plusieurs paramètres (état initial des réserves, date des stades phénologiques, date et volume des irrigations). Ces logiciels, disponibles en local ou depuis un serveur (*via* internet), s'adressent aux irrigants, mais leur utilisation nécessite souvent que ces derniers soient aidés par des conseillers agricoles. La plus ou moins grande sophistication des modèles intégrés dans ces logiciels réside à plusieurs niveaux. On distingue schématiquement :

- des modèles simples à double réservoir. Le RU du sol est compartimenté en un RFU et un RS. L'ETR est estimé à partir de l'ETP multiplié par un coefficient cultural dépendant de la culture et de son stade de végétation. Il peut y avoir des variantes de ce type de modèle se distinguant :
 - par le mode de partition entre RFU et RS,
 - par des valeurs de RU différenciées selon les cultures,
 - par une évolution de l'accessibilité au RU au cours du cycle en lien avec l'évolution de la profondeur d'enracinement,
 - par une date de début de calcul de bilan hydrique variable (certains modèles débutant le calcul en année $n - 1$ pour tenir compte des pluies hivernales et de la consommation d'eau de la culture précédente),
 - par le mode de remplissage du réservoir en cas de pluies ou d'irrigation (d'abord RS puis RFU, soit réparti dans les deux compartiments) ;
- des modèles souvent appelés « modèles de culture » qui simulent de façon plus précise le fonctionnement du système sol-plante-climat. L'ETR y est décomposée en transpiration de la culture et évaporation du sol. La seconde est plus importante tant que la culture ne recouvre pas le sol. La transpiration de la culture est modélisée en fonction de son indice foliaire (surface de feuilles par unité de surface de sol). Ces modèles ne distinguent pas de RFU et de RS au sens habituel du terme, mais une fonction de stress liée à l'espèce et au type de sol ajuste la transpiration de la culture selon le niveau de remplissage du RU (ex. : Stics, Pilote, Moustics, CHN, Apsim, Daisy, Aquacrop, Soygro, Soyamet, Cornagro, Epic, Goa). Toutefois, il convient de rappeler que le bilan hydrique, rigoureux dans son principe, pose de nombreux problèmes d'application, en particulier :
 - le réservoir utile reste une grandeur difficile à déterminer, notamment parce qu'il faut estimer la profondeur du sol contribuant à l'alimentation en eau de la culture ;

- la représentativité de la station utilisée pour estimer l'évapotranspiration de référence (ETP) est à examiner en fonction des conditions climatiques locales ;
- dès lors que l'on cherche à rationner la culture, il faut connaître avec une précision suffisante le RFU et la profondeur d'enracinement qui peuvent varier de manière importante ;
- le rationnement est plus difficile à définir en irrigation localisée, où on ne peut plus utiliser le bilan hydrique en raison d'une estimation difficile de l'état de la réserve en eau du sol ;
- les coefficients culturaux K_c (qui dépendent de la formule d'ETP utilisée, Penman ou Penman-Monteith) sont des valeurs moyennes par période, correspondant à des conditions déterminées (espèce, variété, sol et conditions culturales, climat et rythme d'irrigation). Il en résulte que les conditions d'obtention ne correspondent pas forcément à celles de leur application, et leurs utilisations doivent être raisonnées.

En conséquence, pour éviter une dérive du bilan hydrique, il est nécessaire d'effectuer des contrôles en cours de campagne *via* des capteurs d'état hydrique du sol ou du végétal pour réaliser un recalage des grandeurs utilisées pour le calcul.

Les outils de conduite d'irrigation fondés sur la mesure de l'état hydrique du sol

Les mesures de l'état hydrique du sol sont particulièrement utiles pour évaluer l'efficacité des arrosages et adapter en conséquence la stratégie d'irrigation. L'état hydrique du sol peut s'apprécier à l'aide de deux caractéristiques : la teneur en eau (ou humidité) du sol et la tension des forces de liaison entre l'eau et le sol (ou potentiel hydrique).

Outils de mesure de la teneur en eau

La teneur en eau du sol est mesurée soit par des prélèvements d'échantillons, soit par des mesures *in situ*. Au laboratoire, la méthode la plus répandue est la méthode gravimétrique, qui consiste à peser les échantillons avant et après 24 heures de séchage à 105 °C pour mesurer la teneur en eau pondérale (H_p). Pour obtenir la teneur en eau volumique (H_v), la masse volumique sèche (appelée encore densité sèche ou apparente, D_a) doit également être mesurée à partir des échantillons prélevés ($H_v = H_p \times D_a$). Apparemment simples par le matériel qu'elles exigent (tarière, boîte, balance, étuve), ces méthodes sont cependant lourdes à mettre en œuvre compte tenu des nombreuses répétitions à réaliser, des risques de piétinement du milieu et des sondages souvent difficiles à réaliser selon les sols (taux de cailloux, niveau de sécheresse). Cependant, la méthode gravimétrique reste la méthode de référence des autres modes de mesures de teneur en eau.

Les mesures *in situ* peuvent être réalisées par différents outils comme les humidimètres neutroniques (ou « sondes à neutrons »), la méthode TDR (Time Domain Reflectometry) et les mesures capacitatives. La sonde à neutrons (photo 21), qui reste encore aujourd'hui le meilleur outil de mesure de la teneur en eau du sol, consiste en l'émission de neutrons rapides par une source radioactive. Lors des collisions avec les atomes d'hydrogène contenus dans le sol, ils sont ralentis et deviennent des neutrons lents (thermalisés) qui sont comptés par un détecteur inclus dans la sonde. Le principe de mesure repose donc sur la détection d'hydrogène dont la variation dans les sols agricoles est très directement liée à la variation de la teneur en eau. Cette sonde est déplacée dans un tube d'accès en alliage d'aluminium préalablement installé dans le sol. Le volume de mesure, qui dépend de la teneur en eau (plus il y a d'hydrogène, plus le volume est réduit), est d'environ une dizaine de centimètres et c'est le seul principe de mesure à avoir un tel volume d'introspection. Sa loi de calibration (comptage des neutrons thermalisés *versus* teneur en eau) est une régression linéaire, ce qui implique que l'étalonnage ne requiert que deux séries de mesures (l'une en conditions humides et l'autre en conditions sèches). Lors de la mise en place du tube d'accès, à

la tarière ou à la gouge, des échantillons de sol sont collectés tous les 10 cm pour effectuer une mesure d'humidité pondérale et fournir un premier point d'étalonnage. La mesure de densité peut être effectuée dans le même temps en cas d'utilisation d'une gouge (échantillon peu remanié de volume connu) ou par l'usage dans le même tube d'accès d'un gammadensimètre de profondeur (sa sonde scellée contient aussi une source radioactive spécifique). Ces équipements de référence faisant appel à des sources radioactives, ils sont soumis à des contraintes de sécurité très strictes : seuls quelques centres de recherche et centres techniques continuent d'en posséder.



Photo 2.1. Sonde à neutrons sur son tube d'accès dans une parcelle de sorgho
(© INRAE/C. Dejean).

Les sondes capacitives à corps cylindriques sont utilisées pour mesurer la permittivité diélectrique (K), liée à la propriété du matériau à se polariser sous l'action d'un champ électrique. Dans le sol, trois phases sont présentes avec des permittivités très différentes : phase minérale ($K = 5$ à 8), phase gazeuse ($K = 1$) et phase liquide ($K = 78,5$). L'eau avec sa molécule polaire joue le rôle majeur de la réponse à la variation de la constante diélectrique du sol. La loi de calibration met en relation la teneur en eau volumique et une valeur de fréquence fournie par le capteur. Différents dispositifs sont disponibles, constitués soit d'un seul capteur que l'on déplace dans un tube d'accès non conducteur installé dans le sol, soit de séries de capteurs insérés à demeure dans le même type de tube (ex. : Diviner et Enviroscan Sentek, Trime IMKO, dispositifs Decagon, Delta-T, Spectrum, Aquacheck). Malgré leur intérêt pratique, ces équipements présentent des limitations du fait du faible volume de mesure (distance centimétrique de pénétration du signal dans le sol et faible distance entre éléments de mesure). Ainsi le dispositif de mesure est très sensible à un contact discontinu entre le sol et le tube d'accès avec la présence éventuelle d'espace (donc d'une couche d'air). La qualité de la pose du tube d'accès va donc être essentielle pour ce type de mesure. Par ailleurs, les calibrations proposées sont souvent insuffisamment représentatives de la diversité des types de sols, et une analyse critique des informations fournies peut s'avérer utile (voire une validation avec réétalonnage) ; une attention particulière doit aussi être portée à la prise en compte des couches profondes.

Les sondes de mesure par réflectométrie sont utilisées pour quantifier la teneur en eau par la propagation d'une onde électrique le long de guides dans le sol. La réflectométrie TDR mesure le temps de trajet d'une onde le long de guides d'ondes insérés dans le sol sur des pas de temps très courts, de l'ordre de quelques picosecondes (1 picoseconde = 10^{-12} secondes). La vitesse de propagation de l'onde est déterminée par la constante diélectrique du milieu dans lequel le guide d'ondes est implanté, elle-même influencée par l'humidité du sol. Ces systèmes sont assez onéreux (ex. : TDR-100 Campbell Scientific, TRASE System). Pour réduire le coût des équipements, des sondes FDR (Frequency Domain Reflectometry) ont été utilisées avec des mesures portant sur la modification de la fréquence du signal

(et non directement sur la vitesse de propagation), avec des capteurs dotés de guides d'ondes d'une longueur fixe (ex. : tiges de 10 à 30 cm pour les sondes CS616 et 650 Campbell Scientific, FieldScout Spectrum, Thetaprobe Delta-T). Pour les mesures par réflectométrie comme pour les sondes capacitatives, la zone concernée autour des guides d'ondes dans le sol est là aussi centimétrique, et donc une implantation avec le meilleur contact possible des guides d'ondes avec le sol est indispensable.

Avec l'acquisition de ces données d'humidité du sol au cours du temps, deux types de présentations graphiques sont possibles : soit des profils hydriques en fonction de la profondeur de mesure (figure 2.12), soit des graphes présentant l'évolution de la teneur en eau par couche de sol (figure 2.13).

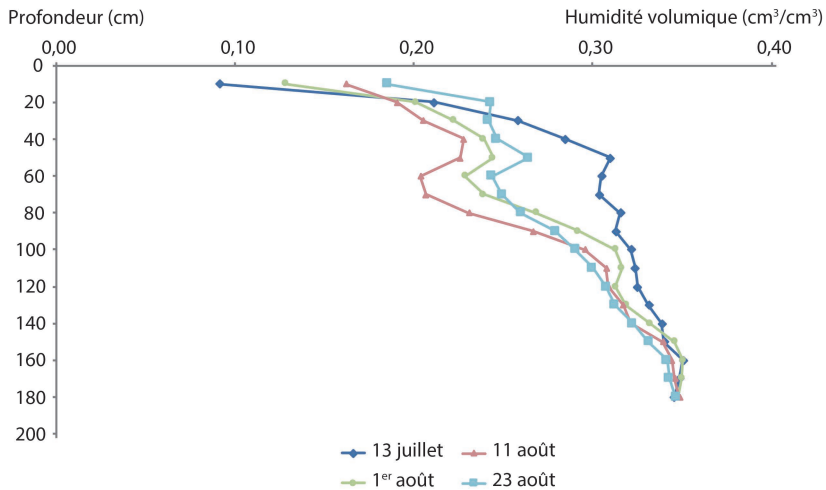


Figure 2.12. Exemples de profils hydriques, réalisés à l'aide d'une sonde à neutrons, à différentes dates en cours de saison sur une culture de soja irriguée (INRAE/UMR G-Eau).

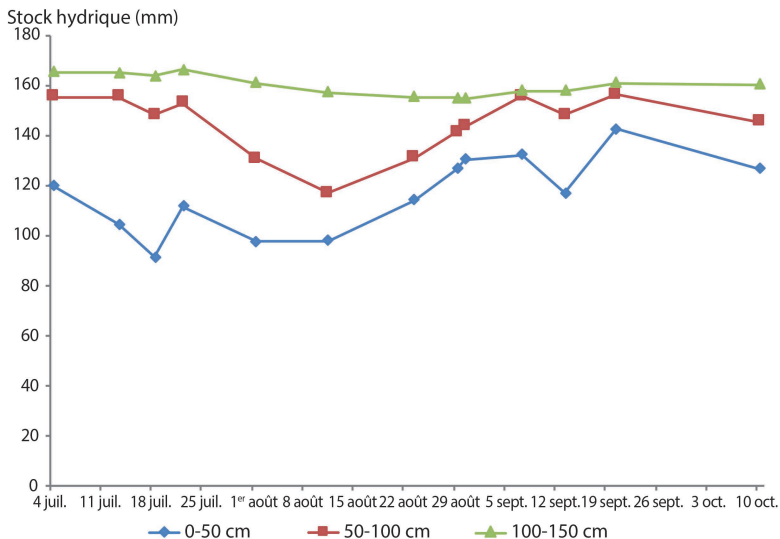


Figure 2.13. Exemple d'évolution au cours du temps des quantités d'eau mesurées par couche de sol (cas d'une culture de soja irriguée en sol profond avec un suivi par sonde à neutrons) (INRAE/UMR G-Eau).

Ces mesures de la teneur en eau du sol peuvent être particulièrement utiles à plusieurs fins :

- pour la conduite tactique des arrosages : la connaissance des réserves en eau du sol en temps réel permet d'orienter la conduite des arrosages grâce à la définition de valeurs seuils de dessèchement acceptables des couches du sol. À la sortie de l'hiver, des mesures permettent de savoir si les réserves en eau du sol, particulièrement en profondeur, ont pu être reconstituées, et de prévoir les arrosages. Ces contrôles nécessitent l'existence de tubages implantés profondément pour dépasser l'enracinement maximal des cultures (jusqu'à 3 m en arboriculture, soit des profondeurs bien supérieures à celles présentées généralement dans les études pédologiques). Pour ce type d'information, des ordres de grandeur sont extrapolables et peuvent être obtenus à partir d'un réseau de références régional. Certains organismes proposent avec l'appui d'un technicien des outils d'interprétation des mesures (par exemple avec des sondes capacitatives) pour la gestion d'un ensemble de parcelles ;
- pour la détermination des niveaux de teneurs en eau caractéristiques du sol : la connaissance de la teneur en eau à la capacité au champ (Hcc) et de la teneur en eau au point de flétrissement permanent (Hpfp) permet d'estimer le réservoir utilisable (RU) du sol. La première est obtenue à partir de suivis après de fortes réhumectations hivernales. La seconde est plus difficile à mesurer, mais elle reste possible à approcher grâce à des suivis pluriannuels et des périodes de forte sécheresse ;
- comme outil de contrôle et de recalage du bilan hydrique en cours de campagne : grâce à l'utilisation combinée des mesures de sonde à neutrons et de tensiomètres, on peut établir directement le bilan hydrique au champ. Ces bilans fournissent une estimation de la consommation en eau de la culture. Ces informations combinées permettent de caler et de valider les données issues des modèles de bilan hydrique.

Outils tensiométriques

La tensiométrie¹² a été mise au point dans les années 1900 aux États-Unis pour des applications géotechniques (contrôle d'humidité des sous-bassements des routes). Dans les années 1970, des agronomes français ont transféré cette technologie au domaine agricole pour estimer la disponibilité de l'eau dans le sol pour les plantes et piloter les irrigations. L'approche tensiométrique consiste à mesurer la force de liaison des molécules d'eau sur les particules de sol : plus le sol est humide, moins l'eau est liée et pourra être extraite facilement par les plantes. Elle fournit des indications universelles, quel que soit le sol, contrairement aux méthodes de mesures de teneur en eau qui requièrent un étalonnage. La relation entre tension et teneur en eau du sol dépend cependant de la texture du sol, notamment du pourcentage d'argile (figure 2.14).

Les premiers tensiomètres utilisés étaient des tensiomètres à eau (photo 2.2) constitués d'une bougie de céramique poreuse surmontée d'un tube rempli d'eau désaérée. La bougie placée dans le sol à une profondeur donnée restitue de l'eau au sol lorsque celui-ci se dessèche. Le réservoir étant étanche, il se crée une dépression qui est mesurée directement sur un vacuomètre (manomètre à dépression), exprimée en centibar (cbar) ($1 \text{ cbar} = 1 \text{ kPa} = 10^{-3} \text{ MPa}$). L'inconvénient du tensiomètre à eau est sa plage de mesure restreinte (80 cbar) et son désamorçage (rupture de la colonne d'eau) précoce, alors que le réservoir utile est loin d'être épuisé.



Photo 2.2. Tensiomètre à eau à lecture directe
(© INRAE/C. Dejean).

¹² Pour plus de détails sur la pose des tensiomètres, se référer à l'annexe numérique ou au guide de Tron *et al.* (2000).

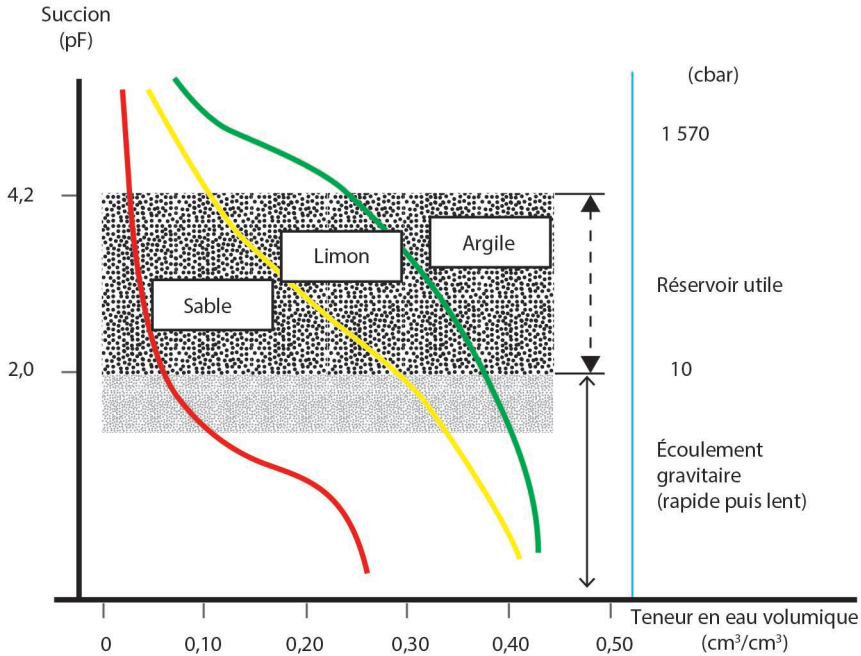


Figure 2.14. Relation type entre succion et teneur en eau volumique pour des sols de type sableux, limoneux et argileux (d'après Mermoud, 2006).

L'automatisation de la relève des données a donné lieu à des évolutions sur le matériel. Des tensiomètres à résistance électrique (photos 2.3 et 2.4) d'un prix très accessible, adaptés aux applications agricoles, côtoient des tensiomètres électroniques avec capteur de pression intégré, utilisés dans d'autres domaines (géotechnique, recherche, métrologie, plus rarement serriculture).



Photo 2.3. Tensiomètre à résistance électrique à connecter à une station d'acquisition automatique ou à un boîtier de lecture (© Sté Irrrometer) ; ce tensiomètre est le plus souvent disponible monté sur un tube PVC pour faciliter son utilisation.



Photo 2.4. Boîtier de lecture des tensiomètres à résistance électrique (© Sté Irrrometer).

Parmi les plus utilisés et les plus répandus, le tensiomètre à résistance électrique, ou tensiomètre Watermark® produit par la société californienne Irrrometer®, repose sur une mesure indirecte de la tension en eau du sol à partir d'une mesure de résistance électrique. La conversion du signal électrique en tension est basée sur une table de correspondance établie par le constructeur et intégrée au dispositif de lecture. Le capteur est composé d'une enveloppe poreuse contenant des matériaux sableux qui se mettent en équilibre avec l'humidité du sol dans lequel il est placé (figure 2.15). Disposé au sommet de la bougie, l'organe de mesure est constitué de deux électrodes et d'une pastille de gypse qui permet de saturer l'ensemble en sulfate de calcium et de rendre les conditions de mesure de la résistance indépendantes des caractéristiques de la solution du sol¹³. Sa plage de mesure s'étend d'une valeur voisine de 0 cbar (sol saturé en eau) à 200 cbar (sol en cours de dessèchement, suivant sa granulométrie). La température influençant la mesure, une correction doit être apportée à partir d'une mesure simultanée de la température de l'horizon où est insérée la sonde. Du fait de sa plage de mesure, le tensiomètre à résistance électrique couvre la gamme de succion correspondant au réservoir en eau facilement utilisable du sol par les plantes (RFU) pour les sols limoneux, sableux et leurs variantes. Pour un sol argileux sans éléments grossiers, il faudrait disposer d'une plage de mesure plus étendue.

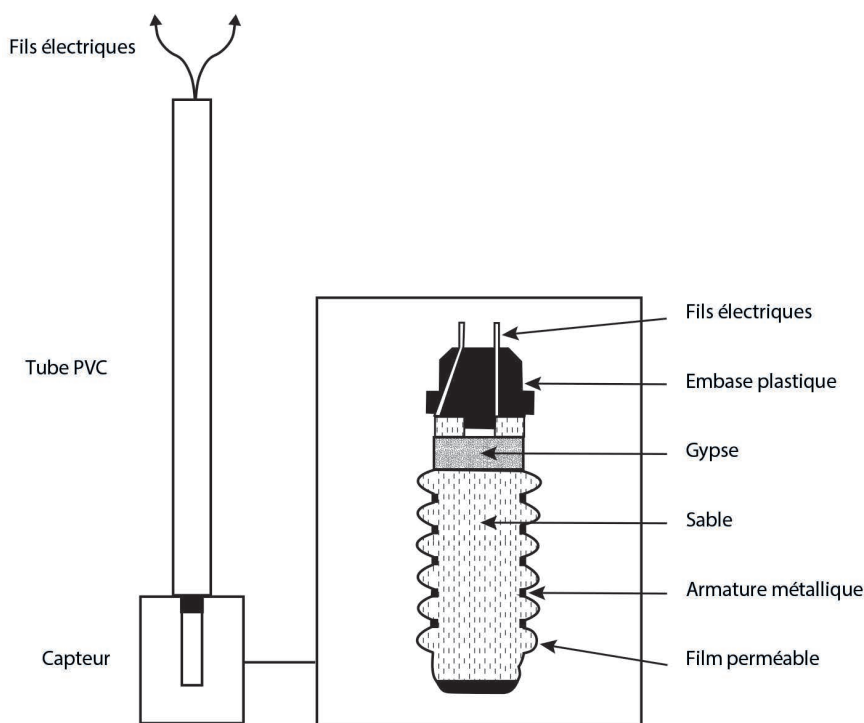


Figure 2.15. Vue schématique d'un tensiomètre à résistance électrique (source : Educagri éditions).

Pour débuter en tensiométrie, il sera préférable d'utiliser la tensiométrie sur une zone de sol homogène avec une culture saine dans le but d'optimiser son irrigation, plutôt que dans des situations particulières à des fins de diagnostic. L'utilisation de la tensiométrie en zone « à problème » est plus hasardeuse, un diagnostic comparatif (zone saine/zone à problème) avec des tensiomètres pourra

¹³ Les caractéristiques de la solution du sol varient notamment lors des apports de fertilisants. Des perturbations peuvent aussi se rencontrer dans les sols salés ou lors d'irrigation avec des eaux chargées en sels.

être utile, mais devrait être précédé d'un diagnostic agronomique plus global intégrant le passé de la parcelle (problématiques liées à la plantation, à l'accumulation d'eau en bas de pente, à l'ombrage d'une haie, etc.).

Une fois le zonage défini, l'emplacement des tensiomètres dans le plan horizontal se raisonne en fonction de trois principaux éléments : le type de distribution de l'eau (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte), le type de culture (arboriculture, maraîchage, grande culture) et les contraintes d'intervention sur la parcelle, pour éviter que le matériel de mesure ne soit exposé inutilement au risque de casse (passage du tracteur, de l'enrouleur, récolte). L'emplacement se raisonne également sur le plan vertical en fonction des horizons pédologiques (texture du sol, structure du sol, zone de compactons), de la densité racinaire (en anticipant son développement s'il s'agit d'une culture annuelle) et de la présence d'eau (bulbe humide, remontée de nappe, etc.). Une fois ces observations réalisées, différentes profondeurs peuvent être intéressantes à équiper : la zone racinaire principale, la zone d'influence du goutteur, la zone d'enracinement profond ou encore la zone de drainage. Idéalement, le creusement d'une ou plusieurs fosses pédologiques permettra de mettre au jour l'environnement dans lequel sera déployée la tensiométrie.

Pour faciliter l'interprétation des données, la qualité de la pose et la multiplication des points de mesure sont essentielles. Le triplement des mesures en un même site de contrôle permet d'écarter une sonde dont les mesures s'éloigneraient trop des deux autres. L'utilisation de trois sondes permet également d'exploiter les valeurs médianes, moins sujettes à des variations locales ponctuelles, et de se prémunir du dysfonctionnement de certains capteurs. Une série de trois sondes tensiométriques par profondeur est donc un minimum pour constituer un jeu de données représentatif de la situation hydrique. La fiabilité de la mesure sur un même point de contrôle dépendra du niveau de dispersion de la valeur à l'instant t entre les différentes sondes, mais aussi de l'évolution des valeurs de chaque tensiomètre. Si les valeurs à l'instant t diffèrent mais que l'allure générale des courbes est commune aux trois répétitions, la donnée tensiométrique médiane pourra être considérée comme fiable et représentative (figure 2.16). Si les mesures de l'un des trois tensiomètres diffèrent en valeur et en tendance, alors il peut être considéré comme non exploitable. Il devra être réimplanté ou doublé par un tensiomètre supplémentaire.

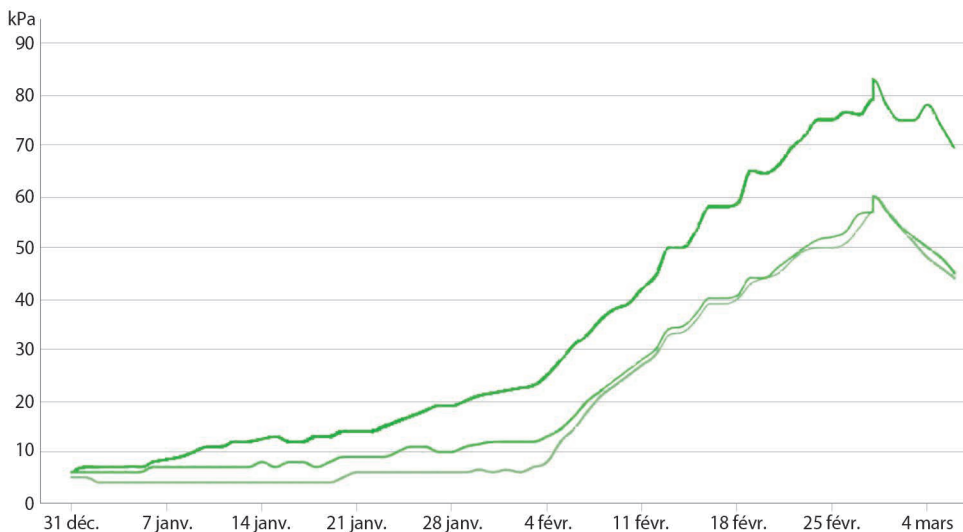


Figure 2.16. Tensiomètres placés à 30 cm de profondeur sur une culture de pistachier (source : SCP AgriData, 2021).

Verticalement, le nombre de points de contrôle de la disponibilité en eau est souvent de deux (zone racinaire principale et zone de drainage), mais peut être porté à trois en ajoutant par exemple une zone de diffusion latérale dans le cas d'une irrigation goutte-à-goutte ou une zone d'enracinement profond. On pourrait également multiplier les points de contrôles au-delà, comme le font d'autres capteurs sol. La plupart des centrales d'acquisition du marché ne proposent pas plus de 6 à 9 ports dédiés aux tensiomètres, ce qui limite de fait le nombre de points de mesures à 2 ou 3. Il existe cependant des centrales d'acquisition spécialisées adaptées pour connecter un grand nombre de tensiomètres.

Une fois le schéma de pose défini, l'emplacement des tensiomètres est piqueté sur le terrain. Il pourra être utile de garder un plan de pose pour les interventions de maintenance. L'outillage de pose se limite à une tarière à mèche spiralée du diamètre du capteur. En sol caillouteux, une barre à mine du même diamètre pourra être utilisée avec une masse. Avant la pose, le fonctionnement du tensiomètre de type Watermark est vérifié. D'une part, la valeur indiquée avant hydratation doit être voisine de 200 cbar et, d'autre part, il est ensuite réhydraté par trempage pendant une quinzaine de minutes dans l'eau, il doit alors indiquer une valeur proche de 0. Le tensiomètre réhydraté est alors praliné d'une boue préparée avec de la terre fine du lieu et de l'horizon de pose ; ce point est essentiel pour qu'il existe un bon contact entre la bougie et le sol (il est primordial d'éviter la présence d'air qui bloque la diffusion d'eau entre la bougie et le sol).

La représentation graphique des données tensiométriques est utile à la fois pour les valeurs numériques obtenues et pour leur évolution dans le temps. Il peut être intéressant d'avoir une relève des données avec un pas de temps horaire pour analyser très finement les phénomènes de diffusion des apports ou l'effet des pratiques culturales (travail du sol, mulch, écimage), mais en général, travailler avec une donnée journalière est suffisant. La représentation graphique devra comporter également les apports d'eau en distinguant pluies et irrigations (figure 2.17).

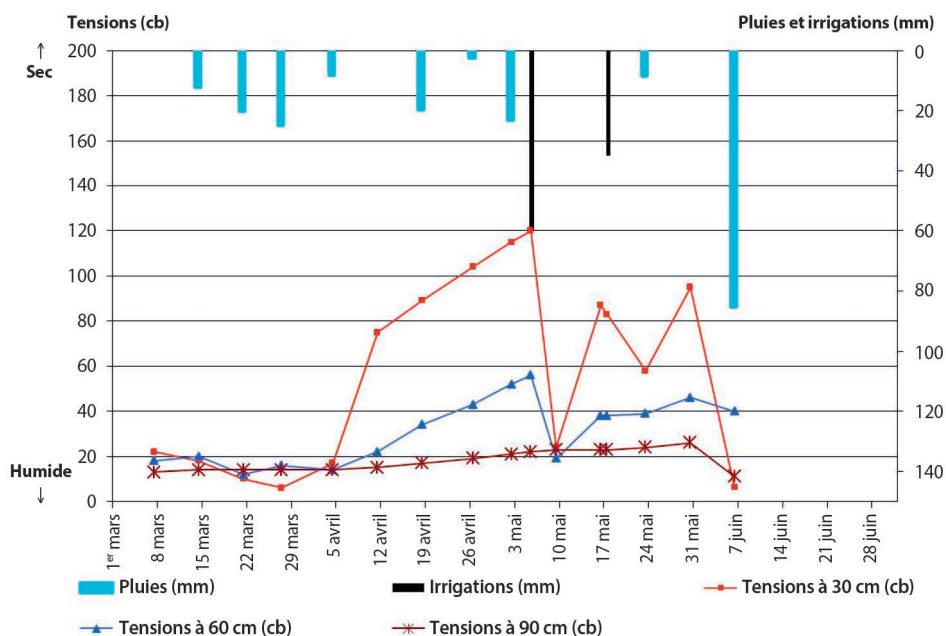


Figure 2.17. Courbes tensiométriques utilisées pour le pilotage des irrigations d'une culture de blé dur (source : SCP, 2011).

Des seuils tensiométriques ont été définis pour faciliter le déclenchement des irrigations. Les valeurs généralement admises, bien que très variables selon les caractéristiques du sol, sont les suivantes :

- 0 à 10 cbar : sol saturé ;
- 10 à 40 cbar : forte disponibilité ;
- 40 à 70 cbar : situation de confort hydrique (pilotage des cultures légumières), mais eau de moins en moins disponible en sol léger (épuisement du réservoir utile très rapide) ;
- 70 à 120 cbar : eau encore disponible pour la plupart des cultures (arboriculture, grandes cultures), sauf en sol léger ;
- 120 à 160 cbar : contrainte hydrique (supportée par les plantes méditerranéennes ligneuses) ;
- 160 à 200 cbar : contrainte hydrique forte (horizon asséché, perte de rendement associée).

Un certain nombre de publications en provenance d'organismes techniques agricoles font état des seuils de référence par culture et par stade. On entend par seuil le niveau de tension qu'il est recommandé de ne pas dépasser pour déclencher une irrigation afin de conserver le potentiel de rendement de la culture.

L'analyse cinétique des données tensiométriques permet de prédire la date à laquelle en l'absence de pluie il sera nécessaire d'intervenir pour éviter de franchir le seuil. Une interprétation dynamique des données permet donc de mieux anticiper les tours d'eau au sein d'une exploitation pour satisfaire les besoins en eau des cultures. Une accélération rapide des tensions appelle à une grande réactivité de la part du producteur : surveillance rapprochée des données, réactivité au champ pour irriguer. Inversement, l'absence d'accélération sur des tensions qui augmentent lentement permet plus de souplesse sur le poste irrigation. Contrairement aux seuils de déclenchement, il n'y a pas dans la littérature de valeurs préétablies pour qualifier la vitesse d'évolution des tensions (cbar/jour). Un accroissement accéléré des tensions lié à un prélèvement racinaire accru est cependant facilement repérable sur une courbe (à condition de bien conserver la même échelle de graduation tout au long de la saison !). Suivant les types de sols, les tensions peuvent croître à une vitesse de 2 à 3 cbar par jour, puis, sous l'influence d'une période chaude, atteindre 10 cbar/j ou plus (en particulier pour les sols sableux). L'augmentation des tensions peut ainsi conduire à une courbe quasi verticale. Dans ce cas, l'assèchement du sol est extrêmement rapide.

En résumé, la tensiométrie est un outil utile et accessible financièrement pour optimiser les irrigations et sécuriser les productions agricoles. Les données acquises permettent d'analyser les interactions entre le sol, le climat, la plante et l'impact des pratiques agricoles (irrigation et travail de sol en particulier) vis-à-vis de la disponibilité en eau du sol. La tensiométrie permet de confirmer la réalimentation du sol par les pluies ou par les irrigations, d'observer le niveau de contrainte hydrique dans la zone racinaire pour déclencher une irrigation avant que la contrainte ne devienne préjudiciable à la culture. Elle permet également d'éviter les pertes d'eau par drainage ou les conduites trop « généreuses » pouvant conduire à l'asphyxie des racines. Bien que d'utilisation facile, la tensiométrie demande de la rigueur pour éviter les erreurs d'interprétation. En cas de doute sur la véracité d'une mesure, rien ne vaut un contrôle empirique de l'état d'hydratation du sol à partir d'un trou creusé à la bêche (avec au minimum examen visuel et réalisation d'un « pâton » à la main). Les données tensiométriques peuvent être complétées utilement par d'autres sources de données issues de capteurs plante, d'outils agro-climatiques ou encore de compteurs d'eau pour suivre les irrigations.

Bilan des mesures basées sur l'état hydrique du sol

Le principal avantage de ces dispositifs est de pouvoir suivre la dynamique de l'eau dans le sol toute l'année, y compris pendant les périodes de repos végétatif ou de faible activité photosynthétique pour estimer notamment l'activité de minéralisation du sol. Un suivi en parallèle de la température du sol est à ce titre très pertinent.

Cependant, l'hétérogénéité des sols, en particulier dans des parcelles viticoles, limite l'extrapolation des résultats. Avant de placer les sondes, il est ainsi recommandé de réaliser une cartographie des sols pour repérer les zones homogènes et placer les capteurs en conséquence. Le développement récent des cartes de résistivité est à ce titre très prometteur. Pour le pilotage à proprement parler de l'irrigation, l'utilisation de sondes dans le sol, avec des couverts non homogènes et des enracinements souvent mal caractérisés, peut conduire à collecter des données peu représentatives et donc trompeuses. La réalisation de fosses pédologiques est un préalable nécessaire à la compréhension des dynamiques eau-sol-racines.

Il apparaît également indispensable de relier les variables hydriques du sol à d'autres facteurs importants. Par exemple, sur la vigne, des journées à très fort déficit de pression de vapeur (VPD) peuvent induire des stress climatiques importants, quelle que soit la teneur en eau du sol. Enfin, particulièrement pour des cultures pouvant s'implanter sur des sols caillouteux, des sondes ne fournissent des informations que sur un faible volume de sol par rapport à ce que le « lent travail » des racines aura pu explorer.

Enfin, il est nécessaire de ne pas confondre la consommation hydrique d'une plante et le seuil de stress hydrique. Des mesures et observations sur plante permettent de repérer des stress et de les relier avec la disponibilité de l'eau dans le sol.

Compte tenu de leur popularité, il convient de rappeler pour ces méthodes trois aspects essentiels :

- les principaux avantages pour le pilotage de l'irrigation :
 - elles fournissent un suivi des recharges hivernales afin d'anticiper le démarrage de la première irrigation,
 - elles permettent de vérifier la bonne diffusion de l'eau d'irrigation,
 - elles constituent des historiques interannuels pouvant servir de référence,
 - elles sont peu coûteuses en utilisant certaines sondes simples ;
- les principales limites :
 - elles révèlent mal la variabilité horizontale et verticale des sols et de l'implantation racinaire. Elles sont de ce fait à préférer pour les plantes à implantation assez superficielle, dans des sols uniformes et peu caillouteux,
 - il n'existe pas de corrélation directe entre teneur en eau dans le sol et niveau de stress en particulier des plantes pérennes ;
- les pistes d'amélioration/précautions :
 - elles requièrent d'utiliser une cartographie des sols, classique ou par résistivité, pour optimiser les emplacements de sondes,
 - il est important de toujours réaliser une fosse pédologique.

Les outils de conduite d'irrigation fondés sur les végétaux

Approche visuelle

L'un des moyens les plus simples et les plus fondamentaux pour évaluer l'état d'alimentation en eau d'une plante consiste à l'observer. Le ralentissement de la croissance végétative est l'une des premières réponses d'une plante à un apport en eau limitant. Ainsi, pour la vigne, les observations portent sur l'évolution des nouvelles pousses et en particulier le méristème apical (ou apex) à l'extrémité des tiges (figure 2.18). Cette méthode a été développée et est utilisée depuis plusieurs années par les principaux acteurs des organisations techniques professionnelles du pourtour méditerranéen (Institut français de la vigne et du vin, chambres d'agriculture, Syndicat des vignerons des Côtes-du-rhône).

L'observation peut se faire de manière systématique, à partir de 30 à 50 apex par parcelle qui sont examinés régulièrement et classés en trois groupes : apex en croissance (stade P), apex en ralentissement ou arrêt de croissance (stade R) et apex en arrêt de croissance (stade C). À partir de ces notations, un indice d'arrêt de croissance (IAC) peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{IAC} = 100/3 \times (1 - \%P + \%R + 2\%C)$$

Une application mobile, ApeX-Vigne, a été développée en 2019 par l'Institut français de la vigne et du vin (IFV) et l'Institut Montpellier SupAgro afin de traduire l'évolution de l'IAC pour la conduite des irrigations.

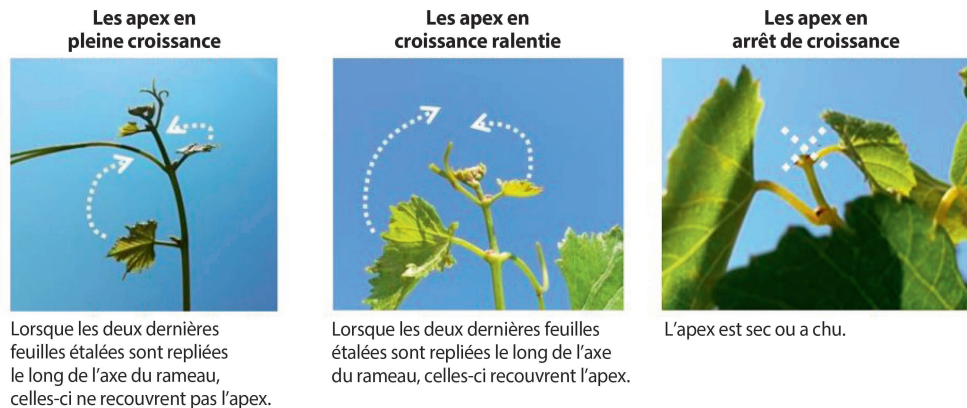


Figure 2.18. Suivi de la contrainte hydrique de la vigne par l'observation visuelle des apex (source : Payan et Pichon, 2020).

Suivi du potentiel foliaire des plantes

Le potentiel hydrique des plantes peut être évalué à l'aide d'une chambre de pression, appareil mis au point dans les années 1960. Le mode de fonctionnement est assez simple : une feuille entière avec son pétiole est placée dans une enceinte fermée et hermétique (la chambre à pression) avec l'extrémité du pétiole dépassant à l'extérieur à travers le couvercle (en maintenant une parfaite étanchéité autour du pétiole). L'air sous pression est lentement libéré dans la chambre. Lorsque la pression sur l'échantillon (feuille) augmente et atteint une valeur suffisante, la sève du xylème sera expulsée des vaisseaux et sera visible sous forme d'une goutte à l'extrémité du pétiole. La pression appliquée lors de l'apparition de la goutte est égale (au signe près) au potentiel hydrique de l'échantillon (figure 2.19).

En raison de leur portabilité, de leur simplicité mécanique et de leur robustesse, associées à une maintenance réduite et à un coût relativement modeste, les chambres à pression sont les dispositifs prédominants pour la mesure du potentiel hydrique en arboriculture et en viticulture. Selon les horaires des mesures et les protocoles choisis, différents potentiels hydriques des plantes peuvent être évalués (Rienth et Scholasch, 2019) :

- potentiel hydrique foliaire, Ψ_{leaf} . C'est la mesure la plus simple, généralement prise à la mi-journée sur une feuille adulte bien exposée au soleil. L'inconvénient de cette évaluation est la fluctuation temporelle en fonction des conditions environnementales (telles que la formation de nuages ou le vent). Cela rend l'interprétation du potentiel hydrique des feuilles comme indicateur des besoins en irrigation souvent insatisfaisante ;
- potentiel hydrique de tige, Ψ_{stem} . La mesure est effectuée en enfermant une feuille qui reste attachée à la plante dans un sac en plastique entouré d'une feuille d'aluminium pendant 45 à 120 min.

De cette façon, la feuille interrompt toute transpiration et équilibre son potentiel hydrique avec le potentiel hydrique de la tige. La mesure du potentiel de la feuille s'effectue ensuite selon le processus décrit ci-dessus en conservant la feuille dans son sachet. L'évaluation du potentiel hydrique des tiges est reconnue comme un moyen de caractériser l'état hydrique d'un pied entier au cours de la journée et est supposée être fortement corrélée à la transpiration de la plante. Il s'agit d'une mesure précise permettant de mettre en évidence de légers déficits en eau, sur des sols à profil d'humidité hétérogène en interaction avec l'enracinement. La mesure est généralement effectuée entre 13 h et 16 h 30, lorsque les valeurs atteignent un minimum. Le potentiel hydrique de tige est stable et sensible par opposition au potentiel hydrique foliaire. Cela signifie que 4 à 6 feuilles ensachées suffisent pour obtenir une information correcte sur l'état hydrique d'une parcelle dans des situations homogènes ;

- potentiel hydrique foliaire de base, Ψ_{PD}^{14} . Il est généralement mesuré à la fin de la nuit, juste avant le lever du soleil, sur les feuilles adultes. On admet que les plantes et le sol s'équilibrent lorsque le jour tombe et que la plante ferme ses stomates et arrête de transpirer. Le Ψ_{PD} atteint son niveau maximum quotidien, dit de base, avant l'aube (Améglio *et al.*, 1999) et reflète le niveau d'humidité du sol ; il peut donc indiquer le niveau de stress hydrique. Cependant, le Ψ_{PD} reflète un équilibre avec la couche de sol la plus humide, indépendamment de son épaisseur, et peut conduire à mésestimer la disponibilité en eau du sol ; l'interprétation de la mesure peut aussi être remise en cause en été, en raison de la brièveté de la période d'obscurité ou du fait de la transpiration nocturne en cas de déficit élevé de pression de vapeur atmosphérique.

Ψ_{PD} et Ψ_{stem} sont les potentiels hydriques les plus largement utilisés dans les études écophysiologiques sur vignes. Ψ_{stem} est considéré comme un indicateur présentant les meilleures corrélations avec la transpiration de la vigne par certains auteurs, mais contesté par d'autres. De nombreux travaux sur le déficit en eau ont été menés avec différentes variétés, types de sol, climats et systèmes de gestion pour évaluer les réponses physiologiques des plantes et leurs conséquences sur la qualité et le rendement des baies. Ils ont permis de définir des seuils de déficit en eau communément acceptés pour optimiser la qualité et le rendement en fonction des objectifs de production ; les valeurs correspondantes sont détaillées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Relations entre les valeurs de potentiel hydrique foliaire (Ψ) et le niveau de confort hydrique de la vigne.

	Ψ_{PD} (MPa)	Ψ_{stem} (MPa)	Ψ_{leaf} (MPa)
Confort hydrique	$> -0,2$	$> -0,6$	$> -0,9$
Léger stress hydrique	$-0,2 \text{ à } -0,3$	$> -0,6 \text{ à } -0,9$	$-0,9 \text{ à } -1,1$
Stress hydrique modéré	$-0,3 \text{ à } -0,5$	$-0,9 \text{ à } -1,1$	$-1,1 \text{ à } -1,3$
Stress hydrique modéré à sévère	$-0,5 \text{ à } -0,8$	$-1,1 \text{ à } -1,4$	$-1,3 \text{ à } -1,4$
Stress hydrique sévère	$< -0,8/0,9$	$< -1,4$	$< -1,4$

Des études récentes publiées sur la segmentation hydraulique de différents organes de la plante ont toutefois soulevé des questions importantes quant à l'interprétation de la mesure du potentiel hydrique des feuilles dans des conditions extrêmes, telles que des déficits de pression de vapeur (VPD) élevés et/ou des événements de cavitation causés par des stress hydriques plus marqués.

¹⁴ Ψ_{PD} , utilise les initiales du terme anglais *predawn*, avant l'aube.

L'interprétation de cette mesure non continue, en particulier en cas de répétitions d'épisodes climatiques extrêmes (journées caniculaires), est donc souvent difficile et requiert l'expertise d'un conseiller technique.

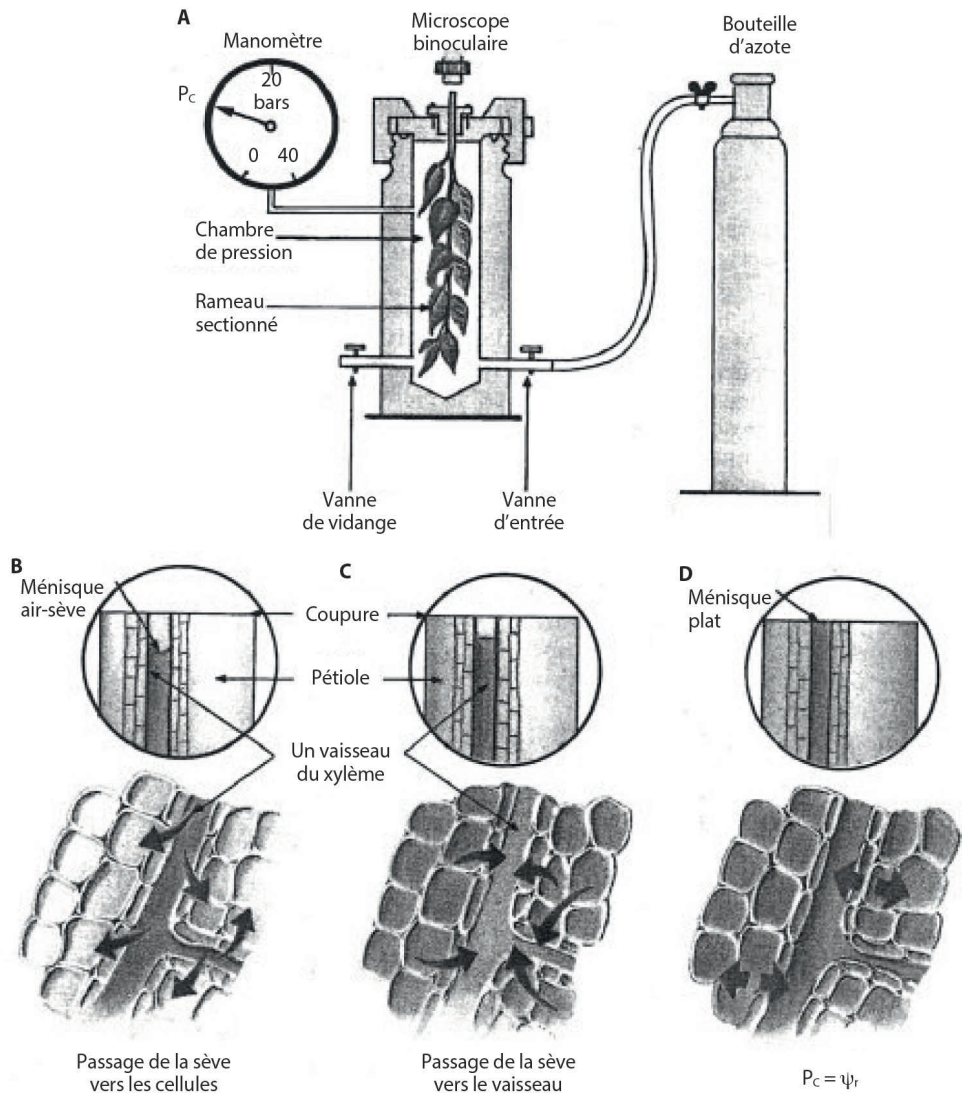


Figure 2.19. Illustration du principe de la mesure de la tension de la sève par la méthode de la chambre de pression (source : Cruziat et al., 2001).

A : chambre à pression. Au fur et à mesure que la pression de la chambre (P_c) augmente, le ménisque air-sève, initialement sous la coupe (B), s'aplatit (C) et remonte vers la coupe (D).

Mesure de conductance stomatique et d'échange gazeux de la feuille

La fermeture stomatique fait partie des réactions physiologiques les plus pertinentes et les plus précoces de la plante face au stress hydrique. L'évolution de la conductance stomatique (g_s) a donc été identifiée comme un paramètre intéressant pour alerter de l'apparition d'une contrainte hydrique

(Urban *et al.*, 2017). Cette mesure est réalisée à partir soit d'un capteur d'humidité (poromètre), soit d'un analyseur de gaz infrarouge (IRGA)¹⁵ pour mesurer l'émission de vapeur d'eau et de CO₂ (avec l'IRGA) au niveau de la feuille.



Photo 2.5. Poromètre (à gauche, © INRAE/C. Dejean) et analyseur IRGA (à droite, © Sté LI-COR).

Les poromètres (photo 2.5) disposent d'un godet pouvant être fixé sur une feuille. L'air dans le récipient est séché et le temps nécessaire à la transpiration pour amener l'humidité à un point prédéterminé est enregistré. Cet intervalle de temps est ensuite utilisé pour déterminer le taux de transpiration et la conductance stomatique. Les poromètres dépendent fortement de procédures d'étalonnage fréquentes et les mesures sont souvent biaisées par les différences entre les températures des feuilles et de l'atmosphère et ont donc été progressivement remplacées par des IRGA (photo 2.5) au fil des années en raison de leur plus grande fiabilité et précision. De tels outils sont assez coûteux, parfois complexes à utiliser et nécessitent des étalonnages réguliers.

Mesure des microvariations de diamètre d'un organe

Les dendromètres sont des appareils qui permettent de mesurer les microvariations du diamètre d'une branche ou d'un tronc (photo 2.6). Ces variations peuvent informer sur la croissance de la plante et son état hydrique, puisque l'expansion et la contraction des tissus sont liées aux variations de la teneur en eau et au potentiel de turgescence des cellules. Ces appareils fournissent ainsi une information indirecte sur les flux de transpiration de manière continue et non destructive.

Les premiers appareils ont été développés dans les années 1970 aux États-Unis pour détecter des mouvements de diamètre de branches de l'ordre de quelques micromètres. Ils sont constitués d'un capteur de



Photo 2.6. Illustration d'un dendromètre positionné sur des branches ou tiges de petit diamètre (© ES France, <https://www.es-france.com/9229-dendrometre-arbre-et-plante-petit-diametre-dd-s1-et-dd-s2.html>).

¹⁵ IRGA : *infrared gas analyser*, appareil qui mesure l'absorption du rayonnement infrarouge par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

déplacement linéaire LVDT (*linear variable differential transformer*) et d'un support métallique en Invar (alliage fer-nickel à très faible coefficient de dilatation) permettant de fixer le capteur sur l'élément à mesurer (tige, branche ou fruit).

Les variations de diamètre des tissus végétaux reflètent une combinaison de quatre phénomènes : la croissance radiale irréversible, l'hydratation et la déshydratation des cellules vivantes, l'expansion et la contraction thermique (considérés comme très faibles), et l'expansion des éléments conducteurs morts due à l'augmentation et au relâchement des tensions internes (Daudet *et al.*, 2005).

Au lever du jour, lorsque le processus de transpiration démarre, une tension se crée dans le xylème entre la surface évaporative des feuilles et les différents organes du végétal. Une partie de l'eau stockée dans les tissus pendant la nuit est alors libérée pour répondre rapidement à la demande évaporative et éviter d'attendre la remontée d'eau par les racines, qui intervient plus tard. Ce processus de déshydratation affecte chaque organe qui stocke de l'eau, de sorte que le diamètre baisse dans tous les tissus du végétal : tige, branches, racines, feuilles et fruits.

Dès le début de l'après-midi et durant la nuit, c'est l'inverse qui se produit avec la baisse de la demande évaporative et la réhydratation des tissus. Si le sol était suffisamment hydraté, les tissus récupèrent leur turgescence initiale et peuvent exprimer une croissance nette. Mais lors d'un déficit hydrique, l'ampleur de la contraction diurne augmente puisqu'il n'y a pas assez d'eau disponible au niveau des racines pour tamponner la demande évaporative. Si la sécheresse s'installe et que la demande évaporative est très importante, la croissance journalière ne s'exprime plus, voire devient négative.

La figure 2.20 illustre la perte de diamètre journalière plus importante en situation de déficit hydrique qu'en condition contrôlée. Les données présentées montrent deux journées successives avec une demande évaporative différente (E_{To}). Différents indices peuvent être fournis par ces courbes : le diamètre quotidien maximal et minimal (notés respectivement MXTD et MNTD dans la figure 2.20) ; l'amplitude de croissance diurne (MDS) et le taux de croissance nette (TGR). Ces différents indicateurs, utilisés de façon complémentaire, permettent de suivre le confort hydrique des plantes et de piloter les irrigations. Par exemple, si le taux de croissance journalier est faible et peut faire suspecter un manque d'eau, une amplitude de croissance diurne importante permet de confirmer ce diagnostic.

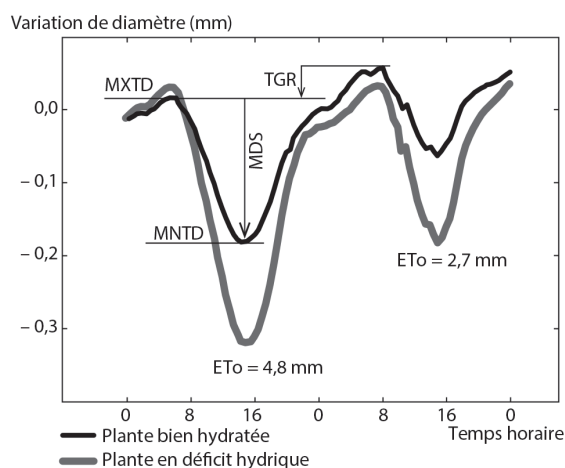


Figure 2.20. Fluctuations quotidiennes du diamètre du tronc pour un prunier bien irrigué (courbe noire) et pour un prunier en déficit hydrique (courbe grise), sur deux jours (d'après Ortuño *et al.*, 2010).

MXTD : diamètre quotidien maximal ; MNTD : diamètre quotidien minimal ;
MDS : amplitude de croissance diurne ; TGR : taux de croissance nette.

De nombreux travaux ont été réalisés sur différentes cultures fruitières et témoignent d'un intérêt de la dendrométrie pour le pilotage de l'irrigation des pêchers, pommiers, amandiers, citronniers ou encore oliviers. Plus récemment, des applications sur lavandin ont été testées dans le sud-est de la France (Lamacque *et al.*, 2020) et ont montré une bonne relation entre le potentiel hydrique des feuilles et le diamètre des branches. Ces travaux se sont principalement intéressés à la réponse du lavandin face à des stress extrêmes et présentent de belles perspectives pour le pilotage de l'irrigation.

Sur la vigne, les quelques travaux réalisés mettent en évidence des difficultés ou peu de corrélation avec l'état hydrique de la plante. La dendrométrie peut être utile pour détecter un stress modéré tôt dans la saison, mais l'intensité du stress ne peut pas être quantifiée. Des relations entre des indicateurs issus des variations de diamètre de tronc et le potentiel hydrique de tige et de base ont été obtenues avant véraison, mais pas après véraison, remettant en question l'intérêt de la mesure pour le pilotage de l'irrigation de la vigne.

Dans tous les cas, les stratégies de pilotage de l'irrigation sont à adapter à chaque culture : détermination des seuils de stress, croissance souhaitable, maximale, ou au contraire mise en évidence de périodes végétatives où l'on peut souhaiter réduire la croissance pour un objectif de qualité.

Pour résumer, les principaux avantages de la dendrométrie sont les suivants :

- la dendrométrie permet de suivre la réponse des végétaux aux conditions hydriques du sol et de l'atmosphère ;
- les mesures sont continues et non destructives ;
- l'enregistrement et la transmission des données peuvent être automatisés ;
- les capteurs sont relativement fiables, robustes et faciles à installer. La maintenance est également facile à réaliser ;
- les stress hydriques, y compris modérés, sont détectés rapidement et précocement.

Et les principaux inconvénients sont :

- les indicateurs issus des dendromètres sont sensibles à différents facteurs comme l'âge de la plante, sa taille, son stade phénologique ou encore sa charge en fruits ;
- les résultats peuvent être difficiles à interpréter lors de journées pluvieuses en raison de la nature hygroscopique des tiges ;
- les oiseaux, insectes, gouttes de pluie peuvent perturber le capteur et brouiller les mesures ;
- les amplitudes de température peuvent induire des variations de diamètre en raison de la dilatation thermique des tissus ;
- l'interprétation des résultats peut être trompeuse en raison des autres facteurs limitants qui touchent les végétaux : attaques de bioagresseurs, carence en éléments minéraux, sénescence naturelle des branches, etc. ;
- la variabilité inter-plants peut limiter la représentativité des mesures.

De nombreux modèles de capteurs fiables et robustes sont aujourd'hui disponibles sur le marché et opérables avec des stations connectées. De nombreux travaux de recherche terminés ou en cours ont permis la mise au point d'indicateurs et de seuils de stress pertinents pour différentes espèces. L'interprétation de ces indicateurs peut toutefois être plus ou moins évidente en fonction des nombreux autres facteurs qui affectent la croissance des végétaux. L'automatisation des irrigations sur la base de capteurs dendrométriques est également difficile compte tenu de l'hétérogénéité interindividus et intraparcellaire. C'est pourquoi l'interprétation des résultats est toujours facilitée lorsque ces indicateurs sont couplés avec d'autres outils, comme la tensiométrie, les capteurs flux de sève, ou encore des informations sur l'hétérogénéité intraparcellaire (images aériennes, cartographie des sols).

Mesure de débit de sève

Le flux de sève brute à l'intérieur du xylème assure le transport de l'eau et des nutriments des racines aux tiges et aux feuilles, où l'eau est transpirée par les stomates. Le suivi de la dynamique du flux de sève des plantes peut donc fournir des informations fondamentales sur le fonctionnement hydraulique de la plante dans un environnement donné. Les mesures de débit de sève sont notamment utilisées pour surveiller l'état hydrique de la vigne et gérer l'irrigation des vignobles. La méthode pour estimer le flux de sève la plus appropriée au pilotage de l'irrigation est la méthode d'équilibre thermique de la tige (Scholasch, 2018). Un manchon chauffant est enroulé autour du bois et de la chaleur est fournie uniformément et radialement à travers une section de la tige (figure 2.21). Un bilan de chaleur, qui dépend du débit de sève, est ensuite établi en utilisant des thermocouples. En absence de flux de sève, l'écart de température mesuré entre les deux sondes est maximal. À l'inverse, lorsqu'il y a un flux de sève dans l'arbre, une partie de la chaleur fournie par l'élément chauffant est absorbée par l'eau et libérée par convection. Plus le flux de sève sera important, plus le différentiel de température entre les sondes sera faible.

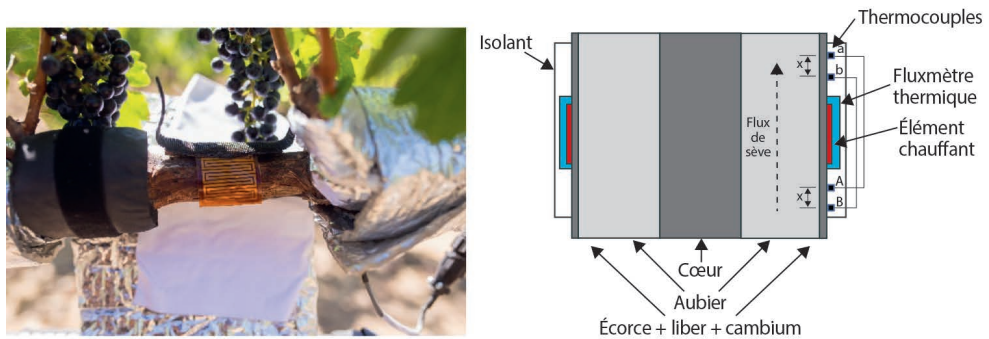


Figure 2.21. Illustration d'un capteur de flux de sève installé sur vigne (source : SCP/Fruition Sciences) et schéma du principe de mesure (source : Saurin et al., 2014).

Ces méthodes permettent une mesure de la transpiration avec une erreur de l'ordre de 10 %, voire inférieure (Saurin et al., 2014). Comme ces techniques sont basées sur des mesures de températures, elles peuvent de ce fait être perturbées par des modifications rapides de l'environnement thermique. Une bonne isolation du système contre le rayonnement solaire direct ainsi que l'éloignement du capteur par rapport à la surface du sol, sujette à de fortes amplitudes thermiques, permettent de fiabiliser ces mesures. L'installation elle-même sur la vigne peut s'avérer délicate, car l'irrégularité des sections conductrices des troncs est accentuée par les plaies de taille réalisées au moment de leur formation. En revanche, en arboriculture, l'installation est généralement plus simple. Aujourd'hui, plusieurs systèmes de mesure sont présents sur le marché, intégrant pour certains des systèmes d'acquisition et de transmission sans fil de l'information (Dynamax, ICT International, Advanced Measurements and Controls Inc, Tranzflo NZ Ltd, Ekomatik, UP-GmbH). Une solution commerciale pour la mesure fine de l'état hydrique de la vigne est proposée par la société Fruition Sciences.

Les flux de sève mesurés quotidiennement montrent souvent une hausse des prélèvements pour atteindre un pic au midi solaire (figure 2.22). En cas de baisse de la disponibilité de l'eau, le pic de transpiration interviendra plus tôt dans la journée, la transpiration de la journée sera – à demande climatique égale – moins forte. Si le stress hydrique se prolonge, le niveau de transpiration devient presque nul (figure 2.23).

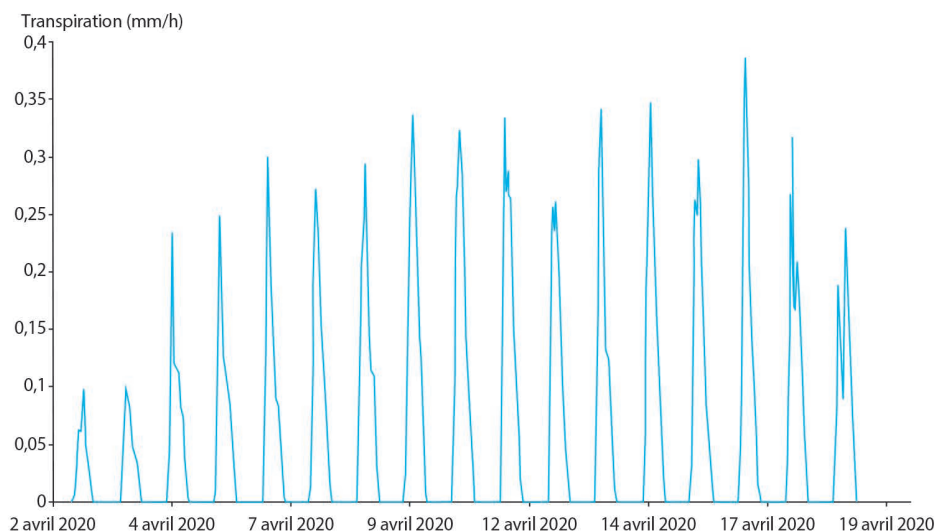


Figure 2.22. Chronique du flux de sève enregistré sur amandiers lors de la première quinzaine d'avril (source : SCP, 2020).

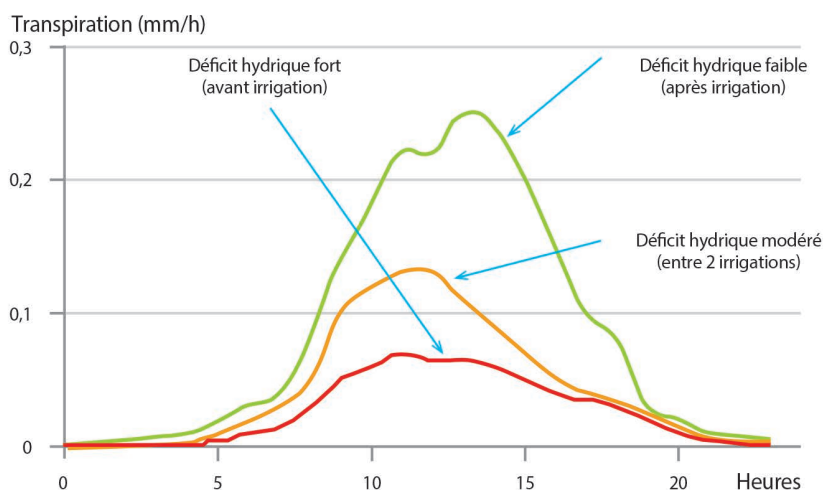


Figure 2.23. Courbes de transpiration mesurées avant, après ou entre deux irrigations pour une demande climatique constante (source : Fruition Sciences, 2010).

C'est en comparant la transpiration potentielle et la transpiration effective qu'on peut qualifier le niveau de stress que la plante est en train de subir. L'utilisation de ces valeurs de transpiration permet ainsi de déterminer des seuils de stress hydriques acceptables en fonction des différents stades de la plante. En fonction du calendrier de la plante et des objectifs de production, le conseiller pourra alors déterminer les seuils à ne pas dépasser pour éviter des stress hydriques trop marqués à des périodes critiques pour le rendement, la qualité ou la sauvegarde du capital végétal.

En outre, cette approche permet de distinguer l'effet d'un stress hydrique (conséquence d'une absence d'eau dans le sol) d'un stress climatique (trop forte demande climatique dans un air chaud et sec), et permet ainsi de piloter avec beaucoup de finesse l'irrigation.

L'intérêt de cette mesure du flux de sève est donc :

- la finesse de la mesure tout au long de la saison, qui traduit le fonctionnement en temps réel de la plante et permet ainsi de piloter très finement les irrigations ;
- la détermination des indices culturaux (notamment k_{cb}) par une mesure directe ;
- l'anticipation de l'apparition du stress hydrique : l'entrée dans le stress hydrique se fait de manière progressive et peut se mesurer bien avant l'apparition de symptômes observés visuellement (chutes des feuilles ou ralentissement de croissance par exemple).

Les inconvénients sont cependant réels :

- l'installation est sensible et nécessite plusieurs maintenances dans l'année ;
- un fort niveau d'expertise pour le contrôle de la donnée est nécessaire ;
- la représentativité du ou des points de mesure dans une exploitation doit être raisonnée avec finesse pour tirer des enseignements pour les parcelles non équipées.

Les outils basés sur des méthodes atmosphériques

La consommation d'eau à l'échelle d'une parcelle peut être estimée en évaluant l'évapotranspiration totale de la plantation (ETR) à l'aide de mesures atmosphériques. Diverses techniques sont disponibles pour l'évaluer dans sa globalité, sans décomposer l'ETR entre la transpiration de la culture et l'évaporation du sol. Elle peut être obtenue à l'aide de mesures fondées sur la méthode de covariance tourbillonnaire et la méthode du bilan énergétique du ratio Bowen (Li *et al.*, 2008). Leur principe est basé sur le bilan énergétique total.

Ces techniques sont toutefois complexes et nécessitent des capteurs coûteux (Drexler *et al.*, 2004). L'utilisation de méthodes basées sur l'atmosphère pour améliorer les stratégies d'irrigation des vignobles est une approche prometteuse, mais elles sont pour le moment principalement utilisées à des fins de recherche.



Photo 2.7. Vignoble contrôlé avec le système EC avec anémomètre sonique utilisé pour les mesures de covariance tourbillonnaire, ou eddy covariance EC (source : Fruition Sciences).

Les outils basés sur des approches spatialisées

Cartes de résistivité des sols

Dans l'optique de mieux connaître le réservoir utile du sol et d'ajuster les volumes d'eau apportés au sein de la parcelle, des méthodes de cartographie par résistivité électrique ont été utilisées par des pédologues depuis une trentaine d'années. Ces techniques consistent à mesurer d'une façon quasi continue la résistivité, c'est-à-dire la capacité d'un sol à laisser passer le courant électrique. Les résultats permettent d'estimer les hétérogénéités du sol liées à des différences de texture, de teneur en CaCO_3 , de présence d'éléments grossiers ou encore de nature et profondeur du substrat (figure 2.24).

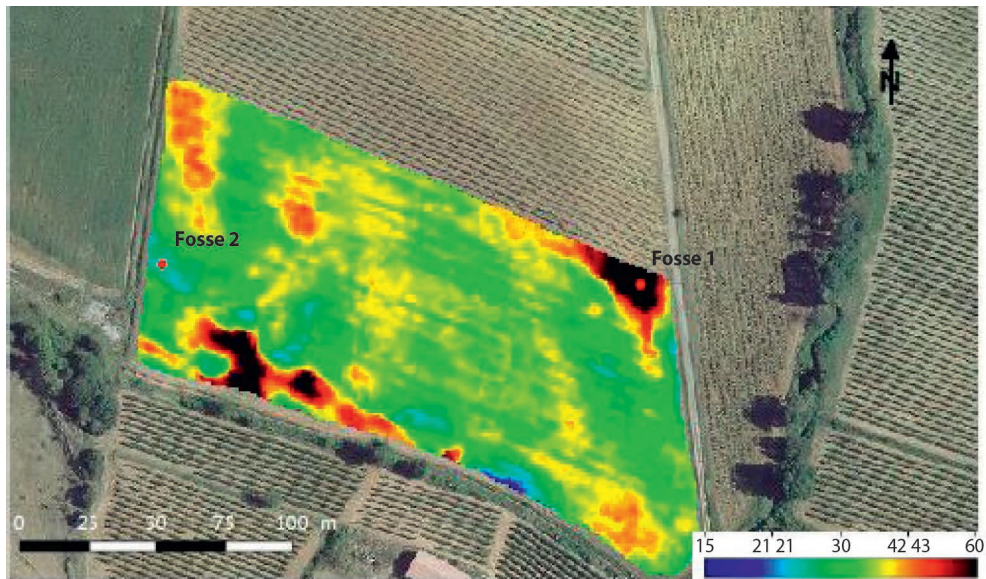


Figure 2.24. Illustration d'une carte de résistivité et des emplacements de fosses définies par rapport aux valeurs extrêmes (source : SCP, données Geocarta).

Couplées à d'autres mesures réalisées à des points précis (analyses de sol physico-chimiques), ces cartes de résistivité permettent ensuite d'estimer la variabilité spatiale du réservoir utile du sol grâce à l'utilisation de règles de pédotransfert. Les résultats peuvent alors servir à la mise en œuvre d'une irrigation de précision en modulant les apports d'eau ou de fertilisants au sein des parcelles.

La méthode présente l'avantage d'être fiable, robuste et non destructive. Sa mise en œuvre s'appuie sur un large choix de dispositifs dont les configurations et parfois même la mécanisation permettent de prospecter des surfaces importantes rapidement ou encore d'investiguer plusieurs profondeurs (photo 2.8).

Cependant, l'interprétation des mesures se complique quand plusieurs propriétés du sol sont susceptibles de varier simultanément, ce qui est un cas fréquent. Non seulement une variation de résistivité électrique peut avoir plusieurs sources, mais l'effet de la variation d'un paramètre pédologique sur la résistivité peut aussi se trouver atténué par le changement concomitant d'un autre paramètre ayant un effet opposé sur la résistivité. Enfin, plusieurs approfondissements sont nécessaires pour valider les règles de pédotransfert permettant de généraliser des cartes de RU à partir des cartes de conductivité pour différentes textures et différents types de sol.



Photo 2.8. Exemple d'un système tracté utilisé pour les mesures de résistivité à grande échelle spatiale (© Geocarta).

Des échantillonnages basés sur des cartes de résistivité peuvent permettre de trouver une équivalence entre la résistivité d'un sol et le réservoir utile.

L'établissement de ces cartes permet :

- en amont d'une plantation, de prendre en compte la variabilité du sol pour l'installation de systèmes d'irrigation de manière différenciée, ou pour le choix des variétés les plus adaptées ;
- en phase d'exploitation, lors de l'installation de capteurs de pilotage de l'irrigation, de cibler les zones à enjeux en fonction des objectifs de production et des paramètres limitants : on peut ainsi souhaiter équiper les zones à plus faible réservoir utile pour alerter sur le début du manque de disponibilité en eau, ou au contraire se mettre dans des zones à fort risque d'asphyxie ;
- une modulation de l'irrigation : en grandes cultures, sous pivots par exemple, des dispositifs de modulation intraparcellaire peuvent être installés sur le matériel d'irrigation. Le pilotage des apports prendra en compte la carte de modulation des sols pour moduler les apports.

Potentiel de l'imagerie optique

Plusieurs travaux de recherche ont démontré que l'imagerie optique à haute résolution, à partir de satellites d'observation de la Terre ou de drones, permet de fournir des informations très pertinentes sur l'occupation du sol, la cartographie des surfaces irriguées et l'état des cultures en place (stades phénologiques, contenu en eau du sol et des plantes, etc.).

La cartographie des assolements est basée sur l'analyse de la signature spectrale des couverts qui est fonction de la culture, de son stade de développement et des stress subis (Inglada *et al.*, 2016). Ainsi, l'utilisation de mesures de réflectances multitemporelles (acquises à différentes dates) permet de discriminer les cultures qui ont des calendriers culturaux et des comportements spectraux (liée à leur activité physiologique) différents. L'obstacle méthodologique majeur provient de la difficulté à

identifier les signatures spectrales propres de chaque culture qui sont modifiées dans le temps et dans l'espace par les différences pédoclimatiques (sol, pente, exposition) et les pratiques agricoles (irrigation, protection phytosanitaire, fertilisation).

Plus récemment, d'autres travaux ont montré que l'utilisation d'images radar combinées aux images optiques permettait de détecter les surfaces irriguées à l'échelle d'un territoire. Des résultats intéressants ont été cartographiés dans le sud-ouest de la France sur cultures d'été (Demarez *et al.*, 2019), et des résultats prometteurs ont été obtenus en conditions méditerranéennes sur vigne (Bourrières, 2020). La chaîne de traitement IOTA2 (Infrastructure pour l'occupation des sols par traitement automatique incorporant les *orfeo tool box Applications*) a été développée par le Centre d'études spatiales de la biosphère (CesBio) pour utiliser des séries temporelles d'images Landsat-8, Sentinel-1 et Sentinel-2. Elle peut être exploitée pour produire des cartes d'occupation des sols ainsi que des cartes de parcelles irriguées.

Ces données satellites permettent également de caractériser la végétation à travers différents indicateurs de suivi au cours du temps. Ces indicateurs sont définis par rapport à la dynamique de la biomasse (NDVI, GNDVI, EIV2), de l'activité chlorophyllienne (NDRE, MCARI), de l'humidité du sol (IB) ou encore de la végétation (NDWI). Ils varient dans le temps et dans l'espace et peuvent alerter sur l'entrée en stress hydrique d'une parcelle à un moment donné. Combinés à des observations, des mesures de recalage au sol et des prévisions météo, ces indicateurs spectraux peuvent permettre de proposer aux irrigants des informations sur le pilotage des irrigations. Le concept a déjà été testé localement dans le sud-ouest de la France sur du maïs et dans la région de Marrakech sur du blé, et est en cours d'amélioration notamment à travers une meilleure détection du stress hydrique par imagerie thermique et des irrigations réelles par imagerie radar (Battude *et al.*, 2017).

Exemples de conduite d'irrigation en fonction des objectifs

Cas des cultures annuelles

Le pilotage conjoint de l'irrigation et de la fertilisation est primordial pour des cultures légumières comme la tomate. Un exemple est présenté dans un complément numérique.

Pour les grandes cultures, que ce soit pour une irrigation de complément, comme dans le cas du blé tendre, du blé dur ou du sorgho, ou pour une irrigation sur l'ensemble du cycle, pour le maïs ou le soja notamment, le pilotage des apports a un rôle clé pour atteindre les objectifs de production, au niveau du rendement et de la qualité des récoltes, et de valorisation de l'eau utilisée. Des illustrations sont proposées dans les compléments numériques.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Cas des cultures pérennes

Les plantes pérennes présentent des spécificités qui conditionnent de manière assez marquée la mise en œuvre de l'irrigation. Cette dernière va influencer la production de manière complexe et avec des effets parfois difficiles à mesurer. Son effet concerne entre autres : la croissance racinaire et l'implantation à long terme de la culture, la construction des vaisseaux de transport de la sève et donc la capacité à long terme de la plante à résister à la sécheresse. Les conséquences sont de fait interannuelles : un stress hydrique peut impacter la production sur plusieurs années.

Le changement climatique, les impératifs de rentabilité économique et de régularité de la production conduisent de plus en plus d'espèces traditionnellement peu ou pas irriguées à l'être. On citera les cas emblématiques de la vigne, de l'olivier, de l'amandier, notamment dans les régions méditerranéennes du sud de la France.

Il est donc encore plus impératif que pour le pilotage des irrigations des plantes annuelles de fixer une stratégie d'irrigation et d'en mesurer les effets sur les performances physiologiques de la plante et la fructification à court et long terme en lien avec son influence sur :

- l'architecture du végétal et sa capacité à résister – ou non – à la sécheresse : profondeur d'enracinement, phénomènes impactant la circulation de la sève (cavitation) ;
- les mécanismes naturels d'adaptation à la sécheresse des végétaux : par exemple la régulation stomatique ;
- le rendement et la qualité de la production pour l'année en cours et dans les années à venir.

Le calendrier de la plante et du fruit est à prendre en compte systématiquement pour chaque espèce pérenne en tenant compte de la sensibilité au stress et des dynamiques des intrants « eau » et « minéraux » en parallèle avec les objectifs de production. La détermination d'un calendrier de la plante et des fruits est un prérequis qui permettra de caler les irrigations, en fonction des stades culturaux, en tenant compte des périodes où le stress hydrique doit être favorisé ou au contraire banni. Les stratégies seront ajustées en fonction des objectifs de production : rendement, qualité, etc.

Ce calendrier physiologique des plantes s'appuiera au minimum sur :

- le calendrier des feuilles : quelle croissance ? Quels facteurs déterminent le pic de potentiel de transpiration ?
- le calendrier des fruits : fleurs, jeunes fruits, maturité. Chaque période se caractérise par une sensibilité spécifique vis-à-vis du stress hydrique.

Pour chaque stade, on veillera à considérer en parallèle les dynamiques de l'intrant « eau » et des intrants minéraux. Une appropriation des grandes phases du cycle annuel des cultures pérennes par les producteurs facilitera une utilisation efficace des techniques de pilotage.

En outre, la dynamique de l'eau dans le sol hors périodes de photosynthèse est aussi un aspect complémentaire et indispensable à connaître pour mettre en place un pilotage adapté de l'irrigation aux cultures pérennes. En effet, la disponibilité de l'eau dans le sol pendant les périodes de mise en réserve (à l'automne) et de minéralisation (en hiver et au début du printemps) est essentielle et peu prise en compte dans la plupart des outils de pilotage de l'irrigation, qui concentrent leurs évaluations sur la période de photosynthèse active. De nombreux organismes sont engagés dans un suivi de la teneur en eau des sols à l'échelle de régions entières. La dynamique de l'eau avant le redémarrage végétatif et la connaissance de l'état des réserves au début de la campagne d'irrigation permettent de bien appréhender le niveau du risque de sécheresse chaque année. Ainsi, l'observatoire provençal des sols non irrigués a été mis en place par la Société du canal de Provence (SCP) depuis plus de vingt-cinq ans, en partenariat avec des organismes régionaux tels que les chambres d'agriculture, le Centre de ressource et d'innovation pour l'irrigation et l'agrométéorologie en région Sud (Criiam Sud) ou Arvalis.

Irrigation de résilience, exemple de la vigne

Le cas de la vigne est très pertinent pour illustrer ce type d'irrigation. En effet, la vigne est l'archétype de la plante qui a besoin d'un certain niveau de stress hydrique, en particulier pour produire des raisins en quantité et en qualité adaptées à la vinification. Ainsi, un déficit hydrique modéré peut améliorer la répartition des assimilats vers les structures reproductives et limiter l'excès de végétation. Dans le cas

de la vigne, la maximisation de la production n'est pas toujours recherchée puisque la qualité du fruit est déterminante sur le produit final. Mais un déficit hydrique trop sévère peut mettre en péril la longévité de la plantation ou du vignoble en réduisant par exemple les réserves des parties pérennes (Pélegrino *et al.*, 2014). Le type de vins (rouge, blanc, rosé, effervescent, etc.) et leur positionnement qualitatif complexifient encore la détermination d'une trajectoire hydrique optimale. Il s'agit donc d'adapter une stratégie d'irrigation de manière fine aux objectifs de production afin de stimuler la capacité naturelle des plantes à faire face à la sécheresse.

Dans une plante pérenne, comme la vigne, on constate une différence de comportement entre les parties pérennes (tronc, rameaux) et les parties annuelles (pétioles, feuilles). Ainsi, la conductivité hydraulique diminuera très fortement en cas de stress climatique dans les tiges et dans les feuilles, mais sera maintenue élevée dans les parties pérennes. Le diamètre des vaisseaux, et donc sa sensibilité à la cavitation, est influencé par le régime hydrique imposé à la plante. Ainsi, des vignes irriguées trop tôt, ou trop fréquemment, développeront des vaisseaux plus gros, plus sensibles en cas de stress climatique ultérieur. Les stratégies des végétaux vis-à-vis de ces facteurs climatiques sont bien connues : les viticulteurs voient jaunir et tomber les feuilles de la vigne en cas de sécheresse ou de « coup de chaud ».

La fréquence d'irrigation aura des conséquences sur l'architecture des racines, sur la régulation de la consommation hydrique et sur la dynamique de maturation des fruits. Les résultats de mesures de flux de sève provenant de différents vignobles et s'étalant sur plusieurs années illustrent l'impact de la fréquence d'irrigation sur le profil de déficit hydrique entre deux irrigations et entre les saisons : des apports conséquents et espacés dans le temps induisent des profils de déficit hydrique plus modérés au cours de la saison que des apports fréquents de faibles volumes (figure 2.25).

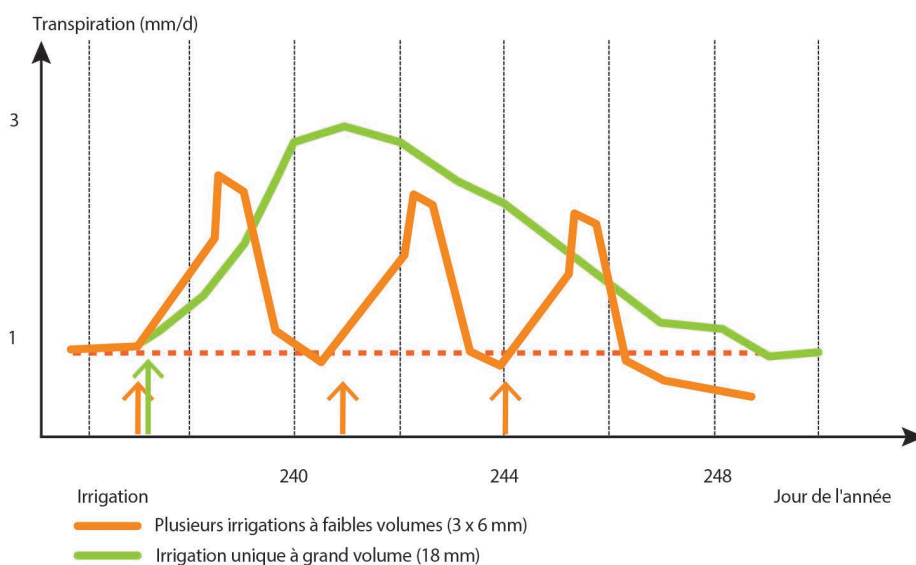


Figure 2.25. Profils de transpiration de la vigne, sous une même demande évaporative dans le même vignoble, en réponse aux irrigations de petits et grands volumes (source : Fruition Sciences).

Ces travaux précisent également que des intervalles plus longs entre les irrigations ont des effets positifs sur le volume des baies et le taux d'accumulation de sucre. Il est donc crucial et complexe de connaître avec précision le statut hydrique des vignes et des arbres en général, et d'adapter les pratiques agronomiques aux objectifs de production.

Moyens de communication et de diffusion des informations

Les avertissements à irrigation

L'acquisition de connaissances sur les besoins en eau des cultures et le déploiement à large échelle des données météorologiques ont permis le développement des avertissements à irrigation. Ces avertissements ont surtout été conçus dans le contexte de l'irrigation par aspersion, pratiquée sur environ 80 % des cultures irriguées en France, bien que leur emploi concerne aussi d'autres techniques d'irrigation (irrigation localisée) et diverses situations (plein champ, serre). Ils sont pratiqués dans la plupart des régions où l'irrigation s'est développée et leur « audience » s'est accrue au cours des années, tant par le nombre des départements concernés que par les moyens de diffusion mis en œuvre.

Par définition, les avertissements délivrent une information, fournie périodiquement au moyen de divers supports, en vue d'aider les irrigants dans leur décision. Cette information a pour but d'optimiser la production des cultures, d'améliorer l'efficacité de l'eau et des moyens mis en œuvre, d'éviter le gaspillage de la ressource et de maîtriser les impacts sur l'environnement.

Ces avertissements sont généralement définis pour apporter...

une information...

- sur l'opportunité d'irriguer,
- utilisant des données climatiques (notamment l'évapotranspiration et les précipitations sur des sites représentatifs de la zone),
- sur les rythmes de consommation des cultures, les périodes critiques,
- accompagnée de conseils agronomiques adaptés à une zone donnée,
- associée parfois à des prévisions météorologiques ;

fournie périodiquement au moyen de divers supports...

- semaine, décade (bulletin, presse, site internet, SMS, etc.),
- en fonction de circonstances climatiques diverses,
- à la demande de l'agriculteur (mail) ;

avec pour objectif d'aider les irrigants...

dont les structures d'exploitation, les sols, les moyens d'irrigation et les stratégies de production peuvent différer ;

dans leur décision...

- quand ? Combien ? Et notamment début et fin d'irrigation,
- avec adaptation par l'agriculteur (pluie, observations au champ, contraintes de son équipement) ;

pour améliorer l'efficacité de l'eau et des moyens mis en œuvre...

en concourant à une meilleure gestion de l'utilisation de l'eau disponible selon le matériel employé, le tour d'eau, les restrictions d'eau, les conditions climatiques, le niveau des charges, le temps de travail disponible ;

pour éviter le gaspillage de la ressource et maîtriser les impacts sur l'environnement :

- ruissellement, érosion,
- lessivage (nitrates, pesticides).

Suivant le cas, les avertissements irrigation indiquent...

la demande climatique : ETP, encore nommée ET de référence (ETref) :

l'irrigant doit s'assurer que cette information est obtenue dans des conditions représentatives de ses propres conditions d'utilisation ;

la demande climatique ETP et le coefficient cultural kc :

- l'irrigant calcule $ETM = Kc \times ETP$ à partir des valeurs de Kc^{16} données avec la culture et son stade phénologique,

- pour calculer son bilan, l'irrigant mesure la pluie¹⁷ et prend en compte l'état du réservoir sol ;

les éléments du bilan : ETP (ETref), Kc et pluie :

- attention, compte tenu de la variabilité de la pluie dans l'espace, on ne peut retenir les valeurs moyennes régionales de la pluie, qui ne peuvent être qu'indicatives. Il faut mesurer la pluie sur l'exploitation...

- donc, encore dans ce cas, l'irrigant mesure la pluie et prend en compte la situation de son réservoir sol pour calculer son bilan ;

le bilan :

- le bilan est calculé et donné par culture, par type de sol et par zone. Cela suppose que les caractéristiques de la zone soient très homogènes à tous points de vue et que le bilan type soit représentatif des conditions de l'exploitation, ce qui est rare,

- ce type de bilan nécessite d'intégrer des dates et doses d'irrigation standards. Si l'agriculteur s'en écarte, il devra continuellement s'ajuster ;

la date et/ou la dose d'irrigation :

certains avertissements vont jusqu'à indiquer, à partir du calcul du bilan, la date à laquelle il faut irriguer et/ou un exemple de dose à apporter. Il faut insister sur le caractère strictement indicatif d'une information aussi élaborée. En effet, cette donnée doit tenir compte des facteurs au niveau de la parcelle dont seul l'irrigant a le contrôle. Ainsi, même dans ce cas, sa participation est nécessaire ;

autres démarches et outils :

l'utilisation de mesures sur des parcelles de référence (sondes capacitatives, tensiomètres) peut permettre de compléter l'avertissement. Les modèles de culture couplés à la télédétection à une échelle adaptée pourront à terme fournir des informations complémentaires utiles.

Ces bulletins sont généralement transmis par e-mail ou courrier.

L'information peut être brève (ETP, ETref, pluie de la semaine passée et/ou prévisions pour la semaine à venir), générale et appliquée à une zone plus ou moins étendue ; elle ne donne que l'estimation d'une valeur moyenne prise comme référence pour le calcul des bilans hydriques.

Elle peut être plus élaborée en délivrant des conseils pour le calcul du bilan hydrique et le suivi de l'évolution des réserves en eau du sol via des parcelles de référence où sont implantées des sondes capacitatives ou tensiométriques. En fonction de toutes ces données, des préconisations sont apportées pour la conduite de l'irrigation.

Le développement d'internet a rendu possible l'amélioration des données climatiques de l'avertissement fondé sur le bilan hydrique, en recalant celui-ci avec des données réelles mesurées sur l'exploitation (pluie, RFU, kc, etc.). L'irrigant peut introduire, en se connectant sur un site web ou sur son espace personnel (dans le cas de services payants), des données mesurées pour le calcul personnalisé de ses bilans hydriques.

En France, une soixantaine de départements, recensés par enquête APCA en 2019, sont concernés par les avertissements à l'irrigation, ce qui est important. Ces avertissements sont parfois très ponctuels, destinés à des cultures spécialisées (ex. : pomme de terre, arboriculture, légumes, semences). Ils peuvent être également associés avec les mesures et la conduite tensiométriques des arrosages

¹⁶ Selon les objectifs de production, il est nécessaire de prendre en compte les coefficients culturaux kc mais d'appliquer éventuellement des conduites restrictives si nécessaire (cas des cultures pérennes).

¹⁷ Et en apprécie l'efficacité, notamment en cas de ruissellement.

(40 départements en 2019) et fréquemment des informations sur la ressource en eau et les restrictions en vigueur. Dans certains cas, ils se heurtent également aux handicaps que connaissent toutes les méthodes visant à améliorer la conduite de l'irrigation :

- eau abondante ou peu coûteuse, ou au contraire restrictions ;
- eau disponible seulement au tour d'eau ;
- sous-équipement en matériel d'irrigation.

Malgré tout, ce chiffre de 60 départements reste significatif d'une attente de la part des irrigants et de leurs techniciens, attente à laquelle répondent les organismes distribuant ces avertissements et des données climatiques : chambres d'agriculture, Météo-France, compagnies d'aménagement, centres agrométéorologiques, coopératives, instituts techniques, syndicats de producteurs, syndicats d'irrigation, etc. Les bulletins diffusés par mail ou sur un site internet sont aujourd'hui prépondérants. Parallèlement, on note le développement de services « individuels », à la carte, avec l'appui d'un technicien (mail, téléphone ou visite de terrain).

Il apparaît aussi une demande de plus en plus importante des agriculteurs sur de nouvelles technologies avec des informations plus adaptées à leur propre contexte local. Pour répondre à ces besoins, les centres agrométéorologiques, dans une démarche collective, disposent de leur propre réseau de mesures sur un territoire donné. Ces plateformes rassemblent des outils d'aide à la décision et des informations permettant une meilleure gestion de l'irrigation et de la lutte phytosanitaire. Ces données sont parfois enrichies par des communautés d'agriculteurs qui constituent des réseaux de mesures encouragés par les offres de service de fournisseurs de stations météo. On note également le développement important de nouveaux capteurs, d'images satellites qui permettent d'alimenter des bases de données sur des serveurs web. À partir de ces données, les centres agrométéorologiques réalisent des avertissements à l'irrigation pour leurs adhérents. Grâce au développement des images satellites, le conseil peut être spatialisé et davantage individualisé, ce qui correspond aux attentes d'un certain public. Des techniques prometteuses sont en cours de déploiement.

Exemples de centres agrométéorologiques

Sud AgroMétéo (SAM) : <http://sudagrometeo.fr/>

Agrométéo de la Confédération suisse : <http://www.agrometeo.ch/>

Centre de ressource et d'innovation pour l'irrigation et l'agrométéorologie en région Sud : <http://www.criiamsud.fr/>

Par conséquent, l'aide à l'irrigation fait appel à des moyens très divers. Le pilotage peut se concevoir de différentes façons, à partir de sources d'information variées souvent complémentaires. Il faut, pour conclure, rappeler que :

- les informations délivrées doivent concourir à promouvoir une irrigation raisonnée menée en vue d'un rendement optimal, avec une quantité d'eau apportée minimale, et une participation maximale des réserves hydriques du sol, surtout en fin de cycle végétatif. Ces précautions devraient permettre de préserver au mieux la ressource en eau, en luttant contre les gaspillages, et de respecter l'environnement, en évitant des lessivages entraînant des pollutions diffuses (et notamment de l'azote et de certains produits de phytosanitaires) vers les nappes ;
- l'avertissement, indépendamment de ses évolutions, doit non seulement être à même de fournir des indications fiables, dont l'origine est précisée, mais aussi de tenter, bien que la tâche soit délicate, d'indiquer les moyens de les moduler en fonction des contraintes inhérentes au milieu, au végétal ou aux exploitations agricoles.

Les apports du numérique

Comme les autres secteurs économiques, l'agriculture vit une transformation numérique depuis une trentaine d'années grâce à l'émergence de l'informatique et des réseaux de communication. Plus récemment, cette transformation a permis le développement de nouveaux outils de suivi et d'aide au pilotage, positionnés au plus près des parcelles, des plantes, des agroéquipements, etc. Cette nouvelle forme d'agriculture, appelée couramment « agriculture numérique », permet de collecter de nouvelles données, plus précises, plus objectives, disponibles quasiment en temps réel et pouvant être partagées par différents acteurs à l'échelle d'un large territoire. Ces nouveaux outils permettent notamment de mieux raisonner l'usage des intrants (eau, fertilisants, produits de protection des cultures).

En matière d'irrigation, ces outils ou services offrent la promesse aux agriculteurs d'améliorer le pilotage des irrigations grâce à la mise en réseau de nouveaux outils (stations météo connectées, électrovannes connectées, etc.) et leurs services de visualisation (graphiques ou indicateurs disponibles en temps réel). Pour faciliter la gestion d'un ensemble de parcelles instrumentées, des algorithmes d'apprentissage automatique (ou *machine learning*), basés sur un très grand nombre de données statistiques, commencent à être mis au point. Par exemple, l'Assistant de lecture des données des dendromètres (ALDD) utilise des arbres de décision de classification, utilisés notamment en fouille de données et en apprentissage (figure 2.26). Avec ces outils, les agriculteurs ou leurs conseillers peuvent suivre un nombre plus important de parcelles en même temps et réduire le risque d'apparition de contrainte hydrique sur certaines parcelles.

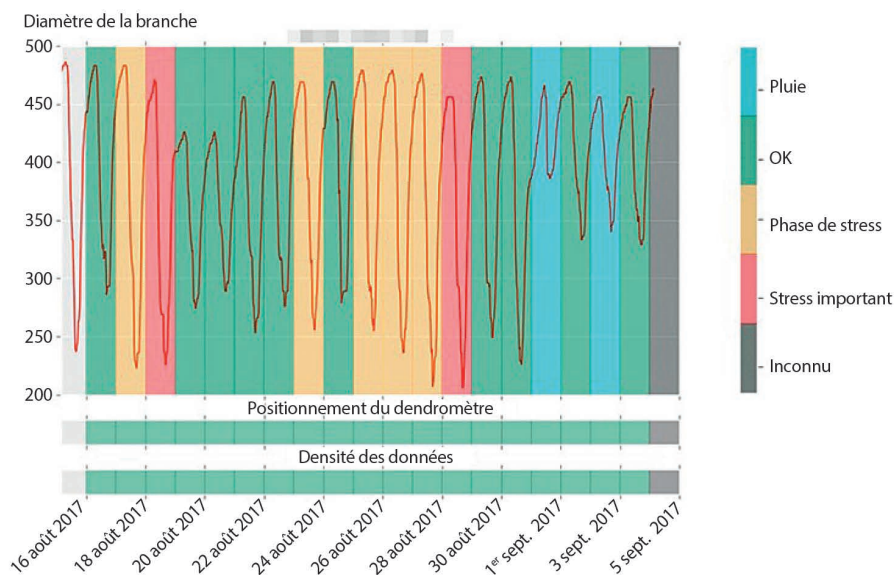


Figure 2.26. Courbe dendromètre instrumentée par l'algorithme ALDD (Fernandez, 2019).

L'adoption de ces nouvelles technologies nécessite toutefois un accompagnement des acteurs dans la maîtrise, le suivi et l'interprétation des observations qui en découlent. À ce titre, il est important de rappeler le rôle primordial du conseiller technique pour favoriser cette transition. En effet, l'enjeu n'est pas d'opposer numérique et expertise agronomique, mais de permettre aux conseillers d'associer de nouvelles sources d'observation avec leurs connaissances agronomiques afin d'accompagner les agriculteurs en leur donnant accès à des indications complémentaires pertinentes. Cette intégration passe nécessairement par une montée en compétence des conseillers sur les outils numériques afin d'en comprendre les liens avec l'agronomie (mais aussi les limites) pour être en mesure de prodiguer un conseil adapté localement.

Fiches outils

Les fiches de présentation qui vont suivre concernent des logiciels intégrant l'interprétation de suivi d'état hydrique du sol pour deux d'entre eux et, pour les autres, des logiciels de bilan hydrique et modèles de cultures pour certains d'entre eux. Elles ne prétendent pas à l'exhaustivité. Leur contenu est sous la responsabilité des concepteurs de ces logiciels. Des compléments et mises à jour sont disponibles dans l'annexe numérique.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Irrinov®	
Concepteur	Arvalis-Institut du végétal, en partenariat avec les chambres d'agriculture des régions concernées, l'Union nationale interprofessionnelle des plantes riches en protéines (UNIP), la Fédération nationale des agriculteurs multiplicateurs de semences (FNAMS) et l'Inra
Contact	Sophie Gendre. Arvalis-Institut du végétal, Station Inter-Instituts, 6 chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège. Tél. : 05 62 71 79 53, s.gendre@arvalis.fr
Objectif	Irrinov® est une méthode de pilotage des irrigations des cultures permettant de gérer un ensemble de parcelles aux caractéristiques de sol voisines, généralement irriguées par un même matériel d'irrigation.
Public visé	Agriculteurs irrigants, conseillers agricoles, techniciens d'organismes économiques.
Cultures concernées	Maïs grain, céréales à paille (blé tendre, blé dur, orge de printemps).
Données nécessaires	Mesures tensiométriques (sondes Watermark®) à 30 cm et à 60 cm de profondeur, date de semis, dates de stades clés, pluie.
Informations fournies par le produit	Seuils de déclenchement de l'irrigation en fonction du stade, du sol et du matériel, protocole de mesure des stades clés d'une culture, protocole de positionnement des sondes dans la parcelle.
Support de diffusion et description du service	La méthode est diffusée sous la forme d'un « guide de l'utilisateur » régionalisé. La méthode nécessite une formation et un appui technique pour permettre une bonne prise en main par l'irrigant.
Principes de fonctionnement	<p>La méthode repose sur quatre principes :</p> <ul style="list-style-type: none"> – la détermination au champ des stades repères de la culture permettant de borner la période d'irrigation et d'appliquer les règles de conduite ; – la proposition d'un rythme « dose-fréquence » d'irrigation de base par milieu (ex. : dose 26 mm tous les 7 jours). Ce rythme suffisant pour couvrir les besoins 8 ans sur 10 sera adapté aux conditions de l'année en fonction des relevés tensiométriques (sondes Watermark®) ; – la proposition de seuils tensiométriques pour décider le déclenchement de la première irrigation et la modulation du rythme dose-fréquence en cours de campagne d'irrigation. Ces seuils tiennent compte de la durée du tour d'eau ; – un ensemble de règles précises pour l'utilisation de la tensiométrie. <p>L'ensemble des mesures permettant de piloter – repérage des stades clés des cultures, mesures de tensions (4 à 6 sondes par site), pluviomètre – sont rassemblées sur une station de mesure localisée sur une position de début de tour d'eau. Les rythmes dose-fréquence dépendent de l'espèce et du type de sol.</p> <p>Les versions actuelles de la méthode sont adaptées aux situations où la capacité d'irrigation (ressource en eau et matériel) permet de couvrir les besoins en eau d'irrigation au moins 8 ans sur 10.</p>
Avantages	Méthode adaptée à l'unité de gestion des irrigants (ensemble de parcelles irriguées par un ou plusieurs matériels d'irrigation), elle propose un cadre général du pilotage (repérage des stades de la culture, dose-fréquence, mesures directes sur le terrain pour décider), utilisable par les agriculteurs.
Limites	Les mesures sont effectuées en un seul endroit des parcelles du tour d'eau.
Extension actuelle du produit	Pas de suivi d'utilisation, en téléchargement libre.
Prix/disponibilité	Méthode disponible en téléchargement gratuit en ligne : http://www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr/irrinov.asp

Analyse des courbes des sondes capacitives	
Concepteur	Agralis services, Corhize
Contact	Corhize : Serge Escuraing, serge.escuraing@corhize.com Agralis services, epatelli@agralis.fr
Objectif	Les méthodes de pilotage de l'irrigation basées sur la mesure de l'humidité volumique via les sondes capacitives permettent de gérer un ensemble de parcelles aux caractéristiques de sol voisines, généralement irriguées par un même matériel d'irrigation.
Public visé	Agriculteurs irrigants, conseillers agricoles.
Cultures concernées	Arboriculture, maraîchage, grandes cultures.
Données nécessaires	Mesures d'humidité volumique via les sondes capacitives, date de semis, stades, courbe de calibration.
Informations fournies par le produit	Seuils de déclenchement de l'irrigation par accès à une plateforme web et conseil personnalisé.
Support de diffusion et description du service	Les deux structures proposant l'analyse des courbes de sondes capacitives vendent également les sondes capacitives et le conseil associé via leurs sites web respectifs.
Principes de fonctionnement	Les sondes mesurent une échelle de fréquence directement corrélée à l'humidité du sol via une courbe de calibration. La courbe est différente pour chaque type de sol. En l'absence de calibration, il n'est possible d'étudier les valeurs fournies par les sondes capacitives qu'en relatif. La méthode repose sur l'interprétation des courbes et la définition de l'humidité à la capacité au champ et l'humidité en bas de RFU. Ces deux points sont identifiés pour chaque profondeur (tous les 10 cm) à partir des inflexions des courbes, soit en fin de la période de drainage, soit avec l'entrée en stress hydrique. Ces seuils sont définis par des techniciens. Ces méthodes nécessitent un accompagnement de l'agriculteur par un technicien.
Avantages	Valeur d'humidité facilement compréhensible, mesure directe à la parcelle, interface d'interprétation des données.
Limites	La mesure est effectuée en un seul endroit de la parcelle, nécessité de connaître la courbe de calibration pour son type de sol.
Prix/disponibilité	Voir site web

Cirame	Centre d'informations régional agrométéorologique (région PACA)
Concepteur	Cirame – site internet : www.agrometeo.fr
Contacts	Anne-Marie Martinez. Tél. : 04 90 63 22 66 Fax. 04 90 63 02 62, e-mail : martinez-am@agrometeo.fr
Objectif	Apporter les éléments nécessaires : – à la mise en œuvre du bilan hydrique ; – au raisonnement des quantités d'eau apportées par les autres méthodes de pilotage.
Public visé	Irrigants et techniciens en irrigation.
Cultures concernées	Cultures légumières, arboriculture, grandes cultures.
Données nécessaires	Relatives au climat : rattachement au poste de notre réseau de stations Cirame le plus proche (pluie, ETP) Relatives à la culture : stade végétatif (kc), profondeur d'enracinement Relatives au sol : RU, RFU Relatives au mode d'irrigation : aspersion, goutte-à-goutte, etc.
Informations fournies par le produit	Pluie ETP (ETref) Coefficients culturaux (kc) Teneur en eau des sols
Support de diffusion et description du service	Données mises à jour quotidiennement, toute l'année, sur une rubrique du site www.agrometeo.fr
Principe de fonctionnement	Rubrique qui regroupe un ensemble de données que les irrigants exploitent à leur gré, pour le calcul de bilans hydriques et l'aide au pilotage des irrigations.
Extension actuelle du produit	Rubrique associée à diverses applications agrométéo.
Avantages	Données facilement accessibles à tous (pas d'abonnement). Données mises à jour quotidiennement sur de nombreux postes.
Limites	Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur et départements limitrophes.
Prix	Sur internet : coût lié à votre connexion à internet. Demande particulière : sur devis.

Irré-LIS®	
Concepteur	Arvalis-Institut du végétal
Distributeur	Outil diffusé via des organismes de développement (plateforme web)
Contact	Sophie Gendre. Arvalis-Institut du végétal, Station Inter-Instituts, 6 chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège. Tél. : 05 62 71 79 53, s.gendre@arvalis.fr
Objectif	Irré-LIS est un outil d'aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation. Cet outil d'aide à la décision permet à l'agriculteur de maximiser ses rendements tout en économisant la ressource en eau grâce à des modèles de calcul exclusifs, fruit de plus de quinze années de recherche.
Public visé	Agriculteurs irrigants
Cultures concernées	Maïs grain et fourrage, maïs semence, maïs doux, blé tendre, blé dur, orge de printemps, pomme de terre, tabac, soja (en partenariat avec Terres Inovia).
Données nécessaires	En début de campagne, les données à renseigner sont les coordonnées GPS, la date de plantation, la variété, le précédent et le sol (réserve utile). Pour choisir le sol dans la base de données Arvalis, une aide au choix des sols est disponible afin de filtrer les sols (qui sont déjà présélectionnés selon la zone régionale de la parcelle). Les critères de filtre sont la profondeur de blocage à la tarière, la pierrosité, l'hydromorphie, la texture et la présence de calcaire. En cours de campagne, il suffit de saisir les irrigations réalisées. Le bilan hydrique est automatiquement généré.
Informations fournies par le produit	Date prévisionnelle des stades clés de la culture, déficit en eau du sol par jour, niveau de réserve utile et de réserve facilement utilisable par jour, niveau d'évapotranspiration potentielle, pluies.
Support de diffusion et description du service	Irré-LIS est accessible en ligne depuis 2008 (http://www.irrelis.arvalisinstitutduvegetal.fr). Irré-LIS est utilisé par les agriculteurs accompagnés de leurs techniciens (abonnement via organisme de développement).
Principes de fonctionnement	Irré-LIS® est un bilan hydrique qui fonctionne à deux réservoirs : – réserve utile racinaire ; – réserve utile sous-racinaire. Cela permet de faire évoluer la disponibilité en eau avec la croissance de la plante et d'éviter des stress précoces, avant la mise en place de l'appareil racinaire. Sur la page d'accueil du site internet, l'apparition d'une goutte d'eau à côté de la parcelle en cas d'épuisement de la réserve facilement utilisable permet de voir les parcelles en stress hydrique et d'aider à la prise de décision pour irriguer ou non la parcelle.
Avantages	Facilité de création d'une parcelle (pas de mesure au champ), interface graphique facile de lecture, connecté aux bases de données Arvalis (sol, variétés, climat, etc.) pour faciliter la saisie.
Limites	Ne fonctionne pas pour les sols avec des remontées capillaires, pas de mesure au champ (mais possibilité de valoriser des mesures au champ en début de cycle pour recalculer l'état du réservoir).
Extension actuelle du produit	En 2018, Irré-LIS a été utilisée pour piloter 34 000 ha de grandes cultures.

Net-Irrig	
Concepteur	Chambre d'agriculture du Loiret
Contact	Thierry Bordin, Nadège De Abreu Tél. : 02 38 71 90 61/02 38 71 91 28 e-mails : Deabreu45d@loiret.chambagri.fr ; bordint45d@loiret.chambagri.fr
Objectif	Pilotage de l'irrigation par le calcul d'un bilan hydrique journalier à la parcelle en fonction du type de sol et de la culture. Modèle simple et robuste permettant d'optimiser ses irrigations, de prévoir la consommation en eau d'une culture et l'arrivée d'un stress hydrique, de prévoir ses irrigations sur 15 jours, et de sécuriser le rendement et la qualité par des irrigations adaptées.
Public visé	Agriculteurs irrigants, conseillers, expérimentateurs.
Cultures concernées	Blé, orge, maïs, pois protéagineux, tournesol, soja, betterave sucrière, sorgho, haricots, pois potager, flageolet, salsifis, carotte, betterave rouge, asperge, pomme de terre, salade, dactyle, ray-grass. Extension possible à d'autres cultures sur calage expérimental des données et envoi d'un fichier de données (en liaison avec les contacts).

Données nécessaires	Données climatiques journalières : ETP, pluviométrie (incorporation automatisée de fichiers de données météo envoyés sur serveur FTP). Pluviométrie à la parcelle (incorporation par l'utilisateur). Données sols : RU, RFU, réserve initiale (préenregistrées dans la base), état structural, taux de cailloux. Itinéraire technique : date de semis, apports par irrigation, durée du tour d'eau à la parcelle.
Informations fournies par le produit	État journalier de la réserve de la parcelle par rapport à la RU, la RFU et la RDU (visualisation graphique). Évolution de la réserve de la parcelle sur 15 jours (visualisation graphique). Date optimale de déclenchement d'une irrigation sur la parcelle avec prise en compte de la durée du tour d'eau de la parcelle (visualisation graphique). Fichier des sorties : graphique de sortie avec RU, RDU, évolution journalière de l'état de la réserve de la parcelle et prévision d'évolution, irrigation, pluie, drainage, seuil de déclenchement en fonction du tour d'eau, période de sensibilité de la culture à un stress hydrique.
Support de diffusion et description du service	Interface web. Accès internet à partir d'un PC ou d'une tablette 24/24. Compte individuel avec code et identifiant. Données sécurisées sur serveur externe. Import de fichier météo possible par dépôt sur serveur FTP.
Principes de fonctionnement	Calcul du bilan hydrique à double réservoir (RFU, RDU) avec prise en compte de l'évolution de l'enracinement de la culture au cours de son cycle végétatif.
Extension actuelle du produit	Organismes de développement et irrigants sur la région Centre-Val de Loire, Normandie, Hauts-de-France, et dans le département du Rhône. Extension possible à toutes les régions et à tous les départements.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> – Optimisation des coûts d'irrigation et maîtrise des marges, sécurisation du rendement et de la qualité sur chaque culture. – Prévision d'évolution de la réserve à 15 j. – Gestion de l'ensemble de la sole irriguée possible sans surcoût. – Accès sécurisé disponible à tout moment 24 h/24 sur simple accès internet sur tablette ou ordinateur sans nécessité d'installation de nouvelles versions ou configuration particulière. Données précises sur l'état du bilan hydrique <ul style="list-style-type: none"> – Simulation et analyse <i>a posteriori</i> des campagnes d'irrigation possibles à partir de stations météo virtuelles et de parcelles virtuelles
Limites	Limites habituelles du bilan hydrique, pas de prise en compte des remontées capillaires, fiabilité liée aux données fournies, recalage nécessaire.
Prix/disponibilité	Disponibilité immédiate sur Centre-Val de Loire et Normandie, sur paramétrage sous 3 semaines et sous conditions pour les autres régions. Prix abonnement annuel 2019 : par module 122 €, 183 € pour toutes cultures.

Optirrig	
Concepteur	Irstea Montpellier – UMR G-Eau (Gestion de l'eau, acteurs, usages)
Contacts	Bruno Cheviron, équipe Optimiste : Optimisation du pilotage et des technologies de l'irrigation : minimisation des intrants, transferts dans l'environnement. Tél. : 04 67 04 67 64 E-mail : bruno.cheviron@irstea.fr
Objectif	Génération, analyse et optimisation des scénarios d'irrigation. Pilotage de l'irrigation par calcul du bilan hydrique journalier, de l'indice foliaire et de la biomasse. Évaluations du rendement, de la productivité et de l'efficacité de l'irrigation, complétées par une évaluation économique des scénarios.
Public visé	Expérimentateurs et développeurs (partenariat recherche ou public-privé), irrigants et conseillers (monde agricole), agences de l'eau et gestionnaires de territoire (organismes de décision publique).
Cultures concernées	La plupart des grandes cultures, de nombreuses cultures saisonnières dont la prairie, quelques cultures maraîchères. Extensions en cours aux cultures pérennes (vigne et arboriculture).
Données nécessaires	Données climatiques journalières (demande climatique, pluie, rayonnement global et température moyenne de l'air). Données sols : capacité au champ ou RU, RFU et profondeur du profil. Données culture : temps thermiques associés aux différents stades phénologiques, point de flétrissement, caractéristiques d'enracinement (vitesse, profondeur). Données de contrôle : date de semis, caractéristiques des scénarios d'irrigation (dates et apports, critères de déclenchement, calendrier, périodes choisies). Données de contrainte : quota, tour d'eau, arrêts d'interdiction.

Informations fournies par le produit	Sorties journalières principales : réserve racinaire, indice foliaire, biomasse. Sorties journalières auxiliaires : ETR, ETM, drainage, stress hydrique. Sorties saisonnières principales : cumul d'irrigation, rendement matière sèche et grain, productivité de l'irrigation, efficacité de l'irrigation, évaluation financière. Sorties saisonnières auxiliaires : cumuls de toutes les variables journalières.
Support de diffusion et description du service	Logiciel recodé sous R. Fonctionne sous Windows et Linux. Tutoriel gratuit et formation possible pour la prise en main et/ou l'utilisation experte.
Principes de fonctionnement	Modèle au pas de temps journalier : lecture des forçages, mise à jour des variables liées à la plante puis calcul du bilan hydrique. Modèle dit « à temps thermique » pour la plante et « à réservoirs » pour le sol (réservoir superficiel, réservoir racinaire, réservoir profond).
Extension actuelle du produit	Outil de recherche (nombreux partenariats) et de formation (master Eau et Agriculture).
Avantages	Trois types de fonctionnements : analyse et optimisation ex post, utilisation en temps réel ou en prospective (scénarios d'adaptation d'usage de la ressource). Les scénarios permettent de gérer au mieux des objectifs contradictoires : irrigation < I max, rendement > R min et évaluation financière > F min. Possibilité d'évaluer les incertitudes liées aux données nécessaires et de les traduire par un degré de précision sur les prédictions (indispensable pour un outil d'aide à la décision). Modèle parcimonieux : peu de paramètres à remplir par l'utilisateur.
Limites	Limites habituelles des modélisations physiques 1D simplifiées, qui ne décrivent que les processus considérés comme principaux. Ignore par exemple la remontée capillaire, le flaquage et le ruissellement, ainsi que la diffusion latérale.
Prix	Nous consulter.

Osiri-Run	Outil simplifié pour une irrigation raisonnée et individualisée version Réunion
Concepteur	Cirad et Chambre d'agriculture de la Réunion
Contacts	J.-L. Chopart, AGER Consult L. Le Mézo, M. Mézino, Cirad F. Aure, Chambre d'agriculture de la Réunion E-mail : lemezo@cirad.fr, mezino@cirad.fr frederic.aure@reunion.chambagri.fr jl.chopart@orange.fr
Objectif	Osiri-Run est un outil de conseil en irrigation utilisable pour différentes cultures. Il effectue un conseil individualisé pouvant couvrir l'ensemble du cycle cultural à l'échelle des secteurs d'irrigation.
Public visé	Techniciens spécialisés en gestion de l'eau et agriculteurs.
Cultures concernées	Toutes les cultures paramétrées par des coefficients culturaux.
Données nécessaires	ETP (mm), température moyenne (°C) et pluviométrie (mm) journalières. Système d'irrigation (programmation, efficacité, débit, tour d'eau, surface) Bilan hydrique sol (réserve utile, cote de drainage, stock initial) Bilan hydrique plante (coefficients culturaux, front et croissance racinaires) Pilotage (seuil mini et maxi de remplissage de la réserve utile racinaire) Calendrier cultural
Informations fournies par le produit	Visualisation des termes du bilan hydrique journalier. Doses préconisées par secteur et par tour d'eau dans l'unité de pilotage (volume ou temps). Pluies attendues par décade.
Support de diffusion et description du service	Le logiciel fonctionne dans l'environnement Windows 95 ou 98, il nécessite Excel 97.
Principes de fonctionnement	Chaque jour, un bilan hydrique par secteur est calculé selon le modèle PROBE (Chopart et Siband, 1988 ; Chopart et Vauclin, 1990) intégrant stock initial, pluies et irrigations réelles, besoins en eau de la culture, etc. Ensuite, un bilan hydrique prévisionnel est calculé pour proposer un conseil en eau d'irrigation selon les contraintes définies par l'utilisateur (débit disponible, tour d'eau, niveaux de remplissage du réservoir en eau du sol).
Extension actuelle du produit	Produit disponible en français.
Avantages	Modèle simple de bilan hydrique Facilité d'utilisation sur PC.
Limites	Base de données météo accessible. Relevés des pluies et des irrigations. Modèle de bilan hydrique à réservoir. Maîtrise des concepts de base de gestion de l'eau, d'irrigation et des probabilités. Nécessite Excel 97.
Prix	Gratuit si accord des concepteurs.

Sarrah et Sarra-O	
Concepteur	Cirad
Contacts	Christian Baron Tél. : 33 (0)4 67 54 87 28 site : http://sarrah-h.teledetection.fr/ E-mail : christian.baron@cirad.fr
Objectif	Modèle simple et robuste pour le diagnostic local et régional des parcelles cultivées, appliqué à des cultures tropicales et méditerranéennes. Orienté sur : le suivi et la prévision des rendements en cours de saison, un système d'alerte précoce pour la sécurité alimentaire, l'analyse de risques liés à la variabilité et au changement climatique. Prise en compte de stratégies paysannes : semis, niveau d'intensification, irrigation, etc. À noter une version spatialisée, Sarra-O, qui permet l'utilisation d'images satellitaires (RFE : Tamsat, Chirps, etc. ; climat : ECMWF, etc.) ainsi que de données des modèles climatiques globaux ou régionaux.
Public visé	Recherche, recherche appliquée, organismes de vulgarisation, décideurs nationaux, territoriaux, etc. (voir site web).
Cultures concernées	Plusieurs cultures à l'échelle de la parcelle : céréales annuelles : mil, sorgho, maïs, riz ; légumineuse : soja ; semi-pérennes : coton.
Principales données nécessaires	Climat : pluie journalière, évapotranspiration, température Min et Max, rayonnement global ou insolation (en journalier ou décadaire). Le calcul de l'ETO est intégré si les données vent et humidité sont disponibles (réf. FAO n° 56). Itinéraire technique : date de semis ou stratégie de semis (recherche automatisée selon un critère de décision de semis), densité de semis, doses réelles d'irrigation ou stratégie d'irrigation, niveau d'intensification (fertilité). Sol : capacité de stockage d'eau dans le sol, stock d'eau en début de simulation, mulch (physique ou couverture végétale).
Informations fournies par le produit	Bilan hydrique : dynamique de stock d'eau dans les réservoirs du sol, de l'enracinement, de la transpiration et de l'évaporation, indicateurs de stress hydrique de la plante, doses d'irrigation (réelles, simulées), etc. Bilan carboné : dynamique des biomasses (feuilles, tiges, racines), du rendement et prévision de rendement en cours de saison, LAI, etc. Phénologie : stades phénologiques, photopériodisme, mortalité juvénile (dates de semis ratés), dates de semis (réelles, simulées), etc.
Support de diffusion et description du service	Site web : http://sarrah-h.teledetection.fr/ , manuel utilisateur et de description scientifique et technique, supports de cours, mini-base de données comportant une série d'exemples et de données observées d'expérimentations, formations.
Principes de fonctionnement	Sarrah-H : sous environnement Windows, le modèle est interfacé avec une base de données et des outils interactifs graphiques et de gestion des données en sortie (agrégation pour différents pas de temps, analyses pluriannuelles, etc.). Des outils d'importation/exportation des données permettent la gestion de différents formats de fichiers de données de forçage, de données observées et de scénarios de simulations. Sarra-O : Mac, Windows, Linux/Unix, interface utilisateur et propose des cartes en sorties (tiff).
Extension actuelle du produit	Recherche et recherche appliquée : IRD, universités Paris, Dijon, Grenoble, Embrapa (Brésil), services nationaux de recherche en agriculture (SNRA, Afrique de l'Ouest), etc. Diffusion à partir du site pour Sarrah-H : mis en fonctionnement début 2014, en date du 28 février 2019, 1 450 téléchargements et 5,6 k visites ; répartition géographique : Amérique du Sud 9 % (8 % Brésil), Amérique du Nord 7 % (6 % États-Unis), Europe 9 % (+ 42 % France), Afrique 26 % (4 % Sénégal, 3 % Algérie, 3 % Côte d'Ivoire, 2,5 % Niger, etc.), Asie 3 % (Iran, Inde). Applications : système d'alerte précoce en Afrique de l'Ouest (Agrhyment, météorologies nationales en cours), zonage agroclimatique au Brésil (Embrapa).
Avantages	Rapide et simple d'utilisation, s'installe sur des ordinateurs de bureau, environnement didactique. Peu de variables de forçage (climat) et de paramètres pour la plupart mesurables. Un effort particulier a été apporté pour la convivialité, interface utilisateur, base de données et modules de gestions importation/exportation des données. Version du modèle en trois langues (français, anglais, portugais) ainsi qu'une partie de la documentation, description complète des variables et paramètres du modèle.
Limites	La version Sarrah-H ne peut être utilisée que sous environnement Windows, la version spatialisée Sarra-O en cours de diffusion est utilisable sous Windows, Mac, Unix/Linux.
Prix	Gratuit hors tout usage commercial, l'utilisateur doit accepter la licence d'utilisation.

Stics	Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard
Concepteur	Équipe projet Stics : 24 chercheurs et ingénieurs, 4 Instituts (Inra, Cirad, AAC-Canada, Gembloux University-Belgium)
Contacts	https://www6.paca.inra.fr/stics/Contact
Objectif	Calcul des variables de production et des variables environnementales : bilan hydrique (consommation d'eau, drainage), bilan azoté et bilan de carbone.
Public visé	Recherche, recherche appliquée, techniciens agricoles, enseignement.
Cultures concernées	Cultures pérennes : graminées herbacées (ray-grass, fétuque, etc.), légumineuses herbacées (luzerne), ligneuses (vigne), banane, cultures bioénergétiques (miscanthus). Cultures annuelles : céréales (maïs, blé, blé dur, orge, sorgho, riz), légumineuses (soja, pois), autres grandes cultures (pomme de terre, betterave) légumes/fruits (tomate, laitue, fraise), oléagineuses (tournesol, lin, colza). Cultures intermédiaires : ray-grass italien, moutarde, vesce, etc.
Principales données nécessaires	Climat (valeurs journalières) Pluie et irrigations ETP (Penman-Monteith) ou vent et humidité (Penman-Monteith calculé) Températures minimale et maximale Rayonnement global Techniques Date et densité de semis Fertilisation et irrigation + paramètres optionnels suivant culture Sol Réserves en début de simulation (eau, azote) Caractérisation de la réserve hydrique du sol, azote organique du sol
Informations fournies par le produit	Réserve en eau du sol Transpiration (plante) Évaporation (sol) Indicateur de satisfaction des besoins en eau Profondeur racinaire Épaisseur du mulch Données de production, donc effet de restrictions hydriques sur la production Drainage et lessivage
Support de diffusion et description du service	Site web : https://www6.paca.inra.fr/stics/ Assistance technique (https://w3.avignon.inra.fr/forge/projects/stics_main_projecu/boards) et formation annuelle
Principes de fonctionnement	Interface utilisateur sous Windows (gestion des entrées/sorties et exécution des simulations), ou en ligne de commande. Modèle = programme interactif à utiliser après avoir adapté les fichiers d'entrée.
Extension actuelle du produit	INRAE et partenaires, sous la directive de l'EPS (Équipe projet Stics)
Avantages	Données précises sur l'état du système tout au long du cycle cultural, prise en compte des stress hydriques et azotés, simulations en rotations ou en cultures associées.
Limites	Présentation de type « recherche », donc à prendre en main, formation conseillée
Prix	Gratuit
Références	Ouvrage collectif <i>Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model</i> , rédigé par plus de 50 coauteurs, paru chez Quæ en janvier 2009 (297 p.).

Références bibliographiques

- Améglio T, Archer P, Cohen M. *et al*, 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil*, 207, 155-167. <https://doi.org/10.1023/A:1026415302759>
- Arvalis, 2017. *Mais grain et fourrage. Guide de culture*, Éditions Arvalis, 120 p.
- Arvalis, 2018. *Les vrai-faux de l'irrigation*, Éditions Arvalis, 80 p.
- Battude M, Al Bitar A, Brut A, Tallec T, Huc M, Cros J. *et al*, 2017. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural and Water Management*, 189, 123-136.
- Bourrières J., 2020. *Les apports de la télédétection dans le suivi de l'irrigation*. Rapport de stage en master II « Aménagement des territoires et télédétection », Université Paul-Sabatier.
- Bruand A., Duval O., Cousin I., 2004. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOLHYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, Association française pour l'étude des sols, 11 (3), 323-334.
- Cruziat P, Améglio T, Cochard H., 2001. La cavitation : un mécanisme perturbant la circulation de l'eau chez les végétaux. *Mécanique et Industries*, 2 (4), 289-29.
- Daudet F.A., Améglio T, Cochard H., Archilla O., Lacoïnte A., 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, 56, 135-144. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri026>
- Daudet F, Cruziat P, 2021. Le potentiel hydrique. <https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/outils-et-concepts-de-base/14-la-pression-osmotique-et-le-potentiel-hydrique/4-le-potentiel-hydrique>
- Demarez V, Helen F, Marais-Sicre C., Baup F, 2019. In-season mapping of irrigated crops using Landsat 8 and Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 11, 118.
- Despinasse Y., 2015. *Diversité chimique et caractérisation de l'impact du stress hydrique chez les lavandes*. Thèse de doctorat en biologie végétale. Université Jean-Monnet Saint-Étienne. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01548309>
- Drexler J.Z., Snyder R.L., Spano D., Paw U.K.T., 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 18 (11), 2071-2101.
- Dutuit P, Pourrat Y, Dutuit J.-M., 1994. La notion de stress, de la cellule à l'écosystème. *Sécheresse*, (5), 23-31
- Fernandez G., 2019. Comment les capteurs dans les champs accompagnent la transformation numérique en agriculture et pour quelle valeur ajoutée ? *Revue Science Eaux et Territoires*, 29, 24-27. <http://www.set-revue.fr/point-de-vue-comment-les-capteurs-dans-les-champs-accompagnent-la-transformation-numerique-en>
- FNSEA-Météo-France, 1986. *L'Agrométéo à la ferme*, Édition FNSEA, Paris, 109 p.
- Froux F, 2002. Caractéristiques hydrauliques, régulation stomatique et efficience d'utilisation de l'eau de quatre espèces de conifères méditerranéens (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* et *Pinus nigra*). Thèse de doctorat. Université Henri-Poincaré Nancy 1. http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2002_0029_FROUX.pdf
- Inglada J, Vincent A, Arias M, Marais-Sicre C., 2016. Improved early crop type identification by joint use of high temporal resolution SAR and optical image time series. *Remote Sensing*, 8 (5), 362.
- Lamacque L, Charrier G, Farnese F.D.S, Lemaire B, Améglio T, Herbet S., 2020. Drought-induced mortality: Branch diameter variation reveals a point of no recovery in lavender species. *Plant Physiology*, 183 (4), 1638-1649.
- Li S, Kang S, Li F, Zhang L, Zhang B., 2008. Vineyard evaporative fraction based on eddy covariance in an arid desert region of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 95 (8), 937-948.
- Mermoud A., 2006. *État de l'eau dans le sol. Cours de physique du sol*, École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse.

- Ortuño M.F., Conejero W., Moreno F., Moriana A., Intrigliolo D.S., Biel C., Casadesus J., 2010. Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97 (1), 1-11.
- Payan J.C., Pichon L., 2020. *ApeX-Vigne : une application mobile gratuite pour faciliter le suivi de la croissance des vignes et estimer la contrainte hydrique*, IFV, Montpellier SupAgro.
- Pellegrino A., Clingeffer P., Cooley N., Walker R., 2014. Management practices impact vine carbohydrate status to a greater extent than vine productivity. *Frontiers in Plant Science*, 5, 283.
- Rienth M., Scholasch T., 2019. State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status. *OENO One*, 53 (4).
- Saurin N., Tisseyre B., Lebon E., 2014. Comment mesurer la contrainte hydrique de la vigne, de la plante au vignoble. *Innovations agronomiques*, (38), 143-158.
- Scholasch T., 2018. Improving winegrowing with sap flow driven irrigation - a 10-year review. *Acta Horticulturae*, 1222, 155-168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1222.21>
- Tron G., Isbérie C., Chol P., 2000. *La tensiométrie pour piloter les irrigations, une utilisation raisonnée de la ressource en eau*, Educagri Éditions, 240 p.
- Tyree M., 1997. The Cohesion-Tension theory of sap ascent: current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 48 (315), 1753-1765.
- Urban J., Ingwers M.W., McGuire M.A., Teskey R.O., 2017. Increase in leaf temperature opens stomata and decouples net photosynthesis from stomatal conductance in *Pinus taeda* and *Populus deltoides* × *nigra*. *Journal of Experimental Botany*, Mar 1, 68 (7), 1757-1767. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx052>.
- Welles J., 2008. *Forty years of figuring, finding, and finesse*. https://ams.confex.com/ams/28Hurricanes/techprogram/paper_139087.htm

INSTALLATIONS DE POMPAGE

Gilles Belaud, Frédéric Rossel

La station de pompage a pour objectif de fournir la puissance requise d'une part pour transporter l'eau depuis la ressource jusqu'aux distributeurs (goutteur, asperseur, canon, etc.), d'autre part pour assurer le bon fonctionnement de ces distributeurs. Le choix de la station de pompage doit se faire en fonction des caractéristiques du réseau, de la topographie (depuis le point de prélèvement jusqu'aux distributeurs) et des débits de fonctionnement souhaités. Ce choix impose donc de définir les caractéristiques attendues des pompes et leur positionnement.

Notions d'hydraulique pour les stations de pompage

Charge hydraulique dans un réseau

La charge hydraulique représente la densité d'énergie mécanique contenue dans un fluide. Elle peut s'exprimer en J/m^3 , c'est-à-dire en pascals, en J/kg ou en joules par unité de poids, c'est-à-dire en mètres. C'est cette dernière définition qui est la plus utilisée en pratique. La charge hydraulique correspond en fait à l'altitude que pourrait atteindre le fluide si toute son énergie était convertie en énergie potentielle.

Une station de pompage a donc pour objectif d'augmenter la charge dans un réseau : cette charge reçue permet de faire monter l'eau, de la mettre sous pression, ou de lui donner de la vitesse (énergie cinétique) pour la projeter à une certaine distance depuis un dispositif d'aspersion. La charge hydraulique, notée H dans la suite, se compose donc d'un terme relatif à l'énergie potentielle (z , l'altitude du point considéré), un terme relatif à la pression ($p/\rho g$, avec p la pression du fluide, ρ sa masse volumique, g la constante de gravité) et un terme de charge cinétique ($v^2/2g$, avec v la vitesse du fluide).

Ainsi, si un système de pompage fournit une pression de $p = 5 \text{ bars}$ ($5 \times 10^5 \text{ Pa}$), il pourrait monter l'eau à $z = p/\rho g = 50 \text{ m}$, ou créer un jet avec une vitesse de $V = \sqrt{2p/\rho} = 31,6 \text{ m/s}$, ou une combinaison comme par exemple un relevage de 25 m puis une mise en vitesse à 22,4 m/s.

En pratique, on appelle aussi « charge » la *charge utile* qui permet d'assurer un écoulement en un point donné. Par exemple, si la charge H dans un réseau est de 120 m en un point situé à une altitude de $z = 100 \text{ m}$, la charge utile est de $120 - 100 = 20 \text{ m}$. Cette charge permet alors d'avoir une pression d'environ 2 bars (= 20 m de colonne d'eau, ou mCE). Si par contre la charge en ce même point est inférieure à 100 m, l'arrivée de l'eau n'est pas possible sans rajouter un système de pompage. Si la charge est de 101 m, la charge utile est de 1 m : elle permet un écoulement par gravité, mais cette charge ne permet pas le fonctionnement de systèmes d'irrigation sous pression.

Pertes de charge dans les conduites sous pression

Le transport de l'eau sur de longues distances implique des pertes d'énergie, donc des pertes de charge que la station de pompage devra compenser. Ces pertes de charge liées à l'écoulement dans les conduites sont dites *linéaires*, et elles sont directement proportionnelles à la longueur de canalisation. Les pertes de

charge *singulières* sont, elles, liées aux divers appareils de mesure, aux vannes, aux rétrécissements ou élargissements de conduite, aux coudes, etc. Ces pertes de charge sont liées à la turbulence qui se développe dans l'écoulement et sont globalement proportionnelles à son énergie cinétique $V^2/2g$.

La loi universelle de perte de charge, dite de Darcy-Weisbach, nous donne, pour une conduite de longueur L et de diamètre D :

$$\Delta H = L (\lambda/D) \times (V^2/2g)$$

où V est la vitesse d'écoulement dans la conduite, et λ le coefficient de frottement.

Ce coefficient peut être donné par des tables ou des abaques.

» Voir le complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Pour les conduites relativement lisses comme le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC) ou l'aluminium, λ est de l'ordre de 0,015 à 0,02. Il varie normalement avec la turbulence et donc le débit, mais dans une moindre mesure.

Il existe des relations qui tiennent compte de ces variations, et plus simples à appliquer que *via* des tables ou des formules qui donnent la valeur de λ en fonction des conditions d'écoulement. En particulier, la formule de Lechapt et Calmon a été ajustée sur ces valeurs pour différents types de matériaux :

$$\Delta H = a_1 L \frac{Q^{a_2}}{D^{a_3}}$$

avec a_1 proche de 10^{-3} m/m, a_2 proche de 2, a_3 proche de 5 (valeurs qui correspondent à l'application de la formule de Darcy-Weisbach avec $\lambda \sim 0,02$).

Pour le PE ou le PVC, on a $a_1 \sim 1,01 \times 10^{-3}$, $a_2 \sim 1,84$, $a_3 \sim 4,88$.

Besoin en charge dans un réseau

La pression requise au niveau des distributeurs dépend de leur nature et de leur fonctionnement souhaité. Pour un canon, l'énergie de pression disponible va être convertie en énergie cinétique : ainsi, une pression élevée au niveau de la buse du canon permettra une grande portée, et inversement cette portée diminue si on réduit la pression. Pour les goutteurs non autorégulants, la pression¹⁸ requise est généralement de 1 bar pour assurer le débit nominal.

Pour un asperseur, la pression est généralement de 3 bars pour la portée nominale – une pression plus faible assurant une portée plus faible.

La pression requise au distributeur P_d impose donc d'apporter une charge hydraulique (exprimée en mètres de colonne d'eau ou mCE) d'environ $10 \times P_d$.

À cette charge, il faut ajouter :

- la hauteur de relevage Δz (dénivelée entre le distributeur et le niveau d'eau – ou charge – au point de prélèvement) ;
- la perte de charge ΔH liée au transport de l'eau sur l'ensemble de la canalisation, depuis le point de prélèvement jusqu'au point de distribution. Cette perte de charge dépend des canalisations et du débit de fonctionnement.

Si le point de prélèvement est en charge (sous pression), cette charge H_0 est à déduire de la charge à apporter.

¹⁸ Cette pression correspond à la pression relative, c'est-à-dire 1 bar de plus que la pression atmosphérique.

Ainsi la charge à apporter est égale à :

$$H = 10 \times P_d + \Delta z + \Delta H - H_0$$

Les pertes de charge, et donc la charge à apporter, dépendent des caractéristiques du réseau de transport (sa longueur, son diamètre) et du débit de fonctionnement Q . La hauteur de relevage peut elle-même être significativement dépendante du débit, du fait du rabattement du niveau d'eau lorsqu'on pompe dans la nappe.

Exemple

Une pompe doit relever l'eau présente dans un aquifère (point A), où le niveau piézométrique est 6 m plus bas que la pompe, en assurant une pression de 5 bars au point D. Le débit de pompage est 5 m³/h, le tuyau (PE) est de diamètre nominal 40 (diamètre intérieur 34 mm). Les tronçons AB et CD font chacun la longueur de 10 m.

La charge à apporter doit permettre de monter l'eau de la hauteur Δz , de compenser les pertes de charge dues à l'écoulement entre A et D, et d'apporter une pression de 5 bars.

La charge à apporter est donc égale à la somme de ces 3 termes.

Le calcul de la perte de charge s'obtient par exemple avec la formule de Lechapt et Calmon, avec :

$$D = 0,034 \text{ m}, Q = 5/3 \text{ 600 m}^3/\text{s}, L = 2 \times 10 \text{ m}, \text{ soit } \Delta H = 1,6 \text{ m CE}$$

La charge à apporter est de :

$$H = \Delta H + \Delta z + 10 \times \Delta \text{pression} = 1,6 + 6 + 10 \times 5 = 57,6 \text{ mCE (pression de 5,7 bars)}$$

La puissance hydraulique correspondante est de :

$$\rho g Q H = 9\,810 \times 5/3 \text{ 600} \times 57,6 = 785 \text{ W}$$

La puissance électrique s'obtient en divisant celle-ci par le rendement total de la pompe.

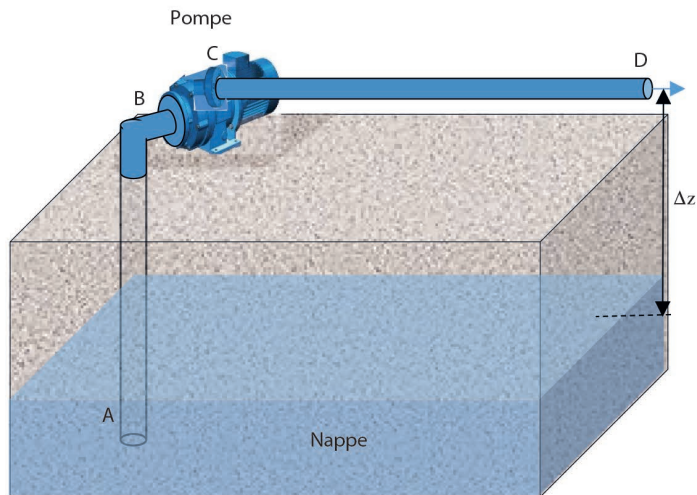


Figure 3.1. Schéma du système de pompage.

Rabattement du niveau d'eau dans une nappe

Lorsqu'on pompe dans un aquifère, on vide localement l'aquifère, entraînant une baisse du niveau d'eau (qu'on appelle « rabattement ») à proximité du point de pompage. La zone d'exhaure est réalimentée grâce aux écoulements dans l'aquifère, d'autant plus facilement que l'aquifère est « transmissif », la

transmissivité étant égale à la conductivité du matériau constituant l'aquifère fois son épaisseur. Le rabattement est donc d'autant plus important que le débit de pompage est élevé, et que l'aquifère est peu transmissif. Pour un aquifère isotrope (même conductivité hydraulique dans toutes les directions), le rabattement Δh peut être calculé approximativement comme solution de l'équation :

$$Q = 2/3 K_{\text{sat}} \Delta h (2h_0 - \Delta h)$$

où Q est le débit de pompage (en m^3/h), K_{sat} la conductivité hydraulique à saturation en m/h de l'aquifère, h_0 est l'épaisseur de la nappe statique (en l'absence de pompage).

Caractéristiques hydrauliques des pompes

Les systèmes sous pression utilisent très majoritairement des pompes centrifuges, utilisées pour la mise sous pression, pour le relevage ou les deux en même temps. La suite du chapitre est illustrée pour les pompes centrifuges, même si certaines notions sont applicables à d'autres systèmes de pompage. Le régime de fonctionnement d'une pompe dépend à la fois de ses caractéristiques et du réseau. Les caractéristiques sont donc fournies sous forme de courbe, indiquant différents régimes de fonctionnement possibles.

Hauteurs d'aspiration et de refoulement

Une pompe a pour objectif de relever l'eau ou de lui apporter de la pression. La hauteur d'aspiration est la différence entre le niveau de départ et le niveau de la pompe. Cette hauteur est essentielle pour l'installation d'une pompe : d'une part, si elle est positive, l'eau n'arrivera pas à la pompe sous le seul effet de la gravité (amorçage de la pompe nécessaire) et, d'autre part, si elle est trop élevée, la cavitation peut apparaître ou le pompage peut être impossible (voir section « Pression nécessaire en entrée », p. 82). Un manomètre en entrée permet de contrôler ces conditions. La pression P_{asp} est égale à la pression P_1 dans le réservoir source (réservoir, rivière, nappe, etc.) moins la hauteur (multipliée par 9 810 pour avoir une pression en pascal). La hauteur de refoulement n'est pas réellement limitée par la pompe, en revanche une forte hauteur induit une forte pression dans la conduite de refoulement et donc nécessite une conduite résistante à cette pression.

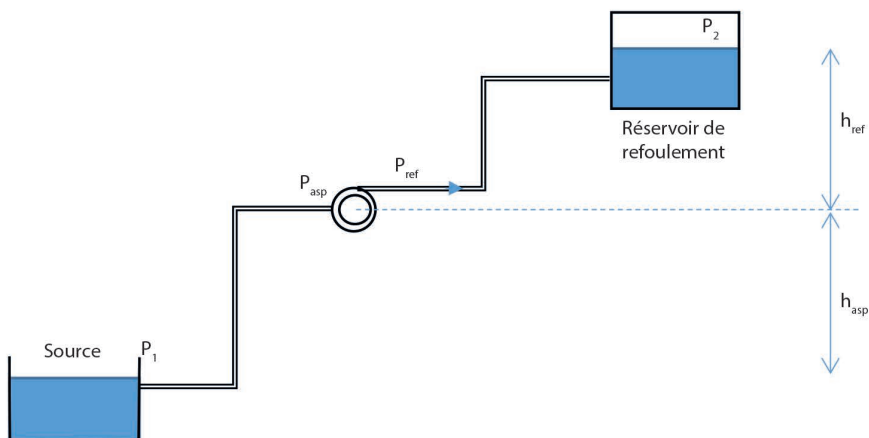


Figure 3.2. Hauteurs et pressions de refoulement et d'aspiration.

Énergie et puissance de pompage, rendement

La puissance hydraulique est l'énergie mécanique fournie au liquide pompé. Par définition de la charge, l'énergie d'un volume de fluide est égale à sa charge hydraulique multipliée par son poids. Dans un système de pompage, on a un apport de charge qui se traduit essentiellement par un gain de pression entre l'aspiration et le refoulement. Ainsi, l'énergie apportée par la pompe est égale au produit entre le gain de pression (en pascals) et le volume pompé ; la puissance hydraulique utile est obtenue en multipliant cette même différence de pression par le débit de pompage.

La puissance consommée est bien sûr plus élevée, du fait des pertes d'énergie dans le moteur et le système de transmission. La puissance consommée est donc obtenue en divisant la puissance hydraulique par le rendement global (incluant les pertes énergétiques dues au moteur, à la transmission, à la pompe).

Ainsi, avec une pression exprimée en bar et un débit en m³/h, la puissance électrique consommée est donnée en kW par :

$$P_{\text{elec}} = [(p_{\text{ref}} - p_{\text{asp}}) \times (Q/36)] / \text{rendement}$$

La différence de $p_{\text{ref}} - p_{\text{asp}}$ sera mesurée par un manomètre. Elle est souvent exprimée en hauteur d'eau équivalente, HMT (hauteur manométrique totale) indiquant la dénivelée que cette pompe permettrait d'assurer. Ainsi, en utilisant la HMT (en mCE), on a :

$$P_{\text{elec}} = 2,725 \times [(HMT \times Q) / \text{rendement}] / 1000$$

L'énergie électrique en kWh est obtenue en multipliant cette puissance par la durée (en heures) de fonctionnement de la pompe. On peut ainsi assez simplement obtenir un coût de fonctionnement énergétique d'une station de pompage en multipliant l'énergie consommée par le prix du kWh (voir chapitre 6).

Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge

Le constructeur de pompe doit fournir les courbes caractéristiques suivantes : HMT(Q), dite « courbe caractéristique de la pompe », $\eta(Q)$, courbe de rendement (puissance hydraulique/puissance consommée) et NPSH_r(Q) (charge résiduelle requise).

Courbe caractéristique HMT(Q)

La courbe HMT(Q) exprime la relation entre le débit (Q) et la charge qu'elle délivre (figure 3.3). Pour une pompe, la charge apportée est caractérisée par la hauteur manométrique totale (HMT), exprimée en mètres de colonne d'eau. Cette HMT est directement mesurée par la différence de pression entre sortie et entrée grâce à des manomètres. Par exemple, pour le modèle 1 (figure 3.3), pour un débit de 25 m³/h, la charge fournie par la pompe sera de 7 m – elle sera de 4 m pour le modèle 2 –, la pompe n° 3 ne sera pas adaptée à ce débit.

Pour une vitesse de rotation donnée, la hauteur manométrique totale HMT(Q) (donc la pression fournie) engendrée par la pompe décroît avec le débit.

Courbe de rendement et consommation énergétique

Le rendement de la pompe $\eta(Q)$ (rapport de la puissance utile à la puissance absorbée) est nul pour le débit nul, passe par un maximum pour le débit nominal et redescend lorsque le débit est plus élevé. Avec le vieillissement de la pompe, notamment la cavitation, ces courbes évoluent avec le temps avec une perte de rendement et un abaissement de la HMT fournie à débit donné. Il existe un régime optimal, maximisant le rapport entre la puissance utile et la puissance consommée. La conception d'une

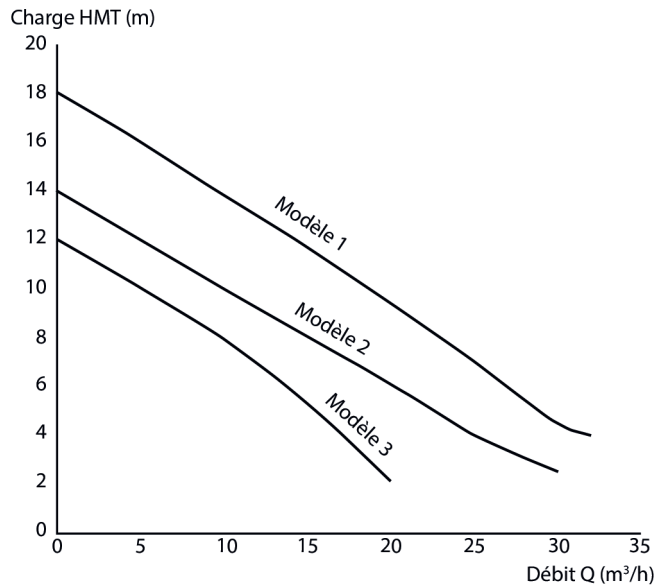


Figure 3.3. Courbes caractéristiques de pompes centrifuges immergées (eaux chargées).

station de pompage doit être telle que le point de fonctionnement de chaque pompe se situe près de son régime optimal. C'est l'objet des variateurs de vitesse pour les systèmes amenés à fonctionner à différents débits (voir plus loin).

La consommation C est la puissance absorbée par unité de débit :

$$C = P_c / Q \text{ exprimée en kWh/m}^3$$

On peut tracer la courbe de consommation en fonction du débit, $C = f(Q)$: elle constitue un des éléments de choix dans le calcul de l'investissement et de la rentabilité d'une installation. La courbe de consommation se déduit des deux courbes HMT et η .

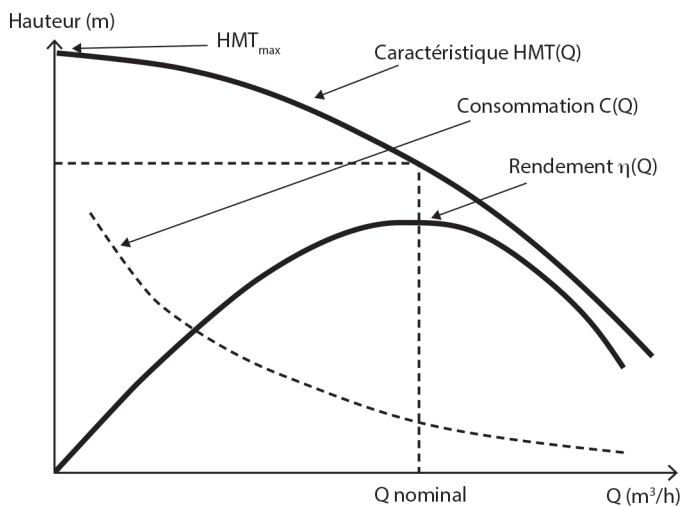


Figure 3.4. Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge.

Pression nécessaire en entrée

Il est impossible d'avoir une pression absolue nulle ou négative (la pression étant liée à la présence de matière). Par ailleurs, lorsque la pompe est située au-dessus du plan d'eau dans lequel elle pompe, elle doit être amorcée en remplissant d'eau la conduite d'aspiration. Elle peut alors fonctionner, avec une pression d'aspiration inférieure à la pression atmosphérique. Les pressions d'aspiration et de refoulement, données par des manomètres, sont affichées en pression relative, c'est-à-dire en écart par rapport à la pression atmosphérique. Ainsi, la pression d'aspiration devra toujours être supérieure à -1 bar.

Cavitation

Elle apparaît lorsque la pression à l'entrée de la roue de la pompe atteint la pression correspondant à la pression de vapeur saturante de l'eau ; celle-ci se met à bouillir et passe en phase gazeuse ; la pompe n'assure plus le débit et la pression. Des cavités remplies de vapeur d'eau se forment dans la veine liquide et implosent en générant des pressions très importantes. Cet écrasement produit un bruit de martèlement et de vibrations, comme si la pompe véhiculait des cailloux.

Ce phénomène de cavitation provoque l'usure rapide, voire très rapide, des éléments de la pompe par érosion de cavitation (percement de la roue et des éléments mécaniques) (photo 3.1).



Photo 3.1. Effet de la cavitation sur une turbine (© Klausbärbel, CC BY-SA 3.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons).

Charge résiduelle, ou NPSH

La charge résiduelle, notée NPSH (*net positive suction head*), est la pression absolue (à l'entrée de la roue, à la bride d'aspiration pour les pompes horizontales de surface), exprimée en hauteur d'eau (mCE), diminuée de la hauteur correspondante à la pression de vapeur saturante à la température de l'eau. La valeur de 0 correspondrait donc à un état où l'eau passe à l'état de vapeur.

Le NPSH disponible (NPSHd) est le NPSH lié à l'installation : il résulte de la pression dans le bassin d'alimentation, de la pression atmosphérique, de la tension de vapeur P_v du liquide pompé, de la hauteur d'aspiration et des pertes de charge à l'aspiration. Il s'exprime en mètres de colonne d'eau.

NB : P_v , pression de vapeur saturante, est la pression en dessous de laquelle le liquide passe en phase gazeuse. Elle varie avec la température. À 20 °C, elle est de 2,3 kPa (0,023 bar).

La cavitation apparaît lorsque le NPSH disponible est inférieur au NPSH requis. Le NPSH requis est supérieur à 0 du fait des pertes de charge dans la pompe, et du fait de la conversion d'énergie de pression en énergie cinétique dans le corps de la pompe. Pour une pompe donnée, le NPSH requis augmente donc avec le débit de pompage.

Par sécurité, il est recommandé d'avoir une marge de 1 m entre ces 2 valeurs.

Point de fonctionnement

Principe

Le point de fonctionnement d'une pompe correspond aux conditions (débit, pression de fonctionnement) qui vont s'établir. Ces conditions résultent à la fois de la pompe et de la charge demandée par le

réseau pour élever l'eau, la mettre sous pression, la transporter. De ces conditions découlent la puissance fournie, la puissance consommée, les pressions d'aspiration et de refoulement, le NPSH disponible.

Un réseau nécessitant peu de charge (faible pression demandée, peu de pertes de charge, peu de hauteur de relevage) lui permettra de fonctionner à un débit élevé. Un réseau nécessitant une forte demande de charge induira un débit faible.

Le point de fonctionnement peut être obtenu graphiquement par intersection entre la courbe de demande du réseau ($\Delta H = L (\lambda V^2)/(D 2g)$) et ce que peut fournir la pompe (HMT(Q)) (figure 3.5). La courbe de demande fait apparaître la hauteur de relevage souhaitée (z) et la perte de charge ΔH due à la circulation de l'eau dans tout le circuit (aspiration plus refoulement).

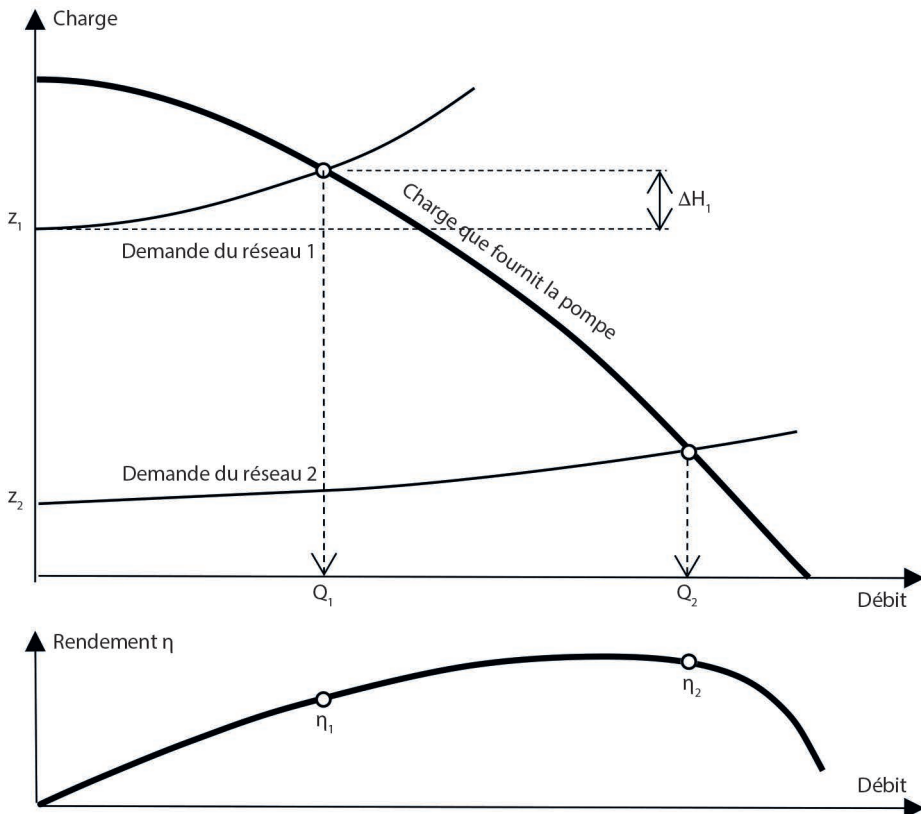


Figure 3.5. Détermination du point de fonctionnement d'une installation.

Le réseau 1 demande une charge plus importante (hauteur de relevage plus élevée, perte de charge ΔH_1 plus élevée), et donc le débit fourni par la pompe, Q_1 , est plus faible que pour le réseau 2. D'après la courbe de rendement, le régime obtenu pour Q_1 est loin de l'optimum énergétique.

Choix du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement détermine le rendement obtenu, la puissance absorbée et la consommation énergétique.

La pompe doit être choisie de manière à ce que le point de fonctionnement se situe au voisinage du point de rendement maximum, c'est-à-dire telle que le débit nominal soit voisin du débit

d'équipement nécessaire. Il importe d'assurer un débit minimum, tel qu'indiqué dans les spécifications techniques, car la circulation de l'eau assure le refroidissement du corps de la pompe. À titre indicatif, ce débit minimum est de l'ordre de :

- 15 % du débit nominal pour les pompes multicellulaires ;
- 40 % du débit nominal pour les pompes monocellulaires.

Plus la courbe caractéristique de la pompe est plate, plus la tolérance de variation de débit (de pression) autour du débit nominal sera grande.

Il faut éviter de faire fonctionner la pompe à débit nul, car cela provoque un échauffement anormal de l'eau dans la pompe et la détérioration de la pompe.

Effet des variateurs de vitesse

La vitesse standard de rotation d'un moteur électrique asynchrone est basée sur la fréquence du courant alternatif (souvent 1 450 ou 2 900 tours par minute, suivant le nombre de pôles du moteur). Un variateur de vitesse permet de modifier la fréquence du courant et donc la vitesse de rotation. Les caractéristiques en sont modifiées (figure 3.6). L'intérêt est de pouvoir ajuster le régime du moteur au point de fonctionnement souhaité, en recherchant un rendement maximum.

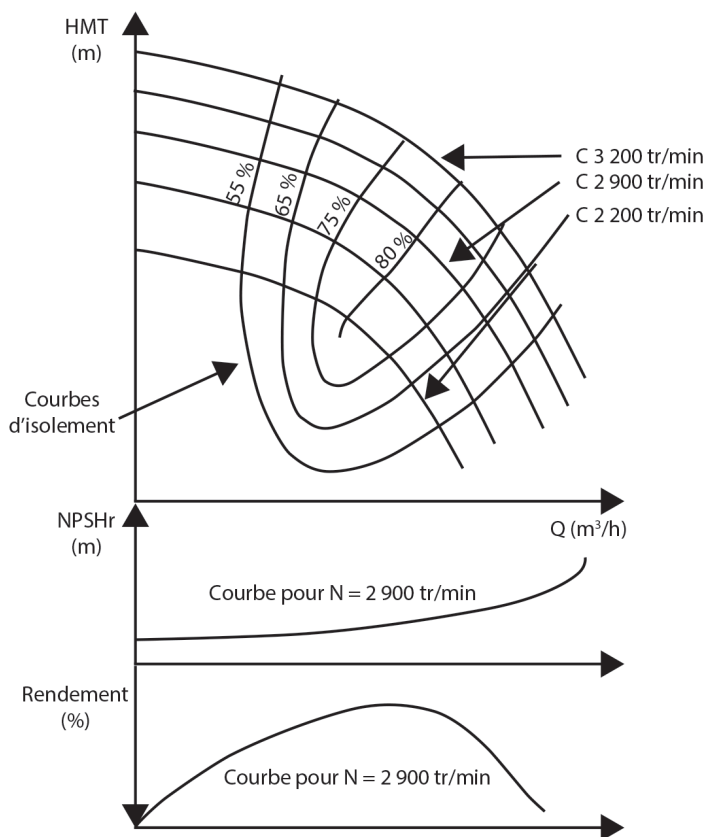


Figure 3.6. Courbes caractéristiques d'une pompe centrifuge avec variateur de vitesse.

NPSHr : charge absolue requise (NPSH requis) pour le bon fonctionnement de la pompe.

Associations de pompes

Lorsque plusieurs pompes sont utilisées, elles peuvent être placées en série ou en parallèle.

Les associations en série de 2 pompes permettent d'augmenter la charge apportée : le débit est le même dans chacune des pompes, mais chacune apporte une certaine charge à l'eau qui circule. On a ce type de montage par exemple avec une pompe de forage, à laquelle on ajoute un surpresseur lorsque la pression est insuffisante (figure 3.7).

Les associations en parallèle sont fréquentes dans les installations collectives, où le débit demandé est très variable en fonction du nombre d'utilisateurs utilisant le réseau (figure 3.8). Dans ce cas, les débits s'additionnent, et les charges fournies par chacune des pompes sont identiques, car la charge est la même en entrée (même conduite) et à la jonction sur la conduite de refoulement.

Dans tous les cas, il faut s'assurer que le point de fonctionnement du montage induit des couples débit-charge dans chacune des pompes proches de leur rendement optimal.

Coups de bélier

Un coup de bélier est un phénomène transitoire dû à des changements rapides de la vitesse de circulation de l'eau. Ils provoquent des surpressions ou des dépressions qui peuvent entraîner la rupture et l'écrasement des canalisations.

Les coups de bélier peuvent être provoqués par :

- l'arrêt ou le démarrage brutal du groupe de pompage ;
- l'ouverture ou la fermeture rapide d'une vanne ou d'une borne d'irrigation ;
- la mauvaise utilisation ou le dysfonctionnement des dispositifs de protection ;
- la présence de poches d'air dans les canalisations.

Pour limiter l'importance des coups de bélier et leurs conséquences, il faut :

- ralentir les variations de vitesse de l'eau grâce à des mises en route et à des arrêts progressifs de l'installation, à des ouvertures et fermetures lentes des vannes ;
- limiter les surpressions et les dépressions à l'aide d'accessoires tels que ventouses, soupapes, ballons judicieusement installés (voir exemple figures 3.8 et 3.32).

Configuration d'une station de pompage

Exemples de stations de pompage

Station individuelle

Une station individuelle est souvent constituée d'une seule pompe, dans un forage (pour le relevage et la mise sous pression) ou sur une conduite d'amenée (augmentation de la pression).

L'exemple (photo 3.2 et figure 3.7) est une station de surpression permettant l'irrigation par aspersion (enrouleur). La pompe a un débit nominal de 90 m³/h pour une pression de 5 bars, puissance consommée de 18,5 kW (rendement total 67 %).

Stations collectives

Une station collective (ou grosse station individuelle) peut être constituée de plusieurs pompes pouvant être actionnées indépendamment. L'intérêt est de pouvoir adapter le nombre de pompes en fonction de la demande de débit, avec des points de fonctionnement proche de l'optimum pour chacune de ces pompes. Les deux exemples qui suivent illustrent ce type de station.

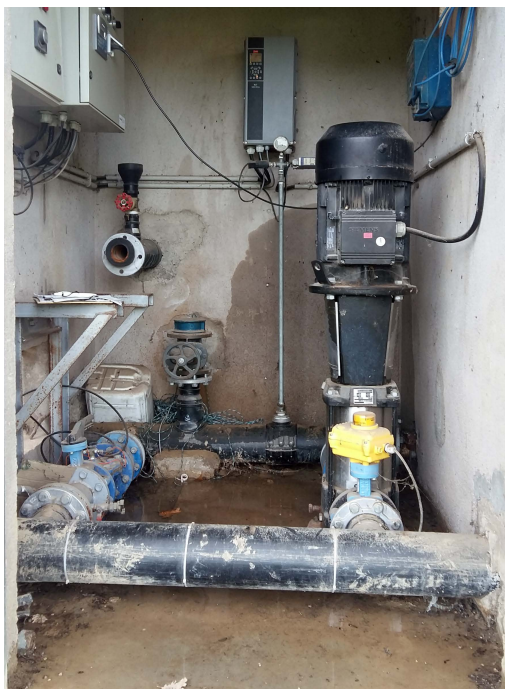


Photo 3.2. Une station de mise en pression individuelle, Domaine de Lavalette (© G. Belaud).

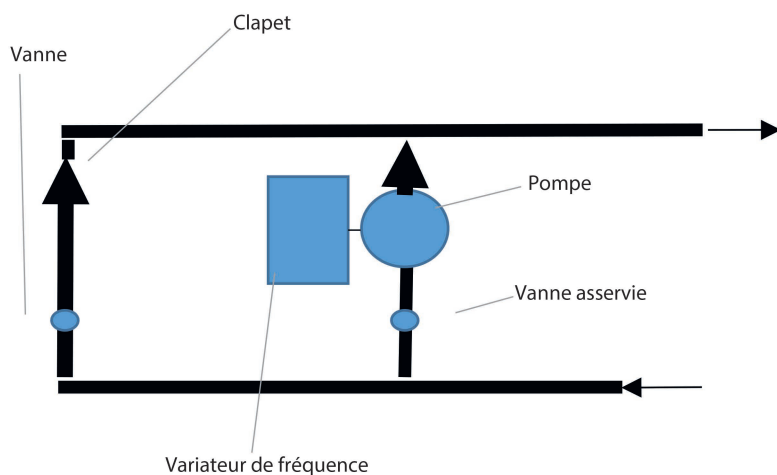


Figure 3.7. Schéma de l'installation.

Exemple de la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG)



Photo 3.3. Station de pompage de l'ASA Cabournieu.

Station de pompage en aspiration directe, 96 l/s (345 m³/h) HMT 135 m (dont 5 m d'aspiration) (moteur 75 kW + moteur 200 kW).

Régulation-optimisation de la consommation énergétique avec un variateur de fréquence, une pompe Jockey pour les faibles débits, télétransmission de type Sofrel ; crépine autonettoyante (© CACG-ASA Cabournieu/J. Richonnier).

Exemple du canal de Gignac

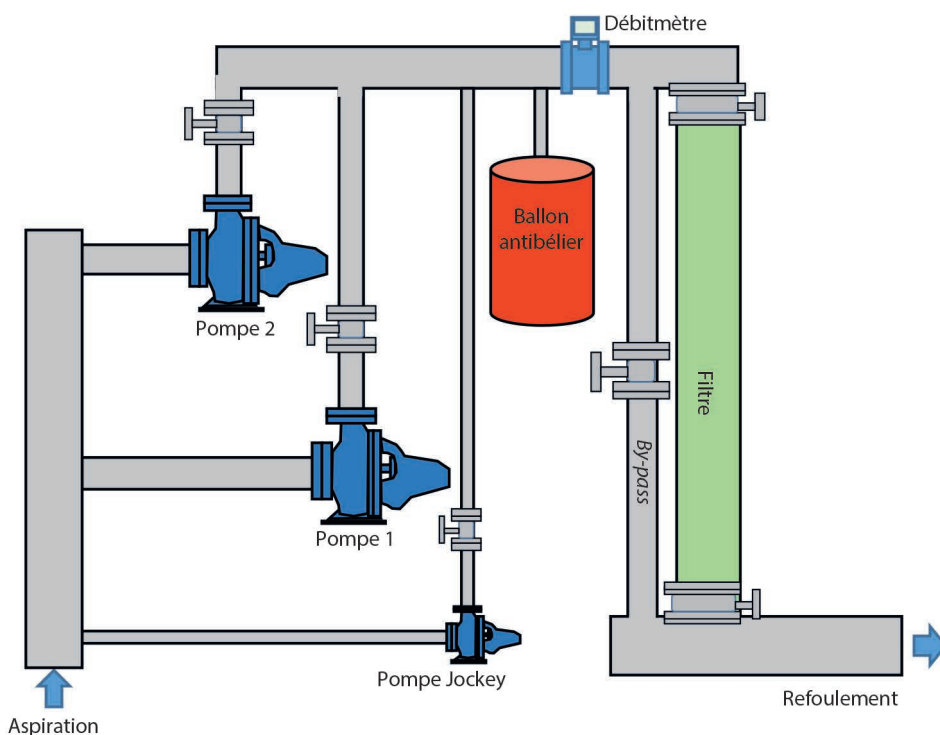


Figure 3.8. Station de pompage avec 2 pompes 73 kW (255 m³/h, HMT 75 m), 1 pompe Jockey, filtre (en vert), ballon antibélier (en rouge). ASA Canal de Gignac.



Photo 3.4. Aménagement du site de prise sur un canal.

Éléments constitutifs d'une station de pompage

Une station de pompage contient au minimum une pompe, un moteur et une conduite de refoulement alimentant le réseau sous pression. On désigne par groupe de pompage l'ensemble regroupant la pompe, *stricto sensu*, et le moteur qui lui fournit l'énergie nécessaire à son fonctionnement. Les autres éléments associés peuvent être :

- une conduite d'aspiration ;
- un clapet antiretour ;
- un système de filtration ;
- un ballon antibélier ;
- des vannes d'isolement ;
- un réservoir tampon ;
- des dispositifs de mesure (débitmètre, compteur de volume, manomètres, etc.) ;
- un poste électrique, avec éventuellement un variateur de fréquence et des automates de régulation de la station (mise en route, arrêt, adaptation vitesse, etc.).

Suivant les plages de fonctionnement prévues, il peut être nécessaire d'avoir plusieurs groupes de pompage en parallèle, les groupes étant mis en marche selon le débit souhaité. La présence d'une pompe avec variateur permet d'affiner le régime de fonction en fonction du débit demandé.

En plus de la station de pompage proprement dite, un aménagement peut être nécessaire au niveau de la prise d'eau qui peut être en rivière, dans un réservoir, dans une nappe. L'aspiration d'eau peut entraîner celle de matériaux (sable, végétaux aquatiques) et induire du colmatage des systèmes de filtration placés en aspiration.

Groupe de pompage

Selon le mode de liaison entre la pompe et son moteur, on distingue :

- les pompes à accouplement direct :
 - l'arbre de la pompe est commun avec celui du moteur ou est relié à celui du moteur par un accouplement rigide : groupe monobloc,
 - l'arbre de la pompe est accouplé à celui du moteur par un accouplement semi-élastique : pompe à accouplement ;
- les pompes à multiplicateur de vitesse :
 - ces pompes sont destinées à être reliées à la prise de force du tracteur. Elles ne conviennent qu'aux installations mobiles ou de secours.

Suivant le cas, on utilisera soit :

- des groupes de surface, qui sont hors d'eau ;
- des groupes immergés, qui peuvent être totalement immergés (moteur et pompe immergés, figure 3.10) ou avoir le moteur hors d'eau, relié à la pompe immergée par une ligne d'arbre (figure 3.9).

Les transmissions par poulies-courroies sont à éviter car elles sont source d'accidents.

Schéma type d'une station individuelle simple

Position de la pompe, du groupe moteur

Une station individuelle simple peut être constituée d'une pompe immergée ou placée en surface et alimentée par une conduite d'aspiration.

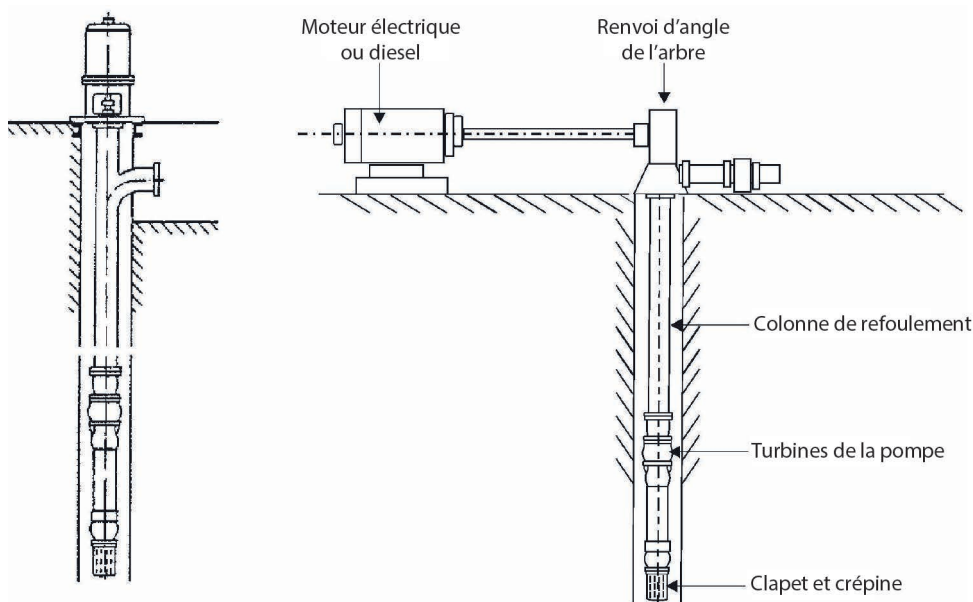


Figure 3.9. Coupe schématique de montage d'une pompe immergée avec moteur en surface (source : AFPR).

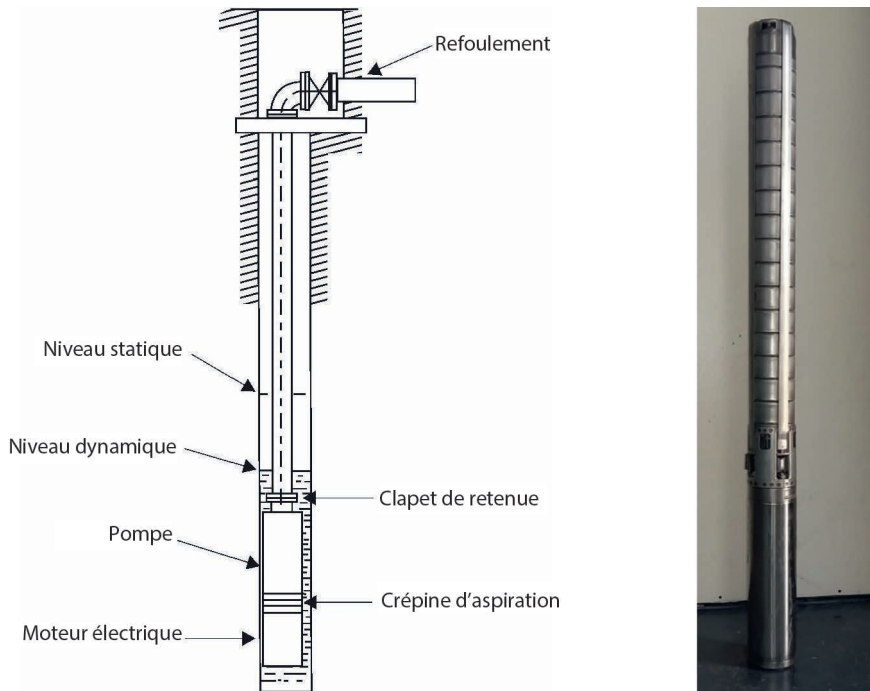


Figure 3.10. Coupe schématique de montage de groupe électropompe entièrement immergée.

Lors de la conception et de l'installation d'une station de pompage, il convient de respecter certaines règles concernant, outre le choix du groupe de pompage :

- l'aménagement de la prise d'eau, et l'emplacement de la pompe par rapport à celle-ci ;
- le montage du groupe de pompage ;
- son raccordement à la prise d'eau, dans le cas d'une pompe de surface, et à la conduite de refoulement ;
- l'alimentation électrique de la station de pompage.

Avec une pompe immergée, il n'y a pas de problème d'amorçage, mais il faut tenir compte du rabattement du niveau d'eau au cours du pompage pour positionner le groupe, également du risque d'ensablement, du risque de mauvais refroidissement du moteur dans le cas d'un groupe électropompe immergée, de la nécessité de prévoir une sécurité de niveau bas de l'eau (via des sondes de hauteur d'eau ou un interrupteur à flotteur).

Si le rabattement est trop important, le niveau d'eau pourra passer sous le niveau d'aspiration. Un système de sécurité (sonde de niveau) permettra d'arrêter la pompe, mais le système de pompage ne fonctionnera pas correctement. Pomper à un débit plus faible permettra de limiter le rabattement. Toutefois, la pompe pourra ne pas être à son rendement optimal.

Aménagement de la prise d'eau

Un bon aménagement de la prise d'eau doit permettre :

- une mise en vitesse progressive de l'eau : en général, les vitesses de l'eau dans les bassins doivent être inférieures à 0,5 m/s ;
- d'éviter l'entraînement de corps étrangers, d'air et de poissons.

Les prises d'eau brute en rivière ou en lac peuvent nécessiter :

- l'installation d'une pompe d'exhaure, qui permet de pomper des eaux chargées ;
- l'installation d'une grille pour arrêter les éléments les plus gros, et d'une crépine ;
- un dimensionnement en fonction du type de pompes installées pour assurer le passage des débits nécessaires ;
- un bassin de décantation si les eaux sont chargées en sable ou en particules argileuses colmatantes. La pompe de reprise sera alors installée de manière à toujours être en charge.

Le bassin est en maçonnerie, en béton, métallique ou en PVC. Son dimensionnement doit faire l'objet d'une étude particulière. On compte en général 1 m^3 de bassin pour un débit de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ de la pompe de reprise.

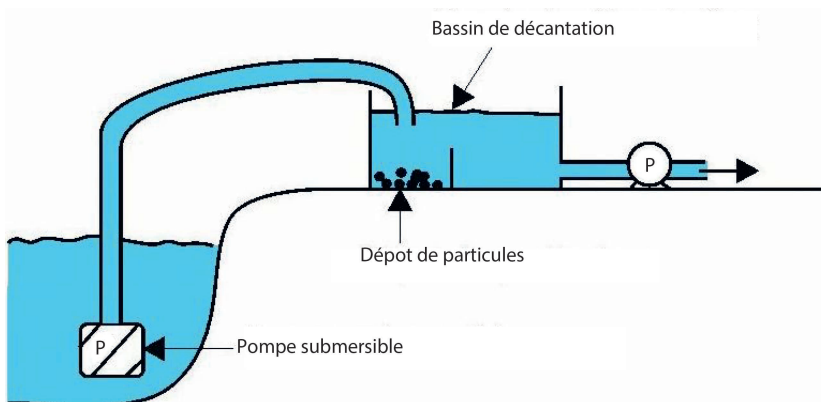


Figure 3.11. Coupe schématique d'une prise d'eau chargée.

Pour une pompe de surface

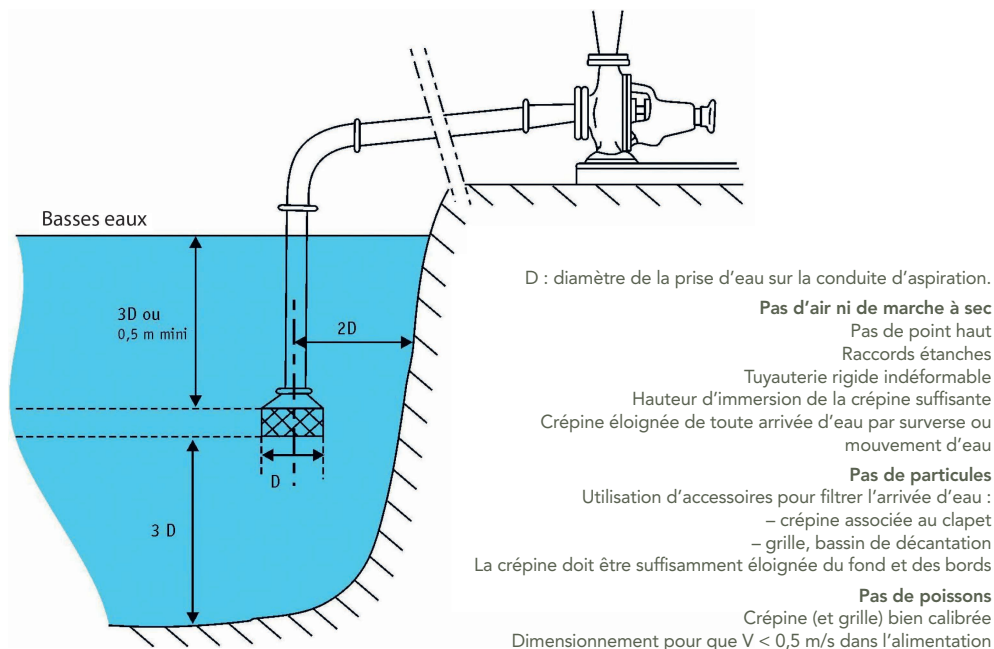


Figure 3.12. Coupe schématique d'une prise d'eau pour une pompe de surface.

Pompage d'eaux de surface

Cette installation concerne les rivières et les plans d'eau (retenues collinaires, carrières).

Types d'aménagement

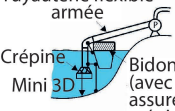
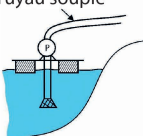
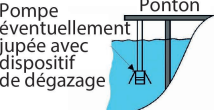


<p>Pompe sur la rive</p> <p>Tuyauterie flexible armée</p>  <p>Crépine Mini 3D Bidon flotteur (avec patte pour assurer 3D sous la crépine au niveau minimum)</p>	<p>Problème d'aspiration lors de l'abaissement du plan d'eau (fin de saison) : vérifier la charge résiduelle disponible (NPSHd) Risque de submersion du groupe en hiver Risque de colmatage de crépine et d'entraînement de poissons</p>
<p>Pompe sur un radeau</p> <p>Tuyau souple</p> 	<p>Pas de problème d'aspiration Risque de problème de refoulement (tuyau souple) Montage temporaire</p>
<p>Pompe de pompage</p>  <p>Pompe éventuellement jupée avec dispositif de dégazage</p> <p>Ponton</p>	<p>Utilisation de pompe immergée équipée d'une jupe Permet de pomper dans un plan d'eau Travaux importants et coûteux réservés à des vitesses d'eau faibles (interdit au fil de l'eau)</p>
<p>Pompe submersible sur rail</p> 	<p>On peut facilement monter ou descendre la pompe L'ensemble doit être bien ancré pour ne pas être entraîné par les crues</p>
<p>Pompage en fond de réserve</p>  <p>Moins immergé ou crépine Murets Digue</p>	<p>Pas de problème d'aspiration Muret qui protège de l'envasement Problème d'accès à la crépine (crépine autonettoyante) Problème de colmatage par les feuilles</p>

Figure 3.13. Coupes schématiques de prises avec pompage direct.

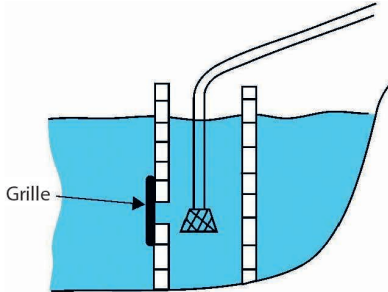
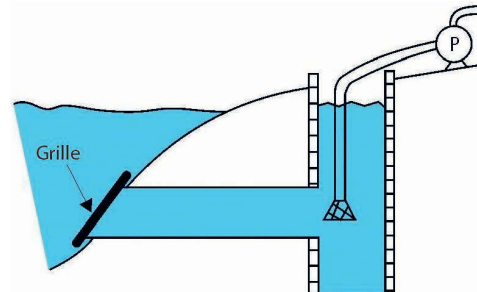
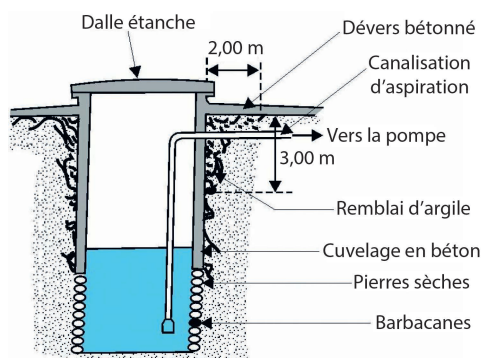
Puisard en rivière ou groupe immergé	Puisard avec amenée d'eau
 <p>Grille</p>	 <p>Grille</p>
<p>Pompe submersible Risque de colmatage de la grille Un filtre de rochers autour du puisard peut constituer une protection supplémentaire</p>	<p>Bien dimensionner le diamètre du puisard Risques de colmatage et d'envasement</p>

Figure 3.14. Coupe schématique de prises avec pompage dans un puits.

Pompage d'eaux souterraines (puits ou forage)

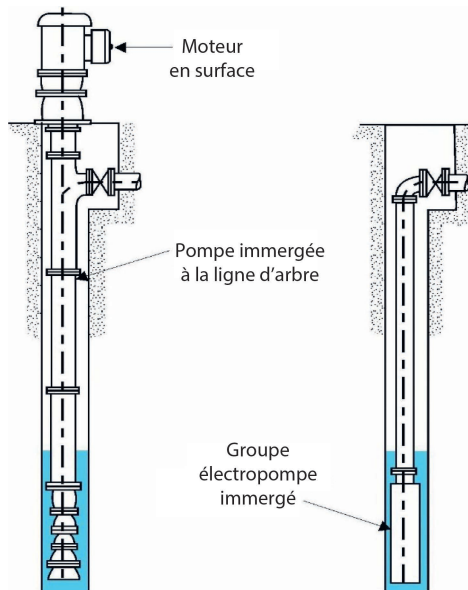
Des coupes schématiques de puits construits dans les règles de l'art sont données ci-après (figures 3.15 et 3.16).



Avec une pompe de surface, la profondeur d'aspiration est limitée à 6-7 m, aussi faut-il faire attention aux variations du niveau d'eau pour qu'il n'y ait pas cavitation (vérifier le NPSHd).

Il est conseillé de prévoir une sécurité de niveau bas (poire, sonde de hauteur).

Figure 3.15. Coupe schématique d'un puits avec pompe de surface.



Par précaution, veiller au niveau dynamique : il doit être au minimum 0,5 m au-dessus du niveau du clapet antiretour.

Pas d'échauffement du moteur :

- la crépine du groupe immergé doit se trouver à un niveau supérieur à celui de la partie crépinée du forage : la circulation de l'eau assure ainsi le refroidissement du moteur ;
- la partie crépinée du forage doit être plus basse que le moteur.

Pas de corps étrangers :

- la crépine du groupe doit être à un niveau différent de celui de la crépine du forage ;
- prévoir une distance suffisante entre le groupe et le fond du forage.

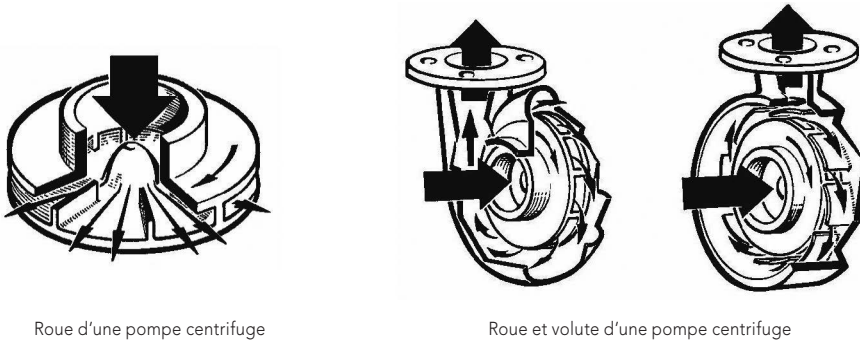
Figure 3.16. Coupe schématique de forage avec pompe immergée (source : AFPR/Prodoc).

Constitution et typologie des pompes centrifuges

Le type de pompe le plus courant en irrigation est la pompe centrifuge. L'énergie hydraulique est apportée au fluide par une roue tournant à une vitesse de rotation élevée, fournissant ainsi de l'énergie cinétique convertie ensuite en énergie de pression dans le corps de la pompe. Cette section décrit les types de pompe et leurs caractéristiques. Les moteurs sont décrits dans la section suivante.

Éléments constitutifs d'une pompe

Un impulseur (ou roue) met en vitesse le liquide qui lui parvient par son ouïe centrale. Un diffuseur ou une volute transforme l'énergie cinétique ainsi acquise en pression de refoulement. La dépression créée à l'orifice d'aspiration assure l'arrivée continue de l'eau, sous réserve du respect de certaines conditions propres à éviter les phénomènes dits de cavitation (hauteur d'aspiration ou pertes de charge trop importantes ; voir section « Cavitation », p. 82).



Roue d'une pompe centrifuge

Roue et volute d'une pompe centrifuge

Figure 3.17. Roue et volute d'une pompe centrifuge (source : AFPR).

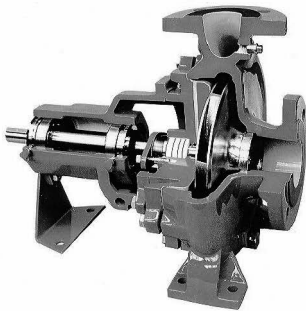
Une pompe sera choisie en fonction du débit et de la charge maximaux souhaités. La hauteur manométrique ou pression fournie par la pompe est liée à la vitesse périphérique de la roue (produit de la vitesse de rotation par le diamètre).

La vitesse de la pompe dépend directement du moteur.

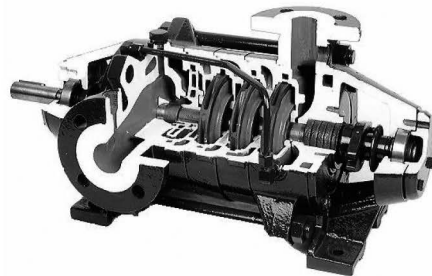
Nombre d'étages

Des pompes installées en série additionnent leur pression. La hauteur manométrique peut ainsi être augmentée en montant des roues en série. On distingue ainsi :

- les pompes monocellulaires, qui comportent une seule roue et donc un seul étage de pression ; elles sont utilisées pour des basses et moyennes pressions ;
- les pompes multicellulaires à plusieurs roues et plusieurs étages de pression ; chaque roue augmente la pression par rapport à la roue précédente. Elles permettent d'obtenir des moyennes et hautes pressions.



Coupe d'une pompe centrifuge monocellulaire



Coupe d'une pompe centrifuge multicellulaire

Figure 3.18. Pompe centrifuge monocellulaire et multicellulaire.

Le débit nominal d'une pompe dépend :

- de la largeur de la roue ;
- de la taille de la pompe ;
- des dimensions des orifices d'aspiration et de refoulement.

Le débit réel dépendra du circuit sur lequel la pompe sera installée, ainsi que de la vitesse de rotation communiquée par le moteur. Le point de fonctionnement nominal (caractérisé par un couple débit-pression) correspond au régime où le rendement de la pompe est maximal.

Groupes de surface

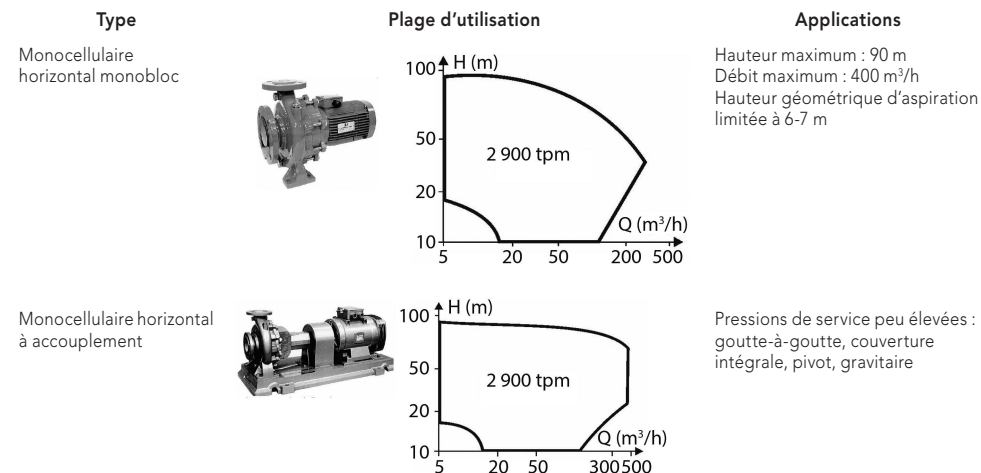


Figure 3.19. Plages d'utilisation de différents types de groupes de surface (tpm = tours par minute) (source : membre de l'AFPR).

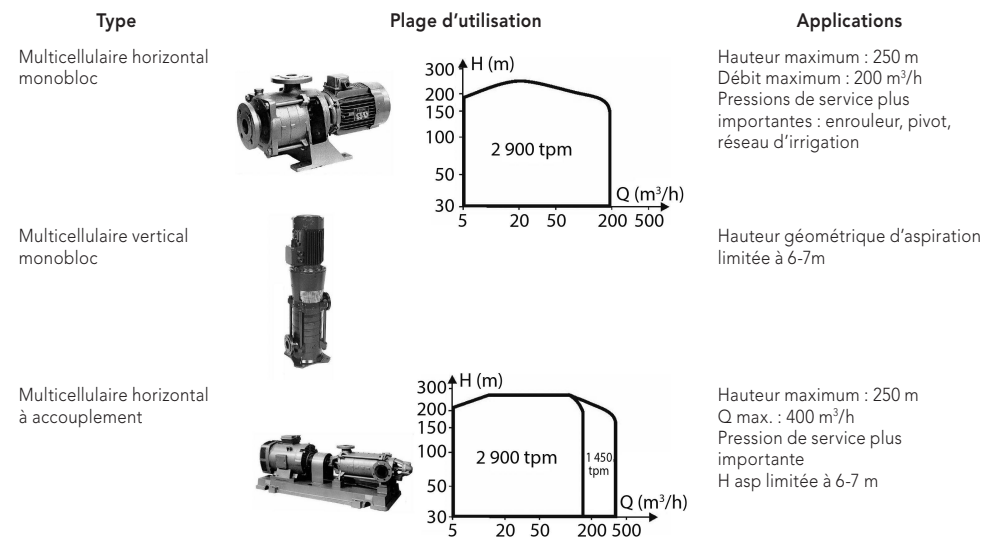


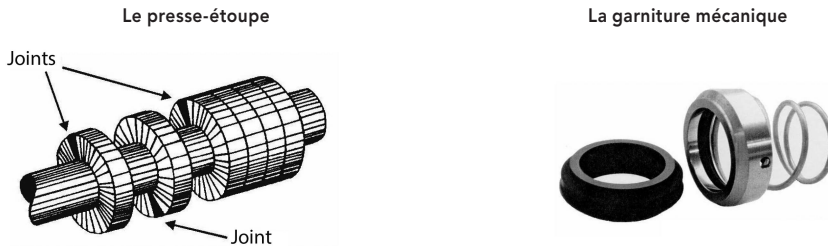
Figure 3.20. Plages d'utilisation de différents types de groupes de surface (source : membre de l'AFPR).

Particularités des pompes de surface

Étanchéité

Deux systèmes principaux sont utilisés pour assurer l'étanchéité du passage de l'arbre entre l'intérieur et l'extérieur de la pompe.

En irrigation, l'étanchéité par presse-étoupe (garniture à tresse) est préférable du fait de la facilité d'entretien et des arrêts prolongés en période hivernale.



L'étanchéité est réalisée par des anneaux de tresse logés dans la boîte à garniture et maintenus en contact avec l'arbre ou la chemise d'arbre par l'action d'un fouloir.

Ce dernier ne doit jamais être trop serré sous peine de surcharger le moteur et d'user rapidement l'arbre ou la chemise d'arbre.

Un presse-étoupe doit fuir en permanence pour assurer le refroidissement et la lubrification des surfaces en frottement :

- vérification périodique du serrage obligatoire ;
- maintenance et remplacement faciles (pas de démontage de la pompe).

Une garniture mécanique comporte une bague fixe montée dans le corps de pompe frottant en permanence sur une bague tournante montée sur l'arbre :

- pas d'entretien ni de fuite d'eau ;
- maintenance et remplacement difficiles (démontage obligatoire) ;
- accepte mal les arrêts prolongés (gommage et incrustations).

Figure 3.21. Dispositifs d'étanchéité d'un arbre de pompe de surface (source : à gauche, AFPR/Prodoc ; à droite, membre de l'AFPR).

Amorçage

Le corps de pompe et la tuyauterie d'aspiration doivent être remplis d'eau avant le démarrage. Un orifice de remplissage (dit d'amorçage) est prévu à cet effet.

Pour les pompes situées au-dessus du niveau de l'eau, un clapet antiretour de pied monté à l'extrémité de la colonne d'aspiration est indispensable pour réaliser le remplissage et maintenir la pompe amorcée à l'arrêt.

Certaines pompes dites « auto-amorçantes », bien que démunies de clapet de pied, s'amorcent d'elles-mêmes une fois réalisé un premier remplissage du corps de pompe. Le faible débit (< 25 m³/h) et le mauvais rendement de ces pompes limitent leur utilisation, en particulier pour l'irrigation.

Groupes immergés

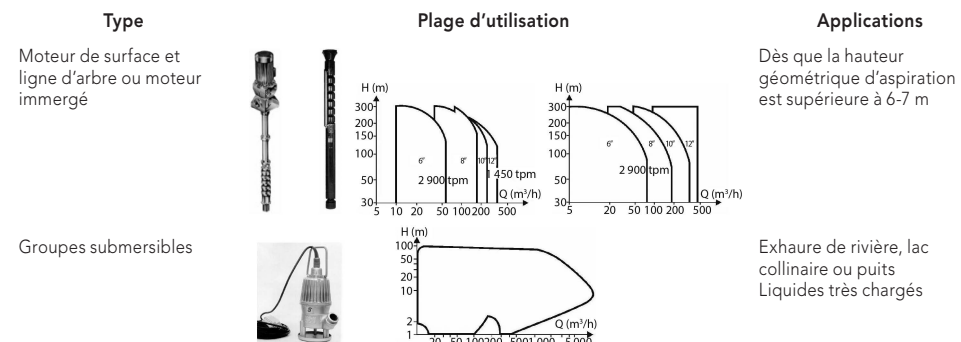


Figure 3.22. Plage d'utilisation de différents types de groupes immergés (source : membre de l'AFPR).

Les pompes immergées peuvent être partiellement ou entièrement immergées. Les pompes partiellement immergées sont mues par un moteur de surface, relié aux turbines immergées par une ligne d'arbre située dans la colonne de refoulement (figure 3.9). Le forage dans lequel est introduite la pompe doit être parfaitement vertical et rectiligne.

Les pompes entièrement immergées sont équipées d'un moteur électrique étanche, placé sous les turbines, en bout de la colonne de refoulement. Ces pompes peuvent être introduites dans des forages présentant un léger défaut de rectitude. Leur montage est facile. Elles ne nécessitent pas d'entretien particulier ; leur niveau sonore est pratiquement nul.

Attention

Une pompe ne doit jamais fonctionner :

- à débit nul plus de 3 minutes (échauffement de l'eau, grippage et destruction) ;
- vanne fermée ;
- en situation de cavitation.

Moteurs

Moteurs électriques

Dans les stations de pompage individuelles, les moteurs les plus répandus sont des moteurs asynchrones à cage d'écureuil, également appelés moteurs à rotor en court-circuit, alimentés en basse tension (BT).

De construction simple, le moteur à cage est robuste et peu coûteux.

Ses caractéristiques principales sont :

- la classe d'isolation : en général, les moteurs sont de classe F. La température maximale admissible est alors de 140 °C et l'échauffement maximum de 100 °C ;
- l'échauffement maximum est de 80 °C pour les moteurs dont la durée de vie est la plus importante ;
- l'indice de protection (IP) relatif à l'étanchéité : les protections les plus courantes actuellement sont IP 23 S et IP 55.

Puissance du moteur

La puissance du moteur doit être adaptée à la puissance absorbée par la pompe avec un coefficient de sécurité d'au moins :

- + 30 %, si puissance absorbée < 4 kW ;
- + 20 %, si 4 kW « puissance absorbée < 18 kW ;
- + 10 %, si puissance absorbée > 18 kW.

Appel de courant

Si on démarre un moteur asynchrone branché directement sur le réseau (couplage direct), l'intensité au démarrage (ID) peut atteindre cinq à sept fois l'intensité nominale (IN). Cet appel de courant provoque une chute de tension de l'alimentation qui peut être préjudiciable au matériel déjà raccordé sur le réseau. Elle est limitée pour cette raison par le fournisseur d'électricité. À l'extrême, le démarrage sera difficile, voire impossible.

Pour que les chutes de tension ne dépassent pas le seuil acceptable, il faut limiter l'intensité de démarrage en utilisant un dispositif de démarrage adapté.

L'ensemble des caractéristiques d'un moteur est reporté sur sa plaque signalétique (photo 3.5) : type, norme de rendement énergétique, numéro de série, tension d'alimentation 230/400 V ou 400/700 V en triphasé et 230 V pour les moteurs électriques monophasés, couplage en étoile ou en triangle (uniquement sur moteur triphasé), fréquence du courant alternatif (50 Hz en France), puissance (kW, chevaux/HP – 1 HP = 0,75 kW), vitesse de rotation exprimée en tr/min (rpm) ou pôles (2 pôles = 3 000 tr/min ; 4 pôles = 1 500 tr/min ; 6 pôles = 1 000 tr/min ; 8 pôles = 750 tr/min), ampérage, cosinus phi (déphasage angulaire entre la tension et l'intensité du courant dans un circuit alternatif), indice de protection, type de service (continu, intermittent, périodique, etc.).

Type	CR90-3-2 A-E-A-E-HQDE			
Model	A96124078P10651			
f	50	Hz	P2	18,5 kW
n	2934	min ⁻¹	H _{max}	81,7 m
Q	90	m ³ /h	H	52 m
p _{max} /t _{max}	16/120	bar/°C	CCW	
Serial No.	0004 Made in DK			

Photo 3.5. Plaque signalétique d'une pompe.

Protections

Les moteurs doivent être efficacement protégés contre :

- les échauffements, par des thermosondes ;
- les surintensités, par des relais thermiques ;
- les défauts d'isolation, par un disjoncteur différentiel.

Moteurs thermiques

Si la pompe électrique est la plus fréquente et efficace d'un point de vue énergétique, le pompage peut se faire aussi à partir de moteurs thermiques, évitant un raccordement au réseau électrique. Des pompes autonomes peuvent ainsi être actionnées à partir de la prise de force d'un tracteur, ou avoir leur propre moteur thermique.



Photo 3.6. Pompe à moteur thermique (© S. Massuel).



Photo 3.7. Pompe à moteur thermique, vallée du Niger (© G. Belaud).

Le rendement d'un moteur thermique est généralement plus faible qu'un moteur électrique, avec un maximum de l'ordre de 30 %.

Énergie solaire

Le recours à l'énergie solaire se développe en irrigation, notamment pour les zones non accordées au réseau, ou lorsque le recours à une alimentation autonome devient intéressant économiquement. Il faut environ 10 m²/kW-crête et tenir compte du stockage d'eau ou d'énergie dans la conception du système.

Régulation, automatismes, supervision

Les systèmes de régulation permettent d'ajuster, automatiquement ou non, les performances du groupe de pompage aux besoins du réseau de façon à délivrer en toutes circonstances le débit voulu dans les meilleures conditions. Ces systèmes sont commandés par des capteurs.

Capteurs

Les capteurs de pression (manostat, manomètre analogique) fixent les seuils de pression (manostat) ou délivrent un signal proportionnel à une pression (manomètre analogique).

Les capteurs de débit fixent les seuils de débit ou délivrent un signal proportionnel à un débit. Les détecteurs à palette sont actionnés sous l'effet de la pression cinétique liée à la vitesse du fluide dans la conduite. Les débitmètres électromagnétiques, plus chers, sont généralement les plus précis (erreur inférieure à 1 % de l'échelle de mesure du débit) et présentent l'avantage d'être peu sensibles au colmatage.

Les capteurs de niveau (poire, électrodes, flotteur, ultrasons) fixent les seuils de niveau ou délivrent un signal proportionnel à un niveau.

Tous ces capteurs (ou appareils) sont utilisés soit pour gérer des sécurités (manque de pression, manque de débit, niveau trop bas), soit pour asservir des groupes électropompes à des pressions, débits, niveaux.

Exemple : une poire permet d'arrêter une station en cas de défaut de présence d'eau.

D'autres capteurs peuvent être utilisés pour les sécurités : capteurs de température, d'intensité ou de puissance.

Systèmes d'arrêt automatique d'une pompe

Arrêt par dépression

Ce système est très utilisé, par exemple quand un enrouleur a terminé sa position.

Une vanne de décharge s'ouvre et fait chuter la pression dans le réseau.

Cette chute est détectée par un manostat placé sur le refoulement de la pompe et commande l'arrêt de la pompe.

- Les contraintes de pression sur les canalisations sont très faibles.
- Le manostat doit être réglé correctement pour éviter les surdébits.

Arrêt par surpression

Ce système d'arrêt est très utilisé quand il y a plusieurs enrouleurs sur la canalisation.

En fin de position, l'enrouleur ferme automatiquement son arrivée d'eau et fait ainsi monter la pression dans le réseau. Cette montée en pression, détectée par un manostat, stoppe la pompe qui doit avoir une caractéristique « tombante » (forte variation de pression associée à une faible variation de débit). Autre possibilité : voir « Arrêt par débit minimal ».

Arrêt par relais d'intensité

Lorsque le débit de la pompe diminue, la puissance absorbée par le moteur diminue aussi. On peut donc asservir l'arrêt du moteur à un seuil de puissance. Ce montage permet d'arrêter des moteurs montés sur des pompes à courbe caractéristique très plate, et à courbe de puissance très montante alimentant plusieurs arroseurs.

Arrêt par débit minimal

Un capteur de débit détecte la diminution de débit et arrête le groupe électropompe pour la valeur réglée. Ce système permet d'assurer de façon efficace l'arrêt des pompes à caractéristique très plate ou présentant peu de variation de la puissance absorbée.

Vanne de régulation : une régulation simple pour les petites stations

La variation de débit est obtenue par fermeture ou ouverture d'une vanne de régulation située dans le réseau.

Les vannes de régulation peuvent être à membrane, à papillon, à opercule, etc. Elles sont actionnées manuellement ou par un système électrique, pneumatique ou hydraulique.

Ce système de régulation est largement utilisé en irrigation : il est pratiquement le seul moyen de régulation sur les petites installations. La vanne permet de faire chuter la pression jusqu'à obtenir la pression souhaitée lue sur un manomètre à l'aval. La régulation est dite « à pression aval » ou « à pression amont constante », selon le cas.

Avantages	Inconvénients
Contrôle simple par un manomètre situé à l'aval de la vanne Bon marché Fonctionne manuellement ou automatiquement (vanne motorisée ou hydraulique) : possibilité d'automatisation	Surconsommation d'énergie Plage d'utilisation limitée Usure plus rapide de la vanne

Dans la régulation par vannage, en fermant la vanne, on augmente les pertes de charge, ce qui déplace le point de fonctionnement. Cette régulation se fait au détriment de la consommation et de la fiabilité pour les débits extrêmes trop éloignés du débit nominal.

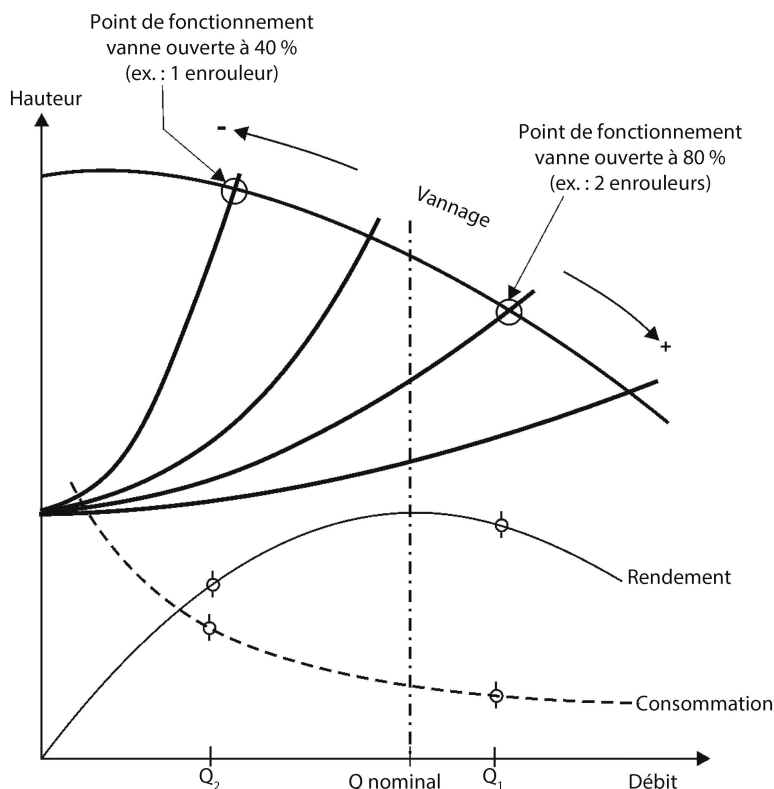


Figure 3.23. Régulation d'une pompe par vannage.

Autres moyens de régulation pour des stations plus importantes

Volume tampon

Ce système consiste à incorporer dans le réseau un volume tampon constitué par un réservoir ouvert ou fermé (réservoir sous pression) et à faire fonctionner la pompe à proximité du débit nominal au meilleur rendement.

Le fonctionnement de la pompe est assujéti à des niveaux ou à des pressions dans le réservoir tampon. Ce système conduit, selon la valeur du débit appelé dans le réseau, à un fonctionnement permanent ou intermittent de la pompe.

Dans la régulation avec un réservoir ouvert, l'enclenchement de la pompe est assujéti au niveau N_0 et le déclenchement au niveau N_1 . Ainsi la charge à fournir par la pompe varie dans une gamme relativement faible, et le débit peut donc s'établir près de l'optimum de rendement.

Ce système assure une consommation réduite et une bonne fiabilité, mais le volume des réservoirs devient rapidement important pour les gros débits. Une répartition du débit sur plusieurs pompes en parallèle permet de limiter ce volume.

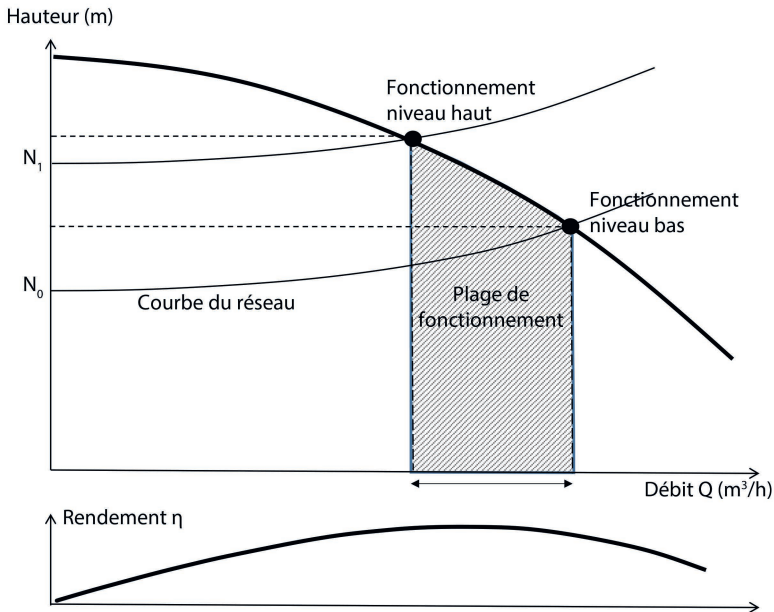


Figure 3.24. Régulation au moyen d'un réservoir.

Régulation débitmétrique

La marche et l'arrêt des groupes de pompage sont asservis au débit appelé sur le réseau (capteurs de débit).

Ces régulations sont largement utilisées pour des installations de taille moyenne. Elles permettent d'assurer les plus grands débits tout en maintenant un rendement énergétique acceptable.

Attention

La diminution ou l'augmentation des pertes de charge entre la sortie de la station et l'entrée du réseau intervient sur les réglages des moyens de régulation.

Pompes centrifuges à vitesse de rotation variable

Avec les pompes centrifuges à vitesse de rotation variable, on peut obtenir une plage étendue de pression et de débit (courbe caractéristique variable) en agissant uniquement sur la vitesse de rotation. En effet, le débit varie comme la vitesse de rotation et la hauteur comme le carré de la vitesse. Une variation de plus ou moins 20 % de la vitesse de rotation est pratiquement sans conséquence sur le rendement (figure 3.25). Ainsi, ce type de régulation est bien plus intéressant d'un point de vue énergétique qu'une régulation par vannage : la réduction du débit réduit d'autant la consommation énergétique, ce qui n'est pas le cas quand on réduit le débit en fermant une vanne.

On constate que le point de meilleur rendement décrit une parabole. Dans tous les cas d'application, le point de fonctionnement doit se situer dans la zone la plus proche de la parabole décrite par le point de rendement maximal.

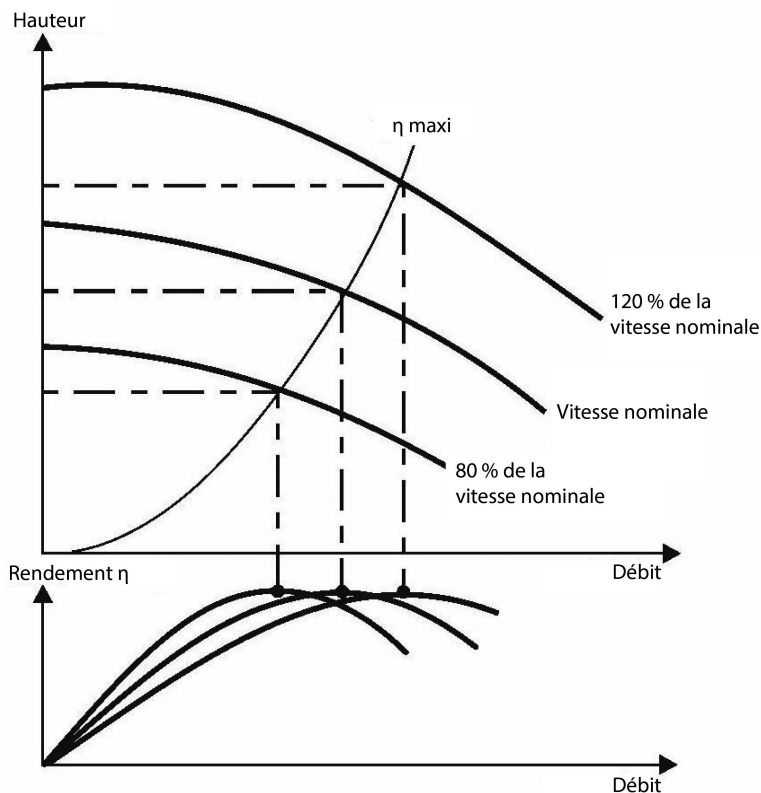


Figure 3.25. Courbes caractéristiques d'une pompe à vitesse variable.

Allure des courbes caractéristiques d'une pompe pour une vitesse inférieure et une vitesse supérieure de 20 % à la vitesse nominale.

La consigne de régulation peut être asservie au débit (le débit est maintenu constant en asservissant la vitesse de rotation de la pompe à un capteur de débit), à la pression, au niveau ou à la courbe réseau (la vitesse de rotation de la pompe est asservie à un régulateur intégrant la courbe réseau).

Technique de l'entraînement à vitesse variable

Le système électrique est pratiquement le seul utilisé actuellement. En dehors du coupleur dont les applications sont limitées, la fréquence variable est applicable aussi bien pour les moteurs de surface que pour les moteurs submersibles ou immergés (respecter impérativement les recommandations du constructeur) qui équipent les groupes électropompes courants. De plus, ces groupes peuvent être alimentés directement par le réseau électrique en cas de défaillance du variateur de fréquence et assurer ainsi un secours automatique à vitesse fixe.

Télétransmission, supervision, télégestion

La télétransmission permet l'échange d'information depuis la station de pompage vers un poste de commande ou un serveur de données qui peut être interrogé par le gestionnaire. Les informations mesurées par les capteurs peuvent être télétransmises (via un réseau GSM, radio, Ethernet, etc.) pour permettre de suivre à distance le fonctionnement de la station, son débit, sa pression, les défauts éventuels. Des alertes peuvent être envoyées par SMS.

La télégestion permet le déclenchement à distance de la station. Des logiciels de supervision (en anglais SCADA, *supervisory control and data acquisition*) permettent une visualisation graphique conviviale du système et l'état des différents capteurs en temps réel.

Installation d'une station de pompage

Montage du groupe de pompage

Le montage du groupe de pompage impose de respecter certaines règles et précautions pour éviter les problèmes de fonctionnement, d'usure, de nuisances, de protection contre le gel, ainsi que pour être conforme aux normes et règlements en vigueur.

Groupes de surface

Le groupe électropompe, monté sur un socle, doit être scellé sur un massif de béton légèrement surélevé par rapport au sol et quatre à cinq fois plus lourd que le groupe (la masse volumique d'un bon béton est de $2\,200\text{ kg/m}^3$).

Lors de la mise en place, il faut veiller à l'horizontalité et à l'alignement du groupe :

- la partie supérieure du massif doit être horizontale ;
- le socle est fixé et calé sur le massif ;
- le groupe est calé, aligné et bloqué sur le socle.

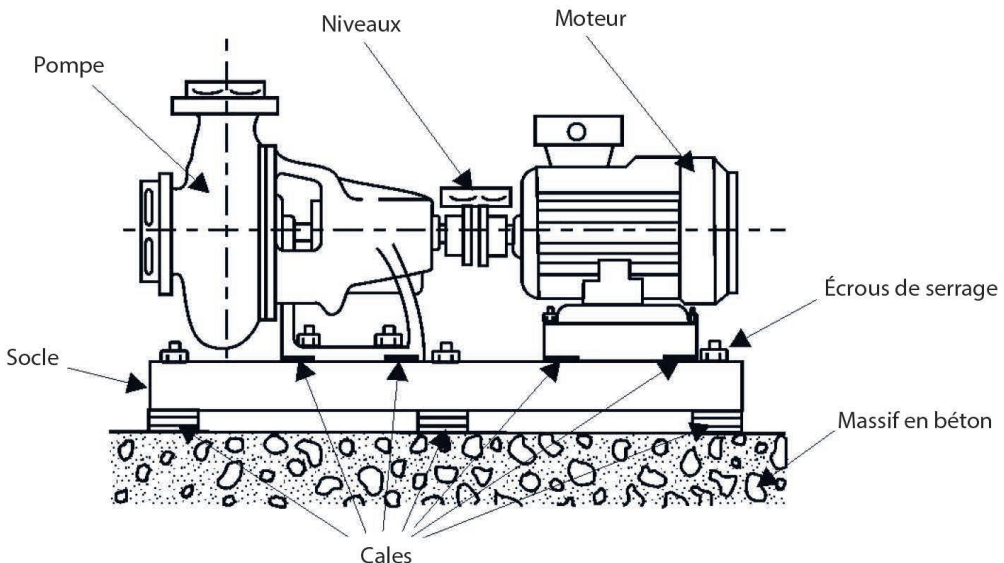


Figure 3.26. Schéma de montage d'un groupe électropompe de surface sur socle en béton.

Remarque

L'alignement pompe-moteur doit être réalisé par l'installateur, après mise en place définitive du groupe, raccordement et remplissage des tuyauteries ; l'installateur engage alors sa responsabilité.

Groupes immergés

La descente du groupe dans le puits ou le forage impose l'emploi d'un engin de levage, chèvre et palan, machine de forage, voire d'une grue.



Photo 3.8. Installation d'un groupe de pompage dans un forage (© C. Leduc).

L'installation verticale se fera en respectant les étapes suivantes dans le cas d'une conduite formée d'éléments rigides :

- raccorder un premier élément de tube à la sortie de refoulement de la pompe, et suspendre l'ensemble par un collier serré à la partie supérieure ;
- placer sur le puits ou le forage deux fers en « U » en ne laissant entre eux que l'espace nécessaire au passage du tube ;
- descendre le groupe jusqu'à faire reposer le collier sur les fers en « U » ;
- raccorder un second élément de tube au bout duquel on aura fixé un autre collier ;
- suspendre l'ensemble pendant le retrait du premier collier.

Poursuivre ensuite l'opération, élément après élément, jusqu'à l'immersion complète du groupe.

Pendant toutes ces opérations, prendre soin de ne pas détériorer le câble électrique, que l'on déroule au fur et à mesure de la descente du groupe et que l'on fixe à la colonne de refoulement à l'aide de colliers tous les deux mètres environ. Le câble est livré avec la pompe, il doit être conforme aux normes.

Les colliers sont serrés de façon à ce que le câble ne puisse glisser vers le bas sous l'action de son propre poids ; en outre, il ne doit pas frotter contre la paroi du forage : on évite cet incident en pratiquant dans les brides de la colonne montante une encoche dans laquelle le câble viendra se loger.

Il est conseillé d'accoler à la colonne montante de la pompe un tube en polyéthylène ou en PVC rigide, de diamètre 25, qui permettra de descendre une sonde électrique ou une poire de contrôle du niveau d'eau.

Le groupe mis en place est définitivement suspendu par le collier-support du dernier élément de colonne montante, lui-même boulonné sur deux fers en « U » (appelés communément « jésus ») placés de part et d'autre de l'ouverture du forage et fermement fixés à la sortie du forage.

Il existe trois types de colonnes :

- colonne en acier : vissée jusqu'à 3 pouces :
 - à brides (plus résistante),
 - en fonction du débit et de la longueur de la colonne ;
- colonne souple de type Well-Master ;
- colonne en polyéthylène (PEHD) rigide ou mi-souple.

Pour les conduites de gros diamètre ($DN > 125$ mm), les éléments de PEHD rigide sont assemblés par collets soudés-bridés tournantes. Cette solution a l'avantage d'un poids moindre, de ne pas transmettre les vibrations du pompage et d'amortir les effets de torsion de la colonne au démarrage de la pompe.

Dans le cas de forages profonds, le groupe de pompage est suspendu à un câble que l'on déroule au fur et à mesure de sa descente en même temps que la conduite de refoulement.

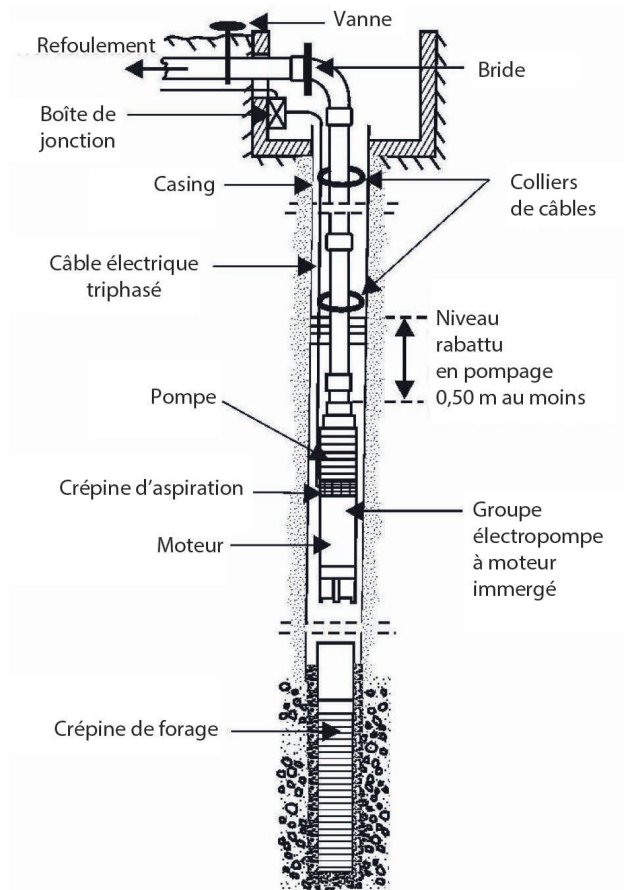


Figure 3.27. Schéma de montage d'un groupe immergé.

Le casing est le cuvelage généralement en acier mis en place lors du forage.

Attention

- Descendre le groupe à une profondeur telle que le niveau dynamique de la nappe soit au moins à la hauteur spécifiée par le constructeur, ou à défaut à 0,5 m au-dessus de la bride de refoulement du groupe.
- Conserver une distance minimale de 2 m entre le pied du groupe immergé et le fond du forage pour qu'il n'y ait pas d'envasement.
- Placer le groupe au-dessus de la crépine du forage pour que la circulation d'eau assure le refroidissement du moteur.
- Réaliser, si nécessaire, un jupage du groupe ou du moteur en cas d'arrivée d'eau au-dessus de la crépine.

En application de la Directive européenne 2006/42/CE (en révision en 2021) concernant la sécurité des machines et la protection des personnes :

- s'assurer que les groupes électropompes sont en conformité avec les directives européennes :
 - pour le moteur seul : déclaration d'incorporation jointe au moteur,
 - pour la pompe seule : déclaration d'incorporation jointe à la pompe,
 - pour le groupe électropompe (pompe et moteur accouplés) : déclaration de conformité jointe au groupe avec marquage CE sur le groupe ;
- respecter scrupuleusement les instructions de sécurité spécifiées par le constructeur de la machine dans sa notice d'installation, de mise en route et d'entretien ;
- s'assurer que le personnel responsable de l'installation possède les qualifications et la compétence nécessaires ;
- s'assurer que toutes les précautions sont prises pour éviter d'exposer des personnes à des dangers électriques, mécaniques, thermiques, acoustiques, chimiques, en conformité avec les directives européennes et les réglementations locales en vigueur.

Raccordement de la pompe à la prise d'eau et au réseau

Les tuyauteries raccordées à la pompe ne doivent exercer aucune contrainte sur celle-ci. Elles ne doivent pas agir anormalement sur le corps de pompe, ni par leur poids, ni en transmettant des efforts de pression, ni par le jeu des dilatations : les éléments à raccorder ou les tuyaux à raccorder doivent se présenter exactement en regard des orifices correspondants de la pompe et n'être montés qu'en dernier lieu, une fois la pompe correctement mise en place.

Les efforts supportés par les canalisations doivent être repris par des butées et jamais par la pompe.

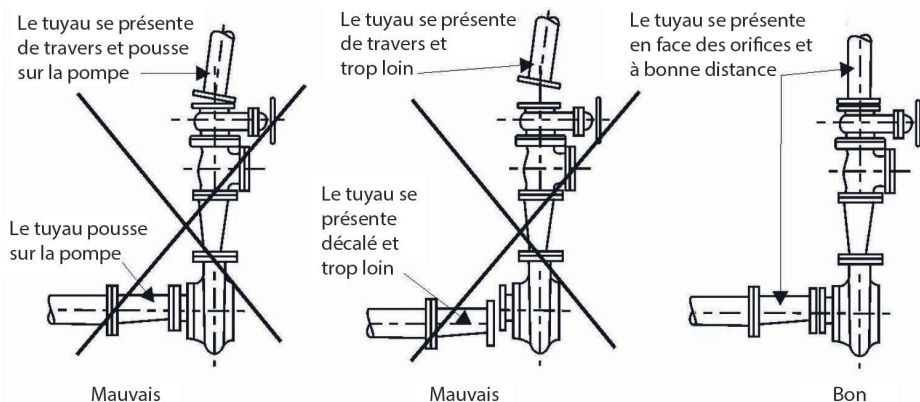


Figure 3.28. Ajustement des raccords à la pompe.

Raccordement à la prise d'eau

Les pompes de surface sont reliées au point d'eau par la conduite d'aspiration, dont :

- le diamètre et la longueur doivent être choisis de manière à ne pas créer des pertes de charge incompatibles avec le fonctionnement de la pompe (cavitation), et à respecter les conditions de vitesse limite de l'eau ;
- le matériau constitutif doit avoir une résistance suffisante à l'écrasement sous l'effet de la dépression ;
- les raccords doivent être parfaitement étanches pour ne pas permettre l'entrée d'air, cause fréquente de désamorçage de la pompe. Les raccords à manchon fileté, les tubes et raccords en PVC collé doivent être évités.

Le tuyau d'aspiration ayant un diamètre en général supérieur à celui de la bride d'aspiration, il est relié à la pompe par un convergent dont la génératrice supérieure doit être montante ou au pire horizontale de façon à éviter les points hauts où l'air pourrait s'accumuler.

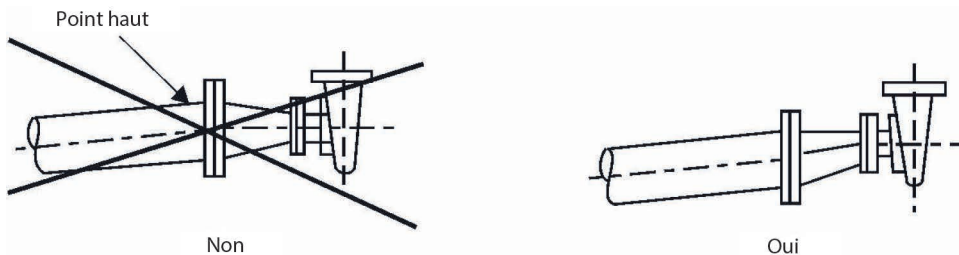


Figure 3.29. Raccordement du convergent d'aspiration.

- La tuyauterie d'aspiration doit être la plus courte possible, en pente montante de 2 % minimum de l'amont vers la pompe. Ceci permet d'évacuer les bulles d'air en permanence.
- Les contre-pentes sont à proscrire.

Un clapet de pied, souvent associé à la crépine, permet le remplissage de la conduite d'aspiration ainsi que le maintien de la colonne d'eau dans la conduite d'aspiration et du corps de pompe.

Attention

En cas de fuite du clapet de pied, la colonne peut se vider et il faut réamorcer la pompe.

Une crépine, cylindre perforé, disposée à l'extrémité de la conduite d'aspiration et plongée dans le point de puisage, permet de retenir les corps étrangers :

- elle doit être placée à une distance minimale de la surface de l'eau et des parois de la prise d'eau ;
- elle doit être nettoyée pour éviter l'obstruction qui engendrerait une perte de charge supplémentaire et éventuellement une cavitation ;
- le surdimensionnement est toujours favorable.

Dans le cas d'aspiration en charge, une vanne d'aspiration permet d'intervenir sur la pompe sans vider la ressource :

- elle doit être toujours ouverte au maximum pendant le fonctionnement de la pompe. Sinon, la pression en entrée chute, ce qui augmente le risque de cavitation ;
- elle doit être de type « vanne à passage direct » et placée en amont de la pompe, à une distance minimale de trois fois le diamètre du tuyau.

Raccordement de la pompe au réseau d'irrigation

Le raccordement de la pompe au réseau d'irrigation se fait par l'intermédiaire d'une tuyauterie de refoulement.

Le tuyau de refoulement ne doit pas être horizontal, mais monté avec une pente ascendante vers le réseau. Des robinets de purge ou des ventouses doivent être installés aux points hauts éventuels, pour permettre l'évacuation de l'air.

Le diamètre du tuyau de refoulement étant supérieur à celui de la bride de refoulement de la pompe, un divergent sera nécessaire pour faire le raccord. La longueur du divergent doit être égale à au moins sept fois la différence entre le diamètre de l'orifice de refoulement de la pompe et celui du tuyau de refoulement, pour ne pas créer de turbulence au niveau du raccordement.

Une vanne de refoulement, de type vanne à opercule, devra obligatoirement être montée après le divergent, car la pompe doit démarrer vanne fermée afin de limiter la puissance absorbée au démarrage. En effet, si le démarrage de l'installation est initié alors que le réseau est vide, la pression qui y règne est très peu élevée et la pompe fonctionnera sous cette faible pression, très éloignée de celle de son point de fonctionnement.

Après le démarrage de la pompe, cette vanne sera ouverte progressivement de façon à remplir le réseau tout en maintenant une pression voisine de la pression nominale.

D'une façon générale, cette vanne doit toujours être manœuvrée lentement pour éviter de provoquer des coups de bélier.

Cette vanne permettra également de régler éventuellement le couple débit-pression et d'isoler l'installation en cas de besoin.

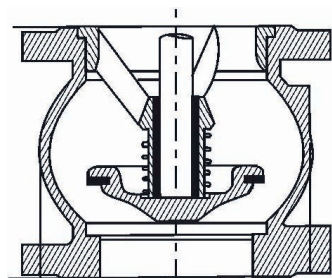


Figure 3.30. Coupe schématique d'un clapet à guidage axial.

Un clapet de retenue doit être disposé entre le réseau et la vanne de refoulement. Il a pour but :

- d'empêcher l'inversion du débit d'eau lors de l'arrêt de la pompe ;
- de ne pas soumettre la conduite d'aspiration à la pression de refoulement ;
- de protéger éventuellement la pompe à l'arrêt de coups de bélier venant du réseau.

Le clapet de retenue doit être disposé de façon à ne transmettre aucune contrainte sur le corps de pompe.

Remarque

Un montage vanne-clapet-divergent est employé sur les petites installations à la place du montage divergent-clapet-vanne pour des raisons économiques. Ce montage diminue le rendement de l'installation, augmente les contraintes mécaniques sur la pompe et risque de nuire à la fiabilité de ces accessoires.

La liaison entre les éléments de tuyauterie pourra être exécutée avec des raccords :

- à manchons filetés et raccords Union ;
- par soudage (tuyau en acier) ;
- à brides ;
- à emboîtement ;
- flexibles.

Les coudes doivent être le moins nombreux possible et à grand rayon de courbure pour éviter les pertes de charge.

Lorsque la canalisation est enterrée, l'utilisation de raccords à emboîtement nécessite d'épauler tous les changements de direction et toutes les fins de ligne par des butées en béton capables de résister à la pression qui tend à déboîter les raccords.

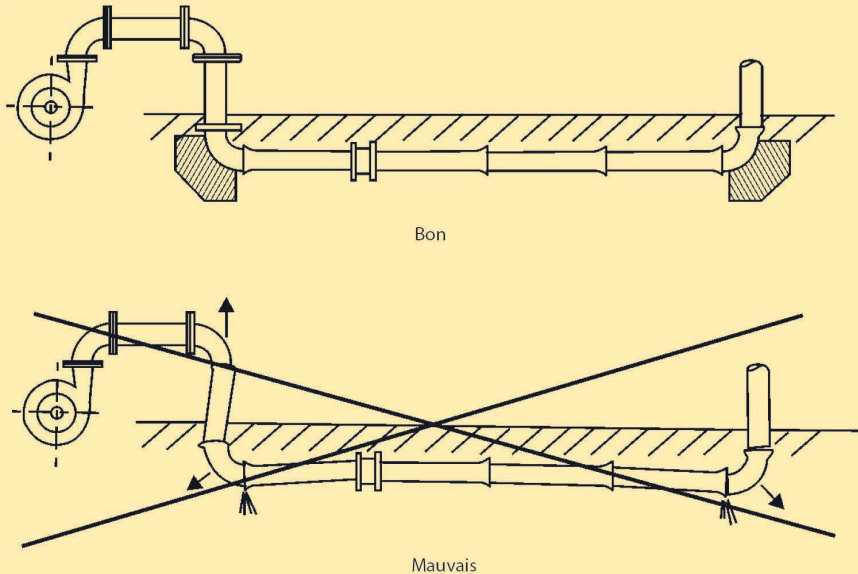


Figure 3.31. Schéma des conduites enterrées à emboîtement (source : AFPR/Prodoc).

Avant de refermer la tranchée de la conduite, vérifier l'étanchéité de l'installation.

Lorsque la canalisation est en surface, elle doit être amarrée au moyen de colliers placés tous les 2,5 m et à chaque changement de direction.

Protection de l'installation de pompage contre les coups de bélier

Dans les **petites stations**, où les vitesses de circulation sont relativement faibles et où l'arrêt de la pompe se fait par chute de pression (voir section « Régulation, automatismes, supervision », p. 100), les risques de coups de bélier sont très limités si la vanne de refoulement est manipulée lentement.

La protection est assurée par des ventouses placées en extrémité et aux points hauts du réseau pour éliminer l'air. Lorsque l'air, plus léger, y arrive et remplace l'eau, la soupape s'abaisse (sous l'effet de la diminution de la poussée d'Archimède) et l'air s'évacue.

Dans les **stations alimentant plusieurs équipements**, refoulant à pression relativement importante sur de grandes dénivelées ou à régulation automatique, les équipements antibélier sont obligatoires.

Pour limiter les surpressions, les soupapes permettent :

- l'entrée d'air en cas de vidange ou de dépression ;
- la sortie d'air pendant le remplissage ;
- le dégazage du réseau.

Dès que la pression du réseau dépasse la pression de tarage, le clapet se soulève et l'eau s'échappe. Le clapet reprend sa place lorsque la surpression disparaît.

La phase dangereuse de surpression est ainsi écrêtée.

Attention

Risque de dysfonctionnement en eau chargée ou après un arrêt prolongé.

Pour limiter les surpressions : le réservoir d'air ou ballon antibélier.

En marche normale, l'eau circule dans la canalisation principale à son débit nominal.

La pression du ballon (A) est égale à celle du réseau (B). Le ballon stocke un volume d'eau.

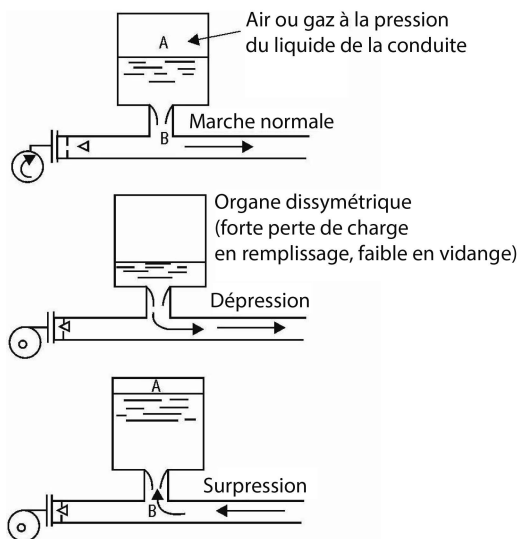


Figure 3.32. Schéma de principe d'une protection par ballon antibélier (source : Engref).

Si la pompe s'arrête, il se produit une dépression dans la canalisation (au niveau du point B).

Le ballon antibélier prend provisoirement le relais de la pompe et fournit de l'eau au réseau, réduisant ainsi la dépression.

Lors du retour de l'onde du coup de bélier, il se produit en B une surpression laminée par le ballon. C'est le réseau qui va remplir le ballon jusqu'à ce que les pressions A et B soient de nouveau en équilibre. Après plusieurs oscillations dépression/surpression, l'équilibre sera définitivement retrouvé.

Le ballon doit être correctement dimensionné (volume d'air, volume d'eau) et faire l'objet d'une étude particulière. La pression du ballon doit être réglée sur la pression de fonctionnement souhaitée de la station de pompage.

Compacts et fiables, les équipements antibélier doivent être régulièrement entretenus et contrôlés périodiquement (au moins une fois par an). Il faut :

- veiller à la présence d'une quantité d'air suffisante dans le ballon (de l'ordre de 1/3 du volume du ballon) ;
- maintenir en position ouverte la vanne située sur la conduite reliant le ballon à la conduite de refoulement.

Local de pompage

Le local doit être inaccessible au public, ventilé et isolé.

L'implantation du local de pompage doit minimiser la hauteur d'aspiration, la longueur des conduites, et tenir compte des risques d'inondation.

Le bâtiment sera construit sur une dalle en ciment avec un dispositif d'écoulement d'eau et de récupération des eaux du presse-étoupe.

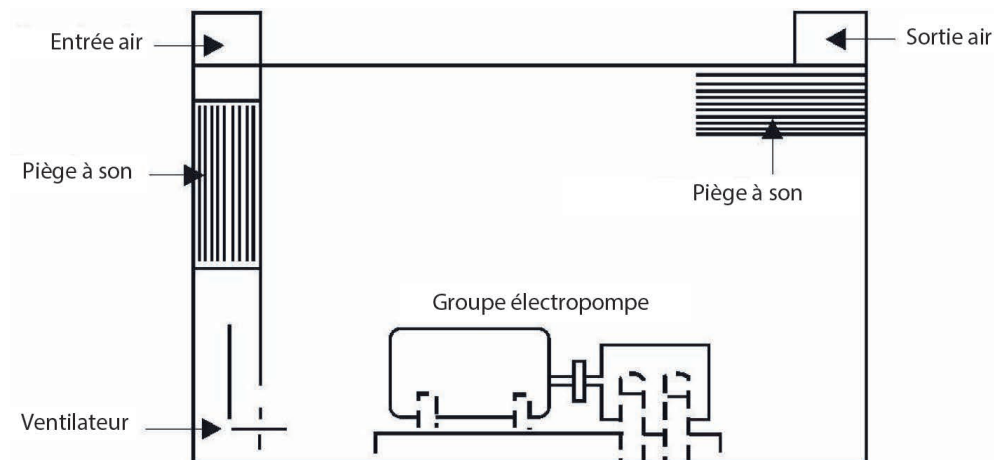


Figure 3.33. Place des pièges à son dans un local de pompage.

Une isolation sonore de la salle de pompage peut s'avérer nécessaire selon la proximité du voisinage :

- des murs épais recouverts de matériaux « absorbant les bruits » (liège, laine minérale, etc.) assurent un minimum d'isolation ;
- des pièges à son aux entrées et sorties d'air peuvent s'avérer utiles.

Il est impératif de disposer de la notice d'entretien du groupe électropompe dans le local. Celle-ci sera bien en vue et protégée de l'humidité par une pochette étanche. Elle sera utile lors de toute opération de maintenance.

Alimentation électrique : l'armoire de commande

Elle permet à l'utilisateur de mettre en marche et d'arrêter son installation (bouton marche-arrêt), et d'avoir accès aux sécurités et au circuit de puissance.

Elle doit être de dimensions suffisantes pour permettre un entretien aisé, un dépannage rapide et des adjonctions de matériels non prévus au départ.

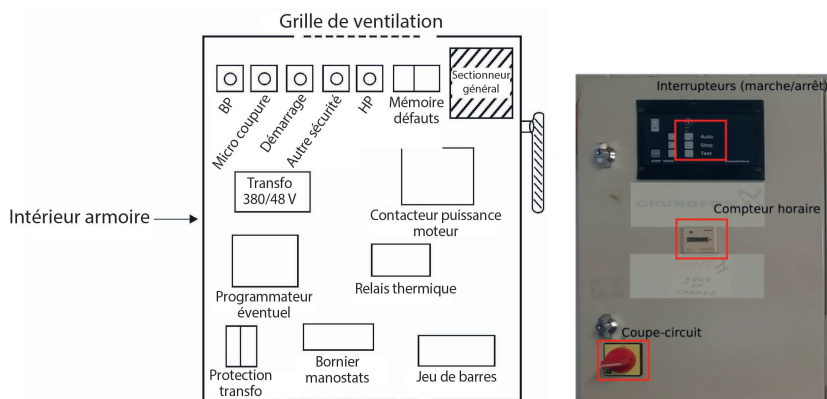


Figure 3.34. Exemple de schéma d'une armoire de commande.

Elle comporte des appareils de contrôle, du relayage et de l'appareillage de puissance, qui devront être largement dimensionnés du point de vue de l'intensité nominale.

L'armoire doit comporter des organes de visualisation du fonctionnement :

- des témoins de signalisation indiquant la marche ou l'arrêt du matériel et les défauts (un témoin par défaut) ;
- éventuellement un ampèremètre et un voltmètre en face avant des armoires ou tableaux de commande, pour contrôler l'intensité et la tension à tout moment ;
- un ou plusieurs compteurs horaires, permettant de contrôler le temps de fonctionnement des pompes ou de l'installation et de planifier ou de programmer les opérations d'entretien.

L'armoire contient aussi deux circuits distincts : le circuit de puissance et le circuit de commande.

Le circuit de puissance : il est alimenté sous une tension de 400 ou 380 volts.

On doit y trouver un disjoncteur adapté à la puissance du moteur, sinon on court le risque de ne pas détecter les défauts et de détruire les organes électriques.

Le circuit de commande : il est alimenté sous une tension de 48 ou 24 volts.

On y trouve les circuits de commande ainsi que les relais de protection et de temporisation :

- en liaison directe avec les machines tournantes :
 - relais voltmétrique pour assurer la protection contre le manque de phase,
 - relais wattmétrique contre la marche à vanne fermée ou le désamorçage,
- assurant une fonction de mesure ou de sécurité : manostat, interrupteur à flotteur, niveau bas, sondes thermiques, etc.

Attention

Après un arrêt sur défaut, le redémarrage est toujours manuel, car il est nécessaire de vérifier que les défauts ont bien disparu avant de redémarrer.

À titre d'exemple, deux schémas sont donnés figure 3.34, l'un du tableau de commande et l'autre de l'intérieur de l'armoire.

Attestation de conformité de l'installation

Le distributeur d'énergie, avant de mettre sous tension l'installation électrique, est tenu d'exiger la remise d'une attestation de conformité de cette installation aux règlements et normes de sécurité en vigueur. L'installation doit donc être contrôlée et agréée.

Livraison et tarification de l'énergie

L'emplacement du poste de livraison est déterminé, en accord avec le distributeur d'électricité, en fonction de l'implantation de la station de pompage. Il est le plus souvent placé en bordure de voie publique afin de faciliter l'accès au distributeur.

Le tarif de l'électricité comprend généralement :

- une prime fixe annuelle, fonction de la puissance souscrite ;
- le prix du kWh, qui dépend de la tension utilisée, de la saison et de la période horaire de la journée (heures de pointe, pleines ou creuses).

Les éléments de choix et des illustrations sont fournis dans le chapitre 7.

Les câbles électriques

Ils doivent être choisis en fonction des contraintes qu'ils devront supporter en service ou par accident. Leur section est calculée en fonction de :

- la puissance ;
- la longueur du câble ;
- la chute de tension admissible (la chute de tension est proportionnelle à la résistance par unité de longueur des conducteurs, à la longueur du câble, à l'intensité appelée et à l'environnement) ;
- la résistance mécanique ;
- l'échauffement admissible.

Le tableau 3.1 indique les longueurs de câble maximales selon l'intensité électrique et la section de ces câbles (tableau 3.2 : section des câbles de mise à la terre).

Tableau 3.1. Longueurs maximales des câbles réseau et moteur en fonction de la section et du calibre. Les longueurs maximales sont données en mètres et sont compatibles avec une chute de tension de 5 %.

Longueurs maximales des câbles (m)		Section en mm ²											
		6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Intensité maximale (ampères)	37	98	160	255	390	520	690						
	60			170	260	355	465	640	840				
	86				175	235	310	430	565	670	770		
	145							240	315	375	430	510	600
	211	Limite d'échauffement								250	290	340	400
	250										250	290	345

Tableau 3.2. Détermination de la section du câble de mise à terre.

Conducteurs de puissance de section S		
Inférieure à 16 mm ²	De 16 à 35 mm ²	Supérieure à 35 mm ²
S (celle du conducteur de puissance)	16 mm ²	La moitié de celle du conducteur de puissance

La tension d'alimentation

La puissance nominale des moteurs est obtenue avec une alimentation basse tension (BT) triphasée 230 ou 400 V (+ 6 %, – 10 %) sur un réseau de 50 Hz.

Réception et première mise en route

Nous indiquons ici les principales vérifications à faire à la livraison des petites installations.

Les grosses installations, comme celles des réseaux collectifs, peuvent faire l'objet de procédures spéciales de réception.

Une fois le montage terminé par les installateurs, la station de pompage doit être livrée en état de marche.

Contrôles visuels et vérification des montages mécaniques :

- conformité du montage : groupe, clapet, vannes, raccords, etc. ;
- fixations et serrage ;
- alignement et libre rotation des groupes.

Vérifications électriques avant mise en route :

- conformité des équipements et du montage ;
- agrément électrique ;
- vérification du couplage du moteur en fonction de la tension d'alimentation électrique ;
- mesures d'isolement ;
- tests des disjoncteurs et sécurités ;
- mise en route (remplissage réseau, vérification pression à débit nul, etc.) ;
- vérifier le presse-étoupe : il doit être uniquement serré à la main lors de la mise en route pour ensuite être resserré jusqu'au gouttage continu après quelques heures de fonctionnement ;
- s'assurer que le local et les armoires sont correctement ventilés.

Le client doit être en possession du schéma électrique de l'armoire, de la notice d'entretien et de la courbe de la pompe.

Exploitation et entretien

L'entretien de la station de pompage conditionne directement sa durée de vie (objectif : 10 ans minimum) : il ne faut pas le négliger.

Pendant la saison d'irrigation, les consignes de mise en route et d'entretien doivent être respectées. À la fin de la saison, il faut prendre certaines précautions pour maintenir le matériel en bon état.

Moteur

Vérifications électriques	Roulements, graissage, ventilation
<p>Lors de la première mise en route, vérifier l'isolement du moteur avant de l'utiliser sous peine de claquer le bobinage : il doit être en général supérieur à 10 mégohms.</p> <p>Vérifier la conformité du couplage moteur par rapport à la tension du réseau.</p> <p>Après un arrêt prolongé en atmosphère humide (inondation), envoyer le moteur à l'étuvage pour le faire sécher.</p>	<p>Les moteurs sont graissés en usine avec une graisse à base de savon de lithium :</p> <ul style="list-style-type: none"> – utiliser une graisse de même composition pour les graissages périodiques (se référer à la notice) ; – l'intervalle entre deux graissages est de 1 000 à 2 000 heures. <p>Renouveler le bouchon de graisse après un arrêt prolongé (≥ 1 an).</p> <p>Attention aux excès de graisse.</p> <p>La détérioration ou l'usure des roulements provoque des bruits et vibrations inhabituels : les remplacer pour ne pas risquer un blocage.</p> <p>Ventilation : s'assurer que la circulation d'air ne soit pas réduite par obturation partielle de la grille d'aspiration.</p>

Armoire et alimentation électrique

Vérifier que les voyants de l'armoire fonctionnent bien.

- Prévoir une protection contre les rongeurs.
- Éviter les entrées d'humidité et prévoir éventuellement des produits contre l'oxydation.
- Vérifier le serrage des contacts.

Pompe

Surveillance du presse-étoupe

- Un certain temps de rodage est nécessaire avant que le presse-étoupe fraîchement garni atteigne sa pleine étanchéité ; il faut pendant cette période le contrôler fréquemment.
- Par la suite, s'assurer que le presse-étoupe goutte légèrement et juger du serrage en faisant tourner la pompe à la main : le serrage ne doit pas sensiblement augmenter la résistance à la rotation. Le presse-étoupe ne doit pas chauffer.
- Si le débit de fuite est excessif, on peut resserrer *modérément* le presse-étoupe en prenant soin de serrer tous les écrous à la fois pour que son enfoncement soit bien régulier et parallèle. Si la fuite continue à être importante, même après un serrage modéré, il faut refaire la garniture.

Remarque

Si la garniture est mécanique, elle doit être parfaitement étanche. Elle peut perdre quelques gouttes dans la période de mise en route, mais la fuite doit disparaître dès que les éléments d'étanchéité sont rodés.

Surveillance des paliers

Les deux paliers extérieurs qui assurent la rigidité de l'arbre doivent être graissés régulièrement, le graissage dépendant du type de palier :

Type de palier	Lubrification
Paliers à graissage : – par bagues (huile) – à billes avec réserve d'huile.	Renouveler l'huile tous les ans en moyenne et surtout avant qu'elle ne noircisse. À chaque changement, nettoyer.
Paliers avec réserve de graisse.	Remplir les graisseurs et tourner le chapeau de deux ou trois tours toutes les 50 heures de marche.
Paliers à billes étanches, à réserve de graisse.	En principe, aucun entretien n'est nécessaire pour ces paliers qui sont censés être graissés à vie.
Paliers à roulements non étanches.	Graisser toutes les 1 000 à 2 000 heures avec quelques grammes, comme indiqué dans la notice d'entretien.

D'une manière générale, éviter les excès de graisse pouvant entraîner des échauffements nuisibles. À la fin de la saison, un appoint de graisse sera réalisé pour :

- renouveler le joint de graisse au passage de l'arbre ;
- protéger les roulements de l'oxydation.

Nettoyage de la crépine

La crépine doit être propre. Chaque fois qu'il y a un problème hydraulique, vérifier d'abord la crépine et la nettoyer si nécessaire. La fréquence du nettoyage dépend de la propreté de l'eau, mais aussi de la saison (chute de feuilles, etc.).

Précautions en cas d'arrêt prolongé

Vidanger la pompe et les tuyauteries en laissant entrer l'air aux points hauts : ouverture de tous les robinets. Les pompes vidangées peuvent éventuellement être protégées de l'oxydation par un rinçage, une pulvérisation ou un remplissage avec un produit de protection.

Attention à la compatibilité avec les produits de protection.

Faire tourner le groupe de temps en temps pour éviter son gommage et le maintenir en état de marche.

Avant de remettre la pompe en marche, vérifier que :

- la pompe tourne librement à la main ;
- l'éventuel accouplement est resté bien aligné ;
- la fixation et l'état du socle sur le massif sont corrects.

Précautions contre le gel

– Dès que la température risque de descendre au-dessous de 0 °C et que la pompe doit s'arrêter un certain temps (la nuit par exemple), vidanger la pompe et les tuyauteries.

– Cette manœuvre est inutile lorsque le groupe se trouve dans un local protégé du gel et que les tuyauteries extérieures sont calorifugées ou enterrées.

– Les problèmes sont généralement limités avec des groupes électropompes immergés : vider la partie de tuyauterie soumise à l'action du gel.

Tableau 3.3. Procédures à suivre en cas d'incidents de marche.

Incident	Cause	Remède	Sécurité
La pompe se désamorce après un arrêt de plusieurs heures.	Le clapet de pied n'est pas étanche.	Vérifier le clapet de pied.	Pressostat court-circuité par un relais temporisé. Permet le démarrage, mais arrête la pompe si la pression normale n'est pas atteinte en fin de temporisation.
La pompe se désamorce après plusieurs heures de fonctionnement.	Point haut sur l'aspiration. Prise d'air au presse-étoupe ou sur la conduite d'aspiration.	Vérifier l'aspiration : la conduite doit être en pente montante et il ne doit pas y avoir de point haut ni de prise d'air. Vérifier le presse-étoupe.	Arrêt par chute de pression. Arrêt par relais d'intensité.
La pompe cavite. Usure rapide de l'hydraulique.	Hauteur d'aspiration ou débit trop important et supérieur aux valeurs max. prévues : – abaissement excessif du niveau dynamique ; – mauvais choix de la pompe ; – inadéquation du matériel d'irrigation.	Fermer la vanne jusqu'à ce que la cavitation cesse. Vérifier la crépine et contrôler l'aspiration. Contrôler le refoulement (fuites, déboîtements).	

IRRIGATION PAR ASPERSION

Sophie Gendre, Jacques Granier, Séverine Tomas, Bruno Molle

L'évolution technique des systèmes d'irrigation par aspersion a été influencée en permanence par le souci d'économiser de la main-d'œuvre et de diminuer la pénibilité du travail.

On peut classer les équipements d'irrigation par aspersion en deux types : les couvertures d'asperseurs et les machines à irriguer.

Alors que dans le cas d'une installation d'irrigation par couverture d'asperseurs, les appareils distributeurs d'eau sont en position fixe durant leur fonctionnement, les machines à irriguer (enrouleurs, pivots, rampes frontales) ont la faculté de déplacer le ou les distributeurs d'eau durant l'arrosage.

L'apparition des machines à irriguer trouve son origine dans le souci de réduire le travail de déplacement manuel des éléments d'arrosage ou les importants investissements de la couverture intégrale d'asperseurs. L'installation d'une couverture d'asperseurs mobilise un grand nombre d'appareils distributeurs d'eau si bien que la recherche et l'obtention d'une grande précision dans l'adéquation de l'installation au parcellaire ou dans la conduite des arrosages peuvent être le résultat d'un raisonnement rigoureux bâti sur la base de données agronomiques et techniques avérées.

Cette même rigueur dans la conduite du raisonnement est tout aussi indispensable pour éviter les pièges, dérives et déboires qui peuvent résulter de l'apparente facilité de la mise en œuvre des machines à irriguer dont la rigidité structurelle exclut bon nombre d'adaptations de circonstance.

En conclusion, l'utilisateur de cet ouvrage ne doit jamais oublier le lien originel qui relie entre elles toutes les installations ou machines à irriguer par aspersion qui ont, toutes, pour dénominateur commun l'asperseur ou un dispositif voisin. Quel que soit le type d'installation qui, au final, sera retenu, il apparaît indispensable de posséder les connaissances et modes de raisonnement nécessaires à la conception d'une installation par couverture d'asperseurs.



© Arvalis/S. Gendre.

Les couvertures d'asperseurs

De la rampe mobile à la couverture intégrale

Les premiers réseaux d'irrigation par aspersion furent équipés d'asperseurs disposés en ligne le long d'une rampe mobile en alliage léger, qu'on démontait et déplaçait à la main, de poste en poste, pour irriguer l'ensemble de la parcelle (figure 4.1). Peu coûteux en investissement, ce système était très exigeant en main-d'œuvre.

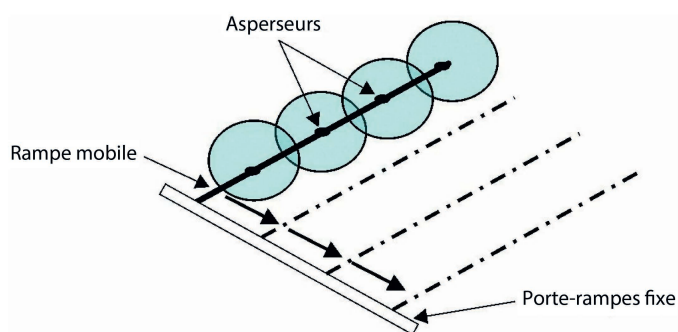


Figure 4.1. Le système de rampe mobile.

Ce système a évolué vers la couverture totale, qui consiste à disposer sur la parcelle à irriguer, en début de campagne, un réseau de rampes sur lesquelles on déplacera manuellement les asperseurs. Chaque rampe, de petit diamètre, alimente un seul asperseur (figure 4.2). La couverture totale permet une économie de main-d'œuvre sensible par rapport aux rampes mobiles, mais l'obligation de déplacer deux à trois fois par jour les asperseurs est une contrainte qui limite l'extension de cette technique à des superficies de l'ordre d'une vingtaine d'hectares pour un irrigant aidé de sa famille.

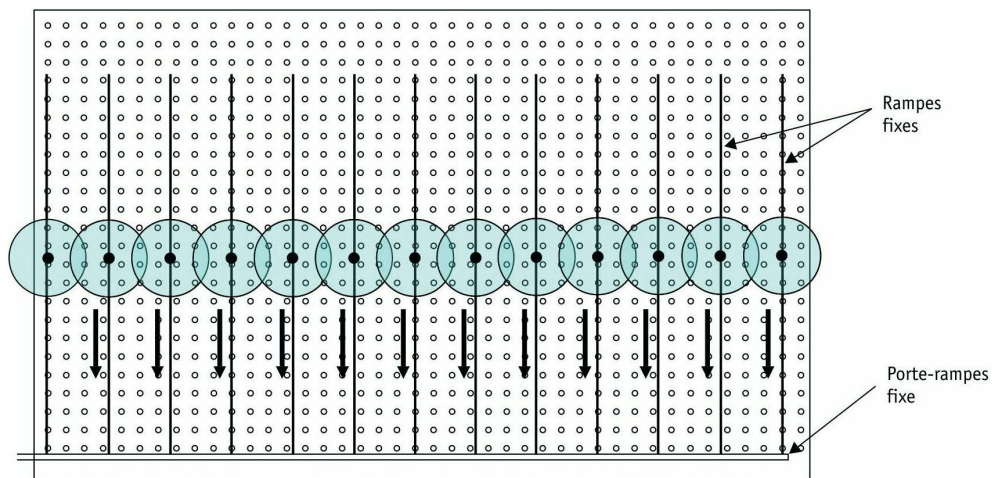


Figure 4.2. La couverture totale.

On a enfin abouti à la couverture intégrale qui consiste, en début de campagne, à disposer les rampes sur la parcelle et à les équiper de l'ensemble des asperseurs, (figure 4.3). Une fois posé, le réseau ainsi conçu reste fixe pendant toute la saison d'irrigation.

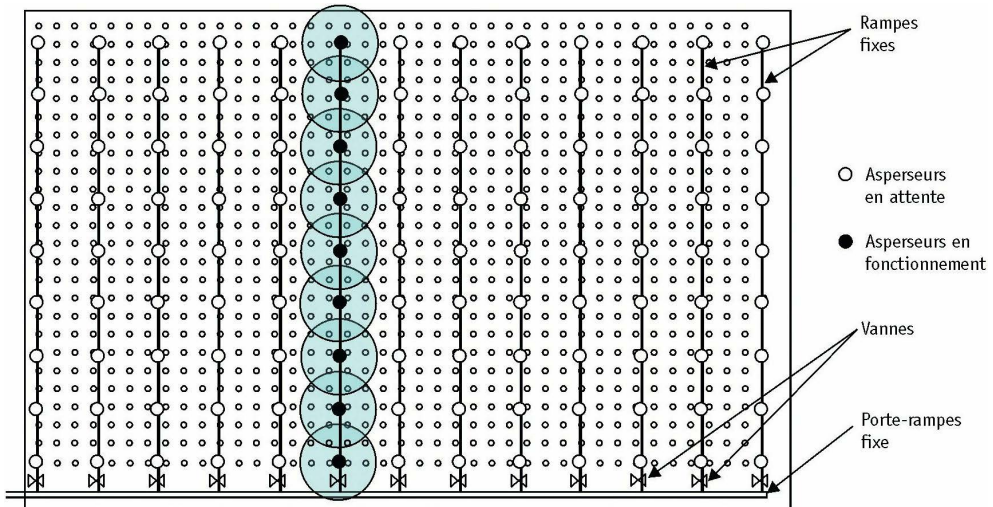


Figure 4.3. La couverture intégrale.

La mise en eau successive des postes d'arrosage, qui peuvent comprendre une ou plusieurs rampes en fonctionnement simultané, est réalisée par l'ouverture ou la fermeture de petites vannes en tête de chaque rampe. Ces vannes peuvent être commandées de manière manuelle, semi-automatique (vannes volumétriques) ou automatique (programmateur d'arrosage).

La couverture intégrale présente l'avantage de supprimer la main-d'œuvre pour les changements de poste, presque totalement lorsque les manœuvres de vannes en tête de rampe sont manuelles, totalement lorsque la commande de ces vannes est automatique. Néanmoins, cet avantage est obtenu au prix d'un investissement d'autant plus élevé que le système est plus automatisé.

La couverture intégrale convient particulièrement bien aux cultures annuelles dont la sole irriguée est déplacée dans l'assolement de l'ensemble de l'exploitation.

Avec ces systèmes, la disposition des asperseurs permet d'obtenir une répartition homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface irriguée. Ces dispositifs peuvent être adaptés à toutes les formes de parcelles, à toutes les natures de sols et à toutes les cultures.

Les éléments d'une couverture d'asperseurs

Les éléments d'une couverture d'asperseurs sont les suivants (figure 4.4) :

- la conduite principale ;
- l'antenne ou porte-rampes, aussi dénommée secondaire ;
- la rampe qui porte les organes d'aspersion, aussi dénommée tertiaire ;
- les asperseurs.

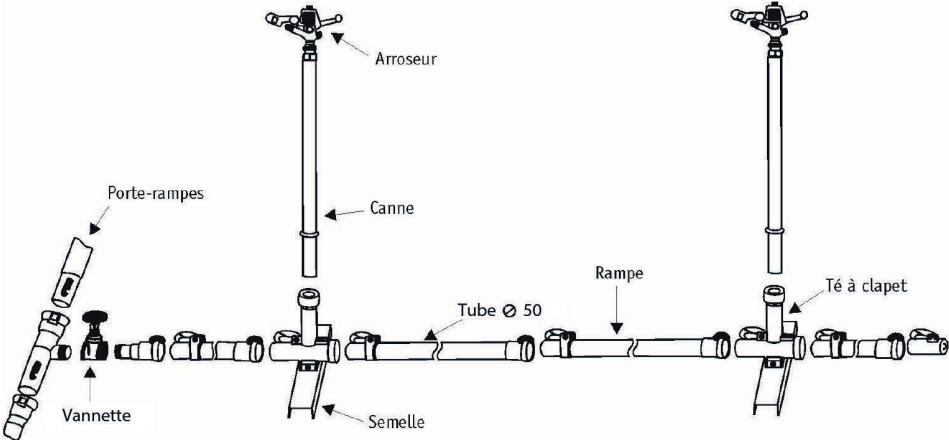


Figure 4.4. Les éléments d'une installation de couverture d'aspersion (source : Irrifrance).

La conduite principale relie la station de pompage ou la borne d'irrigation aux porte-rampes. Enterrée, ou disposée en surface, la conduite a généralement un diamètre de 3 à 6 pouces.

Le porte-rampes est la canalisation qui relie le point d'alimentation en eau de la parcelle aux différentes rampes disposées sur celle-ci. Il est constitué d'éléments de tuyaux rigides à raccords rapides, afin de faciliter leur manipulation. Ses caractéristiques les plus courantes sont indiquées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Caractéristiques du porte-rampe.

Matière du tube	Diamètre	Pression nominale (bar)	Longueur des éléments
Acier galvanisé	80, 100 mm	16	3 m, 6 m, 9 m
	125, 150 mm	16	
Aluminium (alliage)	3", 4", 5", 6"	14	3 m, 6 m, 9 m
Polyéthylène (PE)	70, 100 mm	6	3 m, 6 m, 9 m

Les rampes sont constituées de tuyaux rigides à raccords rapides. Elles portent des prises qui permettent de brancher les aspersion. Leurs caractéristiques, indiquées dans le tableau 4.2, sont liées au type de couverture.

Tableau 4.2. Caractéristiques des rampes.

Type de couverture	Tuyau	Diamètre	Pression nominale (bar)	Longueur des tronçons
Intégrale	Alliage d'aluminium	2"	12	3 m, 6 m, 9 m
	Polyéthylène (PE) haute densité	50 mm	6	À la demande
Totale	Polyéthylène (PE) haute densité	32 mm	6	À la demande
	Polychlorure de vinyle (PVC) rigide	32 mm	6	12 m

L'aspersion est caractérisé par le diamètre de sa buse, qui définit, pour une pression déterminée, le débit de l'aspersion, la portée du jet et la répartition de l'eau (pluviométrie) le long du jet. Il existe des aspersion équipés d'une seule buse (monobuse), et des aspersion équipés de deux buses (double buse) de diamètre différent.



Photo 4.1. Asperseur monobuse
(source : Irrifrance).



Photo 4.2. Asperseur double buse
(source : Irrifrance).

Les monobuses comportent des buses de 4 à 4,8 mm de diamètre, avec des débits allant de 1,2 à 1,7 m³/h sous une pression de l'ordre de 3,5 bars.

Les doubles buses comportent des buses de 4,0 × 2,4 mm, 4,4 × 2,4 mm, 4,8 × 2,4 mm de diamètre pour des débits de l'ordre de 1,5 m³/h, 1,7 m³/h ou 2,1 m³/h sous une pression de 3,5 bars.

L'asperseur peut être monté :

- sur un bipied ou un trépied déplaçable de 1 m à 2,5 m, relié au té porte-asperseur par un tube souple, ce qui est généralement le cas en couverture totale ;
- directement sur la rampe, par l'intermédiaire d'une allonge rigide de 0,5 m à 2 m que l'on emboîte dans un té à clapet fixé sur une plaque stabilisatrice, ce qui est le cas le plus fréquent en couverture intégrale.



Photo 4.3. Trépied utilisé en couverture totale.



Photo 4.4. Canne utilisée en couverture intégrale (source : Irrifrance).

La pression de fonctionnement des asperseurs doit être proche de la pression nominale indiquée par le constructeur. En général, celle-ci est de 3,5 bars pour les asperseurs les plus utilisés. Lorsque la pression est supérieure à la pression nominale, on monte sur la rallonge ou sur le pied porte-asperseur, juste à l'amont de l'asperseur, un régulateur de pression.

Les arroseurs à prévoir sont spécifiques à chaque système (voir section « Choix et implantation des asperseurs », p. 127).

Les bases conceptuelles d'une installation d'irrigation par couverture d'asperseurs à la parcelle

La conception d'un réseau d'irrigation par aspersion à la parcelle dépend d'éléments liés au milieu (besoins en eau, réserve utilisable et perméabilité du sol) et des contraintes d'exploitation qui déterminent le choix des surfaces et des cultures irriguées, le mode d'irrigation, le niveau d'automatisation de l'installation et la durée effective d'irrigation (nombre de jours d'irrigation par mois, nombre de postes par jour, durée de chaque poste).

Le temps effectif de fonctionnement du réseau est d'autant plus important que le niveau d'équipement et d'automatisation est plus élevé.

La couverture totale exige des interventions manuelles pénibles. Il faut souvent prévoir un temps de ressuyage, à l'arrêt de chaque poste, avant de pénétrer dans les parcelles pour le déplacement des asperseurs. Si l'on dispose d'un nombre d'asperseurs suffisant pour équiper deux postes, on peut gagner du temps en équipant un poste pendant que l'autre fonctionne. De même, l'arrêt automatique de l'irrigation, en fin de poste, permet de réaliser un poste supplémentaire la nuit. Le nombre de postes est en général de deux, éventuellement de trois, avec des durées de poste qui varient de 6 h à 10 h. Avec 4 à 5 jours d'arrêt par mois, le temps effectif d'irrigation avec deux postes de 8 h par jour est de l'ordre de 400 h par mois.

Avec la couverture intégrale, il n'y a plus de déplacement d'asperseur et l'automatisation complète du réseau est possible. On peut tabler, pour un réseau à commande manuelle avec une durée d'irrigation de 20 h par jour, sur un temps effectif d'irrigation de plus de 600 h par mois. Pour une installation automatique, on peut aller jusqu'à 650 ou 700 h par mois.

Données de base nécessaires au calcul de l'installation

Elles se résument ainsi.

Données du milieu

Besoins climatiques de pointe en mm B, corrigés éventuellement des pertes par ruissellement et de la contribution du sol. B résulte de l'étude statistique du bilan hydrique pour les cultures les plus exigeantes de l'exploitation au pas de temps choisi (décade, mois, etc.) :

$$B = Kc \text{ ETP} - \text{pluies} - \text{contribution du sol} + \text{pertes (voir chapitre 1)}.$$

On en déduit les besoins journaliers de pointe en mm/j : B_j

RFU = réserve facilement utilisable

Intensité pluviométrique maximale admissible en mm/h : I_{\max}

I_{\max} correspond à la vitesse d'infiltration du sol.

Ces données résultent de mesures, d'observations et d'analyses réalisées sur les paramètres climatiques et culturels, ainsi que sur le sol.

Données de l'exploitation

Superficie à irriguer en ha : S

Nombre de jours effectifs d'irrigation durant la période considérée : J_i

Durée effective de l'irrigation par jour (en heures) : t_j

Débit disponible en bordure de parcelle en m^3/h : Q_d

Les valeurs de ces données pourront être modifiées, ajustées en fonction du résultat des calculs pour parvenir au terme du projet.

Calcul simplifié d'un projet d'irrigation à la parcelle pour une couverture d'asperseur

Les exemples simples présentés ci-dessous le sont à titre pédagogique. Il existe de plus en plus des logiciels permettant un calcul rapide des réseaux à la parcelle avec de bons résultats, à condition d'y introduire correctement les données nécessaires.

Le calcul peut être conduit en millimètres ou en mètres cubes par hectare. On passe de l'une à l'autre de ces unités par la relation suivante : $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3$ par hectare.

Débit d'équipement Q_e :

$$Q_{e \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \frac{S_{(\text{ha})} \times B_{(\text{mm})} \times 10}{J_{(j)} \times t_{j(j)} \times \eta}$$

η étant le coefficient d'efficience du mode d'irrigation tenant compte du mode d'irrigation, des pertes par évaporation et des fuites de l'installation. On peut retenir une efficience de 80 à 85 % en irrigation par couverture d'asperseurs.

Si le débit disponible sur l'exploitation est inférieur à la valeur calculée ($Q_d < Q_e$), on devra augmenter le temps effectif d'irrigation (J_i et t_j) ou diminuer la surface irriguée (S).

Période de retour ou tour d'eau en jours : T

$$T = D/D_j$$

D étant la dose d'irrigation apportée à chaque rotation en mm : $D \leq \text{RFU}$

Nombre de rotations dans la période considérée (en général le mois de pointe) : N

$$N = J/T$$

avec J = nombre de jours de la période considérée.

Si N calculé n'est pas un nombre entier, on choisira la valeur arrondie la plus commode, ce qui conduit à recalculer la période $T = J/N$ et la dose d'irrigation $D = D_j \times T$

Nombre de jours effectifs d'irrigation par rotation, compte tenu du nombre de jours effectifs de la période considérée : j_i

$$J_i = J_i/N$$

Arrondi, ce qui conduit à recalculer $J_i = N \times j_i$

À ce stade, il faut choisir :

- le nombre de postes d'irrigation par jour : n

et calculer la durée de chaque poste en heures : t_p

$$t_p = t_j/n$$

- l'intensité pluviométrique moyenne en mm/h : I

$$I = D_{(mm)} / t_p$$

- la surface irriguée à chaque poste en ha : s

$$s = S / (n \times j_i)$$

On vérifiera que la pluviométrie ainsi calculée est inférieure à l'intensité pluviométrique maximale I_{max} . Dans le cas contraire, il faudra diminuer le nombre de postes et donc augmenter la durée et la surface de chaque poste ; ou diminuer la dose apportée à chaque irrigation et la période de rotation, ce qui conduit à augmenter le nombre de rotations.

Exemple : calcul d'une installation pour irriguer du maïs sur sol argileux peu profond

Données

Besoin mensuel de pointe	$B = 150 \text{ mm}$
Besoin moyen journalier de pointe	$B_j = 150 / 30 = 5 \text{ mm}$
Réserve facilement utilisable du sol	$RFU = 60 \text{ mm}$
Vitesse d'infiltration du sol	$I_{max} = 7 \text{ mm/h}$
Surface à irriguer	$S = 17 \text{ ha}$

Cas 1 : équipement pour un réseau d'asperseurs en couverture totale

Nombre de jours d'irrigation par mois	$j_i = 25 \text{ j}$
Nombre d'heures d'irrigation par jour	$t_j = 18 \text{ h/j}$, soit 450 h/mois
Efficience	$\eta_i = 85 \%$

Calcul

Débit d'équipement nécessaire : $Q_e = (17 \times 150 \times 10) / (25 \times 18 \times 0,85) = 67 \text{ m}^3/\text{h}$

Période de retour ou tour d'eau : $T \leq 60 / 5 = 12 \text{ j}$

Nombre mensuel de rotations : $N \leq 30 / 12 = 2,5$ arrondi à 3

d'où : $T = 30 / 3 = 10 \text{ j}$ et $D = 5 \text{ mm/j} \times 10 \text{ j} = 50 \text{ mm}$.

Nombre de jours d'irrigation par période : $J_i = 25 / 3 = 8,3$ arrondi à 8

soit finalement $j_i = 3 \times 8 = 24 \text{ j/mois}$ et : $Q = (17 \times 150 \times 10) / (24 \times 18 \times 0,85) = 69,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Supposons que nous voulions arroser au rythme de 3 postes de 6 heures par jour, l'intensité pluviométrique nécessaire serait : $I = 60 / 6 = 10 \text{ mm/h}$

qui est supérieure à l'intensité maximale admissible. Il faut donc augmenter la durée des postes en diminuant leur nombre.

Si nous prévoyons 2 postes de 9 heures par jour, on obtient : $I = 60 / 9 = 6,7 \text{ mm/h}$

La surface résultante pour chaque poste sera donc : $s = 17 / (2 \times 8) = 1,06 \text{ ha}$

Cas 2 : équipement pour un réseau d'asperseurs en couverture intégrale

Si le débit d'équipement disponible de l'exploitation n'est que de $55 \text{ m}^3/\text{h}$, on devra, pour irriguer les 17 ha, adopter un temps d'irrigation :

$$T_i \geq (17 \times 150 \times 10) / (55 \times 0,85) = 545 \text{ h/mois}$$

Ce qui conduit à choisir une couverture intégrale automatisée qui fonctionnera par exemple 20 h par jour pendant 27 jours par mois.

On aura alors :

- nombre de jours d'irrigation par période : $J_i = 27 / 3 = 9 \text{ jours}$
- durée de chaque poste : $T_y = 20 / 2 = 10 \text{ h}$
- intensité pluviométrique : $I = 60 / 10 = 6 \text{ mm/h}$

La surface de chaque poste sera donc : $s = 17 / (2 \times 9) = 0,95 \text{ ha}$

Choix et implantation des asperseurs

La quantité d'eau qui tombe sur le sol (ou pluviométrie), le long du jet d'un asperseur, diminue lorsqu'on s'éloigne de celui-ci. Cette décroissance de la pluviométrie est aggravée par le fait que la surface arrosée par mètre linéaire de jet au cours de la rotation de l'asperseur augmente avec la distance par rapport à l'arroseur. Pour obtenir une répartition de l'eau homogène, on doit disposer les asperseurs de manière à avoir un recoupement des jets. Les asperseurs sont usuellement disposés en carré, en rectangle ou en triangle (figure 4.5).

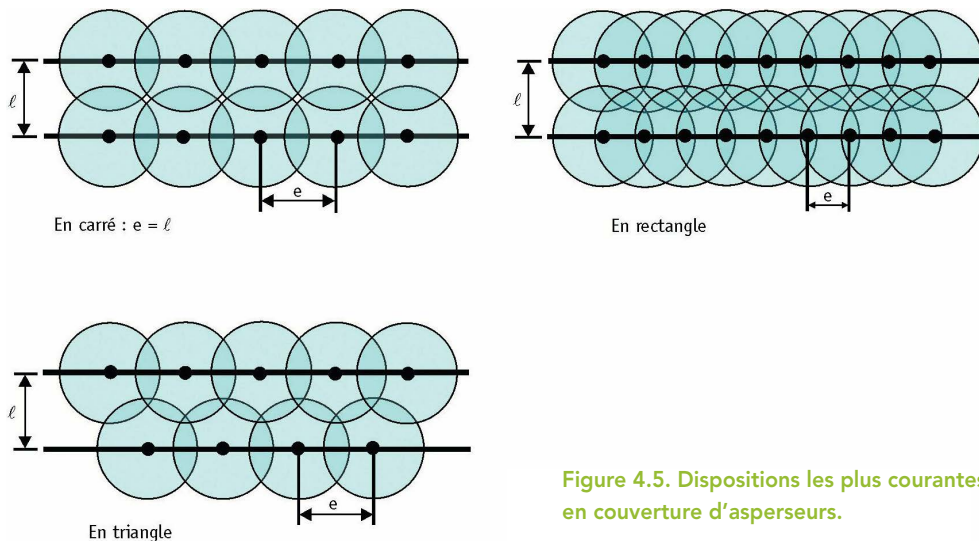


Figure 4.5. Dispositions les plus courantes en couverture d'asperseurs.

Les implantations les plus courantes observées en France sont :

Pour la couverture totale	Pour la couverture intégrale
18 m × 24 m	18 m × 18 m
24 m × 24 m	18 m × 24 m
	21 m × 21 m

La première valeur de chaque couple est celle de l'espacement (e en m) des asperseurs sur la rampe, la seconde celle de l'écartement (l en m) entre deux rampes contiguës.

Le choix et l'implantation des asperseurs définissent l'uniformité de répartition de l'eau. Cette uniformité dépend aussi de l'effet du vent, qui augmente l'hétérogénéité de la répartition de l'eau. Des effets sont sensibles dès que la vitesse du vent atteint 10 km/h. L'irrigation devient pratiquement impossible lorsque cette vitesse atteint 30 km/h. On atténuera l'effet du vent en adoptant un dispositif le plus serré possible en triangle de préférence. Le triangle 18 m × 18 m est préconisé ; l'implantation en 12 m × 12 m est souvent mise en place dans les pays ventés. Si l'on doit, en dépit du vent, adopter des dispositifs rectangulaires ou triangulaires 18 m × 24 m, on orientera les dispositifs pour que la plus grande dimension soit dans le sens du vent dominant.

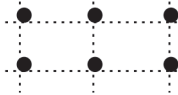
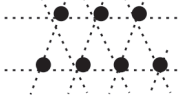
L'uniformité recherchée sera plus ou moins grande suivant l'importance des réserves en eau du sol que peut mobiliser la culture. En effet, l'hétérogénéité des apports d'eau à la surface du sol s'estompe en profondeur. Si la profondeur de sol exploitée par les racines est faible (20 à 30 cm pour certaines

cultures maraîchères par exemple), on choisira un dispositif serré (12×12), équipé d'asperseurs à deux buses. Au contraire, pour des cultures à enracinement profond, telles que le maïs ou le soja, on pourra choisir un dispositif plus lâche et des asperseurs à une seule buse, à condition de ne pas être exposé à des vents forts.

On pourra, également, se montrer relativement tolérant sur la qualité de la répartition de l'eau, lorsque les apports d'irrigation de complément constituent une part relativement faible des besoins en eau totaux de la plante. Si ces apports représentent moins de $1/3$ des besoins, on pourra se contenter de dispositifs à grand écartement avec des asperseurs à une buse. S'ils représentent plus des $2/3$ des besoins totaux ou s'ils interviennent à une période sensible du cycle végétatif de la culture, on adoptera un dispositif à faible écartement équipé d'asperseurs à deux buses.

Les tableaux 4.3 à 4.5 récapitulent les critères de choix des busages d'asperseurs et des dispositifs pour les équipements les plus courants. On pourra choisir le type d'asperseur (busage) et l'implantation des asperseurs en tenant compte des éléments ci-dessus et de la pluviométrie nécessaire (I).

Tableau 4.3. Installation d'arrosage en petits asperseurs. Choix de l'implantation.

Implantation		La portée moyenne observée de l'arroseur doit être au minimum de	Portée théorique P ¹ minimale nécessaire		
			Vent nul ou rare (m)	Vent gênant assez souvent (m)	Vent gênant souvent (m)
		Pr	$P = Pr / 0,95$	$P = Pr / 0,85$	$P = Pr / 0,75$
	12×12	9,5	10	11,2	12,7
	12×18	11,8	12,4	13,9	15,7
	18×18	13,8	14,5	16,2	18,4
	18×21	14,8	15,6	17,4	19,7
	18×24	16	16,8	18,8	21,3
	21×21	15,8	16,6	18,6	21,1
	24×24	18	19	21,2	—
	12×12	8,5	9	10	11,3
	12×18	11	11,6	13	14,7
	18×18	12,2	12,8	14,4	16,3
	18×21	13,3	14	15,6	17,7
	18×24	14,7	15,5	17,3	19,6
	21×21	14,2	15	16,7	19
	24×24	16	16,8	18,8	21,3

¹ Portée annoncée sur les abaques du constructeur.

² Pr = portée réelle.

Tableau 4.4. Caractéristiques des busages et dispositifs d'implantation en couverture intégrale.

Busage mm (pouce)*	Pression **bar	Débit m³/h	Portée (vent nul) m	Dispositif d'alimentation***					
				18 x 18 m		18 x 24 m		21 x 21 m	
				Carré	Triangle	Rectangle	Triangle	Carré	Triangle
1 buse									
4 (5/32")	3,5	1,2	14	Oui (3,7 mm/h)	Oui (3,7 mm/h)	Non	Non	Non	Non
4,4 (11/64")	3,5	1,5	15	Oui (4,6 mm/h)	Oui (4,6 mm/h)	Non	Oui (3,5 mm/h)	Non	Oui (3,4 mm/h)
4,8 (3/16)	3,5	1,7	15	Oui (5,2 mm/h)	Oui (5,2 mm/h)	Non	Oui (3,9 mm/h)	Non	Oui (3,8 mm/h)
2 buses									
4 x 2,4 (5/32" x 3/32")	3,5	1,5	14	Oui (4,6 mm/h)	Oui (4,6 mm/h)	Non	Non	Non	Non
4,4 x 2,4 (11/64" x 3/32")	3,5	1,7	15	Oui (5,2 mm/h)	Oui (5,2 mm/h)	Non	Oui (3,9 mm/h)	Non	Oui (3,8 mm/h)
4,8 x 2,4 (3/16" x 3/32")	3,5	2,1	15	Oui (6,5 mm/h)	Oui (6,5 mm/h)	Non	Oui (4,9 mm/h)	Non	Oui (4,8 mm/h)
Portée minimale du jet pour mouiller la totalité de la surface au centre du dispositif				12,7 m	11,2 m	15 m	13,7 m	14,8 m	13,1 m
Portée minimale du jet pour avoir un recouplement de 2 m au centre du dispositif				13,7 m	12,2 m	16 m	14,7 m	15,8 m	14,1 m

3,7 mm/h : pluviométrie horaire moyenne en millimètres.

* 1 pouce = 1" = 25,4 mm.

** Pour les busages utilisés en couverture intégrale, la pression de fonctionnement de 3,5 bars correspond à la portée maximale du jet et à une pulvérisation optimale de celui-ci.

*** La première dimension correspond à l'espacement des asperseurs sur la rampe, la deuxième à l'écartement entre rampes. En implantation « triangle » (ou en quinconce) les asperseurs sont disposés aux sommets d'un triangle isocèle dont la base, comprise entre les 2 côtés égaux, correspond à la première dimension, et la hauteur, relative à cette base, à la seconde. Il y a compatibilité (oui) entre un busage et un dispositif d'implantation lorsque le recoupement des cercles arrosés au centre du dispositif est égal ou supérieur à 2 mètres, ceci pour se prémunir des effets nocifs du vent faible à modéré (de l'ordre de 10 km/h). Il y a incompatibilité (non) lorsque ce recoupement n'existe pas ou est inférieur à 2 mètres.

Tableau 4.5. Choix du busage et dispositif d'implantation en couverture intégrale.

Culture et conditions pédoclimatiques		Dispositif d'implantation*		
		18 x 18 m (carré ou triangle)	18 x 24 m (carré ou triangle)	21 x 21 m (carré ou rectangle)
Culture	À faible enracinement (maraîchage)	2 buses	Dispositifs d'implantation à éviter	
	À enracinement profond (maïs)	1 buse	1 buse ($\phi > 4$ mm) en triangle seulement	
Rapport : eau d'irrigation besoins en eau totaux	Inférieur à 1/3	1 buse	1 buse ($\phi > 4$ mm) en triangle seulement	
	Supérieur à 2/3	2 buses	Dispositifs d'implantation à éviter	
Vitesse du vent	Inférieure à 10 km/h	1 ou 2 buses	1 ou 2 buses ($\phi > 4$ mm) en triangle seulement	
	Supérieure à 10 km/h	1 ou 2 buses en triangle seulement	Dispositifs d'implantation à éviter	

* Lorsque pour un dispositif d'implantation, l'asperseur à 2 buses est préconisé une fois, c'est ce dispositif d'asperseur qui s'impose au choix de l'agriculteur.

L'uniformité de répartition de l'eau est d'autant meilleure que le dispositif est serré (recoupement des cercles arrosés important) et que l'asperseur utilisé est équipé de deux buses (meilleure courbe pluviométrique).

Calcul du nombre d'asperseurs nécessaire

Pour la couverture totale, le nombre minimal d'arroseurs n_a est celui nécessaire pour couvrir la surface arrosée à chaque poste :

$$n_a = (s \times 10\,000) / e \times d$$

avec :

s = surface du poste irrigué en ha

e = écartement entre lignes en mètres

d = distance entre asperseurs en mètres

Dans ce système, les asperseurs sont déplacés fréquemment (risque de chocs et de détérioration). Ils doivent être très résistants aux chocs (bronze) et d'excellente qualité.

En couverture intégrale, l'ensemble de la surface est couverte par un nombre N_a d'asperseurs :

$$N_a = (S \times 10\,000) / e \times d$$

S étant la surface de la parcelle irriguée, le nombre d'asperseurs en fonctionnement par poste est :

$$n_a = (s \times 10\,000) / e \times d$$

Exemple

En prenant les données de l'exemple page 126, on pourra effectuer les calculs suivants.

Cas 1 : couverture totale

La pluviométrie envisagée étant de 6,7 mm/h, on pourra choisir dans le tableau 4.2 des asperseurs à double buse 4,8 × 2,4 mm disposés en 18 × 18 m qui apporteront 6,5 mm/h. Pour apporter 50 mm par poste, la durée de chaque poste devra être de 50/6,5 = 7,69, soit 7 h 41 min.

Le nombre d'asperseurs nécessaires pour un poste sera :

$$n_a = (1,06 \times 10\,000) / (18 \times 18) = 33$$

et le débit de l'installation : $Q = 33 \times 2,1 = 69,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Cas 2 : couverture intégrale

On peut obtenir une pluviométrie de 5,2 mm/h avec des asperseurs à double buse de 4,4 × 2,4 mm disposés en 18 × 18 m.

Le nombre d'asperseurs nécessaires pour l'ensemble de la parcelle sera de :

$$N_a = (17 \times 10\,000) / (18 \times 18) = 525$$

dont en fonctionnement par poste :

$$n_a = (0,95 \times 10\,000) / (18 \times 18) = 29$$

et le débit de l'installation de $Q = 29 \times 1,7 = 49,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le dimensionnement de la rampe d'asperseurs

Après avoir choisi le dispositif (type et implantation des asperseurs et des lignes de rampes), il faut procéder au découpage des rampes et à l'implantation des porte-rampes et de la conduite d'amenée d'eau.

Le débit et la portée de jet d'un asperseur étant fonction de la pression de l'eau, il importe que la pression de fonctionnement de l'asperseur soit proche de la pression nominale annoncée par le fabricant, pour obtenir les caractéristiques indiquées par celui-ci et une répartition de l'eau correcte.

Il est conseillé de concevoir l'installation de manière à satisfaire la règle de Christiansen qui limite la plage de variation de la pression de fonctionnement des asperseurs à $\pm 20 \%$ de la pression nominale afin que le débit reste constant à $\pm 10 \%$ près.

La longueur des rampes et le nombre d'asperseurs en fonctionnement simultané sur les rampes doivent être tels que cette règle soit respectée, compte tenu de la pression disponible en tête de rampe, des pertes de charge dans les rampes et de la pente de la parcelle le long des rampes. Au besoin, on équipera certains asperseurs de régulateurs de pression pour y parvenir.

Pour le calcul des pertes de charge dans les rampes, porte-rampes et conduite d'amenée, on utilisera les abaques disponibles ou les formules suivantes, en tenant compte de la nature du tuyau.

Formule de Scobey pour les tuyaux en alliage léger :

$$J = 1,634 \times Q^{1,89} \times D^{-4,87}$$

J = perte de charge totale en mm/m, Q = débit en m³/s, D = diamètre intérieur en mm.

Formule de Tison pour les tubes en PVC et polyéthylène :

$$J = 0,0008 \times Q^{1,75} \times D^{-4,75}$$

J = perte de charge totale en mm/m, Q = débit en m/s, D = diamètre intérieur en mm.

Dans le calcul, il faut ajouter ou retrancher à la perte de charge totale la pente du tuyau.

Couverture totale

Dans le cas de la couverture totale, il n'y a qu'un asperseur en fonctionnement par rampe. La règle de Christiansen va s'appliquer entre l'asperseur le plus défavorisé de la parcelle et l'asperseur le plus proche de l'arrivée d'eau dans l'antenne porte-rampes.

Exemple

Pression nominale de fonctionnement de l'asperseur 3,2 bars

Pression calculée pour l'asperseur le plus éloigné 2,9 bars

Pression calculée pour la position d'asperseur la plus proche de la vanne d'arrivée d'eau 3,5 bars

Variation relative de la pression :

$$(3,5 - 2,9) / 3,2 = 0,6 / 3,2 = 0,187, \text{ soit } 18,7 \%$$

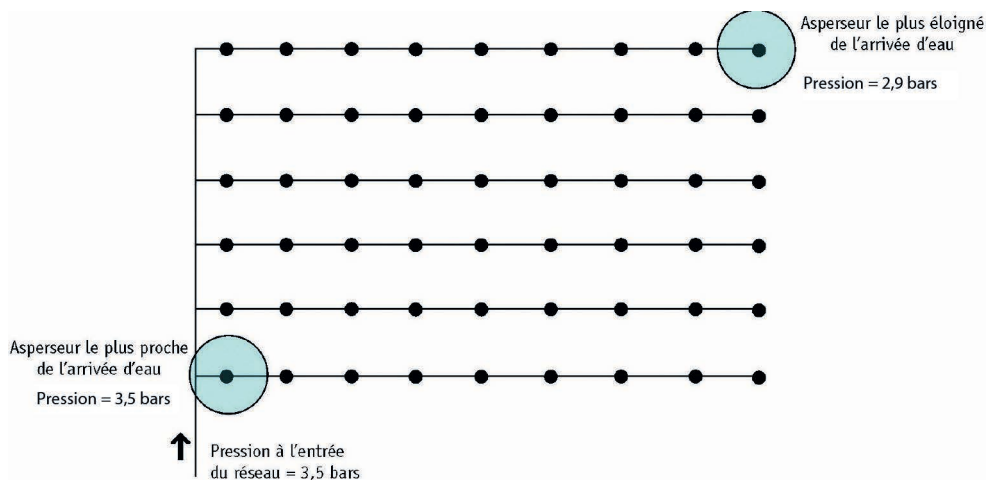


Figure 4.6. Position des asperseurs le plus défavorisé et le plus favorisé d'un réseau en couverture totale.

Couverture intégrale

Dans le cas de la couverture intégrale, une même rampe alimente plusieurs arroseurs. Le débit en tête de la rampe est la somme des débits mesurés à chaque arroseur sur la rampe. Il est important et engendre une perte de charge entre le premier et le dernier asperseur.

À partir de mesures de pertes de charge réalisées par INRAE sur deux types de couverture intégrale (couverture en alliage léger Irrifrance et couverture enroulable en polyéthylène Kulker), il a été établi des abaques permettant de définir les lignes piézométriques correspondant à des dispositifs usuels de couverture intégrale.

À partir de ces abaques ont été établis des tableaux¹⁹ qui indiquent, pour des rampes disposées sur des terrains de différentes pentes, les longueurs maximums des rampes possibles avec le nombre d'asperseurs et la position sur la rampe des asperseurs qui doivent être équipés d'un régulateur de pression pour respecter la règle de Christiansen. Les éléments du tableau 4.6 en ont été extraits et fournissent les informations, pour le cas d'une rampe disposée sur un terrain de pente nulle. Ces éléments doivent permettre, une fois choisi le dispositif (types d'asperseurs, espacement sur rampe, écartement des rampes), de définir le découpage des rampes, l'implantation et le calcul des porte-rampes et de la conduite d'amenée d'eau, compte tenu des postes d'arrosage.

Tableau 4.6. Nombre maximum d'asperseurs et longueur des rampes en couverture intégrale.

Types de buses		Monobuse 4,4 mm	Double buse 4 × 2,4 mm	Monobuse 4,8 mm Double buse 4,4 × 2,4 mm	Double buse 4,8 × 2,4 mm
Débit		1,4 m³/h	1,5 m³/h	1,7 à 1,8 m³/h	2,1 m³/h
Pression en tête de rampe en bar ¹	4,5	10	9	9	8
		171 m	153 m	153 m	135 m
	5	12**	11**	10*	9*
		207 m	189 m	171 m	153 m
	5,5	13***	12**	11*	10*
		225 m	207 m	189 m	171 m
	6	14****	13****	12***	11***
		243 m	225 m	207 m	189 m

¹ En bleu : nombre maximum d'asperseurs sur la rampe ; en rouge : longueur de la rampe.

* Régulateur sur le premier asperseur.

** Régulateurs sur les deux premiers asperseurs.

*** Régulateurs sur les trois premiers asperseurs.

**** Régulateurs sur les quatre premiers asperseurs.

Le dimensionnement de la conduite d'amenée

Le diamètre de cette conduite dépend du débit qui va y circuler. La règle qui prévaut pour le choix de ce diamètre n'est pas la même que celle utilisée pour les rampes d'irrigation.

On s'efforce en général de choisir un diamètre qui entraînera des pertes de charges comprises entre 10 et 50 mm/m pour éviter d'une part les chutes de pression excessives et d'autre part une vitesse trop importante de l'eau dans la conduite susceptible d'entraîner un coup de bélier important.

¹⁹ Ces abaques et tableaux sont disponibles auprès de la plateforme Presti d'INRAE Montpellier (<https://www.ecotech-occitanie.eu/Plateau-par-Plateau/PresTi>).

Le tableau 4.7 donne des ordres de grandeur des débits admissibles en fonction des diamètres lorsqu'on se réfère à cette règle.

Tableau 4.7. Débits passant dans les tuyaux d'amenée avec une perte de charge comprise entre 10 et 50 mm/m de canalisation.

Diamètres		Débits
2"	50,8 mm	Entre 5 et 12 m/h
3"	76,2 mm	Entre 10 et 30 m/h
4"	101,6 mm	Entre 25 et 60 m/h
5"	127 mm	Entre 45 et 100 m/h
6"	152,4 mm	Supérieur à 80 m/h

Il faut, dans les calculs, tenir compte de la pente de la canalisation. Lorsque l'alimentation se fait par le haut, on atténue l'effet des pertes de charge ; lorsque l'alimentation se fait par le bas, il faut ajouter la dénivelée aux pertes de charge.

Le diagnostic de fonctionnement d'une installation de couverture intégrale en asperseurs

L'objectif recherché est d'apporter la dose d'irrigation nécessaire de façon aussi homogène que possible sur l'ensemble de la parcelle irriguée. Des contrôles de terrain ont montré qu'en fait les doses apportées effectivement sont souvent bien différentes de celles qui sont choisies par l'irrigant. Cela est dû notamment à une mauvaise adaptation de l'implantation du dispositif et à des écarts de pression trop importants entre les positions extrêmes des asperseurs sur la parcelle.

Pour sensibiliser les utilisateurs à ces problèmes et améliorer le fonctionnement des installations, le BCMA, les chambres d'agriculture de la région Midi-Pyrénées et INRAE ont défini un protocole et élaboré des fiches de diagnostic qui sont présentées en annexe.

L'enrouleur

L'enrouleur est le matériel d'irrigation par aspersion le plus utilisé en France pour irriguer les grandes cultures. Ce succès provient de sa grande souplesse d'utilisation, au prix d'un temps de main-d'œuvre en saison parfois contraignant.

Descriptif technique

L'enrouleur est constitué d'un canon d'arrosage monté sur un traîneau ou sur un chariot tracté par un tuyau d'alimentation en eau en polyéthylène, qui s'enroule sur une bobine (tambour) disposée sur un châssis et mue par un moteur hydraulique (figure 4.7).

L'arrosage se fait par bandes rectangulaires successives dont la largeur dépend de la portée du canon. À chaque poste d'arrosage, l'ensemble de la machine (bobine et canon) est placé en tête de bande ; le canon est ensuite tiré à l'extrémité de la bande en déroulant le tuyau de la bobine. À l'ouverture de la vanne d'alimentation, l'ensemble se met sous pression et le canon entre en fonctionnement. Le passage de l'eau, que débite le canon, à travers le moteur hydraulique actionne la rotation lente de la bobine et l'enroulement du tuyau qui tracte le canon. En fin d'arrosage, le canon et son traîneau

rejoignent la bobine et un dispositif d'arrêt automatique coupe l'alimentation en eau de la machine. Ensuite, celle-ci est déplacée en tête de la bande voisine et le processus de mise en route de l'arrosage est reproduit (figure 4.8).

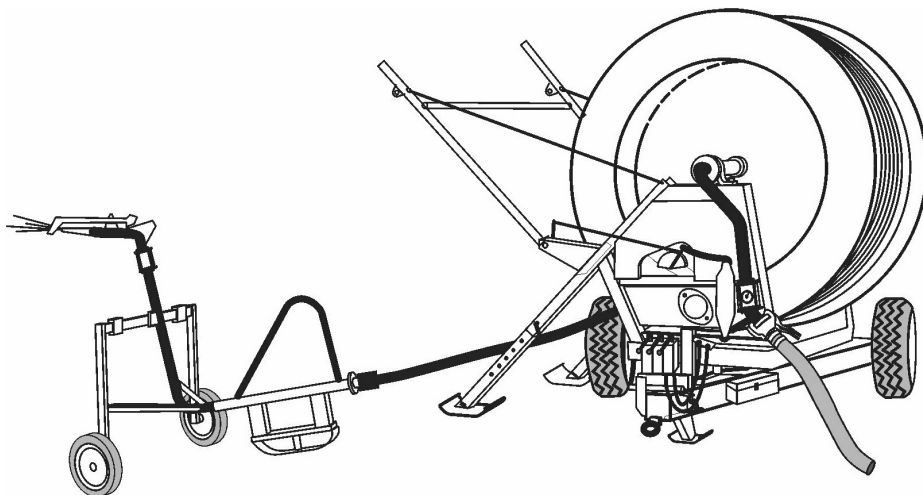


Figure 4.7. Représentation schématique d'un enrouleur.

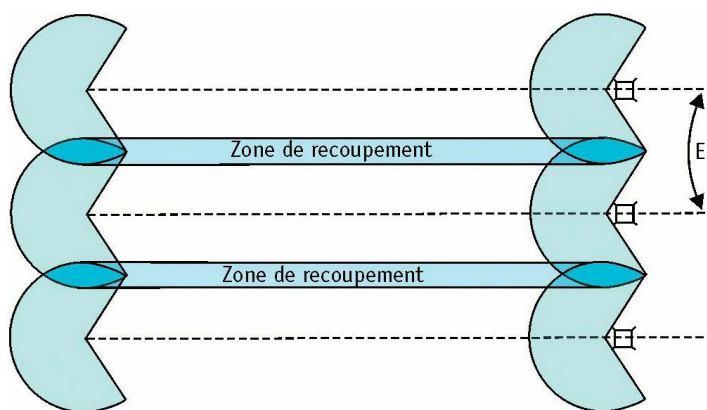


Figure 4.8. Schéma de fonctionnement de l'enrouleur.

Le canon

Le canon qui équipe habituellement l'enrouleur est un gros asperseur dont le jet atteint une grande portée (25 à 65 m environ). Il nécessite une pression élevée à sa buse (4 à 7 bars). Sa pluviométrie moyenne est relativement faible (8 à 20 mm/h) mais sa pluviométrie instantanée est très élevée, ce qui fait qu'il n'est pas adapté à tous les types de sols.

Pour fournir un arrosage de qualité satisfaisante, le canon doit fonctionner dans une plage de pression relativement étroite, liée au débit, spécifiée par le constructeur (figure 4.9). Si la pression est insuffisante, il se produit de grosses gouttes projetées au loin et l'arrosage est insuffisant au voisinage du canon. En revanche, une pression trop élevée provoque une atomisation du jet en gouttelettes au détriment de la portée et avec un accroissement de la sensibilité au vent.

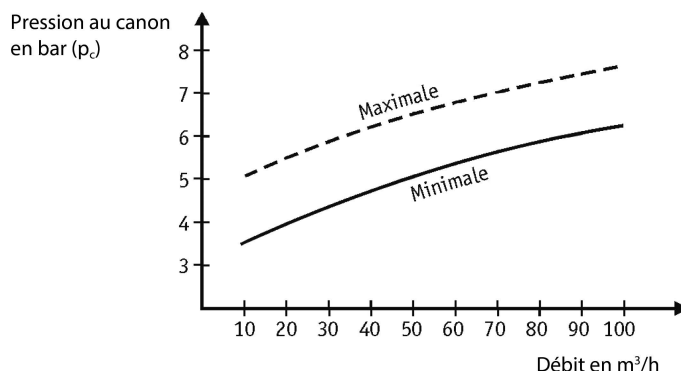


Figure 4.9. Exemple de pression d'eau nécessaire à la sortie du canon selon le débit.

Le tuyau

Compte tenu de la pression nécessaire au canon, le tuyau de l'enrouleur doit résister à des pressions relativement élevées. Sa longueur et son diamètre dépendront des dimensions de la parcelle à irriguer et de la pression requise au canon en fonction du débit souhaité. La longueur maximale d'un tuyau d'enrouleur est de 1 000 m. Néanmoins, en raison du coût énergétique et de la difficulté de déplacement de ces systèmes, il est plutôt conseillé de ne pas dépasser une longueur de 500 m. Le diamètre extérieur du polyéthylène peut être de 75 mm à 16 mm.

La bobine

Les dimensions de la bobine sur laquelle s'enroule le tuyau dépendent du diamètre et de la longueur de celui-ci.

La bobine est souvent montée sur une tourelle qui permet de la faire pivoter sur son châssis. Ce montage présente les avantages suivants :

- le déplacement de la machine et sa mise en place lors des changements de poste sont facilités ;
- il est possible d'arroser de part et d'autre de la bobine, positionnée au milieu de la parcelle, lorsque la longueur de celle-ci est trop importante et nécessite le fractionnement du poste d'arrosage en deux parties, compte tenu de la longueur maximale du tuyau.

Le moteur hydraulique

Le moteur hydraulique, qui fait tourner la bobine, est constitué soit d'un vérin, soit d'une turbine.

Le **vérin** n'a pas d'influence sur la pression de l'eau dans le tuyau d'alimentation du canon ; mais il consomme un peu d'eau, qui est rejetée à chaque mouvement du piston du vérin. Cette perte en eau est de l'ordre de 2 à 5 % selon la dose apportée (tableau 4.8).

Tableau 4.8. Perte en eau à travers le vérin de l'enrouleur selon la dose apportée.

Dose	Débit du vérin/débit de l'enrouleur
20 mm	4 à 5 %
30 mm	3 à 4 %
40 mm	2 à 3 %

La **turbine** ne consomme pas d'eau, mais crée une perte de charge de l'ordre de 0,5 à 1 bar, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'installation.

Au fur et à mesure de l'enroulement du tuyau, la superposition des rangées de spires sur la bobine augmente le diamètre d'enroulement ; ce qui aurait pour conséquence d'accroître la vitesse d'avancement du canon et de faire varier la dose d'arrosage. Un dispositif de régulation de la vitesse de rotation de la bobine est nécessaire pour assurer une vitesse de déplacement du canon constante et conforme au choix fait par l'irrigant pour obtenir la dose d'irrigation souhaitée. Le système de régulation peut être mécanique ou électronique.

La **régulation mécanique** est, en général, constituée d'un palpeur qui, suivant le nombre de couches de tuyau enroulé, agit sur la vanne d'alimentation du vérin ou de la turbine par l'intermédiaire d'une tringlerie réglable (figure 4.10).

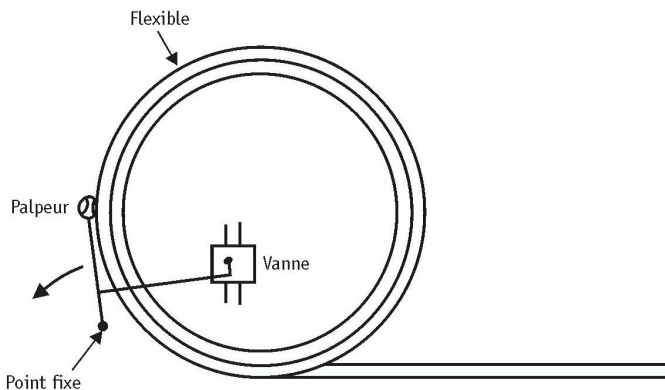


Figure 4.10. Schéma d'un système de régulation mécanique.

La **régulation électronique**, plus précise et plus fiable, doit assurer la distribution de la dose d'irrigation choisie de façon aussi homogène que possible le long de la bande arrosée.

La qualité de l'irrigation dépend essentiellement de la qualité de la régulation de l'enrouleur.

Arrêt de l'arrosage

L'arrêt de l'arrosage lorsque le canon rejoint la bobine est assuré soit par une vanne d'arrêt automatique qui coupe l'alimentation par surpression, soit par une vanne de décharge qui provoque l'arrêt d'alimentation par une chute de pression.

Choix et dimensionnement des équipements

Les éléments essentiels à considérer pour le choix et le dimensionnement des équipements d'une installation d'arrosage par enrouleur sont :

- le débit d'équipement ;
- la longueur du tuyau flexible de l'enrouleur ;
- la pression minimale à l'entrée de la parcelle.

Le débit d'équipement

Comme pour toute installation d'irrigation, le débit d'équipement doit permettre d'apporter les quantités d'eau nécessaires pour satisfaire les besoins en eau des cultures irriguées pendant la période au

cours de laquelle la différence entre les besoins des cultures et les apports naturels est la plus élevée. En France, cette période, dite « période de pointe », se situe en général au mois de juillet pour les cultures d'été. Les besoins en eau d'irrigation correspondant à cette période sont dits « besoins de pointe ».

Le débit horaire d'équipement nécessaire est donné par la relation :

$$\text{Débit horaire équipement} = \frac{\text{Besoins de pointe sur l'ensemble de la surface irriguée}}{\text{Temps effectif d'irrigation durant la période considérée}}$$

Un même enrouleur peut être utilisé pour l'ensemble des cultures de l'exploitation. Il convient, dans ce cas, de considérer l'étalement des cycles végétatifs des différentes cultures et de leur consommation en eau dans le temps, pour définir la période de pointe et les besoins en eau correspondants (voir chapitre 1).

Exemple

Calcul du débit d'équipement nécessaire pour une installation d'irrigation par enrouleur destinée à arroser 12 ha de maïs, 4 ha de luzerne, 3 ha de tournesol et 3 ha de soja.

Détermination du mois de pointe

L'étalement des périodes d'arrosage dans la région considérée est représenté en figure 4.11. Cette figure fait apparaître que la période de pointe se situe au mois de juillet.

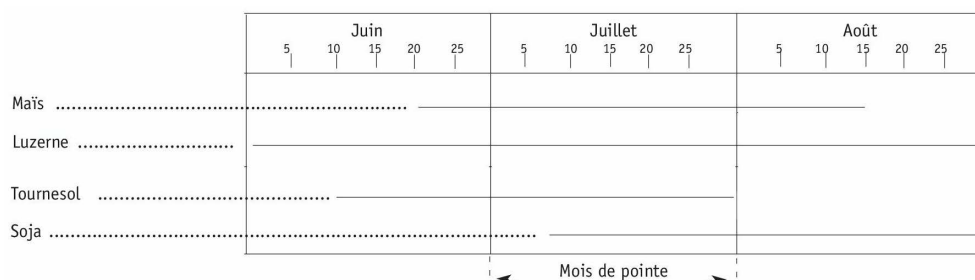


Figure 4.11. L'étalement des périodes d'arrosage.

Consommation en eau pour le mois de pointe

L'examen des données climatiques de la région concernée indique, pour la fréquence choisie (décennale en général) et pour le mois de juillet, la valeur moyenne d'évapotranspiration ETP = 130 mm par exemple.

La consommation en eau des cultures au mois de juillet est calculée comme suit.

Tableau 4.9. Consommation en eau des plantes au mois de juillet des cultures à irriguer.

Besoins des cultures en juillet	Hectares	m ³ totaux
Maïs 130 mm × 1,15 = 150 mm	12	18 000
Luzerne 130 mm × 1 = 130 mm	4	5 200
Tournesol 130 mm × 0,9 = 117 mm	3	3 510
Soja 130 mm × 1 = 130 mm	3	3 900
Consommation moyenne totale des plantes en juillet		30 610 m ³

Apport par les pluies

Les données pluviométriques locales font apparaître pour le mois de juillet et la fréquence considérée la valeur de pluie à prendre en considération : P = 13 mm.

L'apport d'eau correspondant sur 22 ha est de : $13 \times 10 \times 22 = 2\,860 \text{ m}^3$

Contribution du sol

On peut considérer que l'apport du sol est négligeable pour le calcul du débit de pointe de l'installation. Toutefois, dans le cas de sol profond à forte réserve, il convient d'en tenir compte (voir chapitre 1).

Pertes en eau

Les pertes en eau sont relativement faibles en irrigation par enrouleur si l'installation est correctement entretenue. En général, on en tient compte en majorant les besoins de 10 %.

Besoins en eau d'irrigation

Les besoins en eau d'irrigation du mois de pointe se déterminent ainsi :

Consommation en eau des plantes	30 610 m ³
Pluies	– 2 860 m ³
	<hr/>
Apport d'eau nécessaire	27 750 m ³
Pertes en eau (10 %)	2 775 m ³
	<hr/>
Besoins en eau d'irrigation (arrondi)	30 500 m ³

Débit d'équipement

Le débit d'équipement nécessaire pour un temps effectif d'irrigation de 450 h/mois est :

$$Q = 30\,500 / 450 = 68 \text{ m}^3/\text{h}$$

Remarques

1. Le débit d'équipement peut être imposé par les ressources en eau disponibles sur l'exploitation. Dans ce cas, il convient d'adapter l'assolement et/ou la surface irriguée au débit disponible.
2. Le débit d'équipement calculé comme ci-dessus s'applique à l'assolement pour lequel il a été déterminé. Cet assolement n'est pas forcément fixé une fois pour toutes pour l'exploitation considérée. On peut être conduit à le modifier pour s'adapter à la conjoncture économique ou à d'autres contraintes de l'exploitation (voir chapitre 1). Le débit pour lequel l'équipement a été choisi devient alors une contrainte pour le choix de l'assolement. Il peut être souhaitable de calculer ce débit en faisant l'hypothèse d'un assolement le plus exigeant en eau si les ressources en eau le permettent et si l'investissement supplémentaire n'est pas prohibitif.

La longueur du tuyau de l'enrouleur

La longueur du tuyau flexible de l'enrouleur dépend de la forme et des dimensions des parcelles à irriguer. Les bandes arrosées successivement aux différents postes sont disposées parallèlement au sens de culture. La longueur maximale d'un polyéthylène est de 1 000 m. Néanmoins, en raison du coût énergétique et de la difficulté de déplacement de ces systèmes, il est plutôt conseillé de ne pas dépasser une longueur de 500 m. Si la longueur des bandes est supérieure à celle-ci, une conduite d'amenée d'eau sera disposée à l'intérieur de la parcelle, de manière à diviser la longueur des bandes par deux, en arrosant de part et d'autre de la conduite d'amenée.

Calcul de la pression et choix des équipements

Le choix des diamètres du tuyau de l'enrouleur et des conduites d'amenée d'eau à l'entrée de l'enrouleur dépend de la pression disponible à la borne d'irrigation qui dessert l'exploitation, de la topographie des parcelles et de la pression minimale nécessaire au bon fonctionnement du canon de l'enrouleur pour le débit d'équipement nécessaire.

D'autre part, pour assurer une bonne uniformité d'arrosage, la pression de fonctionnement du canon ne doit pas varier de plus de 20 %, de manière à ce que la dose apportée ne varie pas de plus de 10 % (règle de Christiansen).

En conséquence, il est nécessaire de calculer, pour le débit d'équipement et pour les deux points de fonctionnement (le plus défavorisé et le moins défavorisé), les pressions de fonctionnement maximale $P_{c\max}$ et minimale $P_{c\min}$ au canon. Si la pression maximale ($P_{c\max}$) s'écarte de plus de 20 % de la pression minimale ($P_{c\min}$), on installe à l'amont immédiat du canon un régulateur de pression aval taré entre $P_{c\min}$ et $1,2 P_{c\min}$.

Dans le calcul de la pression P_c du canon, on prendra en compte :

- la pression à la borne d'irrigation (supposée constante) P ;
- les pertes de charge dans les conduites d'amenée J_1 ;
- les pertes de charge dans le raccordement et le moteur hydraulique de l'enrouleur J_2 ;
- les pertes de charge dans le tuyau flexible de l'enrouleur J_3 ;
- les dénivelées éventuelles entre la borne d'irrigation et les points de fonctionnement le plus défavorisé et le moins défavorisé de la parcelle ΔH :

$$P_c = P - J_1 - J_2 - J_3 \pm \Delta H$$

Pression nécessaire au canon P_c

Le graphique de la figure 4.9 indique les plages de pressions P_c conseillées pour les canons les plus courants, en fonction des débits des canons.

Pertes de charge dans les conduites d'amenée J_1

Les pertes de charge dans les conduites d'amenée sont également déterminées à l'aide de formules ou d'abaques appropriés à la nature des tuyaux (aluminium ou polyéthylène, voir section « Pertes de charge dans les conduites sous pression », p. 76).

Pertes de charge à l'entrée de l'enrouleur J_2

On peut estimer la perte de charge minimale dans l'ensemble de raccordement et du moteur hydraulique du canon à 0,5 bar pour les enrouleurs à vérin et à 1 bar pour les enrouleurs à turbine.

Pertes de charge dans le flexible de l'enrouleur J_3

La figure 4.12 indique la valeur des pertes de charge pour 100 m de tuyau flexible en polyéthylène en fonction du débit, pour les diamètres les plus courants sur les enrouleurs.

Détermination des pertes de charge par abaques pour les cas standards

Des ensembles d'abaques correspondant aux dix modèles d'enrouleurs les plus répandus ont été établis pour faciliter la détermination des pertes de charge dans les divers éléments de l'équipement.

Chaque ensemble d'abaques (figures 4.13 à 4.22) correspondant à un modèle d'enrouleur donné indique :

- les pertes de charge dans les conduites d'amenée en alliage d'aluminium pour 2 ou 3 diamètres usuels et pour différentes longueurs ;
- la perte de charge dans le tuyau en polyéthylène haute densité, série 8 bars, pour différentes longueurs ;
- le débit en fonction de la pression des différentes buses coniques susceptible d'équiper le canon, avec leur plage d'utilisation conseillée ;
- la portée du jet des buses en fonction de la pression.

Perte de charge
en bar pour 100m

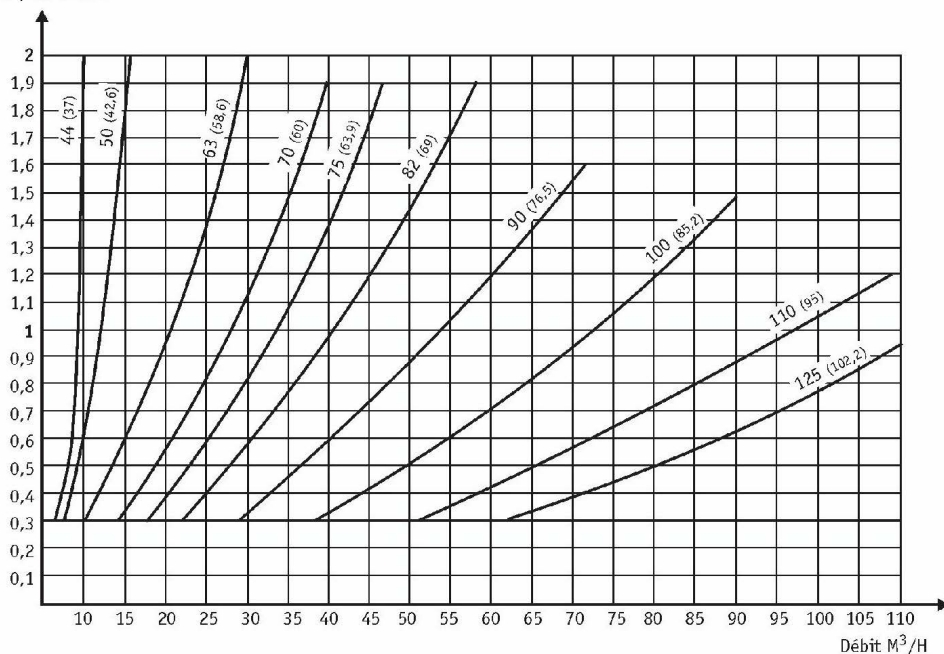


Figure 4.12. Pertes de charge dans les flexibles en polyéthylène des enrouleurs (série 8 bars) (source : Cemagref/BCM).



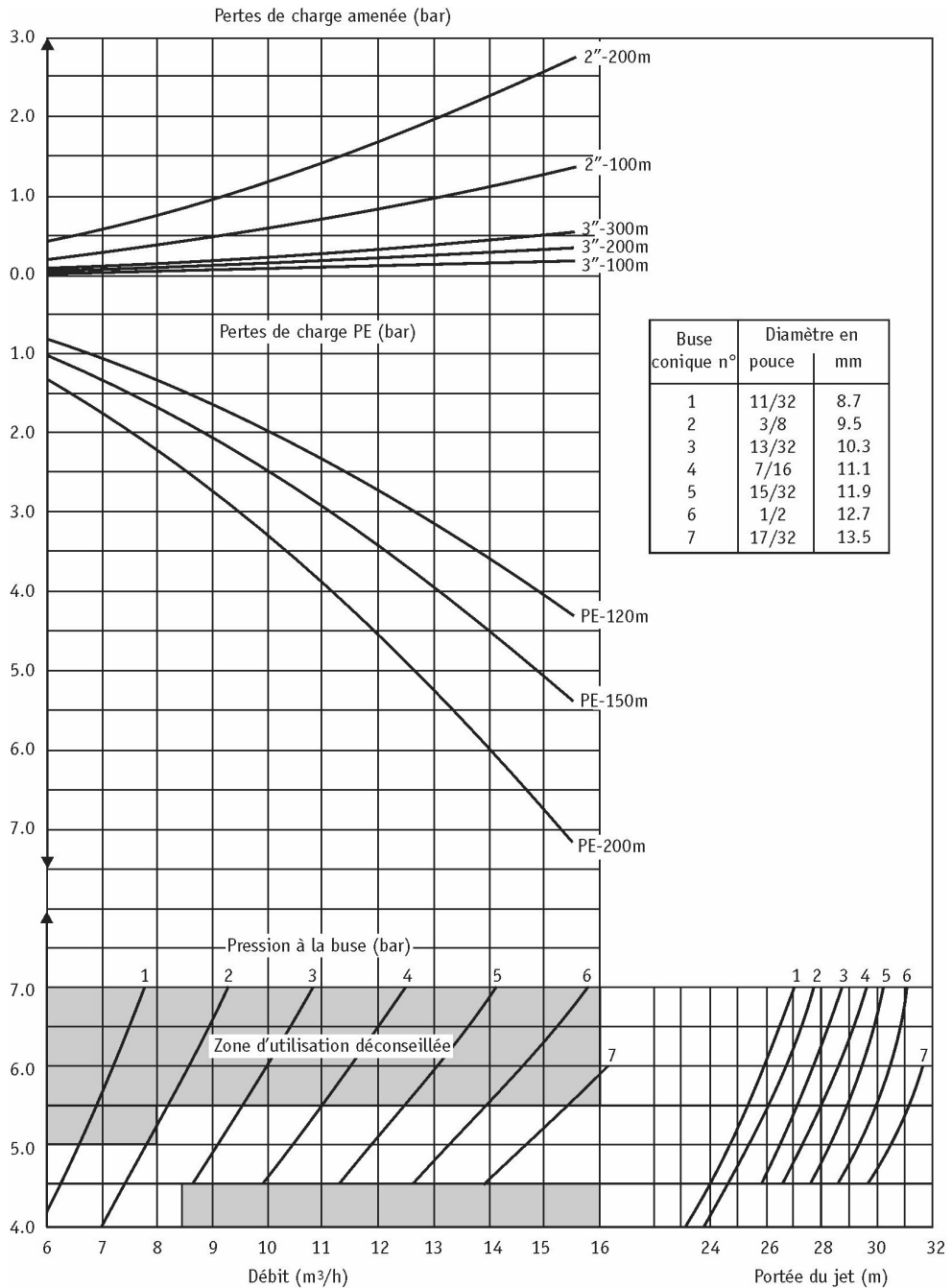


Figure 4.13. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 44.

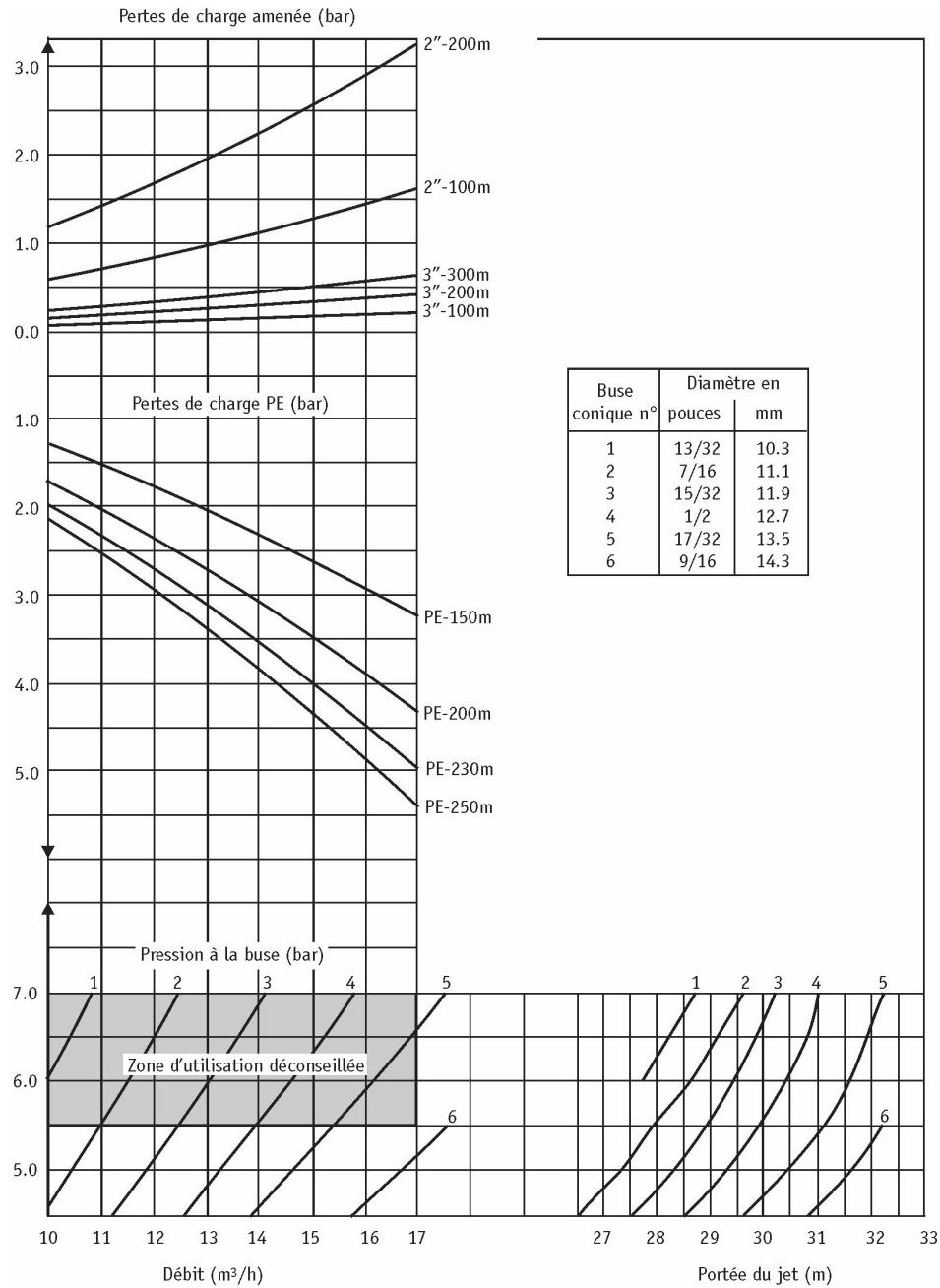


Figure 4.14. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 50.

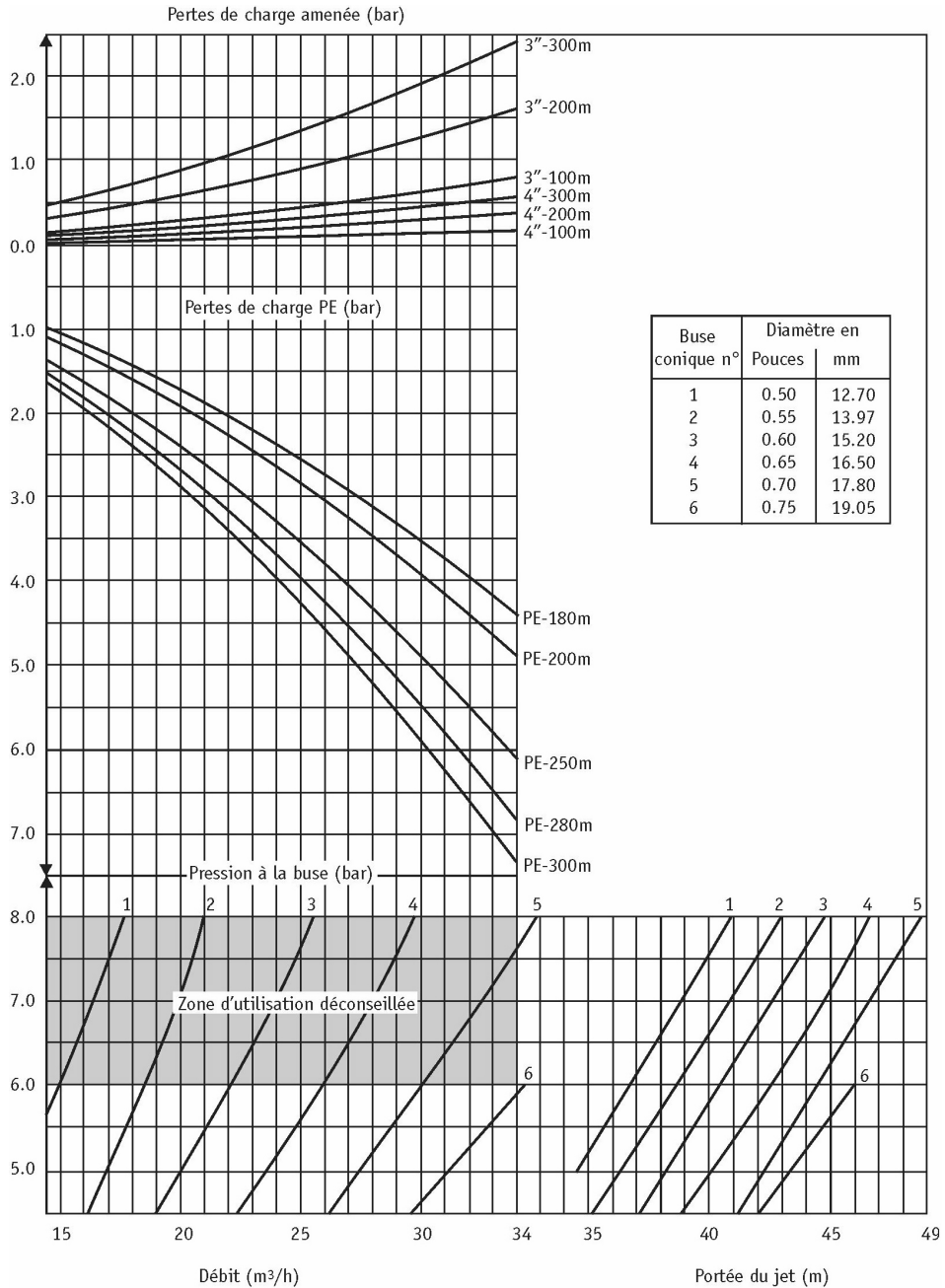


Figure 4.15. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 63.

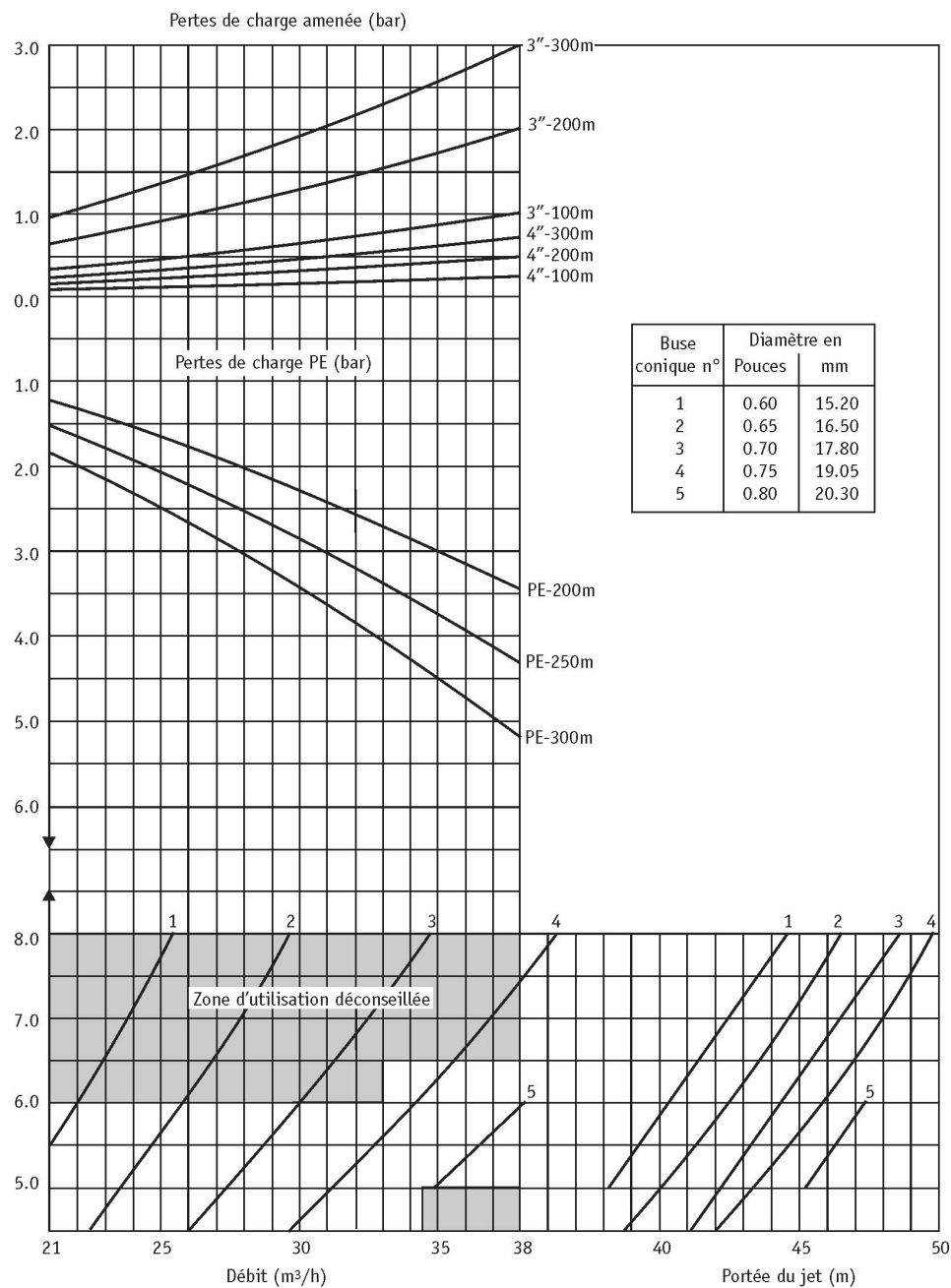


Figure 4.16. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 70.

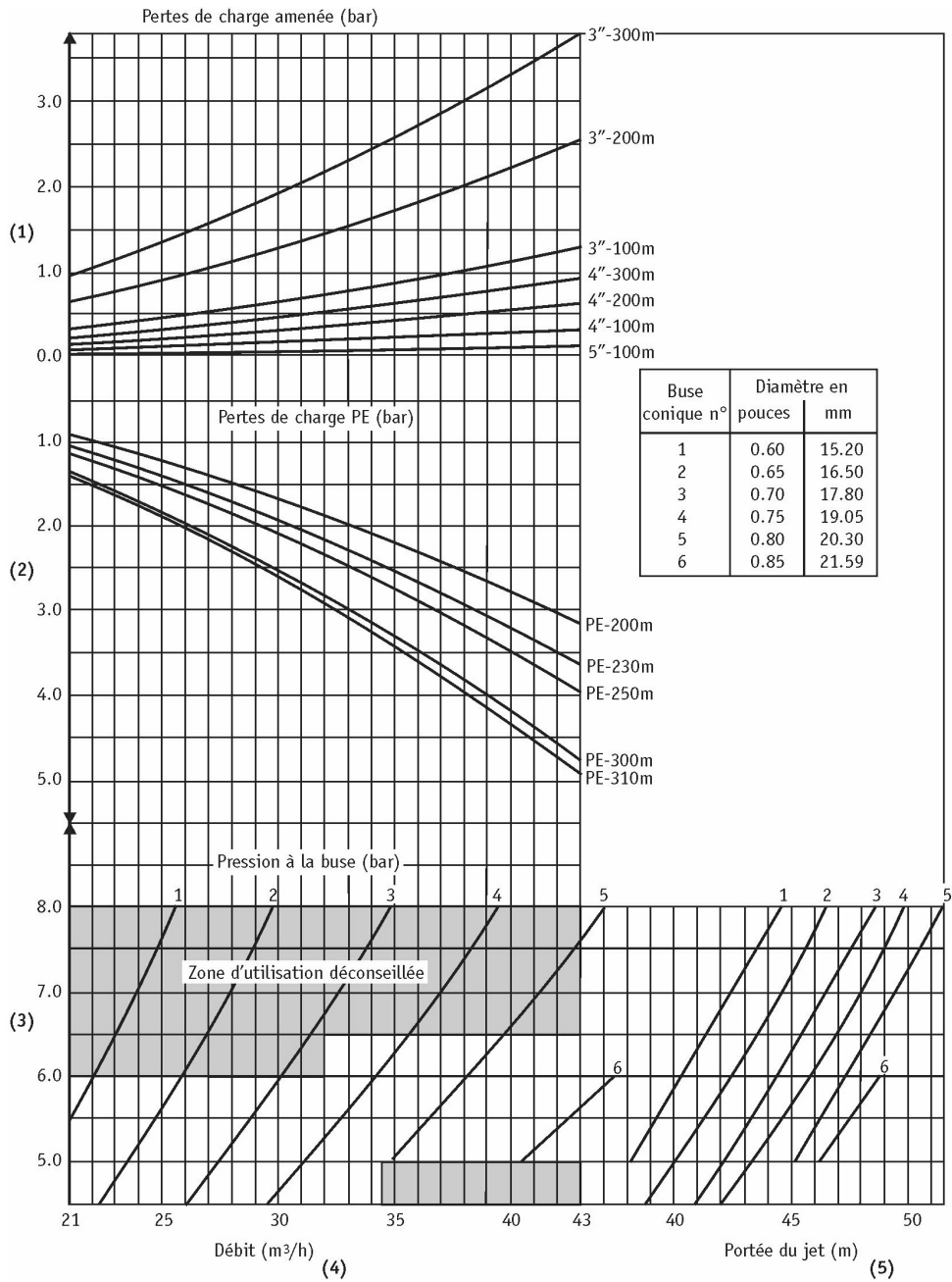


Figure 4.17. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 75.

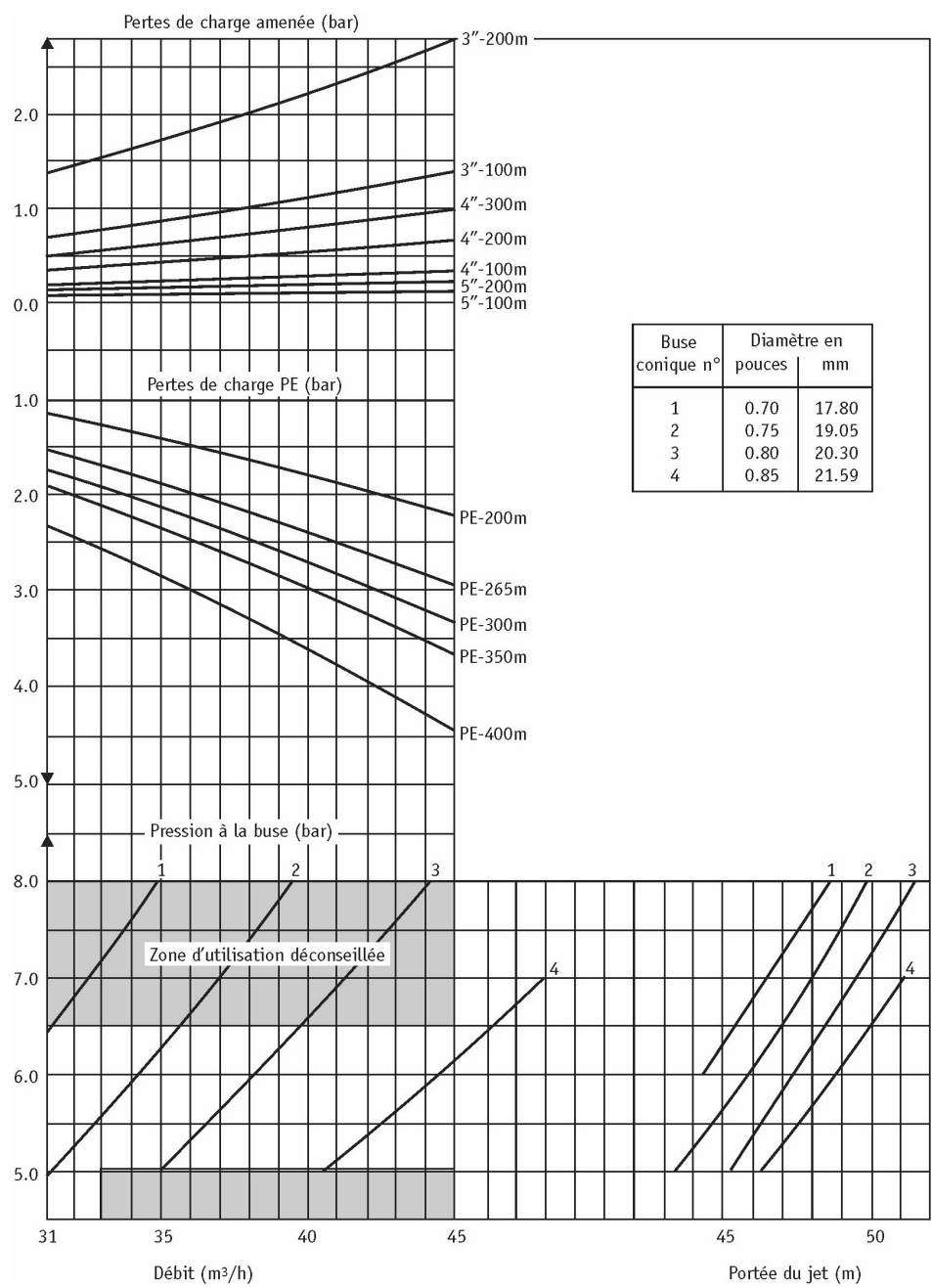


Figure 4.18. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 82.

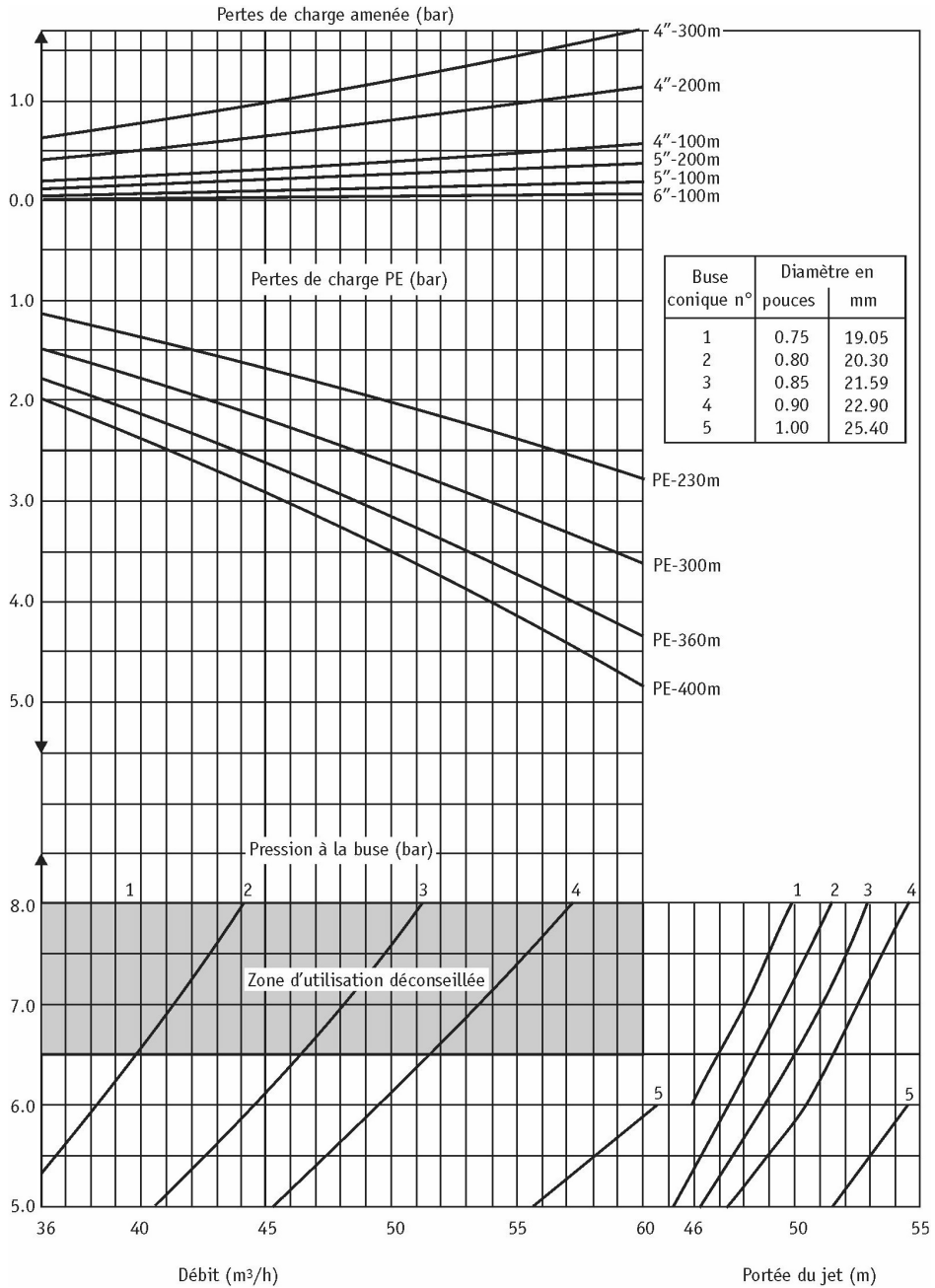


Figure 4.19. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 90.

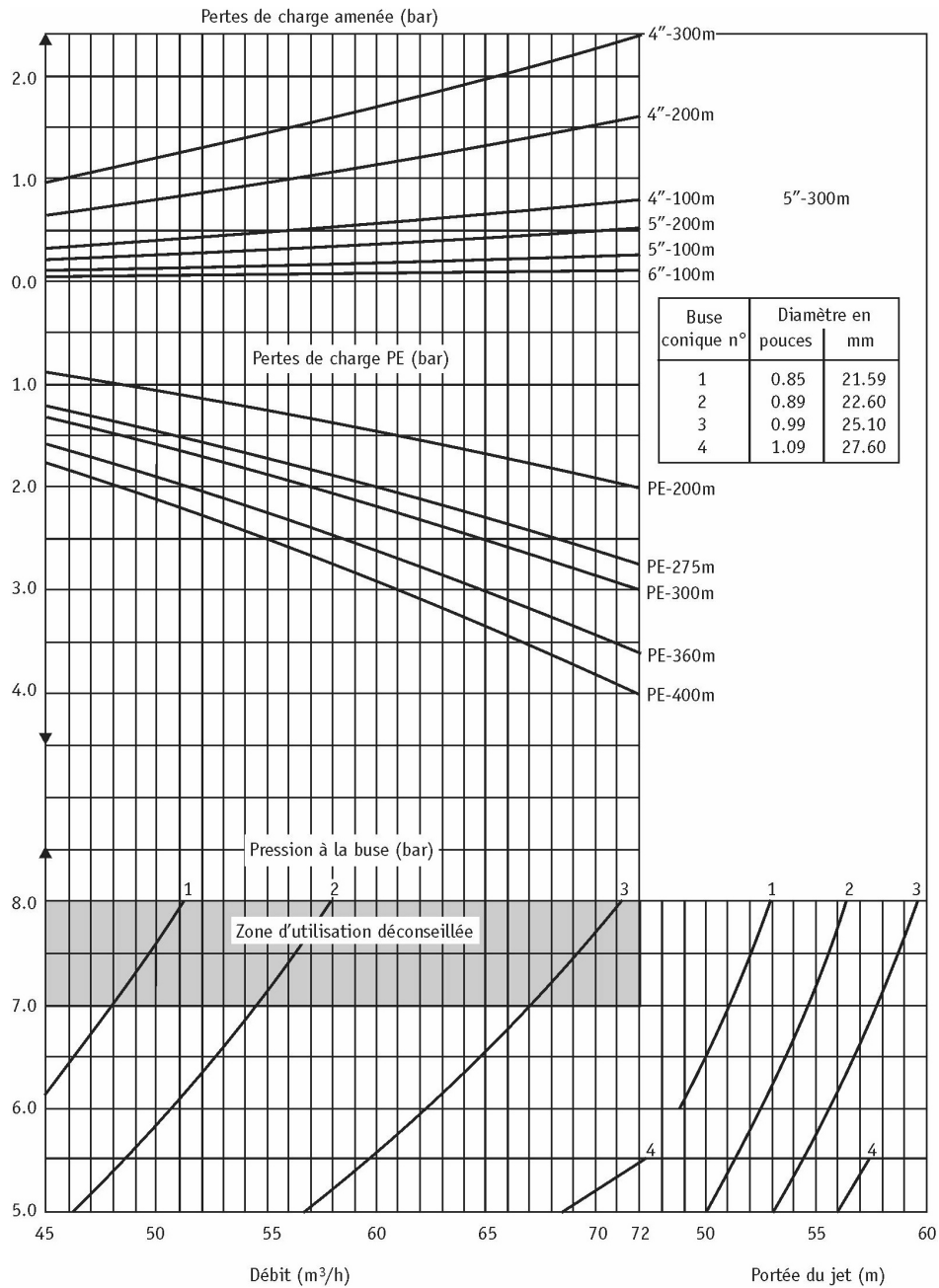


Figure 4.20. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 100.

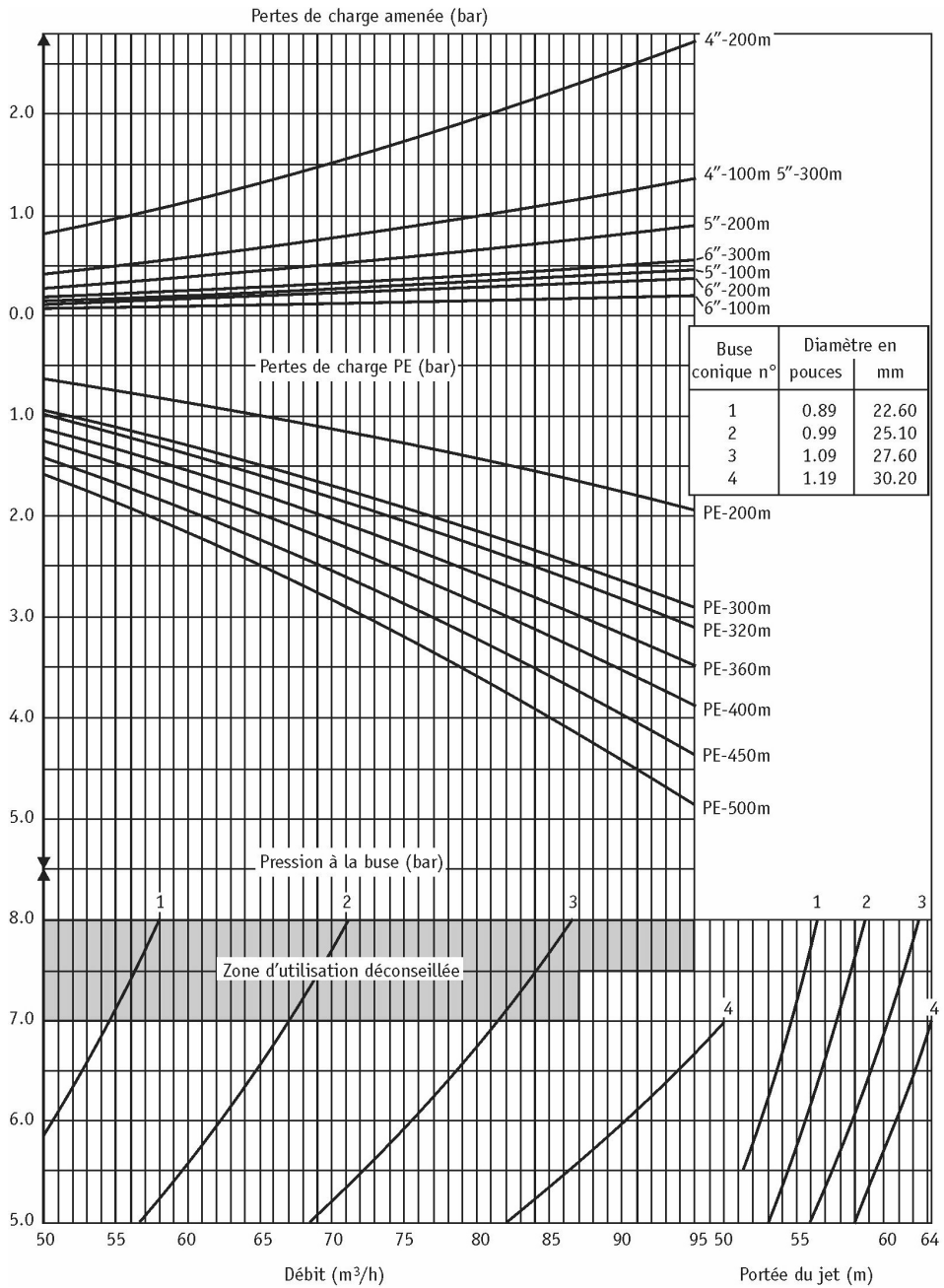


Figure 4.21. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 110.

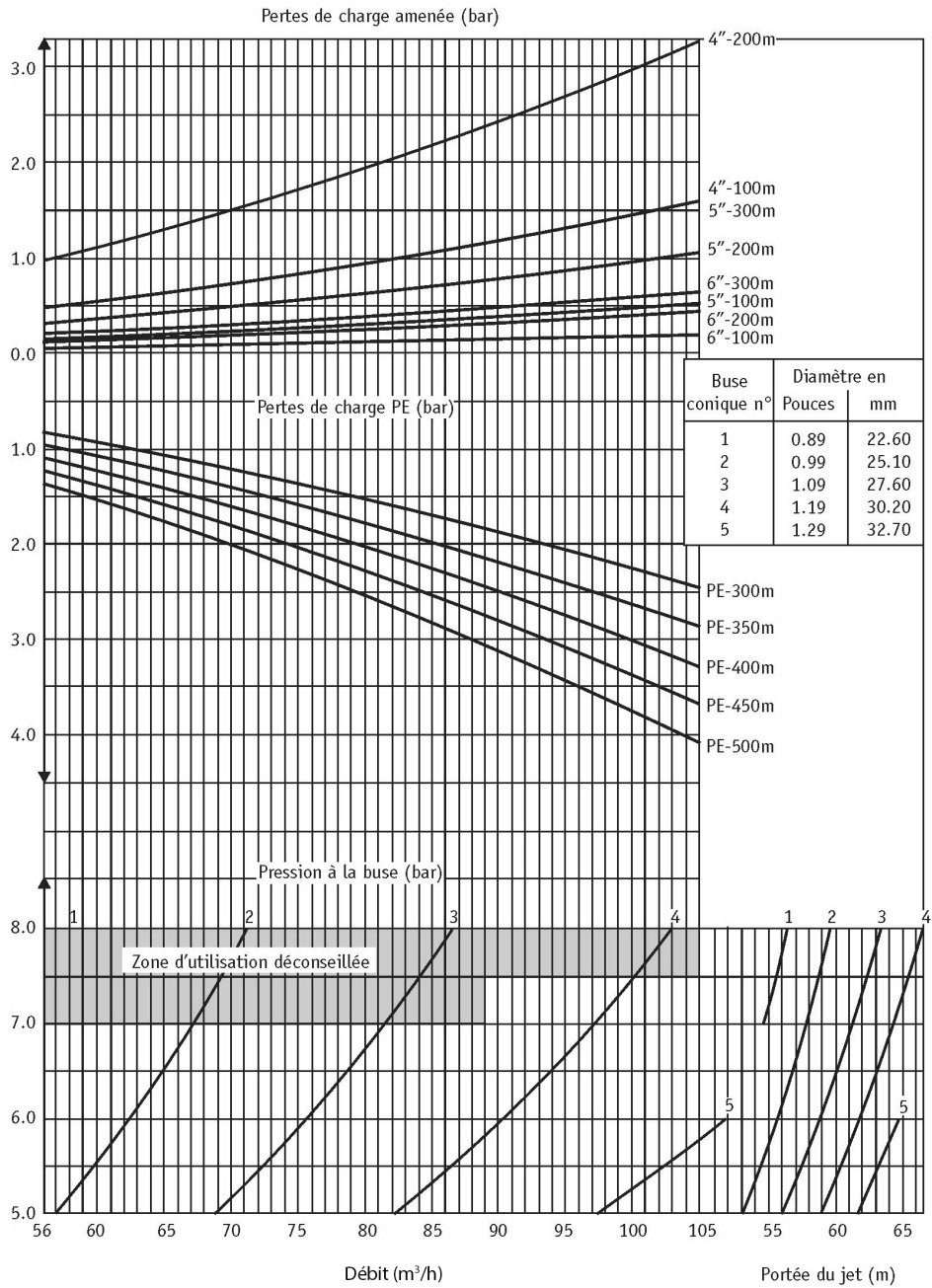


Figure 4.22. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 125.

Exemple

Un agriculteur doit irriguer au moyen d'un enrouleur les parcelles I et II schématisées sur le plan de la figure 4.23.

Les deux parcelles sont desservies par une borne, située à l'un des coins de la parcelle I à la cote 94 m, et dont le débit, sous 10 bars correspond au débit d'équipement des deux parcelles, soit 40 m³/h.

Le sens de culture est parallèle au plus grand côté de chaque parcelle, de longueur 500 m pour la parcelle I et 300 m pour la parcelle II.

Longueur de tuyau PE de l'enrouleur

Les bandes irriguées doivent être disposées parallèlement au sens de culture, soit, pour la parcelle I, selon le côté de 500 m de longueur, et pour la parcelle II, selon le côté de 300 m de longueur. La longueur maximale du tube PE d'un enrouleur ne dépassant pas 400 m, une conduite d'amenée sera installée à l'intérieur de la parcelle I de manière à arroser des bandes de 250 m de longueur disposées de part et d'autre de la conduite.

Il en résulte que la longueur maximale de bande est ramenée à 300 m (parcelle II). L'enrouleur choisi sera donc équipé d'un tube PE de 300 m de long.

Localisation des deux points de fonctionnement extrêmes du canon

Point de fonctionnement le plus défavorisé (pression la plus faible, $P_{c,min}$)

Compte tenu de la cote et de la situation de la borne par rapport aux deux parcelles à irriguer, la bande la plus défavorisée au plan de la pression est la bande 1 de la parcelle I à la fois la plus éloignée de la borne (conduite d'amenée de longueur L_1 égale à 300 m) et située dans la zone la plus haute des deux parcelles. Le point le plus défavorisé étant le point 1 situé au point haut de la bande (cote 100, figure 4.23).

Point de fonctionnement le moins défavorisé (pression la plus forte, $P_{c,max}$)

La bande la moins défavorisée n'est pas facile à localiser. En effet, c'est soit la bande 2 de la parcelle II la plus éloignée de la borne, mais située dans la zone la plus basse des deux parcelles, soit la bande 2' la plus près de la borne mais située dans la zone la plus haute de la parcelle II, soit la bande 2'' de la parcelle I jouxtant la borne. Quant au point le moins défavorisé, ce sera le point 2, 2' ou 2'' situé respectivement au point bas de chacune de ces 3 bandes :

- point 2 : cote 84 m, conduite d'amenée $L_2 = 500$ m environ ;
- point 2' : cote 86 m, conduite d'amenée $L_2' = 300$ m ;
- point 2'' : cote 95 m, conduite d'amenée $L_2'' = 40$ m environ.

Le calcul de la pression de fonctionnement maximale du canon sera fait pour les 3 points, une fois connu le diamètre de la conduite d'amenée déterminé lors du calcul de la pression de fonctionnement minimale du canon au point 1 le plus défavorisé.

Dimensionnement de la conduite d'amenée de l'enrouleur et de la buse du canon

Le débit d'équipement de 40 m³/h apparaît sur la plage de débit des abaques de trois enrouleurs : 75, 82 et 90 mm. On va donc vérifier, en commençant par le plus petit, si, pour ce débit d'équipement, la pression au canon est suffisante pour le point de fonctionnement le plus défavorisé : le point 1 localisé ci-dessus.

La pression disponible au canon au point 1 le plus défavorisé et pour le débit d'équipement est égale à : la pression à la borne (10 bars) – les pertes de charge (P_{dC}) dans la conduite d'amenée (de longueur $L_1 = 300$ m), dans le tuyau PE (longueur 300 m), dans le tuyau souple de raccordement et dans l'enrouleur*, + ou – la dénivelée** entre la borne et le point 1.

* La perte de charge dans le tuyau souple de raccordement et l'enrouleur est estimée à :

- 1 bar pour les enrouleurs à turbine ;
- 0,5 bar pour les enrouleurs à vérin, quel que soit le débit.

** La dénivelée est comptée positivement (+) si le point 1 est situé au-dessous du niveau de la borne et négativement (–) dans le cas contraire.

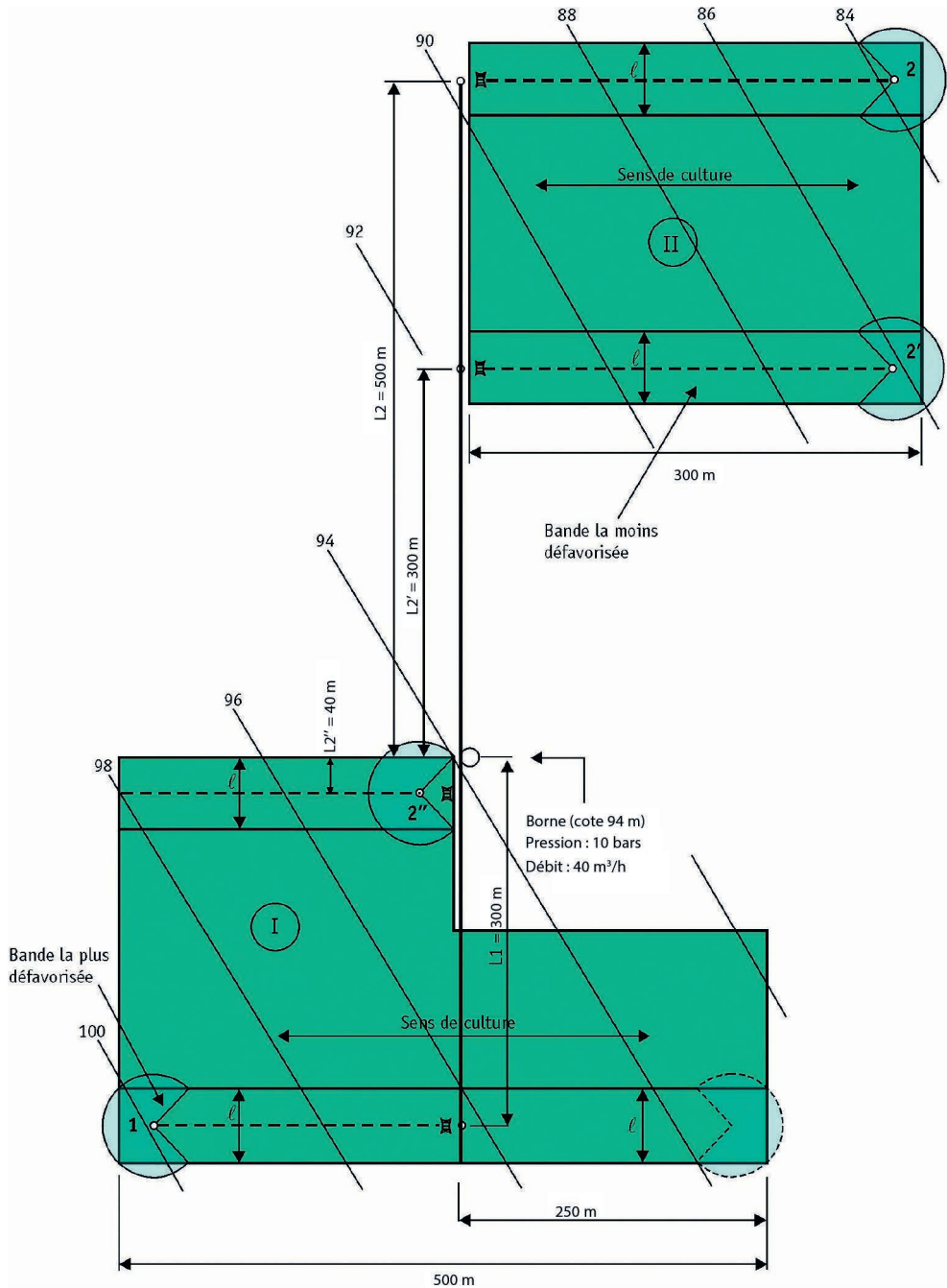


Figure 4.23. Parcelles I et II à équiper d'une installation d'irrigation par enrouleur.

Nous aurons donc à 40 m³/h, en nous reportant à l'abaque de l'enrouleur 75 (figure 4.17) :

Pression à la borne	10,0 bars
PdC conduite d'amenée (L1 = 300 m)	
ϕ 3"	– 3,3 bars
ou ϕ 4"	ou – 0,8 bar
PdC souple et enrouleur à vérin	– 0,5 bar
PdC tube PE (300 m)	– 4,2 bars
Dénivelée borne-point 1 (94-100)	– 0,6 bar*
Pression disponible au point 1	
avec amenée en 3"	1,4 bar
avec amenée en 4"	3,9 bars

* 10,197 m de colonne d'eau CE = 1 bar, donc 1 m CE # 0,1 bar.

Ces deux pressions étant inférieures l'une et l'autre à la pression minimale requise à la buse (5 bars), on en conclut que l'enrouleur 75 ne convient pas. On recommence le calcul avec l'enrouleur de diamètre immédiatement au-dessus.

Enrouleur 82

À 40 m³/h, en nous reportant à l'abaque de l'enrouleur 82 (figure 4.18), nous aurons :

Pression à la borne	10,0 bars
PdC conduite d'amenée (L1 = 300 m)	
3" (égale à 3 fois la PdC dans 100 m de 3" : $3 \times 1,1$)	– 3,3 bars
ou ϕ 4"	ou – 0,8 bar
PdC souple et enrouleur à vérin	– 0,5 bar
PdC tube PE (300 m)	– 2,7 bars
Dénivelée borne-point (94-100)	– 0,6 bar
Pression disponible au point 1	
avec amenée en 3"	2,9 bars
avec amenée en 4"	5,4 bars (point A)

Seule une amenée en 4" permet d'avoir une pression disponible au canon supérieure à la pression minimale requise à la buse (5 bars). Ce diamètre sera donc adopté dans les calculs qui vont suivre.

Le point A, d'abscisse 40 m³/h et d'ordonnée 5,4 bars, ne se trouvant pas sur une courbe débit pression d'un diamètre de buse (figure 4.24), le calcul précédent sera refait pour un débit légèrement supérieur au débit d'équipement, 42 m³/h par exemple (point M). À ce débit, nous aurons :

Pression à la borne	10,0 bars
PdC conduite d'amenée 4" (L1 = 300 m)	– 0,9 bar
PdC souple et enrouleur à vérin	– 0,5 bar
PdC tube PE (300 m)	– 3,0 bars
Dénivelée borne-point	– 0,6 bar
Pression disponible au point 1	5,0 bars (point B)

On porte sur l'abaque (figure 4.24) le point B d'abscisse 42 m³/h et d'ordonnée 5,0 bars. Le segment AB coupe la courbe débit-pression de la buse n° 4 en un point M (débit Q_{min} = 41,0 m³/h, pression P_{c min} = 5,15 bars) qui définit les conditions de fonctionnement minimales de l'enrouleur 82, équipé de la buse n° 4, au point 1 le plus défavorisé.

Le même calcul sera repris pour le point 2 le moins défavorisé des deux parcelles, localisé soit en 2, soit en 2', soit en 2". À 42 m³/h, en nous reportant au même abaque, nous aurons les résultats présentés en tableau 4.10.

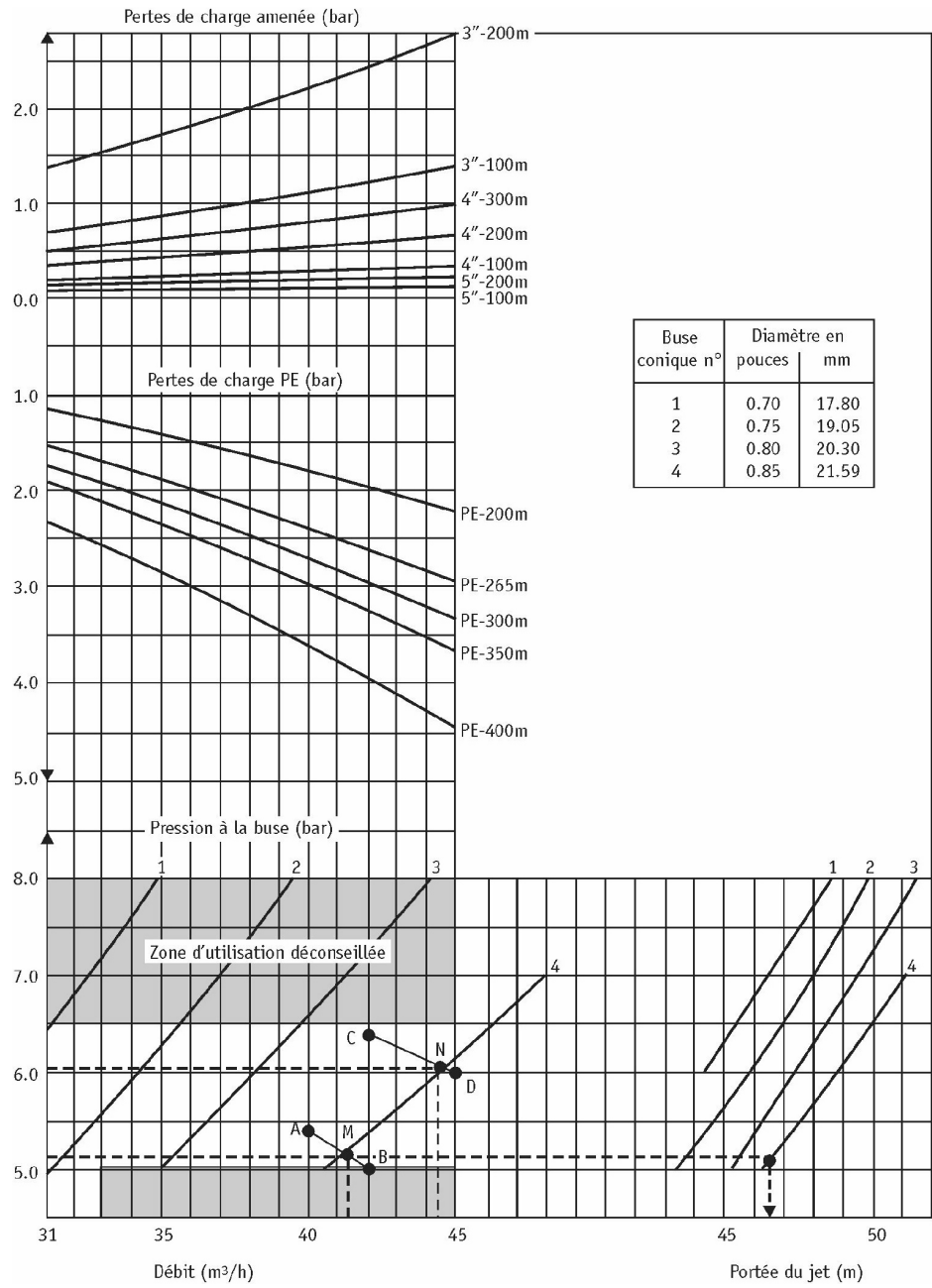


Figure 4.24. Abaques servant au dimensionnement d'un enrouleur 82.

Tableau 4.10. Pression disponible au niveau du canon de l'enrouleur.

	Point		
	2	2'	2''
Pression à la borne	10,0	10,0	10,0
PdC conduite d'amenée $\Phi = 4''$			
longueur L2 = 500 m (la perte de charge est 5 fois celle dans 100 m de conduite) $5 \times 0,3 = 1,5$ bar	- 1,5		
longueur L2' = 300 m $2 \times 0,3 = 0,9$		- 0,9	
longueur L2'' = 40 m $0,4 \times 0,3 = 0,12$ bar			- 0,1
PdC souple et enrouleur à vérin	- 0,5	- 0,5	- 0,5
PdC tube PE (300 m)	- 3,0	- 3,0	- 3,0
Dénivelée borne-point 2 (94-84)	1,0		
Dénivelée borne-point 2' (94-86)		0,8	
Dénivelée borne-point 2'' (94-95)			- 0,1
Pression disponible en bars (PtC)	6,0	6,4	6,3

Finalement, il s'avère, après calcul, que c'est le point 2' qui est le point le moins défavorisé des deux parcelles.

On reporte sur l'abaque le point C, d'abscisse $42 \text{ m}^3/\text{h}$ et d'ordonnée 6,4 bars. Ce point ne se trouvant pas sur la courbe débit-pression de la buse n° 4, on refait le même calcul pour un débit supérieur, $45 \text{ m}^3/\text{h}$ par exemple.

On a alors, en nous reportant au même abaque :

Pression à la borne	10,0 bars
PdC conduite d'amenée $\Phi 4''$ (L2' = 300 m)	- 1,0 bar
PdC souple et enrouleur à vérin	- 0,5 bar
PdC tube PE (300 m)	- 3,3 bars
Dénivelée borne-point 2'	+ 0,8 bar
<hr/>	
Pression disponible au point 2'	6,0 bars (point D)

On porte sur l'abaque le point D, d'abscisse $45 \text{ m}^3/\text{h}$ et d'ordonnée 6,0 bars. Le segment CD coupe la courbe débit/pression de la buse n° 4 en un point N (débit $Q_{\text{max}} = 44,5 \text{ m}^3/\text{h}$, pression $P_{\text{cmax}} = 6,05$ bars) qui définit les conditions de fonctionnement maximales de l'enrouleur 82 équipé de la buse n° 4 au point 2' le moins défavorisé.

Par conséquent, une conduite d'amenée en $4''$ et un enrouleur 82 (à vérin), équipé de 300 m de tube PE et d'un canon avec une buse conique de diamètre 21,59 mm, constituent l'installation d'arrosage par enrouleur la plus économique (compte tenu de la pression dont on dispose à la borne), capable d'apporter le débit d'équipement de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ à l'ensemble des deux parcelles I et II.

Le débit calculé d'un tel enrouleur variera de $Q_{\text{min}} 41,0 \text{ m}^3/\text{h}$ à $Q_{\text{max}} 44,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

La variation du débit est : $[(Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}})/Q_{\text{min}}] \times 100 = + 8,5 \%$.

La règle de Christiansen, qui autorise une variation de débit de l'enrouleur de 10 %, est ici respectée. Point n'est besoin d'installer à l'amont immédiat du canon un régulateur de pression.

Réglage et contrôle au champ

Pour obtenir une qualité d'irrigation satisfaisante, il faut non seulement que les équipements soient bien conçus, mais encore qu'ils soient réglés et utilisés correctement. Les éléments ci-après sont destinés à guider l'irriguant pour le réglage et le contrôle du fonctionnement d'un enrouleur.

Intervalles de passage du canon

Les intervalles E entre les axes de passage du canon (largeur de bande ; figure 4.8) doivent être définis en fonction de la portée du canon et de l'importance du vent dans la région, de façon à obtenir une répartition suffisamment homogène de l'eau sur la bande arrosée.

Le tableau 4.11 présente les largeurs de bande conseillées pour différentes vitesses de vent.

Tableau 4.11. Largeur de la bande irriguée par l'enrouleur selon la vitesse du vent.

Importance du vent	Largeur de bande
Jusqu'à 10 km/h (échelle de Beaufort 2 – légère brise : les feuilles frémissent)	1,6 p*
Jusqu'à 20 km/h (échelle de Beaufort 3 – petite brise : feuilles et petites branches constamment agitées)	1,5 p*
Jusqu'à 30 km/h (échelle de Beaufort 4 – jolie brise : le vent soulève la poussière et les feuilles de papier)	1,4 p*
Au-delà de 30 km/h	Arrêt de l'arrosage

* p = portée du jet du canon en mètres.

Dans l'exemple pratique traité précédemment, l'abaque donne la portée du jet de la buse n° 4 choisie, pour les conditions minimales de fonctionnement de l'enrouleur ($P_{c\ min} = 5,15$ bars, $Q_{min} = 41,0$ m³/h). À 5,15 bars la portée du jet de la buse n° 4 est d'environ 47 m. Ce qui nous donne, si le vent ne dépasse pas 10 km/h, une largeur de bande conseillée E de :

$$1,6 \times 47 = 75,2 \text{ m}$$

qu'on arrondira au multiple de 9 m immédiatement inférieur (la conduite d'amenée étant constituée d'éléments de tube de 9 m), soit :

$$E = 72 \text{ m}$$

Une fois E déterminée, on peut découper en bandes contiguës les parcelles I et II.

Vitesse d'avancement du canon

La vitesse d'avancement (V) du canon doit être déterminée en fonction de la dose d'irrigation à apporter (D) à chaque passage de l'enrouleur, du débit horaire de celui-ci et de la largeur des bandes arrosées (E).

La vitesse à adopter (V) est donnée par la relation :

$$V = (1\,000 \times Q) / (D \times E)$$

où V = vitesse d'avancement en m/h ; Q = débit du canon en m³/h ; D = dose d'irrigation en mm et E = largeur de bande en m.

Exemple

Dans le cas de l'exemple ci-dessus, pour apporter une dose de 60 mm, avec un débit moyen de 43 m³/h, la vitesse d'avancement du canon devra être de :

$$V = (1\,000 \times 43) / (60 \times 72) = 10 \text{ m/h (valeur arrondie)}$$

La vitesse ainsi calculée, il convient d'effectuer le réglage correspondant selon les indications de la notice de l'enrouleur, puis de vérifier que le canon avance effectivement à la vitesse choisie.

Un moyen pratique pour effectuer cette vérification consiste à dérouler un multimètre à ruban (figure 4.25) le long du flexible déroulé et à relever, à partir d'une marque faite sur celui-ci, la

distance parcourue par le flexible en six minutes. La vitesse horaire d'avancement est égale à dix fois cette valeur. Par exemple, si la distance parcourue en six minutes est de 1,25 m, le canon avance de 12,5 m/h.

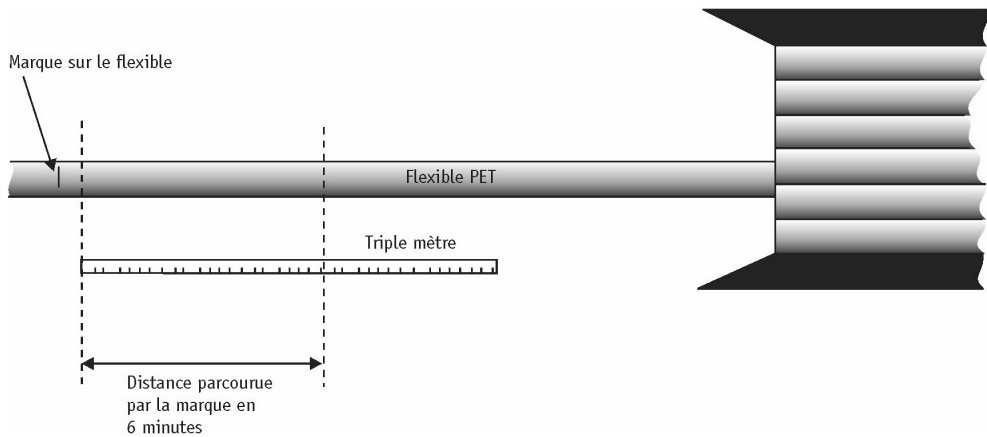


Figure 4.25. Contrôle de la vitesse d'avancement de l'enrouleur.

Régulation de la vitesse d'avancement

La vitesse d'avancement du canon doit être régulière au cours d'un enroulement complet du flexible.

Pour le vérifier, il convient de contrôler la vitesse au cours d'un même enroulement, au moins une fois par rangée de spires ; ceci représente 4 à 5 mesures.

Si l'écart entre la vitesse maximum et la vitesse minimum mesurées n'excède pas 15 %, on peut considérer que la régulation fonctionne de façon satisfaisante. Si cet écart excède 15 %, il convient de régler le système de régulation.

Balayage du canon

L'angle du secteur balayé par le canon doit être compris entre 200° et 220° , quelle que soit la largeur de la bande arrosée (figure 4.26).

Les deux demi-secteurs balayés doivent être symétriques par rapport à l'axe de déplacement du canon. Toutefois, le canon peut fonctionner sur un demi-secteur pour arroser une bande de demi-largeur si la forme du parcellaire l'exige. La vitesse du canon doit alors être deux fois plus grande que pour l'arrosage d'une bande normale.

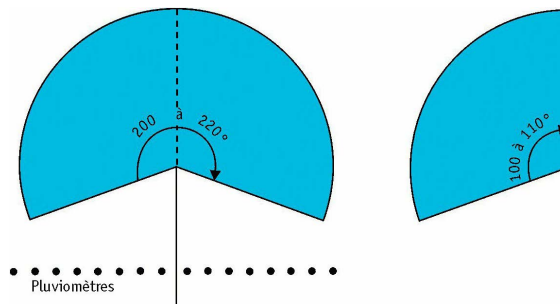


Figure 4.26. Angle du secteur arrosé assurant une bonne répartition de l'irrigation.

Le temps de balayage d'un secteur doit être voisin d'une minute (réglage de la cuillère et de son frein).

Le nombre de battements de la cuillère motrice du canon pour le balayage d'un secteur doit être d'une vingtaine environ (équilibre du bras portant la cuillère motrice).

Diagnostic de fonctionnement d'un enrouleur au champ

L'objectif recherché est d'obtenir sur l'ensemble de la parcelle arrosée une dose d'irrigation aussi homogène que possible. Outre la qualité du choix de l'enrouleur et du dimensionnement des équipements, il convient de vérifier que l'installation fonctionne bien dans les conditions prévues et que l'enrouleur est réglé correctement. Pour cela, un protocole de contrôle et des fiches de diagnostic ont été établis, comme pour les couvertures intégrales d'asperseurs. Ils sont présentés en annexe 2 (p. 188).

Le pivot (rampe pivotante)



Pivot arrosant du blé en Algérie, 2018 (© Arvalis/S. Gendre).

Le pivot, également appelé rampe pivotante, est un appareil d'irrigation mobile, arrosant en rotation une surface circulaire ou semi-circulaire. Il est en général à poste fixe, mais il peut être conçu pour être déplacé d'un poste à l'autre.

L'irrigation par rampe d'arrosage (pivot ou rampe frontale), inventée aux États-Unis vers la fin des années 1940, a débuté en France au cours des années 1960. Convenant bien à l'irrigation des grandes surfaces, le pivot s'est d'abord développé dans les zones plates des Landes, sur des parcelles de grande taille (jusqu'à 200 ha). Il se développe de plus en plus dans des zones où son utilisation semblait moins évidente, sur des parcelles plus petites (solutions déplaçables, épandages de fertilisants et pesticides) et dont la pente peut atteindre localement 15 %.

L'intérêt essentiel de ce type de matériel est sa simplicité de mise en œuvre, ses possibilités de fonctionnement automatique et ses performances en termes d'uniformité d'apport d'eau, y compris en conditions ventées.

Le fonctionnement électrique du pivot et la présence d'un canon d'extrémité offrent une certaine souplesse d'utilisation, et permettent d'arroser des parcellaires de forme non circulaire (figure 4.27).

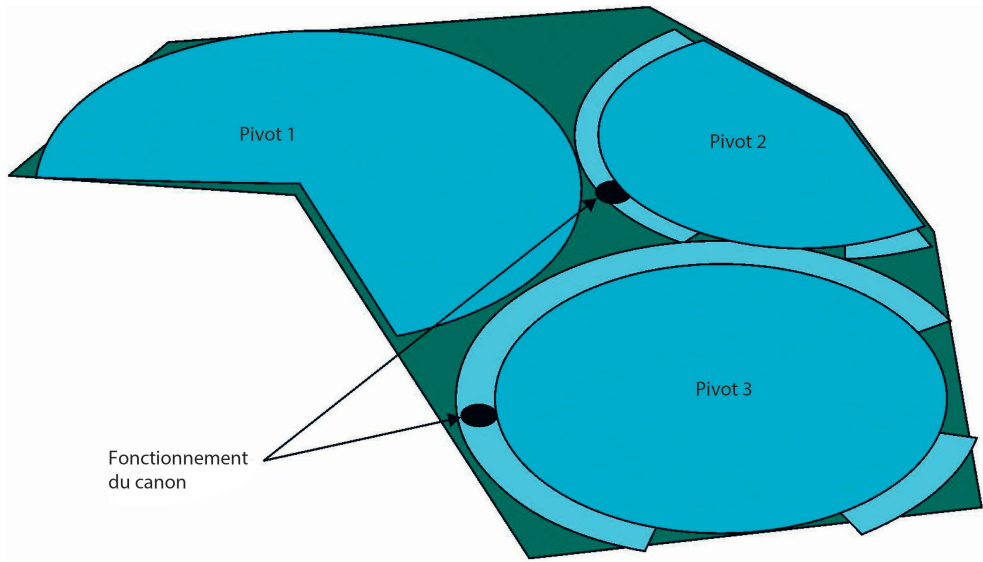


Figure 4.27. Disposition possible d'une couverture par pivot sur une parcelle de forme quelconque.

Principe de l'irrigation par pivot

Le pivot est constitué par une canalisation de grande longueur, tournant autour d'un axe, ou pivot, par lequel se fait l'arrivée d'eau et d'électricité.

La canalisation est portée, de proche en proche, par des tours équipées de roues, animées par des moteurs électriques. Les tours séparent l'appareil en travées rigidifiées par un système de triangulation et de tirants, la canalisation tenant lieu de poutre (figure 4.28).

L'eau est distribuée par des asperseurs ou des buses disposés le long de la canalisation. Un canon d'extrémité, placé au bout du porte-à-faux, complète souvent l'équipement.

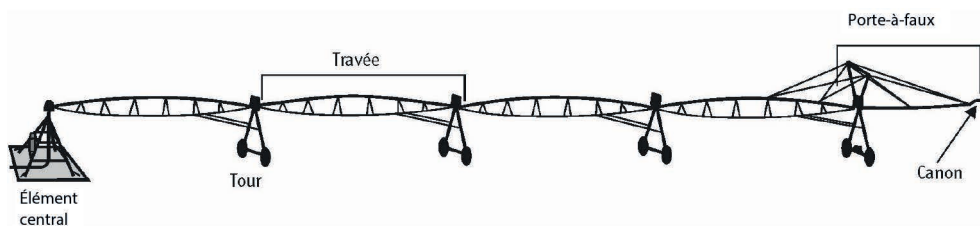


Figure 4.28. Schéma de principe d'un pivot.

Le mouvement de la rampe est discontinu, l'alignement de l'ensemble est commandé au niveau de chaque tour par des contacteurs, sensibles à l'angle formé par deux travées contiguës.

Le réglage de l'avancement se fait par modification du temps de fonctionnement du moteur de la dernière tour, au cours d'un cycle d'une minute.

L'évolution de l'électronique embarquée permet de disposer de pilotes capables de commander l'appareil en fonction de sa position dans la parcelle ou de la connaissance de la demande climatique, pour appliquer des doses variables, ou de l'arrêter en cas de pluie ou de vents trop forts.

Descriptif technique

Caractéristiques générales

L'élément central

Le point où se fait l'arrivée d'eau et d'électricité, l'élément central, est généralement fixé sur une dalle en béton équipée d'ancrages scellés dans des plots dont le volume dépend du type de structure de la machine (figure 4.29).

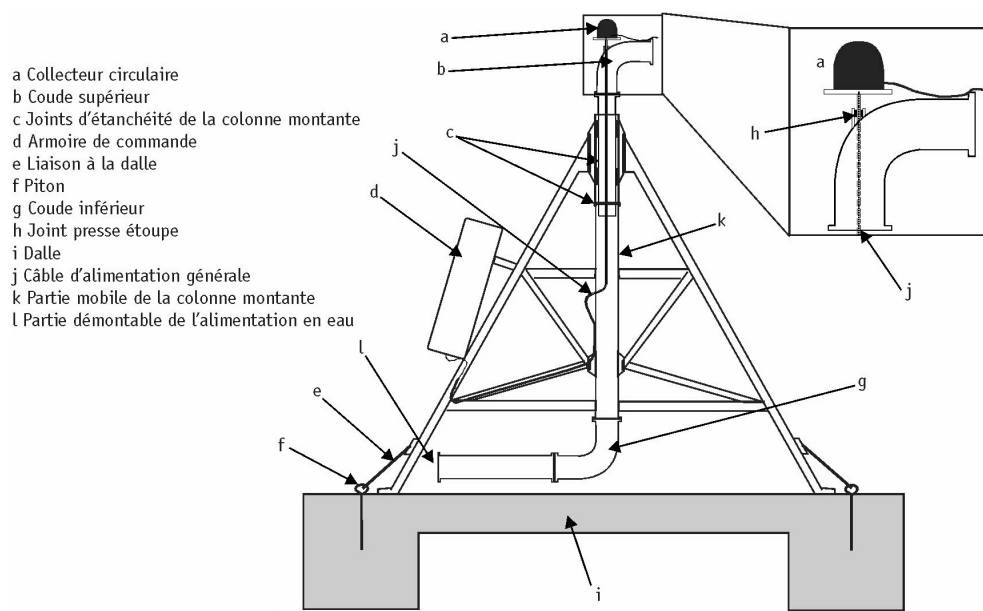


Figure 4.29. L'élément central (appelé aussi axe, ou pivot).

- La dalle doit permettre de résister au couple de retournement exercé par la rampe ; son volume minimum dépend du type de structure²⁰.
- L'eau est amenée à la colonne montante, axe de rotation de l'ensemble.
- L'électricité est distribuée à la machine soit par un collecteur circulaire à balais pour les appareils effectuant une rotation complète, soit par un câble pour un fonctionnement en secteur.

L'utilisation d'un groupe électrogène peut se révéler fort intéressante dans les situations où l'alimentation électrique est déficiente (fluctuations de tension) ou simplement difficile (éloignement des lignes). Il existe également des solutions via l'utilisation de panneaux solaires (photo 4.5).

- On peut trouver sur la colonne divers piquages ou clapets, pour assurer la vidange, poser un manomètre, un débitmètre, injecter des produits divers.
- Lorsque l'appareil est équipé d'un canon d'extrémité à fonctionnement intermittent, la commande de l'électrovanne d'alimentation se fait au niveau de l'élément central.

²⁰ EN909, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, (35), 1980.



Photo 4.5. Pivot solaire la Mirandette, CACG (© Arvalis).

L'alimentation en eau

Plusieurs solutions sont possibles.

- « Gavage » ou alimentation directe : à partir d'un ou plusieurs forages, l'alimentation est directe et ne nécessite pas de pompe de reprise.
- Bâche de reprise (photo 4.6) : l'eau pompée à partir des forages se déverse dans un bassin. Une pompe de reprise alimente le pivot. Cette méthode permet une bonne observation de l'état de fonctionnement des forages. Elle permet en outre une décantation de l'eau (dépôt des sables) ainsi qu'une aération ayant pour effet direct de diminuer la capacité corrosive de l'eau.
- Pompage en rivière ou en retenue ; cela revient à un gavage direct.
- Borne d'un réseau collectif : l'eau arrive sous pression au pied du pivot.



Photo 4.6. Bâche de reprise.

Dans les situations où les risques de dépôt ou d'obstruction existent, et quand la canalisation d'amenée d'eau est enterrée, il est conseillé de prévoir dès la conception une entrée (et une sortie) pour assurer le nettoyage au moyen d'un obus racleur, ou simplement la purge du système.

Lorsque la qualité de l'eau (charge en particules solides) et les diamètres de buses l'imposent, on peut aussi adjoindre un filtre en tête d'installation pour éviter les risques de colmatage. Le type de filtre, la taille des mailles sont à choisir en fonction des impuretés aspirées et du diamètre minimal des buses. L'utilisation d'une bêche de reprise dans ce cas de figure est plus sûre.

Les tours et travées

Les tours supportent la canalisation. Elles sont équipées de roues animées par des moteurs électriques, commandés séquentiellement par des micro-rupteurs assurant l'alignement des travées entre elles. Des dispositifs de motorisation hydraulique à eau ont été proposés dans le passé puis abandonnés. Néanmoins, on peut en trouver pour des installations de petite taille (une travée). On peut également envisager une motorisation à huile dans certaines situations où l'utilisation de l'électricité est difficile.

Les travées sont comprises entre deux tours. Elles sont constituées par une canalisation servant de poutre, et rigidifiées par une structure. D'une longueur de 30 à 65 m, elles laissent un dégagement sous structure de 2,5 m à 3,5 m, pour une hauteur totale de 3,5 m à 5 m. Certains pivots utilisés en arboriculture peuvent laisser un dégagement sous structure de 5,5 m au moins.

Le nombre de travées peut dépasser 15 pour les appareils fixes. Les appareils déplaçables sont en général limités à 4 à 6 travées.

Les dernières travées peuvent être repliables afin d'éviter des obstacles pour des parcelles avec des formes particulières.



Photo 4.7. Tours, travées et porte-à-faux (© Lindsay).

La canalisation est généralement en acier galvanisé. Elle est constituée d'éléments de 6 à 12 m, assemblés entre eux par des brides boulonnées. Son diamètre varie de 114 mm (4,5 pouces) à 254 mm (10 pouces) pour les plus grands appareils. Son épaisseur varie de 2,6 à 4,0 mm suivant la situation (abrasion, corrosion, transport de produits divers). De cette épaisseur dépend la stabilité (résistance à l'affaissement de la travée). Elle peut être revêtue intérieurement (peinture, polyéthylène).

La conduite est équipée de piquages à intervalles réguliers (1 à 3 m) destinés à recevoir les organes d'arrosage.

La liaison hydraulique entre travées est assurée par une gaine souple ou un manchon métallique avec joints.

La *liaison mécanique* entre travées doit être articulée dans le plan vertical (variations de pentes) et dans le plan horizontal (avancement). Elle est en général assurée par un cardan ou une rotule lorsque le terrain est vallonné, ou par un joint caoutchouc lorsque le terrain est plat. Elle permet de tolérer des pentes pouvant aller jusqu'à 15 %.

Des vannes ou clapets de vidange sont placés au point bas de chaque tour.

Le porte-à-faux

L'appareil se termine par une *canalisation haubanée, placée en porte-à-faux* (photo 4.7). D'une longueur pouvant atteindre 24 m, elle est souvent équipée d'un canon d'extrémité. Il est alimenté par un surpresseur si la pression résiduelle l'impose, et fonctionne de manière continue ou intermittente sur secteur défini par la forme de sa courbe de distribution.

La motorisation et l'alignement

La chaîne cinématique

Les moto-réducteurs assurent le déplacement des tours. Ils sont constitués d'un moteur électrique et d'un réducteur. Les moteurs électriques ont une puissance de 0,25 à 3 CV (0,18 à 2,2 kW). Ils sont disposés sur les tours, au milieu de la barre transversale qui relie les roues (photo 4.8), et doivent être isolés conformément aux normes en vigueur (EN909). Le réducteur divise par 20 à 50 la vitesse du moteur.



Photo 4.8. Motorisation d'une tour (© Arvalis).

Entre le moto-réducteur et les roues, différents systèmes (chaînes, cardans) sont utilisés. La transmission par cardan au sortir d'un réducteur se généralise. La protection des cardans est essentielle pour des raisons de sécurité comme pour éviter les enroulements de végétation (EN909). Pour la même raison, les extrémités de la transmission doivent être protégées dans des coupelles.

Les réducteurs de roue divisent par 50 la vitesse de rotation de la transmission. On trouve des réducteurs à vis sans fin, ou à train épicycloïde, qui nécessitent un frein. Ces derniers tendent à se généraliser car ils sont moins exigeants en énergie et plus robustes. Ils doivent être équipés d'un orifice de vidange et être vidangés périodiquement, ne serait-ce que pour enlever l'eau de condensation qui peut s'y accumuler (EN12325).

Les roues existent en différentes dimensions avec différents profils de pneus. Le choix sera fonction de la pression au sol admissible, de la pluviométrie appliquée, de la pente maximale du terrain. Les pneus à profil agraire avec un nombre de plis de 6 (minimum) ou 8 sont préférés. Sur une même tour, les profils sont opposés. On évitera les pneus rechapés dont la durabilité est réduite sur ces machines.

La vitesse d'avancement peut varier de 1,5 à 8 m/min (règle générale : 2,5 m/min). Plus la vitesse exigée est élevée, plus la puissance nécessaire est importante.

L'alignement

Au niveau de chaque tour, un boîtier étanche renferme un système de micro-rupteur à came et à bielles (figure 4.30), ou à tiroir dans le cas d'une propulsion hydraulique. Ce dispositif permet de maintenir l'angle entre deux travées dans un intervalle donné (en général $1/3$ de degré). Le rupteur est constitué de deux parties, chacune étant solidaire d'une des deux travées voisines. Le boîtier de tour doit être conforme aux normes électriques en vigueur (EN909).

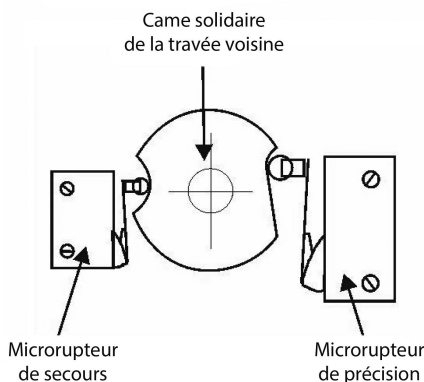


Figure 4.30. Schéma du dispositif d'alignement.

Chaque boîtier est équipé d'un micro-rupteur de commande, voire de deux micro-rupteurs de sécurité. Ils interviennent lorsque l'angle entre deux travées contiguës dépasse 1° . Ils arrêtent alors la rampe et la station de pompage (mise en sécurité).

Ces dispositifs doivent être révisés et changés fréquemment. Leur réglage doit être minutieux pour que l'alignement de l'appareil soit le meilleur possible en évitant un décalage trop marqué entre les positions des tours extrêmes.

On trouve parfois des systèmes à câble, un pour le guidage, l'autre pour la sécurité ; ces systèmes tendent à disparaître, sauf dans les situations où les variations de tension électriques du secteur sont importantes.

L'armoire de commande

Une armoire de commande située au niveau de l'élément central permet de régler la vitesse moyenne d'avancement. Par l'intermédiaire d'un doseur cyclique, on fixe le temps de fonctionnement du

moteur de la dernière tour au cours d'un cycle d'une minute. Les armoires de commande ont beaucoup évolué ces dernières années, il est possible de modifier en fonction de l'angle la vitesse d'avancement ou encore de vérifier le bon fonctionnement du pivot *via* un écran digital.

Ce dispositif de réglage permet de choisir la vitesse d'avancement pour apporter la dose d'arrosage choisie.

On trouve également dans l'armoire un coupe-circuit général, un système autorisant le déplacement de l'appareil avec ou sans eau, en avant et en arrière, un interrupteur de mise en route d'une installation d'injection de produits chimiques (engrais, pesticides).

L'armoire de commande doit satisfaire aux normes électriques en vigueur, et comporter des indications dans la langue du pays d'installation (EN12325).

Les circuits électriques

Puissance installée/puissance consommée

La puissance nécessaire au fonctionnement de la rampe doit prendre en compte :

- le fait que tous les moteurs peuvent fonctionner simultanément, même si cela est exceptionnel. La puissance nécessaire en pointe correspond à 1,8 à 2,5 fois la puissance moyenne requise par les moteurs ;
- le besoin de la station de pompage.

La puissance installée est en général de 1 kVA par CV, augmentée de la puissance nécessaire au pompage. La puissance consommée par l'avancement se calcule de la façon suivante :

$$1,25 \times (\text{puissance consommée} + 0,60 \times \text{somme des puissances des autres moteurs})$$

Les dispositifs d'arrêt et de sécurité

Étant donné la taille des appareils et leur mode d'avancement, un certain nombre de sécurités sont nécessaires :

- un disjoncteur différentiel dans le boîtier de tour, relié à chaque moteur, fonctionne lors d'un problème électrique. Il arrête la tour, puis la rampe en cas de désalignement. Attention : la protection magnétothermique à l'intérieur du moteur n'est pas conforme aux normes Cenelec ;
- des dispositifs d'arrêt ou d'inversion en fin de parcelle utilisés en cas de fonctionnement en secteur. Ils peuvent se trouver au niveau de l'élément central (peu précis), au milieu de la rampe et à son extrémité. En règle générale, on trouve deux interrupteurs ou inverseurs, l'un venant au secours de l'autre en cas de panne, et une ou deux butées lestées servant d'obstacle physique à l'avancement vers une zone dangereuse ;
- des dispositifs empêchant le sur-arrosage : en cas de patinage ou d'arrêt pour une raison quelconque, une horloge, réinitialisée à chaque mouvement de la dernière tour, stoppe l'ensemble de l'installation au bout d'un temps prédéfini ;
- un pressostat, placé en tête d'installation, arrête le fonctionnement des pompes en cas de baisse de pression.

Un contrôle technique par un organisme agréé doit être effectué selon la réglementation en vigueur pour obtenir le raccordement au réseau EDF.

Les organes d'arrosage

Les organes d'arrosage sont des asperseurs dont le débit varie le long de la rampe pour tenir compte de l'augmentation de la surface arrosée avec l'augmentation du rayon et des pertes de charge.

Ils font l'objet d'un calcul résumé dans le « plan de busage », dont les caractéristiques dépendent des paramètres hydrauliques de l'installation (pression et débit disponibles, rugosité des conduites).

Le plan de busage est fourni et garanti par le constructeur pour les hypothèses de calcul retenues. Le montage des asperseurs devra suivre strictement ce plan sous peine de graves hétérogénéités d'arrosage.

Les différents types d'asperseurs

On distingue cinq types d'arroseurs différents.

Arroseurs à impact : pression de fonctionnement entre 2 et 4 bars, avec des angles de jets de 6 à 8° en règle générale, et une portée de 10 à 15 m. Ces *sprinklers* ont une répartition du débit en « couronne » : l'eau n'est pas répartie de façon homogène sur toute la surface du cercle et arrive « en paquets ». Le résultat est généralement une pluviométrie instantanée élevée. À déconseiller sur les cultures à germination sensible ou les sols peu filtrants et/ou battants. Cette technique tend à disparaître.

Sprays : pression de fonctionnement basse de 0,5 à 2,8 bars, et une plus faible portée de 1,5 à 5 m. L'eau est projetée en sortie de buse sur un plateau fixe dont les stries répartissent le flux en jets, éventuellement à différentes portées. L'homogénéité de la répartition de l'eau est très faible, et la pluviométrie instantanée élevée.

Asperseurs rotatifs (sprays à rotor) : pression de fonctionnement de 0,7 à 3,5 bars, portée de 9 à 22 m. L'eau est projetée en sortie de buse sur un plateau (ou plate) en rotation sur un axe (dont le mouvement est assuré par la pression de l'eau) qui répartit les jets de différentes portées sur un cercle. Ils peuvent être montés directement sur la travée (montage « tête en haut », ou être fixés à des cannes de descente. L'homogénéité de la répartition de l'eau sur l'ensemble du cercle couvert est assez bonne et la pluviométrie instantanée peut être très faible. Les systèmes rotatifs dont la vitesse de rotation est assez élevée projettent le flux d'eau sous forme de gouttelettes : l'homogénéité de la répartition est alors excellente et la pluviométrie instantanée faible.

Asperseurs oscillants : pression de fonctionnement de 0,4 à 1,4 bar, portée de 4 à 9,5 m. L'eau est projetée en sortie de buse sur un plateau qui oscille autour d'un point fixe et qui est mis en mouvement par la pression de l'eau. L'homogénéité de la répartition de l'eau sur l'ensemble du cercle couvert est excellente, et la pluviométrie instantanée est faible. L'eau est appliquée sous forme de gouttes et non sous forme de jets, comme c'est le cas avec les arroseurs à impact, les asperseurs rotatifs à vitesse de rotation faible ou les sprays, ce qui rend leur utilisation particulièrement adaptée aux cultures à germination sensible ou aux sols battants.

Bubbler (*low energy precision application*) (asperseur oscillant) : pression de fonctionnement de 0,5 à 1 bar. L'objectif est d'apporter l'eau au plus près de la culture sans pression.

Remarques

- Les asperseurs utilisables sur les pivots sont spécifiques (angle bas, robustesse). Il ne saurait être question d'utiliser sur ces appareils des asperseurs de couverture intégrale.
- Quel que soit le système, le choix du diamètre de la buse prend en compte la pression disponible, la position sur la rampe et l'écartement entre asperseurs. L'ensemble de ces données est regroupé dans un document engageant la responsabilité du constructeur : le plan de busage. Le fonctionnement correct de l'arrosage suppose que les conditions hydrauliques utilisées lors de sa définition soient maintenues dans le temps.
- Il est possible d'utiliser plusieurs types d'asperseurs sur un même appareil, pour mieux ajuster débit nécessaire et pression disponible.

Dispositifs et systèmes particuliers

Le **canon d'extrémité** permet d'augmenter la surface arrosée à moindre coût. On peut le faire fonctionner par intermittences, pour s'adapter au parcellaire. Les canons utilisés sont à angle bas (18°) et généralement de taille inférieure à ceux utilisés sur les enrouleurs, les diamètres de buses variant de 12 à 25 mm.

Le canon doit être réglé minutieusement, et doit être réservé aux situations où le vent n'est pas une contrainte majeure.

Attention, le débit du canon doit être tel que le fonctionnement d'ensemble de la rampe ne soit pas perturbé lors de sa mise en marche.

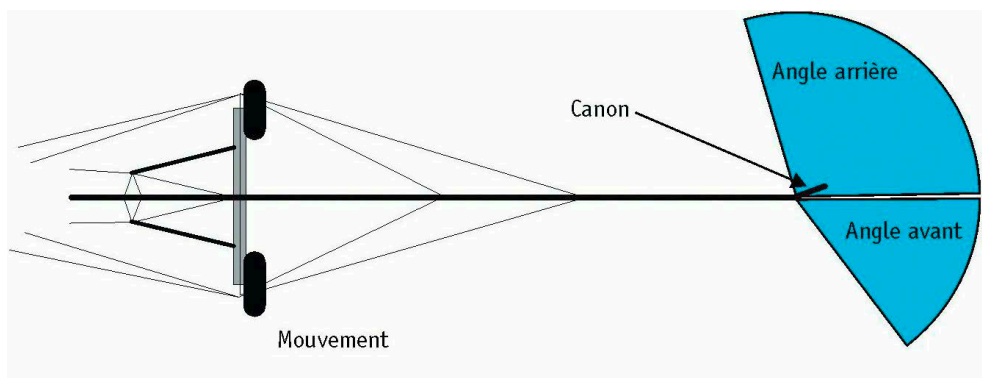


Figure 4.31. Schéma de disposition d'un canon d'extrémité.

Pour les faibles débits, un gros asperseur d'extrémité peut remplacer le canon.

Les **régulateurs de pression** permettent de faire fonctionner des asperseurs à pression constante. Ils compensent les variations de pression dues à la topographie ou à la mise en marche du canon, et limitent les excès de pression en tête. Leur plage de fonctionnement (écart entre pression mini et maxi) est de l'ordre de 4 bars.

Les régulateurs sont recommandés si la variation de débit à la buse est susceptible de dépasser 10 %.

Dans le cas de la variation de la dénivelée, le constructeur Valley propose le tableau 4.12.

Tableau 4.12. Dénivelée et variation de débit et de pression (d'après Valley).

Pression à l'extrémité du pivot (bar)	Variation de dénivelée (en m) entraînant...	
	une variation de débit de 10 %	une variation de débit de 20 %*
0,4	2,8	5,5
0,7	4,5	9
1,4	9	16
2,1	13	24
2,8	17	33
3,5	22	41
4,2	26	49
4,9	31	57

* Régulateur de pression indispensable.

Les **buses régulatrices** jouent le rôle de régulateurs de débit. Leur diamètre varie en fonction de la pression. Leur plage de régulation est de l'ordre de 0,5 bar. Elles limitent les risques de colmatage grâce à leur diamètre variable. Le surcoût par rapport à des buses classiques reste réduit.

Les **cannes de descente** permettent de positionner des asperseurs spéciaux au niveau de la végétation, voire dans celle-ci, pour lutter contre les effets du vent et de l'évaporation. Il est conseillé de fonctionner à pression plus faible (moins de 2,5 bars) pour éviter que les jets détériorent le feuillage.

Attention, néanmoins, aux situations où des impuretés ou des dépôts peuvent venir obstruer les asperseurs.



Photo 4.9. Arrosage au moyen de cannes de descente (© Lindsay).

Les **systèmes très basse pression** (*LEPA systems*) fonctionnent à très faible pression (0,3 à 1,5 bar). Ces systèmes allient un faible coût énergétique et une grande précision d'application de l'eau. Ils équivalent à réaliser un arrosage par gravité au moyen de tubes de descente souples ou rigides, portant à leur extrémité une ou plusieurs buses, éventuellement traînées à même le sol, ou un asperseur basse pression.

Ces systèmes sont souvent utilisés avec des rampes frontales, sur cultures basses (maraîchage), pour des arrosages fréquents et peu importants. Ils sont aussi utilisés pour les épandages d'effluents clairs car ils évitent toute formation d'aérosols préjudiciables aux riverains.

Ils imposent des travées à structures renforcées, pour supporter la surcharge due aux tubes de descente.

Les **systèmes d'arrosage des angles** existent sous différentes formes. Les plus répandus sont les *corner systems*, constitués d'une travée supplémentaire articulée par rapport à la dernière, capable de passer d'un déplacement tangentiel au passage de la dernière travée à un déplacement conforme à celui d'une travée normale.

On trouve aussi des porte-à-faux escamotables télescopiques (intégration dans la structure de la dernière travée) ou rotatifs capables d'éviter un obstacle (le porte-à-faux peut être soit perpendiculaire, soit parallèle à la rampe).

Mode de fonctionnement

La vitesse moyenne de déplacement de la rampe pivotante est fixée par le temps de fonctionnement de la tour d'extrémité. Le mouvement de l'ensemble de l'appareil se fait ensuite par corrections angulaires successives entre travées, comme décrit et illustré ci-dessous (figure 4.32).

L'angle entre deux tours voisines doit rester compris entre deux angles limites : $A0$ l'angle de déclenchement (angle à partir duquel la tour considérée se met en marche) et $A1$ l'angle d'arrêt (angle à partir duquel la tour considérée s'arrête). Lorsque l'appareil est mis sous tension (temps $t0$), seule la dernière tour (n) démarre, jusqu'à ce que l'angle An séparant la tour (n) et la tour ($n-1$) atteigne la limite de déclenchement, la tour ($n-1$) se met alors en marche (temps $t1$). Comme cette dernière doit parcourir une distance moins importante que la tour (n) pour parcourir le même angle, il arrivera un moment où l'angle entre les tours (n) et ($n-1$) atteindra la limite d'arrêt (temps $t2$), il en est ainsi de proche en proche jusqu'à l'axe du pivot.

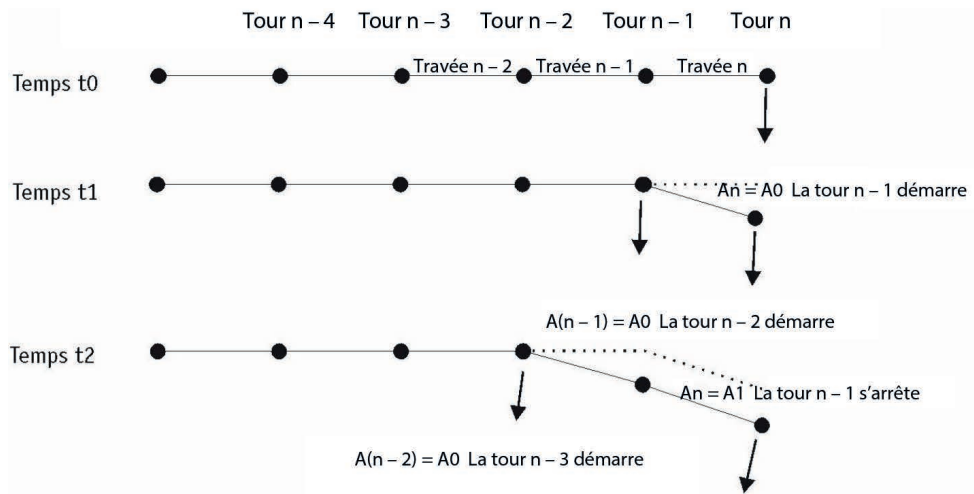


Figure 4.32. Principe de l'avancement d'un pivot.

Remarque 1 : l'angle maximum entre travées est toujours inférieur ou égal au tiers d'un degré.

Remarque 2 : c'est la tour n qui commande les autres.

$A0$: angle de déclenchement.

$A1$: angle d'arrêt.

An : angle séparant les travées (n) et ($n-1$).

Dimensionnement

L'irrigation par pivot doit être raisonnée selon les critères habituels de l'irrigation par aspersion. Rappelons les principaux éléments à prendre en compte :

- les besoins journaliers à satisfaire, qui permettent de calculer le débit de l'installation ;
- la profondeur de sol exploitée par les plantes et la capacité de rétention du sol, qui déterminent la dose d'arrosage ;
- la capacité d'infiltration du sol qui limite l'intensité pluviométrique admissible ;
- le rythme des arrosages.

La présente partie se termine par un exemple complet illustrant le calcul de dimensionnement d'une installation.

Calcul des besoins journaliers de pointe

Les caractéristiques hydrauliques d'un appareil doivent être calculées pour apporter les quantités d'eau nécessaires aux besoins journaliers des plantes en période de pointe. La détermination desdits besoins a été traitée dans le chapitre 1.

En grandes cultures, ces besoins correspondent à l'évapotranspiration maximale (ETM) de la culture, obtenue en affectant à l'évapotranspiration potentielle (ETP) de la période de pointe le coefficient cultural (Kc) de la culture à cette période.

Aux besoins ainsi déterminés, il convient d'ajouter des correctifs pour prendre en compte :

- des pertes éventuelles dues au vent ou à l'évaporation. Elles peuvent atteindre momentanément 20 % en zone ventée. Une valeur moyenne de 10 % peut être retenue ;
- une marge de sécurité qui permet de tenir compte des arrêts accidentels. Celle-ci est laissée à l'appréciation des utilisateurs, en fonction de la valeur de la culture en place et du supplément d'investissement rendu nécessaire par un éventuel surdimensionnement de la machine.

Tableau 4.13. Exemples de calcul de besoins journaliers de pointe d'une culture de maïs.

	Exemple 1	Exemple 2	Exemple 3
ETP max. journalière	3,5 mm	4,5 mm	5,5 mm
ETM maïs (Kc max = 1,1)	3,8 mm	4,9 mm	6,0 mm
Pertes climatiques 10 %	0,4 mm	0,5 mm	0,7 mm
Coefficient de sécurité éventuel 10 %	0,5 mm	0,5 mm	0,7 mm
Dose journalière	4,7 mm	6,0 mm	7,4 mm

En règle générale, on ne prend pas en compte l'éventuelle contribution du sol, du fait de son influence très souvent négligeable sur le débit de pointe de l'installation.

Néanmoins, dans le cas particulier des sols à forte réserve (sols limono-argileux profonds par exemple), il convient d'évaluer la contribution du sol par remontées capillaires au cours du mois de pointe (voir section « Pilotage de l'irrigation », p. 69). Cette réserve peut, en effet, grâce à la stratégie choisie pour la conduite de l'irrigation, être parfois mise à contribution pour abonder les quantités d'eau apportées par l'arrosage.

Calcul du débit d'équipement nécessaire

Le débit horaire d'équipement est donné par la relation :

$$\text{Débit horaire d'équipement} = \frac{\text{Besoins de pointe sur l'ensemble de la surface irriguée}}{\text{Temps effectif d'irrigation durant la période considérée}}$$

La surface totale S irriguée par un pivot est celle d'un cercle dont le rayon est égal à celui du pivot, portée efficace du canon d'extrémité comprise, lorsque le pivot fonctionne en cercle complet. Si le pivot fonctionne sur un secteur d'angle θ , la superficie sera $S \times \theta/360$.

Le pivot fonctionnant en permanence 24 h sur 24, on peut considérer une période de 24 h pour le calcul du débit d'équipement.

Dans le cas du fonctionnement en cercle complet, les besoins journaliers de pointe sur l'ensemble de la surface irriguée sont :

$$B_j = (\Pi \times R^2 \times D_j)/1000$$

avec : B_j en m^3/jour ; R en m, D_j en mm.

Le débit horaire nécessaire aux besoins des cultures sera de :

$$Q_c (m^3/h) = B_j/24 = (\Pi \times R^2 \times D_j)/1000 \times 24$$

Les abaques des figures 4.33 et 4.34 permettent de déterminer directement le débit Q_c nécessaire en fonction des besoins journaliers D_j et du rayon arrosé.

Dans le cas d'un fonctionnement en secteur d'angle θ° , on devra corriger le débit requis par un facteur $\theta/360^\circ$.

De même, si l'appareil doit faire un retour sans eau, il faudra en tenir compte dans le temps effectif d'irrigation. Le dénominateur pris en compte dans le calcul du débit horaire Q_c ne sera pas 24 h, mais le temps effectif d'arrosage.

Choix de la vitesse d'avancement

La pluviométrie du pivot étant fixe, la vitesse d'avancement des travées doit être déterminée de manière à apporter la dose d'irrigation nécessaire à chaque passage.

La dose d'arrosage délivrée à chaque passage ne peut être supérieure à la capacité de rétention du sol, plus précisément de la réserve facilement utilisable (RFU) de celui-ci, pour une conduite à l'ETM, ce qui est fréquemment le cas pour les cultures arrosées par un pivot :

$$D < \text{RFU}$$

Le rythme de passage T (en jours) ou rythme des arrosages est défini par le rapport de la dose d'arrosage sur les besoins journaliers :

$$T = D/D_j$$

La vitesse d'avancement des travées se règle en pourcentage $Av\%$, de la vitesse maximale V_m de la dernière tour. Ce pourcentage se détermine comme suit :

$$Av(\%) = Tr/(T \times 24) \times 100$$

Tr étant le temps en heure mis par l'appareil pour effectuer une rotation complète à la vitesse maximale V_m (m/h) de la dernière tour, située à la distance L (m) du centre du pivot :

$$Tr = (2 \times \Pi \times L)/V_m$$

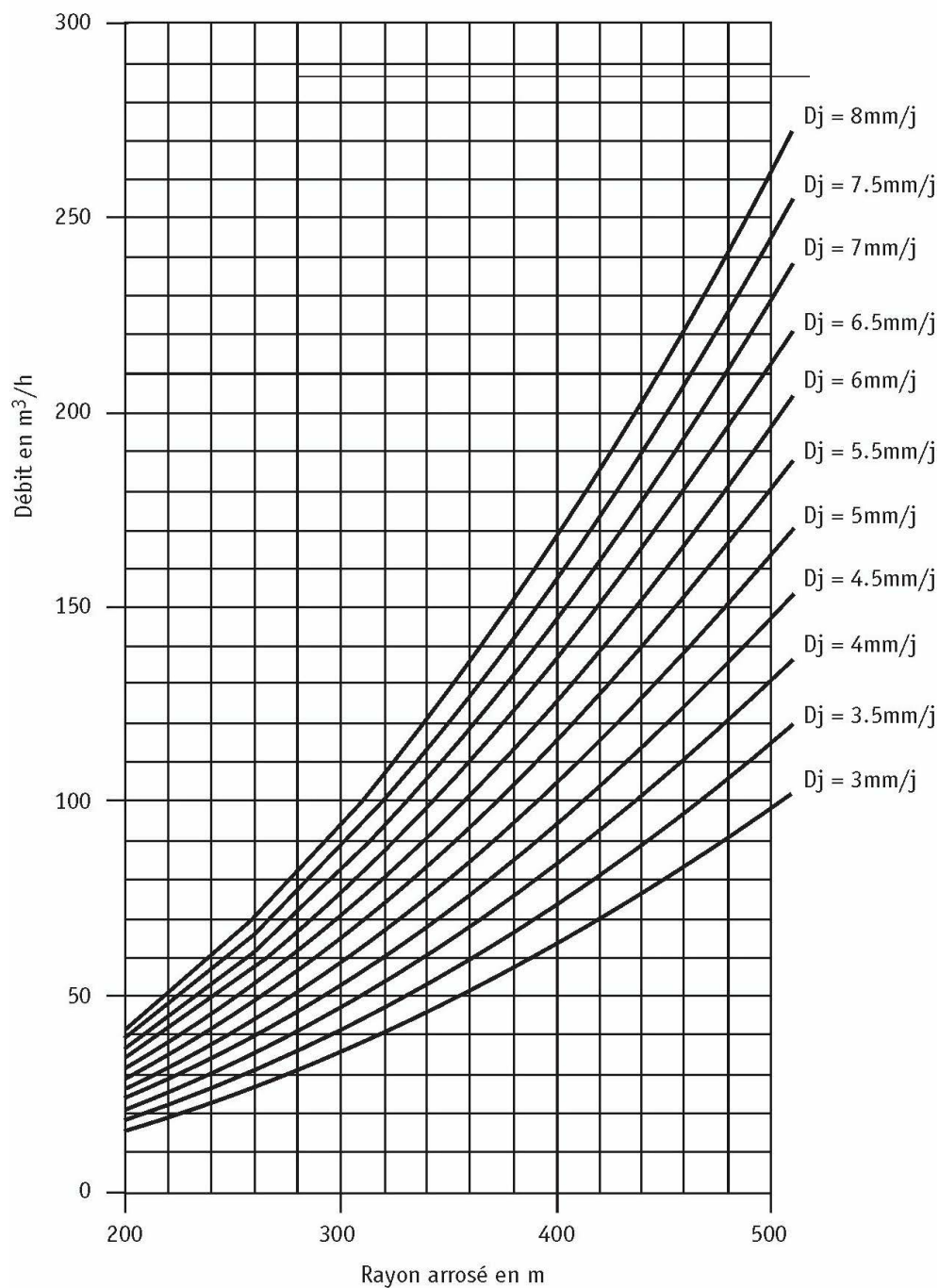


Figure 4.33. Évaluation du débit requis, en fonction du rayon de la parcelle arrosée, pour différentes doses journalières, pour des pivots de moins de 500 m.

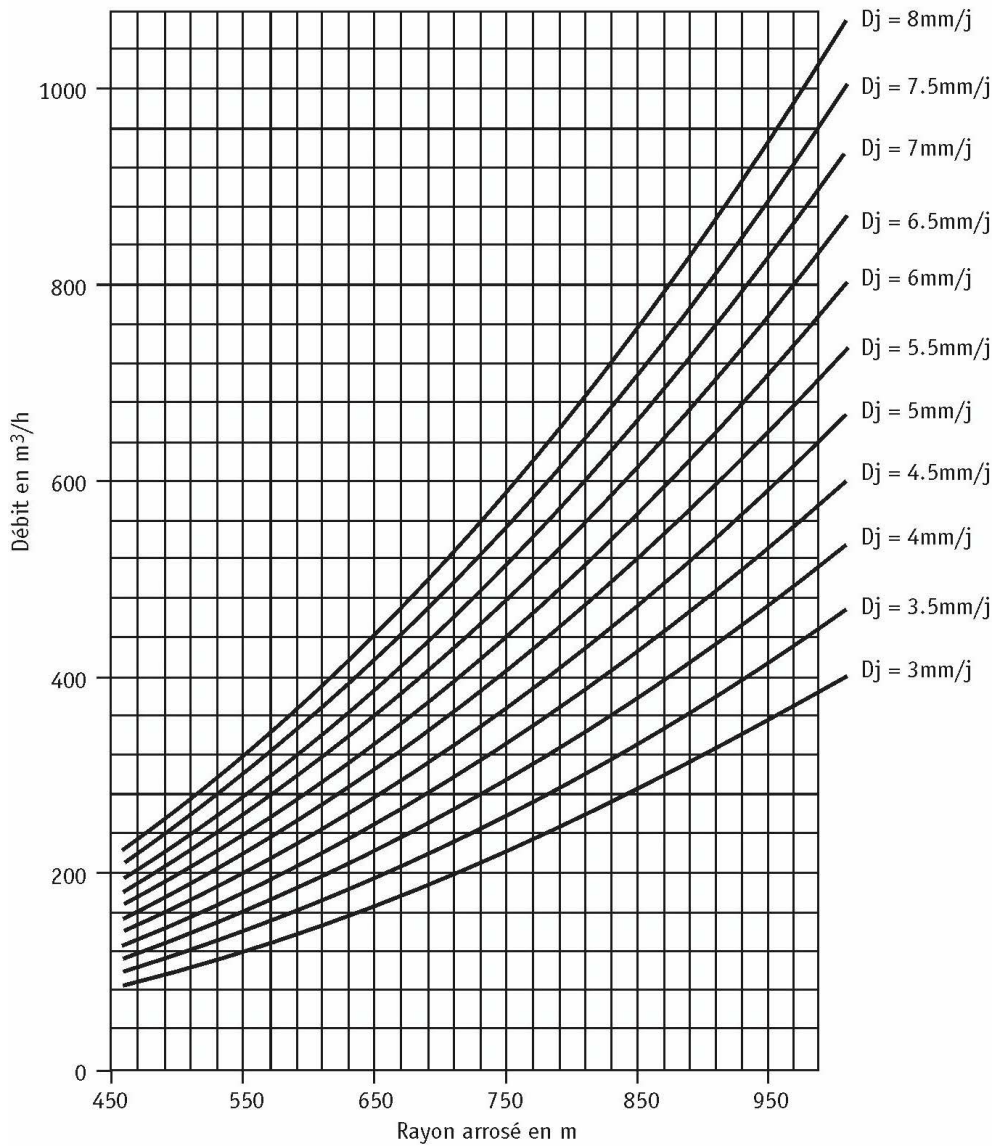


Figure 4.34. Évaluation du débit requis, en fonction du rayon de la parcelle arrosée, pour différentes doses journalières, pour des pivots de plus de 450 m.

Exemple

Soit une culture de maïs dont les besoins en eau, en période de pointe, sont de 5 mm/j, sur un sol dont la RFU est de 32 mm. Compte tenu des dimensions de la parcelle, le pivot choisi arrose un cercle de 450 m de rayon, la dernière tour étant à 400 m de l'unité centrale et pouvant avancer à la vitesse maximale de 150 m/h.

Avec une majoration de 10 % pour les pertes + 10 % pour les arrêts, les besoins journaliers de pointe sont : $D_j = 5 \times 1,20 = 6 \text{ mm/j}$ et on en déduit le débit d'équipement nécessaire :

$$Q_e = (\pi \times 450^2 \times 6) / (1\,000 \times 24) = 159 \text{ m}^3/\text{h}$$

arrondi à 160 m³/h.

Compte tenu de la valeur de la RFU, on apportera une dose d'irrigation de 30 mm à chaque passage, soit pour un besoin de 5 mm/j : 30

$$T = 6 = 5 \text{ j, soit } 144 \text{ h}$$

Le temps d'une rotation à la vitesse maximale est :

$$T_r = (2 \times \pi \times 400) / 150 = 16,75 \text{ h}$$

La vitesse d'avancement à respecter sera réglée à :

$$Av(\%) = 16,75 / (6 \times 24) \times 100 \approx 12 \%$$

de la vitesse maximale de la dernière tour, ce qui correspond à une vitesse d'avancement de la dernière tour de :

$$150 \times 12 \% = 18 \text{ m/h.}$$

Remarque

Au cours de la campagne d'irrigation, les besoins journaliers D_j varient et sont la plupart du temps inférieurs aux besoins de pointe. Il convient de déterminer le rythme des arrosages T aux différentes périodes de la campagne, en tenant compte des besoins D_j effectifs de chaque période pour éviter des apports d'eau excessifs, qui engendreraient, outre le gaspillage, des risques de lessivages et/ou de ruissellement.

Par exemple, dans le cas ci-dessus, si les besoins journaliers sont de 3 mm/j seulement au lieu de 6 au cours d'une période différente de la période de pointe, le rythme de retour des arrosages durant cette période sera de 10 jours ($T = 30/3$). La vitesse du pivot étant réglée pour apporter une dose de 30 mm en 6 jours, il conviendra de le faire fonctionner 6 jours sur 10 au cours de cette période.

Contraintes pédologiques et choix des asperseurs

Capacité d'infiltration

Les calculs présentés ci-dessous font l'objet d'un projet de norme en cours d'enquête finale (prEN14049). En irrigation par aspersion, la pluviométrie des asperseurs ne doit pas être supérieure à la capacité d'infiltration ou à la perméabilité des sols. Les valeurs de vitesse d'infiltration, en régime permanent, varient de moins de 5 à plus de 50 mm/h selon le type de sol.

Tableau 4.14. Exemples de vitesses d'infiltration pour différents types de sol, en régime permanent.

Type de sol	Infiltration en régime permanent, ou infiltration limite
Sols légers (sables)	20 à plus de 50 mm/h
Sols moyens (sablo-limoneux, sableux)	10-20 mm/h
Sols lourds (limono-argileux, argileux)	5-10 mm/h

Tout excès d'intensité pluviométrique engendre l'apparition de flaques et des risques de ruissellement et de battance, d'autant plus graves que la pente est forte et que le sol est fragile. Les figures 4.35 et 4.36 illustrent ce phénomène.

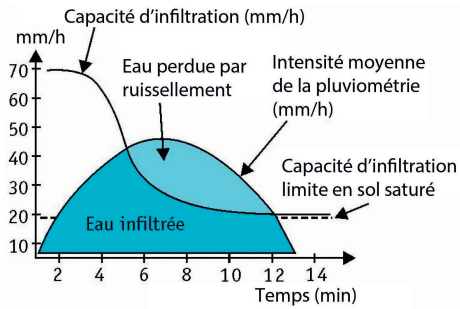


Figure 4.35. Cas d'un asperseur de faible portée.

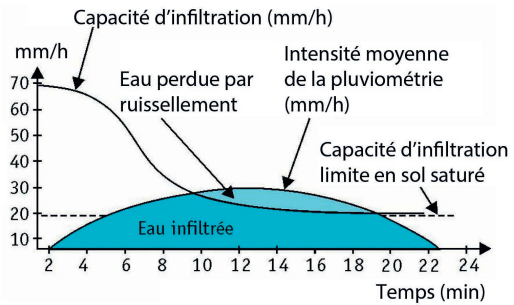


Figure 4.36. Cas d'un asperseur délivrant le même débit, avec une portée supérieure.

L'incidence de l'arrosage sur la dégradation du sol dépend aussi de la nature du jet : de sa concentration (jet dirigé, pluie uniforme) et de la taille des gouttes qui le composent. Ces facteurs interviennent sur l'énergie avec laquelle l'eau est appliquée. Celle-ci provoquera des dégradations (formation d'une croûte de surface, apparition de phénomènes de battance) d'autant plus importantes que l'énergie sera grande.

La présence d'un couvert végétal protège la structure et peut faire diminuer ces risques.

» Complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Estimation de la pluviométrie instantanée. Au cours de la rotation du pivot, les asperseurs les plus éloignés de l'axe sont animés d'une vitesse linéaire d'autant plus grande que le pivot est long. Ils doivent donc apporter la dose d'irrigation en un temps relativement court ; ce qui peut conduire à des pluviométries instantanées très élevées.

D'autre part, plus la portée de l'asperseur est faible et plus le temps d'arrosage d'un point, au passage de la rampe, sera court et donc la pluviométrie nécessaire pour apporter la dose sera importante.

L'intensité moyenne I_r nécessaire pour apporter une dose d'arrosage D en un point P_r situé à la distance r du centre du pivot est :

$$I_r = D / t_r$$

t_r étant la durée d'arrosage du point P_r . Si la portée du jet qui arrose ce point est W_r , on a :

$$t_r = 2 W_r / V_r$$

V_r étant la vitesse de rotation de la rampe à la distance r du centre du pivot. La durée d'une rotation complète correspondant à une période d'arrosage T étant de $T \times 24$ h, on a :

$$V_r = 2 \pi r / (T \times 24) = 2 \pi r D_j / (D \times 24)$$

et

$$I_r = D / t_r = D V_r / 2 W_r$$

d'où

$$I_r = \pi r D_j / 24 W_r$$

L'intensité pluviométrique moyenne I_r en un point situé à la distance r du centre du pivot est proportionnelle à cette distance r et inversement proportionnelle à la portée W_r du jet de l'asperseur qui arrose ce point. Elle est maximale au niveau de l'asperseur d'extrémité situé à la distance R du centre du pivot.

La valeur ainsi estimée est une moyenne ; pour obtenir une valeur maximale, il convient de la multiplier par un facteur, qui pourra être 1,275, lorsque l'on émet l'hypothèse que la forme de la courbe de distribution est une ellipse. Ce coefficient peut être modifié pour tenir compte de facteurs de fonctionnement particuliers (présence de vent qui va diminuer les portées, donc concentrer l'eau sur une surface plus réduite), ou de courbes de distribution particulières.

On peut, inversement, calculer la portée minimale W_r nécessaire de l'asperseur d'extrémité situé à la distance R , pour ne pas dépasser la valeur de l'intensité pluviométrique I_{\max} correspondant à la capacité d'infiltration du sol concerné :

$$W_r = 1,275 (I \times R \times D_j) / (24 \times I_{\max})$$

Le problème de pluviométrie instantanée élevée fait que le pivot convient surtout aux sols légers (sableux, sablo-limoneux). Il peut être compatible avec des sols lourds à condition que la longueur du pivot soit réduite, et que la portée des asperseurs soit suffisante.

Certains constructeurs proposent des dispositifs transversaux (tubes horizontaux perpendiculaires au tuyau portant les asperseurs) qui permettent d'élargir la bande arrosée à partir de la rampe et donc de diminuer l'intensité d'arrosage. Ce dispositif alourdit l'appareil et nécessite que la structure ait été conçue pour en tenir compte.

Exemple

Cas de l'exemple précédent : pivot de 400 m de rayon devant satisfaire un besoin journalier de 6 mm.

Si le pivot est équipé en son extrémité d'un asperseur dont la portée est de 15 m, la pluviométrie instantanée maximale sera de :

$$I_{\max} = 1,275 (I \times 400 \times 6) / (24 \times 15) = 26,7 \text{ mm/h}$$

Une telle pluviométrie est prohibitive dans le cas de sols lourds tels que celui de l'exemple ci-dessus, dont la vitesse d'infiltration n'est que de 8 mm/h.

On peut considérer le problème à l'inverse et calculer la portée minimale W_r de l'asperseur d'extrémité, nécessaire pour une pluviométrie maximale I_{\max} correspondant à la vitesse d'infiltration du sol de 8 mm :

$$W_r = 1,275 (I \times 400 \times 6) / (24 \times 8) = 50 \text{ m}$$

ce qui conduirait à choisir un canon d'extrémité ; mais la pluviométrie des canons de telle portée est en général bien supérieure à 8 mm. La seule solution consiste alors à réduire la longueur du pivot.

Remarque

La valeur de l'intensité pluviométrique est également proportionnelle à la valeur des besoins journaliers D_j , mais ne dépend pas de la dose D appliquée à chaque passage. Plus celle-ci est élevée, plus la vitesse de rotation du pivot est lente et la durée d'exposition du point à l'arrosage est élevée ; ce qui n'influe pas sur l'intensité pluviométrique.

Choix des asperseurs

L'intensité moyenne de l'arrosage est une caractéristique intrinsèque de l'installation, déterminée par ses paramètres de conception (besoin en eau journalier, longueur de la machine, type d'asperseur).

On a vu que l'intensité de l'arrosage dépend également de la composition du jet (granulométrie). Sur sols battants, on peut être conduit à éviter les asperseurs comme les sprays à rotor, qui résistent bien au vent mais génèrent de grosses gouttes. Les asperseurs oscillants semblent assez intéressants par le fait qu'ils ne créent pas de jet dirigé, il reste à identifier leur distribution granulométrique. Les asperseurs à batteur permettent les portées les plus grandes, mais concentrent le jet sur une surface limitée à un instant donné.

La portée de l'asperseur dépend du couple buse-pression ; plus la pression est élevée, plus grande sera la portée. À l'inverse, la distribution des gouttes sera orientée vers des gouttes d'autant plus petites que la pression est élevée. Enfin, la hauteur de l'asperseur favorisera une augmentation de sa portée, une dispersion du jet, mais accroîtra sa sensibilité au vent.

Contrôle de l'uniformité d'arrosage

Il est vivement conseillé de contrôler la qualité de la répartition pluviométrique et en particulier de son uniformité, notamment lorsque le busage vieillit et aussi lorsqu'il est envisagé d'utiliser l'appareil pour effectuer des épandages de fertilisants ou de produits phytosanitaires par aspersion.

Ce contrôle fait l'objet d'une « Fiche de diagnostic d'un pivot ou d'une rampe frontale au champ » à la fin du présent chapitre.

La méthode proposée est codifiée dans la norme ISO 11545. Le calcul du coefficient d'uniformité proposé permet une appréciation globale de la distribution d'eau à partir de mesures sur deux rayons. Ce coefficient ne donne qu'une idée de la qualité de la distribution, et ne doit pas empêcher une observation stricte de la courbe de distribution et du fonctionnement des asperseurs. En particulier, lorsque l'appareil est équipé d'un canon d'extrémité et qu'il est mal réglé, la baisse du coefficient peut faire apparaître une mauvaise performance de l'ensemble de la machine alors qu'elle n'est due qu'au canon.

Effet du vent sur l'uniformité de distribution d'un pivot

Les travaux conduits par l'INRAE (ex-Irstea) sur ce sujet, confirmés par de nombreuses références bibliographiques, ont montré que les asperseurs de pivots sont en général assez tolérants par rapport à la présence de vent. Par ailleurs, le déplacement de l'appareil permet d'annuler une bonne part des déformations par le vent de la distribution des asperseurs isolés.

Le seul conseil que l'on peut donner en situation ventée est d'éviter de faire fonctionner les machines sur un « horaire » unique. Par exemple, on décalera le démarrage de l'arrosage de 12 h d'un tour d'eau sur l'autre. Ainsi, l'appareil ne passera pas toujours sur les mêmes zones aux mêmes heures du milieu de la journée, les plus ventées en général. Cette remarque s'applique particulièrement aux appareils équipés de canons d'extrémité.

Problème du réglage du canon d'extrémité

En France, la plupart des pivots sont terminés par un canon d'extrémité, dont le réglage est souvent approximatif. Celui-ci doit être décidé en fonction de l'allure de la courbe de distribution radiale du canon. Le tableau 4.15 donne un exemple des angles à adopter pour un arrosage sans vent.

Un réglage déterminé pour une combinaison canon-buse-pression ne sera pas extensible à tous les cas de figure.

Tableau 4.15. Réglage des angles de secteur pour un canon Twin 101 18° en fonction de la pression.

Canon/big gun komet	Buse/nozzle (mm)	Pression/pressure (kPa)	Angle de secteur/sector angle	Angle arrière/reverse angle	CUC minimum
Twin 101 18°	14	250	95-115°	70-75°	82
	16	200	95-155°	80-90°	85
	18	250	115-175°	80-95°	86
	18	300	135-155°	80-90°	85
	18	350	95-115°	75-80°	85

CUC : coefficient d'uniformité de Christiansen.

Calculs hydrauliques des installations

Pour obtenir une pluviométrie uniforme le long de la rampe, le busage est calculé en tenant compte à la fois des pertes de charge dans la canalisation et de la variation croissante des surfaces desservies lorsque l'on s'éloigne de l'axe du pivot.

Calcul des pertes de charge

C'est une donnée essentielle du dimensionnement de l'installation, car il est nécessaire de calculer la pression requise à l'entrée du pivot :

$$\text{Pression requise à l'entrée} = \text{Hauteur colonne montante} + \text{Perte de charge totale dans le pivot} + \text{Pression disponible au canon}$$

Connaissant la pression requise, il sera possible de calculer les caractéristiques de la station de pompage. Différentes formules permettent le calcul des pertes de charge dans les tuyaux du pivot. Nous citerons celle de Hazen et Williams :

$$j = 1,148 \times 10^{11} \times (Q/Chw)^{1,852} \times (L/D^{4,87})$$

avec j : perte de charge exprimée en mètre ; Q : débit en m³/h ; L : longueur de canalisation en mètre ; D : diamètre de la conduite en mètre ; Chw : coefficient de rugosité.

La valeur retenue du coefficient de rugosité (Chw) doit tenir compte du vieillissement de la canalisation durant une période égale à la durée de vie du busage. Pour estimer le vieillissement d'une canalisation, on peut mesurer la variation de la perte de charge (i) au cours du temps à débit connu.

Remarques

- La perte de charge est proportionnelle au débit dans la canalisation. On évitera de véhiculer des débits correspondant à des vitesses de l'eau dans la canalisation supérieures à 3 m/s. Cette précaution en limitant les phénomènes d'abrasion permet ainsi de retarder le vieillissement de la canalisation.
- En règle générale, un appareil en état correct de moins de 400 m de longueur a une perte de charge globale faible (< 1 bar). Pour les appareils dépassant 400 m de long, la perte de charge devra être déterminée avec soin pour éviter des déséquilibres dans la courbe de distribution.

Busage de l'appareil

Le débit nécessaire au niveau de chaque asperseur dépend uniquement de sa position sur la rampe. Le choix des caractéristiques des buses dépendra des deux paramètres suivants : pression disponible et débit requis. Lors du calcul du busage, on dispose de plusieurs stratégies suivant que l'on a des asperseurs à buse unique ou non, que l'on désire réduire ou augmenter les écartements, que l'on dispose d'une pression en tête plus ou moins élevée.

Ces choix sont bien souvent dictés par les contraintes locales, en particulier celles liées aux caractéristiques physiques du sol ou à la station de pompage.

Il ne faut jamais oublier que l'uniformité d'arrosage est d'autant plus grande que les écartements entre distributeurs sont réduits, permettant un meilleur recouvrement entre asperseurs voisins.

Un busage est calculé pour une série de caractéristiques hydrauliques bien déterminées. Toute modification d'une seule d'entre elles change le comportement de l'ensemble. La pression de tête doit être maintenue aussi constante que possible pour limiter les variations de débits.

Respect des contraintes hydrauliques

Lors de l'utilisation de l'appareil, il est donc essentiel de maintenir la pression en tête au plus près de la valeur choisie lors du calcul du busage. Un régulateur de pression peut s'avérer parfois très utile.

Toute variation des conditions hydrauliques d'alimentation du pivot se traduira par une variation du débit des asperseurs, donc par des excès ou des déficits d'eau. L'utilisation de canon d'extrémité à trop fort débit par rapport au débit de l'installation est à proscrire et peut provoquer de tels problèmes.

Pour des appareils dont la perte de charge est importante :

- un excès de débit en tête va entraîner une augmentation de la perte de charge globale de la machine, aboutissant à un surdosage en tête et à un sous-dosage relatif en extrémité ;
- à l'inverse, une baisse de débit en tête entraînera une baisse de la perte de charge globale et donc un sous-dosage en tête et un surdosage relatif à l'extrémité.

Problème hydraulique de l'arroseur d'extrémité

Pression nécessaire

Les canons installés en bout de rampe nécessitent une pression minimale de fonctionnement supérieure à 3 bars, et pour certains canons particuliers à 2,5 bars. Or cette pression ne peut pas toujours être disponible, notamment sur des rampes longues. Il est alors nécessaire d'utiliser un surpresseur alimenté électriquement pour augmenter la pression.

Les arroseurs à gros débit qui peuvent remplacer les canons sont capables de fonctionner avec une pression faible (2 bars au minimum), évitant l'utilisation d'un surpresseur.

Fonctionnement intermittent

On a vu précédemment que l'addition d'un canon d'extrémité pouvait permettre de faciliter l'arrosage des angles ; dans ce cas, son fonctionnement ne sera pas continu.

Le fonctionnement intermittent du canon d'extrémité présente l'inconvénient de faire varier les conditions hydrauliques du système. Pour limiter ces perturbations, on utilisera des pompes dont la courbe caractéristique [$Q = f(P)$] est telle que toute variation du débit n'entraîne qu'une faible variation de la pression et ne modifie pas trop les caractéristiques de fonctionnement des asperseurs (pompe à courbe plate).

Dans le cas d'un appareil sur réseau collectif, il est vivement conseillé de monter un régulateur de pression en tête d'installation.

Pour éviter de trop grandes variations des conditions hydrauliques de l'appareil, on limitera le débit du canon en fonction du débit de la rampe. Si ce débit doit dépasser 10 % du débit du pivot, on réglera la pression en tête de machine ou aux asperseurs.

Maintenance, surveillance des pivots

Les pivots nécessitent peu de surveillance et d'interventions en cours de campagne par rapport aux différents systèmes mobiles, mais l'investissement qu'ils représentent impose un suivi rigoureux.

Remise en route

Les vérifications suivantes sont conseillées avant la remise en route, en début de campagne d'irrigation :

- effectuer un tour de « rodage » en début de campagne ; faire fonctionner l'appareil à vide et vérifier les alignements ;

- examiner les armoires électriques (présence d'humidité, corrosion, dégâts de rongeurs) ;
- tester les sécurités, les interrupteurs et autres inverseurs destinés à arrêter ou à renvoyer une rampe en fin de rotation ;
- remettre en place et vérifier le calage des butées de fin de parcelle ;
- nettoyer la conduite en ouvrant son extrémité ; si l'eau reste sale, il est possible qu'une pompe ait sa crépine détériorée ;
- vérifier la station de pompage ou la pression à la borne, l'étanchéité des conduites, le fonctionnement des asperseurs ;
- vérifier et changer fréquemment les manomètres ;
- faire établir périodiquement un diagnostic (électrique, mécanique et hydraulique) des installations par un professionnel assurant une garantie, avant la mise en route ;
- surveiller la corrosion et l'état d'usure de la canalisation (photo 4.10).



Photo 4.10. Affaissement d'un appareil suite à la corrosion et à l'érosion de la canalisation.

Surveillance en cours de saison

Au cours de la campagne d'irrigation, il est recommandé de veiller aux points suivants :

- observer les obstructions ou casses d'asperseurs, les fuites ;
- détecter les bruits suspects sur les moteurs et sur les réducteurs ;
- observer les désalignements ;
- refaire les niveaux des réducteurs une fois dans la campagne, et purger l'eau qui a pu s'accumuler à cause de la condensation.

Si l'appareil est équipé pour réaliser l'injection d'engrais en cours d'arrosage, il est nécessaire de démonter toute la ligne d'injection qui reste sur la rampe pour la nettoyer et la vérifier minutieusement : clapets, tuyauterie, vannes, injecteur, asservissement.

Après toute injection, il faudra rincer abondamment l'ensemble de l'installation (injection comme arrosage).

Hivernage

Les règles de maintenance suivantes devront être respectées avant l'hivernage :

- vidanger l'installation (eau) ;
- graisser la colonne montante, les filetages de tendeurs ;
- vidanger les moto-réducteurs suivant les spécifications du fournisseur, en général tous les 2 ans ou toutes les 2 000 h ;
- vérifier et graisser les transmissions à cardan ;
- vérifier et graisser les écrous de roues ;
- sur-gonfler les pneus à 3,5 bars, pour éviter pliures et cassures ;
- graisser les pièces externes des armoires électriques et des coffrets d'alignement ;
- vérifier les connexions de l'armoire électrique et des coffrets d'alignement, vaporiser un anti-humidité, vérifier les presse-étoupe des câbles.

En liaison avec le constructeur, et après un diagnostic, on peut évaluer le risque de panne de l'appareil en fonction de son état et de ses conditions de fonctionnement : nombre de rotations annuelles, qualité de l'eau, épaisseurs résiduelles des conduites, distance parcourue par la dernière tour, accessibilité en cas de panne.

ANNEXE 1

Diagnostic du fonctionnement d'une installation de couverture intégrale

Date..... Nom de l'enquêteur.....
 Nom de l'agriculteur.....
 Adresse complète.....
 Téléphone.....

Caractéristiques des parcelles irriguées

Cultures	Surface irriguée (ha)		Volume d'eau apporté par ha/an en moyenne	Débit d'équipement souhaitable		
	Total	Par matériel testé		m ³ /h/ha	Total	Pour l'installation considérée
Maïs						
Soja						
.....						
.....						
.....						
Total						

Ressources en eau		Volume disponible	Débit disponible	Observations
Retenue collinaire			
Rivière			
Forage			
Puits			
Borne d'irrigation			

Sol		Type de sol	Profondeur d'enracinement	Réserve utile estimée
Sol à faible réserve m	..... mm
Sol à réserve moyenne m	..... mm
Sol profond à bonnes réserves m	..... mm

Vent		Observations
Rare	
Génant	
Génant souvent	
Empêche de temps en temps d'irriguer	
Empêche souvent d'irriguer	

Le matériel

Rampes (canalisations porte-asperseurs)

Marque Année d'achat

Matériel : alu ☐ PET ☐ enroulable oui ☐ non ☐

Diamètre :

Écartement entre tertiaires (L) m

Écartement arroseurs (l) m

Disposition : en carré ☐ en triangle ☐

Arroseurs

Marque Type

Monobuse ☐ Ø de la buse mm

Bi-buse ☐ Ø buse avant mm buse arrière mm

Équipements spéciaux

Guide-jets sur buse ☐ Régulateurs de pression ☐ Buses de régulation ☐

Buses spéciales ☐ Busage différentiel ☐

Pompe ou borne

Groupe électrique ☐ Groupe Diesel ☐ Tracteur ☐ Borne ☐

Débit horaire disponible : m³/h Puissance du moteur : ch kW

Pression de refoulement : bar

Pratique de l'irrigation

Interview de l'agriculteur		Annoncé fermement par l'irrigant	Estimé par l'irrigant	Ne sait pas
Nombre total d'arroseurs				
Nombre d'arroseurs fonctionnant en même temps	En moyenne	.....	.....
	Au maximum	.....	.....
	Au minimum	.....	.....
Débit moyen par arroseur				
Durée moyenne du tour d'eau				
Pression moyenne aux arroseurs				
Possédez-vous les courbes débit/pression des arroseurs ?				
Dose d'eau apportée au moment du contrôle				
Variation externe de pression entre arroseurs				

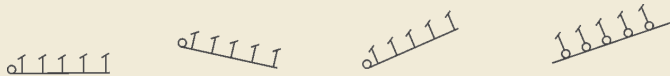
L'installation possède-t-elle un compteur ? Oui ☐ Non ☐

Êtes-vous satisfait de la qualité de répartition de l'eau sous les arroseurs ?

Oui ☐ Non ☐ Ne sait pas ☐

Pourquoi ?

Conditions de mesures



Pente moyenne : %

Nombre total d'arroseurs fonctionnant en même temps (N) :

Pression des arroseurs, débit, portée

		Arroseur en position					
		Favorable (f)		Moyenne (m)		Défavorable (d)	
Pression à la buse (bar)		Pf =		Pm =		Pd =	
		mm	pouces	mm	pouces	mm	pouces
Buses équipant l'arroseur	Avant	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	Arrière	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Débit calculé (abaque) m ³ /h		Qf =		Qm =		Qd =	
Portée moyenne mesurée (m)				Pm =			

Débit total de l'installation ($Q \times N$) = m³/h

Variation maxima de pression : $200 \times [(Pf - Pd) / (Pf + Pd)] = \dots \%$

Écart par rapport à une pression moyenne souhaitable :

$$Ps = \dots \text{ (bar)} = 100 (Pm - Ps) / Ps = \dots \%$$

Implantation

Implantation constatée $L = \dots\dots\dots$ $l = \dots\dots\dots$ m ☐ Δ

Portée de l'arroseur annoncée sur les abaques $\dots\dots\dots$ m à $\dots\dots\dots$ bar

Implantation souhaitable (voir tableau) $\dots\dots\dots \times \dots\dots\dots$ ☐ ou $\dots\dots\dots \times \dots\dots\dots \Delta$

Dose apportée

Temps par position d'arrosage (t) = $\dots\dots\dots$ heures

$$D_{mm} = (1\,000 \times Q \times t) / (L \times l)$$

Df =	Dm =	Df =
------	------	------

Dose annoncée par l'irrigant (D_a) = $\dots\dots\dots$ mm

Variation entre la dose moyenne apportée (D_m) et la dose annoncée par l'irrigant :

$$(D_a - D_m) / D_a = \dots\dots\dots \%$$

Variation maximum de dose $200 (D_f - D_d) / (D_f + D_d) = \dots\dots\dots \%$

Nombre d'arroseurs par tertiaire

Nombre d'arroseurs	Pente tertiaire	Pressions relevées		Variation = $200 \times (P_1 - P_d) / (P_1 + P_d)$
		Premier arroseur (P_1)	Dernier arroseur (P_d)	

Diagnostic du fonctionnement d'une installation de couverture intégrale en petits arroseurs

Chez $\dots\dots\dots$

Adresse $\dots\dots\dots$

Couverture intégrale marque $\dots\dots\dots$ Date du contrôle $\dots\dots\dots$

Arroseurs marque $\dots\dots\dots$ Type $\dots\dots\dots$

Écartement $\dots\dots\dots 12 \times 18, 18 \times 18, 18 \times 21, 18 \times 24, 21 \times 24, 24 \times 24$

Implantation ☐ Δ

Éléments de diagnostic

	Observé	Souhaitable	Observations
Débit de l'installation			
Débit moyen par arroseur			
Pression moyenne		3,5 bars	
Variation extrême de pression		Moins de 20 %	
Dose moyenne			
Variation extrême de dose		10 %	
Nombre d'arroseurs par tertiaire			
Implantation			

Appréciation générale

Fiches réalisées conjointement par le BCMA, la CRAMP, les SUAD des chambres d'agriculture du Tarn, de la Haute-Garonne, du Gers et INRAE.

Diagnostic du fonctionnement d'une installation de couverture intégrale en petits arroseurs

Mode d'emploi de la fiche diagnostic

Cultures irriguées, type de sol, débit d'équipement

Il s'agit de cultures irriguées l'année en cours.

Le débit d'équipement souhaitable est à calculer par l'enquêteur au moment du contrôle, ou plus tard sur la base des références locales préétablies.

Exemple : références établies par le SUAD du Tarn en irrigation de couverture intégrale :

	Maïs
Sol à bonnes réserves	1,5 m ³ /heure/ha
Sol à réserves moyennes	1,9 m ³ /heure/ha
Sol à faibles réserves	2,3 m ³ /heure/ha

Les caractéristiques du type de sol le plus représentatif de l'exploitant doivent être précisées par l'enquêteur en fonction des références locales connues.

Le vent

Il est difficile de le caractériser de manière fréquentielle pour une région donnée. À défaut de relevés fiables, l'enquêteur se référera à l'expérience de l'agriculteur.

Le matériel

Le diamètre des buses utilisées est inscrit sur la buse elle-même.

Les caractéristiques du groupe de pompage (type de pompe, puissance moteur, vitesse de rotation, etc.) doivent être relevées sur les plaques fixées sur la pompe et le moteur.

Pratique de l'irrigation

Les questions sont posées à l'irrigant avant la phase de contrôle du matériel.

L'enquêteur doit s'assurer :

- que le sens des questions est complètement compris par l'agriculteur ;
- que celui-ci ne se réfère pas à un document écrit ou à toute autre source d'information autre que sa propre connaissance du sujet ;
- que la réponse est bien notée dans la colonne appropriée : annoncée fermement, estimée, ne sait pas.

Contrôle de l'installation

Conditions des mesures

La position choisie pour le contrôle de l'installation devra, autant que possible, comporter trois types d'arroseurs représentatifs de l'ensemble du parcellaire, parmi ceux qui :

- reçoivent le plus de pression (position favorable), qu'ils soient placés près de l'alimentation en eau, en début de ligne ou en position basse ;
- reçoivent le moins de pression (position défavorable), qu'ils soient placés loin de l'alimentation en eau, en fin de ligne ou en position haute ;
- sont situés en conditions de pression moyenne (position moyenne).

- Noter la configuration générale de l'installation : tertiaires en pente montante, descendante, dévers, plat.
- Mesurer la pente moyenne au moyen d'un clisimètre.
- Relever le nombre d'arroseurs fonctionnant en même temps.

Pression des arroseurs, débit, portée

Trois arroseurs (un par catégorie précédente) seront sélectionnés, et pour chacun l'enquêteur déterminera :

- La pression de fonctionnement

Mesurer la pression à la buse de chacun de ces trois arroseurs au moyen d'un pitot-tube : enfoncer le moins possible l'embout pitot à l'intérieur de la buse pour éviter de modifier sensiblement le débit et la pression.

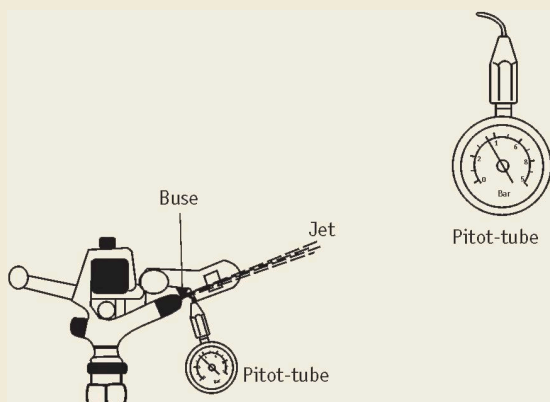


Figure 4A.1. Mesure de la pression avec le pitot-tube.

- Le débit

Il sera déterminé à partir des abaques de l'arroseur en fonction :

- de la ou des buses utilisées ;
- de la pression mesurée.

L'enquêteur pourra évaluer le débit total de l'installation ($q_m \times N$) et le comparer au débit horaire souhaitable (section « Capacité d'infiltration », p. 174).

- La portée

Elle sera mesurée uniquement sur l'arroseur situé en position moyenne.

L'enquêteur retiendra la portée moyenne entre quatre mesures perpendiculaires.

$$P_m = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 4$$

- L'implantation

L'implantation souhaitable peut être déterminée :

- soit en fonction de la portée moyenne observée (P_m) ;
- soit en fonction de la portée annoncée sur les abaques de l'arroseur et de l'importance du vent dans la région.

Se référer au tableau 4.3.

- La dose apportée

Pour les trois arroseurs sélectionnés, la dose apportée sera calculée en fonction :

- du débit de l'arroseur (Q en m^3 /heure) ;
- du temps moyen par position (t en heures) ;
- de l'implantation ($L \times l$ en m^2).

$$D_{mm} = (1\,000 \times Q \times t) / (L \times l)$$

- Nombre d'arroseurs par tertiaires

Pour les tertiaires le plus long, le plus pentu ou le plus défavorisé en pression, relever le nombre d'arroseurs desservis ainsi que la pression au premier et au dernier arroseur.

Appréciation générale

Elle doit faire la synthèse des défauts constatés sur l'installation et proposer éventuellement de nouveaux réglages.

Les 3^e et 4^e pages seront renvoyées à l'agriculteur à l'issue du dépouillement de sa fiche.

Matériel nécessaire

- 2 à 3 manomètres (0-10 bars) vérifiés au manotest et munis de pitot-tubes suffisamment fins ;
- un double-décamètre à ruban ;
- un tabouret à fond plat permettant d'accéder aux buses (les pieds des escabeaux traditionnels risquent de s'enfoncer dans le sol) ;
- un vêtement de pluie serré aux poignets ;
- des chaussures imperméables ;
- 1 clisimètre ;
- 1 petite clé à molette ;
- 1 pince multiprise ;
- 1 rouleau de téflon.



© INRAE.

ANNEXE 2

Diagnostic du fonctionnement d'un enrouleur

BCMA RNED-HA

Date..... Nom de l'enquêteur.....

Nom de l'agriculteur.....

Adresse complète.....

Téléphone.....

Caractéristiques des parcelles irriguées (voir mode d'emploi de la fiche p. 185)

Cultures	Surface irriguée (ha)		Volume d'eau apporté par ha/an en moyenne	Débit d'équipement souhaitable		
	Totale	Par l'enrouleur testé		m³/h/ha	Total	Pour l'enrouleur testé
Maïs						
Soja						
.....						
.....						
.....						
Total				

Ressources en eau		Volume disponible	Débit disponible	Observations
Retenue collinaire	<input type="checkbox"/>			
Rivière	<input type="checkbox"/>			
Forage	<input type="checkbox"/>			
Puits	<input type="checkbox"/>			
Borne d'irrigation	<input type="checkbox"/>			

Sol		Type de sol	Profondeur d'enracinement	Réserve utile estimée
Sol à faible réserve	<input type="checkbox"/>	 m	..... mm
Sol à réserve moyenne	<input type="checkbox"/>	 m	..... mm
Sol profond à bonnes réserves	<input type="checkbox"/>	 m	..... mm

Vent		Observations
Rare	<input type="checkbox"/>	
Génant	<input type="checkbox"/>	
Génant souvent	<input type="checkbox"/>	
Empêche de temps en temps d'irriguer	<input type="checkbox"/>	
Empêche souvent d'irriguer	<input type="checkbox"/>	

Le matériel (voir mode d'emploi de la fiche p. 185)

L'enrouleur

		Oui	Non
Marque			
Type	Régulation mécanique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Année de fabrication	Régulation électronique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Année d'achat	Manomètre entrée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ø PET	Manuel de réglage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L PET			
Nombre de lits de spires :			
Moteur hydraulique : Piston <input type="checkbox"/> Vérin souple <input type="checkbox"/> Turbine <input type="checkbox"/>			

Le pompage

Groupe électrique <input type="checkbox"/> Groupe diesel <input type="checkbox"/> Tracteur <input type="checkbox"/> Borne <input type="checkbox"/>			
Débit horaire disponible m ³ /h			
Pression de refoulement bar		Oui	Non
Puissance moteur ch	Mano au canon ou sur son support	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Le canon

	Canon à retour lent	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Marque	Abaque débit/pression du canon	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type	Régulateur de pression	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Buses utilisées	Contrepoids	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pratique de l'irrigation (voir mode d'emploi de la fiche p. 185)

Interview de l'agriculteur		Annoncé fermement par l'irrigant	Estimé par l'irrigant	Ne sait pas
Buse utilisée le jour du contrôle	Ø			<input type="checkbox"/>
	type			<input type="checkbox"/>
Pression au canon				<input type="checkbox"/>
Débit moyen de l'enrouleur				<input type="checkbox"/>
Portée du canon				<input type="checkbox"/>
Espacement entre passages				<input type="checkbox"/>
Dose d'eau apportée le jour du contrôle (DA)				<input type="checkbox"/>
Variation de vitesse au cours d'un enroulement (%)				<input type="checkbox"/>
Autres modèles de buses				
Êtes-vous satisfait de la qualité de répartition de l'eau sous le canon ? Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Ne sait pas <input type="checkbox"/>				
Pourquoi ?				

Fiche de contrôle de l'enrouleur

Contrôle de l'enrouleur¹

Vérification des manomètres						
	Juste	Faux	Variation constatée avec manotest			
Mano avec enrouleur		 %			
Mano canon		 %			
Conditions des mesures						
Pente moyenne %						
Détermination de la pente moyenne de l'enrouleur						
Réglage du canon						
		À gauche		À droite		Moyenne ou totale
	Portée moyenne observée					
	Temps de balayage par demi-secteur (secondes)	Aller	Retour ¹	Aller	Retour ¹	
	Angle arrosé
		Surface du secteur arrosé (S)			 m ²
	Trop fermé	<input type="checkbox"/>			Décalé à gauche	<input type="checkbox"/>
	Trop ouvert	<input type="checkbox"/>			Décalé à droite	<input type="checkbox"/>

¹ Si canon à retour lent.Contrôle de l'enrouleur²

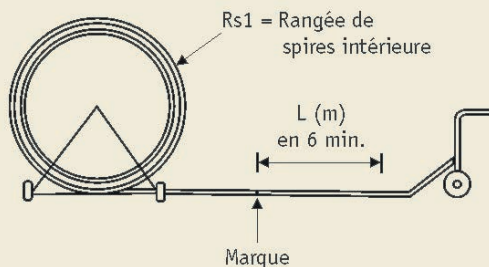
Intervalles de passage

Intervalle moyen adopté par l'agriculteur : m

Portée annoncée sur les abaques du canon : m à bar

Intervalle maximum souhaitable : m

Débit – Vitesse d'avancement – Dose apportée

² À prendre en compte seulement si le contrôle a été fait sur quatre rangées de spires au moins.

Diamètre de la buse utilisée mm < conique ☐
 pouces pastille ☐

Rangée de spires	Pression du canon	Débit relevé sur abaque (m ³ /h)	Vitesse d'avancement (V m/h)	Dose calculée $D_{mm} = 1\,000\, Q / (V \times E)$
RS 1				
RS 2				
RS 3				
RS 4				
RS 5				
	Moyenne	Qm =	Vm =	Dm =

Variation entre la dose moyenne apportée (Dm) et la dose annoncée par l'irrigant (DA) :

$$(DA - DM) / DA \times 100 = \dots \%$$

Variation maxima de vitesse (donc de dose) :

$$(V_{max} - V_{min}) / (V_{max} + V_{min}) \times 100 = \dots \%$$

$$\text{Pluviométrie horaire} = (Q_m \times 1\,000) / S \text{ (m}^2\text{)} = \dots \text{ mm}$$

IRRIGATION LOCALISÉE OU MICRO-IRRIGATION

François Gontard, Bruno Molle, Jérémy Nouvian

Principes de fonctionnement

Comme son nom l'indique, l'irrigation localisée, ou micro-irrigation selon l'appellation internationale, consiste à irriguer en humidifiant seulement une partie localisée du sol. Sous climat aride, il s'ensuit que seule cette partie de sol est colonisée par les racines de la culture. En région tempérée, les racines se développent dans l'ensemble du sol humecté grâce aux pluies, et la partie du volume de sol irriguée par micro-irrigation ne constitue qu'une fraction du volume de sol exploité par les racines, dans laquelle la culture s'alimentera en eau en période sèche (figure 5.1).

En pratique, le terme d'irrigation localisée englobe à la fois le goutte-à-goutte et la micro-asperion, selon la définition de l'ISO, et concerne les distributeurs dont le débit individuel est inférieur à 150 l/h.

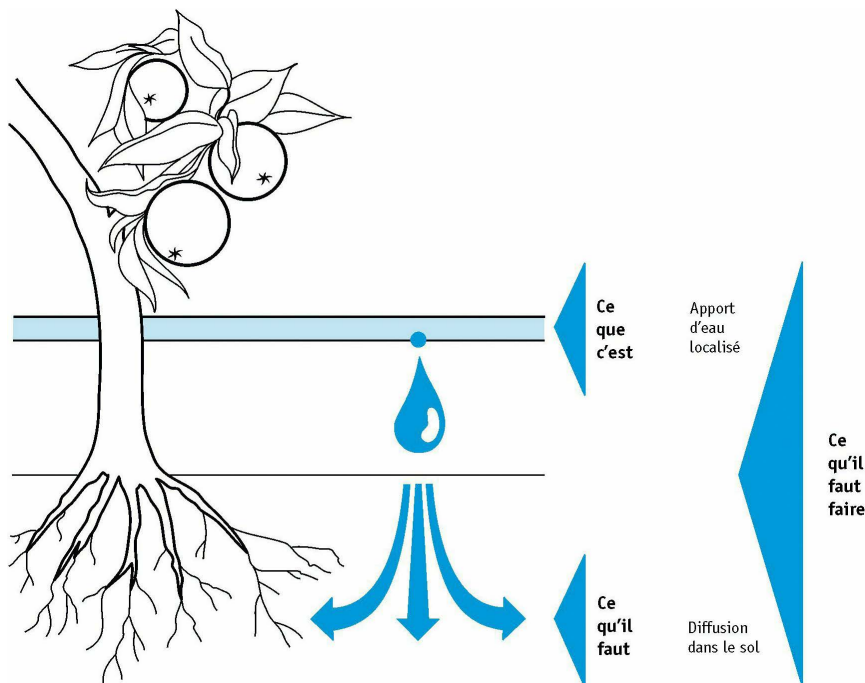


Figure 5.1. En irrigation localisée, l'eau diffuse à partir d'un point d'apport et n'humidifie qu'une partie du sol.

Cette méthode d'arrosage est fondamentalement différente de celles de l'irrigation de surface ou par aspersion, qui consistent à réapprovisionner en eau, périodiquement, tout ou partie de l'ensemble du réservoir du sol. Dans ce cas, des doses d'eau relativement importantes (plusieurs dizaines de mm) sont apportées à chaque arrosage sur l'ensemble de la parcelle irriguée. La réserve d'eau ainsi constituée dans le sol permet d'allonger le laps de temps qui sépare deux arrosages successifs (en général de 3 à 10 jours) au prix d'une part d'évaporation directe à partir de la surface du sol.

En irrigation localisée, l'ensemble des réserves en eau du sol n'est pas reconstitué. L'eau dont a besoin la plante est apportée en petites quantités, une ou plusieurs fois par jour, de façon ponctuelle (goutte-à-goutte) ou sur une petite surface (diffuseurs). Elle diffuse tant radialement sous l'effet des forces capillaires que verticalement sous l'effet de la gravité, dans un volume de sol limité au voisinage des racines, dans lequel la plante puisera.

Il est fondamental de bien maîtriser le volume de sol humidifié et, au travers des quantités d'eau fournies à chaque apport, la fréquence des apports pour satisfaire les besoins de la plante au fur et à mesure de ses consommations en eau.

Dans le cas de l'**irrigation goutte-à-goutte**, mode spécifique de la micro-irrigation à très faible débit (moins de 8 l/h), il se forme sous le goutteur une zone saturée de faible volume, d'où la majeure partie de l'eau diffuse par capillarité. On parle souvent de bulbe d'humectation.

Pour un débit et une durée d'arrosage déterminés, la forme et les dimensions du volume de sol humidifié (extension latérale et profondeur d'humectation) dépendent essentiellement des caractéristiques hydrodynamiques du sol (figure 5.2) et de son degré de siccité.

Sur les sols argileux présentant des phénomènes de retrait-gonflement, les apports en eau doivent être gérés de façon à éviter l'apparition de fentes de retrait liées à une trop grande dessiccation, qui perturbent fortement la diffusion de l'eau dans le sol et peuvent endommager les racines.

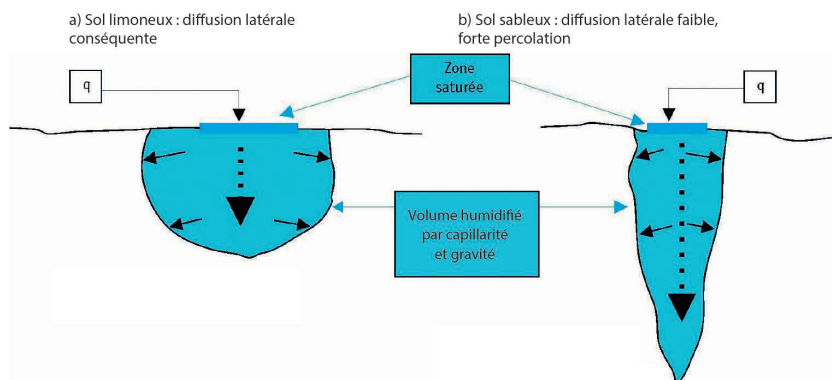


Figure 5.2. Formes du volume de sol humidifié suivant les caractéristiques du sol.
q : quantité d'eau.

Attention

- Il faut que les quantités d'eau apportées à la plante par le biais du volume de sol humidifié soient suffisantes pour satisfaire ses besoins (voir section « Les bases de conception », p. 218).
- Il faut noter que plus le volume humidifié est petit, plus l'arrosage est risqué ; car aucune réserve tampon n'est disponible en cas de défaillance du réseau d'irrigation.
- Il est conseillé d'humidifier au moins 30 % du volume de sol occupé par les racines (voir section « Les bases de conception », p. 218).

Parallèlement au mode d'irrigation goutte-à-goutte, s'est développée l'irrigation par diffuseurs, par micro-asperseurs ou par ajutages (figure 5.3) qui entrent dans la catégorie de l'irrigation localisée.

Les diffuseurs et les micro-asperseurs arrosent de petites surfaces de sol par aspersion, sous forme de taches ; c'est une technique intermédiaire entre le goutte-à-goutte et l'aspersion, avec un débit par point d'apport qui peut aller jusqu'à 150 l/h. Les valeurs les plus fréquentes étant comprises entre 30 et 80 l/h, à une pression variant entre 1 et 3 bars, ils existent aussi en version avec régulation de pression. Elle permet de s'affranchir des contraintes liées aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (forte conductivité et faible capillarité) ou à la présence de macropores dues à la fissuration ou à la faune du sol, lorsque des contraintes de ce type ne permettent pas un fonctionnement acceptable du goutte-à-goutte ou nécessitent une trop forte densité de gouteurs.

Les ajutages alimentent en eau la surface du sol avec des débits équivalents aux micro-asperseurs, à pression réduite (moins de 1 bar), sous forme de petites flaques ou de petits bassins à partir desquels l'eau s'infiltre progressivement. Ce mode d'irrigation peut permettre de moderniser les systèmes d'irrigation de surface traditionnels par petits bassins avec des exigences moindres que le goutte-à-goutte en termes de filtration.

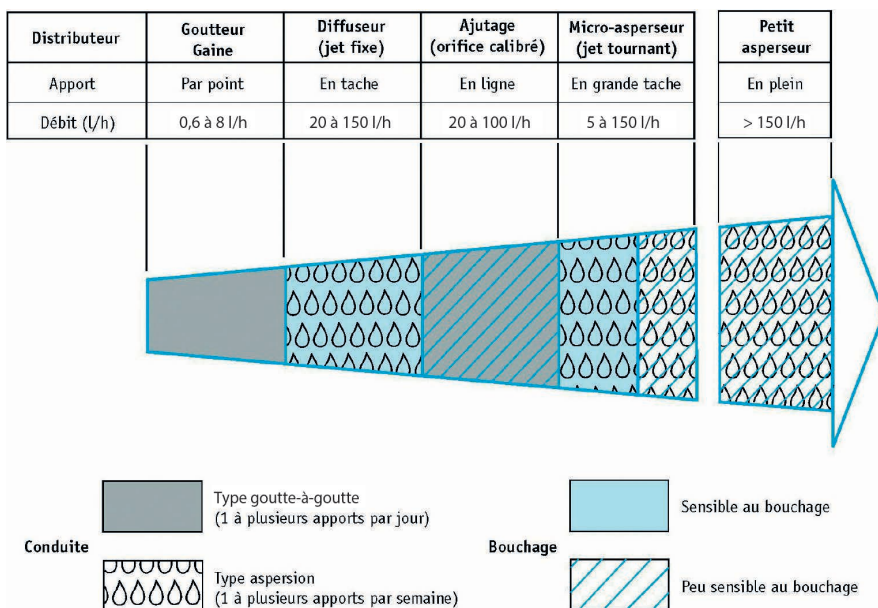


Figure 5.3. Caractéristiques principales des dispositifs d'irrigation localisée : gamme de débits, mode de distribution, sensibilité au bouchage.

Caractéristiques de l'irrigation localisée

Les grands principes de l'irrigation localisée sont les suivants :

- elle n'arrose qu'une fraction du sol donc limite l'évaporation à partir de la surface du sol ;
- elle nécessite de faibles débits et de faibles pressions ;
- elle met en œuvre des équipements fixes et légers ;
- elle ne mouille en général pas le feuillage ;
- elle peut être enterrée à 5 cm pour les gaines en culture annuelle et à 30-40 cm en système pérenne ;
- elle convient bien à l'irrigation fertilisante ;

- elle est peu encombrante et donc gêne peu les autres interventions sur la culture ;
- elle justifie dans la plupart des cas l'automatisation, car elle nécessite des apports fréquents et fractionnés.

Ce qui est nécessaire

S'adapter à la qualité de l'eau

Les faibles sections de passage de l'eau dans les distributeurs pouvant être inférieures à 1 mm², elles nécessitent une eau exempte de matière en suspension pour prévenir le colmatage. Les ajutages, et plus généralement les micro-asperseurs, sont moins sensibles au colmatage du fait de la taille de la buse, mais nécessitent tout de même une filtration.

La filtration retire les matières en suspension de taille supérieure à la taille de la maille, mais aussi une bonne part des plus petites. L'origine de l'eau est l'élément prioritaire à prendre en compte dans le choix du type de filtration :

Eau de surface (lac, rivière)	Eau de nappe (puits, forages)
Filtre(s) à sable + filtre(s) à tamis ou à disque	Filtre(s) à tamis ou à disque

La finesse de la filtration doit être adaptée au type de distributeur (voir section « La filtration », p. 207), elle doit être précisée par le fabricant.

Analyser les conditions de fonctionnement

L'installation est fixe, c'est-à-dire qu'elle est :

- mise en place pour toute la durée de la culture (une quinzaine d'années en arboriculture et au-delà en viticulture) ;
- difficilement modifiable si cela n'a pas été prévu au départ ;
- dimensionnée pour satisfaire les besoins de pointe de la culture.

En conséquence, elle doit faire l'objet de calculs techniques et économiques préalables afin d'être correctement adaptée aux conditions d'exploitation.

Le devis de l'installation doit s'appuyer sur une étude complète et le coût d'investissement dans l'installation ne doit pas être le seul critère de choix. En effet, l'entretien, la facilité et le temps de mise en œuvre, la robustesse d'une installation peuvent limiter les performances attendues sur la durée de vie du dispositif et nuire à la rentabilité.

L'analyse technique préalable doit :

- déterminer les besoins en eau et les confronter aux ressources en eau disponibles sur l'exploitation ;
- choisir des matériels adaptés au régime d'irrigation, lui-même dépendant du type de plante, et à la qualité de l'eau ;
- raisonner la disposition et les dimensions des équipements.

Conduire les arrosages

Il faut satisfaire les besoins des cultures en maintenant un volume de sol humidifié compatible avec l'enracinement des plantes et les possibles restrictions à des périodes clés (impératifs de qualité des produits) pendant toute la saison d'irrigation.

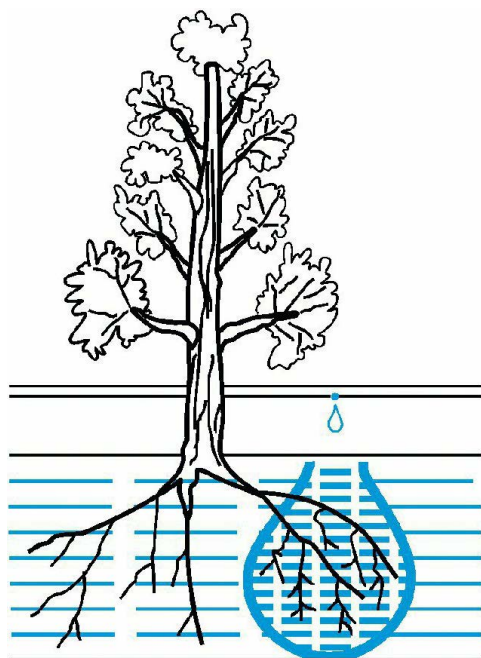


Figure 5.4a. En période humide, la plante puise l'eau dans tout le sol occupé par les racines.

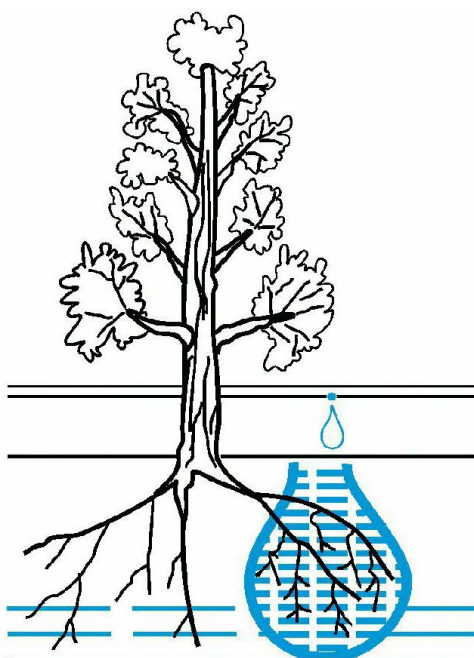


Figure 5.4b. En période sèche, l'eau du sol s'épuise. Seul le volume humidifié par irrigation alimente les racines.

Pour cela, il est nécessaire de :

- démarrer l'irrigation à faible dose sur un sol encore « frais » (donc plus tôt qu'en aspersion) pour profiter pleinement des phénomènes de capillarité et la maintenir, éventuellement à dose réduite, après les pluies, pour éviter la fissuration du sol ou les intrusions (insectes, racines) ;
- adapter les apports au fur et à mesure que l'on avance en période sèche, car la réserve issue des pluies naturelles s'épuise (figure 5.4) ;
- contrôler fréquemment l'état hydrique du sol pour conduire les arrosages ;
- fractionner les apports suivant les caractéristiques du sol, pour éviter les percolations au-delà de la profondeur des racines ;
- maintenir une irrigation réduite en fin de saison sur cultures pérennes, pour éviter les intrusions de racines dans les goutteurs, dans le cas du goutte-à-goutte enterré.

L'automatisation du réseau facilitera la bonne conduite de l'irrigation.

Entretien du réseau

La durée de vie et les performances du réseau dépendent directement du soin apporté à sa maintenance. Indépendamment des choix techniques, il faut veiller à :

- nettoyer les filtres (photo 5.1) dès que leur perte de charge augmente de 0,5 bar environ ;
- contrôler les organes de protection et de régulation ;
- contrôler le débit des distributeurs (par mesure directe ou indirecte en suivant le débit des postes d'irrigation) ;
- purger les rampes en cours de campagne lorsqu'on a affaire à des eaux sales ;

- entretenir les rampes par des injections de produits d'entretien, choisis en fonction de la qualité de l'eau (chlore, acide, peroxyde) ;
- purger l'ensemble du réseau au moins en début et en fin de saison.



Photo 5.1. Station de filtration (© BRLE).

Les distributeurs

En irrigation localisée, l'eau est apportée par une canalisation le long des rangs de culture et distribuée au voisinage des plantes. On distingue deux cas, selon que les deux fonctions, transport et distribution, sont assurées par deux éléments différents ou par le même élément.

• **1^{er} cas.** Le transport est assuré par des canalisations en plastique (polyéthylène en général) appelées « rampes », tandis que les distributeurs sont insérés dans la paroi des rampes sur place pour mieux s'adapter au terrain. On parle de goutte-à-goutte *on-line* ou de goutteurs rapportés.

Les distributeurs peuvent être des goutteurs (photo 5.2), des diffuseurs, des ajutages calibrés, des micro-asperseurs, et peuvent être déportés au moyen d'un tube de faible diamètre, ou *tubing* (photo 5.3).



Photo 5.2. Goutteur *on-line* (© Netafim).



Photo 5.3. Distributeur *on-line* sur tubing (© INRAE/B. Molle).

• **2° cas.** Le transport et la distribution sont assurés par le même élément. Les goutteurs, qualifiés de *in-line*, sont intégrés dans la canalisation (photos 5.4 et 5.5). Suivant la durée de vie souhaitée pour le dispositif, on trouve soit des parois de plus de 500 μm d'épaisseur pour des systèmes pluriannuels, soit des gaines dont les parois plus fines (100 à 500 μm), renouvelées chaque année, intègrent des goutteurs plats, générant moins de pertes de charge, ou des labyrinthes intégrés dans la soudure de la gaine. Cette dernière solution permet de diminuer les coûts de fabrication du matériel mais impose de recycler les gaines, même si les filières n'existent pas toujours.



Photo 5.4. Gaine de micro-irrigation
(© Netafim).



Photo 5.5. Goutteurs *in-line* (© Netafim).

Descriptif technique

Les goutteurs

Les goutteurs apportent l'eau à la surface du sol de manière ponctuelle.

Débit

Les goutteurs ont un faible débit compris entre 0,5 et 8 l/h sous une pression de 1 bar (charge de 10 m de colonne d'eau), la plus fréquemment utilisée. Pour les goutteurs à compensation de pression, celle-ci peut varier de 0,5 à 4,0 bars.

Dans la pratique, les débits les plus courants sont :

- 1 à 2 l/h pour les cultures maraîchères ou sous abri ;
- 1,6 à 4 l/h pour les cultures pérennes (arbres fruitiers, vignes).

Fonctionnement hydraulique

À travers le goutteur, l'eau suit un cheminement plus ou moins long (0,1 à 1 m une fois développé) qui provoque la dissipation de la pression sous forme de perte de charge.

Il existe des goutteurs à circuit uniforme (les plus anciens et aujourd'hui quasiment plus fabriqués) et des goutteurs à circuit non uniforme.

Dans les *goutteurs à circuit uniforme* (capillaire, figure 5.5 et photo 5.6), la section de passage de l'eau est constante tout le long du cheminement. Les pertes de charge sont engendrées par le frottement de l'eau le long des parois du tube capillaire et le débit est donc fonction de la longueur du capillaire et de la pression de fonctionnement.

Dans les *goutteurs à circuit non uniforme*, dits « à chicanes » ou « à labyrinthe » (photo 5.7), des changements brusques de direction du filet liquide provoquent un effet de turbulence qui s'ajoute aux

frottements le long des parois pour accentuer l'effet des pertes de charge et éviter le dépôt des particules. Les sections de passage sont, pour un même débit, plus importantes que celles des goutteurs à circuit uniforme : elles varient d'un peu moins de 1 mm² jusqu'à 4 mm².

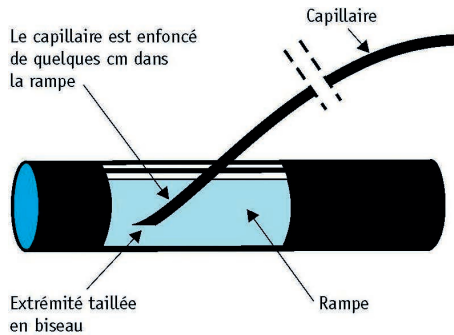


Figure 5.5 et photo 5.6. Goutteur à circuit uniforme (capillaire).



Photo 5.7. Goutteur à circuit non uniforme (© Netafim).

Mode de fixation sur la rampe

Les **goutteurs montés en dérivation** sont fixés sur la rampe par l'intermédiaire d'un embout appelé « tête de vipère ».

Selon les modèles, ils font plus ou moins saillie sur la rampe. Le montage en dérivation des goutteurs sur la rampe s'effectue soit sur le terrain, soit en usine (figure 5.6 et photo 5.8). De telles lignes étant difficiles à déplacer, elles seront donc privilégiées pour des installations fixes.

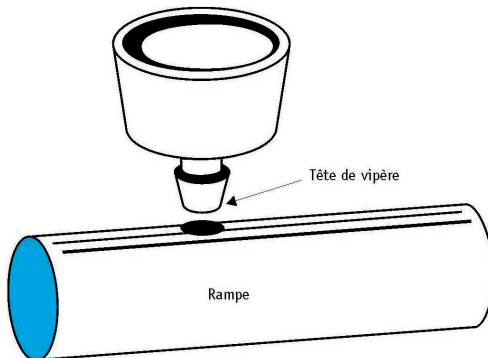


Figure 5.6. Schéma du montage en dérivation du goutteur sur la rampe d'irrigation localisée.



Photo 5.8. Goutteur monté en dérivation (© Netafim).

Les **goutteurs en ligne** ne sont quasiment plus utilisés et sont cités pour mémoire.

Constitués de deux éléments assemblés en usine, ils s'insèrent dans la rampe par l'intermédiaire de deux embouts cannelés (figure 5.7 et photo 5.9). Ce montage est effectué, après tronçonnage du tuyau, à des intervalles réguliers qui varient selon les cultures auxquelles sont destinées les installations (écartements de 0,30 m à 2,5 m).

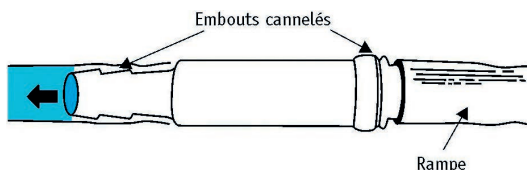


Figure 5.7. Montage d'un goutteur en ligne sur la rampe.



Photo 5.9. Goutteur en ligne.

Pour les **goutteurs intégrés**, l'élément portant le cheminement est mis en place dans le tuyau lors de son extrusion (photo 5.10). Le tuyau n'est pas tronçonné. Comme dans le cas des goutteurs en ligne, les fabricants proposent différents écartements.

C'est la solution la plus vendue aujourd'hui, avec une évolution vers des goutteurs de plus en plus petits et plats, collés sur une face du tube, mais les goutteurs cylindriques, dont certains sont tombés dans le domaine public, restent encore très présents.



Photo 5.10. Vue d'un goutteur intégré (© Netafim).

Sensibilité aux variations de pression

La relation entre le débit d'un distributeur et la pression dans la rampe au niveau de celui-ci est de la forme :

$$Q = K H^x$$

où Q = débit du goutteur (en l/h), K = constante adimensionnelle, H = pression s'exerçant dans la rampe (en m de colonne d'eau), x = exposant caractéristique du goutteur.

En fonction de la sensibilité de leur débit aux variations de pression, on peut classer les distributeurs en deux groupes (tableau 5.1).

Les distributeurs **non autorégulants**, dont le débit varie en fonction de la pression dans la rampe (figure 5.8), sont d'autant moins sensibles aux variations de pression que la valeur de x est faible. Les modèles de goutteurs actuels ont un exposant généralement inférieur ou égal à 0,5.

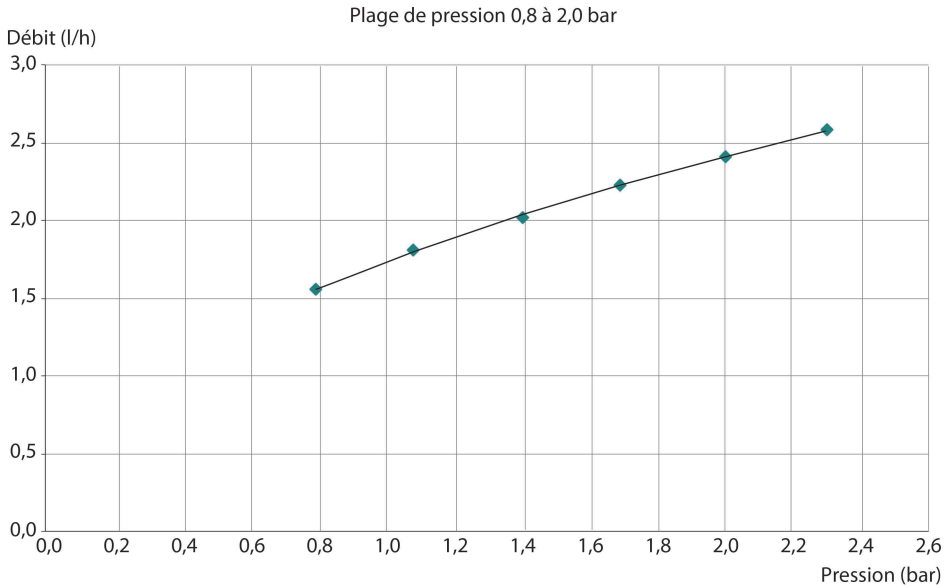


Figure 5.8. Relation débit-pression pour un distributeur non autorégulant de débit nominal 2,2 l/h. Plage de pression : 0,8 à 2,0 bar (source : Bruno Molle).

Les distributeurs **autorégulants**, dont le débit, dans une plage de valeurs de pression définie, est pratiquement constant, sont caractérisés par une valeur de x inférieure à 0,2 (figure 5.9).

La régulation est obtenue par une membrane élastique qui obture plus ou moins le passage de l'eau dans le goutteur selon la pression dans la canalisation.

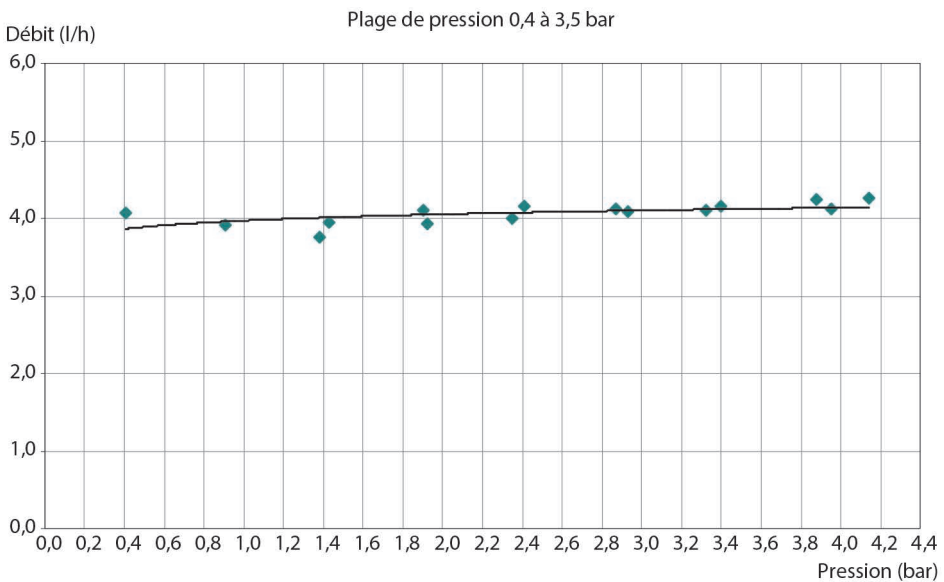


Figure 5.9. Relation débit-pression pour un distributeur autorégulant de 4 l/h sur 25 échantillons (source : Bruno Molle).

Tableau 5.1. Avantages comparés des distributeurs non autorégulants et autorégulants.

	Avantages	Inconvénients
Non autorégulants	Longévité Coût moindre Aptitude supérieure au recyclage	Moins adaptés aux grandes longueurs et aux situations de relief
Autorégulants	Adaptation aux grandes longueurs, au relief et aux fluctuations de pression sur le réseau Conception simplifiée de l'installation Option anti-siphon et anti-vidange	Coût un peu supérieur Non recyclable lorsque la membrane est en silicone

Les évolutions récentes sur le matériel

Les distributeurs autorégulants deviennent le standard actuel, avec un coût qui était anciennement plus élevé que les non autorégulants, mais cet écart se réduit aujourd'hui.

Les formes de goutteurs sont de plus en plus complexes et performantes, permettant d'atteindre de faibles débits tout en ayant une bonne résistance aux contraintes et au colmatage : certains constructeurs proposent des goutteurs à moins de 0,5 l/h, dont le besoin de filtration est de 130 µm.

L'adjonction de cuivre en copeaux ou autre répulsif dans la matière constitutive du goutteur est proposée pour lutter contre les dépôts biologiques et les intrusions racinaires.

Les matières des tubes sont aussi sujettes à évolution, et les constructeurs proposent aujourd'hui des résines de polyéthylène spécifiques qui apportent des résistances à la traction supérieures aux tubes standards et des revêtements ou profilages améliorant la résistance à l'abrasion.

Mode d'installation

Selon les situations, les rampes de goutte-à-goutte peuvent être installées (tableau 5.2) :

- posées directement au sol ;
- suspendues ;
- enterrées.

Tableau 5.2. Avantages comparés des diverses installations de goutte-à-goutte.

	Avantages	Inconvénients
Au sol ou faiblement enterré (< 5 cm)	Surveillance, maintenance, réparation aisées Coût d'installation moindre	Contrainte au travail mécanique du sol Exposition aux agressions (engins, insectes, animaux, etc.)
Suspendu	Surveillance, maintenance, réparation aisées Adapté au travail mécanique du sol Réservé aux cultures pérennes	Coût d'installation majoré (fil porteur, crochets, etc.) Exposition aux agressions (engins, animaux, chasseurs, etc.) Obstacle à la circulation en travers des rangs
Enterré	Efficacité maximum de l'eau et des engrais injectés Adapté au travail mécanique du sol Protection vis-à-vis des agressions	Coût d'installation majoré (pose, collecteur de purge, etc.) Surveillance, réparation complexes Maintenance renforcée nécessaire Sensibilité aux intrusions racinaires

Les mini-diffuseurs et micro-asperseurs

Les mini-diffuseurs fonctionnent comme de petits asperseurs statiques placés à environ 0,30 à 0,50 m au-dessus du sol, qui pulvérisent l’eau sur une partie de la surface du sol au voisinage des cultures.

Les micro-asperseurs possèdent un déflecteur rotatif qui permet de garder une meilleure portée, jusqu’à 5 m avec moins de 1,5 bar de pression.

Débit

Le débit des micro-diffuseurs varie le plus couramment de 20 à 80 l/h, sous une pression de 1 bar, selon les modèles ou plus pour les modèles autorégulants. Celui des micro-asperseurs peut aller à 150 l/h (définition Iso), au-delà on parle de mini-asperseurs.

Pour un même fabricant, les différents modèles sont repérés par des couleurs (tableau 5.3).

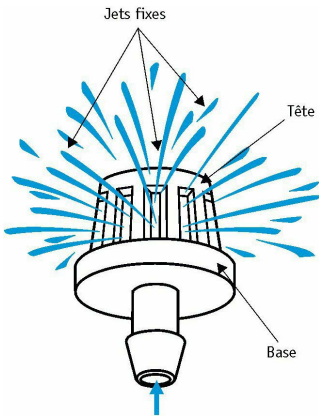


Figure 5.10. Schéma d'un mini-diffuseur.

Tableau 5.3. Exemple de caractéristiques d'une gamme de mini-diffuseurs.

À 0,50 m du sol	Jaune	Orange	Bleu
Pression (bar)	1,0 à 2,0	1,0 à 2,0	1,0 à 2,0
Débit (l/h)	19 à 28	31 à 48	42 à 61
Portée (m)	1,1 à 1,4	1,4 à 2	1,7 à 2,4

Fonctionnement hydraulique

Les mini-diffuseurs sont constitués d’une base comportant un orifice calibré au travers duquel l’eau passe sous forme de jet, et d’une tête formant déflecteur sur laquelle le jet vient se briser (figure 5.10).

Dimensions et forme des surfaces arrosées

Les portées des micro-diffuseurs sont limitées de 1 à 2,5 m, tandis que les micro-asperseurs portent jusqu’à 5 m. La forme des surfaces arrosées varie selon le type de tête utilisé pour les micro-diffuseurs (figure 5.11). Elle est circulaire pour les micro-asperseurs.

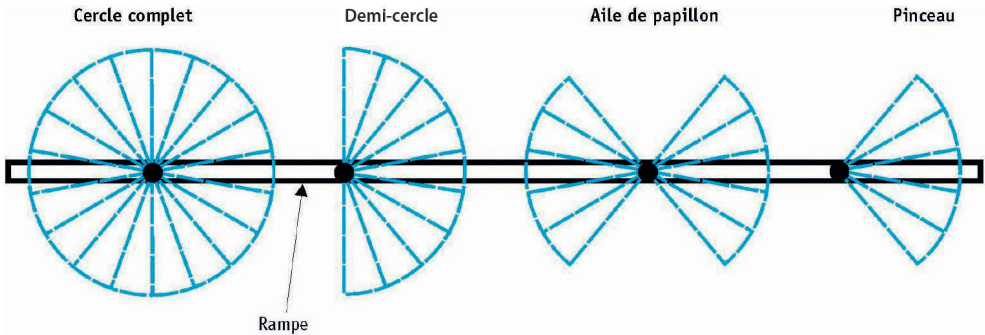


Figure 5.11. Forme des surfaces irriguées en localisé avec des mini-diffuseurs.

Fixation sur la rampe

Tous les mini-diffuseurs et micro-asperseurs sont montés en dérivation. Ils sont :

- soit fixés directement sur la rampe (photo 5.11) ;
- soit reliés à celle-ci par un tube adducteur ou prolongateur (photo 5.12). Dans ce cas, le distributeur est placé sur un support particulier.



Photo 5.11. Mini-diffuseur monté sur la rampe.



Photo 5.12. Mini-diffuseur relié à la rampe par un tube conducteur.

Les ajutages (procédé Bas-Rhône)

Les ajutages sont constitués d'orifices calibrés de 1,2 à 2,1 mm de diamètre (figure 5.12), fixés en dérivation sur la rampe à intervalles réguliers (2,5 à 6,5 m) et recouverts d'un brise-jet. Selon le diamètre de l'ajutage, son débit varie de 35 à 100 l/h, sous une pression de 1 bar. L'eau distribuée par les ajutages s'écoule dans de petits bassins d'où elle diffuse (photo 5.13).

Remarque

Ce mode d'irrigation se rapproche d'une irrigation de type gravitaire, mais la distribution localisée élimine les pertes d'eau relativement importantes dans les canaux de distribution gravitaire.

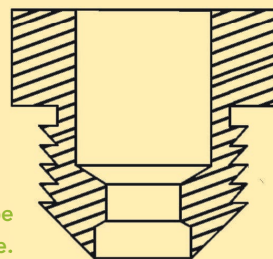


Figure 5.12. Schéma en coupe d'un ajutage.



Photo 5.13. Dispositif d'irrigation par ajutage calibré (5.13 droite : © INRAE/B. Molle).

Les gaines

Les gaines sont constituées de tuyaux en polyéthylène (PE) souple, ce qui limite leur encombrement, qui assurent à la fois les fonctions de transport et de distribution de l'eau. Elles sont fabriquées par soudure ou par extrusion.

Les constructeurs proposent différentes épaisseurs, de durée de vie variable. Elles sont le plus souvent prévues pour durer une saison, mais certaines peuvent être réutilisables. Aplaties au repos, elles se gonflent sous l'effet de la pression.

Le débit des gaines est généralement compris entre 1 et 8 l/h par mètre linéaire, suivant l'écartement des orifices (20 à 120 cm) et la pression (0,15 à 1 bar).

Les gaines à cheminement long

L'eau sort après avoir suivi un cheminement plus ou moins long et plus ou moins uniforme, formé à chaud à la fabrication dans le matériau du tube ou intégré sous la forme d'une bande contenant le canal qui est thermosoudée (figure 5.13).

Les gaines avec goutteurs plats

Les progrès faits dans les matières plastiques ont permis l'arrivée de gaines (faible épaisseur de parois, faible coût) intégrant des goutteurs plats de petite taille (photo 5.14). Du fait de la faible épaisseur des parois, ces gaines sont produites à faible coût.

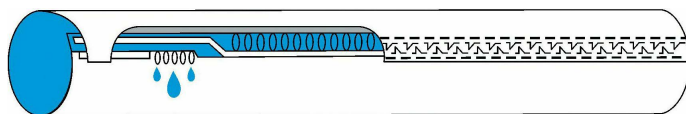


Figure 5.13. Schéma du trajet de l'eau dans une gaine à cheminement long.

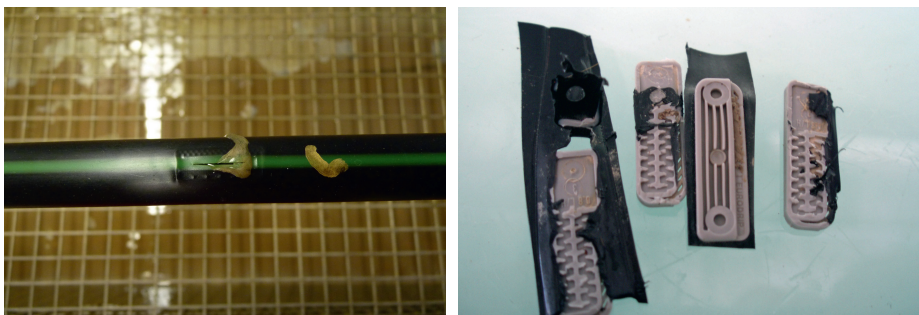


Photo 5.14. Goutteur plat intégré dans sa gaine (© INRAE/B. Molle).

Caractéristiques et aptitudes des distributeurs

La qualité essentielle des distributeurs de micro-irrigation réside dans la régularité et la stabilité de leur débit, qui dépendent notamment de :

- l'homogénéité de fabrication, qui qualifie la régularité des caractéristiques des distributeurs d'un même type dans les lots de fabrication ;
- la tolérance aux variations de pression, qui caractérise la sensibilité du débit du distributeur aux variations de pression ;
- l'écart par rapport au débit nominal, qui est la différence entre le débit nominal annoncé par le constructeur et le débit moyen observé sur un lot de 25 goutteurs tirés au hasard ;
- la sensibilité au bouchage par les éléments transportés dans l'eau d'irrigation.

Une appréciation de l'aptitude d'un distributeur pour chacun de ces critères peut être faite à partir de résultats d'essais, suivant une échelle d'appréciation établie par l'ISO TC23 SC18 pour les deux premiers critères. Ces critères et le classement des performances des distributeurs peuvent être établis à la suite d'essais réalisés par Irstea (devenu INRAE), et moins d'une dizaine d'autres laboratoires équivalents dans le monde, et sont donnés ci-après.

Il est à noter que les résultats mentionnés caractérisent le matériel fabriqué à une période donnée, tant que les plastiques et les différents modes de fabrication ne changent pas. Les évolutions des matériaux, des fournisseurs de matériaux, des machines et les fluctuations de fabrication peuvent induire des variations des caractéristiques des lots de matériel livrés. L'essentiel est de rester dans les spécifications minimales, et pour le vérifier les essais doivent être renouvelés périodiquement. Les essais d'INRAE sont considérés comme valables sur une durée de 5 ans.

Les essais réalisés

Le test d'homogénéité de fabrication (norme ISO 9261) consiste à déterminer le coefficient de variation CV, calculé à partir de mesures de débit q effectuées sur 25 exemplaires neufs de distributeurs, à une température de l'eau standard ($23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$) et à une pression nominale ou au milieu de la plage de régulation de pression.

$$CV\% = \sigma(q)/q_m$$

avec $\sigma(q)$: écart type sur les débits des distributeurs et q_m : débit moyen.

La **sensibilité à la pression** est traduite par la valeur de l'exposant x de la loi débit-pression du distributeur : $Q = KH^x$

Les coefficients K et x sont calculés à partir des débits moyens de 25 exemplaires au moins de distributeurs choisis suivant une procédure normalisée, pour des pressions variant par palier de 0,5 bar.

L'écart Δ entre le débit mesuré q_m et le débit nominal q_n est également un critère de qualité :

$$\Delta = (q_m - q_n)/q_n$$

$$CV\% = \sigma(q)/q_m$$

La **sensibilité au bouchage** physique est mesurée sur 8 exemplaires au moins de distributeurs qui ont servi à l'essai précédent. L'essai comporte quatre phases successives de 40 heures, au cours desquelles le débit de chaque exemplaire est mesuré journalièrement, des particules minérales de granulométrie croissante sont ajoutées à l'eau à chaque phase. Ce protocole pratiqué depuis 1974 par INRAE est en cours de normalisation à l'ISO TC23 SC18.

Critères de classement

Homogénéité de fabrication

L'homogénéité de fabrication est appréciée à partir de la valeur du coefficient de variation CV, avec les classes et appréciations suivantes :

Valeur de CV%	0	5	10	15
Appréciation par classe	Très bonne	Bonne	Médiocre	Mauvaise

Selon la norme ISO, une production est conforme si le CV mesuré est inférieur à 7 %, aboutissant à deux catégories de qualité : bonne ou mauvaise suivant qu'on est en dessous ou au-dessus de la valeur de 7 %.

Tolérance aux variations de pression

La tolérance aux variations de pression est estimée à partir de la valeur de l'exposant x de la loi débit-pression.

La quasi-totalité des distributeurs non autorégulants (NPC) aujourd'hui présents sur le marché sont très tolérants, avec une valeur de x inférieure à 0,5.

Sensibilité à l'obstruction physique

La sensibilité à l'obstruction est appréciée à partir du comportement du distributeur au cours des quatre phases d'essai d'obstruction, et aboutit à la recommandation de la finesse de filtration à adopter pour éviter l'obstruction.

Comportement	Appréciation par classe	Finesse de filtration
Le distributeur s'est bouché en 1 ^{re} phase	Ultra-sensible	< 80 μm
Le distributeur s'est bouché en 2 ^e phase	Très sensible	80 μm
Le distributeur s'est bouché en 3 ^e phase	Sensible	100 μm
Le distributeur s'est bouché en 4 ^e phase	Peu sensible	125 μm
Le distributeur ne s'est pas bouché en 4 ^e phase	Très peu sensible	150 μm

Classement

Les caractéristiques et le classement des principaux matériels d'irrigation localisée commercialisés sont consultables sur demande à INRAE²¹ et sur le site du CIT²².

La filtration

Il n'y a pas d'irrigation localisée sans filtration.

La filtration a pour objet d'extraire de l'eau, destinée à être injectée dans les goutteurs, les impuretés susceptibles de sédimenter peu à peu dans les distributeurs, de se trouver bloquées et d'en altérer le bon fonctionnement par obstruction ou en perturbant le fonctionnement de la membrane des goutteurs autorégulants.

Le poste de filtration



Photo 5.15. Poste de filtration combinant trois filtres à sable et un filtre à tamis (© INRAE/B. Molle).

²¹ <https://www.inrae.fr>

²² Center for Irrigation Technology, <http://www.fresnostate.edu/jcast/cit/goods/drip-emitters/index.html>.

Les dispositifs de filtration installés doivent être adaptés aux caractéristiques de l’eau brute à traiter et à celles requises par les distributeurs de l’installation (tableau 5.4, photo 5.15 et figure 5.14).

Tableau 5.4. Choix des filtres en fonction de la nature de l’eau brute.

Origine de l'eau		Nature des impuretés	Filtration	Option
Eau de surface	Rivières, canaux, lacs collinaires	Argiles, limons, algues, bactéries, particules	Filtre à sable et filtre à tamis (ou à disques)	Filtre flottant
Eau souterraine	Puits, forages	Limons, sables, fer	Filtre à sable et tamis ou tamis seul (si peu de limons)	Séparateur hydrocyclone (si particules denses) Déferrisation (coût élevé)
Eaux usées traitées	Sortie de station d'épuration	Particules organiques et minérales, nutriments (N et P)	Filtre à sable et tamis (ou à disques)	Injection d'acide et de chlore périodiquement

Pour une capacité de filtration donnée, on a intérêt à prévoir plusieurs petits filtres en parallèle plutôt qu’un seul gros filtre, car le lavage d’un filtre est d’autant plus difficile et plus long que celui-ci est gros. Avec plusieurs filtres, on peut effectuer des lavages tout en conservant le réseau d’irrigation en fonctionnement. Il est recommandé de laver les filtres avec de l’eau propre.

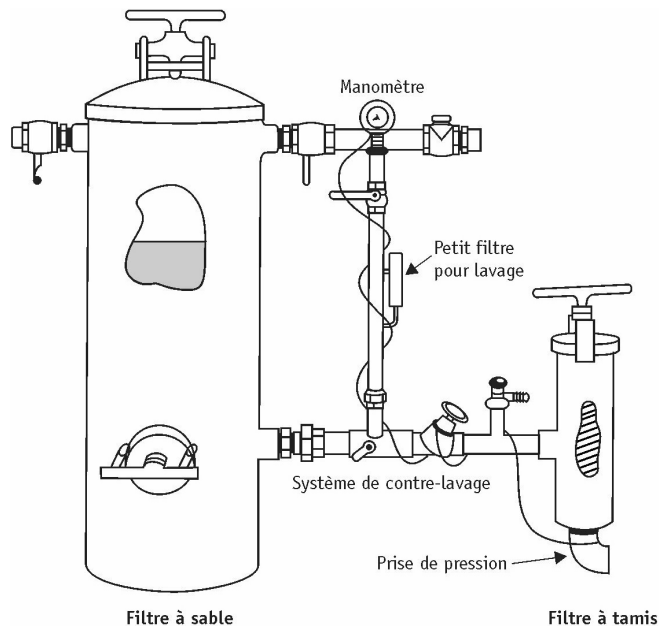


Figure 5.14. Installation de filtration.

Les types de filtres

Le filtre à sable

Le filtre à sable est une cuve fonctionnant en pression et remplie d’une épaisse couche de sable calibré (figure 5.15) qui arrête les éléments solides en suspension dans l’eau qui la traverse. Il est indispensable pour arrêter les éléments organiques. Il est le plus souvent utilisé comme premier filtre dans une installation majoritairement lorsqu’on utilise des eaux de surface ou des eaux usées traitées.

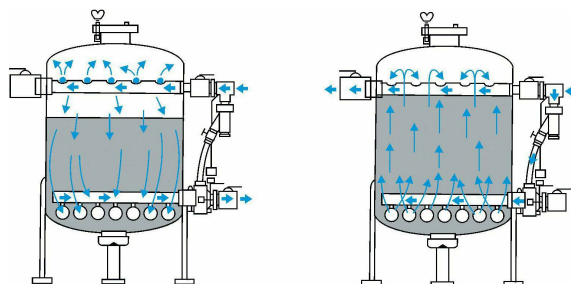


Figure 5.15. Circulation de l'eau dans le filtre à sable.

Le sable peut être roulé ou concassé. Le sable roulé, d'une seule granulométrie, permet une filtration plus homogène. À granulométrie équivalente, un sable concassé affichera une finesse de filtration plus grande.

Devant la difficulté croissante à trouver du sable de bonne qualité, une alternative se développe avec le verre pilé, matériau recyclable qui présente le même niveau d'efficacité qu'un sable.

Pour un bon fonctionnement, le filtre doit retenir les particules de granulométrie supérieure à 1/7 de la plus petite dimension de passage de l'eau dans le distributeur (figure 5.16). Par exemple, si le plus petit passage est de 0,8 mm, il faut filtrer à 110 µm. Pour obtenir ce résultat, la granulométrie du sable doit être choisie de la manière suivante.

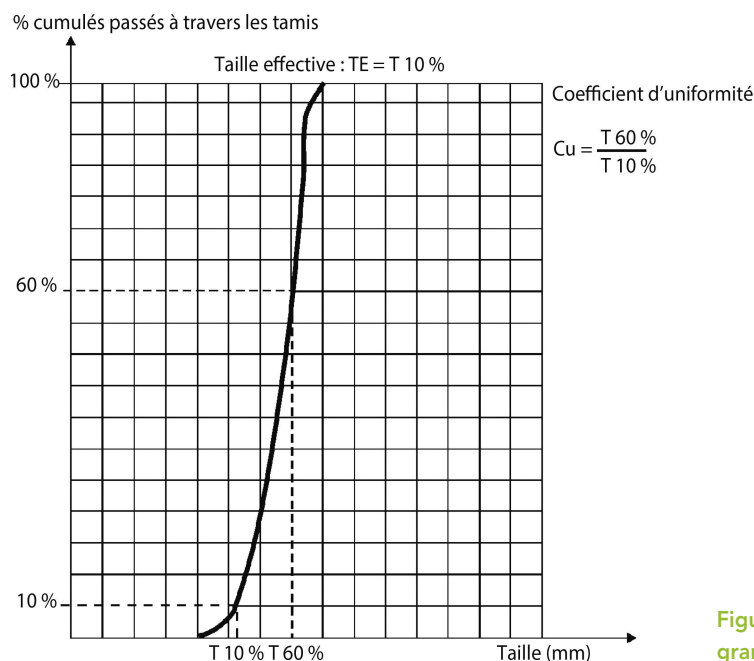


Figure 5.16. Courbe granulométrique du sable.

Choisir un sable dont la taille effective (TE) est d'environ 10 fois la dimension des particules à filtrer ; par exemple, pour filtrer à 110 µm, on prendra un sable de TE : 1,1 mm. Le coefficient d'uniformité (CU) doit être inférieur ou égal à 1,3.

L'efficacité de la filtration est fonction de la vitesse de passage de l'eau. Celle-ci doit être inférieure à 60 m/h. Des vitesses plus faibles sont à conseiller, ce qui permet une meilleure contribution de l'ensemble du volume de sable ; une vitesse rapide (> 30-50 m/h) conduira à un colmatage rapide des couches supérieures de sable, les couches inférieures restant propres.

Pour un même volume de sable, il est préférable d'avoir un filtre de grande section (grand diamètre). Une épaisseur excessive de la couche de sable (plus de 60 cm) n'est pas nécessaire et nuit au lavage du filtre. Ce lavage se fait en inversant le sens de circulation de l'eau à travers le filtre, on parle de contre-lavage. Pour éviter l'entraînement du sable, la vitesse de l'eau en contre-lavage doit être comprise entre 50 m/h (1,4 cm/s) pour une granulométrie de TE = 0,6 mm, et 80 m/h (2,2 cm/s) pour TE = 1,1 mm.

Le courant lors du contre-lavage doit être bien réparti à la base de la masse filtrante. Différentes formes de répartiteurs existent pour améliorer cette homogénéité (figure 5.17).

Un filtre à sable doit toujours être suivi d'un filtre à tamis installé en sécurité.

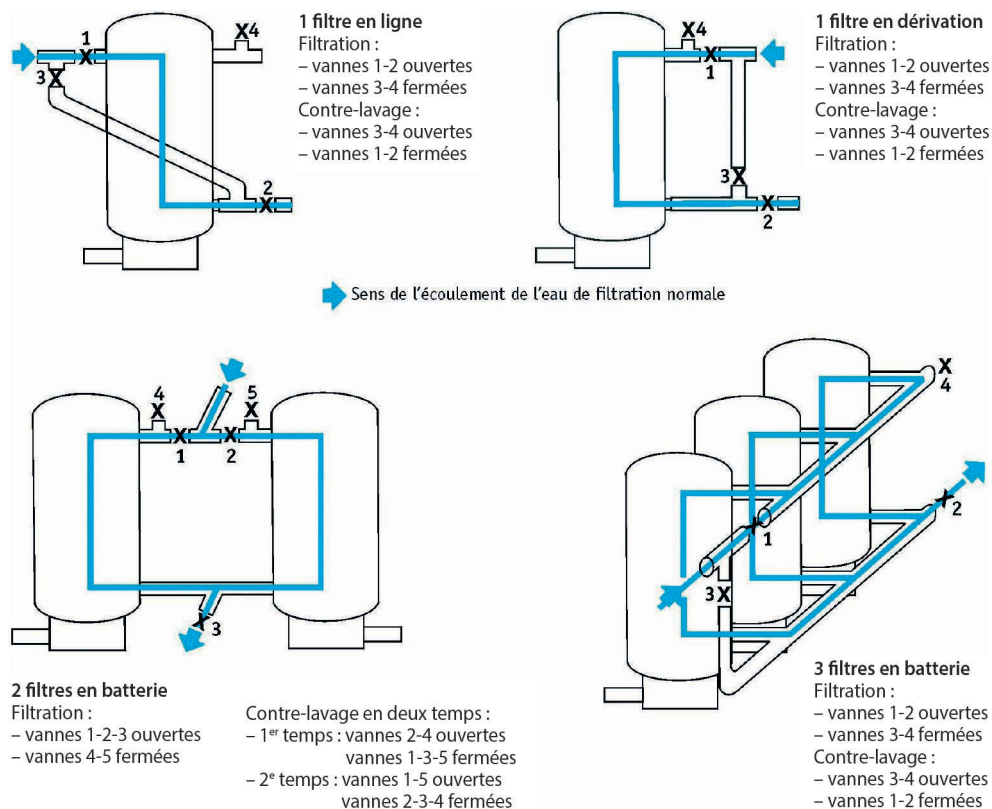


Figure 5.17. Montage des filtres à sable.

Le filtre à tamis

Le filtre à tamis est constitué d'une cuve à pression contenant une paroi filtrante, ou tamis, en matière plastique ou en acier inox dont les mailles varient de 80 à 800 µm. Les particules de dimensions supérieures à cette maille sont arrêtées par le tamis (figure 5.18).

On obtient une bonne filtration pour une vitesse de passage de l'eau à travers le tamis plus élevée qu'à travers un filtre à sable, soit environ 400 m/h (11 cm/s).

Les filtres à tamis sont adaptés pour les eaux de bonne qualité et faiblement chargées, d'où leur utilisation fréquente en aval d'un filtre à sable chargé de piéger les plus grosses particules.

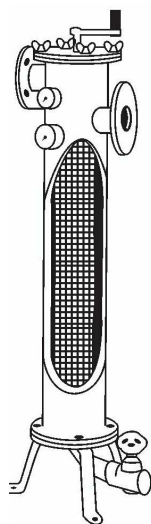


Figure 5.18. Vue en coupe d'un filtre à tamis.

Le filtre à disques

Le filtre à disques, aussi appelé « filtre à lamelles », est constitué d'une cuve à pression contenant un empilement de disques en polypropylène dont la surface est rainurée. La maille de filtration est comprise entre 20 et 400 μm .

La vitesse de filtration est de l'ordre de 100 m/h (2,8 cm/s).

Le filtre à disques est adapté pour les eaux de qualité moyenne à mauvaise.

La préfiltration

Lorsque l'eau est chargée en éléments grossiers (sable par exemple), une préfiltration est souhaitable. Pour cela, on devra disposer une crépine filtrante à l'amont de l'aspiration de la pompe ou un séparateur du type hydrocyclone à l'amont du poste de filtration.

La crépine filtrante est constituée d'un tamis à grande surface, à maille grossière de 1 000 à 2 500 μm . Elle doit être équipée d'un dispositif assurant un nettoyage permanent du tamis. Elle est surtout adaptée pour arrêter les algues et autres débris végétaux.

Le séparateur, ou hydrocyclone, est un récipient à l'intérieur duquel l'eau subit deux mouvements (figure 5.19) :

- un mouvement descendant tourbillonnant, qui entraîne les particules denses (de densité supérieure à 1) telles que le sable dans une chambre d'accumulation munie d'une purge ;
- un mouvement ascendant, qui conduit l'eau débarrassée des éléments solides denses vers une sortie située au sommet du récipient.

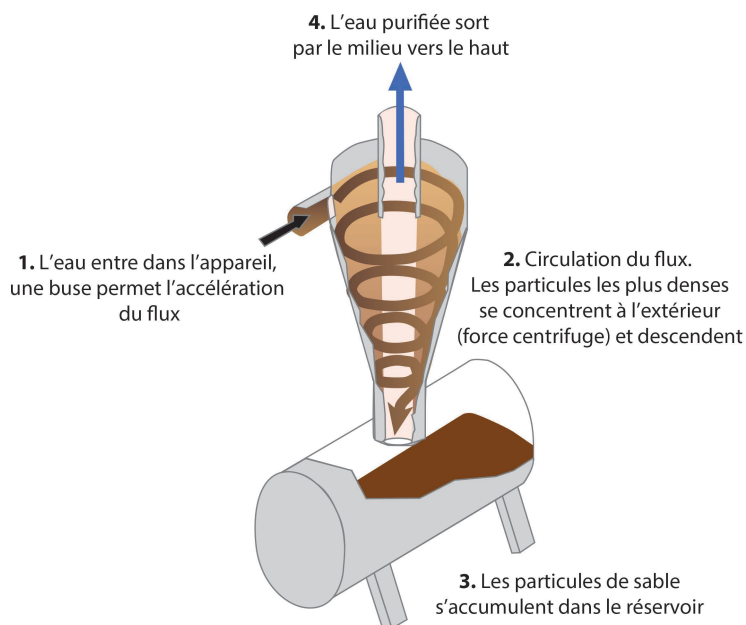


Figure 5.19. Séparateur (© Hectron).

Chaque appareil fonctionne dans une plage de débit étroite. Il doit donc être choisi de façon bien adaptée au débit à filtrer, sous peine de perdre en efficacité.

Le nettoyage des filtres

Au fur et à mesure qu'un filtre se colmate, la perte de charge à travers le filtre augmente, ce qui entraîne une baisse de pression à sa sortie. Lorsque la différence de pression entre l'entrée et la sortie du poste de filtration augmente de 0,3 à 0,5 bar (3 à 5 m de hauteur de colonne d'eau), il est nécessaire de nettoyer les filtres.

Le nettoyage se fait différemment suivant qu'il s'agit d'un filtre à sable ou d'un filtre à tamis.

Nettoyage d'un filtre à sable

Le nettoyage d'un filtre à sable se fait par contre-lavage (figure 5.15), en faisant passer de l'eau filtrée en sens inverse de la filtration par un jeu de vannes. Les impuretés sont évacuées à l'extérieur par le courant d'eau.

Nettoyage d'un filtre à tamis

Pour nettoyer un filtre à tamis, on doit l'ouvrir, sortir le tamis, le brosser et le rincer. Il faut éviter d'utiliser des brosses métalliques dures qui peuvent détériorer les mailles du tamis. Certains filtres intègrent une brosse qui permet un nettoyage sans démontage.

Enfin, certains filtres à tamis présentent un dispositif autonettoyant, selon un principe de lavage à contre-courant.

Nettoyage d'un filtre à disques

Pour nettoyer un filtre à disques, on doit ouvrir la cartouche, désolidariser la pile de disques et les rincer à l'eau propre à l'aide d'un jet (haute pression).

Dans les filtres à lavage automatique, le nettoyage s'effectue par une circulation à contresens, après une étape de libération automatique de la pile de disques.

Nettoyage automatique

Comme évoqué précédemment, il existe des dispositifs qui permettent le nettoyage automatique des filtres, tant pour les filtres à sable que pour les filtres à tamis ou à disques. Le déclenchement du lavage est commandé soit par la différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre, soit par une horloge.

Attention

- Le nettoyage automatique est conseillé notamment lorsque la qualité de l'eau nécessite plusieurs lavages par jour.
- Si la fréquence de nettoyage devient trop importante, il faut augmenter la capacité du filtre à sable.
- En tout état de cause, un nettoyage hebdomadaire et un changement périodique du sable (tous les 2 à 3 ans) sont nécessaires pour maintenir une circulation homogène de l'eau dans toute la section du filtre.

La maintenance des filtres

Malgré les nettoyages, des dépôts finissent par altérer la perméabilité des filtres plus ou moins rapidement, suivant la qualité de l'eau. Les interventions suivantes sont nécessaires pour y remédier :

- pour le filtre à sable, il est conseillé de changer le sable au moins tous les deux à trois ans, plus fréquemment si les eaux sont chargées. Il faut veiller à la qualité du sable (calibré ou roulé) et faire un contre-lavage avant la première utilisation ;
- pour le filtre à tamis et le filtre à disques, il faut vérifier périodiquement l'état du tamis et des disques et changer les éléments obstrués ou détériorés.

Quel que soit le type de filtre, il est conseillé de le vidanger en fin de saison d'irrigation.

L'automatisation

L'automatisation consiste à déclencher et à arrêter le fonctionnement de tout ou partie du réseau d'irrigation en fonction d'indications prédéterminées ou définies en temps réel à partir d'informations recueillies par des capteurs.

Pourquoi automatiser ?

Le nombre élevé des postes d'arrosage, le fractionnement et la fréquence des apports d'eau en fonction de l'évolution de la réserve en eau du sol, la nécessité d'une bonne filtration de l'eau sont autant de facteurs qui exigent de nombreuses interventions pour le bon fonctionnement d'une installation d'irrigation localisée.

Seule une automatisation plus ou moins complète de celle-ci permet d'en tirer le meilleur profit au moindre coût :

- en améliorant la qualité de l'irrigation et la gestion de la ressource en eau disponible ;
- en libérant la main-d'œuvre, qui pourra consacrer une part plus importante du temps à des tâches de contrôle et de surveillance du fonctionnement des installations et de l'irrigation.

Les dispositifs d'automatisation

En irrigation localisée, de nombreuses fonctions peuvent être automatisées (figure 5.20) :

- la mise en pression et l'arrêt du réseau par le démarrage et l'arrêt de la station de pompage ou par l'ouverture et la fermeture de la vanne d'alimentation du réseau ;
- la gestion des postes d'arrosage par l'ouverture et la fermeture des vannes d'alimentation de ces postes, suivant une programmation prédéterminée des fréquences et des doses d'arrosage ou les ordres d'un dispositif de pilotage automatique de l'irrigation ;
- la filtration, par déclenchement du nettoyage des filtres ;
- le contrôle du bon fonctionnement du réseau, par arrêt de la station de pompage ou fermeture de la vanne d'alimentation du réseau en cas de chute ou d'élévation anormale de la pression (rupture ou obstruction de canalisation, notamment) ;
- la « fertigation », par démarrage et arrêt des appareils d'injection, avec contrôle éventuel des quantités et des dosages des apports réalisés.

Une installation d'irrigation localisée automatisée comprend :

- des appareils commandés, en général des vannes ou des pompes ;
- des appareils de commande ou programmeurs, qui transmettent les ordres de marche/arrêt ou ouverture/fermeture selon des consignes préétablies par l'irrigant ou élaborées à partir d'informations recueillies par des capteurs ;
- des moyens de transmission de la commande : transmission filaire ou par différents moyens de télécommunication : radio, téléphonie mobile ;
- des capteurs qui mesurent en temps réel les valeurs de paramètres indicateurs des besoins en eau, dans le complexe eau-sol-plante-atmosphère, pour piloter l'irrigation et ceux relatifs au fonctionnement de l'installation (débits, volumes, pressions) pour en gérer et contrôler le bon fonctionnement.

Les vannes automatiques

Les vannes automatiques sont des dispositifs dont l'ouverture et/ou la fermeture sont commandées par un dispositif intégré à la vanne ou monté sur ou à proximité de la vanne. Le dispositif de commande peut être :

- mécanique : vannes volumétriques ou hydrauliques ;
- électrique : électrovannes.

Les pilotes des vannes automatiques peuvent être montés soit directement sur les vannes qu'ils commandent (figure 5.21), soit à distance dans un local de commande (figure 5.22), soit activés grâce à des liaisons pilotes-vannes par l'intermédiaire de petits tubes en polyéthylène.

La liaison entre le programmeur et le pilote peut s'effectuer par différents moyens : filaire, radio, téléphonie mobile. Dans le domaine de la communication par ondes radio, de nombreuses technologies sont développées, avec des caractéristiques de portée et de débit très variables (Bluetooth, Wi-Fi, WiMax, LoRa, Sigfox, etc.) permettant de répondre à une large gamme de besoins et de configurations.

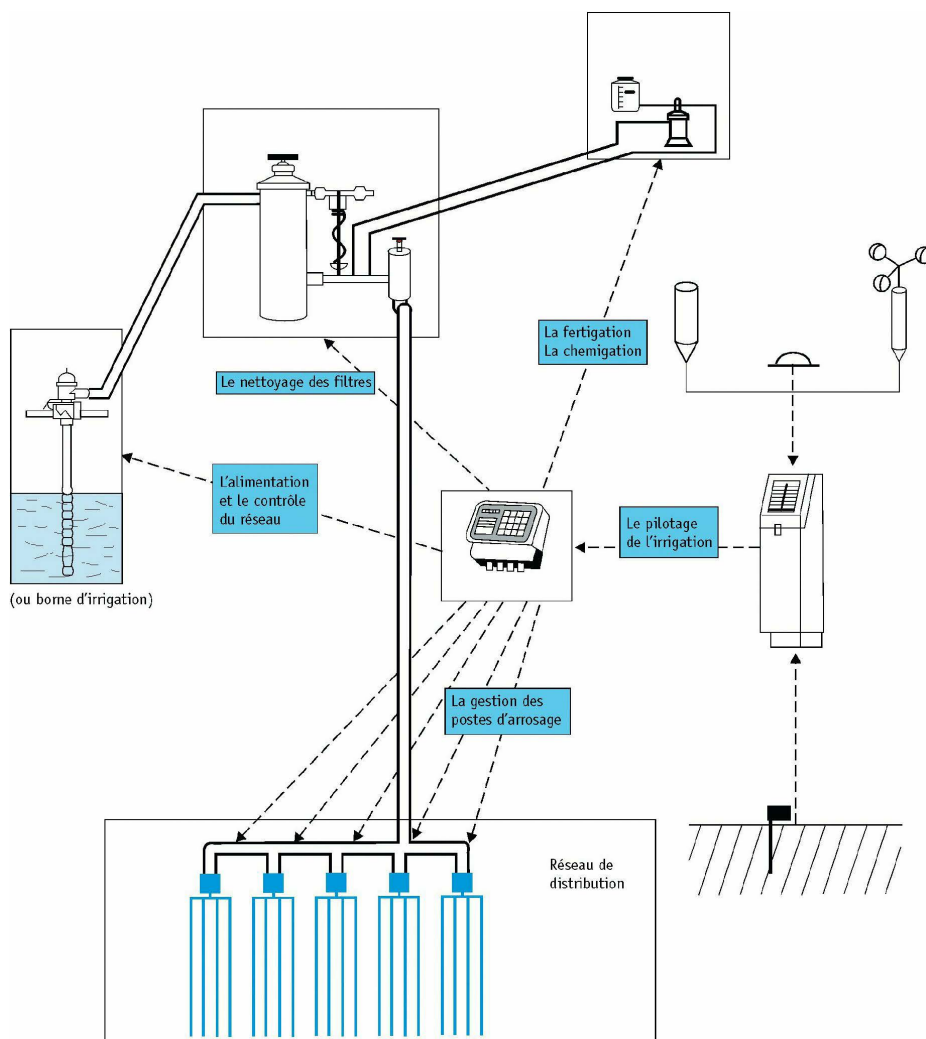


Figure 5.20. Quelles fonctions automatiser ? (source : CTIFL).

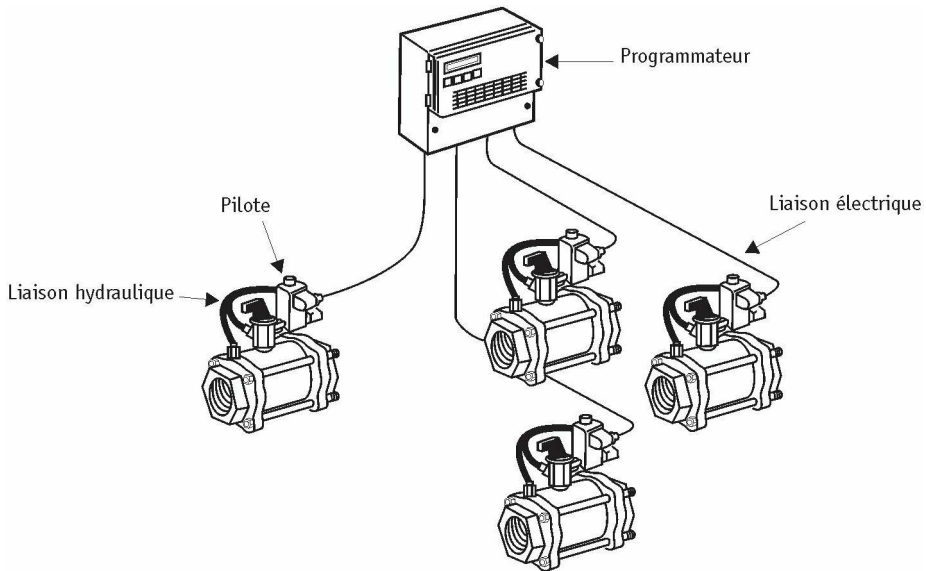


Figure 5.21. Électrovannes commandées par liaison électrique.

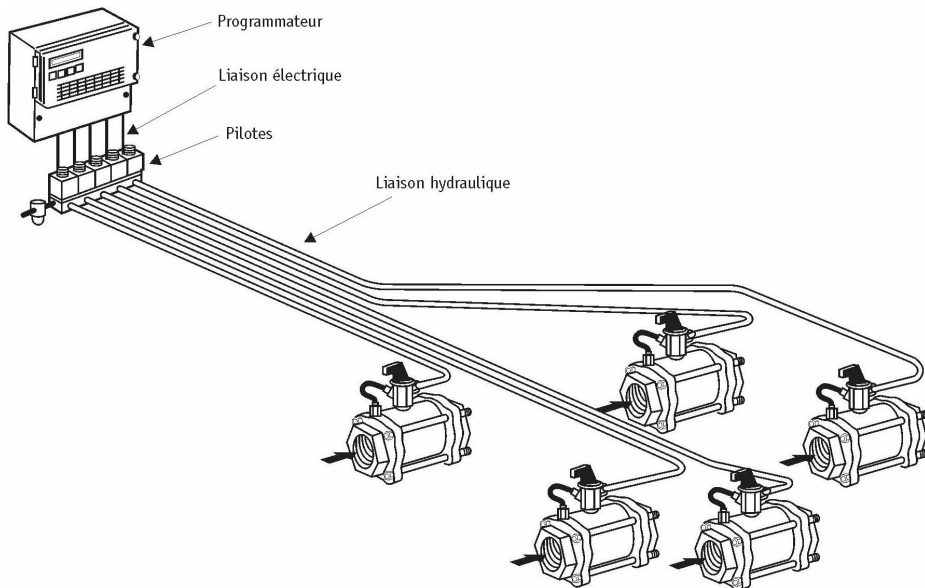


Figure 5.22. Électrovannes commandées par liaison hydraulique.

Les vannes volumétriques

Les petites vannes volumétriques semi-automatiques (photo 5.16) sont constituées d'une vanne associée à un compteur. À l'ouverture, qui est manuelle, l'irrigant programme sur la vanne le volume d'eau à apporter. Le dispositif de comptage provoque la fermeture de la vanne lorsque le volume programmé est écoulé.

Malgré leur simplicité de fonctionnement et leur intérêt pratique, ces équipements sont aujourd'hui peu installés.



Photo 5.16. Vanne volumétrique (© BRLE).

Les vannes hydrauliques

Les vannes hydrauliques (photo 5.17) sont équipées d'une membrane dont la déformation sous l'effet de la pression de l'eau provoque l'ouverture ou la fermeture de la vanne.



Photo 5.17. Vanne hydraulique (© Netafim).

Les vannes sont dites normalement ouvertes (NO) ou normalement fermées (NF).

Une vanne normalement ouverte est ouverte lorsqu'aucune pression externe n'est exercée sur la membrane (figure 5.23a). Sa fermeture est provoquée par l'envoi d'une pression externe sur celle-ci (figure 5.23b).

Une vanne normalement fermée ne s'ouvre que sous l'effet d'une pression externe sur sa membrane.

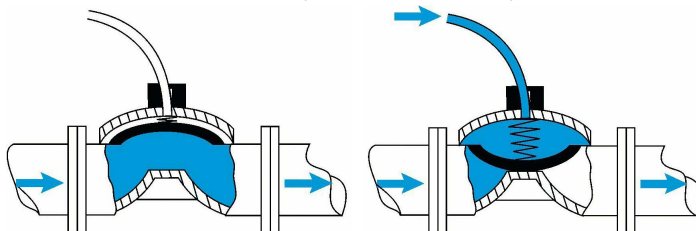


Figure 5.23a. Vanne ouverte.

Figure 5.23b. Vanne fermée.

Les vannes volumétrique pilotées

Les vannes volumétriques de gros diamètre (supérieur à 3") sont des vannes hydrauliques pilotées par un dispositif de comptage volumétrique (photo 5.18). Celui-ci ferme la vanne en ouvrant un circuit d'admission de la pression amont sur la membrane de celle-ci, lorsque le volume programmé est écoulé.

Comme déjà indiqué à propos des petites vannes volumétriques, ces vannes automatiques sont aujourd'hui peu utilisées, étant supplantées par les électrovannes associées à un programmeur.

Les électrovannes

Les électrovannes sont des vannes pilotes qui commandent l'admission de la pression externe sur la membrane des vannes hydrauliques (photo 5.18). L'ouverture du circuit est commandée par l'attraction d'un noyau de fer doux par un solénoïde alimenté soit par un courant de maintien de 24 volts, soit par des impulsions électriques qui le font passer de la position fermée à la position ouverte et *vice versa*. Diverses tailles existent, en règle générale pas au-delà de 2 pouces.



Photo 5.18. Électrovanne et vanne hydraulique (© Netafim).

Les programmeurs

Les programmeurs sont des appareils électroniques. Ils commandent des vannes automatiques et/ou des pompes électriques soit en fonction de consignes enregistrées par l'irrigant, soit après analyse d'informations transmises par des capteurs. Suivant le nombre de voies à la sortie du programmeur, ils peuvent commander séparément un ou plusieurs postes. On distingue du plus simple au plus complexe :

- l'horloge à une voie, qui permet de programmer un ou plusieurs fonctionnements de durée déterminée par jour ;
- le programmeur séquentiel à plusieurs voies, qui permet de programmer la durée de fonctionnement de chaque voie et la fréquence de démarrage des cycles. Au cours de chaque cycle, les voies sont activées les unes après les autres, ce qui permet d'utiliser la totalité du débit disponible sur chaque poste, l'un après l'autre. Un nouveau cycle ne démarre que si le précédent est terminé ;
- le programmeur à voies indépendantes, qui permet de programmer la fréquence ou les heures de fonctionnement de chaque voie de façon indépendante. Il peut y avoir chevauchement de fonctionnement des différentes voies (de différents postes).

Certains programmeurs sont assujettis à un compteur qui comptabilise le volume d'eau écoulé et ajuste la durée de fonctionnement du poste pour apporter le volume d'eau choisi.

Les automates programmables fonctionnent à partir d'informations transmises par des capteurs en temps réel, qu'ils enregistrent et traitent. Ces informations peuvent concerner :

- des paramètres de pilotage de l'irrigation tels que données climatiques, tension de l'eau dans le sol, variations de diamètre d'organes végétaux ;
- des paramètres de gestion du fonctionnement des postes du réseau d'irrigation tels que pression de l'eau, volume écoulé, et dans le cas des serres en culture hors sol concentration en éléments fertilisants, pH de l'eau.

Un bon programmeur doit :

- être simple d'utilisation ;
- permettre d'apporter la dose d'irrigation correspondant aux besoins de pointe du jour le plus contraignant (durée maximale des cycles) ;
- permettre de fractionner les apports d'eau (plusieurs cycles par jour) ;
- être fiable, robuste et protégé électriquement contre les variations de tension et contre la foudre ;
- permettre le fonctionnement du réseau en commande manuelle ;
- bénéficier d'un service après-vente rapide et efficace.

L'automatisation est utile, voire indispensable pour bien gérer l'irrigation localisée et la fertigation. Elle rend possible le pilotage automatique de l'irrigation.

Attention

Les défaillances techniques des dispositifs d'automatisation sont toujours possibles et, en agriculture, les aléas de tous ordres sont courants. Un contrôle fréquent des automatismes et une surveillance attentive du fonctionnement du réseau ainsi que de l'état des cultures, directement par l'irrigant, sont nécessaires.

Conception et dimensionnement d'une installation

Les bases de conception d'un réseau d'irrigation goutte-à-goutte

Rappel. L'irrigation de type gravitaire ou par aspersion consiste à réapprovisionner périodiquement le réservoir en eau du sol, de façon homogène sur l'ensemble de la parcelle irriguée. Cette réserve pourvoira à l'alimentation de la culture pendant une période de plusieurs jours.

En irrigation localisée, il n'y a pas reconstitution de la totalité de la réserve du sol sur l'ensemble de la parcelle, lorsque celle-ci est épuisée. L'eau dont a besoin la plante est apportée fréquemment, par petites doses, de manière ponctuelle (goutte-à-goutte) ou sous forme de tache (diffuseurs), dans un volume de sol limité à proximité des racines. Aucune réserve tampon autre que le volume humidifié à chaque apport n'existant, il importe de bien maîtriser le volume humidifié, autrement dit les quantités d'eau stockées à chaque apport, en combinant la fréquence et la dose des apports.

Pour la vigne ou d'autres cultures ayant des facultés de résistance à la sécheresse et un enracinement développé, des apports relativement conséquents et moins fréquents sont préconisés pour favoriser un enracinement profond qui contribue à améliorer la résistance de la plante face au stress hydrique.

Dans le cas particulier de l'irrigation goutte-à-goutte, une petite zone saturée apparaît sous le goutteur. L'eau diffuse ensuite par capillarité en écoulement non saturé.

Le volume maximal de sol humidifié par un goutteur de débit donné est fonction de la profondeur de sol disponible ou explorée par les racines et des caractéristiques de sol (texture et structure). Ce volume détermine les doses d'arrosage qu'on pourra appliquer.

La consommation d'eau par la plante détermine la dose d'arrosage, combinaison de la durée d'arrosage et de l'intervalle entre arrosages, l'objectif étant de mobiliser au mieux l'eau infiltrée.

Pour une durée d'irrigation donnée, l'extension latérale et la profondeur d'humectation obtenues avec un distributeur de débit déterminé dépendent essentiellement :

- de la conductivité hydraulique du sol (K_s), caractéristique de la composante gravitaire de l'écoulement ;
- de sa longueur capillaire (λ_c), caractéristique de la composante capillaire de l'écoulement ;
- de la différence ($\Delta \theta$) entre la teneur en eau initiale du sol sec et la teneur en eau moyenne recherchée dans le volume humecté supposée uniforme.

Il existe des modèles simplifiés, par exemple sur la base des travaux de Raats²³, qui permettent de simuler l'infiltration de l'eau sous un goutteur en fonction de son débit et des caractéristiques du sol.

En pratique, la profondeur à humecter est déterminée par la profondeur d'enracinement de la culture, ce qui détermine le volume à apporter donc le temps d'arrosage requis pour humidifier le sol jusqu'à la profondeur explorée par les racines. Au-delà de ce temps, le risque est grand d'induire des percolations profondes.

Les exemples de résultats fournis par le modèle sont donnés dans le tableau 5.5 pour trois types de sol et un goutteur débitant 2 l/h.

Il faut noter que pour des apports égaux, dispensés par des débits différents, le volume humidifié varie peu.

Tableau 5.5. Dimensions de la zone humidifiée en fonction de la durée d'arrosage pour des sols types.

Profondeur humectée Z (cm)	Sable $K_s^* = 36 \text{ cm/h}$ $\lambda_c = 3 \text{ cm}$ $\Delta \theta = 0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$				Limon sableux $K_s^* = 3,6 \text{ cm/h}$ $\lambda_c = 8 \text{ cm}$ $\Delta \theta = 0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$				Argile $K_s^* = 0,36 \text{ cm/h}$ $\lambda_c = 25 \text{ cm}$ $\Delta \theta = 0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$			
	t(h)**	r(m)	q × t(l)	V (l)	t(h)	r(m)	q × t(l)	V(l)	t(h)	r(m)	q × t(l)	V (l)
15	0 h 15	0,08	0,5	2,5	0 h 32	0,11	1,1	4,4	0 h 51	0,13	1,7	5,7
25	0 h 51	0,10	1,7	8,5	1 h 54	0,15	3,8	15,2	3 h 36	0,20	7,2	24
50	3 h 54	0,14	7,8	39	10 h 30	0,23	21,0	84	23 h 00	0,35	46,0	153
75	9 h 15	0,17	18,5	93	26 h 00	0,29	52,0	208	64 h 00	0,46	128,0	427
100	17 h 00	0,19	34,0	170	49 h 00	0,33	98,0	392	130 h 00	0,56	260,0	867
150	39 h 30	0,22	79,0	395	118 h 00	0,40	236,0	944	340 h 00	0,71	680,0	2 267

* Ordre de grandeur de K_s pour caractériser le sol et temps nécessaire pour humidifier le volume de sol ciblé.

** Le temps dans le tableau est indiqué sous la forme X h YZ min, le symbole min a été omis pour rendre le tableau lisible.

À partir de ces valeurs et d'une connaissance de la taille du bulbe d'humectation, les résultats du tableau montrent que la durée d'arrosage nécessaire pour réhumecter en profondeur un sol sec peut être relativement importante. Il est nécessaire de commencer les irrigations avant que le sol ne se dessèche et d'entretenir l'humidité du sol en apportant fréquemment une quantité d'eau qui compense la consommation de la culture afin d'éviter l'apparition de fissures de retrait par exemple.

Le volume maximal de sol V que l'on peut humidifier par un goutteur sur une profondeur déterminée, sans perte d'eau par percolation, est limité et dépend essentiellement des caractéristiques hydrodynamiques du sol et de son état de siccité initial. Il lui correspond une durée maximale d'arrosage (t) et une quantité d'eau maximale apportée par arrosage ($q \times t$).

23 Raats P.A.C., 1971. Steady infiltration from point sources, cavities and basins. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 35, 689-694.

Ce constat doit être considéré comme base pour la conception et la conduite de l'irrigation goutte-à-goutte.

Si l'installation comporte un nombre de goutteurs (N) pour arroser une surface (S), le volume total d'eau correspondant qu'il sera possible d'apporter sans perte d'eau par percolation sera :

$$N \times V$$

La dose maximale D (en mm) qui peut être apportée par un arrosage sur le sol initialement sec, sans perte par percolation, sera :

$$D = (N \times q \times t) / S$$

avec $q \times t$ en l et S en m².

Si le besoin en eau journalier de pointe de la culture considérée est D_j (en mm/j), on définit un coefficient de sécurité ou délais de retour (k) de l'installation par le rapport :

$$k = D / D_j$$

Théoriquement, ce coefficient correspondrait au nombre de jours pendant lesquels le volume d'eau maximal que l'on peut apporter par irrigation sur sol sec pourrait satisfaire les besoins de la plante. En fait, le volume de sol humidifié, et par conséquent la quantité de racines alimentées en eau, décroît rapidement au fur et à mesure que la plante consomme l'eau. Il s'ensuit qu'il faut entretenir un volume humidifié suffisant par des arrosages fréquents, bien avant que le sol soit desséché. Cela vaut pour les questions d'alimentation en eau, mais aussi pour éviter l'apparition de fentes de retrait dans le sol lorsqu'il sèche.

Cette dernière remarque peut être nuancée sur les cultures présentant un fort enracinement et conduites avec une irrigation rationnée (typiquement la vigne de cuve), pour lesquelles des apports plus espacés sont possibles. Ils vont favoriser l'enracinement profond, avoir une incidence sur la qualité et accessoirement permettre à la vigne de tirer un meilleur parti des pluies.

On distingue deux cas :

k < 1. Le volume maximal que l'on peut apporter à chaque arrosage est inférieur aux besoins journaliers de la culture.

Dans ce cas, les consommations en eau de la culture ne peuvent être compensées que par des apports répétés au cours de la journée, en fonction de l'activité des plantes et de l'évolution de la réserve disponible dans le sol. Seul un pilotage automatique de l'irrigation permet de le faire.

Lorsque la réserve facilement utilisable du sol (RFU) est épuisée, le risque de rupture d'approvisionnement en eau des plantes est important. Il faut absolument commencer les irrigations bien avant l'épuisement de la réserve initiale du sol et maintenir la réserve disponible en compensant la consommation en eau de la culture au fur et à mesure.

Les valeurs de V du tableau 5.5 montrent que ce cas est rare et ne concerne que des sols sableux de faible profondeur ou des substrats de culture hors sol.

k > 1. Le volume maximal que l'on peut apporter à chaque arrosage est supérieur aux besoins journaliers de la culture.

Il est alors possible de satisfaire les besoins de la culture par des arrosages plus espacés.

Il est conseillé d'adopter une fréquence d'arrosage telle que le volume maximal existant initialement ou constitué à la 1^{re} irrigation ne soit pas largement consommé entre deux arrosages, pour maintenir

une réserve de sécurité dans le sol. En général, en irrigation goutte-à-goutte, après s'être assuré que la réserve maximale est constituée, on entretient cette réserve par des apports quotidiens qui compensent les consommations en eau des cultures.

Les valeurs de t calculées à partir du tableau 5.5 montrent que la durée d'irrigation nécessaire pour constituer la réserve maximale peut être relativement importante pour des sols limoneux ou argileux. Il importe donc de commencer les irrigations avant que les réserves en eau constituées par les pluies soient épuisées.

Il est vivement conseillé de concevoir l'installation pour obtenir une valeur du coefficient de sécurité k supérieure à 2, de manière à pouvoir disposer d'une réserve de sécurité en cas de dysfonctionnement de l'installation ou d'erreur dans la conduite de l'irrigation.

Une irrigation conduite de manière à conserver une bonne réserve en eau dans le sol (début de l'irrigation avant épuisement de la RFU et apports suffisants en quantité et en fréquence) assurera une garantie contre les risques de défaillance du réseau d'irrigation ou en cas de capacité insuffisante de l'installation pour faire face à des conditions de sécheresse exceptionnelles.

La **fraction de sol humidifié** maximale p (%) sera :

$$p (\%) = 100 \times (N \times V) / (S \times z)$$

avec N : nombre de goutteurs irriguant la surface S , V : volume de sol humidifié par un goutteur, S : surface irriguée par les N goutteurs, z : profondeur humidifiée.

On considère que cette fraction doit être au moins de l'ordre de 30 % pour assurer une alimentation suffisamment fiable des racines de la culture.

Il faut se rappeler que le volume maximal V humidifié par un goutteur et par conséquent la quantité d'eau $q \times t$ nécessaire pour atteindre ce volume sont limités et dépendent des caractéristiques du sol. Il n'est pas possible de les accroître en augmentant la durée d'arrosage : les quantités d'eau supplémentaires seraient perdues par percolation profonde. Seul le choix de la disposition et de la densité des goutteurs permet d'obtenir les valeurs de k et de p % choisies.

Le débit d'équipement nécessaire pour arroser un poste de surface S (ha) sera :

$$Q = N \times (q/1000) \times S$$

avec Q en m^3/h , N nombre de goutteurs par ha, q en l/h , S en ha.

Disposition et densité des goutteurs

En culture maraîchère, on s'efforce d'obtenir une humidification continue le long de la rampe, sans recoupement significatif des volumes humidifiés entre distributeurs voisins (figure 5.24).

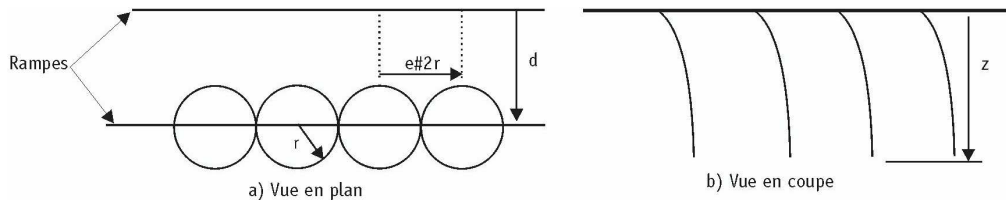


Figure 5.24. Représentation schématique des zones humidifiées par goutteurs.

L'écartement des goutteurs sur la rampe (e) sera sensiblement égal au diamètre de l'extension latérale du volume humidifié (e # 2 r). La distance entre rampes (d) sera fonction de l'espacement des rangs de culture. On pourra prévoir suivant le cas une rampe par rangée de culture ou une rampe pour deux rangs jumelés de culture.

Exemple

Soit à irriguer une culture de tomates disposées en rangs jumelés deux à deux, sur un sol limono-sableux de 0,75 m de profondeur, les besoins de pointe journaliers étant $D_j = 5$ mm.

On lit dans le tableau 5.5 : $t = 26$ h, $r = 0,29$ m, $q \times t = 52$ l, $V = 208$ l.

Des goutteurs de 2 l/h pourront être espacés de 60 cm et les rangs jumelés de 120 cm.

Chaque goutteur desservira une surface de sol : $e \times d = 0,6 \times 1,2 = 0,72$ m².

Le nombre N de goutteurs à l'hectare sera : $N = 10\,000 / 0,72 = 13\,888$.

La dose maximale que l'on peut apporter sans percolation est : $D = 52 / 0,72 = 72$ mm.

On en déduit le coefficient de sécurité : $k = D / D_j = 14,4$ j

ce qui représente un volant de sécurité confortable pour une consommation de 5 mm/j.

Le pourcentage du volume de sol humecté est : $p \% = 100 \times 208 / 72 \times 7,5 = 38,5$ %.

La pluviométrie fictive de l'installation est : $P = 2 / 0,72 = 2,8$ mm/h.

La durée d'arrosage quotidien nécessaire pour compenser les consommations de la culture :

$$D_j / P = 5 / 2,8 = 1 \text{ h } 47'$$

Dans le cas d'un sol sableux, on aurait : $r = 0,17$ m, $q \times t = 18,5$ l, $V = 93$ l.

L'espacement entre goutteurs sur rampe pourra être de 40 cm ; si l'on maintient l'espacement entre rangs jumelés de 1,20 m, on aura : $e \times d = 0,40 \times 1,20 = 0,48$ m²

$N/ha = 10\,000 / 0,48 = 20\,833$

$D = 18,5 / 0,48 = 38,5$ mm

$k = 38,5 / 5 = 7,7$

$p \% = 100 \times 93 / 48 \times 7,5 = 26$ %

$P = 2 / 0,48 = 4,17$ mm/h

$D_j / P = 5 / 4,17 = 1 \text{ h } 12'$

On constate que la fraction de sol humidifié est faible, ce qui nuit à la robustesse de l'irrigation, sauf à réduire l'espacement entre goutteurs et leur débit.

En arboriculture fruitière, on disposera au moins une rampe par rangée d'arbres et un ou plusieurs goutteurs par arbre en veillant à les disposer de telle manière que les volumes humectés autour d'un même arbre ne se recoupent pas. La densité de goutteurs à l'hectare est fonction de la densité des arbres et du nombre de goutteurs par arbre.

Le nombre de goutteurs par arbre (n) doit être choisi de manière à ce que le pourcentage de volume de sol humidifié (p %) à chaque arbre ne soit pas trop petit et procure une autonomie de sécurité (k) suffisante. En général, on définit n pour une valeur de p % choisie et on vérifie que cette valeur permet d'obtenir un volant de sécurité suffisant.

Le volume maximal de sol que l'on peut humidifier à chaque arbre, sans perte par percolation, est : $n \times V$.

Si l'on désigne par l l'espace entre arbres sur un même rang, par L la distance entre rangs d'arbres, on aura :

$$p \% = (n \times V) / (l \times L \times z)$$

avec V en m³; l, L et z en m.

$$k = (n \times q \times t) / (l \times L \times D_j)$$

avec $q \times t$ en l ; l et L en m ; D_j en mm ;

n étant défini en fonction des valeurs de p (%) et k , on en déduira :

- le nombre de goutteurs à l'hectare : $N = (n \times 10\,000) / (l \times L)$ (l et L en m) ;
- la pluviométrie fictive de l'installation : $P = (n \times q) / (l \times L)$ (q en l/h, l et L en m, P en mm/h) ;
- la durée d'arrosage nécessaire pour compenser les consommations journalières : P / D_j (en h).

Attention

Il faut noter que pour des jeunes plantations, l'extension racinaire est limitée tant latéralement qu'en profondeur. Cela peut conduire à concevoir une première installation tenant compte du faible volume exploité par les racines les premières années (petit nombre de goutteurs proches du tronc), puis à la renforcer lorsque les arbres atteignent la dimension définitive, en ajoutant des goutteurs plus éloignés du tronc.

Exemple

Soit à irriguer un verger disposé en rangées d'arbres espacés de 5 m, la distance entre deux arbres étant de 2 m, sur sol argileux profond de 1,50 m ; les besoins journaliers de pointe étant de 6 mm/j.

Pour des goutteurs de 2 l/h, le tableau 5.5 indique :

$$r = 0,71 \text{ m}$$

$$q \times t = 680 \text{ l}$$

$$V = 2,267 \text{ m}^3$$

Si l'on choisit d'humidifier un pourcentage de volume de sol de 30 %, on aura :

$$n = 0,30 \times 5 \times 2 \times 1,50 / 2,267 = 2 \text{ goutteurs par arbre, soit } 2\,000 \text{ goutteurs par ha.}$$

Le coefficient de sécurité sera : $k = 2 \times 680 / (2 \times 5 \times 6) = 22 \text{ j.}$

La pluviométrie fictive de l'installation sera : $P = 2 \times 2 / (2 \times 5) = 0,4 \text{ mm/h}$

d'où la durée d'arrosage quotidien nécessaire pour compenser les consommations journalières en période de pointe : $D_j / P = 6 / 0,4 = 15 \text{ h.}$

Pour un sol sablo-limoneux, on aurait :

$$r = 0,40 \text{ m}$$

$$q \times t = 236 \text{ l}$$

$$V = 0,944 \text{ m}^3$$

d'où : $n = 5$ goutteurs par arbre, soit 5 000 goutteurs par ha ; coefficient de sécurité $k = 19 \text{ j.}$

Pluviométrie fictive : $P = 1 \text{ mm/h}$

Durée d'arrosage quotidien : $D_j / P = 6 \text{ h}$

Dans le cas d'un sol sableux, on aboutirait à 12 goutteurs par arbre, ce qui est prohibitif en goutteurs en dérivation. La solution peut être de passer à un dispositif à double rampe avec des goutteurs intégrés à faible espacement, ou de préférer des distributeurs de type micro-jet ou micro-asperseur.

Il importe de rappeler que les valeurs ainsi déterminées ne sont valables que dans la mesure où la réserve en eau du sol maximale est constituée en début de période d'irrigation. Dans le cas des exemples ci-dessus, on notera que la durée d'arrosage nécessaire pour humecter le sol sec sur une profondeur de 1,5 m serait de plusieurs jours. D'où la nécessité de commencer les arrosages suffisamment tôt avant dessiccation du sol.

Remarque

Sauf risque d'obstruction des goutteurs de faible débit ou limitation de la durée d'arrosage journalière, on a intérêt à choisir le débit d'apport par arbre (nombre de rampes, nombre de goutteurs/micro-asperseurs, débit des goutteurs) le plus faible possible, de manière à minimiser les diamètres des porte-rampes et des conduites d'amenée et par conséquent le coût de l'installation.

Le tableau 5.6 donne à titre indicatif des ordres de grandeur de densité et débit de distribution les plus couramment utilisés.

Tableau 5.6. Densité et débit des distributeurs selon la culture.

Culture	Nombre de distributeurs par ha	Débit moyen du distributeur (l/h)	Pluviométrie fictive (mm/h)
Maraîchage de plein champ Grandes cultures	10 000 à 20 000 goutteurs	2	2 à 4
Serre	Jusqu'à 50 000 goutteurs	2	Jusqu'à 10
Arboriculture	1 500 à 2 000 goutteurs 400 à 1 000 diffuseurs	4 ou 2 20	0,4 à 0,8 0,8 à 2
Viticulture	4 000 à 6 000 goutteurs	1 à 2 l/h	0,6 à 0,8

Calculette irrigation : calculer une pluviométrie, un temps ou une dose d'irrigation en irrigation localisée et en aspersion par couverture intégrale.

» Voir complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Le dimensionnement hydraulique de l'installation

Pour concevoir le projet, il est nécessaire de disposer d'un plan détaillé à grande échelle (1/500 ou 1/1 000), sur lequel seront reportés les points cotés, les courbes de niveau, le point d'alimentation en eau, le sens des lignes de culture et toutes autres indications jugées utiles.

Les dispositions, la densité et le débit des goutteurs étant déterminés, on pourra procéder à la détermination des postes d'arrosage et au dimensionnement des rampes, des porte-rampes et des canalisations d'amenée d'eau.

Les postes d'arrosage (ensemble de rampes arrosées simultanément) seront définis en tenant compte :

- de la forme, des dimensions et de la topographie des parcelles à irriguer, qui conditionnent la longueur et le choix des rampes, compte tenu de la densité et du débit des goutteurs ;
- de la durée d'arrosage quotidien, qui limitera le nombre de postes possibles par jour ;
- du débit disponible sur l'exploitation, qui limitera la surface maximale possible d'un poste.

La contrainte imposée est de respecter la pression de fonctionnement des distributeurs, qui doit être proche de la pression nominale indiquée par le fabricant, tout en évitant que la variation de débit, due à la variation de pression, entre le goutteur le plus favorisé et le plus défavorisé ne soit supérieure à 10 %.

Les ordres de grandeur des pressions de fonctionnement des distributeurs sont les suivants :

- 1 à 4 bars (10 à 40 m de colonne d'eau) pour les goutteurs autorégulants ;
- 1 bar (10 m de colonne d'eau) pour les goutteurs et les diffuseurs non autorégulants ;
- 1,5 à 4 bars pour les diffuseurs et micro-asperseurs autorégulants ;
- 0,6 bar (6 m de colonne d'eau) pour les gaines.

Lorsque la pression en tête de rampes est supérieure à celle de la limite de tolérance du distributeur, il est nécessaire d'y installer un régulateur de pression.

Le tableau 5.7 indique les longueurs maximales de rampes pour différents diamètres et différents débits au mètre linéaire de rampe, en fonction de la pente moyenne de la rampe, pour des goutteurs non autorégulants de type tolérant. Ce tableau a été établi de façon à respecter une variation de débit inférieure ou égale à 10 %. Les calculs prennent en compte les pertes de charge dans la rampe et leur compensation par la pente.

On peut constater qu'une forte pente entraîne des surpressions qui limitent rapidement la longueur de la rampe. Dans ce cas, on sera conduit à utiliser des goutteurs autorégulants.

Tableau 5.7. Longueur maximale de rampe (en m) pour des goutteurs non autorégulants ($\times = 0,5$) sous une pression de 1 bar, avec une tolérance de variation de débit de 10 % et de variation de pression de 0,14 bar.

		Diamètre de la rampe																	
		13/16 mm						14,5/17 mm						17/20 mm					
	Débit (l/h/m)	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7
Pente	0	116	90	75	65	58	52	140	108	90	78	70	63	184	142	118	103	92	83
	1	142	106	86	74	65	58	177	131	106	91	80	72	245	180	145	124	108	97
	2	162	118	95	81	71	65	94	149	119	101	88	78	77	91	167	140	122	108
	3	52	130	104	87	76	68	50	54	131	110	95	85	48	50	52	56	66	118
	4	37	39	43	93	81	72	36	37	39	42	48	90	36	36	37	38	39	40
	6	24	24	25	26	28	24	24	24	25	26	26	26	24	24	24	24	24	25
	8	18	18	18	19	19	19	18	18	18	18	18	19	18	18	18	18	18	18
	10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Le choix du type de distributeur

En irrigation localisée, le choix du type de distributeur est important. Il conditionne le niveau de filtration de l'eau, le type de maintenance à assurer, la pérennité des équipements et par voie de conséquence l'uniformité de la répartition de l'eau sur la parcelle. Il déterminera le dimensionnement du projet. Le choix du type de distributeur doit tenir compte :

- des caractéristiques du sol ;
- de la nature des cultures ;
- de la qualité de l'eau ;
- de la configuration des parcelles.

Il détermine une bonne part du coût de l'installation en lien avec les contraintes locales et les hypothèses retenues (notamment pour les cultures et le parcellaire).

Les caractéristiques du sol doivent être considérées en premier lieu pour le choix du type de distributeur. Il faut se rappeler que le sol doit transmettre l'eau aux racines par diffusion verticale et latérale (voir section « Principes de fonctionnement », p. 192). Celle-ci joue un rôle d'autant plus important que le mode d'apport est localisé (goutteurs).

Sur des sols de perméabilité moyenne, qui assurent une bonne diffusion latérale, des goutteurs de 1,6 à 4 l/h conviennent et conduisent à des investissements moindres que les diffuseurs à plus forts débits.

Dans les sols à forte perméabilité, de texture grossière, ainsi que dans certains sols argileux gonflants dont la dessiccation provoque la formation de grosses fentes de retrait, l'eau a tendance à percoler en profondeur, sans diffuser latéralement. Dans ces cas, on choisira de préférence des goutteurs à faible débit (0,6 à 1,0 l/h) ou des mini-diffuseurs, qui arrosent une surface de sol de 1 à quelques m². Dans le cas des sols gonflants, le maintien d'un niveau satisfaisant des apports d'eau est indispensable pour limiter l'apparition de fentes de retrait pouvant aller jusqu'à endommager le système racinaire.

La nature des cultures intervient dans le choix des distributeurs compte tenu notamment de leur disposition, du type d'enracinement et des façons culturales. On peut distinguer :

- les cultures annuelles, qui nécessitent de dérouler ou enrouler les rampes à la mise en place de la culture et pour la récolte. Les goutteurs en dérivation qui font saillie sur les rampes sont à proscrire. On choisira plutôt des goutteurs intégrés dans les rampes ou des gaines ;
- les cultures pérennes telles que les arbres fruitiers, les vignes, dans lesquelles les installations sont fixes, qui peuvent recevoir tous les types de distributeurs si la nature du sol le permet. Les goutteurs de 1 à 4 l/h sont les plus employés. Les solutions enterrées (30-40 cm) ou semi-enterrées (5-10 cm) sont de plus en plus rencontrées, elles permettent de limiter l'enherbement ou les obstacles aux travaux, mais réclament une gestion particulière pour éviter toute intrusion de racines dans les goutteurs ;
- les cultures maraîchères, qui sont le plus souvent arrosées avec des goutteurs de 2 l/h ou des gaines ; dans le cas des gaines, elles sont souvent mises en place en même temps que la culture et le paillage et peuvent être enterrées de quelques centimètres ;
- les cultures hors sol, qui sont irriguées par des goutteurs montés en dérivation sur des tubes d'alimentation et positionnés à l'aide d'un pic ;
- les grandes cultures, qui sont rarement irriguées par irrigation localisée en France, du fait du coût d'installation élevé de ce mode d'irrigation (densité importante des distributeurs et des rampes) et dont les gaines sont en général privilégiées. Pour autant, du goutte-à-goutte enterré est parfois mis en place dans un but initial de maîtrise des apports d'eau, et également dans un certain nombre de situations particulières (voisinage d'habitations ou de routes, arrosage discret).

La qualité de l'eau est un élément essentiel en irrigation localisée. En effet, elle détermine le niveau de risque de colmatage. Elle est d'autant moins bonne qu'elle contient des éléments susceptibles de boucher les distributeurs. Ces éléments sont de nature physique, chimique ou biologique (voir section « L'entretien du réseau », p. 228).

Une analyse de l'eau est nécessaire pour mieux cerner les risques et choisir les distributeurs en conséquence. Des recommandations précises sur les paramètres à analyser sont données dans le guide *Water Quality for Agriculture* de la FAO²⁴.

Lorsque les eaux sont de qualité médiocre ou mauvaise, on apportera une attention particulière à la sensibilité des distributeurs à l'obstruction. Il est intéressant de demander au fournisseur des références sur la sensibilité au colmatage des goutteurs qu'il propose, les tests d'INRAE par exemple.

La topographie des parcelles. Lorsqu'elle est douce et qu'il est possible d'implanter des rampes de longueur limitée, les différents types de goutteurs non autorégulants sont préférables, car ils sont moins chers que les goutteurs autorégulants, présentent une meilleure homogénéité de fabrication et souvent une moindre sensibilité au colmatage. Cependant, pour conserver une bonne répartition de l'eau, on choisira de préférence des goutteurs dont l'exposant x de la loi débit-pression est inférieur à 0,5, moins sensibles aux variations de pression.

24 « Clogging problems in localized irrigation », <http://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm>.

Dans le cas d'une topographie accentuée, d'une parcelle de forme très irrégulière ou de grandes dimensions, sur laquelle il n'est pas possible de limiter la longueur des rampes, on utilisera des goutteurs autorégulants. Il faut vérifier, après calcul des débits linéaires des rampes, compte tenu de la pente, que les pressions dans les rampes restent dans la plage de fonctionnement des goutteurs.

Le coût de l'installation doit être considéré dans sa globalité, c'est-à-dire en tenant compte du coût des équipements et des charges annuelles qui en découlent, en fonction de leurs durées de vie ; mais aussi du coût de la main-d'œuvre nécessaire à la mise en œuvre de l'installation.

Le coût des équipements dépend du choix des distributeurs, du type de filtration nécessaire et du dispositif choisi pour l'implantation des porte-rampes et des rampes. Pour une même parcelle, ce coût peut varier de 20 à 30 %.

À type d'équipement proche, les prix peuvent varier sensiblement selon les fournisseurs et la qualité des produits.

La station de filtration est un poste onéreux qu'on essaiera d'installer pour au moins 3 ha et d'affecter à plusieurs blocs d'irrigation. La durée de vie des équipements peut aller d'une seule campagne d'irrigation (gaine souple jetable) à 10 ou 15 ans en fonction de la qualité de l'eau et du soin porté à la maintenance.

Le coût de la main-d'œuvre dépend également du choix du type de distributeur. Suivant les cas, sa mise en œuvre exigera un temps de travail plus ou moins long. On peut classer par ordre croissant d'exigence :

- les gaines ;
- les goutteurs en ligne ;
- les goutteurs en dérivation ;
- les capillaires ;
- les mini-diffuseurs.

Le coût de la main-d'œuvre est également influencé par le mode de pose (au sol, suspendu, enterré) et bien sûr le caractère annuel ou pérenne de la mise en place.

En conclusion, le choix du type de distributeur le mieux adapté à la situation sera l'aboutissement d'un compromis raisonné entre plusieurs exigences, d'abord technique puis économique.

Par conséquent, il faut que celui qui a la responsabilité de ce choix soit bien informé :

- des besoins en eau à satisfaire ;
- des exigences imposées par la nature du sol et par le type de culture ;
- des pratiques culturales ;
- de la qualité de l'eau d'irrigation ;
- de la configuration des parcelles à irriguer.

Le ou les types de distributeurs les mieux adaptés techniquement seront ceux qui réaliseront le meilleur compromis entre leurs propres performances et les caractéristiques du milieu dans lequel ils seront placés. Les critères d'ordre économique n'interviendront ensuite que pour sélectionner le type de distributeur le mieux placé sur le plan du rapport qualité-prix, par rapport aux objectifs de production.

Le choix du niveau d'équipement du réseau

La micro-irrigation présente l'avantage de pouvoir être plus ou moins automatisée (voir section « L'automatisation », p. 213).

En outre, elle permet d'apporter les fertilisants ou d'autres produits chimiques de traitement (entretien du réseau) par le réseau lui-même (voir section « La fertigation », p. 232). La pratique de traitements phytosanitaires par le système d'irrigation n'est actuellement pas autorisée en France.

Facteur d'économie de main-d'œuvre appréciable, ce type d'installation doit être conçu et mis en place par des professionnels. L'équipement et l'automatisation du système devront être raisonnés en fonction de la disponibilité et de la technicité de la main-d'œuvre pour l'irrigation, ainsi que des possibilités financières de l'exploitation. Néanmoins, il faut se souvenir qu'une installation de micro-irrigation est difficilement modifiable et extensible si les modifications ne sont pas prévues au projet initial.

Aboutissement d'un compromis entre les exigences humaines, techniques et économiques, un bon projet doit permettre de répondre au plus juste aux besoins en eau et fertilisants, en évitant tout gaspillage, tout en conservant une marge de sécurité en cas de panne.

L'entretien du réseau

Les distributeurs d'irrigation localisée sont sensibles à l'obstruction. Celle-ci ne se manifeste que rarement de façon brutale sur l'ensemble du réseau.

Le colmatage est lent, progressif et irrégulier au cours des campagnes d'irrigation. Cela entraîne :

- une baisse des débits plus ou moins importante selon le degré de colmatage des distributeurs.
- Dans le cadre de goutteurs autorégulants, on peut aussi avoir des augmentations de débit dues au blocage du fonctionnement de la membrane ;
- une mauvaise répartition de l'eau sur la parcelle irriguée.

Pour maintenir une distribution d'eau aussi homogène que possible, il faut bien entretenir le réseau :

- en veillant au bon fonctionnement des filtres et en les nettoyant, voire en installant un lavage automatique ;
- en contrôlant régulièrement l'état général et l'équilibre des pressions du réseau de distribution ;
- en le purgeant, *a minima* en début et fin de saison, et régulièrement au cours de la saison, la fréquence dépendant de la qualité des eaux ;
- en pratiquant des injections de produits d'entretien du réseau (acide, javel) ;
- en vidangeant les filtres en fin de saison d'irrigation et en les protégeant du gel l'hiver.

Le nettoyage et le contrôle des filtres

Malgré les nettoyages des filtres, des dépôts finissent par altérer leur perméabilité, plus ou moins rapidement suivant la qualité de l'eau.

Filtre à sable

Il est conseillé de changer le sable au moins tous les deux ans (plus fréquemment pour des eaux chargées). Il faut veiller à la qualité du sable (calibré et roulé) et le laver avant de l'utiliser.

Filtre à tamis

Il faut :

- vérifier périodiquement l'état du tamis et le changer si les mailles sont obstruées ou détériorées ;
- vérifier les joints d'étanchéité du tamis (en partie supérieure et inférieure).

Filtre à disques

Il faut :

- vérifier périodiquement l'état des disques et les changer s'ils sont obstrués ou détériorés ;
- vérifier d'avoir la bonne quantité de disques sur la cartouche filtrante ;
- vérifier le système de compression des disques.

Le nettoyage et le contrôle des distributeurs

Contrôle

Contrôle du débit total

Pour surveiller les variations des débits dues au colmatage progressif des distributeurs, on mesure régulièrement le débit total distribué par l'installation grâce à un compteur monté en tête du réseau sur lequel on contrôlera le volume distribué en une heure.

Calcul de l'uniformité des débits

Il faut :

- vérifier visuellement en début et en cours de campagne que les distributeurs ne sont pas obstrués (ou détériorés) ;
- contrôler périodiquement (si possible chaque année à la mise en eau du réseau) l'uniformité des débits et leur variation par rapport à ceux du réseau neuf.

Pour contrôler l'uniformité des débits, la procédure suivante pourra être appliquée au champ.

Mesurer sur au moins quatre rampes le débit d'au moins quatre distributeurs (figure 5.25).

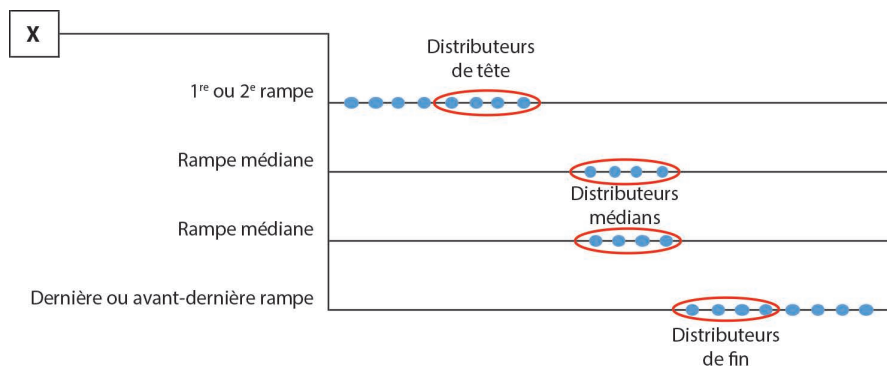


Figure 5.25. Exemple de localisation des points de mesure des débits sur installation d'irrigation localisée.

Sur la première rampe (ou deuxième), mesurer le débit d'un groupe de 4 distributeurs (à partir du 4 ou 5°).

Sur deux rampes médianes, mesurer le débit de 4 goutteurs situés approximativement en leur milieu.

Sur la dernière rampe (ou avant-dernière), mesurer le débit de 4 goutteurs situés en fin de ligne (en évitant les quatre derniers) :

- classer les débits mesurés par ordre croissant ;
- calculer :
 - la moyenne de l'ensemble des débits mesurés :

$$\bar{q} = \frac{\text{Somme des valeurs}}{16}$$

- la moyenne des 4 mesures de débit les plus faibles :

$$q_{\min} = \frac{\text{Somme des 4 valeurs des débits les plus faibles}}{4}$$

Le coefficient de distribution d'uniformité est :

$$Du = 100 \times \left(\frac{\bar{q}_{\min}}{\bar{q}} \right)$$

si Du est supérieur à 90, il n'y a pas lieu d'intervenir sur le réseau ;

si Du est compris entre 90 et 70, le réseau doit être nettoyé ;

si Du est inférieur à 70, il faut rechercher les causes du colmatage et traiter.

Dans le cas d'un dispositif enterré, il est impossible (ou trop coûteux) de mettre en œuvre un tel protocole, aussi on pourra évaluer le point de fonctionnement du dispositif (débit pour une pression donnée) dans son ensemble et observer son évolution dans le temps. Ce type de mesure est à faire après une opération de purge et de nettoyage. Une mesure avant permet de prendre conscience de l'effet du nettoyage. On pourra aussi établir la courbe du débit du réseau en fonction de la pression. Une mesure de pression en bout de réseau est un bon complément aux observations de la courbe du réseau, en particulier pour mettre en évidence d'éventuelles fuites. C'est un bon moyen d'identifier une part des dysfonctionnements, à croiser avec les observations terrain de l'état des plantes.

Cette méthode peut bien sûr s'appliquer au cas des réseaux de surface, elle a l'avantage d'être rapide et de pouvoir être mise en œuvre par deux personnes.

Nettoyage

En fonction de la nature du colmatage des distributeurs (physique, chimique, organique), on procédera aux nettoyages adéquats.

Le colmatage physique

Le colmatage physique est provoqué par le dépôt d'éléments minéraux ou organiques grossiers (sables, fragments de végétaux, algues) ou fins (argiles, limons tendant à former des agrégats).

Les éléments les plus gros doivent être retenus par une filtration efficace. Leur présence est le signe d'une filtration inadaptée ou endommagée. On peut aussi avoir des phénomènes d'aggrégation en aval des filtres que seule une purge régulière du système pourra combattre.

Il faut vérifier et changer si nécessaire l'organe filtrant (sable ou tamis).

Une filtration efficace n'empêche pas le dépôt progressif d'éléments fins, qui traversent les filtres et sont susceptibles de s'agréger en aval. Si les purges périodiques pratiquées ne suffisent pas à les

éliminer (vitesse minimale d'écoulement nécessaire 0,3 à 0,5 m/s), on peut être amené à déboucher le réseau en augmentant la pression de celui-ci jusqu'à 2 ou 3 bars, en nettoyant les distributeurs obstrués lorsqu'ils sont démontables ou en les changeant.

Le colmatage chimique

Le colmatage chimique est dû le plus souvent à la présence de calcium qui précipite en calcite ou parfois de fer qui favorise le développement de bactéries spécifiques :

- soit à la sortie des orifices des distributeurs au moment de la mise à l'air ;
- soit à l'intérieur de ceux-ci lors de l'arrêt des arrosages.

Cela nécessite un nettoyage fréquent des distributeurs.

Si les dépôts de limon et d'argile sont cimentés ou si les distributeurs sont colmatés par des précipitations calcaires (dépôts blanchâtres), un nettoyage à l'acide fort est nécessaire.

Le nettoyage consiste à injecter dans le réseau une solution d'acide nitrique du commerce (36° Baumé densité 1,33) ou chlorhydrique dont la concentration en acide pur sera de 2 à 5 pour mille en volume (2 à 5 litres par m³ d'eau), selon l'importance du colmatage. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des concentrations supérieures qui ne donnent pas de meilleurs résultats. À titre indicatif, il est recommandé de réaliser l'injection durant 30 min, puis de laisser agir pendant 10 min, le réseau à l'arrêt, et enfin de rincer pendant 30 min à l'eau claire. On pourra utiliser le poste de fertilisation (pompe doseuse) pour l'injection de la solution acide dans le réseau. Attention toutefois de bien consulter la liste des produits autorisés pour la pompe doseuse utilisée.

Précaution

Injecter l'acide dans le réseau en plastique, en aval des pièces métalliques, et rincer abondamment en fin d'opération.

Le traitement n'est efficace que s'il intervient avant que les distributeurs ne soient complètement obturés. Si c'est le cas, ils doivent être changés.

Le fer dissous dans certaines eaux de nappes profondes peut également précipiter sous forme de mince couche dont l'épaisseur augmente progressivement, par incorporation d'oxygène ou sous l'action de bactéries ferrugineuses. Il est pratiquement impossible d'éliminer ce précipité.

Pour l'éviter, il faudrait préalablement réoxygéner les eaux dans un bassin, cette mise à l'air permettant une précipitation du fer et une décantation en fond de bassin, avant envoi dans le réseau d'irrigation. Ce procédé onéreux est rarement appliqué en irrigation. Mieux vaut s'assurer, au préalable, que l'eau d'irrigation ne contient pas plus de 1 partie par million (1 ppm) de fer dissous ou choisir une technique d'aspersion.

Le colmatage organique

Les matières organiques de grandes dimensions (débris végétaux, algues, gels de bactéries, petites algues) entraînées dans les eaux de surface sont normalement arrêtées par les filtres.

Les eaux de surface contiennent souvent des micro-organismes (spores, kystes, bactéries, petites algues) qui traversent les filtres et se développent ultérieurement dans le réseau, ou au niveau des distributeurs sous forme de biofilm, ce d'autant plus que les eaux sont riches en nutriments ou qu'on pratique la fertigation tout au long de la saison.

Le traitement le plus utilisé contre ces micro-organismes consiste à injecter du chlore sous forme d'eau de Javel dans le réseau, à faible concentration, de 1 à 5 ppm (1 à 5 mg/l) de chlore libre, périodiquement 2 à 3 fois par saison. Toutefois, il faut savoir qu'au-delà de 50 mg/l de chlore résiduel dans l'eau d'arrosage, celui-ci peut nuire à certaines cultures.

Le sulfate de cuivre peut également être utilisé à raison de 4 ppm (4 mg/l). Il est nettement moins efficace et atteint plutôt les algues que les bactéries.

Le tableau 5.8 résume les solutions proposées en fonction des risques rencontrés.

Tableau 5.8. Niveau de risques et traitement des principaux cas de colmatage chimique et organique.

Type de colmatage	Importance	Produit utilisé	Dose	Type d'injecteur	Durée du traitement	Périodicité du traitement
Précipités de carbonate de calcium	Faible < 100 mg/l	Acide fort	0,2 %	Pompe doseuse	1/2 heure	2 à 3 fois par saison
	Moyen 100 à 200 mg/l	Acide fort	0,5 %	Pompe doseuse	1/2 heure	1 fois tous les quinze jours
	Fort > 200 mg/l	Acide + eau de Javel	0,5 %	Pompe doseuse volumétrique	1/2 heure en début d'irrigation	1 fois par semaine
Algues	En formation à la sortie des goutteurs	Eau de Javel	1 ppm	Pompe doseuse	Au cours d'une irrigation	2 à 3 fois par saison
Bactéries du fer	Présence faible	Eau de Javel	1 à 2 ppm	Pompe doseuse	Au cours d'une irrigation	1 fois par semaine
	Présence importante	Eau de Javel + acide pH 6	5 ppm	Pompe doseuse volumétrique		En continu

La fertilisation en irrigation localisée, ou fertigation

Un réseau d'irrigation localisée est une installation fixe qui peut être utilisée pour distribuer l'engrais aux cultures, grâce à des matériels d'injection.

L'apport d'engrais bénéficie alors des avantages de la micro-irrigation :

- intervention possible à tout moment, ce qui permet le fractionnement des apports et la correction des carences ;
- localisation des apports à proximité des racines ;
- meilleur contrôle des quantités apportées, ce qui évite les pertes par lessivage et accroît l'efficacité ;
- automatisation possible.

Toutefois, il faut respecter certaines conditions :

- le réseau d'irrigation doit être bien conçu pour assurer une répartition homogène de l'eau sur la parcelle ;
- la conduite de l'irrigation doit être bien maîtrisée ;
- l'injection d'engrais dans le réseau doit toujours être faite à l'amont d'un filtre à tamis ;
- le matériel d'injection doit être fiable, bien choisi, bien utilisé ;
- lors de mélanges, les produits injectés ne doivent pas précipiter ni provoquer la corrosion du matériel ;

- la canalisation principale doit comporter un clapet antiretour pour éviter tout risque de pollution de la ressource en eau par les engrais.

Les matériels d'injection

Les matériels d'injection utilisables sont les dilueurs, les venturis, les pompes doseuses hydrauliques, les pompes doseuses électriques.

Le dilueur, ou tank de fertilisation

Le dilueur est constitué d'une cuve étanche dans laquelle on introduit l'engrais sous forme liquide ou soluble (figure 5.26). La cuve est montée en dérivation sur la conduite principale d'irrigation, à l'amont du filtre à tamis.

Le raccordement à la conduite d'irrigation se fait par deux branchements de part et d'autre d'un dispositif permettant de créer une perte de charge dans la conduite principale, qui entraîne la dérivation d'une partie de l'eau à travers le dilueur. Un dispositif placé à l'entrée de l'eau, dans le bas de la cuve, provoque un brassage pour favoriser la dissolution de l'engrais. La solution fertilisante ressort par le haut de la cuve et est injectée dans la conduite d'irrigation. Un réglage du débit d'injection devra être effectué au préalable avec l'eau pour avoir un temps d'injection de 30 minutes au moins.

Avantages. Rustique, d'un fonctionnement hydraulique autonome et simple, le dilueur est très commode d'emploi, car il permet d'utiliser directement des engrais solides solubles.

Inconvénients et précautions d'utilisation. La dissolution et l'entraînement de l'engrais dans le réseau d'irrigation sont progressifs. Le temps de dissolution des fertilisants n'est pas toujours connu. La concentration de l'engrais dans le réseau varie fortement entre le début et la fin du poste d'irrigation. La durée de celui-ci doit être suffisamment longue pour que tout l'engrais soit dilué/dissous et distribué.

À chaque changement de poste d'irrigation, la cuve doit être rincée et rechargée.

Le volume de la cuve (50 à 400 litres suivant le modèle) limite l'emploi du dilueur à des postes d'irrigation qui arrosent des surfaces relativement peu importantes (moins 0,5 ha en cultures légumières à 1 ha en arboriculture et jusqu'à 5 ha en vigne).

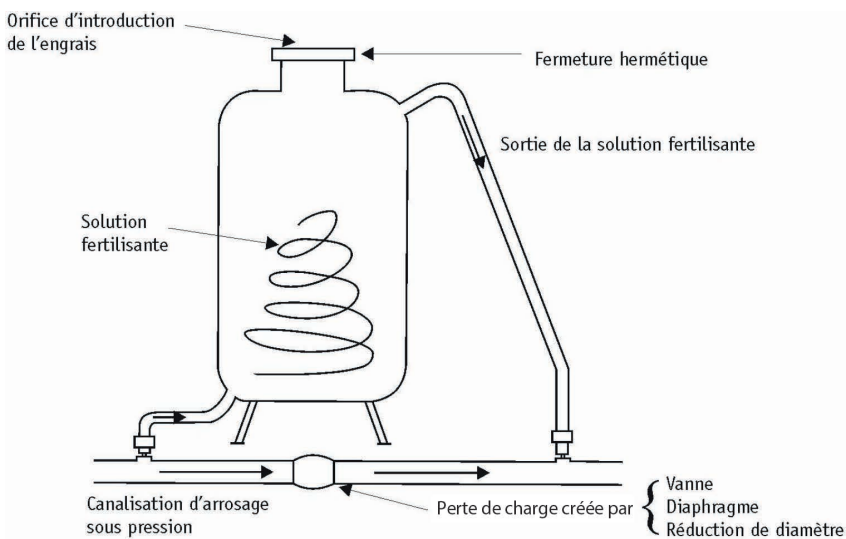


Figure 5.26. Le dilueur d'engrais.

Les venturis

Les venturis sont des injecteurs hydrauliques à très faible coût ne comportant aucune pièce mobile. L'aspiration est provoquée par effet venturi créé sur la canalisation d'irrigation, ou une dérivation de celle-ci. Elle permet d'aspirer (dépression 0,7 à 0,9 bar) une solution avec un taux d'injection qui peut aller jusqu'à 8 % du débit moteur (figure 5.27).

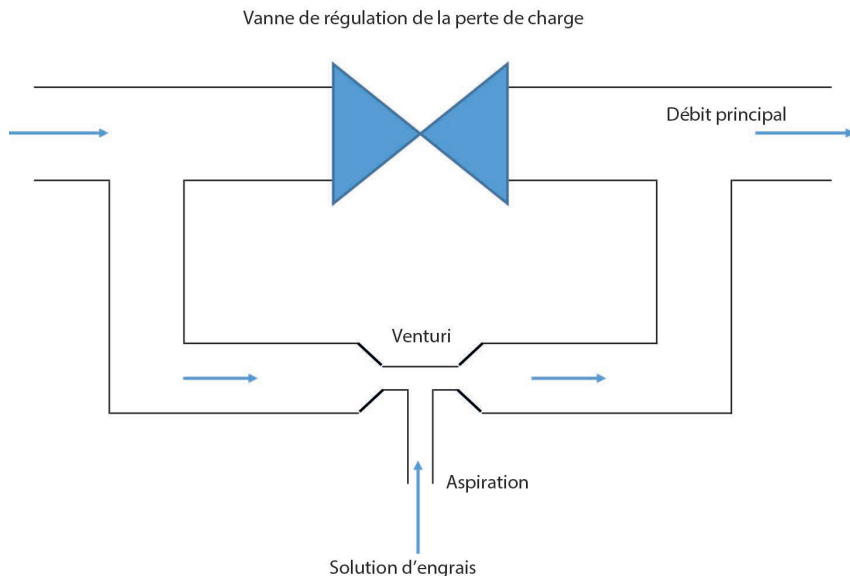


Figure 5.27. Principe du venturi.

Les pompes doseuses hydrauliques

Les pompes doseuses hydrauliques fonctionnent avec l'énergie hydraulique du réseau. L'appareil aspire et refoule alternativement une quantité constante et connue de solution fertilisante dans la conduite d'irrigation. Il en existe deux types : les pompes montées en dérivation de la conduite d'irrigation et les pompes montées en série sur celle-ci.

Les pompes montées en dérivation

Les pompes montées en dérivation de la conduite d'irrigation sont mues par un piston qui prélève de l'eau dans cette conduite et la rejette à l'extérieur (figure 5.28). Cette solution technique n'est plus beaucoup pratiquée.

Le nombre de va-et-vient par minute détermine le débit de solution injectée et peut être réglé par une vanne. Le débit injecté est réglable entre quelques litres et 300 litres par heure selon les modèles. Cependant, ce réglage est conditionné à la pression de l'eau dans la conduite d'irrigation.

Le démarrage et l'arrêt de la pompe peuvent être commandés par une vanne volumétrique ou par une électrovanne placée sur l'arrivée d'eau motrice.

Avantages. D'un fonctionnement hydraulique autonome, ces pompes assurent des apports assez précis et ne sont pas soumises à des risques de surpression et de surdosage accidentels.

Inconvénients. Le volume d'eau motrice perdu est égal au double du volume de solution injectée. Le fonctionnement du dispositif nécessite une pression minimale de 2 bars.

Pour éviter tout dysfonctionnement, il est préférable d'utiliser des engrais liquides ou des engrais solubles parfaitement solubilisés, grâce à une cuve agitée.

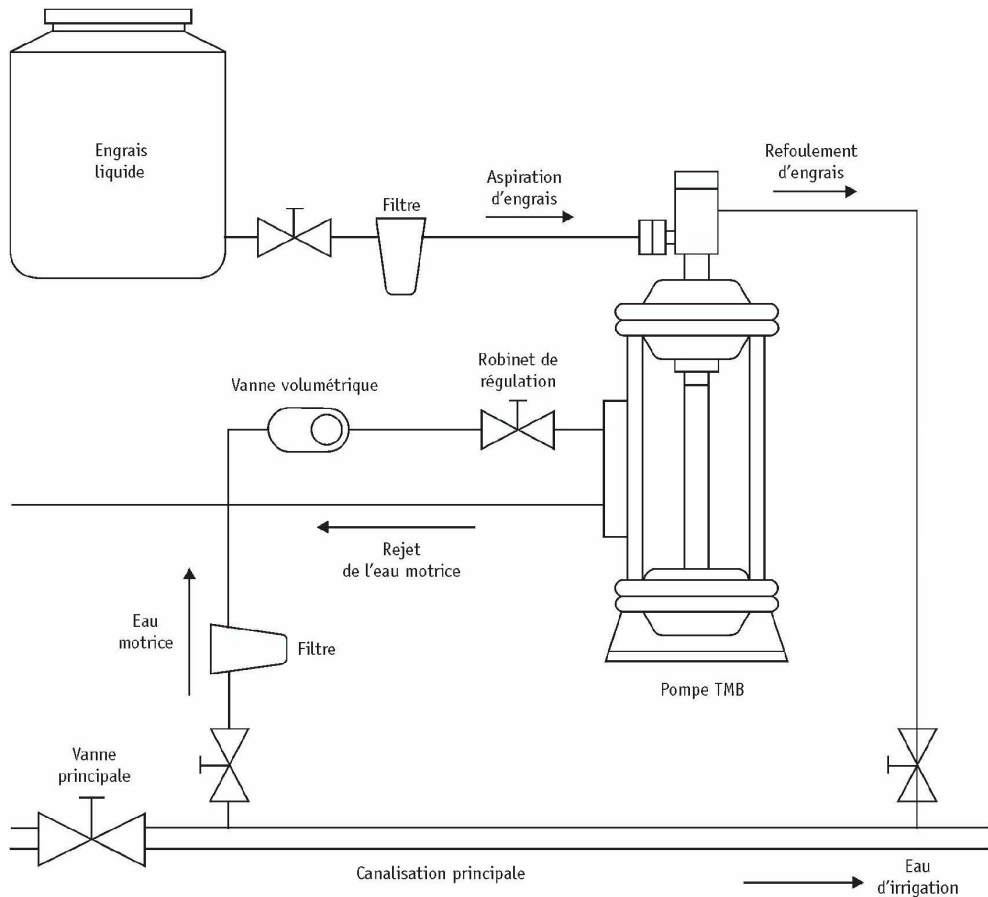


Figure 5.28. Pompe doseuse hydraulique à membrane, montée en dérivation de la canalisation principale.

Les pompes montées en série

Les pompes montées en série sur la conduite d'irrigation sont mues par le passage de toute l'eau de la conduite d'irrigation, ou de sa dérivation, dans le corps de pompe (figures 5.29 et 5.30).

Le débit d'injection est lié au débit de la conduite d'irrigation. Il est possible de monter cette pompe en dérivation de la conduite principale d'irrigation lorsque les débits d'irrigation sont importants ($> 30 \text{ m}^3/\text{h}$).

Le dosage ou taux d'injection varie de 1 à 5 % du débit moteur, la quantité de solution fertilisante injectée varie en règle générale de 2 à 50 litres de solution fertilisante par m^3 d'eau.

Avantages. Comme les précédentes, elles fonctionnent hydrauliquement de manière autonome, donc sans aucun branchement électrique.

Inconvénients. Elles doivent être protégées contre les coups de bélier éventuels dans le réseau d'irrigation.

La dimension du corps de pompe de certains modèles limite le débit admissible, et donc l'importance de la surface desservie par le poste d'irrigation.

Pour éviter tout dysfonctionnement, il est préférable d'utiliser des engrais liquides ou des engrais solubles parfaitement solubilisés, grâce à une cuve agitée.

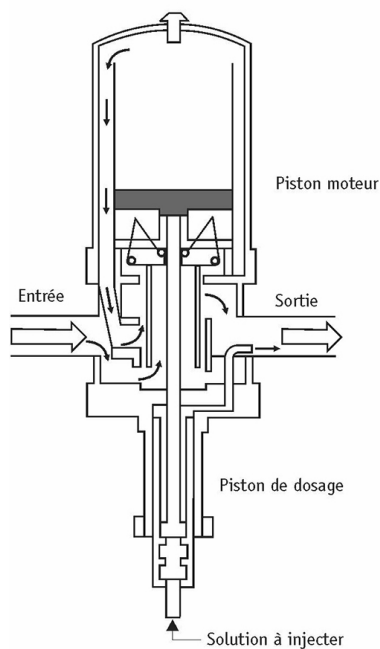


Figure 5.29. Pompe hydraulique à piston : montée du piston.

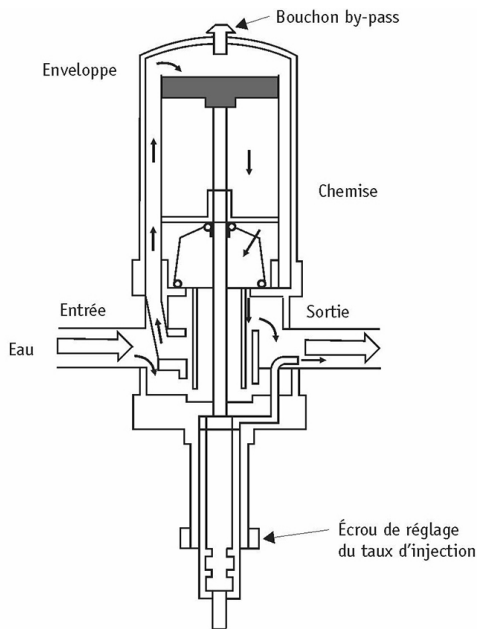


Figure 5.30. Pompe hydraulique à piston : descente du piston.

Les pompes doseuses électriques

Les pompes doseuses électriques sont constituées d'un moteur électrique qui entraîne soit une pompe alternative à piston, soit une pompe rotative (figure 5.31).

Il existe également des pompes électromagnétiques constituées d'un électro-aimant commandé électroniquement, qui actionne un système piston/membrane et qui présente l'avantage de limiter les pièces d'usure.

Avantages. Les pompes doseuses électriques sont précises et fiables. Elles permettent de disposer d'une gamme étendue de débits d'injection, que l'on peut régler de manière continue, et elles sont capables de travailler à haute pression. Leur fonctionnement peut être complètement automatique. Plusieurs pompes doseuses électriques peuvent être montées en parallèle, ce qui permet d'injecter simultanément plusieurs solutions, en particulier dans le cas des cultures hors sol ; il existe pour ce type de montage des doseurs équipés de plusieurs corps d'injection.

Inconvénients. Il faut disposer d'une source d'énergie électrique sur le lieu d'utilisation.

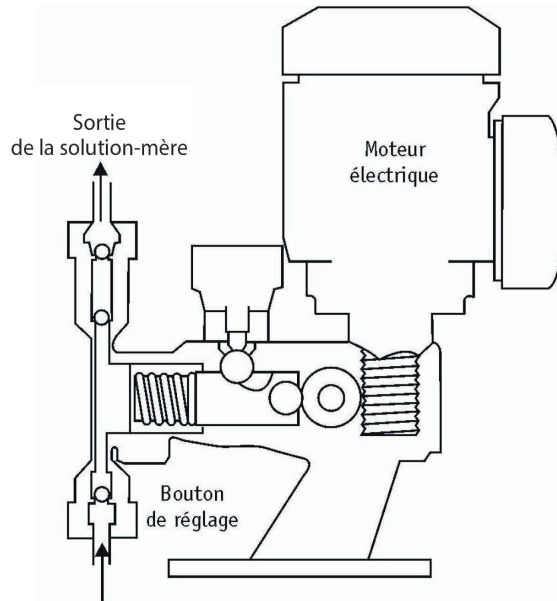


Figure 5.31. Pompe doseuse électrique.

L'asservissement des pompes doseuses

L'asservissement des pompes doseuses a pour but de maintenir constante la concentration en éléments fertilisants dans l'eau d'irrigation, lorsque le débit de la conduite principale d'irrigation varie.

La pompe doseuse peut être asservie au débit de la conduite principale d'irrigation soit directement (pompe hydraulique montée en série), soit par l'intermédiaire d'un volucompteur placé sur la conduite principale (pompe électrique, figure 5.32).

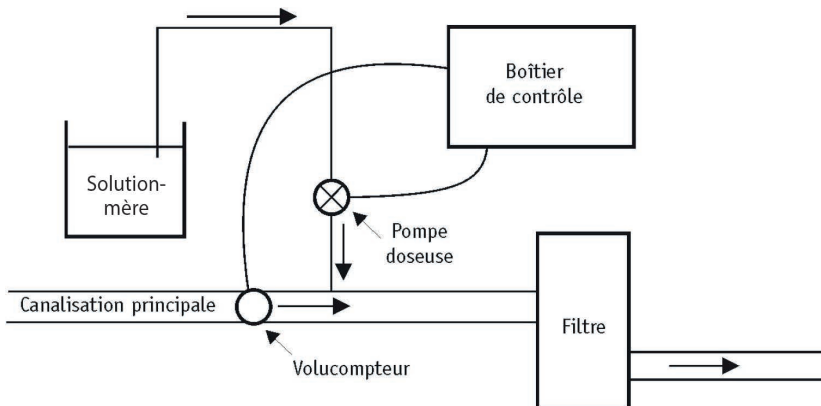


Figure 5.32. Asservissement au débit de la conduite d'irrigation.

L'asservissement peut également se faire par la mesure automatique du pH et de la conductivité de l'eau d'irrigation fertilisée, à l'aval du point d'injection de la solution fertilisante (figure 5.33).

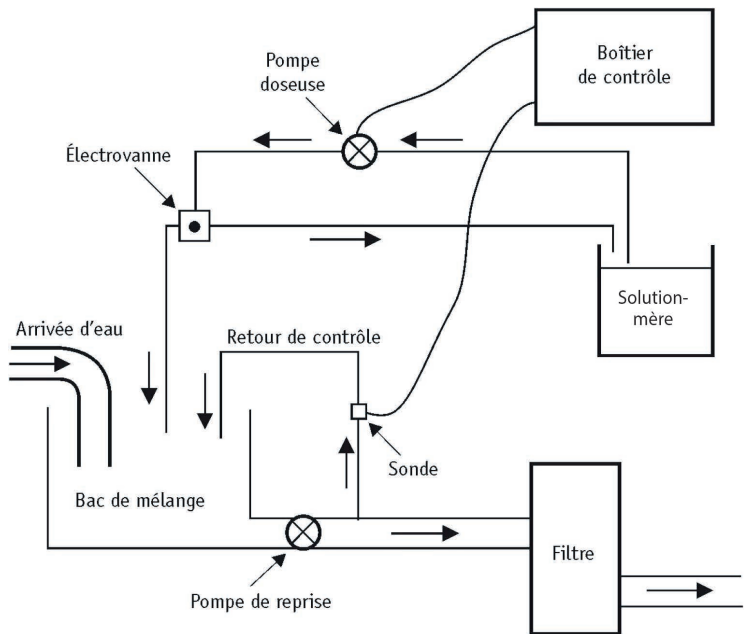


Figure 5.33. Asservissement au pH et à la conductivité de la solution.

Le choix des matériels d'injection

Les critères présentés dans le tableau 5.9 permettent de choisir des matériels d'injection, en fonction des situations rencontrées.

Tableau 5.9. Critères de choix des matériels d'injection.

	Dilueur	Injecteur venturi	Pompe doseuse non asservie	Pompe doseuse asservie
Adaptation aux cultures				
Grandes cultures	0	+++	+++	+++
Arboriculture – Vigne	+++	+++	+++	+++
Maraîchage de plein champ	+++	+++	+++	+++
Hors sol	0	++	++	+++
Énergie disponible				
Hydraulique	+++	+++	+++	++
Électrique			+++	+++
Débit de la conduite d'irrigation				
< 10 m³/heure	+++	+++	+++	+++
10 à 20 m³/heure	++	+++	+++	+++
> 20 m³/heure	+	++	+	+++
Caractéristiques techniques				
Apport continu	+	+++	+++	+++
Apport fractionné	+	+	+	+++
Régularité de la concentration	+	++	++	+++
Précision du réglage	+	+	+++	+++
Coût (électricité)			++	+++

0 : non utilisable ; + : peu favorable ; ++ : favorable ; +++ : très favorable.

La solution nutritive

Quelques définitions

La solution-mère est la solution fertilisante, ou solution nutritive, qui sera injectée dans la conduite d'irrigation.

La solution-fille est l'eau d'irrigation fertilisée après injection de la solution-mère.

La concentration de la solution-mère est définie par le poids d'engrais dissous par unité de volume de solution. Il s'exprime souvent en g/litre.

$$\text{Concentration de la solution-mère (g/l)} = \frac{\text{Poids d'engrais dissous (g)}}{\text{Volume d'eau de solution-mère (l)}}$$

Le taux d'injection sera fonction de la concentration de la solution-mère. Il est défini par le volume de solution injectée par unité de volume d'eau d'irrigation. Il s'exprime souvent en litre par m³ ou en ‰ (pour mille).

$$\text{Taux d'injection (l/m}^3\text{)} = \frac{\text{Débit de la pompe doseuse (l/h)}}{\text{Débit de la conduite d'irrigation (m}^3\text{/h)}}$$

Choix des engrais

Il est impératif de choisir des engrais solubles, soit solides (de préférence cristallisés), soit liquides.

Les **engrais simples** sont détaillés dans les tableaux 5.10 à 5.12.

Tableau 5.10. Principaux engrais solubles. Dosages en pourcentage du poids*.

Engrais	N ¹	N ²	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O	Mg	MgO	Ca	CaO	S	SO ₄
Nitrate d'ammonium 34,5 %	17,25	17,25										
Ammonitrate 33 %	16,5	16,5										
Sulfate d'ammoniaque 21 %	–	21									24	72
Nitrate de calcium anhydre	17,1	–							23,8	33,6		
Nitrate de chaux courant	14,5	1							21,8 ¹	30,8 ¹		
Nitrate de chaux cristallisé	11,8								16	23		
Nitrate de magnésie	10,9						9,5	15,7				
Nitrate de potasse	13				38	46						
Phosphate monoammonique		12	26,2	60								
Phosphate diammonique		20,5	23	53								
Phosphate monopotassique			22	51	28	34						
Bicarbonate de potasse					38	46						
Sulfate de potasse					41	50					17	51
Sulfate de magnésie 16 %							9,8	16			12	36

* Teneur très légèrement variable en plus ou en moins.

¹ nitrique ; ² ammoniacal.

Tableau 5.11. Solubilité de divers engrais dans 100 litres d'eau.

Engrais	En kg de produit		En unités fertilisantes à 20 °C			
	à 0 °C	à 20 °C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Ammonitrate (haut dosage)	118,3	192	64,4			
Bicarbonate de potasse		33			15	
Chlorure de potassium	27,6	34			20,4	
Nitrate de chaux	102	122	18,3			
Nitrate de magnésie		279	30,4			43,8
Nitrate de potasse	13,3	31,6	4		13,6	
Nitrate de soude	73	88	14,1			
Phosphate monoammonique	23	37	4,4	22,2		
Phosphate diammonique	43	66,1	11,8	31,7		
Phosphate monopotassique	14	23		11,9	7,8	
Sulfate d'ammoniaque	70,6	75	14,6			
Sulfate de magnésie 16 %	60	71				11,4
Sulfate de potasse	7,4	11,1			5,3	
Urée	66,7	103,3	46,4			

Tableau 5.12. Engrais pouvant être mélangés ou non en solution-mère.

Engrais	Sulfate d'ammoniaque	Nitrate de chaux	Nitrate de soude	Nitrate de potasse	Sulfate de potasse	Sulfate de magnésium
Sulfate d'ammoniaque	–	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Nitrate de chaux	Non	–	Oui	Oui	Non	Non
Nitrate de potasse	Oui	Oui	Oui	–	Oui	Oui
Sulfate de potasse	Oui	Non	Oui	Oui	–	Oui
Sulfate de magnésium	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	–
Phosphate d'ammoniaque	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui ¹

¹ Attention : ces engrais ne peuvent être mélangés ni à sec, ni en milieu alcalin.

Les **engrais composés** sont des engrais solubles, solides ou liquides du commerce contenant un ensemble d'éléments fertilisants (N, P₂O₅, K₂O, MgO, CaO, oligoéléments éventuels). Ces engrais sont nettement plus chers que le même équilibre en engrais simples, mais la solution est plus facile à réaliser.

Quels engrais injecter ? Les engrais azotés et potassiques ne posent généralement pas de problèmes d'injection. En revanche, en eau calcaire, des engrais phosphatés risquent de précipiter. Il faut :

- soit utiliser un engrais phosphaté acidifiant (phosphate mono-ammonique) ;
- soit acidifier l'eau jusqu'à obtenir un pH de la solution-fille voisin de 6.

Si l'on utilise des engrais complets du commerce, il faut s'assurer de la nature du P₂O₅. Si le phosphore est sous forme bi-ammonique, l'acidification est nécessaire.

On peut aussi injecter dans le réseau :

- des chélates de fer (cas de chlorose ferrique) ;
- pour l'entretien du réseau : de l'eau de javel ; de l'acide nitrique²⁵.

²⁵ Attention : toujours verser l'acide dans l'eau et non l'inverse, pour éviter projections et brûlures.

Préparation de la solution

La solution-mère est préparée dans une cuve en matière plastique (PVC ou polyester) dans laquelle on dissout l'engrais par agitation.

Les opérations seront réalisées dans l'ordre suivant :

- remplir la cuve avec l'eau nécessaire ;
- verser le ou les produits à dissoudre en remuant pour favoriser la dissolution.

Les engrais sont versés dans l'eau par alcalinité et solubilité croissantes.

La solubilité augmentant avec la température, il sera judicieux, dans certains cas, d'utiliser de l'eau tiède.

Un exemple pratique de calcul

Dans la pratique, à partir des caractéristiques de la parcelle à irriguer et de la fertilisation nécessaire, on calcule la quantité d'engrais à apporter, le volume de solution-mère à préparer et le débit de la pompe doseuse ou le réglage du taux d'injection.

Caractéristiques de la parcelle

Soit à fertiliser une parcelle d'arbres fruitiers ayant les caractéristiques suivantes :

- surface de la parcelle : 3 ha
- densité des arbres : $4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$ par arbre, soit 1 666 arbres/ha
- dispositif d'irrigation : 1 goutteur de 4 l/h par arbre
- soit un débit d'irrigation/ha de : $4 \text{ l/h} \times 1\,666 = 6\,664 \text{ l/h/ha}$ ou $6,7 \text{ m}^3/\text{h/ha}$
- et une pluviométrie fictive de $4 \text{ l/h} / 6 = 0,66 \text{ mm/h}$

Les besoins en eau journaliers de 3 mm sont couverts par une irrigation par jour, soit un temps d'arrosage de : $3 / 0,66 = 4 \text{ h } 30 \text{ min}$.

Apport d'engrais nécessaire

N : 10 kg/ha

P_2O_5 : 10 kg/ha

K_2O : 13 kg/ha

Tableau 5.13. Engrais utilisés.

Engrais	N	P_2O_5 (en % du poids)	K_2O
Phosphate mono-ammonique (12-61-0)	12	61	0
Nitrate de potasse (13-0-46)	13	0	46
Ammonitrate (33,5-0-0)	33,5	0	0

Tableau 5.14. Calcul des quantités respectives d'engrais nécessaires par hectare.

Apports nécessaires par ha	Nature d'engrais	Poids d'engrais
$\text{P}_2\text{O}_5 = 10$	(12-61-0)	$10/0,61 = 16,4 \text{ kg}$
$\text{K}_2\text{O} = 13$	(13-0-46)	$13/0,46 = 28,3 \text{ kg}$
N = 10 ⁽¹⁾		

⁽¹⁾ Les deux premiers engrais apportent respectivement :
 $16,4 \times 0,12 = 1,97 \text{ kg}$ et $28,3 \times 0,13 = 3,66 \text{ kg}$, soit au total 5,63 kg d'ammonitrate.
 Les besoins finaux en ammonitrate sont :

N = 10 – 5,63 = 4,37

(33,5-0-0)

$4,37/0,335 = 13 \text{ kg}$

Préparation de la solution

On verse dans l'ordre :

- l'eau ;
- le phosphate monoammonique ;
- le nitrate de potasse ;
- l'ammonitrate.

Calcul du volume de solution-mère

Compte tenu de la solubilité des engrais, le volume d'eau nécessaire à la préparation de la solution-mère pour 1 ha se calcule comme suit.

Tableau 5.15. Calcul du volume de solution-mère.

Poids d'engrais à dissoudre		Solubilité de l'engrais dans 100 l d'eau	Volume d'eau nécessaire (en litres)
Phosphate mono-ammonique	16,4 kg	37 kg	$100 \times 16,4 / 37 = 44 \text{ l}$
Nitrate de potasse	28,3 kg	31,6 kg	$100 \times 28,3 / 31,6 = 90 \text{ l}$
Ammo-nitrate	13 kg	192 kg	$100 \times 13 / 192 = 7 \text{ l}$
Total	57,7 kg		141 l

Par sécurité, le volume d'eau calculé sera majoré d'environ 20 %, ce qui conduit à un volume d'environ 170 l/ha. Pour l'ensemble du poste d'irrigation pour 3 ha, le poids total d'engrais nécessaire sera :

- phosphate monoammonique : $16,4 \times 3 = 49,2 \text{ kg}$
- nitrate de potasse : $28,3 \times 3 = 84,9 \text{ kg}$
- ammonitrate : $13 \times 3 = 39 \text{ kg}$
- soit au total : 173,1 kg.

La quantité de solution-mère nécessaire sera de $170 \times 3 = 510 \text{ l}$.

Calcul du débit de la pompe doseuse

Les postes d'irrigation ont une durée d'arrosage de 4 h 30 min. L'injection d'engrais doit être réalisée dès le début du poste. Le temps de rinçage nécessaire pour obtenir une eau claire dans tout le réseau sera de l'ordre de 30 min. Toute la solution-mère doit donc être injectée en 4 heures, ce qui conduit à un débit d'injection de :

$$510 \text{ l} / 4 \text{ h} = 127,5 \text{ l/h}$$

On réglera le débit de la pompe doseuse à 130 l/h.

Vérification de la salinité de l'eau d'irrigation

Concentration de la solution-mère : $173 \text{ kg} / 510 \text{ l} = 0,34 \text{ kg/l}$

Taux d'injection = débit de la pompe doseuse divisé par le débit d'irrigation, soit :

$$130 \text{ (l/h)} / 20 \text{ (m}^3\text{/h)} = 6,5 \text{ l/m}^3$$

Salinité de l'eau d'irrigation = $0,34 \times 6,5 = 2,2 \text{ g/l}$. La salinité, bien inférieure à 4 g/l, est bonne.

Fertigation et agriculture biologique

Les engrais liquides utilisables en agriculture biologique sont peu répandus.

Il s'agit généralement de produits peu compatibles avec les distributeurs (goutteurs, micro-jets) et facteurs de colmatage. À ce jour, il n'est pas possible de donner une liste indicative de produits disponibles sur le marché.

Avant tout emploi, il est recommandé de procéder à un essai sur une période significative, sur une petite zone test, pour évaluer les risques de colmatage rapide.

Rappel de quelques principes pour la fertigation

- Raisonner le choix du matériel d'injection.
- Injecter l'engrais toujours avant un filtre à tamis.
- Connaître le pH et la teneur en calcium de l'eau et acidifier si nécessaire.
- Pour les apports de P_2O_5 , choisir de préférence un phosphate mono-ammonique.
- Bien calculer la concentration des solutions-mère et fille.
- Effectuer le rinçage de réseau après injection.
- Manipuler l'acide nitrique avec précaution.

Irrigation localisée et réutilisation des eaux usées traitées

Selon les pays, la mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées traitées est plus ou moins contrainte par les réglementations en vigueur, lesquelles sont par ailleurs en constante évolution. La qualité des eaux usées traitées est donc de nature extrêmement variable selon les situations, tant du point de vue sanitaire que physico-chimique.

Dans ce contexte, il est impossible d'établir des préconisations précises et les éléments à retenir sont les suivants :

- risque de transfert de pathogènes dans les aérosols : ce risque est absent dans le cas du goutte-à-goutte et modéré dans le cas des mini-diffuseurs (pression faible, portée faible) ;
- risque de transfert de pathogènes par le végétal récolté (potentiellement consommé en frais) : le risque est absent pour du goutte-à-goutte enterré et à évaluer au cas par cas dans les autres situations, en prenant en compte la qualité de l'eau usée traitée, le contact ou non avec l'organe récolté, le mode de consommation du végétal (cru, cuit). D'une façon générale, le risque est moindre qu'avec les techniques par aspersion ;
- problèmes de colmatage des distributeurs, de développement de biofilm dans les rampes : ils sont extrêmement liés à la qualité de l'eau. À qualité d'eau équivalente, plus le diamètre des distributeurs est réduit, plus les risques de colmatage sont importants. À ce titre, le goutte-à-goutte est bien entendu plus sensible que les autres matériels d'irrigation. Son emploi doit être associé à un entretien renforcé (purge, injection de produits d'entretien).

IRRIGATION GRAVITAIRE

Frédéric Rossel, Gilles Belaud, François Charron

Principes et notions de base

L'irrigation gravitaire, encore appelée irrigation de surface, se pratique à la raie, par planche ou par bassin. C'est la méthode d'irrigation la plus répandue dans le monde (86 % des surfaces²⁶). Dans le sud de la France, l'irrigation gravitaire reste largement pratiquée en raison de son adaptation au contexte local. Souvent accusée de gaspiller l'eau, l'irrigation gravitaire peut s'avérer relativement efficiente si elle est bien maîtrisée et modernisée. Ce chapitre traite plus en détail de l'irrigation à la raie, mais la majeure partie des informations présentées sont valables pour les différentes techniques d'irrigation gravitaire.



Irrigation à la raie d'oignons dans la région de Valence, Espagne (© F. Rossel).

Pourquoi moderniser ?

- Pour adapter l'irrigation au progrès des facteurs de production.
- Pour mieux maîtriser les apports d'eau (répartir l'eau régulièrement, éviter aussi bien les sous-irrigations que les excès d'eau et les lessivages).
- Pour diminuer les charges de main-d'œuvre (alléger les temps de travaux nécessaires au bon déroulement de l'arrosage).

Comment ?

- Par une meilleure connaissance de l'irrigation et de la parcelle.
- Par un meilleur contrôle de la distribution en tête de parcelle.

²⁶ Aquastat, FAO, 2014 (<https://www.fao.org/aquastat/fr/>).

- Par l'amélioration du planage (nivellement) de la parcelle.
- Par un meilleur suivi de l'arrosage au sein de la parcelle.

Avec quels moyens ?

- Les distributeurs de surface.
- Les appareils de mesure hydrauliques.
- Le laser rotatif en planage.
- Les tensiomètres et les vannes automatiques.
- L'organisation des tours d'eau.

Le déroulement d'une irrigation gravitaire

Le principe et les différentes étapes d'une irrigation à la raie sont résumés sur la figure 6.1, le principe est également valable pour une irrigation par planche (ou calan) ou par bassin.

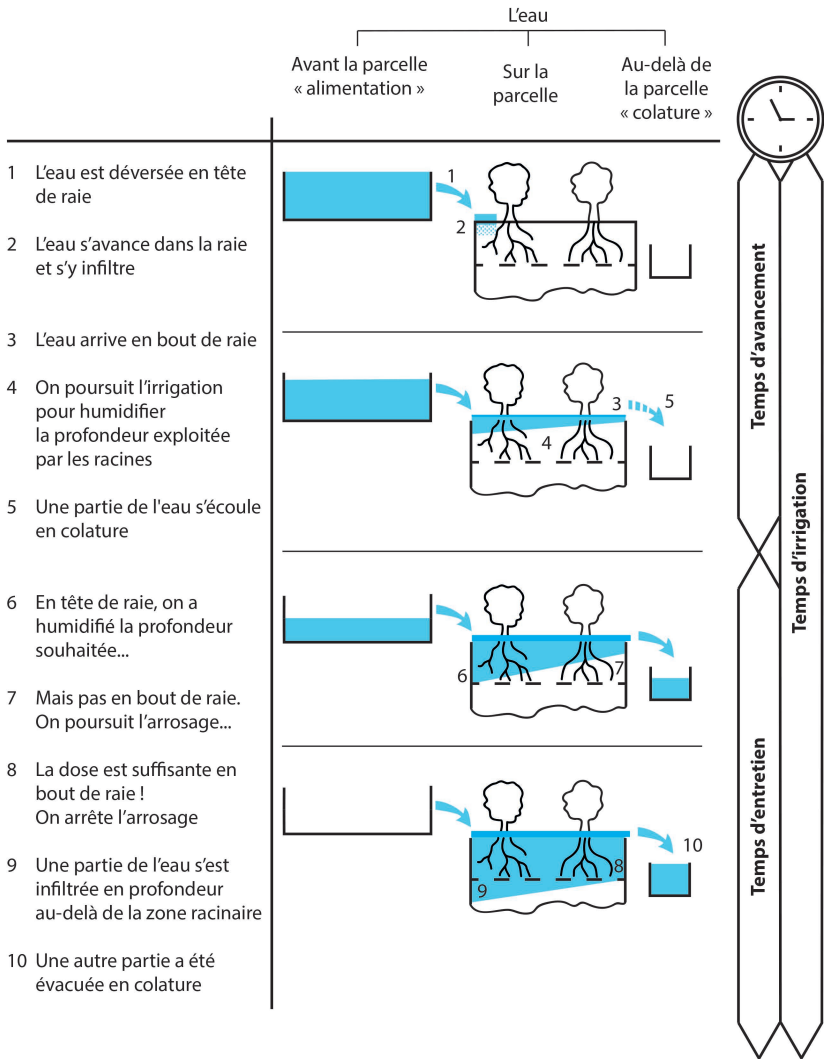


Figure 6.1. Principe et principales étapes de l'irrigation à la raie (illustration A. Rossel).

La répartition de l'eau apportée

Que devient la quantité d'eau apportée en tête de raie appelée volume brut (V_b) ? L'estimation du volume brut apporté en tête de parcelle se fait par multiplication du débit moyen d'apport par le temps d'irrigation.

Exemple d'estimation du volume brut

Soit un débit de 1 litre/seconde par raie et un temps d'irrigation de 4 heures. Le volume brut par raie est de :

$$1 \text{ (l/s)} \times 60 \text{ (s)} \times 60 \text{ (mn)} \times 4 \text{ (h)} = 14\,400 \text{ litres, soit } 14,4 \text{ m}^3$$

Seule la partie stockée dans la zone racinaire de la culture sera utilisable par les plantes (figure 6.2) : elle est appelée volume net (V_n).



Figure 6.2. Une partie de l'eau provenant de la raie peut être absorbée par les racines, celle stockée dans la zone racinaire (illustration A. Rossel).

Le reste est perdu pour les plantes par infiltration profonde : volume percolé (V_p), et par surverse en bout de la raie : volume en colature (V_c) (figure 6.3).

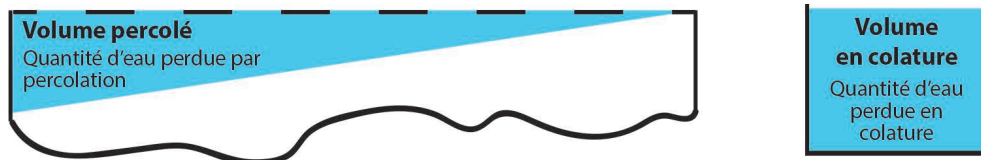


Figure 6.3. Une partie de l'eau provenant de la raie est perdue pour les plantes par percolation dans le sol et par évacuation dans le fossé de colature (illustration A. Rossel).

La caractérisation d'une irrigation gravitaire : rendement et uniformité

La qualité d'une irrigation à la raie est caractérisée par le rendement, encore appelé « efficacité », et par l'uniformité de l'arrosage (figure 6.4). En irrigation gravitaire bien maîtrisée, le rendement peut atteindre des valeurs comprises entre 60 et 70 %. En irrigation gravitaire modernisée, il peut dépasser les 80 %. L'uniformité peut aussi dépasser 80 %.

Les paramètres fondamentaux

La qualité de l'irrigation, c'est-à-dire le rendement et l'uniformité, dépend de deux paramètres fondamentaux : le **débit en tête de raie** (figure 6.5) et le **temps d'irrigation** (figure 6.6). Mais cela est également fonction de la nature et de l'occupation du sol, de la pente, de la géométrie de la surface à arroser (calan, raie, bassin), et qu'en fait un débit bien adapté tient compte de tout cela.

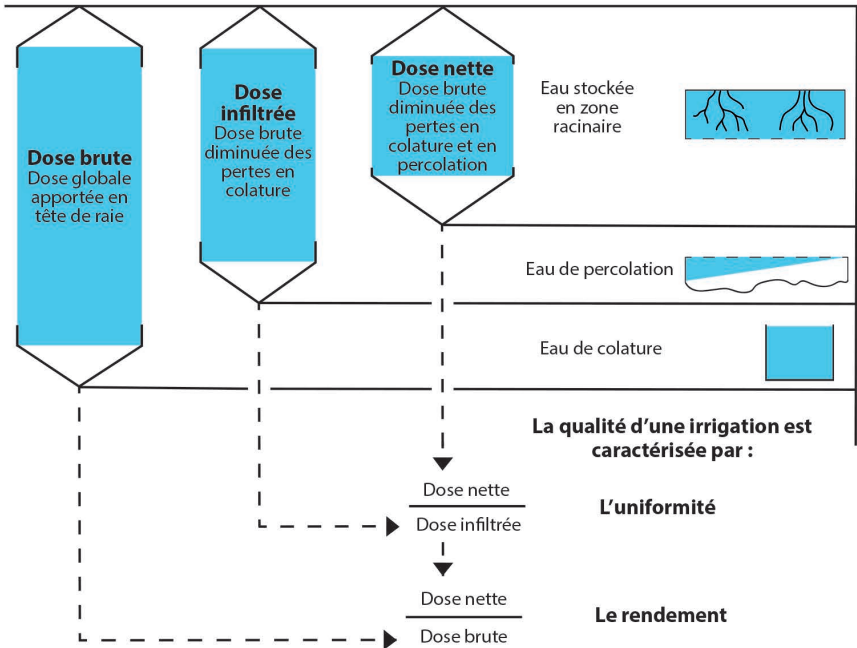


Figure 6.4. Les critères de qualité d'une irrigation à la raie (illustration A. Rossel).

Le temps d'irrigation est la somme de deux temps : le temps d'avancement et le temps d'entretien (figure 6.6). En Crau, pour l'irrigation des planches de foin, la pratique actuelle est de stopper l'irrigation dès que l'eau arrive au bout de la planche, dans ce cas le temps d'entretien est nul et le temps d'irrigation est donc égal au temps d'avancement. Des essais sont conduits pour voir si la qualité de l'irrigation reste satisfaisante en stoppant l'apport d'eau avant que le front atteigne le bout de la planche, ceci dans le but d'augmenter encore l'efficacité de l'irrigation.

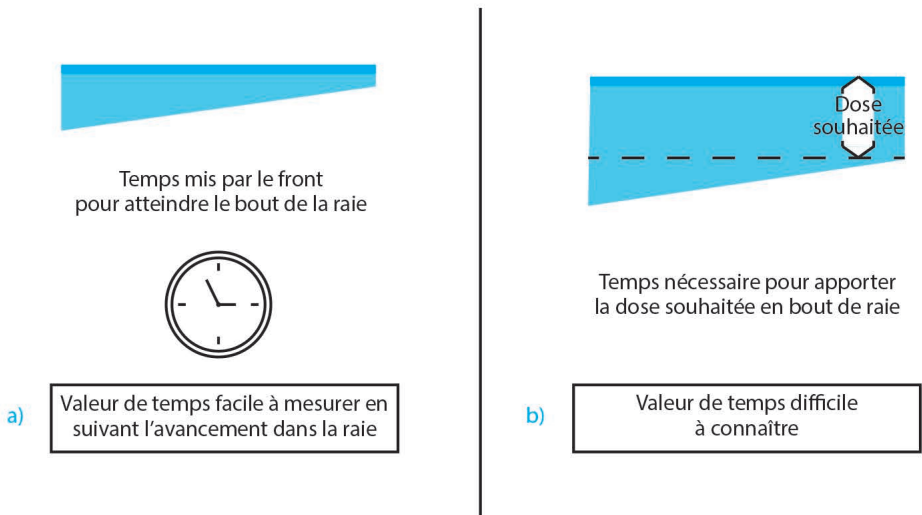


Figure 6.6. (a) Temps d'avancement de l'eau dans la raie. (b) Temps d'entretien de l'eau dans la raie (illustration A. Rossel).

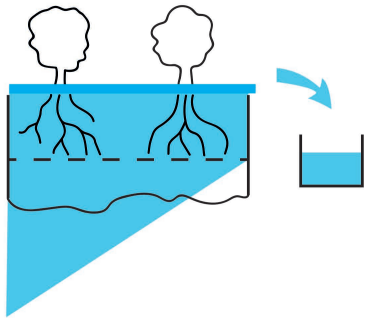
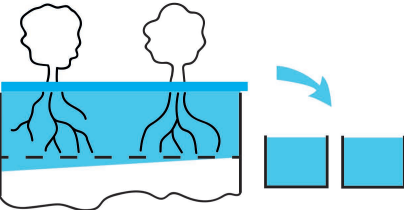
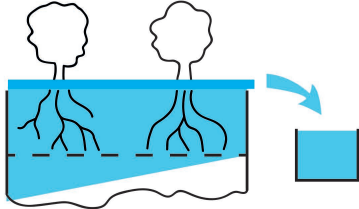
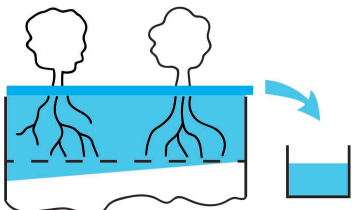
Calage du débit	Conséquence sur l'irrigation
<p>Débit trop faible</p> <p>Le front avance trop lentement</p> <p>Le temps d'infiltration en tête de raie est trop élevé</p> <p>Importantes pertes par percolation</p> <p>Rendement faible</p> <p>Mauvaise uniformité</p>	
<p>Débit trop fort</p> <p>Le front avance très vite</p> <p>Le débit de surverse en colature devient vite très élevé</p> <p>Importantes pertes par colature</p> <p>Bonne uniformité, mais rendement faible</p>	
<p>Un seul débit bien adapté</p> <p>Équilibre entre les pertes par colature et celles par percolation</p> <p>Rendement et uniformité entre 60 et 70 %</p>	
<p>Double débit</p> <p>Un débit d'attaque élevé pendant l'avancement</p> <p>Un débit plus faible en phase d'entretien</p> <p>Avancement rapide donc faibles pertes par percolation</p> <p>Faible surverse en colature</p> <p>Le rendement et l'uniformité peuvent dépasser les 80 %</p>	

Figure 6.5. Influence du débit en tête de raie sur les pertes par percolation et en colature (illustration A. Rossel).

Les équipements d'irrigation gravitaire

Il peut être utile de mécaniser l'irrigation de surface grâce aux matériels modernes (photo 6.1) pour :

- améliorer les conditions de travail au champ ;
- diminuer les temps de travail afin d'améliorer les conditions de travail des agriculteurs ;
- diminuer les temps de travail afin de répondre aux exigences du droit du travail ;
- faire face à la diminution du personnel expérimenté ;
- maîtriser la conduite des arrosages ;
- faire en sorte que l'irrigation ne soit pas un frein au progrès des autres techniques de production.



Photo 6.1. Modernisation de l'irrigation gravitaire
(© INRAE/B. Molle).

Éléments de choix

Le choix d'un équipement de surface doit prendre en compte les caractéristiques des matériels disponibles et les contraintes d'utilisation.

Caractéristiques des matériels disponibles

Les caractéristiques techniques et économiques des différents matériels de distribution à la parcelle sont détaillées ci-après.

Contraintes d'utilisation

Ces contraintes sont spécifiques à chaque situation. Pour les cerner correctement, il faut examiner :

La desserte en eau :

- débit (quantité, régularité, disponibilité) ;
- charge utile (dénivelée entre le canal d'amenée de l'eau et la parcelle) ;
- propreté de l'eau ;
- nature et nombre de prises.

La parcelle :

- surface ;
- pente ;
- nature du sol ;
- longueur des raies ;

- configuration de la « tournière » en bout de parcelle. Une tournière est la bande de terre située à chaque extrémité des raies de labour où l'on fait tourner les engins agricoles. Cette lisière de champ labourée en travers ou non labourée porte différents noms selon les régions : fourrière, chaintre, frontaille, bordière ;
- débit nécessaire par raie.

La culture :

- écartement des raies ;
- nécessité de façon culturale pendant la période d'irrigation.

La main-d'œuvre :

- disponibilité ;
- quantité ;
- compétence.

Bien connaître ces contraintes, c'est se donner les moyens d'effectuer un choix judicieux de matériel pour une amélioration de l'irrigation de surface.

Pour bien choisir le matériel

Les matériels cités dans le tableau 6.1 sont décrits dans les pages suivantes. Certains sont plus adaptés que d'autres à la méthode d'irrigation et à la culture pratiquée. Le tableau 6.1 donne des indications pour le choix du matériel selon la culture.

Tableau 6.1. Choix du matériel d'irrigation gravitaire selon la culture.

Matériels	Irrigation à la raie			Irrigation à la planche
	Grandes cultures	Maraîchage	Vergers	Vergers/fourrage
Canal en terre	+	+	+	+
Mécanisation				
Canal en terre avec martelière				+++
Siphons	++	+		
Canal maçonné à vannettes		+++	+++	++
Gaine souple	+	+++	++	+
Tube à vannettes	+++	++		
Tuyau enterré avec cannes			+++	++
Automatisation				
Trans-irrigation de surface	++			
Trans-irrigation enterrée			+++	++

Pour bien utiliser le matériel

Les conditions à satisfaire pour une bonne irrigation gravitaire sont :

- un tour d'eau fiable ;
- un débit régulier ;
- une pente des raies ou des planches régulière ;
- il doit être possible d'évacuer les eaux en colature.

Quand on réunit ces éléments, on se place dans de bonnes conditions pour réaliser des irrigations correctes, c'est-à-dire homogènes (même dose sur toute la parcelle) et efficaces (faibles pertes par percolation et en colatures). C'est la solution idéale mais pas pour diminuer les coûts d'entretien : une parcelle bien réglée au calan par exemple ne nécessite pas forcément une colature, ce qui diminue de ce fait les coûts en entretien (désherbage, curage).

Certains matériels ont besoin de pression pour fonctionner. On doit donc :

- disposer d'une charge (dénivelée entre le canal d'amenée de l'eau et la parcelle) suffisante en tête d'installation, au minimum 20 cm ;
- penser à un dégrillage pour éviter les problèmes de bouchage des canalisations. La filtration adéquate dépend de la nature des éléments à éliminer et de la nature des équipements à l'aval, ceci dans le but d'optimiser la fréquence d'intervention (débouchage du filtre), sauf si le système de nettoyage du filtre est automatique.

Les matériels d'irrigation gravitaire

Dans l'irrigation traditionnelle gravitaire, la répartition du débit à l'amont de la parcelle est difficile à obtenir et relativement précaire en raison des phénomènes d'érosion intervenant aux droits des entrées d'eau sur un même poste (raie ou portion de calan). Ainsi, pour l'irrigation à la raie, la présence permanente de l'irrigant est-elle quasiment nécessaire pour éviter toute dérive préjudiciable à l'uniformité d'arrosage. L'utilisation de distributeurs mécanisés à l'amont de la parcelle est un élément capital pour garantir une répartition uniforme du débit et prévenir les dérives ultérieures. Ces distributeurs, réglés en début d'arrosage, peuvent être laissés sans surveillance. Ils permettent d'économiser de la main-d'œuvre, facilitent la conduite des arrosages et améliorent les performances de l'irrigation.

Canaux en terre : conduite manuelle traditionnelle

Destination. Toutes cultures irriguées à la raie ou à la planche où il n'est pas nécessaire d'intervenir avec des engins agricoles pendant la période d'irrigation.

Description. À partir d'un canal arroseur en terre implanté en partie amont de la parcelle, on alimente les raies ou la portion de calan par ouverture d'une brèche à l'aide d'une houe (photo 6.2).



Photo 6.2. Conduite manuelle d'irrigation gravitaire traditionnelle, culture d'oignons, Haïti (© F. Rossel).

Qualités essentielles. Investissement négligeable.

Défauts majeurs. Pendant l'arrosage, présence permanente d'une personne pour l'ouverture et la fermeture des brèches dans le canal arroseur.

Entre les arrosages, enherbement et apparition de fentes dans le canal arroseur.

Canaux en terre avec martelières

Destination. Cultures irriguées à la planche (par calan) de grandes surfaces avec une bonne planéité. Cette technique est utilisée, par exemple, par la majorité des agriculteurs de la plaine de la Crau pour l'irrigation du foin de Crau.

Description. Le canal arroseur est implanté en partie amont de la parcelle, la berge du canal du côté de la parcelle doit être plus basse que celle opposée et bien horizontale. La parcelle est divisée en plusieurs parties appelées « planches » ou « calans ». On alimente un calan par fermeture d'une martelière (vanne guillotine), obstruant le canal en aval du calan. La fermeture de la martelière provoque la montée du niveau de l'eau, le débordement du canal et la submersion du calan (figure 6.7, photo 6.3). En aval du calan, il peut y avoir un canal de colature pour évacuer les excédents d'eau, c'est la solution idéale, mais pas pour diminuer les coûts d'entretien (désherbage, curage) ; une parcelle bien réglée ne nécessite pas forcément une colature.

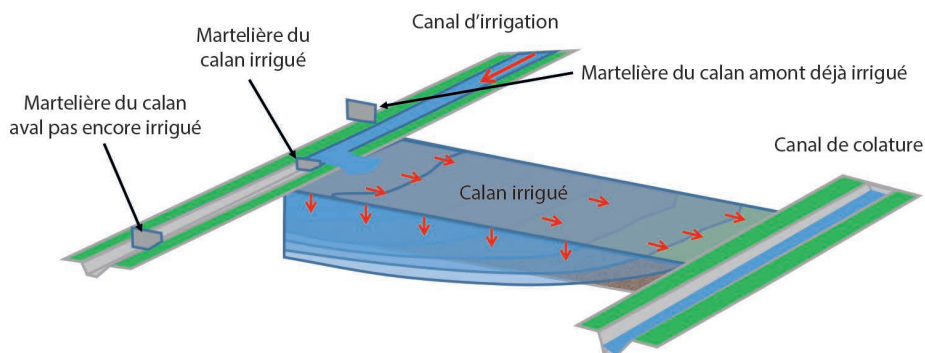


Figure 6.7. Canal en terre avec martelière de distribution de l'eau (illustration G. Belaud et F. Rossel).



Photo 6.3. Irrigation d'une parcelle de foin de Crau par submersion à l'aide d'un canal en terre et d'une martelière (© F. Charron).

Qualités essentielles

- Possibilité d'intervenir sur la parcelle avec des engins pendant la période d'irrigation.
- Investissement faible.
- Simplicité.
- Grande surface irriguée.
- Possibilité de redimensionner facilement les canaux en terre.
- Mise en place relativement simple du système d'irrigation.
- Système rustique et robuste.

Défauts majeurs

- Nécessité d'avoir des parcelles bien nivelées pour assurer un arrosage homogène sur la parcelle.
- Nécessité d'intervenir de façon répétée pendant les arrosages pour la manipulation des martelières et la surveillance.
- Entre les arrosages, enherbement et apparition de fentes dans le canal arroseur.
- Nécessité d'intervenir parfois sur le profil du canal (curage essentiellement).
- L'étanchéité des martelières se dégrade avec le temps, ce qui entraîne des pertes d'eau.

Amélioration. La réalisation d'un revêtement en béton (béton projeté fibré) du canal arroseur permet de faire un réglage précis de la lame de déversement et donc d'améliorer l'homogénéité de l'arrosage (photo 6.4a). La pose d'une membrane imperméable (moins durable) permet de réduire les pertes par infiltration et de réduire les temps de transfert dans les canaux de transport (photo 6.4b). Dans les deux cas, l'investissement est plus important que pour des canaux en terre mais les coûts de fonctionnement et les temps d'entretien sont réduits (désherbage, curage) et les pertes en eaux sont réduites.



Photo 6.4. Afin d'améliorer les performances du système, le canal peut-être maçonné (a) ou recouvert d'une membrane (b), culture de foin de Crau, France (© F. Charron).

Afin de réduire le nombre d'interventions et de manipulations de martelières, surtout pendant les tours d'eau de nuit, de nombreux agriculteurs de la plaine de la Crau ont développé des systèmes pour l'automatisation de l'ouverture ou de la fermeture des martelières ainsi que des piquets détecteurs de présence d'eau en fin de calan. De nombreuses structures (domaine du Merle, Comité du foin de Crau, INRAE, lycée Pasquet) se sont également penchées sur ce problème, et la Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône a réalisé en 2019 un travail de synthèse sur les innovations techniques sur l'automatisation des martelières et édité des fiches techniques. Les systèmes les plus fréquents sont des systèmes mécaniques à commande par réveil ou minuterie (photos 6.5a et 6.5b), leurs principaux avantages sont qu'ils sont robustes et n'ont pas besoin d'énergie électrique. Plus récemment, des systèmes motorisés alimentés par panneaux solaires ou batterie (photos 6.5c et 6.5d) à commande par jalons (photo 6.5e) pour détecter l'arrivée de l'eau en bout de parcelle sont expérimentés, leurs principaux avantages sont qu'ils modifient automatiquement la durée de l'arrosage en fonction du débit d'apport et de l'état initial de la parcelle.



Photo 6.5. Exemples d'automatisation de martelière dans la plaine de la Crau : culture de foin de Crau, France (a, b et d : © M. Moebs ; c et e : © F. Charron).

Siphons

Destination. Toutes cultures irriguées à la raie où il n'est pas nécessaire d'intervenir avec des engins agricoles pendant la période d'irrigation.

Description. Le siphon est un tube de plastique coudé de faible diamètre qui, une fois amorcé, assure le transfert du débit entre le canal arroseur en terre implanté en partie amont de la parcelle et la raie ou la portion de calan qu'il dessert (photo 6.6). C'est un système mécanisé, peu onéreux, de mise en œuvre facile, qui nécessite une très faible charge en tête de parcelle. À partir d'un canal arroseur, on alimente les raies par siphonage à l'aide de tuyaux mobiles déplacés de poste en poste. Le canal arroseur doit avoir une section suffisante et une pente régulière.



Photo 6.6. Alimentation des raies par siphons, 2015, Sénégal (© Cirad/P. Marnotte).

Caractéristiques techniques. Les tuyaux sont de petit diamètre (inférieur à 60 mm). Ils sont constitués avec des matériaux rigides ou semi-rigides. La majorité des siphons est réalisée avec du PVC rigide de 1,5 mm d'épaisseur, dans une gamme de diamètre qui va de 20 à 43 mm. Le poids moyen d'un siphon est de 300 g pour une longueur comprise entre 1 m et 1,50 m. On peut utiliser des tuyaux semi-rigides, du type tuyau annelé ou gaine armée, qui se courbent sans s'aplatir.

Fabrication. Avec les matériaux semi-rigides, il s'agit uniquement de découper des éléments de longueur adéquate.

Avec le PVC rigide, le cintrage à chaud est préférable à l'utilisation de coudes qui provoquent des pertes de charges singulières. Il faut remplir le tuyau avec du sable ou y introduire un boudin gonflable pour éviter qu'il s'aplatisse lors du cintrage.

Il vaut mieux que l'extrémité du siphon qui plonge dans le canal soit biseautée, avec une coupe à peu près parallèle au plan d'eau.

Utilisation. Le débit d'un siphon est fonction de son diamètre et de la charge motrice (tableau 6.2 et figure 6.8).

Tableau 6.2. Débit d'un siphon de diamètre 43 mm (en l/s), avec ou sans réducteur de diamètre en sortie.

Diamètre (mm)	Charge (cm)			
	5	10	15	20
Avec réduction 20	0,25	0,40	0,45	0,55
23	0,35	0,50	0,60	0,70
26	0,45	0,65	0,80	0,90
30	0,60	0,85	1,05	1,20
Sans limiteur 43	1,00	1,40	1,70	2,00

Après mise en charge du canal arroseur que l'on ferme avec une tôle en demi-lune ou un barrage de terre, les siphons sont amorcés manuellement. Pour cela, il faut remplir le siphon en l'immergeant dans le canal puis le maintenir fermé avec la paume de la main le temps de le mettre en place. Une charge de 10 cm est suffisante pour travailler dans de bonnes conditions.

On réalise facilement un arrosage à deux débits :

- en jouant sur le nombre des siphons ;
- en utilisant des diamètres différents ;
- en plaçant des bouchons percés à la sortie (limiteur de débit).

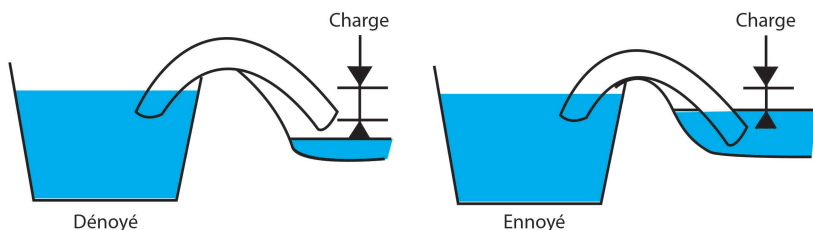


Figure 6.8. L'amorce du siphon est manuelle (illustration A. Rossel).

Qualités essentielles

- Investissement négligeable.
- Bonne répartition du débit.

Défauts majeurs

Pendant l'arrosage

- Manutention des siphons : transports et amorçage.
- Risque de désamorçage.
- Risque de rupture du canal en terre.

Entre les arrosages

Enherbement et apparition de fentes dans le canal en terre.

Canaux maçonnés avec vannettes

Destination. Toutes cultures irriguées à la raie ou à la planche. Cette technique est utilisée par de très nombreux agriculteurs de la région de Valence, en Espagne, pour l'irrigation à la raie de maraîchage ou à la planche pour l'arboriculture.

Description. Le canal arroseur implanté en partie amont de la parcelle est maçonné, on alimente les raies ou la portion de calan par l'ouverture de vannettes elles-mêmes en béton (photo 6.7).



Photo 6.7. Canal maçonné avec vannettes de distribution de l'eau, la pierre en aval de la vannette permet de réduire l'érosion, cultures oignons et maraîchage, Espagne (© F. Rossel).

Qualités essentielles

- Durabilité.
- Peu d'enherbement des canaux.
- Peu de pertes d'eau grâce à la forme biseautée des vannettes.
- Vitesse de transfert dans les canaux.

Défauts majeurs

- Coût d'investissement.
- Présence permanente d'une personne pour l'ouverture et la fermeture des vannettes.
- Érosion en aval des vannettes.

Gaine souple

Destination. Grandes cultures, mais en particulier celles où l'on doit intervenir pendant la période d'irrigation.

Description. Sur une manche souple qui sert au transport de l'eau, on fixe des manchettes de dérivation aux emplacements désirés. Elles permettent de répartir l'eau entre les différentes raies d'un poste d'irrigation. Entre la manche souple et le canal, il faut installer un système de filtration (simple grille) pour éviter le colmatage des manchettes.

Caractéristiques techniques. Les parties souples (gaine et dérivation) sont en PVC plastifié de couleur jaune, traité contre les rayons ultraviolets (tableau 6.3). Les pièces de raccordement gaine/manchette et le limiteur de débit sont en polyéthylène.

Tableau 6.3. Caractéristiques techniques des gaines souples.

Dimensions (épaisseur : 1 mm)	Diamètre (mm)	Longueur (m)
Gaine	205	30
	150	50
Dérivation	50	0,50

Montage. La gaine est perforée à l'écartement souhaité avec un emporte-pièce à frapper.

Les raccords sont insérés dans chaque perforation et fixés par serrage d'un écrou (figure 6.9).

Ce travail est réalisé en atelier. Si on prévoit une utilisation sur plusieurs cultures avec des écartements différents, il est préférable de monter les manchettes à l'espacement le plus faible.

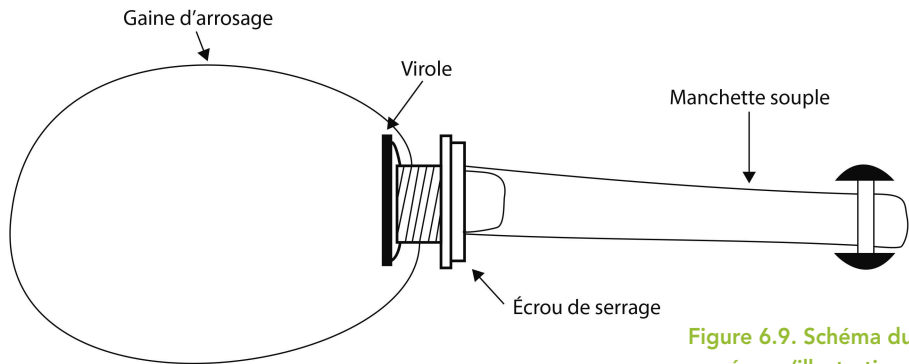


Figure 6.9. Schéma du raccord par écrou (illustration A. Rossel).

Utilisation. La gaine est posée dans une rigole préalablement aménagée au ras des lignes de culture. Le raccordement des tronçons de gaine entre eux est réalisé avec des manchons en PVC de 200 mm de diamètre.

Pour une utilisation correcte, il faut travailler avec une charge disponible²⁷ comprise entre 40 cm et 1 m. D'autre part, à titre indicatif, le débit à pleine ouverture d'une dérivation est de 2 l/s pour une charge résiduelle²⁸ sur la sortie de 50 cm.

On condamne une dérivation inutilisée en la pliant et en la coinçant sous la gaine.

En fin de saison, une « chasse » permet d'évacuer les dépôts qui se sont accumulés quand on utilise des eaux chargées.

Qualités essentielles

- Franchissement aisé.
- Installation rapide.

Défauts majeurs

- Réglage du débit peu précis.
- Stockage à l'abri des rats.

Tube à vannettes

Destination. Toutes cultures nécessitant peu de passages (pour les façons culturales, les traitements, etc.) pendant la période d'irrigation.

Particulièrement efficace et commode pour les grandes cultures irriguées à la raie (maïs, tournesol, etc.).

Description. Sur des tuyaux rigides qu'on assemble facilement, on fixe des vannettes coulissantes, à l'écartement souhaité, qui permettent de répartir équitablement le débit entre les différentes raies en service. Entre les tuyaux rigides et le canal, il faut installer un système de filtration (simple grille) pour éviter le colmatage des vannettes.

Caractéristiques techniques. Les tuyaux en PVC de couleur blanche sont traités anti-ultraviolet. Ils font 6 m de longueur, 200 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur.

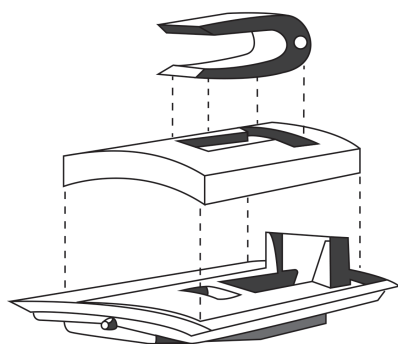


Figure 6.10. Vue éclatée d'une vannette (illustration A. Rossel).

Les vannettes, composées de 2 ou 3 parties selon la marque, correspondent au galbe du tuyau (figure 6.10). Coulissantes, elles obstruent plus ou moins la fenêtre sur laquelle elles sont assemblées.

Montage. On découpe des fenêtres rectangulaires de 32 mm × 67 mm dans le tube, sur lesquelles on fixe les vannettes. Ceci est réalisable avec une scie sauteuse ou un gabarit et une défonceuse.

On prendra trois précautions :

- alignement des vannettes ;
- même nombre de vannettes par tube, quitte à ne pas utiliser certaines d'entre elles en les laissant fermées ;
- fabrication de fenêtres régulières et nettes.

²⁷ Charge disponible : dénivelée entre le plan d'eau dans le canal à la prise et le sol au niveau de la sortie la plus éloignée de la prise.

²⁸ Charge résiduelle sur une sortie : elle est plus faible que la charge disponible car il y a des pertes de charge dans la conduite.

Utilisation. Les tubes sont posés au ras de la culture, en alignant toutes les vannettes, sur un sol qui aura été nivelé au préalable. En maraîchage, on peut aussi installer les tubes en haut de la tournière pour laisser un passage aux engins en bout de parcelle, en prolongeant les têtes de raies (à la pelle le plus souvent).

Le raccordement des tubes au canal arroseur ou à la pompe est réalisé avec des pièces en PVC, de la gaine souple ou des raccords en acier. Pour gagner un peu de charge et diminuer l'érosion à l'endroit où retombe le jet, on peut enterrer le tube jusqu'au niveau des vannettes ou placer des tuiles « canal ».

On peut envisager l'équipement d'une parcelle à partir d'une charge disponible de 30 cm. La charge maximale n'est pas limitée, car les joints sont étanches jusqu'à 1 kg de pression (tableau 6.4).

Une charge résiduelle au-dessus des vannettes de 20 cm facilite le réglage des débits.

Tableau 6.4. Débit d'une vannette (en l/s).

Ouverture (mm)	Charge (cm)					
	10	20	30	40	50	100
10	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80	1,10
20	0,65	0,95	1,15	1,30	1,45	2,10
30	0,95	1,35	1,65	1,90	2,10	3,00
40	1,20	1,75	2,10	2,45	2,75	3,85

Qualités essentielles

Précision et fiabilité du réglage des débits, facilité de pose et de dépose.

Défauts majeurs

Difficilement franchissable, organisation du stockage.

Variante : buses réglées. Les vannettes peuvent être remplacées par des buses réglées (photo 6.8).



Pression (bars)	Débit Q (l/s)
0,15	0,75
0,2	0,8
0,4	0,84
0,5	0,89

Photo 6.8. Buses réglées, Italie (© N. Maddalena).

Tuyau enterré avec cannes

Destination. Ce système concerne surtout l'arboriculture. Il est aussi appelé « système californien ». Il ne gêne pas pour intervenir dans la parcelle pendant la période d'irrigation.

Il peut être utilisé pour irriguer à la raie ou au calan.

Description. Sur un tuyau en PVC rigide enterré, on fixe des cheminées verticales (les cannes) qui alimentent les raies ou les planches, en les plaçant dans l'alignement des rangées d'arbres (figure 6.11). Entre le tuyau en PVC et le canal, il faut installer un système de filtration (simple grille) pour éviter le colmatage des orifices de sortie.

En fonction des situations, les cheminées sont équipées de dispositifs qui permettent de régler ou d'orienter le débit. On trouve différents types de sorties. Les sorties à orifice sont conseillées, car on obtient une meilleure répartition des débits.

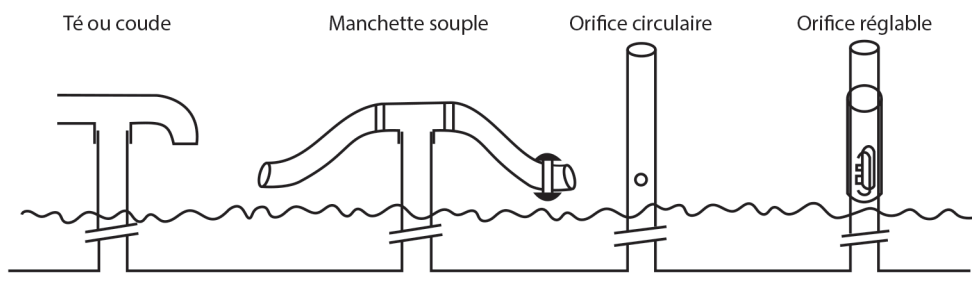


Figure 6.11. Sorties à orifice du tuyau enterré (illustration A. Rossel).

Caractéristiques techniques. Ces installations sont réalisées en PVC rigide (tableau 6.5).

Il faut faire une étude pour les dimensionner correctement.

Tableau 6.5. Caractéristiques des tuyaux enterrés avec cannes.

Dimensions	Épaisseur (mm)	Diamètre (mm)
Tuyau enterré	3,5 à 4,9	160 à 300
Cannes	1,0	70 à 100

Réalisation. Le tuyau enterré, avec joints à coller ou à lèvre, est posé au fond d'une tranchée creusée par un tractopelle.

À l'emplacement voulu, on réalise un trou avec une scie-cloche, sur lequel on colle la sortie. Une sortie est constituée de deux parties en PVC :

- une coquille (ou selle de fixation) de même diamètre que celui du tuyau enterré ;
- une canne d'un diamètre inférieur, fixée sur la coquille, qui sort de la terre.

Il est souhaitable que le tuyau soit recouvert de 80 cm de remblai. On doit aussi prévoir une vidange en bout d'installation.

Utilisation

– *Irrigation à débit unique.* Si la parcelle est arrosée en une seule fois, il s'agit simplement de manœuvrer une martelière en début et en fin d'irrigation. Quand il y a plusieurs postes, les sorties qui ne fonctionnent pas doivent être étanches, car elles restent en charge et il est important que les collages soient bien faits.

– *Irrigation à double débit.* On arrose avec un débit fort pendant l'avancement et faible en entretien. Ceci suppose de pouvoir faire varier la section des orifices en obturant avec un cache coulissant. Si on se contente de diminuer la charge et le débit en fermant un peu la martelière, la répartition des débits est mauvaise.

Qualités essentielles

- Aucune gêne pour les travaux agricoles.
- Facilité d'utilisation.

Défaut majeur. Étude hydraulique nécessaire pour dimensionner l'installation.

Trans-irrigation de surface et enterrée

Une brève description est donnée ici sur ces techniques qui ont été mises au point mais qui ne sont pas commercialisées par un distributeur de matériel, une description plus complète est proposée dans le

» complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>.

Destination. Parcelle suffisamment grande (au moins 6 ha) avec des raies assez longues (au moins 200 m).

Description. Un tuyau rigide, posé sur une butte selon une pente régulière, est percé d'orifices calibrés en face de chaque raie d'irrigation. Le déplacement d'un piston à l'intérieur du tube entraîne automatiquement le déplacement de la main d'eau sur l'ensemble de la parcelle. Un système de filtration (simple grille) doit être installé pour éviter le colmatage des orifices de sortie.

Pour la trans-irrigation enterrée, le système correspond à une installation du type tuyau enterré avec cannes, mais conçue comme une trans-irrigation de surface (figure 6.12). Les orifices sur les sorties sont percés selon une ligne de pente qui remplace la butte inclinée où l'on installe une trans-irrigation de surface.

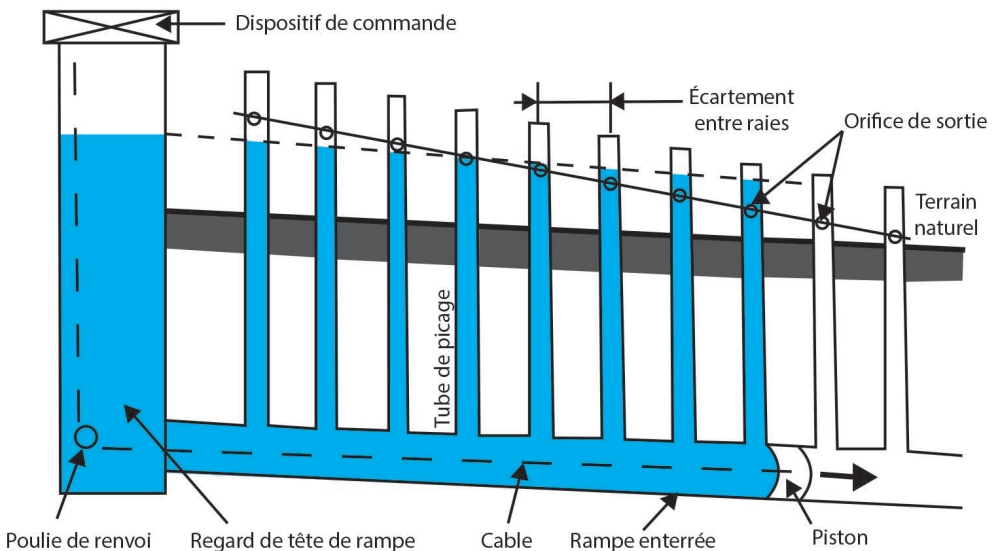


Figure 6.12. Schéma de principe d'un système de trans-irrigation enterrée (illustration A. Rossel).

Qualités essentielles

- Peu de travail pendant la période d'irrigation.
- Permet une bonne maîtrise de la dose apport.
- Modulation automatique des débits (peu de pertes en colature).

Défauts majeurs

- Nécessite une étude hydraulique préalable.
- Technique pointue, adaptée seulement aux grandes unités de production.
- Cette technique a été mise au point et testée, mais n'est pas produite et commercialisée par un distributeur.
- Coût.

L'économie et l'irrigation gravitaire**Coût d'investissement**

En irrigation gravitaire, on arrose à partir d'un canal ou d'une rampe installée en tête de parcelle (figure 6.13).

L'investissement dépend surtout du coût au mètre linéaire de rampe.

Le coût à l'hectare est d'autant plus faible que la parcelle est longue.

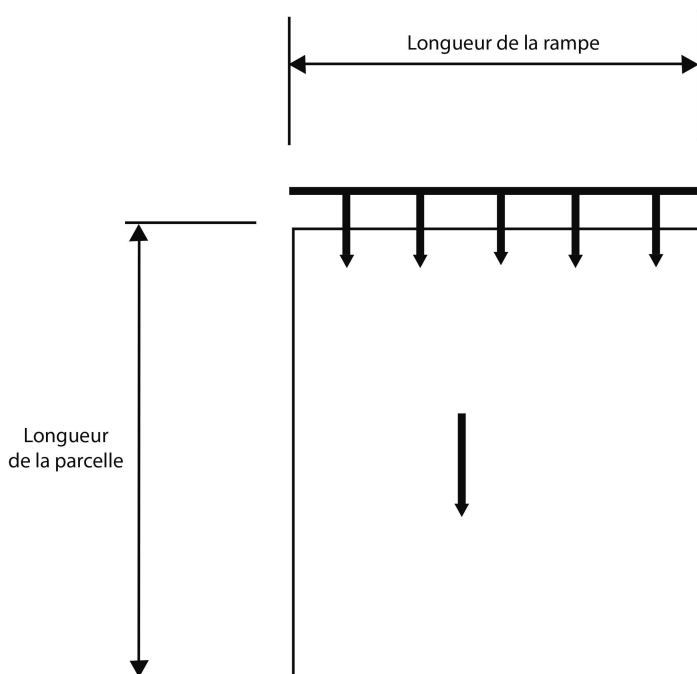


Figure 6.13. Rampe d'irrigation gravitaire en tête de parcelle (illustration A. Rossel).

Économie de main-d'œuvre

Trois types de travaux demandent de la main-d'œuvre : l'équipement annuel de la parcelle, la réalisation de chaque arrosage et la maintenance du matériel.

Tableau 6.6. Économies de main-d'œuvre en irrigation gravitaire.

Montage et démontage du matériel (en début et fin d'année)	Matériel concerné	Nature du travail
	<ul style="list-style-type: none"> – Gravitaire traditionnel : canaux et siphons – Gaine souple, tube à vannettes, trans-irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> – Confection/destruction des canaux en terre – Pose et enlèvement des rampes
Surveillance des arrosages (en cours de saison)	Matériel concerné	Nature du travail
	<ul style="list-style-type: none"> – Gravitaire traditionnel – Siphons – Canaux maçonnés à vannettes – Gaine souple, tube à vannettes, tuyau enterré avec cannes – Trans-irrigation de surface et enterrée 	<ul style="list-style-type: none"> – Ouverture/fermeture des buttes de terre grâce à un habile coup de houe – Changement de place/amorçage des siphons – Ouverture/fermeture des vannettes – Ouverture/fermeture des sorties des tubes à vannettes et tuyau enterré avec cannes – Réglage de la temporisation de la trans-irrigation
Maintenance du matériel	Matériel concerné	Nature du travail
	<ul style="list-style-type: none"> – Gravitaire traditionnel – Siphons – Gaine souple, tube à vannettes, trans-irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> – Curage et désherbage des canaux – Renouvellement des siphons – Réparation des gaines souples et/ou des rampes
Économies de main-d'œuvre par rapport au gravitaire traditionnel	Montage et démontage	Surveillance
	<ul style="list-style-type: none"> – Peu ou pas d'économie, sauf pour les canaux maçonnés 	<ul style="list-style-type: none"> – Grandes cultures : 1/2 journée/ha/an – Maraîchage : 1 journée/ha/an – Cultures fruitières : économie négligeable

Conclusion

- L'économie est très intéressante en grandes cultures, car l'irrigation représente une part importante de la main-d'œuvre totale (35 %).
- Elle l'est apparemment moins en maraîchage et en arboriculture pour la raison inverse. Mais la main-d'œuvre qualifiée étant de plus en plus rare, c'est souvent le chef d'exploitation qui se charge de l'irrigation. Il est donc important qu'il dégage du temps libre pour se consacrer à d'autres tâches (surveillance des récoltes, commercialisation).

Calculée au taux du SMIC, l'économie de main-d'œuvre ne compense pas l'amortissement du matériel. Mais le calcul n'est pas aussi simple, car on sait bien que, à l'échelle d'une exploitation agricole et selon la saison, particulièrement en période d'irrigation, certaines heures n'ont pas de prix !

- Enfin, les matériels modernes d'irrigation de surface permettent de rationaliser la conduite des apports et la qualité du travail est nettement améliorée (contrôle du débit, efficacité de l'irrigation, arrosages de nuit, etc.). Cela rejoint les préoccupations agronomiques. L'exemple des vergers, les poiriers notamment, montre que la maîtrise de l'irrigation est importante pour éviter des conséquences très néfastes (réduction de la pérennité, détérioration de la qualité des fruits).

La conduite de l'irrigation

Afin de maîtriser la conduite de l'irrigation gravitaire (photo 6.9), il faut :

- se placer dans de bonnes conditions liées à l'alimentation en eau et à la parcelle ;
- choisir correctement le débit et le temps d'irrigation ;
- éviter les pièges.



Photo 6.9. Avancement de l'eau dans une raie, culture d'oignons, Espagne (© F. Rossel).

Des conditions sur l'eau et la parcelle

Conditions sur l'alimentation en eau

Un débit régulier

Cela permet de limiter la surveillance et d'éviter de modifier les réglages en cours d'arrosage.

Une eau propre délivrée avec une légère charge hydraulique

Cet aspect est surtout important quand on utilise des matériels de distribution.

Conditions liées à la parcelle

Une longueur de raie compatible avec l'infiltration

On a intérêt à avoir des raies suffisamment longues si on veut faciliter les opérations culturales et diminuer les temps de main-d'œuvre. Néanmoins, il ne faut pas tomber dans l'excès inverse, car des raies trop longues ne permettent pas de conduire des irrigations dans de bonnes conditions, avec des excès en amont et des déficits potentiels en aval de la raie.

Une pente régulière

La régularité s'apprécie correctement « à l'œil » ; cependant, un relevé topographique est nécessaire pour connaître la valeur de la pente. Plus les raies sont longues, meilleure doit être la qualité du planage (photo 6.10). On obtient de très bons résultats avec la technique du guidage laser.



Photo 6.10. Planage d'une parcelle avec guidage au laser (a : © F. Rossel, Valence, Espagne) et attelé (b : © IRD/F. Molle).

Le sillon

La surface du sillon est plus ou moins rugueuse, ce qui peut freiner l'avancement de l'eau, surtout pendant la première irrigation. La rugosité dépend de l'état du sol au moment du billonnage (photo 6.11). Si la rugosité est trop élevée, certains outils permettent de lisser les raies.



Photo 6.11. La qualité du billonnage de la parcelle conditionne celle de l'irrigation, Valence, Espagne (© F. Rossel).

L'écartement des raies

La nature de la culture détermine l'écartement entre raies. On peut néanmoins :

- envisager de n'irriguer qu'une raie sur deux ;
- modifier légèrement l'écartement des lignes de culture : par exemple de 0,65 à 0,80 m pour le maïs ou la pomme de terre et de 1,50 à 1,65 m pour la tomate ou le persil (photo 6.12).



Photo 6.12. Écartement des raies sur culture d'oignons (0,7 à 0,8 m) et de persil (1,50 à 1,65 m), Valence, Espagne (© F. Rossel).

Un réseau de colature

En irrigation à la raie, les pertes en colature sont souvent indispensables pour apporter une dose suffisante en bout de raie. Il faut donc prendre les dispositions nécessaires pour évacuer cette eau (photo 6.13). Sinon, soit on noie le bout de la parcelle, soit on apporte des doses trop faibles. Par ailleurs, l'absence de colature peut poser de grands problèmes lors des orages, parfois très violents dans les régions méditerranéennes.



Photo 6.13. La colature permet d'évacuer l'eau en excès, Valence, Espagne (© F. Rossel).

Si on veut modifier la pente et/ou la longueur, il faut tenir compte de la perméabilité du sol, car ces trois paramètres sont liés. Les raies sont d'autant plus courtes que la perméabilité est forte, mais on peut aussi jouer sur la pente pour augmenter ou diminuer la longueur.

Choisir correctement le débit et le temps d'irrigation

Choix du débit

Le débit est le facteur primordial qui conditionne le déroulement et le résultat d'un arrosage (voir section « Les paramètres fondamentaux », p. 246). Le choix de sa valeur est délicat, car s'il est très facile de l'augmenter ou de le diminuer (dans la gamme des débits alloués et dans la limite de la capacité de transport des technologies mobilisées), il n'y a pas de critère simple pour le calculer en fonction des caractéristiques de la parcelle.

Ce qui est évident

Le débit :

- doit être le même pour chaque raie, ce qui est grandement facilité par l'utilisation d'un matériel de distribution adapté ;
- doit être supérieur à l'infiltration totale de la raie, pour que l'eau atteigne le bout de la raie ;
- doit être inférieur au débit érosif, valeur du débit qui provoque une érosion manifeste dans la raie.

Les valeurs usuelles du débit par raie sont de 0,2 à 0,7 l/s pour 100 m de longueur de raie. En Crau, le débit moyen est de 80 l/s par calan et peut atteindre 120 l/s pour de très grand calans bien plans.

Exemple : pour une raie de 200 m de long, il faut multiplier ces valeurs par 2.

Ce qui est souvent vrai

Le débit idéal diminue lorsque l'on renouvelle les irrigations, à cause de la diminution de la capacité d'infiltration due au lissage de la raie et à la chute de perméabilité du sol. C'est surtout la première irrigation qui se distingue des autres : schématiquement, on peut avancer qu'elle exige un débit double de celui des irrigations suivantes.

Choix du temps d'irrigation

Le temps d'irrigation (temps d'avancement + temps d'entretien) est déterminé par le débit en tête de raie et par la dose nette d'irrigation.

Ce qui est évident

Il varie en sens inverse du débit ; en effet, les gros débits correspondent aux sols qui « boivent beaucoup », donc à ceux où la dose s'infiltrerait rapidement. En irrigation à la raie, il est difficile, voire impossible de faire des apports corrects en dessous de 40 mm (400 m³/ha), car si les apports sont trop faibles, la dose infiltrée en bout de parcelle est insuffisante, d'où un dessèchement progressif du sol, avec un risque de blocage de l'infiltration ou de formation de fentes.

Ce que l'on constate

Lorsqu'il y a un tour d'eau, c'est en fonction des caractéristiques de ce dernier que l'on détermine la durée de l'apport ; dans beaucoup de situations, on aurait avantage à considérer globalement l'utilisation de l'allocation d'eau d'irrigation sur l'ensemble de l'exploitation, quitte à n'irriguer qu'une fois sur deux, mais avec des doses suffisantes, plutôt qu'à s'astreindre à « faire passer » l'eau sur l'ensemble des parcelles irriguées à chaque fois, avec le risque de n'apporter que des doses trop faibles.

Les plus grosses erreurs sont généralement consécutives à des temps d'application réduits : par exemple, lorsqu'on se base sur l'arrivée de l'eau en bout de raie pour arrêter l'irrigation, afin de limiter les pertes en colature, l'infiltration en bout de raie sera insuffisante. Les irrigants adoptent souvent des règles simples à défaut d'être exactes.

Exemple de pratique

- Temps d'irrigation = 2 ou 3 fois le temps d'avancement, avec des adaptations aux conditions de sols.
- Moins de 2 fois sur sol perméable.
- Jusqu'à 6 ou 7 fois sur sols limoneux desséchés.

Trois pièges à éviter

Le plus subtil : les terres limoneuses

Ces sols ont la particularité de former en surface une couche quasiment étanche quand ils sèchent. Si on tarde trop pour déclencher l'irrigation, il devient impossible d'apporter une dose correcte, car la presque totalité de l'eau apportée en tête se retrouve en colature (figure 6.14).

Il faut donc maîtriser les doses avec des apports faibles, mais fréquents.

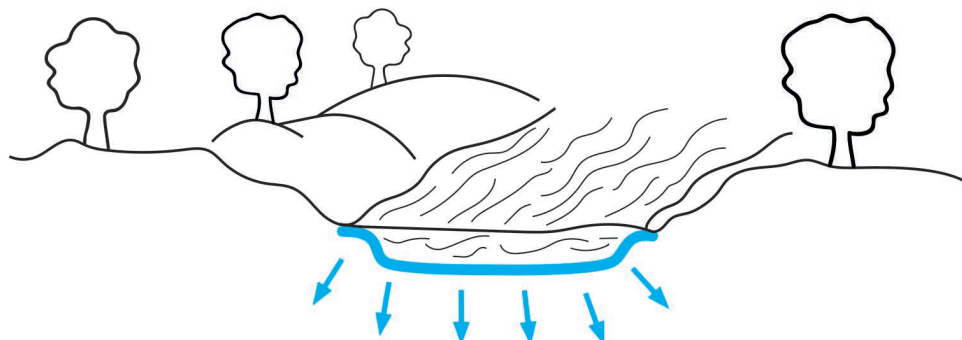


Figure 6.14. En sol limoneux, éviter la formation d'une croûte de battance dans la raie (illustration A. Rossel).

Le plus flagrant : les argiles gonflantes

Ce type d'argile provoque en séchant des fissures importantes et il devient difficile de conduire l'eau au bout des raies avec de trop faibles débits, les temps d'avancement devenant trop longs. Selon l'importance des fissures, une dose importante peut être localement et quasi instantanément apportée. Après remplissage de la macro-fissuration, l'eau ne s'infiltre que très faiblement en raison du caractère argileux du sol, ce qui ne peut avoir qu'un impact favorable sur l'uniformité de l'arrosage. On peut limiter la fissuration et son problème sous-jacent : la communication inter-raies, en faisant des apports plus fréquents (figure 6.15).

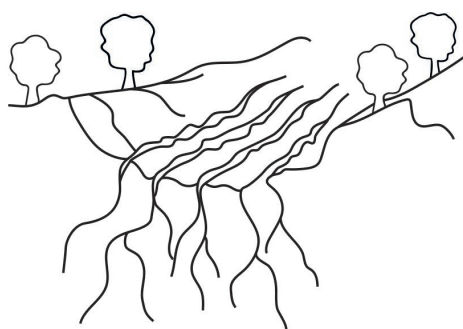


Figure 6.15. En sol argileux, éviter les fissures en fond de raie par des apports fréquents (illustration A. Rossel).

Le moins gênant : une sous-couche imperméable proche

Quand un horizon supérieur perméable repose sur une couche qui l'est moins, il y a peu de percolation ; en revanche, les transferts horizontaux sur la sous-couche imperméable sont grandement facilités (figure 6.16).

Ce phénomène, quand on le maîtrise, permet de réaliser des apports efficaces.

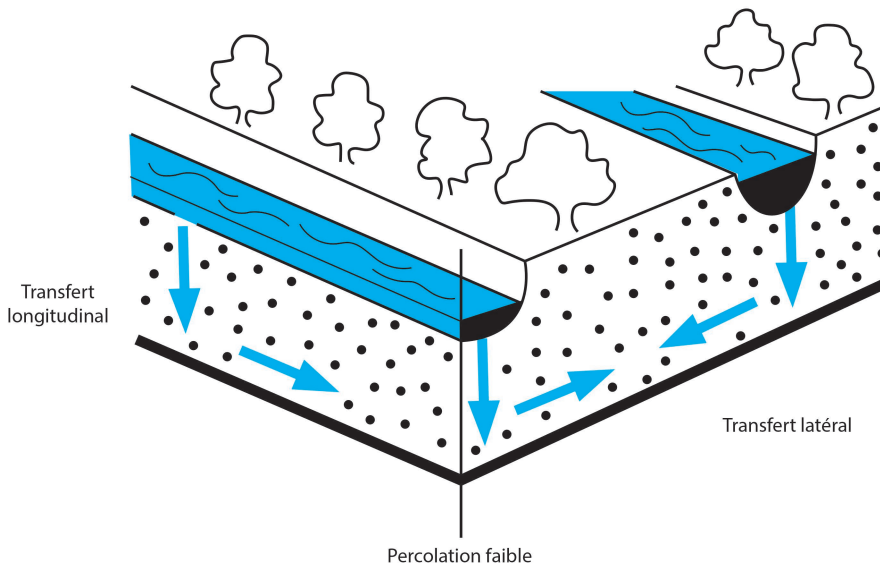


Figure 6.16. En présence d'une sous-couche imperméable, les pertes par percolation sont faibles (illustration A. Rossel).

La mesure des débits et l'évaluation des doses

Il est indispensable de connaître les débits pour évaluer les doses apportées par irrigation.

Connaître le débit en tête de parcelle

Prélèvement dans un canal

Vous prenez l'eau dans un canal :

- la majorité des associations contrôlent et connaissent le module (valeur du débit délivré en tête de parcelle ou d'exploitation) qu'elles distribuent à leurs adhérents (par exemple, 25 l/s pour le canal de Manosque) ;
- vous mesurez le débit.

Pompage

Vous utilisez une pompe récente :

- vous connaissez ses caractéristiques et les conditions dans lesquelles vous l'utilisez (diamètre de refoulement, vitesse de rotation du moteur, hauteur de pompage) ; contactez le constructeur ou votre fournisseur ;
- vous mesurez le débit.

Techniques pour mesurer le débit en tête de parcelle

Vous prélevez tout le débit d'un canal. Dans ce cas, il est possible d'évaluer le débit utilisé pour l'ensemble de la parcelle ou du poste d'arrosage en mesurant le débit dans le canal.

Mesure de la vitesse de l'eau avec un flotteur

Pour mesurer le débit avec un flotteur, il est nécessaire de choisir une portion du canal qui soit la plus régulière possible sur une distance d d'au moins 10 mètres. On mesure le temps de parcours t du flotteur (t en seconde) pour la distance (d en mètre).

Le flotteur doit être partiellement immergé pour ne pas subir l'influence du vent et ne pas rendre compte que de la vitesse de surface, qui est plus élevée qu'en profondeur. Une bouteille lestée dont le goulot seul sera émergé peut être utilisée.

Le flotteur est déposé à la surface de l'eau en amont du premier repère afin qu'il franchisse celui-ci en vitesse stabilisée.

On calculera alors la vitesse du flotteur (V_f en m/s) : $V_f = d/t$

On effectuera au moins 5 mesures successives pour en établir la moyenne.

La vitesse de l'eau est plus élevée à la surface qu'en profondeur et supérieure au milieu par rapport aux berges (en raison des frottements sur les parois du canal), il sera nécessaire de corriger le résultat obtenu (V_f) en le multipliant par un coefficient (C_f) qui dépend du rayon hydraulique (tableau 6.7 et figure 6.17).

La vitesse moyenne (V_m en m/s) de l'écoulement est : $V_m = V_f \times C_f$

Tableau 6.7. Coefficient de correction de la vitesse du flotteur.

Rayon hydraulique	Canal recouvert de ciment	Canal en terre
Inférieur à 30 cm	0,75	0,60
De 30 à 60 cm	0,80	0,67
De 60 à 100 cm	0,85	0,70

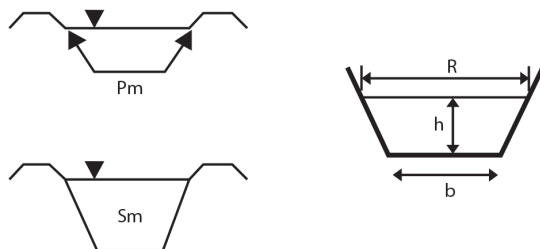


Figure 6.17. Dimensions à mesurer pour un canal trapézoïdal (illustration A. Rossel).

P_m : périmètre mouillé ; S_m : section mouillée ; rayon hydraulique : $R_h = S_m/P_m$.

Puis on calcule la section mouillée du canal (figure 6.18) (S_m en m^2) :

$$S_m = [(B + b)/2] \times h$$

h : hauteur moyenne (tirant d'eau) de la lame d'eau dans le canal en mètres ;

b : largeur de la base du canal (largeur au radier) en mètres ;

B : largeur de la lame d'eau en surface (largeur au miroir) en mètres.

Dans le cas d'un canal rectangulaire, la section mouillée du canal est estimée par la multiplication de la largeur (en m) du canal par la hauteur (en m) de la lame d'eau dans le canal.

On choisit au moins 3 sections représentatives du canal sur la longueur de mesure de vitesse.

Le débit sera alors : $Q = V_m \times S_m$ (en m^3/s)

Pour obtenir un débit en litres/seconde, il faut multiplier le résultat par 1 000.

Le tableau 6.8 donne quelques exemples de débit pour un canal rectangulaire en béton.

Tableau 6.8. Débit en l/s pour un canal rectangulaire en béton pour différentes valeurs de vitesse moyenne.

Section (m^2)	Vitesse (m/s)					
	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
$0,5 \times 0,5 = 0,25 m^2$	75	125	175	200	225	250
$0,6 \times 0,6 = 0,36 m^2$	110	180	250	290	325	360

Mesure par déversoir

Le débit peut être estimé avec une chute : soit elle existe, soit on peut en créer une avec un barrage constitué de planches sur le cours du canal (figure 6.18).

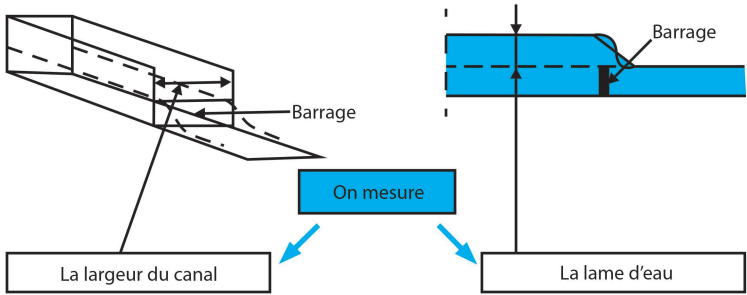


Figure 6.18. Une chute dans le canal permet de mesurer le débit de l'eau (illustration A. Rossel).

On mesure la hauteur de la lame d'eau qui se déverse au-dessus du barrage et la largeur du canal.

Précautions :

- mesurer la lame d'eau en amont (au moins 1 à 2 mètres) de la chute ;
- la longueur de déversement doit se rapprocher le plus possible de la largeur du canal ;
- choisir une section adaptée (la plus uniforme possible, non turbulente).

Les débits sont calculés à partir de la formule :

$$Q = 0,018 \times L \times h \times \sqrt{h} = 0,018 \times L \times h^{1,5}$$

Q : débit en l/s ; L : largeur en cm ; h : lame d'eau en cm.

La méthode est illustrée dans le tableau 6.9.

Tableau 6.9. Débit calculé en l/s en utilisant un petit barrage (planche) dans le canal.

Largeur (cm)	Lame d'eau (cm)								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
40	6	11	16	23	30	38	46	55	64
50	7	13	20	28	37	47	58	69	80
60	9	16	24	34	45	57	69	82	97
80	12	21	33	46	60	75	92	110	129
100	14	26	41	57	75	94	115	137	161

Mesure avec une vanne

On peut évaluer le débit avec les formules ci-dessous en mesurant la surface de l'orifice et la lame d'eau en amont de la vanne (figure 6.19) ; le tableau 6.10 donne les valeurs du débit pour différentes valeurs de la surface de l'orifice et la lame d'eau calculés à l'aide des formules suivantes :

Orifice rectangulaire :

$$Q = 0,027 \times S \times \sqrt{h} \quad Q = 0,018 \times L \times h \times \sqrt{h} = 0,018 \times L \times h^{1,5}$$

Orifice circulaire :

$$Q = 0,021 \times D^2 \times \sqrt{h} \quad Q = 0,018 \times L \times h \times \sqrt{h} = 0,018 \times L \times h^{1,5}$$

- avec : Q : débit (en l/s) ;
S : section de la vanne (en cm²), avec S = L × W ;
L : largeur de la vanne (en cm) ;
W : la hauteur de l'ouverture sous la vanne (en cm) ;
h_{am} : la lame d'eau en amont de la vanne (en cm) ;
D : diamètre de la buse (en cm) ;
h : lame d'eau par rapport au centre de l'orifice (en cm).

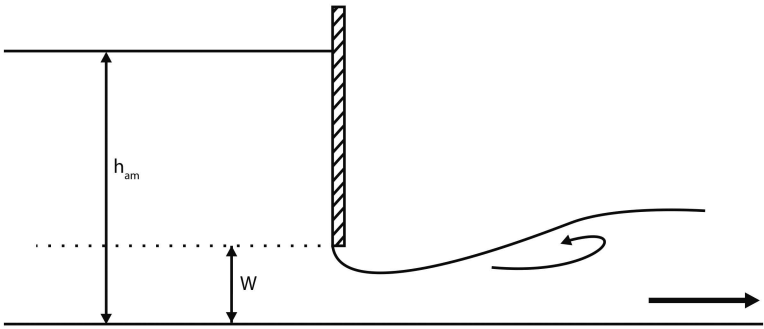


Figure 6.19. Vue en coupe d'une vanne, h_{am} est la lame d'eau en amont de la vanne, W est la hauteur de l'ouverture sous la vanne (illustration A. Rossel).

Tableau 6.10. Débit calculé en l/s en présence d'une vanne noyée dans le canal.

Buse diamètre D (cm)	Section rectangulaire L × l (cm × cm)	Surface de l'orifice (cm ²)	Lame d'eau (cm)						
			10	15	20	30	50	100	150
10	10 × 5	50	4	5	6	7	10	14	17
	10 × 10 ou 20 × 5	100	9	10	12	15	19	27	33
	30 × 5	150	13	16	18	22	29	41	50
	20 × 10 ou 40 × 5	200	17	21	24	30	38	54	66
	50 × 5 ou 25 × 10	250	21	26	30	37	48	68	83
	30 × 10 ou 20 × 15	300	26	31	36	44	57	81	99
	20 × 20 ou 40 × 10	400	34	42	48	59	76	108	132
	30 × 15	450		47	54	67	86	122	149
	50 × 10 ou 25 × 20	500		52	60	74	95	135	165
	30 × 20 ou 40 × 15	600		63	72	89	115	162	198
		79	7	8	9	12	15	21	26
		123	10	13	15	18	23	33	40
		177	15	18	21	26	33	47	58
		314	27	33	38	46	59	84	103
		491		51	59	72	93	131	161
		707			85	104	134	189	231

Précautions

Il faut que l'eau s'écoule librement à la sortie de la vanne.

Dans le canal, l'eau doit atteindre un niveau au moins égal au niveau supérieur de l'orifice. Dans le cas contraire, il y a entrée d'air et cette méthode n'est pas valable. Le niveau dans le canal doit être pris un peu en amont de la vanne.

Les chiffres indiqués par le tableau peuvent varier en fonction de la manière dont la buse est fixée au canal. Suivant les conditions particulières, on pourra les corriger selon les indications de la figure 6.20.

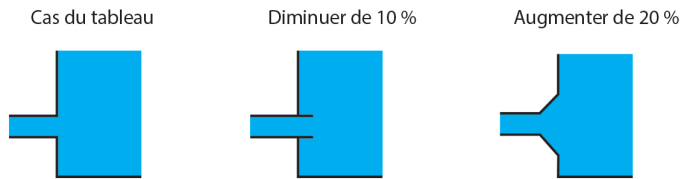


Figure 6.20. Corrections du calcul du débit selon le mode de fixation de la buse au canal.

Connaître le débit appliqué dans une raie ou une planche

Sans charge

Il n'y a pas de chute naturelle en tête de raie. Le principe de la mesure est d'en créer une suffisamment petite pour ne pas modifier les conditions d'écoulement. Le débit est mesuré avec un seuil jaugeur ou par le système de la gouttière.

Seuil jaugeur

Le principe consiste à installer dans la raie un appareil où l'on fait couler l'eau (photo 6.14).



Photo 6.14. Mesure du débit à l'aide d'un seuil jaugeur (© F. Charron).

Quand l'appareil est correctement installé, on mesure la hauteur d'eau au-dessus du seuil et on obtient le débit avec un abaque ou une formule.

Une méthode d'estimation du débit avec des seuils à paroi mince est disponible dans le

» complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Gouttière

Si la parcelle a une pente suffisante, on peut, à l'aide d'un récipient plat (type bidon) et d'une gouttière assez longue (plus de 3 m), estimer le débit en chronométrant le temps de remplissage du bidon (au 1/10^e de seconde) (figure 6.21). Le débit (en l/s) est obtenu par division du volume du bidon en litre (l) par le temps de remplissage en seconde (s).

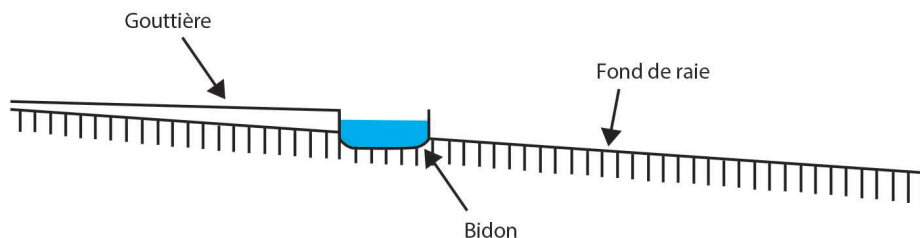


Figure 6.21. Mesure du débit d'eau dans la raie à l'aide d'un bidon plat et d'une gouttière (illustration A. Rossel).

Cette technique n'est pas très pratique, car il est souvent difficile de pénétrer dans la parcelle en cours d'arrosage. Elle est plutôt adaptée aux petits débits, car on est limité par la taille du bidon. Pour augmenter la capacité de la mesure, il est possible d'aménager un trou dans le sol (figure 6.22).

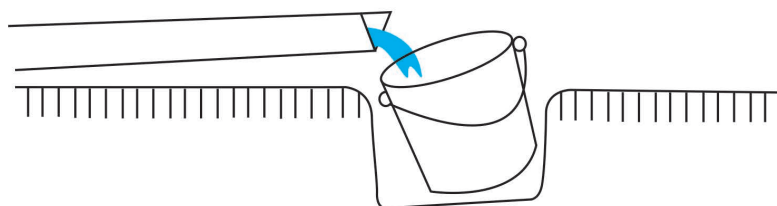


Figure 6.22. Mesure du débit d'eau avec gouttière et aménagement d'un trou dans la raie (illustration A. Rossel).

Avec charge

Il y a une chute naturelle en tête de raie. La technique la plus simple est alors d'utiliser un seau ou un récipient gradué d'une taille proportionnelle au débit (figure 6.23).

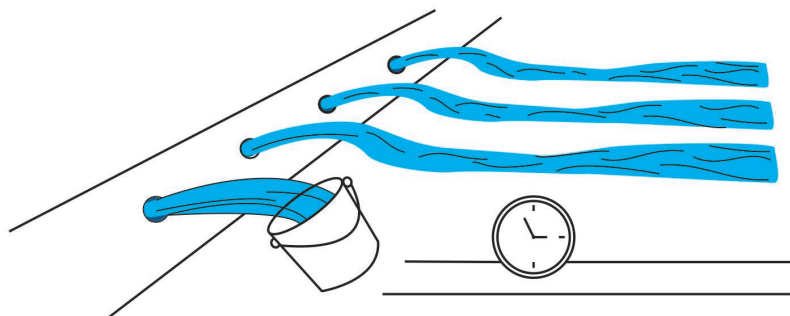


Figure 6.23. Mesure du débit d'eau dans la raie à l'aide d'un seau (illustration A. Rossel).

Une autre possibilité existe par une mesure indirecte sur les tubes à vannettes et les systèmes californiens à orifice.

Si la distribution de l'eau en tête de raie est mécanisée et suivant le type de matériel que vous utilisez, il est possible d'estimer le débit en connaissant la section de l'orifice qui alimente la raie et la charge au niveau de cet orifice.

Cas des tubes à vannettes : pour mesurer la charge d'une installation de tubes à vannettes, on peut utiliser un tuyau transparent (figure 6.24).

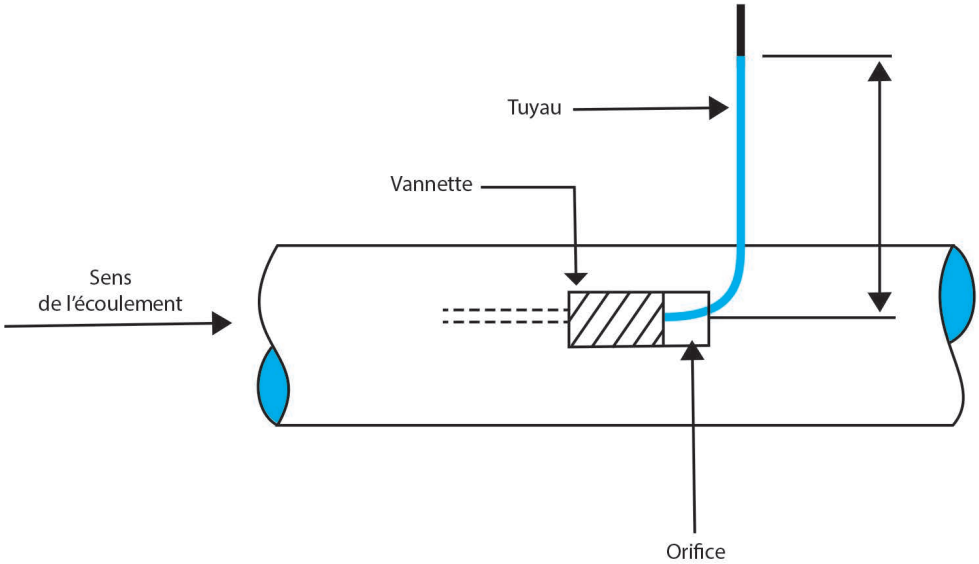


Figure 6.24. Mesure de la charge dans un tube à vannettes (illustration A. Rossel).

Le tableau 6.11 indique le débit d’une vannette (en l/s) pour quelques valeurs de la charge (en cm) et de l’ouverture (en mm).

Tableau 6.11. Débit d’une vannette en l/s.

Ouverture (mm)	Charge (cm)								
	5	10	15	20	30	40	50	70	100
1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6
10	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
15	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,6
20	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,1
25	0,6	0,8	1,0	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,5
30	0,7	0,9	1,2	1,3	1,6	1,9	2,1	2,5	3,0
35	0,8	1,1	1,3	1,5	1,9	2,2	2,4	2,9	3,4
40	0,9	1,2	1,5	1,7	2,1	2,4	2,7	3,2	3,9
45	1,0	1,4	1,7	1,9	2,4	2,7	3,0	3,6	4,3

Cas d’un système californien

- On peut évaluer le débit à partir de la charge (tableau 6.12).
- On peut mesurer le débit à la sortie avec un seau s’il y a une chute (figure 6.25).

Tableau 6.12. Débit d’un orifice en l/s (raie à distribution mécanisée, système californien).

Diamètre (mm)	Charge (cm)					
	5	10	15	20	30	40
25	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4
40	0,9	1,2	1,5	1,7	2,1	2,4
50	1,3	1,9	2,3	2,7	3,3	3,8
60	1,9	2,7	3,3	3,9	4,7	5,5
80	3,4	4,9	5,9	6,9	8,4	9,7
100	5,4	7,6	9,3	10,7	13,1	15,2

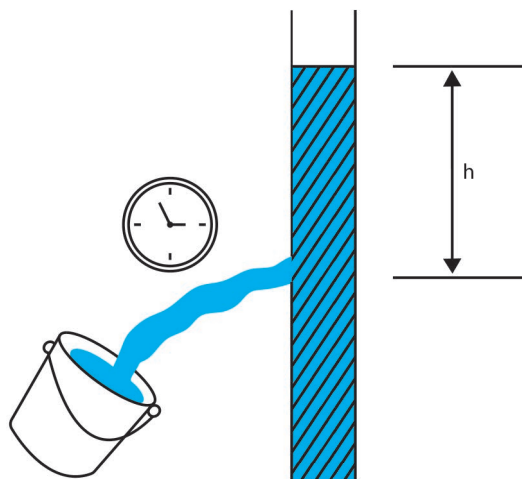


Figure 6.25. Mesure du débit d'eau dans la raie (système californien) (illustration A. Rossel).

Évaluation de la qualité de l'irrigation

Pour évaluer la qualité de l'irrigation, il faut estimer :

- la dose brute ;
- la dose stockable dans le sol.

Et les comparer à des références pour effectuer un diagnostic des pratiques actuelles.

Estimer la dose brute

La quantité totale d'eau apportée sur la parcelle par unité de surface représente la dose brute (figure 6.26). Cette quantité n'est pas totalement utilisable par la culture, mais sa connaissance est indispensable pour savoir si l'on irrigue correctement.

Cette dose est généralement exprimée en millimètres (mm) ou en mètres cubes par hectare (m^3/ha), et plus rarement en litres par mètre carré (l/m^2).

Pour s'y retrouver : $1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1 \text{ l}/\text{m}^2$.

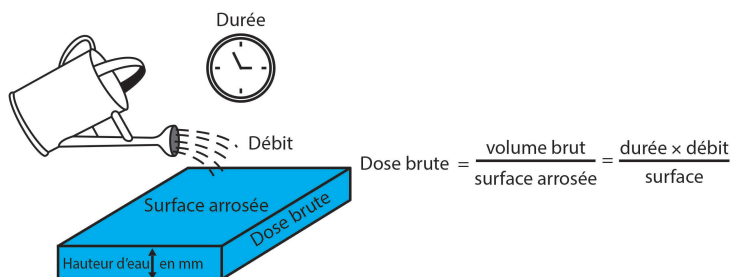


Figure 6.26. Paramètres intervenant dans l'estimation de la dose brute d'eau apportée à la parcelle (illustration A. Rossel).

Estimer la dose brute, c'est déterminer :

- la durée de l'irrigation ;
- le débit utilisé en tête de parcelle ;
- la surface irriguée.

La durée : par montre chronomètre

Le débit : globalement sur le poste ou par raie

La surface arrosée

Si on calcule la dose à partir du débit admis dans la raie, la surface à prendre en compte dans le calcul de la dose est celle concernée par cette raie, à savoir :

$$\text{Surface (m}^2\text{)} = \text{écartement (m) entre 2 raies arrosées} \times \text{longueur (m) de la raie}$$

Le calcul est identique dans le cas d'une planche en irrigation sur verger.

Le tableau 6.13 donne quelques exemples. On constate qu'on aboutit parfois à des doses importantes ou au contraire très faibles.

Tableau 6.13. Dose brute de la surface arrosée.

Type de mesure	Surface irriguée	Débit (l/s)	Temps (heure)	Dose brute (mm)
Débit du canal	1 ha	25	6	54
	1 ha	50	5	90
Débit d'une raie ou d'une planche	(1) 150 m ²	0,5	6	72
	(2) 150 m ²	0,5	2	24
	(3) 240 m ²	2	8	240
	(4) 480 m ²	1	6	90
	(5) 400 m ²	4	7	252

(1) Longueur de raie : 200 m ; écartement : 0,75 m ; toutes les raies sont arrosées.

(2) Longueur de raie : 100 m ; écartement : 1,50 m ; toutes les raies sont arrosées.

(3) Longueur de raie : 300 m ; écartement : 0,80 m ; toutes les raies sont arrosées.

(4) Longueur de raie : 300 m ; écartement : 0,80 m ; toutes les raies sont arrosées.

(5) Longueur de raie : 100 m ; écartement : 4,00 m ; toutes les raies sont arrosées.

Estimer la dose stockable dans un sol

La dose utilement stockée dans un sol dépend de la composition granulométrique du sol, de son état physique, de son état hydrique initial et de la profondeur exploitée par les racines de la culture.

La quantité d'eau stockable dépend surtout de la texture du sol (figure 6.27) : elle augmente avec la richesse en argile et diminue avec la teneur en sable. En d'autres termes, plus les éléments qui composent le sol sont fins, plus grande est l'aptitude à emmagasiner de l'eau.

Elle dépend aussi de l'état hydrique du sol au moment de l'irrigation :

- un « sol sec a soif » ; il « boira beaucoup » ; d'où une dose élevée ;
- un « sol humide boira peu » ; d'où une dose faible.

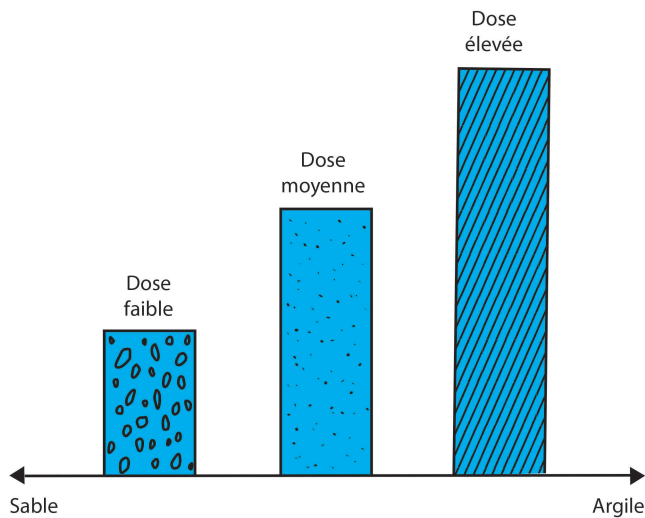


Figure 6.27. Capacité de stockage de l’eau dans le sol selon la nature du sol (illustration A. Rossel).

La dose dépend également de la profondeur exploitée par les racines (figure 6.28).

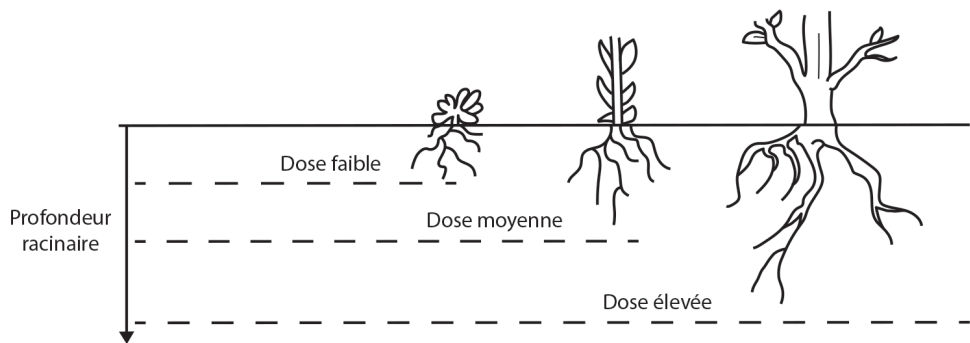


Figure 6.28. Stockage de l’eau dans le sol selon la culture (illustration A. Rossel).

Sur sols superficiels, l’épaisseur de sol risque d’être plus contraignante que la profondeur des racines. Le problème est comparable avec une semelle de labour.

Comparer à des références

Dose stockable

Le tableau 6.14 propose quelques valeurs courantes de doses stockables dans le sol.

Tableau 6.14. Exemples du stock d’eau dans le sol (mm).

Cultures	Profondeur d’enracinement de référence (cm)	Sol limoneux	Sol argileux
		Dose (mm)	Dose (mm)
Pomme de terre	40	30	45
Carotte	45	40	55
Maïs	70	60	85
Tournesol	110	100	140
Arbres fruitiers	130	125	165

Attention

Ces chiffres ne sont qu'indicatifs et doivent être corrigés en fonction de la profondeur d'enracinement. En effet, suivant l'état de la culture et de la préparation du sol, le système racinaire peut explorer des couches de sol d'épaisseur variable.

Dans certains cas, on peut être amené à ne pas utiliser toute la capacité du réservoir-sol : les caractéristiques du sol obligent parfois à remplir le réservoir avant qu'il ne soit complètement épuisé. C'est le cas des sols à forte teneur en limon ou des argiles gonflantes.

Si on les laisse trop se dessécher, les sols limoneux (silt) deviennent quasiment imperméables : il faut alors un faible débit et des durées d'arrosage très longues pour humidifier correctement le sol. À l'inverse, les sols argileux se fissurent : on doit alors augmenter le débit ou le temps d'arrosage.

Le tour d'eau (fréquence et débit disponible) peut ne pas être adapté aux caractéristiques du couple sol-plante. On est alors amené à irriguer avant que la réserve ne soit épuisée, car passer un tour entraînerait un dessèchement du sol trop important pénalisant la culture.

» Une méthode d'estimation de la dose maximale d'irrigation est proposée dans le complément numérique : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Dose brute

L'apport d'eau d'une irrigation doit être inférieur ou égal à la valeur de la dose stockable.

Cependant, en irrigation à la raie, la dose brute doit être majorée par rapport à la dose stockable pour tenir compte des pertes (percolation, colature).

$$\text{Dose brute} = \text{dose stockable} / \text{rendement}$$

Exemple : si vous estimez le rendement de vos irrigations à 50 %, la valeur de la dose brute devra être au plus égale à deux fois la dose stockable ($2 = 1/0,5$).

EFFICIENCE DE L'IRRIGATION EN EAU ET EN ÉNERGIE

Jean-Jacques Weber, Claire Wittling, Gilles Belaud, Sami Bouarfa, Bruno Cheviron, Caroline Coulon, Magalie Delmas, Sophie Gendre, Jacques Granier, Jean-Philippe Luc, Bruno Molle

Préambule : l'efficacité en eau et en énergie

L'eau est un facteur de production indispensable pour de nombreuses productions et situations géographiques. L'accès à l'eau et à l'énergie peut être contingenté et son coût doit être pris en compte comme son incidence environnementale.

Analyser l'efficacité en eau et en énergie permet d'être plus pertinent dans le choix des systèmes irrigués, du pilotage de l'irrigation, du matériel utilisé, de la source et de la quantité d'énergie nécessaire. Ce chapitre vise à mieux comprendre un ensemble de facteurs qui interfèrent pour trouver le meilleur compromis entre le coût, le confort de fonctionnement et les pratiques respectueuses de l'environnement.

Qu'est-ce que l'efficacité en eau ?

Définitions

La notion d'efficacité en eau est utilisée pour caractériser la performance de l'irrigation, afin d'optimiser l'utilisation de la ressource en eau. On distingue la définition classique de l'efficacité de la définition néoclassique (Lankford, 2006 ; Kambou *et al.*, 2014). La première se rapporte au ratio entre la quantité d'eau qui bénéficie réellement à la culture et la quantité d'eau appliquée. La seconde prend en compte l'estimation de la part d'eau d'irrigation potentiellement disponible pour une réutilisation en aval. La définition classique considère l'eau qui quitte la parcelle comme une perte, l'échelle d'analyse est donc la parcelle. La définition néoclassique intègre l'eau quittant la parcelle car elle est réutilisable à l'échelle du bassin versant.

Dans le présent guide pratique, principalement dédié aux technologies de l'irrigation, la définition classique sera utilisée. Au sein même de l'efficacité classique, plusieurs variantes existent et de nouvelles définitions voient régulièrement le jour. Nous définissons l'efficacité globale d'irrigation à la parcelle comme le rapport entre le volume d'eau utilisé au bénéfice de la culture, c'est-à-dire réellement transpiré par la culture, et le volume à l'entrée de la parcelle (Israelsen, 1950 ; Howell, 2003 ; Hsiao *et al.*,

2007). L'efficacité d'irrigation fait appel à des ratios de volumes d'eau, c'est donc une valeur sans unité ou exprimée en %. Le concept d'efficacité est utilisé, entre autres, en ingénierie de l'irrigation pour évaluer les performances technologiques des systèmes.

La productivité de l'eau, quant à elle, est définie comme le rapport entre une quantité produite et un volume d'eau consommé (Van Halsema et Vincent, 2012). Plus précisément, la productivité agronomique de l'eau d'irrigation est le rapport entre le supplément de rendement permis par l'irrigation et le volume d'eau d'irrigation en entrée de parcelle. Elle s'exprime en kg/m^3 . La productivité économique de l'eau d'irrigation est parfois utilisée. Elle exprime alors le gain économique relatif au supplément de rendement en $\text{€}/\text{m}^3$. Dans la suite du chapitre, nous adopterons le terme de productivité de l'eau d'irrigation avec son sens agronomique.

La productivité de l'eau d'irrigation peut varier fortement d'une saison à l'autre en conditions tempérées, c'est pourquoi une comparaison de résultats sur différentes années est souvent peu pertinente, une comparaison au cours d'une même année climatique étant préférable. En conditions arides, cette contrainte est moindre du fait que, le plus souvent, l'irrigation doit couvrir près de 100 % des besoins.

Contrairement à l'efficacité d'irrigation, la productivité de l'eau d'irrigation ne concerne plus uniquement l'eau d'irrigation, mais également le processus de transformation et de production qui inclut la plante et sa physiologie. C'est à la productivité que fait allusion le slogan *more crop per drop* (produire plus par goutte d'eau consommée). La productivité de l'eau est déterminée par le type de culture, sa physiologie et sa génétique, la disponibilité en nutriments pendant le cycle de culture et, dans une moindre mesure, les pratiques culturales et d'irrigation (Van Halsema et Vincent, 2012). Elle peut être accrue en améliorant l'efficacité technologique de l'irrigation, mais également par le biais des pratiques agronomiques et de la sélection variétale.

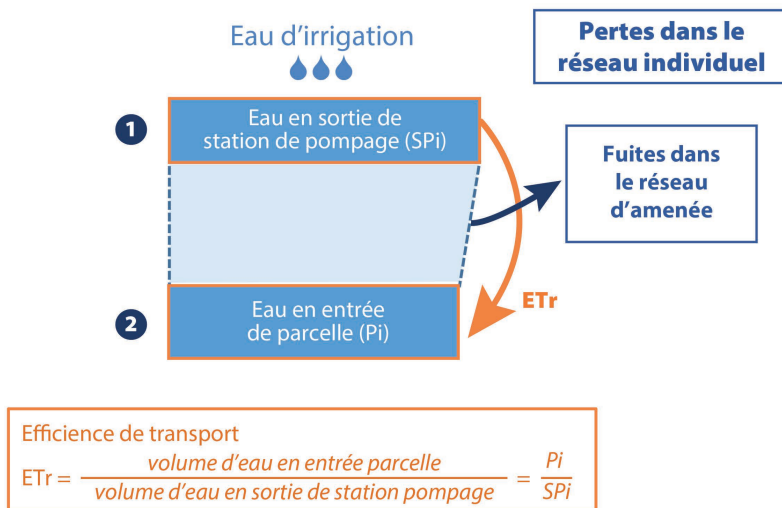
Outre l'efficacité et la productivité de l'eau d'irrigation, d'autres indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer la performance de l'irrigation. Le rapport entre la dose perçue par un agriculteur et la dose mesurée au compteur permet de comparer la dose que l'agriculteur pense apporter à la dose réellement apportée. Une inadéquation de ces deux grandeurs peut mettre en évidence un problème de réglage ou une méconnaissance des caractéristiques du matériel. La comparaison dose optimale (établie par exemple avec la méthode Arvalis Irrinov®)/dose compteur, une fois écartés les problèmes de fuites, permet de révéler une conduite de l'irrigation en décalage par rapport aux besoins en eau de la culture et de préconiser un suivi de l'état hydrique du sol en cours de campagne (bilan hydrique et/ou sondes de mesures).

Les étapes de l'efficacité d'irrigation

Le cheminement de l'eau d'irrigation

Depuis sa sortie de la station de pompage jusqu'à son utilisation effective par les plantes, l'eau d'irrigation (en bleu sur les figures 7.1 et 7.2) franchit 7 étapes qui correspondent à 7 volumes d'eau décroissants. En amont de la parcelle (depuis la station de pompage jusqu'à l'entrée de la parcelle), on distingue une station de pompage individuelle (figure 7.1a) d'un réseau collectif (figure 7.1b). Une fois arrivée à l'entrée de la parcelle, l'eau d'irrigation suit un cheminement identique dans les deux cas (détaillé sur la figure 7.2).

a)



b)

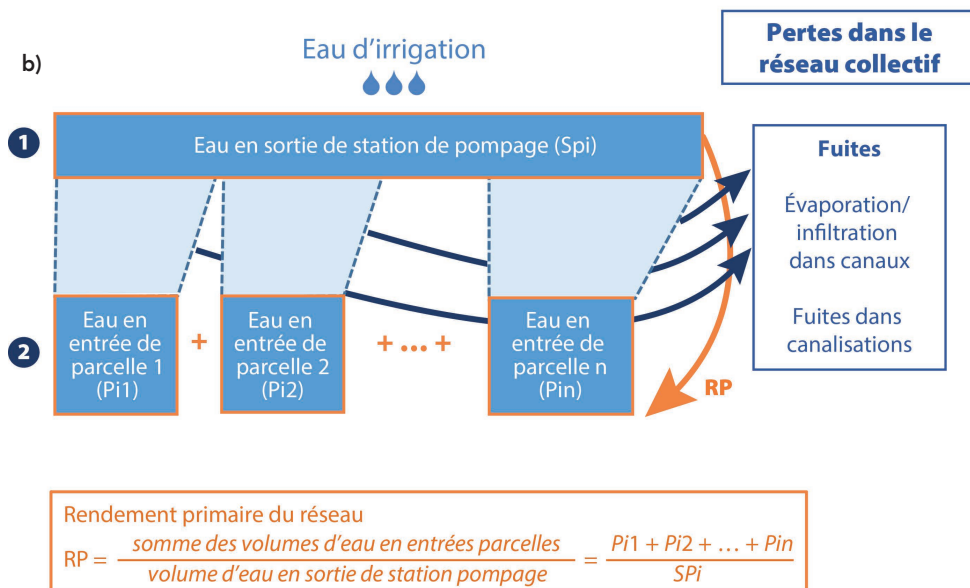


Figure 7.1. Étapes 1 et 2 : efficacité de l'eau d'irrigation en amont de la parcelle : de la station de pompage à l'entrée de la parcelle.

(a) Cas d'une installation individuelle. L'efficacité est alors l'efficacité de transport (ETr).

(b) Cas d'un réseau collectif. L'efficacité est définie par le rendement primaire (RP).

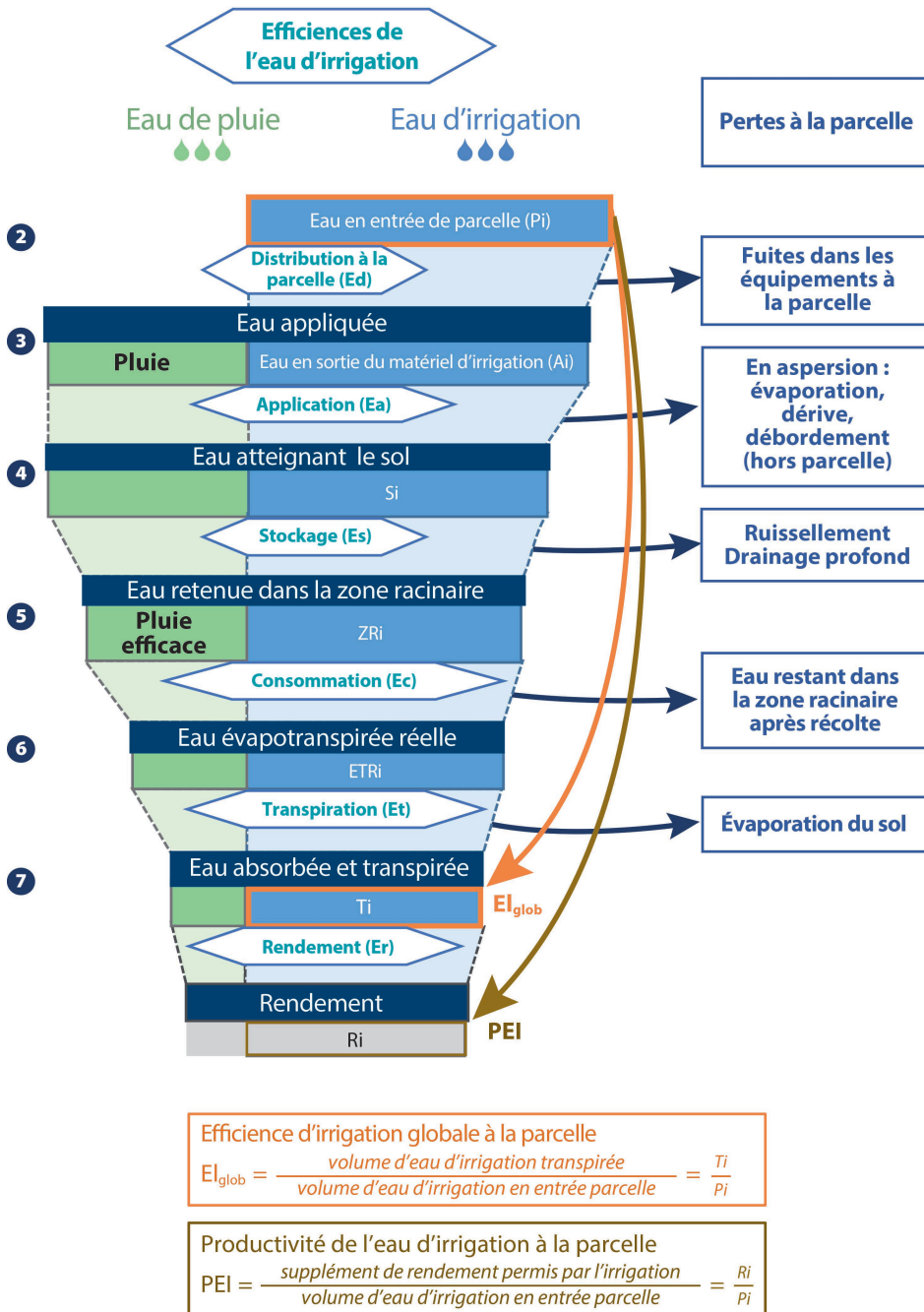


Figure 7.2. Étapes 2 à 7 du cheminement de l'eau d'irrigation et de pluie, nature des pertes d'eau d'irrigation, calcul des efficacités de l'eau d'irrigation à l'échelle de la parcelle.

① L'eau en sortie de station de pompage (SP_i). Dans le cas d'une station de pompage individuelle (figure 7.1a), le volume d'eau quittant la station de pompage est acheminé vers une ou plusieurs parcelles

de l'exploitation. Une fraction peut quitter le système en raison de fuites dans le réseau d'amenée de l'exploitation. Dans le cas d'un réseau collectif (figure 7.1b), l'eau quittant la station de pompage est distribuée vers les différentes exploitations et parcelles. Le long du réseau collectif, qui peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres, une partie peut être perdue par évaporation ou infiltration dans les canaux, ou fuites dans les canalisations sous pression et les organes de protection hydraulique.

- ② L'eau en entrée de parcelle (P_i). Une partie de cette eau est perdue en raison de fuites dans les équipements à la parcelle.
- ③ L'eau appliquée (A_i), c'est-à-dire l'eau sortant du matériel d'irrigation (buse ou goutteur). En asper-
sion, une partie de cette eau peut être perdue par évaporation directe, par dérive due au vent (dépla-
cement du périmètre mouillé à l'intérieur de la parcelle), par transport (exportation hors de la parcelle)
également dû au vent, par débordement hors de la parcelle, ou enfin par interception par la canopée
(puis éventuellement évaporation sur la canopée).
- ④ L'eau atteignant le sol (S_i). Une partie est susceptible d'être perdue par ruissellement ou drainage.
- ⑤ L'eau retenue dans la zone racinaire (ZR_i). Une partie est perdue par l'évapotranspiration des
adventices. Une autre partie considérée comme une perte, à l'échelle de la saison culturale, est l'eau
d'irrigation qui reste dans la zone racinaire après la récolte et ne sera pas utilisée par la culture ; on
aurait en effet pu se passer de cet apport d'eau d'irrigation. Il faut souligner ici que l'on parle bien d'eau
d'irrigation, l'eau de pluie dans le stock final du sol n'étant pas une perte d'eau d'irrigation.
- ⑥ L'eau réellement évapotranspirée par la culture (ETR_i). Une part est perdue sous forme d'eau
évaporée par le sol.
- ⑦ L'eau absorbée et effectivement transpirée par la culture (T_i). Elle permet l'assimilation de dioxyde
de carbone pour la photosynthèse et participe donc à la production de biomasse. Ce volume d'eau
d'irrigation transpirée permet un surplus de rendement (R_i) par rapport à une culture non irriguée.

Les efficacités de l'eau d'irrigation

On définit alors une cascade de 7 efficacités d'eau d'irrigation à la parcelle (figures 7.1 et 7.2) :

① En amont de la parcelle

L'efficacité de transport, dans le cas d'une installation individuelle (figure 7.1a)

$E_{tr} = \text{eau en entrée de parcelle} / \text{eau en sortie de station de pompage} = P_i / S_{pi}$

Ou bien

Le rendement primaire du réseau dans le cas d'un réseau collectif (figure 7.1b).

$RP = \text{somme des volumes d'eau en entrées de parcelles} / \text{volume d'eau en sortie de station de pompage}$
 $= (P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{in}) / S_{pi}$

② L'efficacité de distribution à la parcelle

$E_d = \text{eau appliquée} / \text{eau en entrée de parcelle} = A_i / P_i$

③ L'efficacité d'application

$E_a = \text{eau atteignant le sol} / \text{eau appliquée} = S_i / A_i$

En goutte-à-goutte enterré à plus de 20 cm de profondeur, $E_a = 100 \%$

④ L'efficacité de stockage

$E_s = \text{eau retenue dans la zone racinaire} / \text{eau atteignant le sol} = ZR_i / S_i$

⑤ L'efficacité de consommation

$E_c = \text{eau évapotranspirée} / \text{eau retenue dans la zone racinaire} = ETR_i / ZR_i$

⑥ L'efficacité de transpiration

E_t = eau transpirée/eau évapotranspirée = T_i/ETR_i

⑦ L'efficacité de rendement, qui englobe l'assimilation de CO_2 pour la photosynthèse, corrélée au volume d'eau transpirée, la conversion du CO_2 en biomasse et la production de rendement.

E_r = supplément de rendement permis par l'irrigation/eau transpirée = R_i/T_i

Les étapes 2 à 6 composent l'efficacité globale d'irrigation (E_{glob}) à la parcelle :

E_{glob} = eau transpirée/eau en entrée de parcelle = $T_i/P_i = E_d \times E_a \times E_s \times E_c \times E_t$

La productivité de l'eau d'irrigation est :

PEI = supplément de rendement permis par l'irrigation/eau en entrée de parcelle

$$= R_i/P_i = E_d \times E_a \times E_s \times E_c \times E_t \times E_r$$

L'eau de pluie (en vert sur les figures 7.1 et 7.2) suit le même cheminement, depuis l'eau appliquée (l'eau « tombée du ciel ») jusqu'à l'eau de pluie transpirée par la culture. La part d'eau de pluie atteignant le sol et stockée dans la zone racinaire est appelée « pluie efficace ».

Évaluation des volumes d'eau à chaque étape de l'efficacité

L'évaluation des volumes aux différentes étapes d'efficacités d'irrigation n'est pas aisée. Certains volumes, tels la pluie efficace ou l'évapotranspiration de la culture, peuvent être estimés indirectement par diverses formules de calcul empiriques. On peut également avoir recours à la modélisation pour estimer d'autres grandeurs comme la part d'eau d'irrigation évaporée et transpirée (voir chapitre 2). Pour la quantification directe de ces volumes, certaines mesures sont relativement courantes, d'autres mesures sont plus délicates et nécessitent un matériel sophistiqué.

Eau d'irrigation en entrée de parcelle. Elle peut être mesurée à l'aide d'un compteur ou d'un débitmètre au niveau de la borne en entrée de parcelle. Elle peut également être approchée par la connaissance du débit en entrée de parcelle et la durée d'ouverture des vannes. Peuvent également être utilisées les données de facturation des organismes délivrant l'eau. Dans tous les cas, pour évaluer l'efficacité de façon fiable, il est indispensable de disposer d'un compteur d'eau en entrée d'exploitation, ou mieux en entrée de chaque îlot d'irrigation, voire de chaque parcelle.

Eau appliquée. L'eau de pluie appliquée est l'eau de pluie « tombant du ciel ».

L'eau d'irrigation appliquée est évaluée par la mesure du débit du ou des distributeurs (buse(s) ou goutteurs) multipliée par la durée d'irrigation.

Eau atteignant le sol. Pour l'eau de pluie, la mesure à l'aide de pluviomètres est celle dont on dispose le plus souvent. Pour l'eau d'irrigation, dans le cas de l'aspersion, l'eau atteignant le sol peut être mesurée à l'aide de collecteurs (ou pluviomètres) situés au sol qui permettent également d'apprécier l'uniformité de distribution.

Eau retenue dans la zone racinaire. À partir de cette étape, l'eau de pluie et l'eau d'irrigation ne se distinguent plus et leur quantification devient moins aisée. L'eau dans le sol peut être approchée, sur échantillons prélevés, par la mesure de l'humidité pondérale (dessiccation), ou par instrumentation au champ par la mesure de l'humidité volumique (sondes à neutrons, sondes capacitatives, FDR, TDR, etc.) ou de la tension (tensiomètres).

Eau évapotranspirée. Elle peut être évaluée à partir de dispositifs onéreux et lourds à mettre en œuvre, comme les cases lysimétriques qui mesurent la quantité d'eau perdue dans l'atmosphère par transpiration et évaporation.

Eau transpirée par la plante. Elle peut être mesurée par des capteurs de flux de sève positionnés sur la plante.

Rendement. Il ne s'agit plus, à ce stade de mesure, de quantités d'eau, mais de poids de biomasse ou de production.

Efficiences des différents systèmes d'irrigation

Les valeurs d'efficacité couramment citées à l'échelle de la parcelle pour une saison culturale sont présentées dans le tableau 7.1. Il est important de bien établir la distinction entre ces valeurs d'efficacité globale (rapport volume évapotranspiré réel/volume en entrée de parcelle, à gauche dans le tableau 7.1) et les valeurs d'efficacité d'application (à droite dans le tableau 7.1) qui sont en général supérieures. Ainsi, le goutte-à-goutte de surface est souvent prôné comme une technologie très efficace qui peut effectivement présenter une efficacité d'application supérieure à 90 % (pas de pertes par évaporation directe, dérive ou débordement), voire proche de 100 % selon les constructeurs. Il faut cependant garder à l'esprit que son efficacité globale peut être de seulement 70 % si les pratiques d'utilisation sont défaillantes (pertes par ruissellement, drainage, stock après récolte), par exemple si les durées d'irrigation sont augmentées du fait d'un colmatage entraînant une non-uniformité des apports.

Tableau 7.1. Efficacités des différents systèmes, prenant en compte l'évaporation directe, la dérive, l'interception par la canopée, le ruissellement et le drainage (à l'exclusion de l'évaporation du sol). Pour plus de détails sur les figures, se reporter à la figure 7.2.

Système	Efficacités (%)			
	Volume évapotranspiré/volume en entrée de parcelle		Volume atteignant le sol/volume en sortie du matériel d'irrigation = efficacité d'application	
	Moyenne	Min-Max	Moyenne	Min-Max
Gravitaire	40	10-90	50	20-85
Canon enrouleur	70	55-80	75	75-95
Couverture intégrale	70	60-85	75	70-95
Pivot traditionnel	80	75-90	85	80-95
Micro-asperion	80	60-90	85	80-95
Goutte-à-goutte de surface	85	70-95	90	90-100
Goutte-à-goutte enterré	90	75-95	95	90-100

Il s'agit des efficacités atteignables en considérant l'état moyen des dispositifs en France. Suivant le niveau de vieillissement ou d'entretien des installations, un intervalle de variation de ces performances est proposé (d'après Howell, 2003 ; Hassanli *et al.*, 2010 ; Weber et Granier, 2012 ; Granier et Deumier, 2013 ; Fader *et al.*, 2016, et dires d'experts).

Attention, les valeurs d'efficacité de la colonne de gauche prennent en compte l'évaporation directe, la dérive, l'interception par la canopée, le ruissellement et le drainage, mais pas l'évaporation du sol. Elles correspondent donc au rapport volume évapotranspiré réel/volume en entrée de parcelle. Elles ne représentent pas entièrement l'efficacité globale de l'irrigation définie précédemment comme le ratio volume transpiré réel/volume en entrée de parcelle, qui inclut également les pertes par évaporation du sol.

Qu'est-ce que l'efficacité en énergie ?

Utiliser de l'eau, c'est consommer de l'énergie, en prenant en compte trois critères : la quantité, la hauteur manométrique totale et le type de ressource énergétique. Si l'économie d'eau représente la première économie d'énergie, d'autres facteurs influencent l'efficacité énergétique.

Énergie primaire, énergie finale

L'énergie primaire est l'énergie disponible dans les ressources naturelles, avant transport sur le lieu d'utilisation et avant toute transformation par l'homme. Le pétrole, le gaz ou l'uranium sont des formes d'énergie primaire.

L'énergie disponible au niveau du consommateur (ici l'agriculteur irrigant) est appelée « énergie finale » ; c'est par exemple la quantité d'électricité relevée au compteur de l'utilisateur final.

La différence entre les deux notions est importante : en effet, l'énergie finale est la quantité facilement perceptible par le consommateur puisque c'est celle qui lui est facturée ; mais l'énergie primaire est celle qui permet de quantifier l'importance des prélèvements sur les ressources naturelles. Le coefficient de conversion (énergie primaire/énergie finale) est toujours supérieur à 1.

En ce qui concerne l'électricité, le coefficient moyen à utiliser pour évaluer l'énergie primaire correspondant à une certaine énergie finale, peut être calculé à partir de la somme des quantités d'énergies primaires consommées par les centrales de production d'électricité et la somme des quantités d'énergie facturées aux consommateurs : en France, ce coefficient est actuellement de 3,83 selon la base de données Ecoinvent 3 (*Allocation, cut-off by classification system*, Werner *et al.*, 2016) ; mais cette valeur se modifie dans le temps selon l'évolution des formes de production (nucléaire, thermique, hydraulique, solaire, éolien, etc.). Lorsque l'énergie finale est sous forme thermique, il n'y a pas de transformation par l'homme, hormis le transport. Le coefficient est actuellement de 1,75.

Bilan d'énergie

À quoi sert l'énergie dans un système d'irrigation sous pression ? Pour répondre à cette question, il est bon d'établir d'abord un bilan d'énergie, pour mettre en évidence les postes sur lesquels il est possible d'intervenir pour améliorer l'efficacité.

Le système d'irrigation a besoin d'énergie :

- pour élever l'eau au niveau de la parcelle à irriguer ;
- pour transporter l'eau depuis la ressource jusqu'à la parcelle ;
- pour répartir cette eau le mieux possible pour la culture.

Élever l'eau constitue la contrainte la plus forte : la configuration de la parcelle et la situation de la ressource en eau imposent de dépenser au minimum la quantité d'énergie potentielle correspondante.

Le transport de l'eau dans les systèmes d'aspersion se fait d'abord dans les conduites sous pression (énergie hydraulique), et ensuite sous forme d'un jet dans l'air (énergie cinétique) lors de l'application. L'indicateur pertinent pour évaluer l'efficacité énergétique du transport de l'eau devra exprimer l'énergie nécessaire pour transporter un certain volume d'eau sur une certaine distance (par exemple en Wh par m³ d'eau et par mètre linéaire).

Les ordres de grandeur de cet indicateur montrent qu'il est beaucoup plus efficace de transporter l'eau dans une conduite sous pression qu'avec un jet aérien (tableau 7.2).

Tableau 7.2. Énergie nécessaire pour transporter 1 m³ d’eau sur une distance de 1 m pour divers systèmes d’irrigation.

Jet d’asperseur	5 à 25 Wh/m³/m	Très forte variabilité selon les modèles, et des valeurs qui augmentent avec la pression
Jet de canon, sans vent	2 à 4 Wh/m³/m	2 ou 3 fois plus en conditions ventées, car le jet porte moins
Tube polyéthylène d’enrouleur	0,2 à 0,4 Wh/m³/m	
Rampe de couverture intégrale	0,3 Wh/m³/m	En début de rampe
Rampe de pivot	0,05 Wh/m³/m	En début de pivot

Enfin, la répartition de l’eau sur la culture constitue la dernière phase.

Du point de vue de l’efficacité énergétique, l’idéal serait de conduire l’eau sous pression en chaque point où l’on en a besoin : c’est ce que l’on fait en micro-irrigation, où l’eau sort du goutteur au pied de la plante, à une pression faible : l’efficacité énergétique est alors élevée.

Mais en aspersion, où l’on cherche à minimiser aussi les coûts d’équipement, c’est le jet qui assure la répartition lors de cette dernière phase. Or un jet compact ne peut pas assurer une bonne répartition : la formation de gouttes est indispensable pour une irrigation par aspersion de qualité. Sans atomisation, on aurait un jet compact dommageable pour le sol et la culture, et une répartition concentrée sur l’extrémité de la portée.

L’énergie hydraulique dont on dispose au niveau de l’arroseur se transforme donc en énergie cinétique, puis le processus d’atomisation transforme cette énergie en énergie de tension superficielle pour former des gouttes ; enfin, plus les gouttes sont nombreuses et petites, plus elles sont soumises aux forces de frottement et à l’évaporation, qui sont des formes d’énergie perdues (figure 7.3).

Et pour être complet, il faut mentionner aussi la part d’énergie transformée en énergie mécanique pour la rotation de l’arroseur, qu’il s’agisse d’un batteur ou d’une turbine.



Figure 7.3. Bilan d’énergie d’un jet de canon.

Indicateurs d'efficacité énergétique

Plusieurs indicateurs permettent d'analyser un tel bilan d'énergie.

L'efficacité énergétique exprime la dépense énergétique par unité de volume d'eau apporté, donc en kWh/m³. Elle est très variable selon les systèmes d'irrigation.

La productivité de l'énergie se rapporte à la production agricole commercialisable, soit en kWh/q ou en kg/kWh par exemple. Bien entendu, elle varie selon les cultures et les itinéraires techniques.

Ces indicateurs peuvent être aussi rapportés à la surface (en kWh/ha et par an), par exemple lorsqu'on veut les mettre en rapport avec les coûts d'équipement à l'hectare.

Il peut être utile aussi d'exprimer les mêmes indicateurs en énergie primaire, lorsque l'on veut évaluer l'impact environnemental d'un type d'installation. Une telle démarche prend toute sa valeur lorsqu'il s'agit de comparer des groupes de pompage thermiques et électriques.

Enfin, pour être complet, il faudrait intégrer dans certains indicateurs prenant en compte l'énergie liée à la fabrication et à la mise en place des équipements d'irrigation. Les méthodes d'analyse de cycle de vie (ACV) proposent des outils adaptés à ce type de problématique.

On caractérise l'efficacité énergétique d'un réseau d'irrigation, sa performance, en utilisant communément l'indicateur de base exprimé en kWh/m³. Il s'agit des m³ distribués par la station de pompage au niveau du débitmètre et des kWh relevés à cette station de pompage au niveau du compteur électrique. Cet indicateur prend en compte l'énergie finale disponible en amont de la station de pompage, nécessaire à la mise sous pression et au transport de l'eau en tête de parcelle, selon la pression de service requise par le matériel d'application (figure 7.4).

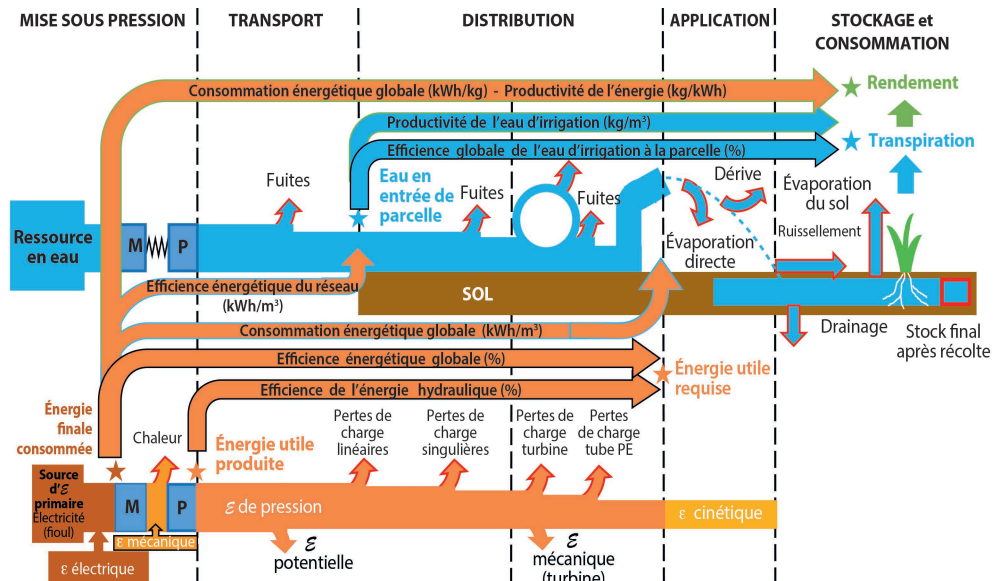


Figure 7.4. Pertes en eau et en énergie (flèches rouges) tout au long du cheminement de l'eau, dans le cas de l'irrigation par canon-enrouleur avec station de pompage individuelle. Exemples d'indicateurs d'efficacité en eau et en énergie (M : moteur, P : pompe).

NB : à la sortie du canon, seule figure l'énergie cinétique. Sa transformation en énergie de tension superficielle pour l'atomisation ainsi que les pertes par frottement et évaporation ne sont pas représentées.

Exemple

L'énergie dont la station de pompage a besoin comprend :

- l'énergie nécessaire au pompage à proprement parler, c'est-à-dire l'élévation de l'eau depuis la ressource (réservoir, rivière ou nappe) jusqu'à la pompe elle-même (il faut 10 kJoules pour élever un m³ d'eau d'une hauteur de 1 mètre) ;
- la mise en pression de l'eau, indispensable pour le fonctionnement des systèmes d'irrigation (il faut 100 kJoules/m³ pour élever la pression de 1 bar) ;
- ces 2 premiers points représentent l'énergie utile, le rendement de la pompe est à prendre en compte pour calculer l'énergie finale nécessaire au niveau de la pompe.

Par exemple, pour une station de pompage dont le rendement est de 75 % et qui prélève à 5 m de profondeur une eau qu'elle doit mettre en pression à 10 bars, l'énergie finale sera la suivante :

$$\text{Énergie finale} = (5 \times 10 + 10 \times 100) / 0,75$$

$$= 1\,400 \text{ kJoules par m}^3 = 0,39 \text{ kWh par m}^3$$

avec 1 kWh = 3 600 kJoules, soit 1 joule = 1 watt par seconde.

On en déduit l'énergie primaire consommée, en multipliant par le coefficient de conversion mentionné ci-dessus, de 3,83 pour les pompes électriques, et de 1,75 pour les pompes thermiques.

On peut donner un ordre de grandeur simple qui variera en fonction du rendement de la station de pompage (cas d'un rendement de 56 % selon calcul du chapitre 3) :

- pour une pression en tête stable de 20 bars (élévation de la ressource + pression départ station) : 1 kWh/m³ ;
- pour une pression en tête stable de 10 bars (élévation de la ressource + pression départ station) : 0,5 kWh/m³.

Le niveau de pression requis est fonction de l'efficacité de l'ensemble de l'installation et de contraintes naturelles (linéaire et dénivelée).

Pour caractériser la performance globale d'un réseau d'irrigation, on s'intéressera aux kWh/m³ ou au kWh/kg de grain ou au kWh/ha, pour la productivité au kg de grain/m³ ou au kg de grain/kWh.

Exemple du projet EDEN 2017 (CACG, Irstea-Arvalis, CA 31) (Donnat *et al.*, 2017) :

- performance du matériel d'application (ou d'une installation de pompage) nécessitant 6 bars de pression ;
- culture de maïs avec un rendement de 155 qtx/ha, pour 233 mm irrigués en couverture intégrale ;
- performance : 0,16 kWh/m³ – 0,02 kWh/kg – 326 kWh/ha – 6,6 kg grain/m³ – 47,5 kg grain/kWh.

Cas particulier des eaux usées ou chargées

Les eaux usées émanent des stations d'assainissement, elles sont traitées avant utilisation, après traitements elles n'ont pas de caractéristiques particulières qui puissent dégrader leur efficacité tant en eau qu'en énergie. Il faudra simplement prendre en compte la consommation énergétique propre à la station et au procédé de traitement choisi (ultraviolet, filtration, etc.).

Les eaux chargées sont des effluents industriels ou agricoles (viticoles, effluents d'élevage, etc.). On devra prendre en compte leurs caractéristiques au cas par cas en fonction du matériel d'irrigation utilisé.

- En goutte-à-goutte, pour éviter les bouchages liés à des solides en suspensions ou des développements de biofilms qui peuvent être arrachés, une filtration renforcée s'avère en général nécessaire, et dans la mesure où le potentiel de colmatage de ces eaux est plus important qu'avec des eaux brutes standards, les nettoyages de filtres vont s'avérer plus fréquents, de même que les nettoyages du réseau et du système de distribution (chasses, traitement chlore et acide). Cela induit des consommations d'énergies et d'eau supplémentaires sans lien avec l'arrosage qu'il faut comptabiliser.

- En micro-asperion, la situation est proche de celle du goutte-à-goutte, avec des exigences un peu moindres en matière de finesse de filtration et de fréquence de nettoyage, puisque les sections de passage sont en règle générale plus importantes.
- En asperion par canon, aucune précaution particulière n'est nécessaire étant donné les diamètres de passage et les vitesses d'écoulement, ces systèmes sont d'ailleurs souvent utilisés pour épandre des lisiers.
- Dans le cas de quadrillage d'asperseurs, cela dépendra principalement de la pluviométrie horaire choisie et donc de la taille des buses utilisées, suivant les cas on se trouvera dans une situation sans risque, comme avec les canons, ou plus sensible comme dans le cas des pivots, abordés ci-après.
- En asperion par pivot, on peut se trouver en situation sensible lorsqu'on a affaire à des machines fonctionnant en basse pression dans lesquelles les vitesses d'écoulement sont réduites pour limiter les pertes de charge rendant possible la formation de dépôts, lesquels dépôts peuvent être remis en suspension et venir obstruer les buses. Dans le cas d'utilisation de cannes de descente, la présence de débris en suspension peut aboutir à leur accumulation juste en amont des asperseurs. Dans le cas de machines de petites dimensions calculées pour effectuer des passages fréquents, et donc équipées de buses de petit diamètre (< 3 mm), des bouchages peuvent facilement avoir lieu. Dans ce genre de situations, il est donc impératif de prévoir un dégrillage en tête de machine (0,5 à 1 mm) et des chasses régulières en ouvrant l'extrémité du porte-à-faux.

Donc d'un point de vue général, dans le cas d'utilisation d'eaux de mauvaise qualité, les consommations d'eau et d'énergie peuvent se trouver légèrement augmentées par les besoins de chasse, de filtration, de nettoyage de filtres, ou d'injection de produits de nettoyage, sans compter dans le cas d'arrosage de plantes sensibles une possible désinfection pour respecter les règles sanitaires.

Comment améliorer l'efficacité en eau ?

Améliorer l'efficacité en eau d'un système d'irrigation consiste à réduire les pertes aux différentes étapes du cheminement de l'eau d'irrigation. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la nature des pertes en eau d'irrigation et leur origine (figures 7.1 et 7.2).

Nature des pertes d'eau d'irrigation

Fuites dans le réseau d'amenée (individuel ou collectif)

Les différents types de pertes que l'on peut recenser sur le réseau d'amenée ou de transport en irrigation peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur nature.

Les pertes liées à l'exploitation du réseau

Lors des interventions ou de la mise hors gel du réseau, une partie de celui-ci est vidangée. Bien que comptabilisé au départ de la station, ce volume n'est pas pris en compte ou facturé et conduit donc à déprécier la valeur du rendement calculé. Ce volume est, toutefois, relativement faible comparé aux consommations d'un groupement d'irrigants. Il est par ailleurs utilisé au cours de périodes où la ressource est généralement abondante. À titre d'exemple, un volume de 330 m³ a été nécessaire pour mettre un réseau de conduites de 22 km sous pression suite à un hivernage, soit 0,05 % de la consommation moyenne de l'ASA de Pessoulens (Gers) sur la période 2005-2009, test « réseau fermé » de l'ASA de Pessoulens (voir projet Casdar Eau, Deumier *et al.*, 2011).

Les pertes liées à la protection du réseau

Des ouvrages hydrauliques de point bas tels que des soupapes antibélier, destinées à protéger les canalisations contre les « coups de bélier » et les excès de pression, peuvent conduire à engendrer des pertes (matériel obsolète ou réglage inapproprié). De même, les purgeurs d'air sur les points hauts peuvent être, en cas de dysfonctionnement, à l'origine de fuites.

Par manque d'entretien ou à cause d'une sollicitation trop importante, certaines vannes ou ouvrages de vidange du réseau peuvent également générer des fuites.

L'état de ces appareillages est donc crucial pour une gestion économe de l'eau.

Les pertes liées aux fuites

Celles-ci sont plus ou moins facilement décelables en fonction de leurs causes (rupture de conduites, fermeture de vannes non étanches, etc.) et de leurs positions sur le réseau de canalisations.

Parmi elles, on différencie :

- les fuites accidentelles et donc ponctuelles. Dans le cas le plus fréquent de casses franches, une chute de pression est alors constatée, permettant facilement de caractériser la source du problème ;
- les fuites répétées, caractéristiques d'un réseau ancien, avec des conduites poreuses ou inadaptées à l'utilisation actuelle. Dans ce dernier cas, les réparations ne sont que les solutions d'attente de mesures plus globales.

Fuites dans les équipements à la parcelle

Les problèmes d'étanchéité ou de fuites dans les tuyaux d'amenée d'eau au sein de la parcelle sont susceptibles d'entraîner jusqu'à 5, voire 10 % de pertes qui, bien sûr, altèrent l'efficacité de distribution à la parcelle. Elles sont influencées par la vétusté du matériel et son mauvais entretien. Les tuyaux en aluminium posés en surface sont plus sujets à ces fuites (joints mal ajustés ou défectueux) que les canalisations en polyéthylène enterrées. En couverture intégrale, les fuites peuvent être nombreuses et de petit débit. Pour les enrouleurs et les pivots, il s'agit en général de fuites accidentelles, plus faciles à identifier. En goutte-à-goutte, les fuites par endommagement de gaines (pincements, dégâts par les oiseaux ou les insectes) sont difficiles à repérer, encore plus lorsqu'elles sont enterrées.

Débordement hors de la parcelle

Ce problème d'irrigation involontaire de débordement de l'irrigation hors de la parcelle ciblée est rencontré essentiellement avec le canon enrouleur. L'eau est perdue sur les parcelles voisines ou sur la route bordant le champ.

Pour l'irrigation par ruissellement (à la planche ou à la raie), il est nécessaire qu'un volume d'eau arrive au bout de la parcelle par ruissellement, pendant un temps suffisamment long pour permettre le remplissage du réservoir utile. Ainsi, ceci se traduit par un volume ruisselé en dehors de la parcelle. On parle de volume perdu en colature, qui peut rejoindre un réseau de drainage ou être réutilisé pour d'autres parcelles. Il est parfois possible de boucher les extrémités pour éviter ce ruissellement (avec un volume infiltré en profondeur par conséquent plus important).

Évaporation directe et dérive

Une idée reçue consiste à penser que l'évaporation directe est une source importante de pertes d'eau, mais c'est essentiellement par dérive liée au vent que les pertes d'eau par aspersion dans l'air sont les plus importantes.



Photo 7.1. Les fuites dans les équipements d'irrigation à la parcelle sont à l'origine d'une baisse d'efficacité de l'irrigation (© J. Granier).

Les pertes par **évaporation directe** dans l'air en asperion représentent en effet, et en règle générale, moins de 5 % de l'eau appliquée lors d'une journée chaude (Molle *et al.*, 2012).

Par exemple (figure 7.5), au cours de l'été caniculaire de 2003, le 6 août, pour un asperseur de couverture intégrale isolé fonctionnant à 3,5 bars, avec une ETP journalière de 9,3 mm, une température maximale de 36,3 °C, une humidité minimale de 28 %, une vitesse de vent maximale de 3,8 m/s, ces pertes n'ont pas dépassé 9 % sur 24 h. Elles peuvent dépasser ponctuellement 20 % en conditions de demande évaporative et de vent extrême, durant les trois heures les plus chaudes et ventées de la journée (Ruelle *et al.*, 2004). Elles concernent peu les grosses gouttes mais essentiellement les petites ($\phi < 1$ mm) et les très petites gouttes ($\phi < 150$ μ m, dont la proportion en volume reste faible (pour l'asperseur cité plus haut, respectivement 4,2 et 0,17 %) et qui sont susceptibles de s'évaporer entièrement.

Les pertes par **dérive** sont dues à l'influence du vent sur les plus petites gouttes du jet d'asperion qui dérivent hors de la zone ciblée. Elles sont quantitativement plus importantes que les pertes par évaporation directe.

Pour donner un ordre de grandeur, sur un asperseur, **la perte globale par évaporation et dérive combinées**, durant les différentes périodes d'une journée d'été dans le sud de la France, peut atteindre ponctuellement 20 %, ce qui représente 4 % du volume appliqué sur une période d'arrosage de 24 h (Molle *et al.*, 2012).

Les pertes par évaporation et dérive occasionnent une légère baisse de la température du couvert végétal, ainsi qu'une hausse de l'humidité relative de l'air, conduisant à une réduction passagère de l'évapotranspiration de la culture. Néanmoins, cette réduction de l'évapotranspiration ne compense pas le volume d'eau évaporé et transporté qui représente donc une perte réelle (Playan *et al.*, 2005).

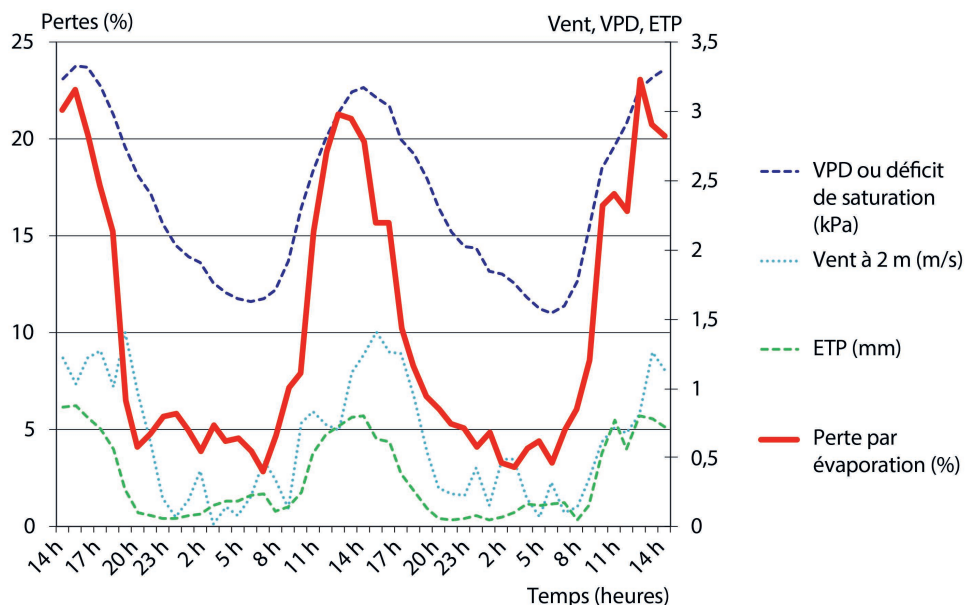


Figure 7.5. Pertes d'eau d'irrigation par évaporation directe pour un asperseur de couverture intégrale isolé fonctionnant à 3,5 bars, au cours de la journée du 27 juillet 2003 (d'après les données de Molle et al., 2012). VPD : déficit de pression de vapeur ; ETP : évapotranspiration de référence.

Interception par la canopée

Une part de cette eau retourne au sol en s'écoulant le long des tiges (*stemflow*) ; l'autre part, estimée entre 1,5 et 2,5 mm pour une culture de maïs après floraison, est finalement perdue par évaporation à partir de la surface foliaire (Lamm et Manges, 2000).

Ruissellement

Le ruissellement est un effet de la microtopographie. Si le débit d'apport d'eau d'irrigation est supérieur aux capacités d'infiltration du sol, on observe le phénomène de flaquaage. Dès que le sol est en pente, même très légère, l'eau ne pouvant pénétrer dans le sol est perdue par ruissellement. C'est le cas notamment lorsqu'une croûte de battance s'est constituée à la surface d'un sol limoneux.

Par ailleurs, l'énergie cinétique des gouttes peut provoquer l'érosion par impact direct (effet « splash ») et créer de la microtopographie, donc du ruissellement. D'où l'importance d'éviter l'aspersion avec des gouttes à forte énergie cinétique (taille et vitesse élevées) sur les sols battants ou non couverts par la végétation, et d'adapter le débit d'irrigation aux caractéristiques du sol.

Drainage profond

Si les doses d'irrigation sont supérieures au volume d'eau que le sol peut retenir, l'excédent est perdu par drainage profond, sous la zone racinaire, et ne pourra plus être utilisé par la culture. Pour économiser de l'eau en irrigation, il est fondamental de bien connaître le réservoir utile (RU) du sol et de tenir compte de la participation des pluies au remplissage du RU. Les pertes par drainage peuvent être générales sur la parcelle si la dose d'apport global est excédentaire par rapport aux capacités de stockage du sol. Elles peuvent également être localisées en raison de l'hétérogénéité spatiale du sol de la parcelle.

et/ou de l'hétérogénéité de distribution due au matériel. À titre d'exemple, une étude menée en Espagne dans le bassin de l'Èbre sur 55 parcelles irriguées essentiellement par aspersion (Merchan *et al.*, 2015) a estimé la valeur moyenne de pertes par drainage à 10 %.

Évapotranspiration des adventices

Les adventices, tout comme les plantes cultivées, consomment de l'eau (Abouziena *et al.*, 2014) et sont à l'origine de pertes d'eau d'irrigation. Inversement, les adventices peuvent créer un tapis végétal, équivalent à un mulch naturel, et ainsi limiter les pertes par évaporation du sol. Une gestion appropriée des adventices peut accroître significativement l'efficacité de l'irrigation.

Eau restant dans la zone racinaire après récolte

L'eau d'irrigation résiduelle dans la zone racinaire après la récolte est perdue pour la culture à l'échelle de la saison culturale. Elle pourrait éventuellement être réutilisée si une culture ultérieure était installée immédiatement après. Cependant, dans le cas du maïs, par exemple, l'eau d'irrigation résiduelle est réellement gaspillée car le maïs suivant ne sera semé qu'au printemps et les pluies d'hiver suffisent en général à recharger la réserve du sol. La conduite de l'irrigation est le facteur déterminant pour éviter cette perte. Cependant, même dans le cadre d'une conduite optimisée, des orages imprévisibles de fin de saison peuvent rendre une irrigation inutile *a posteriori*.

Évaporation du sol

La part d'eau évaporée par le sol diminue au fur et à mesure que le taux de couverture par la canopée augmente. On estime entre 10 et 20 % la part d'eau évapotranspirée qui est évaporée en journée par le sol sous un couvert végétal complètement développé (Jara *et al.*, 1998 ; Hsiao *et al.*, 2007). L'irrigation localisée, en n'humidifiant qu'une partie restreinte du sol, limite considérablement l'évaporation. Le système de goutte-à-goutte enterré peut même supprimer totalement ces pertes. Bonachela *et al.* (2001) ont mis en évidence une économie d'eau consécutive à la réduction de l'évaporation du sol en goutte-à-goutte enterré par rapport au goutte-à-goutte de surface de 4 à 11 % de l'eau évapotranspirée dans une oliveraie mature et de 18 à 41 % dans une oliveraie jeune. Les pratiques culturales visant à diminuer l'évaporation du sol, comme le mulching, permettent également des économies d'eau d'irrigation.

Origine des pertes d'eau d'irrigation

L'origine des pertes conditionne à la fois la nature des pertes et leur ampleur en fonction des différents systèmes d'irrigation (tableau 7.3).

Tableau 7.3. Origine des pertes en eau d'irrigation à la parcelle. Sensibilité des divers systèmes d'irrigation.

Origine des pertes en eau d'irrigation	Nature des pertes en eau d'irrigation	Système d'irrigation						
		Gravitaire	Aspersion			Micro-aspersion	Goutte-à-goutte de surface	Goutte-à-goutte enterré
			Enrouleur	Couverture intégrale	Pivot			
Conditions locales								
Climat								
Forte température, fort rayonnement	Évaporation directe	+++	++	+++	++	+	—	—
	Évaporation du sol	+++	+++			+	+	—

Fort vent	Évaporation directe	+++	++	+++	++	+	-	-
	Dérive	-	+++	+++	+	+	-	-
	Évaporation du sol	+++	+++			+	+	-
Sol								
Perméabilité faible, battance	Ruissellement	+	+++	++	++	+	+	-
Forte pente	Ruissellement	0	+++	++	++	+	-	-
Faible réservoir utile	Drainage profond	+++	+++	++	+	+	+	+
Variabilité spatiale importante	Ruissellement	+	+++	++	+	+	+	-
	Drainage profond	+++	+++	++	+	+	+	+
Développement de la culture								
Premiers stades de développement	Évaporation du sol	+++	+++			+++	++	-
Fort indice foliaire	Interception par la canopée (maïs)	-	+	+++	+	+++	-	-
Technologie d'irrigation								
Faible étanchéité des conduites d'amenée ou des équipements	Fuites	+++	+++			+++	+++	+++
Grande taille et forte vitesse des gouttes (impact)	Ruissellement	0	+++	++	++	+	-	-
Système d'irrigation aérien vs enterré	Évaporation du sol	+++	+++			+++	+++	-
Forte hétérogénéité de distribution	Ruissellement	0	+++			+++	-	-
	Drainage profond	0	+++			+++	+++	+++
Pratiques d'irrigation								
Dates, horaires (vent, chaleur)	Évaporation directe	++	+++			+	-	-
	Dérive	0	+++			+	-	-
Doses importantes	Ruissellement	++	+++			+	+	-
	Drainage profond	+++	+++			+	+	+
	Eau restant dans la zone racinaire après la récolte	+++	+++			+++	+++	+++
Pratiques culturales								
Date de semis tardive	Évaporation directe	+++	+++			+	-	-
	Évaporation du sol	+++	+++			+	+	-
Présence d'adventices	Évapotranspiration des adventices	+++	+++			++	+	-
Pas d'adventice : sol nu sur l'inter-rang et/ou sur le rang	Évaporation du sol	+++	+++			+	+	-
Paillis naturel ou synthétique	Évaporation du sol	0	+			-	-	-

0 : ne s'applique pas ; - : insensible ; + : peu sensible ; +++ : très sensible.

Les facteurs générant des pertes liées au contexte local et au développement de la culture ne sont pas modifiables, comme une parcelle à forte pente, un sol à faible réservoir utile, une situation en une région ventée, une végétation encore peu couvrante. Il convient alors d'adapter les équipements d'irrigation et les pratiques afin de limiter au mieux leur influence. En revanche, les facteurs liés à la technologie du système d'irrigation, aux pratiques d'irrigation (c'est-à-dire la manière dont est utilisée la technologie) et aux pratiques culturales sont autant de leviers à actionner pour réduire les pertes en eau d'irrigation et ainsi améliorer l'efficacité en eau.

Améliorer l'efficacité en eau d'irrigation par les pratiques culturales

Les choix opérés par l'agriculteur en termes de spéculations, de pratiques agricoles ou d'aménagements à l'échelle du paysage ont un impact sur l'efficacité globale de l'eau d'irrigation (Debaeke *et al.*, 2008 ; Salman *et al.*, 2016). La démarche agroécologique, qui adopte des pratiques valorisant les équilibres de la nature et les services qu'elle rend, permet de réduire les intrants, et en particulier l'eau d'irrigation dont l'efficacité est accrue.

Valoriser l'eau de pluie pour réduire la consommation d'eau d'irrigation

Des aménagements paysagers ayant pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et de crue vont permettre de mieux valoriser par l'agriculture les précipitations d'un territoire et de limiter le recours à l'irrigation. Ainsi, la collecte des eaux qui ruissellent sur les surfaces imperméabilisées des routes, l'installation de bandes enherbées, le paillage ou l'incorporation de fumier et compost vont améliorer localement le stockage de l'eau de pluie quand elle est abondante, et la restituer quand elle se raréfie.

Augmenter le volume d'eau disponible dans le sol

L'efficacité de l'utilisation de l'eau est optimale lorsque les besoins en eau du couvert végétal sont, à tout moment, satisfaits par le réservoir facilement utilisable (voir chapitre 4) : c'est souvent le remplissage du réservoir facilement utilisable (RFU) que peut viser l'irrigation. Le remplissage du réservoir utilisable est variable dans le temps : il est alimenté par les apports en eau (précipitations, irrigation, remontée capillaire en provenance de la nappe) et réduit par le ruissellement, le drainage et l'évapotranspiration, et est fonction également de la profondeur et de l'étalement d'enracinement du couvert végétal.

Ainsi, toute pratique agricole visant à réduire le ruissellement ou le drainage (cultures en courbes de niveau, billonnage ou griffage du sol, labour, couverture du sol), à améliorer la capacité au champ des sols (apport de matières organiques) ou l'enracinement du couvert, contribue de fait à augmenter le réservoir utile et son remplissage et à valoriser utilement l'eau disponible pour les plantes.

L'incorporation de matière organique, par exemple avec le recours au bois raméal fragmenté (BRF), broyat de branches d'arbres ou arbustes épandus ou incorporés dans les premiers centimètres, améliore la texture du sol, la teneur en humus et l'activité biologique du sol, avec pour effet une meilleure conservation de l'humidité du sol²⁹. Les pratiques d'agriculture de conservation des sols, basées sur le non-labour, la couverture permanente des sols et les rotations culturales, améliorent l'infiltration de l'eau, réduisent le ruissellement et accroissent la taille du réservoir utile.

Les couverts végétaux sont connus pour réduire le ruissellement et le drainage. Un exemple de suivi de couverts d'hiver (vesce ou orge) en interculture de maïs en Espagne montre une diminution des

²⁹ Pour des exemples concrets, voir les expérimentations dans le Gard (http://www.nord-nature.org/fiches/fiche_j43.pdf).

volumes d'eau drainés sur 3,5 années d'expérimentation (figure 7.6). En cours de culture du couvert d'hiver, le drainage (estimé par modélisation) a été réduit, par rapport à la jachère, de 4 à 51 % avec la vesce et de 26 à 55 % avec l'orge. Ce phénomène a également été observé durant la saison culturale du maïs consécutive au couvert d'hiver : le drainage a été restreint de 0 à 29 % avec la vesce et de 37 à 100 % avec l'orge (Gabriel *et al.*, 2012).

Une vaste étude sur les plantes de couverture, cultivées entre deux saisons de cultures commerciales, montre une réduction du drainage (pluie + irrigation), dans la plupart des cas, de 10 à 40 mm par rapport à un sol nu, ce qui constitue une faible fraction du drainage total en régions humides, mais peut représenter toute l'eau drainée en régions sèches (Meyer *et al.*, 2019).

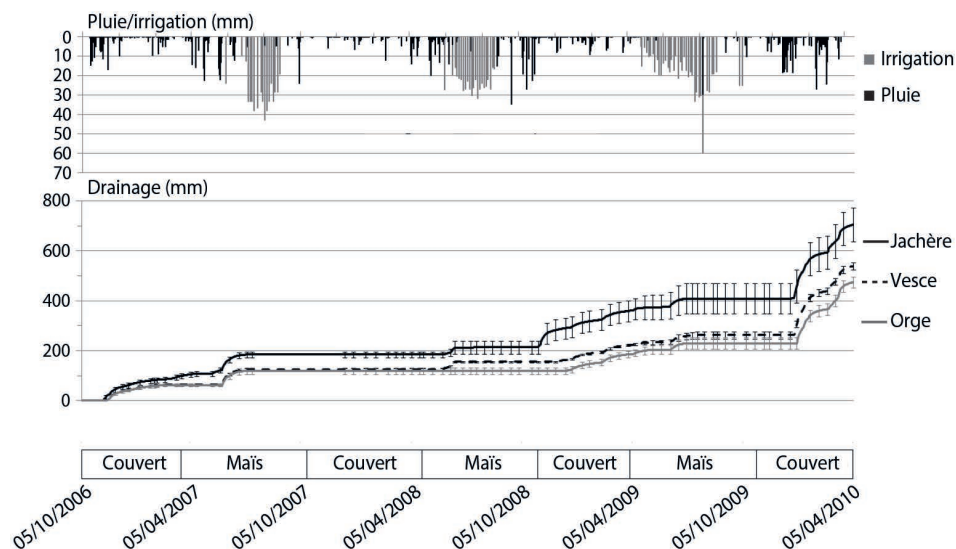


Figure 7.6. Drainage simulé pour la jachère et les couverts intermédiaires de vesce et orge (d'après Gabriel *et al.*, 2012).

Agir sur les plantes cultivées

Le rapport entre la quantité de biomasse produite et la quantité d'eau transpirée (donc l'efficacité de rendement, voir figure 7.2) est fonction de l'espèce cultivée, et par ailleurs inversement proportionnelle à la demande climatique.

Par le choix de plantes intrinsèquement plus efficaces

L'amélioration de l'efficacité de rendement par le couvert est directement liée au choix des espèces et des variétés cultivées : la capacité à produire de la biomasse par unité d'eau transpirée est, génétiquement, très variable. Ainsi, les oléagineuses et légumineuses, du fait des coûts énergétiques (via la transpiration) qu'elles doivent supporter pour la production d'huile pour les premières et la fixation symbiotique de l'azote pour les secondes, ont des efficacités de rendement faibles. De même, les conditions de sécheresse et de chaleur sont favorables aux plantes ayant un métabolisme dit « C4 »

(maïs, sorgho, canne à sucre, etc.) par rapport aux plantes dites « C3 » (riz, blé, légumes, arbres fruitiers, etc.). En effet, à 30 °C, le processus chimique de fixation du CO₂ pour produire les glucides, la photosynthèse, requiert jusqu'à 3 fois plus de molécules d'eau pour les plantes en C3. Les plantes en C4 ont donc une meilleure efficacité physiologique d'utilisation de l'eau et, *in fine*, une meilleure production de biomasse par unité d'eau consommée.

L'évitement est une adaptation de la plante (que des manipulations génétiques peuvent aussi favoriser) qui consiste à moduler la conductance stomatique, la croissance foliaire ou le développement racinaire, et ainsi éviter que la plante ne subisse un stress hydrique. Par exemple, des variétés de tournesol à fermeture stomatique précoce réduisent les pertes en eau par transpiration, et donc le prélèvement de l'eau du sol. L'équilibre est alors à trouver entre le stress hydrique et le stress thermique, car en l'absence de possibilité de transpirer, la feuille ne dissipe plus l'énergie solaire incidente et court le risque de s'échauffer irréversiblement.

Il est à noter que dans un contexte de rareté de la ressource en eau (par exemple, sous l'effet du changement climatique), la substitution de plantes gourmandes en eau par des plantes plus économes en eau (par exemple, le maïs vers le tournesol) répond à une part du problème, hors prise en compte de la rentabilité économique.

Par les modalités d'installation de la culture

L'esquive relève d'une décision de l'agriculteur. Elle consiste à décaler les stades de développement des plantes les plus sensibles au déficit hydrique pour qu'ils ne coïncident plus avec des périodes de déficit en eau, et se réalisent dans des périodes pluvieuses et/ou à demande climatique faible (Normand, 2006). Il s'agit d'esquive simple quand l'un des deux leviers suivants est mobilisé, ou double lorsqu'il y a combinaison, d'une part, de la précocité, par le choix d'une variété ayant un développement plus rapide, mais le rendement maximum atteignable est réduit du fait du rayonnement intercepté plus faible ; et, d'autre part, de la date de semis, qui peut être avancée de quelques jours/semaines pour des cultures de printemps quand il s'agit de variétés résistantes au froid ou lorsque le changement climatique le favorise. Ainsi, le cycle de croissance est certes globalement plus long mais peut se terminer avant les périodes critiques.

La densité de peuplement et la fertilisation azotée ont des incidences sur le rationnement en eau du couvert végétal, mais les effets peuvent être contradictoires. Ainsi, une faible densité de peuplement et une fertilisation azotée limitée restreignent le développement de la surface foliaire et ralentissent la transpiration pendant la phase végétative, et donc *in fine*, maintiennent un meilleur niveau du réservoir utile dans le sol dont le couvert pourra bénéficier ultérieurement. Mais inversement, le développement du couvert peut être recherché pour réduire l'évaporation du sol, et contrôler le développement d'adventices qui entrent en compétition pour l'eau.

L'esquive, l'évitement et l'amélioration de l'efficacité de l'eau sont trois stratégies dites « conservatrices », car elles adoptent un compromis basé sur la réduction du rendement maximum atteignable au profit d'une réduction du risque de perte de rendement.

Les pratiques culturales propices à une meilleure efficacité de l'eau sont répertoriées dans le tableau 7.4 par grands types de stratégies.

Tableau 7.4. Résumé des différentes pratiques culturales permettant d'améliorer l'efficacité en eau de l'irrigation (source : Agrimaroc, 2018).

Stratégies d'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau	Techniques à mettre en œuvre
Utiliser des cultures et des géotypes adaptés	Ajustement du cycle de développement de la culture à la saison pluvieuse (variétés précoces/tardives) Variétés résistantes à la sécheresse Variétés à enracinement dense et profond Variétés à fort indice de récolte
Augmenter la part de la transpiration dans l'évapotranspiration	Réduire l'évaporation du sol par le mulching, le choix de la densité de peuplement et un rapide recouvrement du sol par la culture en début de cycle
Augmenter l'efficacité de la transpiration	Choix des cultures d'automne Choix des cultures efficaces (C4) Choix des cultures à cycle court Semis précoce
Équilibrer l'offre et la demande en eau	Augmenter les disponibilités en eau de la culture par l'irrigation, la collecte et le stockage des eaux de ruissellement, la jachère, l'enracinement, le travail du sol, le contrôle des mauvaises herbes Ajuster le couvert végétal aux disponibilités en eau par le choix de la densité de peuplement, la structure de semis, la réduction du peuplement, le déprimage et les anti-transpirants

Améliorer l'efficacité en eau par le pilotage de la conduite d'irrigation

Le pilotage de l'irrigation consiste à ajuster la fréquence et les quantités selon une stratégie basée soit sur les conditions climatiques combinées au statut hydrique des plantes ou du sol, soit sur des modèles de culture (voir chapitre 1). Ci-après sont détaillés quelques résultats d'amélioration de l'efficacité de l'irrigation par réduction des pertes en eau grâce à ces outils de pilotage.

L'utilisation de capteurs

Les sondes sols (capacitives ou tensiométriques) ainsi que les sondes plantes (dendromètres, capteurs de flux de sève, etc.) permettent le pilotage de l'irrigation en fonction du statut hydrique réel du sol ou des plantes (voir chapitre 1), évitant par conséquent toute sur-irrigation et limitant les pertes par ruissellement, drainage et stock d'eau résiduel dans la zone racinaire après la récolte.

Une étude menée à l'irstea en 2016-2017 a permis de compiler des références d'économies d'eau réalisées à la parcelle par l'adoption d'outils pour le pilotage de l'irrigation (Serra-Wittling et Molle, 2017), en comparaison d'un pilotage sans capteurs (pratiques empiriques traditionnelles, bulletin d'irrigation hebdomadaire, évaluations de l'évapotranspiration maximale). Le tableau 7.5 résume les valeurs d'économies d'eau ainsi réalisées.

Par ailleurs, comme le montre la figure 7.7, la comparaison des résultats d'économies d'eau réalisées ne révèle pas de différence significative entre les deux types de sondes sol (capacitives et tensiométriques). Dans un objectif d'amélioration de l'efficacité, le facteur clé est donc le pilotage de l'irrigation, indépendamment du type de sonde. Cependant, il faut noter que les deux types de sondes ne peuvent pas nécessairement être utilisés dans tous les types de sols. Par exemple, les tensiomètres ne sont pas adaptés aux sols propices aux fentes de retrait ou pierreaux, et l'usage de sondes capacitives peut être problématique dans des sols argileux lourds.

Tableau 7.5. Valeurs d'économies d'eau réalisées par l'utilisation d'un système de pilotage de l'irrigation dans les références collectées, pour les différents types de cultures.

	Tensiomètres	Sondes capacitatives	Tensiomètres + dendromètre
Maïs et autres grandes cultures			
Essais	GGs 16-41 %		
Arboriculture			
Essais		Aspersion 8 % GGs 21 %	
Suivis de pratiques	Aspersion 23 %		Aspersion 52 %
Maraîchage de plein champ			
Essais	Aspersion 35-49 %	Aspersion 36 %	
	GGs 31 %	GGs 65 à 89 %	
	GGs 53-68 %		
	GGE 25 %		

GGs : goutte-à-goutte de surface ; GGE : goutte-à-goutte enterré. Les références bibliographiques détaillées pour chaque essai/suivi de pratiques sont consultables dans le rapport de Serra-Wittling et Molle (2017).

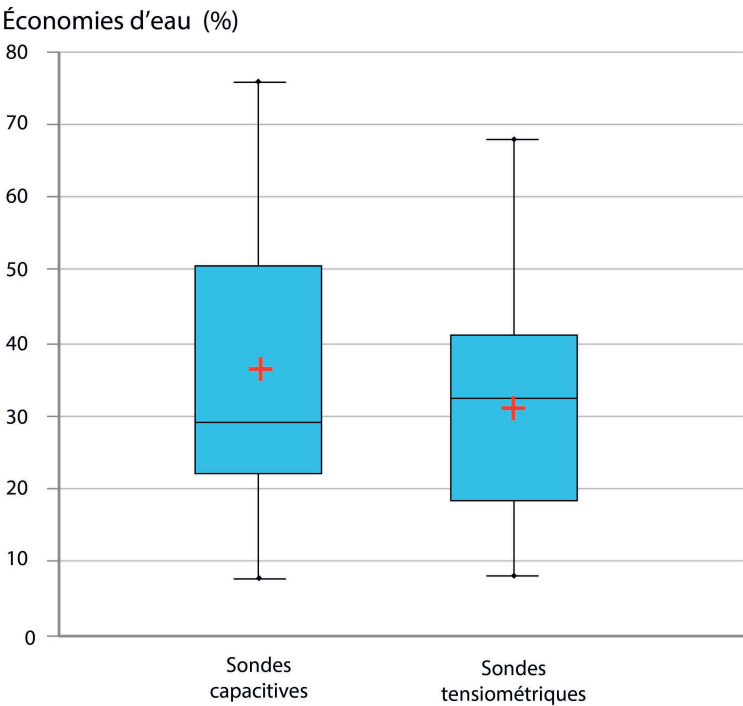


Figure 7.7. Économies d'eau réalisées avec l'utilisation de sondes capacitatives ou tensiométriques pour le pilotage de l'irrigation.

L'utilisation de modèles et outils d'aide à la décision

Les paragraphes précédents définissent l'efficacité de l'irrigation comme le ratio entre la quantité d'eau d'irrigation finalement transpirée par la culture et la quantité d'eau d'irrigation initialement prélevée (efficacité totale) ou la quantité d'eau amenée à l'entrée de la parcelle (efficacité globale).

Les pertes sont nombreuses lors de l'acheminement de l'eau « du canal à la racine » (voir section « Nature des pertes d'eau d'irrigation », p. 291) : fuites régulières ou occasionnelles lors du transport, de la distribution ou de l'application à la parcelle, dérive liée au vent, évaporation lors de l'aspersion, ruissellement de surface ou drainage de l'eau d'irrigation hors du profil racinaire, évapotranspiration des adventices et remplissage excessif du sol par l'irrigation, évaporation de l'eau d'irrigation parvenue au sol.

Toutes ces pertes sont quantifiables, plus ou moins directement, par la modélisation (par exemple *via* une formulation *ad hoc* du modèle Optirrig, Cheviron *et al.*, 2020), mais aussi *via* une série de mesures dédiées à la quantification des pertes mentionnées ci-dessus. Ceci rend possible la construction de procédures d'optimisation de l'irrigation spécifiquement axées sur son efficacité, avec la possibilité de les évaluer au champ. Plus généralement, ces développements méthodologiques et informatiques, couplés avec les bonnes pratiques en matière de métrologie des flux, donnent la possibilité d'évaluer quantitativement l'efficacité de n'importe quelle stratégie d'irrigation, donc de comparer les stratégies entre elles et, au-delà, d'aller du constat aux préconisations.

Il faut toutefois garder en tête deux arguments, l'un de nature tactique, l'autre de nature physique, qui questionnent la mise en place d'une optimisation de l'irrigation dont l'efficacité serait la variable clé.

- L'argument tactique est que le maximum de l'efficacité de l'irrigation ne correspond pas, *a priori*, au maximum du rendement agricole ou au maximum de la rentabilité financière : la recherche de ce maximum d'efficacité est donc difficile à promouvoir en tant que telle, sauf si la réalisation de stratégies efficaces était accompagnée d'un coup de pouce.

La figure 7.8 illustre ceci, en positionnant la variable d'efficacité (EI) parmi les variables d'intérêt habituelles du problème d'optimisation de l'irrigation, le rendement agricole (Y), le rendement financier (F) et le cumul d'irrigation sur la saison (ΣI).

C'est la courbe de productivité $Y(\Sigma I)$ qui fournit la base de l'analyse. Pour une stratégie donnée, c'est-à-dire un ensemble de règles de décision d'irrigation, la courbe de productivité atteint un maximum, puis décroît légèrement. La position de ce maximum permet d'identifier les situations d'irrigation déficitaire ou excessive, dans lesquelles apporter plus d'irrigation n'a plus d'effet bénéfique sur le rendement, au contraire : risque de stress par anoxie, ou développement trop superficiel des racines, l'eau étant toujours disponible en surface, donc fragilité des plants. *A contrario*, en irrigation déficitaire, apporter plus d'irrigation sur la saison est *a priori* profitable, sauf si la stratégie d'irrigation est mal pensée. C'est précisément dans les cas d'irrigation déficitaire, en présence de quotas plus ou moins sévères, que l'optimisation des stratégies d'irrigation offre le plus d'intérêt, par exemple pour obtenir de meilleurs rendements avec autant d'irrigation, ou les mêmes rendements avec moins d'irrigation, voire concilier les deux objectifs.

Le rendement financier F est très corrélé au rendement agricole Y, à travers le prix de vente de la culture, et parce que les coûts variables (eau, énergie) liés à l'irrigation sont d'importance secondaire, sans être négligeables, de même que les coûts fixes le plus souvent. Le bénéfice financier maximal (F max) est en général obtenu pour un rendement légèrement inférieur au rendement maximal, car ce

dernier nécessite une irrigation plus conséquente (ΣI pour $Y_{\max} > \Sigma I$ pour F_{\max}). Réciproquement, $F(Y_{\max}) < F_{\max}$, et le bénéfice financier associé au rendement maximal est légèrement inférieur au bénéfice maximal.

L'efficacité de l'irrigation (ratio entre l'irrigation transpirée et l'irrigation apportée) n'est pas définie en l'absence d'irrigation, c'est-à-dire pour des cumuls $\Sigma I = 0$ tout à gauche du graphique de la figure 7.8. Pour les très faibles cumuls d'irrigation, une large gamme de valeurs de l'efficacité est possible, avec deux extrêmes : soit le volume d'eau apporté était absolument nécessaire et l'a été au bon moment, il est alors quasi intégralement utilisé par la culture et EI est maximale, soit ce faible volume n'est pas apporté judicieusement (exemple : trop peu, trop tard) et n'est pas utilisable par la plante (EI minimale).

Plus généralement, le maximum de l'efficacité survient pour des cumuls d'irrigation bien inférieurs à ceux nécessaires pour les maxima de F et de Y . En conséquence, le rendement financier tiré d'une irrigation d'efficacité maximale, $F(EI_{\max})$, est assez largement inférieur à F_{\max} et $F(Y_{\max})$, sauf à envisager une récompense financière $R(EI)$ pour les stratégies d'irrigation efficaces, avec un nouveau calcul du rendement financier, $F(EI)$, au bas de la figure 7.8.

L'idée serait d'encourager ces stratégies efficaces au motif qu'elles sont vertueuses : elles permettent une production agricole tout de même importante, avec un bon usage de la ressource (peu de pertes). La recherche des stratégies d'irrigation les plus efficaces prend alors tout son sens, *via* modélisation et optimisation.

- Le second argument à surmonter est de nature physique : en essayant d'optimiser l'irrigation, on n'agit jamais que sur l'un des cinq forçages du système, les quatre autres étant des forçages naturels (température, rayonnement, évapotranspiration potentielle, pluie). Tous conditionnent la croissance des cultures, même si, dans bien des cas, la quantité d'eau disponible est le déterminant le plus puissant et le plus naturellement variable de cette croissance. Tout de même, la tentative d'optimisation ne sera potentiellement efficace que si *ce qu'on choisit* (règles de décision, stratégie d'irrigation) prévaut sur *ce qu'on subit* (climat, restrictions, quota, contraintes d'utilisation de la ressource). C'est une autre lecture de la figure 7.8 : si les contraintes sont trop fortes, l'optimisation est vaine. Si les contraintes n'existent pas, l'optimisation est sans objet. De nouveau, ce sont les situations intermédiaires, faiblement à modérément déficitaires, qui se prêtent le mieux à l'optimisation et à l'aide à la décision.

L'effort peut porter sur l'identification des stratégies d'irrigation les plus efficaces, sans doute à condition qu'elles soient récompensables, mais se donner l'efficacité comme variable d'intérêt a des implications en termes de modélisation. Le simple fait de définir l'efficacité de l'irrigation comme le ratio de l'irrigation transpirée sur l'irrigation totale implique de savoir « séparer » transpiration due à l'eau de pluie et transpiration due à l'irrigation. Comme cette variable est calculée « en bout de chaîne », cette partition en composantes P (pluie) et I (irrigation) doit être effectuée pour toutes les variables en amont : réserve du sol, drainage et évaporation. Bien sûr, ce distinguo entre composantes P et I est fictif (à moins d'exploiter les signatures isotopiques distinctes) et on se contente d'attribuer les composantes P et I en fonction des volumes respectifs amenés par la pluie et l'irrigation.

Pour que cette approche fonctionne, il faut quelques hypothèses sur les flux hydriques et les processus associés : voici celles qui ont été choisies, et implémentées dans le module Efficacité du modèle Optirrig.

H1. À la date du semis, toute l'eau présente dans le sol est due à la pluie. Ceci convient *a minima* pour les cultures d'été, dans la plupart des climats.

H2. La réserve du sol est mise à jour au prorata des contributions de la pluie et de l'irrigation. Par exemple, pour un sol dont le réservoir utile est de 200 mm, qui contient 150 mm d'eau de pluie et reçoit une irrigation de 30 mm, la partition est triviale.

H3. Le drainage est également mis à jour au prorata des contributions : le même sol qui contiendrait 190 mm d'eau de pluie et recevrait une irrigation de 30 mm devrait contenir au total 220 mm et donnerait en fait lieu à 20 mm de drainage. Une supposition possible est que la proportion d'eau de pluie dans la réserve totale soit la même que dans le drainage, c'est-à-dire 173 mm dans la réserve et 17,3 mm dans le drainage. Le fondement de cette approche est de supposer un mélange complet de l'eau de pluie et de l'eau d'irrigation au pas de fonctionnement du modèle, et de ne pas décrire d'effet de chasse, hypothèses très vraisemblables pour les teneurs en eau usuelles (Cheviron *et al.*, 2020).

H4. La transpiration et l'évaporation se font au prorata des composantes P (eau de pluie) et I (eau d'irrigation) des horizons de sol mobilisables pour ces processus. Ainsi, si la transpiration du jour est de 5 mm et que la réserve racinaire est composée à 80 % d'eau de pluie, la transpiration d'eau de pluie sera de 80 % de 5 mm, c'est-à-dire 4 mm.

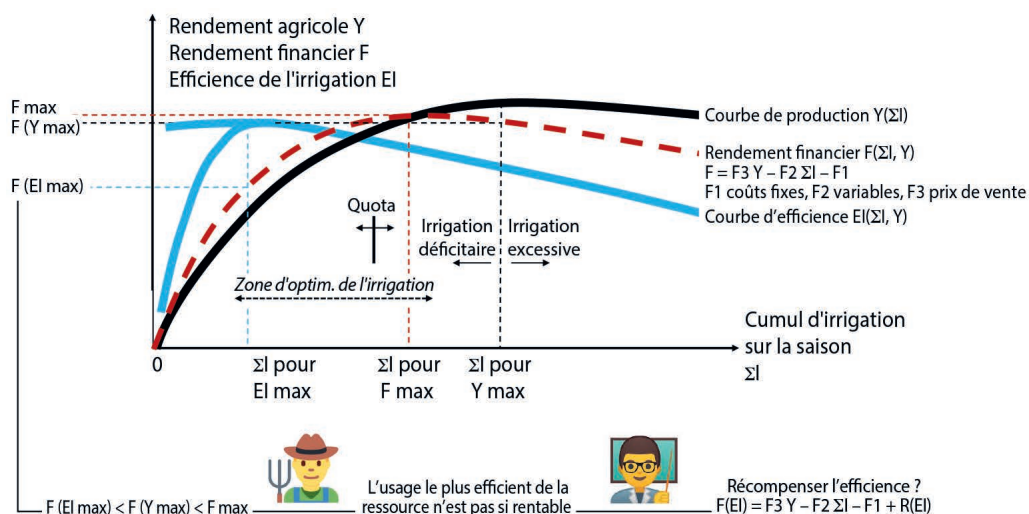


Figure 7.8. Les principales variables du problème d'optimisation de l'irrigation, axé sur la recherche et la récompense des stratégies les plus efficaces.

La figure 7.9 illustre l'évolution des composantes I (irrigation) et P (pluie) de la réserve du sol, pour un niveau initial donné, et un calendrier des irrigations (histogramme violet) et des pluies (histogramme rose) indiqué sur l'axe des abscisses (figure 7.9a). L'évolution du niveau total de remplissage de la réserve permet le calcul du développement de la plante (indice foliaire, création de biomasse par photosynthèse, non représentés ici), qui en retour conditionne le prélèvement d'eau par les racines, avec une influence plus ou moins directe sur la dynamique des termes de drainage, de stockage, d'évaporation et de transpiration d'eau d'irrigation. Ces quantités sont représentées dans la figure 7.9b, qui inclut également une hypothèse de pertes amont dans un ordre de grandeur vraisemblable, afin de donner une indication sur l'importance relative des différents termes. L'efficacité de l'irrigation de 0,52 est un assez bon score.

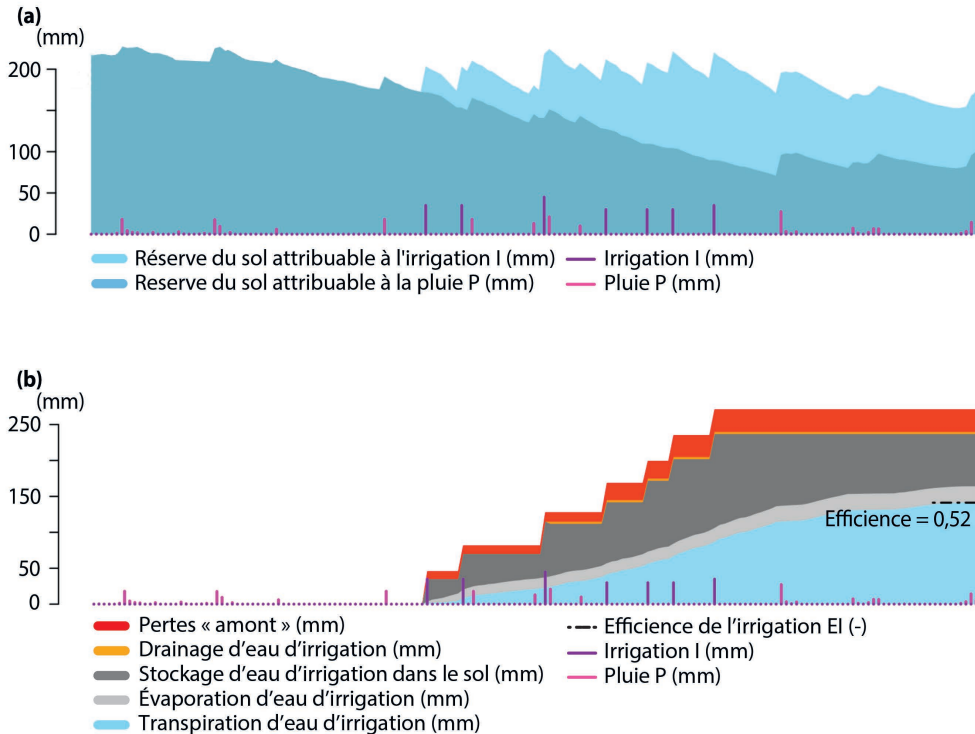


Figure 7.9. Principe de représentation du remplissage de la réserve du sol par l'irrigation et la pluie (a) et de la dynamique des principales variables liées à l'irrigation (b) au cours d'une saison d'irrigation.

Pour incarner un peu plus l'approche de modélisation sous l'angle de l'efficacité, à travers un second exemple, une possibilité est de représenter quelques stratégies d'irrigation bien différentes (pour du maïs, avec les données climatiques de 2015 sur le site expérimental de Lavalette, Montpellier), puis de détailler les calculs d'efficacité qui leur sont associés.

Pour ce faire, la figure 7.10 compare la gestion de l'irrigation pour les quatre familles de stratégies d'irrigation détaillées ci-dessous.

1. « Pluvial » : on n'irrigue pas et on compte sur les pluies.
2. « Tour d'eau » : on apporte 15 mm tous les 6 jours au début de la saison culturale, puis 30 mm tous les 6 jours. On se donne une règle supplémentaire, une règle de report : si une pluie de plus de 10 mm tombe dans l'intervalle, on décale l'irrigation de 1 jour par tranche de 5 mm au-dessus de ce seuil de 10 mm. Par exemple, s'il pleut 40 mm 2 jours après un tour d'eau, on est 30 mm au-dessus du seuil de 10 mm, soit 6 tranches de 5 mm, donc on décale le tour d'eau suivant de 6 jours.
3. « Capteur » : on décide des irrigations en fonction du niveau d'épuisement de la réserve du sol, dès qu'un seuil de déclenchement est franchi (analogue à l'utilisation d'un ou plusieurs tensiomètres), et on apporte alors 30 mm.

4. « Capteur + modèle » : on garde le fonctionnement précédent mais on lui adjoint une confiance dans les prévisions météorologiques à 4 jours, qui permet de se passer de certaines irrigations « si le modèle considère qu'il ne sera pas préjudiciable » d'attendre la pluie prévue prochainement.

La figure 7.10a montre des caractéristiques très méditerranéennes : des épisodes pluvieux peu nombreux mais conséquents, une absence quasi totale de pluie entre le semis et mi-juin, puis de mi-juin à mi-août jusqu'à « l'orage du 15 août ».

La figure 7.10b illustre essentiellement les différences entre stratégies d'irrigation pour les périodes sèches mentionnées ci-dessus, ce qui conduit à des cumuls assez différents (380 mm pour la stratégie « Tour d'eau » qui est un cumul très élevé, 300 mm pour la stratégie « Capteur » qui est un cumul élevé, et 240 mm pour la stratégie « Capteur + modèle » qui est un cumul plus habituel).

La figure 7.10c montre les effets des différentes stratégies sur le remplissage de la réserve racinaire. Les pics successifs de la courbe en noir, désignés par le point A, indiquent que la stratégie « Tour d'eau » est la seule dans laquelle des irrigations ont lieu entre le semis et début juin. Le point B désigne la dernière irrigation de 15 mm de la stratégie « Tour d'eau » et la première de 30 mm de la stratégie « Capteur », irrigation qui est économisée dans la stratégie « Capteur + modèle » (ce qui sera aussi le cas de la dernière irrigation juste avant la pluie du 13 août). Pour la période sous le point C, l'irrigation au « Tour d'eau » choisie (30 mm tous les 6 jours) conduit tout de même à une baisse progressive de la réserve, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres stratégies. Enfin, au voisinage du point D, l'allure des courbes est très différente entre la stratégie pluviale et les trois autres : la consommation d'eau par la plante est très faible dans le cas pluvial, car la plante est bien moins développée.

En guise de conclusion, le tableau 7.6 propose une vue d'ensemble des principales variables d'intérêt, introduites figures 7.8 et 7.9 et calculées pour les stratégies d'irrigation représentées figure 7.10, ainsi que pour une stratégie fictive mais vraisemblable d'irrigation déficitaire, que le lecteur attentif pourra positionner sur la figure 7.8.

Tableau 7.6. Vue d'ensemble des variables d'intérêt pour les différentes stratégies d'irrigation de la figure 7.10, auxquelles a été rajoutée une stratégie fictive (mais vraisemblable) d'irrigation déficitaire.

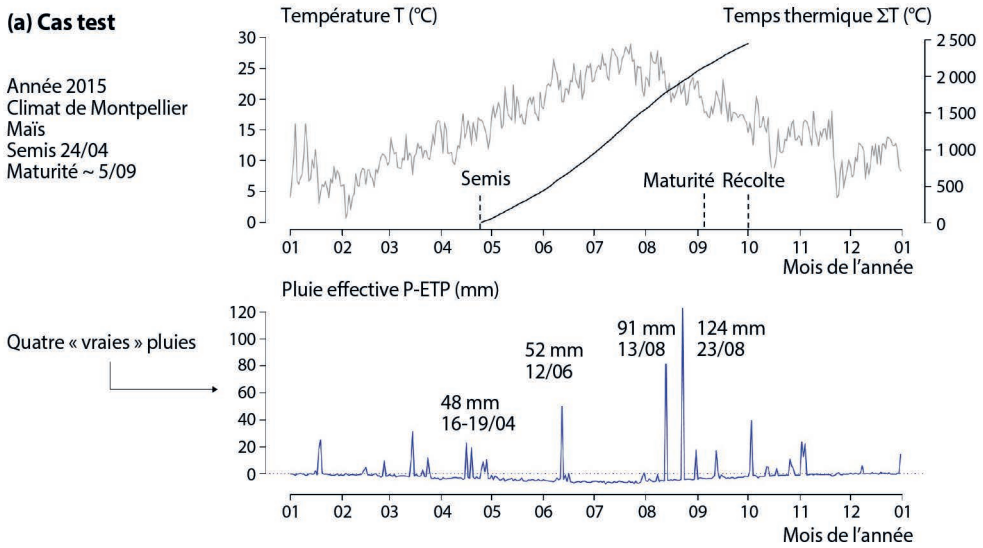
Stratégies	ΣI (mm)	Y (t/ha)	F (k€/ha)	$\Sigma I^{(1)}$	$R(EI)$ (k€/ha)	$F(EI)$ (k€/ha)
Pluvial	0	4,0	0,90	0,95	0,45	1,35
Fictive	150	10	1,20	0,85	0,35	1,55
Capteur + modèle	240	15,8	1,93	0,72	0,22	2,15
Capteur	280	16,0	1,50	0,73	0,23	1,73
Tour d'eau	380	15,9	0,84	0,54	0,04	0,88

⁽¹⁾ Valeur attribuée par défaut, EI n'étant pas calculable en l'absence d'irrigation, dans l'idée de récompenser la stratégie pluviale avec la même logique que les autres stratégies.

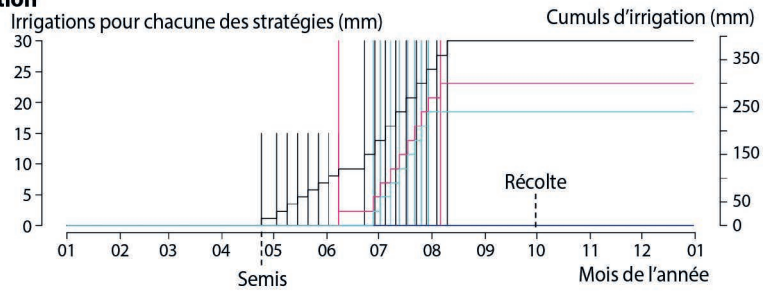
ΣI représente le cumul d'irrigation sur une saison, Y le rendement agricole, EI l'efficience de l'irrigation, F le rendement financier (calculé par $F = F_3Y - F_2 \Sigma I - F_1$, avec des coûts fixes $F_1 = 0,1$ k€/ha, des coûts variables $F_2 = 0,08$ €/m³, et un prix de vente de la culture $F_3 = 0,25$ k€/t¹), $R(EI)$ la récompense financière de l'efficience de l'irrigation, avec pour l'exemple $R(EI) = EI - 0,5$ k€/ha, et $F(EI) = F + R(EI)$.

(a) Cas test

Année 2015
Climat de Montpellier
Maïs
Semis 24/04
Maturité ~ 5/09

**(b) Stratégies d'irrigation**

1. Pluvial
2. Tour d'eau
3. Capteur
4. Capteur + modèle

**(c) Réserve racinaire**

1. Pluvial
2. Tour d'eau
3. Capteur
4. Capteur + modèle

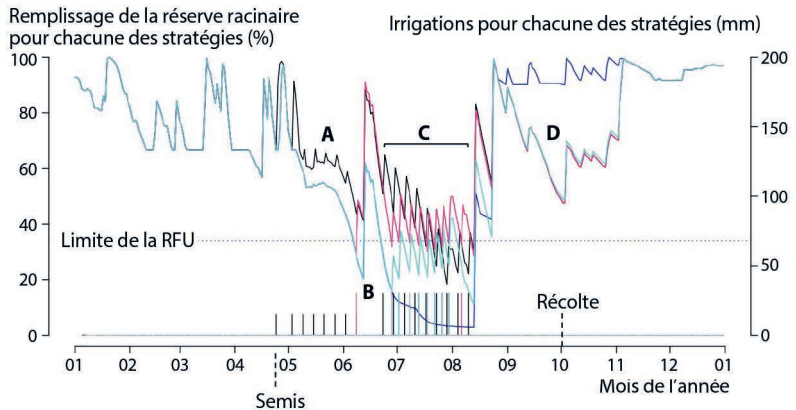


Figure 7.10. Tests réalisés avec le modèle Optirrig pour une culture de maïs, conduite en 2015 avec le climat de Montpellier, reprenant les principales caractéristiques climatiques (température, temps thermique et pluie effective) (a), les stratégies d'irrigation simulées et les cumuls correspondants (b) ainsi que leurs effets sur le remplissage de la réserve racinaire du sol (c). Les points A à D sont détaillés dans le texte.

À travers ce tableau, la finalité de ce chapitre est d'ouvrir la voie à un usage pratique du concept d'efficacité de l'irrigation, avec d'abord l'usage de la modélisation pour optimiser l'efficacité de l'irrigation, et ensuite l'identification d'une juste récompense financière pour les stratégies les plus efficaces :

- la modélisation la plus à même de parvenir à l'optimisation de l'efficacité de l'irrigation est certainement celle qui s'appuie à la fois sur un modèle hydro-agronomique éprouvé, sur la connaissance des techniques mathématiques d'optimisation, et sur la capacité à intégrer des données observées (mesures des flux hydriques *in situ* ou de l'indice foliaire des cultures par télédétection), dans un fonctionnement en temps réel capable de plus d'intégrer les prédictions climatiques sur le court terme pour la prise de décision ;

- le dimensionnement correct des récompenses financières associées à l'efficacité de l'irrigation est du ressort des économistes, des gestionnaires de la ressource et des politiques publiques, à travers un calcul qui s'effectue plus à l'échelle du territoire qu'à celle de la parcelle agricole. Comme souvent, cet *upscaling* spatial s'accompagne d'un élargissement thématique et disciplinaire, avec une connexion vers une question sociétale plus vaste – la mise en œuvre d'un paiement pour service environnemental pour inciter à des stratégies d'irrigation passées dans la doctrine et identifiées comme cœur de cible. Ces stratégies d'irrigation, efficaces et déficitaires, seraient *a minima* rendues viables pour les agriculteurs, voire deviendraient les plus rentables, tout en garantissant un niveau suffisant de production agricole.

Réduire les pertes par le matériel d'irrigation

La station de pompage et le réseau de transport

C'est une démarche commune aux installations individuelles et collectives, qui prend en compte l'efficacité de transport, depuis la station de mise sous pression jusqu'à la borne ou le compteur d'irrigation en tête de la parcelle, *via* le réseau de transport.

Le rendement primaire

Il est possible de réaliser un diagnostic sur un réseau afin d'en calculer l'efficacité globale. La première approche consiste à calculer le rendement primaire du réseau. À l'échelle du réseau, on définit le rendement primaire comme le rapport entre la somme des volumes prélevés sur les compteurs individuels ou en tête du matériel d'application et le volume mesuré à la station de pompage. Cet indicateur intègre à la fois les pertes sur le réseau, la qualité du suivi des relevés et la précision des compteurs individuels (5 à 7 % en eau brute). Sa valeur varie entre 70 et 95 % (valeur moyenne des réseaux réferents CACG : 95 %). Cet indicateur permet à l'irrigant ou au collectif d'améliorer la gestion interne de l'eau, mais il ne reflète pas forcément le niveau de pertes sur le réseau.

Rappel des principes de calcul. Les définitions suivantes proviennent des services d'Alimentation en eau potable (AEP)³⁰ :

- volume mis en distribution : volume issu de l'ouvrage de production qui est introduit à l'entrée du réseau de distribution ;
- volume comptabilisé : volume desservi chez l'abonné. Il est calculé par les appareils de comptage des abonnés ;

³⁰ Source : SAGE Gironde, version validée par la CLE du 28 juin 2004 : rendement des réseaux d'eau potable.

- volume non comptabilisé = volume mis en distribution – volume comptabilisé :
 - volume non comptabilisé de défense incendie : l'eau utilisée pour la défense contre les incendies,
 - volume non comptabilisé d'exploitation : l'eau utilisée pour le bon fonctionnement du réseau et de la station,
 - pertes : l'eau qui n'est pas consommée et qui est « perdue dans la nature », issue de diverses fuites,
 - aucun moyen de comptage ne permet de connaître exactement les volumes non comptabilisés. C'est pourquoi ceux-ci sont estimés.

La notion de rendement primaire est un des paramètres de mesure de l'efficacité d'un réseau d'irrigation.

Le rendement primaire est simple à calculer, et prend en compte la somme des consommations comptabilisées (et non estimées) pour les comparer à celles du volume mis en distribution.

Sa formule est la suivante :

$$\text{Rendement primaire} = \frac{\text{Volume comptabilisé } (\Sigma \text{ des compteurs individuels})}{\text{Volume mis en distribution}} \times 100$$

Lorsque l'on veut également prendre en compte des volumes non comptabilisés, le rendement net est préféré au rendement primaire car il considère tous les usages de l'eau.

Le rendement net est donné par la formule suivante :

$$\text{Rendement net} = \frac{\begin{array}{l} \text{Volume comptabilisé } (\Sigma \text{ des compteurs individuels}) \\ + \quad \text{Volume non comptabilisé de collectif public} \\ + \quad \text{Volume non comptabilisé de défense incendie} \\ + \quad \text{Volume non comptabilisé d'exploitation} \end{array}}{\text{Volume mis en distribution}} \times 100$$

Comme le montre la formule ci-dessus, certains termes font l'objet d'estimations pouvant accroître artificiellement le rendement net obtenu.

En pratique, ce type de rendement est utilisé pour les réseaux d'eau potable où les volumes dédiés à l'exploitation du réseau, à la défense incendie ou aux besoins des collectivités publiques peuvent représenter des volumes conséquents.

En matière de réseau d'irrigation, les cas où le réseau collectif dessert également des bornes incendie ou des collectivités (volumes non comptabilisés) se développent mais restent encore rares.

Le calcul du rendement net ne contribuerait qu'à rajouter, au numérateur, le volume estimé dédié à l'exploitation du réseau (purges, vidanges, etc.), et ainsi à améliorer la valeur du rendement obtenu. C'est pourquoi on utilise de façon usuelle le rendement primaire.

Un exemple de comparaison entre le rendement primaire mesuré sur une ASA du sud-ouest de la France (Gers) et celui des réseaux de référence suivis par la CACG est présenté figure 7.11. Le gain de 25 % d'économie d'eau entre 2006 et 2010 relève de trois décisions de l'ASA : le remplacement des compteurs individuels, la mise en œuvre d'un suivi régulier des relevés (avec correctifs si besoin), la mise en place d'un débitmètre en tête du réseau collectif.

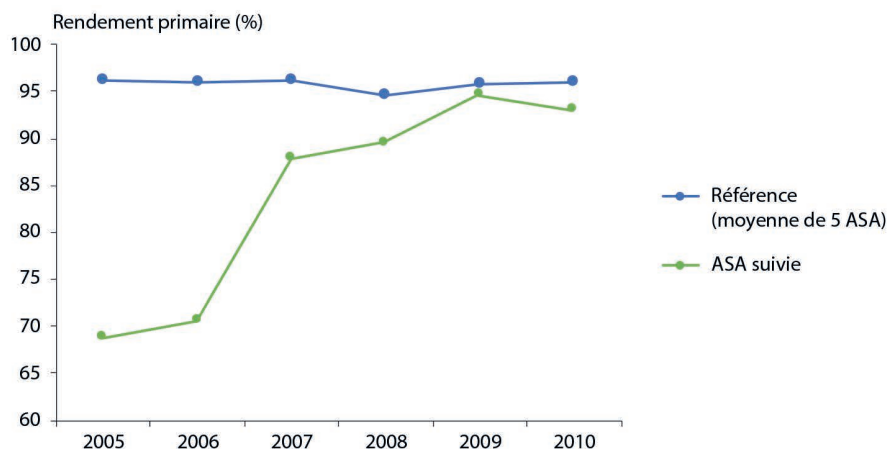


Figure 7.11. Rendements primaires du réseau d'une ASA suivie de 2005 à 2010 comparés à celui des réseaux de référence suivis par la CACG.

Les pertes en eau et le test réseau fermé

Le rendement primaire prend en compte les imprécisions de comptage sur le réseau de distribution, mais aussi les pertes en eau en amont des compteurs de répartition. Pour estimer ces pertes, on fait appel au test dit « réseau fermé ».

Mais avant d'y venir, rappelons les trois catégories de pertes que l'on peut recenser en fonction de leur nature sur un réseau d'amenée ou de transport en irrigation (voir section « Fuites dans le réseau d'amenée (individuel ou collectif) », p. 291) :

- les pertes liées à l'exploitation du réseau ;
- les pertes liées à la protection du réseau ;
- les pertes liées aux fuites.

Ces dernières sont plus ou moins facilement décelables en fonction de leurs causes (rupture de conduites, fermeture de vannes non étanches, etc.) et de leurs positions sur le réseau de canalisations.

Parmi elles, on différencie :

- les fuites accidentelles et donc ponctuelles ;
- les fuites répétées.

Il est important de faire le distinguo entre les types de pertes possibles, puisque cela fait apparaître le caractère inévitable de certaines d'entre elles. Elles n'en sont pas moins optimisables par un réglage approprié des appareils de régulation et de protection du réseau.

Dans le but de quantifier les pertes répétées, un test de mise en pression réseau fermé peut être mis en œuvre. Il permet de distinguer les pertes réelles des imprécisions de comptages. Lors d'un tel test, les appareillages de protection du réseau sont sollicités et génèrent des pertes qui sont donc comptabilisées dans le même temps.

Principe du test réseau fermé. Ce test consiste à mettre le réseau sous pression, bornes fermées. Le réseau doit, dans les conditions idéales, pouvoir maintenir une pression fixe. Si la pression chute, l'automatisme de la station déclenche un démarrage jusqu'à ce que la pression de consigne soit de nouveau atteinte. Le volume nécessaire pour remettre le réseau à la pression de consigne est alors relevé et ramené à l'intervalle de temps entre le début du test et l'enclenchement du groupe.

Ce test peut se réaliser grâce à deux moyens distincts :

- soit lors d'un test terrain avec présence humaine sur la station de pompage hors période d'irrigation ;
- soit avec des données de débits, pressions et volumes télétransmises si la station de pompage possède un équipement de télétransmission.

Dans le cadre du projet régional Casdar Eau Midi-Pyrénées (Deumier *et al.*, 2011), le test du réseau fermé a été mis en œuvre sur trois associations syndicales autorisées du sud-ouest de la France (ASA Saurdrune, Haute-Garonne ; ASA la Baysolle, Gers ; et ASA Sauveterre, Hautes-Pyrénées). Sur les trois réseaux étudiés, elles se situent entre 1 et 3 % du volume distribué pendant la campagne d'irrigation, ce qui est faible. Les pertes réelles dépendent de la longueur du réseau et de la durée de fonctionnement.

Il est difficile de qualifier les résultats bruts obtenus, puisque ces derniers ne prennent pas en compte la structure du réseau de distribution et le temps de fonctionnement des stations. C'est pourquoi nous allons nous intéresser au calcul de l'indice linéaire de pertes, en rappelant au préalable sa méthodologie.

Indice linéaire de pertes (ILP). Le *Journal officiel de la République française* du 4 mai 2007 donne la définition de l'indice linéaire de pertes suivante : « L'indice linéaire de pertes en réseau est égal au volume perdu dans les réseaux par jour et par kilomètre de réseau (hors linéaires de branchements). Cette perte est calculée par différence entre le volume mis en distribution et le volume consommé. Il est exprimé en m³/km/jour. »

$$\text{ILP} = \frac{\text{Volume non comptabilisé}}{\text{Linéaire réseau} \times 365}$$

Pour des raisons évidentes, dans le cas des réseaux d'eau potable, un test « réseau fermé » ne peut pas être réalisé, c'est pourquoi le « volume perdu » ne peut être que calculé par différence entre le volume mis en distribution et le volume consommé autorisé. En revanche, en irrigation, la possibilité de réaliser un tel test permet alors d'évaluer le « volume perdu » de façon plus précise par le calcul suivant :

Volume perdu (m³) = débit de fuite (m³/h) × temps de fonctionnement de la station Tf (h)

C'est pourquoi, pour le calcul de l'ILP, nous utiliserons le résultat issu du test « réseau fermé » plutôt que la méthode précédente. Ainsi nous pouvons appliquer la formule suivante :

$$\text{ILP} = \frac{\text{Volume perdu (m}^3\text{)}}{\text{Linéaire réseau (km)} \times \text{Tf (j)}}$$

Afin de comparer les réseaux entre eux, il est indispensable de pouvoir les caractériser. Cette démarche est d'autant plus indispensable en réseau d'eau potable, où les configurations varient beaucoup d'un réseau à un autre, mais elle reste nécessaire en réseau d'irrigation (ne serait-ce qu'à titre comparatif avec les réseaux d'eau potable).

Parmi les critères servant à caractériser un réseau, on peut citer :

- le linéaire du réseau (L) (hors linéaire après la borne) ;
- le nombre d'abonnés (N) (dans le cas de l'irrigation, on considérera le nombre de bornes) ;
- la densité (D), facteur immédiatement déduit des 2 précédents en faisant le rapport N/L et qui donne le nombre de bornes par kilomètre de réseau ;

– l'indice linéaire de consommation (ILC), exprimé $\text{m}^3/\text{km}/\text{jour}$, et qui donne le volume journalier consommé comptabilisé par kilomètre de réseau. Dans le cas de réseaux d'irrigation, cet indice est calculé ainsi :

$$\text{ILC} = \frac{\text{Volume mis en distribution (m}^3\text{)}}{\text{Linéaire réseau (km)} \times \text{Tf (j)}}$$

En irrigation, il n'existe aucun référentiel qui permette de juger des performances d'un réseau à partir de l'indice linéaire de pertes. En revanche, dans le cas de réseaux d'eau potable, il en existe plusieurs mais aucun n'est communément admis. Parmi eux, on peut citer le référentiel de l'Agence de l'eau Adour-Garonne, celui du laboratoire Gestion de l'eau et de l'assainissement (2006) ou encore ceux des distributeurs tels que Véolia, Saur, Lyonnaise des eaux.

Certains prennent en compte la comparaison de l'ILP avec la densité de bornes (en distinguant milieu rural, intermédiaire et urbain), d'autres avec l'ILC (en distinguant milieu rural, intermédiaire et urbain).

Exemple d'efficience en réseau collectif d'irrigation

Depuis 2011, la CACG, dans le cadre des études d'audit-diagnostic menées en relation avec l'AEAG, a mis au point un référentiel Irrigation en adaptant les référentiels existants à la particularité de l'irrigation. On a ainsi retenu un comparatif de l'ILP et de l'ILC, cette dernière norme étant la plus représentative des réseaux d'irrigation (dans sa configuration urbaine).

La campagne de mesures menée par la CACG pour les tests « réseau fermé », dans le cadre des études d'audit-diagnostic, concerne les périmètres en ASA présentés dans le tableau 7.7.

Tableau 7.7. Principales caractéristiques des ASA diagnostiquées.

ASA	Codification	Linéaire (km)	Consommation moyenne (2005 à 2009)	Nombre jours fonctionnement moyen	ILP ($\text{m}^3/\text{j}/\text{km}$)	ILC ($\text{m}^3/\text{j}/\text{km}$)	Performance
ASA n° 1 (31)	C	40,1	1 581 990	83	14,53	475,31	Médiocre
ASA n° 2 (47)	2M	6,8	187 279	89	44,12	309,45	Mauvais
ASA n° 3 (32) 2009	P (2009)	26,8	652 508	93	8,96	261,80	Acceptable
ASA n° 4 (47)	Mo	30,4	729 783	117	4,43	205,18	Bon
ASA n° 5 (47)	N	14,0	352 000	87	7,61	287,58	Acceptable
ASA n° 6 (32)	Mi	29,4	437 058	86	2,90	172,55	Bon
ASA n° 3 (32) 2010	P (2010)	26,8	652 508	66	3,14	368,90	Bon
ASA n° 7 (82)	T	18,2	388 425	73	3,96	291,32	Bon
ASA n° 8 (65)	B	29,3	859 454	90	2,46	325,92	Bon
ASA n° 9 (65)	S	4,2	204 587	70	8,57	695,87	Acceptable

Les performances des réseaux d'irrigation référents ont été positionnées sur le graphique référentiel adapté par la CACG afin de visualiser plus facilement et à titre de comparaison (figure 7.12).

Les deux réseaux référents modernisés et économes en énergie le sont aussi en termes d'économie d'eau. Leurs performances sont jugées bonnes selon les indicateurs d'eau potable adaptés pour l'irrigation (ILP inférieure à $7 \text{ m}^3/\text{km}/\text{j}$). *A contrario*, le réseau de l'ASA n° 2 apparaît comme mauvais, car son ILP est bien supérieure à $15 \text{ m}^3/\text{km}/\text{j}$.

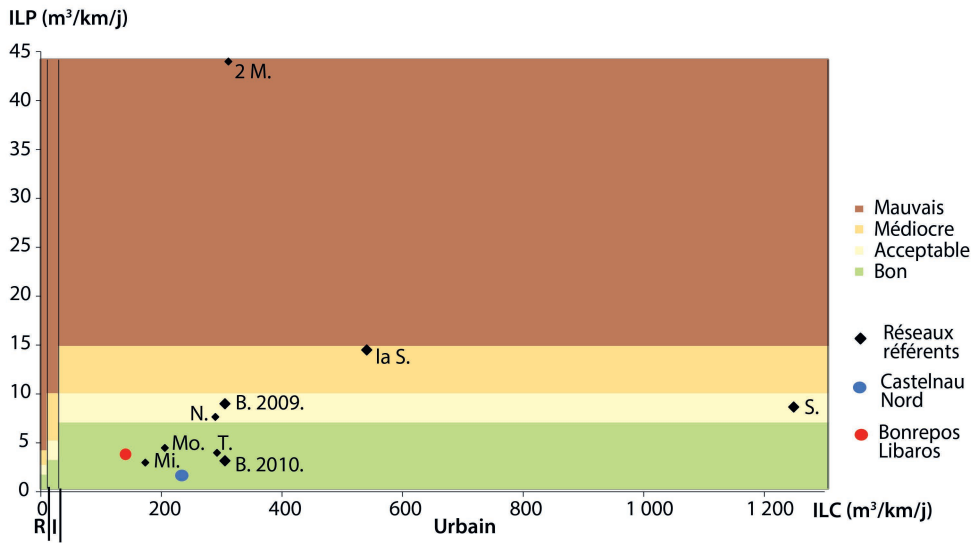


Figure 7.12. Performances des réseaux d'irrigation selon le référentiel adapté CACG en milieu rural (R), urbain ou intermédiaire (I). ILP : indice linéaire de pertes ; ILC : indice linéaire de consommation.

Ainsi, même si l'interprétation n'est pas toujours aisée, l'ensemble de ces indicateurs (rendement primaire, débit de fuite par les tests « réseaux fermés », rendement par pertes et ILP) contribuent à cerner précisément la qualité du réseau et son efficacité en eau.

Le suivi dans le temps de ces indicateurs permet de se rendre compte de l'évolution de la qualité du réseau. C'est un outil indispensable pour les maîtres d'ouvrages et les exploitants, pour la prise de décisions quant aux mesures correctives à mettre en place.

Cas particulier de la station individuelle

Les mêmes techniques peuvent être utilisées pour une station individuelle, il s'agira simplement de disposer de compteurs fiables placés :

- au départ de la station de pompage ;
- à l'amont immédiat du matériel d'application (pivot, enrouleur, station de filtration, etc.).

Le matériel d'application

Supprimer les fuites dans les tuyaux et les équipements à la parcelle

Les fuites potentielles peuvent être limitées dès la conception du réseau à la parcelle, en privilégiant des matériels plus étanches. On améliore ainsi l'efficacité de distribution à la parcelle. Par exemple, les raccords à boule et crochet pour les tuyaux de surface sont plus étanches que les conduites équipées de joint à lèvres, étanches en pression mais qui se vident à chaque arrêt. De même, les tuyaux enterrés en polyéthylène présenteront moins de risque de fuites que les tuyaux en aluminium en surface. En outre, les tuyaux enterrés, pouvant être maintenus sous pression même lors de l'arrêt de l'irrigation, permettent de limiter les pertes par la vidange involontaire du circuit due à un effet de siphonage.

Sur les enrouleurs, les fuites sont souvent localisées sur la turbine et les joints de palier de la bobine qui nécessitent un entretien régulier. En goutte-à-goutte, une vigilance particulière s'impose lors des

travaux culturaux qui peuvent endommager les gaines, de surface ou enterrées, et engendrer des fuites. Il est également important d'éviter les surpressions qui occasionnent des détériorations sévères des gaines.

Améliorer les systèmes d'aspersion

Uniformité de l'application. En irrigation sous pression, c'est le système qui détermine l'uniformité et non la variabilité spatiale du sol (comme en irrigation de surface). Une mauvaise uniformité peut être due à un mauvais dimensionnement de l'installation entraînant des écarts de débit, à une variation des conditions hydrauliques de fonctionnement, aux conditions ventées, au colmatage. Elle est à l'origine de zones sous et sur-irriguées dans la parcelle et provoque des pertes localisées par ruissellement et/ou drainage, réduisant ainsi l'efficacité de stockage. Plusieurs études sur différents systèmes ont fait le lien entre uniformité, estimée à l'aide d'un coefficient d'uniformité, et efficacité globale, et montrent qu'il est important de veiller au soin à apporter aux réglages et à l'entretien des équipements afin d'assurer une uniformité d'application satisfaisante : couverture intégrale (Li et Rao, 2001 ; Carrion *et al.*, 2014 ; Lecina, 2016), pivot (Ortiz *et al.*, 2010 ; Ali *et al.*, 2016), goutte-à-goutte (Benouniche *et al.*, 2014).

Les travaux du projet Casdar Eau Midi-Pyrénées (2007-2010) illustrent l'influence du vent sur l'uniformité de l'application en aspersion, évaluée par le coefficient d'uniformité de Christiansen (CUC), ainsi que sur l'efficacité d'application (Ea) (Weber et Granier, 2012). En couverture intégrale (figure 7.13), on observe le 7 juillet 2010 un vent faible (0,5 à 1 m/s), une uniformité convenable (CUC de 80 %) et une bonne efficacité d'application (93 %). En revanche, le 5 juillet 2010, avec un vent plus fort (2,5 à 3 m/s), le CUC est nettement moins satisfaisant (43 %) et l'efficacité d'application plus faible (83 %) en raison de pertes par évaporation directe et dérive. Avec le canon enrouleur (figure 7.14), le CUC est de 79 % en journée et avec un vent moyen, et de 76 % de nuit avec un vent faible. L'uniformité est donc convenable et peu influencée par le vent. L'efficacité d'application est de 80 % en journée et avec un vent moyen, et de 95 % de nuit avec un vent faible. Elle est donc dégradée par le vent, principalement du fait des pertes par évaporation et dérive.

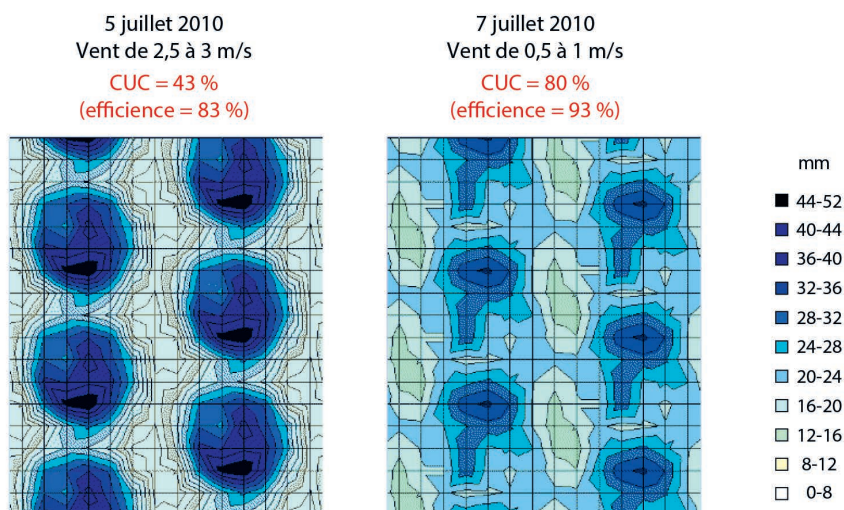


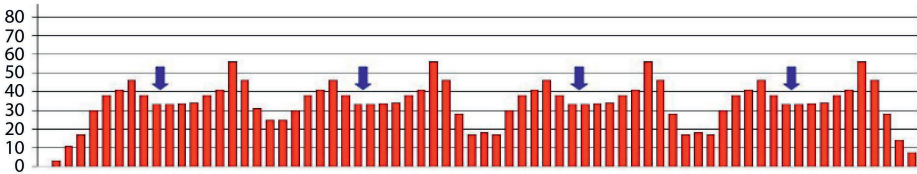
Figure 7.13. Cas de la couverture intégrale. Répartition pluviométrique, évaluation de l'uniformité d'application (CUC : coefficient d'uniformité de Christiansen) et efficacité d'application sous deux vitesses de vent différentes.

16 juillet 2008 : de jour et vent moyen

Dose objectif : 38 mm
Écartement : 87 m (= $1,85 \times P$)

CUC = 79 %

Efficacité = 80 %



6 juillet 2009 : de nuit et vent faible

Dose objectif : 40 mm
Écartement : 60 m (= $1,40 \times P$)

CUC = 76 %

Efficacité = 95 %

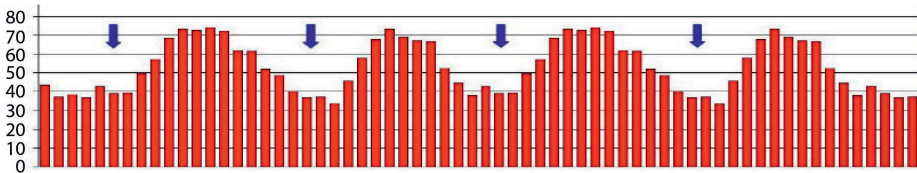


Figure 7.14. Cas du canon enrouleur. Répartition pluviométrique, évaluation de l'uniformité d'application (CUC : coefficient d'uniformité de Christiansen) et efficacité d'application sous deux vitesses de vent différentes. P : portée.

Choix de la période d'application. Dans un objectif de réduction des pertes par évaporation directe, il est recommandé d'éviter d'irriguer durant la plage horaire 11 h-15 h, heure à laquelle la température et le rayonnement sont le plus élevés. Pour limiter les pertes par dérive, l'aspersion est déconseillée en journées fortement ventées, de même que durant la plage horaire 12 h-18 h (vent thermique).

Systèmes de modulation des doses : régulation de l'avancement et modulation de l'ouverture des buses. Tous les enrouleurs sont aujourd'hui équipés en série d'un système de régulation électronique de l'avancement destiné à assurer l'application d'une dose constante tout au long de la bande arrosée (voir chapitre 2). Inversement, ce système, installé sur enrouleur, pivot ou rampe, permet de programmer des doses différentes par zone de parcelle (zones rectangulaires dans le cas d'une rampe ou d'un enrouleur, zones en secteurs dans le cas d'un pivot). Cette pratique peut être intéressante dans le cas où l'installation d'irrigation parcourt des cultures ou des sols différents.

Un autre système existe sur pivot, la modulation de l'ouverture des buses, connue sous le nom de VRI (*variable rate irrigation*), qui permet également de moduler les doses. Ces deux techniques de modulation intraparcellaire des doses peuvent être utilisées en irrigation de précision³¹ afin d'adapter la dose à l'hétérogénéité d'une parcelle (variabilité du réservoir utile du sol, de la densité de semis, du développement de la culture, etc.). Elles permettent ainsi de réduire les pertes par drainage profond dans les zones qui seraient autrement sur-irriguées, d'augmenter ainsi l'efficacité de stockage, et donc l'efficacité globale. Il faut cependant souligner que la mise en œuvre de la modulation intraparcellaire des doses nécessite une bonne identification préalable de la variabilité intraparcellaire.

31 L'irrigation de précision est un ensemble de techniques permettant d'apporter la bonne dose d'irrigation, au bon moment, au bon endroit.

Systèmes de type brise-jet ou angles réglables sur canons. L'objectif est d'éviter les pertes en eau par débordement hors de la parcelle ciblée (routes ou parcelles voisines), donc d'augmenter l'efficacité d'application. Dans le système brise-jet, des pointes pénètrent dans le jet pour en réduire sa portée en début ou en fin de position (Gun corner de Di Palma Irrigation, Rain Control de Beinlich).

Le système d'inversion du balayage permet de faire fonctionner le canon « dos à la route » en début de position, puis de le retourner automatiquement pour le reste de son passage (Auto revers de Pommier, Control Jet de Labi, Vector Control de Komet, Top Rain de Irrimec). Grâce à ces deux systèmes, les débordements en début ou fin d'enroulement sont réduites. Cependant, l'inversion de balayage présente l'inconvénient de doubler localement la quantité d'eau, donc de générer quand même une perte pendant la phase de remise en balayage classique.

Le système d'ajustement de l'angle de balayage en cours d'enroulement (Vector Control de Komet, Gun corner de Di Palma Irrigation, Top Rain de Irrimec) limite le débordement parallèlement à la position et est capable de modifier le réglage de secteur en cours d'enroulement. Toutefois, pour respecter la dose lors de la réduction de l'angle d'aspersion, la vitesse d'enroulement devrait être augmentée. Actuellement, aucun constructeur ne commercialise une telle solution ; une sur-irrigation a donc lieu ponctuellement. Les pertes par débordement hors parcelle sont certes évitées, mais des pertes par ruissellement et drainage profond peuvent avoir lieu.

Arroseurs basse pression sur pivot et rampe frontale. Installés à la place des traditionnels sprinklers, ces arroseurs rotatifs ou oscillants présentent la particularité de fonctionner à faible pression (0,5 à 1,5 bar selon les modèles, contre 3 pour les sprinklers). Ils assurent une bonne homogénéité d'application, génèrent de grosses gouttes et sont donc moins sensibles aux pertes par évaporation directe et par dérive due au vent. Ils améliorent donc les efficacités d'application et de stockage.

Cannes de descente sur pivot et rampe frontale. Le montage des arroseurs basse pression sur des cannes de descente permet d'appliquer les gouttes plus près de la canopée et de la surface du sol, ce qui réduit leur trajectoire et limite encore les pertes par évaporation directe et par dérive due au vent.

Renouveler le système d'irrigation

Le système peut être renouvelé à l'identique. L'efficacité est alors souvent améliorée, en raison de l'érosion des performances des matériels dues au vieillissement (Molle *et al.*, 2009) : fuites, diminution de l'uniformité d'application, colmatage des goutteurs ou micro-asperseurs. À titre d'exemple, un changement de busage sur un pivot ou une rampe peut entraîner une économie d'eau de 5 % (Molle, 1998).

Le choix peut également être fait de basculer vers un autre type de système qui génère moins de pertes, donc plus efficient.

Par exemple, passer d'un enrouleur à une rampe (pivot ou rampe frontale) à asperseurs basse pression permet de réduire les pertes par évaporation directe, dérive et débordement, d'autant plus en présence de cannes de descente. La rampe permet également d'améliorer l'uniformité d'application, donc de limiter les pertes par ruissellement et drainage, et de moduler plus facilement les apports en fonction des besoins de la culture. De même, en basculant d'un système d'aspersion vers le goutte-à-goutte, on supprime totalement les pertes par évaporation directe, dérive, débordement et ruissellement, et même les pertes par évaporation du sol dans le cas du goutte-à-goutte enterré.

Une étude menée à Irstea en 2016-2017 a permis de compiler des références d'économies d'eau réalisées à la parcelle par un changement de matériel d'irrigation sur un large éventail de conditions

pédoclimatiques du territoire métropolitain (Serra-Wittling et Molle, 2017). Il apparaît que les valeurs d'économies d'eau réalisées présentent une grande variabilité. Les économies d'eau les plus fortes sont souvent observées en année humide, alors qu'elles sont moins conséquentes en année sèche. De même, elles tendent à être plus importantes dans les sols à faible réservoir utile. Néanmoins, à partir des références collectées, un référentiel d'économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation (sous réserve de pratiques optimales) a pu être établi (tableau 7.8).

Tableau 7.8. Économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation (Serra-Wittling et Molle, 2017).

Maïs et autres grandes cultures					
Économie d'eau (%) ➡	Nouveau				
Ancien	Enrouleur	Couverture intégrale	Pivot basse pression	Goutte-à-goutte de surface	Goutte-à-goutte enterré
Enrouleur	10	10	5-20*	10-20*	15-35*
Couverture intégrale	–	10	5-20*	15-25*	20-25*
Pivot/rampe	–	–	5-10	5-15	10-25
Goutte-à-goutte de surface	–	–	–	10-20	15-20
Goutte-à-goutte enterré	–	–	–	–	10-20

Arboriculture					
Économie d'eau (%) ➡	Nouveau				
Ancien	Aspersion sur frondaison	Aspersion sous frondaison classique	Aspersion sous frondaison micro-jet	Goutte-à-goutte de surface	Goutte-à-goutte enterré
Aspersion sur frondaison	10	10	15-30*	20-35*	25-35*
Aspersion sous frondaison micro-jet	–	–	10-20	15-25	15-30
Goutte-à-goutte de surface	–	–	–	10-20	5-15
Goutte-à-goutte enterré	–	–	–	–	10-20

Maraîchage de plein champ			
Économie d'eau (%) ➡	Nouveau		
Ancien	Couverture intégrale	Mini-aspersion	Goutte-à-goutte de surface
Couverture intégrale	10	5-10*	5-15*
Mini-aspersion	–	10-20	10-30
Goutte-à-goutte de surface	–	–	10-20

* Augmenter les valeurs hautes et basses des intervalles de + 5 en région ventée.

L'automatisation

La commande manuelle des vannes est susceptible d'occasionner des pertes par drainage liées à des durées excessives d'arrosage. Cela peut être le cas, par exemple, d'une vanne ouverte en fin de journée puis refermée seulement au petit matin. Le volume d'eau apporté peut être supérieur à la capacité de rétention du sol et l'excédent est perdu par drainage.

L'automatisation, c'est-à-dire la programmation de l'ouverture et de la fermeture des vannes d'irrigation, permet d'irriguer potentiellement 24 h/24. Il est ainsi possible de s'affranchir des contraintes horaires de manipulation manuelle de vannes et d'éviter les apports excessifs et les pertes par drainage.

Un exemple d'amélioration de l'efficacité à la parcelle

L'exemple d'une culture de maïs grain dans l'Ain (figure 7.15) montre les différences d'efficacité entre l'irrigation au canon enrouleur et le goutte-à-goutte enterré (espacement des gaines de 1,50 m). Les rendements sont équivalents dans les deux cas (133 et 131 q/ha respectivement). Cependant, l'efficacité globale de l'irrigation (part de l'eau mesurée au compteur en entrée de parcelle qui a réellement été transpirée par la culture, en orange sur la figure 7.2) est de 49 % pour l'enrouleur et de 68 % pour le goutte-à-goutte enterré.

L'économie d'eau réalisée grâce au goutte-à-goutte enterré est de 34 % par rapport à l'enrouleur. Elle est due essentiellement à la réduction des pertes par évaporation du sol et par évaporation/dérive (pertes liées à la technologie de l'aspersion par canon enrouleur) ainsi qu'au drainage profond (perte liée à la conduite de l'irrigation). L'économie d'eau aurait encore pu être augmentée en réduisant les pertes par eau d'irrigation restant dans le sol après récolte (pertes liées à la conduite). On visualise ici que l'amélioration de l'efficacité passe par un changement de système, mais aussi par une amélioration de la conduite de l'irrigation.

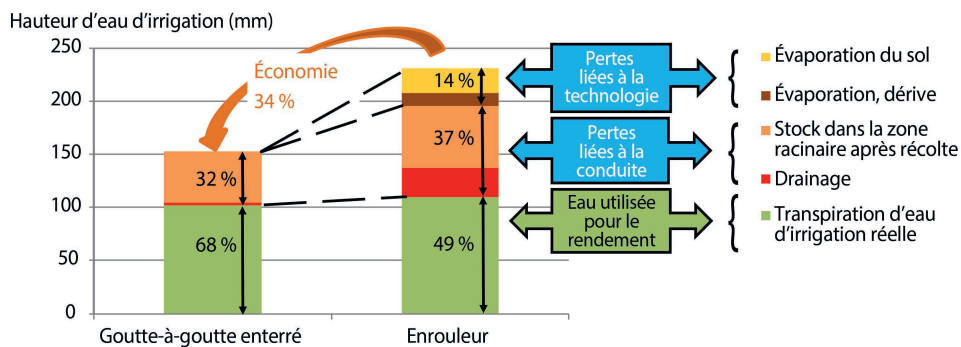


Figure 7.15. Répartition de l'eau d'irrigation entre la transpiration réelle de la culture et les différentes pertes sur une culture de maïs à Saint-Maurice-de-Gourdans (Ain) au cours de la saison 2009.

Quantification des volumes obtenue par simulation avec le logiciel Optirrig.
Les pertes par fuites à la parcelle sont arbitrairement considérées comme nulles.

Comment améliorer l'efficacité énergétique ?

L'efficacité énergétique sera abordée dans cette section à l'échelle de la station de pompage individuelle ou du petit réseau collectif (100-200 ha), à l'exclusion des grosses structures collectives.

Le matériel d'irrigation

Réduire les pertes en eau améliorera l'efficacité en eau et bien sûr l'efficacité énergétique ; c'est un préalable indispensable. On peut distinguer deux niveaux :

– améliorer l'efficacité en eau par la conduite d'irrigation et les pratiques culturales (figure 7.16B, p. 320). Ce levier d'amélioration de l'efficacité a été décrit dans les sections « Améliorer l'efficacité en eau d'irrigation par les pratiques culturales » et « Améliorer l'efficacité en eau par le pilotage de la conduite d'irrigation ».

– améliorer l'efficacité en eau en réduisant les pertes en eau sur le matériel d'application (figure 7.16C, p. 321). Cette démarche est détaillée dans la section « Réduire les pertes par le matériel d'irrigation ».

La démarche complémentaire pour améliorer l'efficacité énergétique consiste à réduire les pertes énergétiques en optimisant la conception du matériel d'irrigation et de l'installation hydraulique (figure 7.16D, p. 321).

La présentation simplifiée ci-dessous (figure 7.17) schématise les différentes étapes du diagnostic énergétique d'une installation d'irrigation individuelle ou d'un petit collectif. La station de pompage doit répondre à la demande du réseau de transport, qui lui-même doit répondre à celle de la pression de service souhaitée selon le matériel d'application choisi.

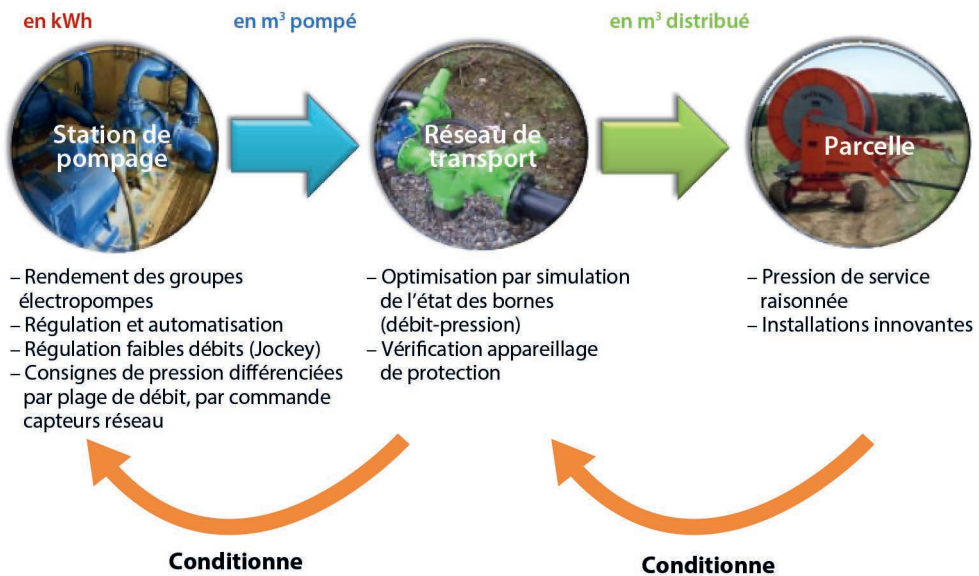


Figure 7.17. Différentes étapes du diagnostic énergétique d'une installation d'irrigation individuelle ou d'un petit collectif (Ondes, Haute-Garonne, 12 mars 2015).

Cette méthodologie reprend la démarche à réaliser lors de la conception d'une installation d'irrigation en recherchant la meilleure efficacité énergétique.

Le point de départ réside dans le choix de la pression de service couplée au débit nécessaire au matériel d'application de l'utilisateur. Cette demande définit ensuite les caractéristiques du réseau de transport qui dépend lui-même de normes standards de conception. La station de pompage, finalement, doit répondre aux consignes de débit-pression exigées en tête du réseau de transport. Il s'agira pour la station de pompage, au-delà des exigences de demande maximale et de variabilité des débits (donc des pressions), de proposer le rendement optimum pour les principales plages de fonctionnement appelées.

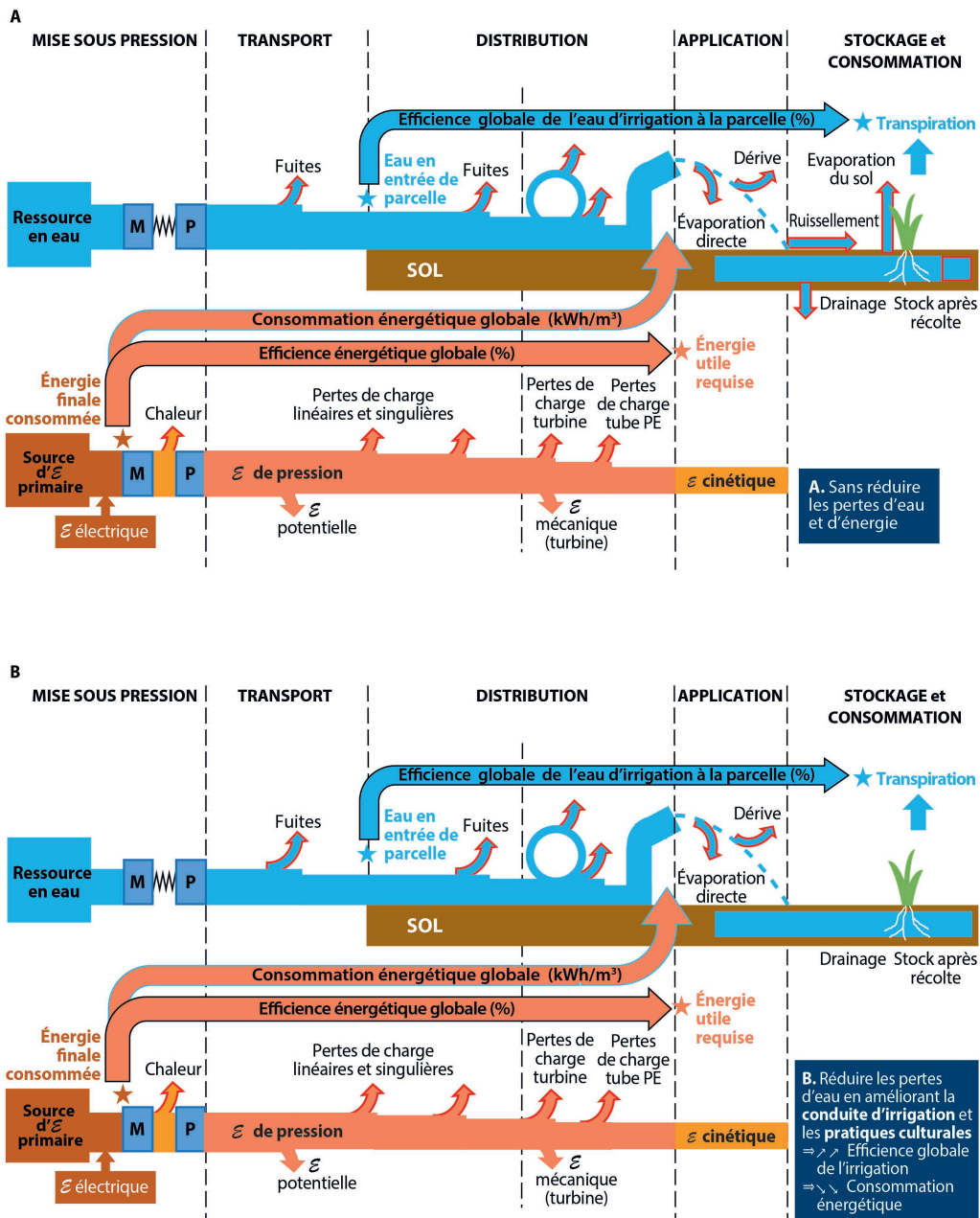
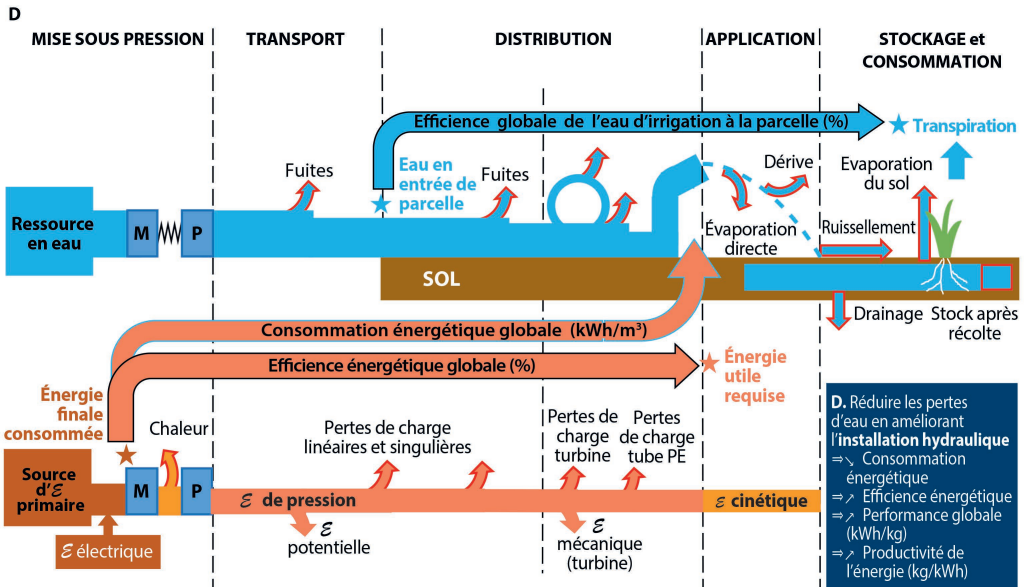
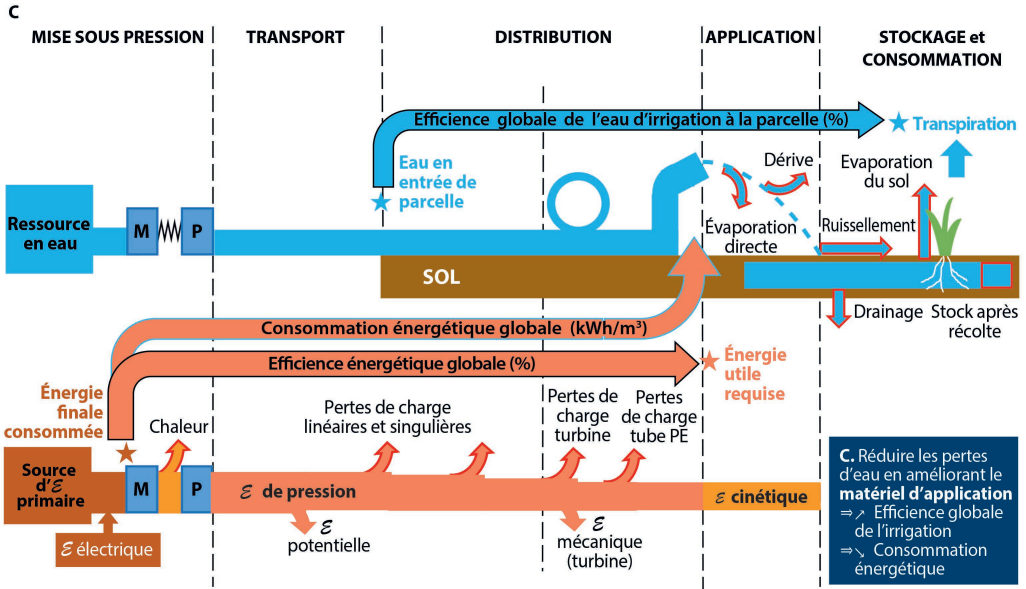


Figure 7.16. (A) Les différentes pertes d'eau et d'énergie en irrigation (flèches rouges).
(B) Réduire les pertes en eau en améliorant la conduite de l'irrigation et les pratiques culturales.



(C) Réduire les pertes en eau en améliorant le matériel d'application. (D) Réduire les pertes énergétiques en améliorant l'installation hydraulique.

Le matériel d'application

La conception d'ensemble de l'installation est définie pour répondre à la pression de service nécessaire au matériel d'application et à ses caractéristiques en termes de débit souhaité. L'irrigation de surface requiert une pression nulle³². L'énergie nécessaire est donc liée uniquement à la topographie et au matériel de transport. Les systèmes de micro-irrigation non autorégulés (comme le goutte-à-goutte) requièrent généralement une pression de 1 bar, devant être maintenue constante pour assurer les débits d'application. Le développement des systèmes autorégulants permet théoriquement de diminuer la pression nécessaire, mais pour des questions de colmatage il est au contraire recommandé d'augmenter cette pression, la plage de régulation allant de 0,5 à quelques bars. Les systèmes d'asperersion nécessitent une pression plus élevée pour assurer la projection de l'eau à une vitesse, et donc à une distance suffisante, de 3 bars (asperseurs) à plus de 8 bars pour les canons. Des pressions plus faibles peuvent être utilisées, sans garantie de performance de l'application.

Compte tenu des exigences de réseau, les ordres de grandeur standards, par exigences croissantes de pression en tête de parcelle, sont ainsi de 2 à 5 bars en micro-irrigation, 4 à 6 bars en pivot et couverture intégrale, 5 à 10 bars en enrouleur. La configuration du parcellaire pourra orienter certains choix pour la desserte des points hauts. De manière générale, il faudra veiller à ne pas surdimensionner une installation pour la seule desserte de points extrêmes qui ne pourrait pas être automatiquement réglée par la station de pompage.

Le débit relève du choix du débit d'équipement de l'installation. Ce choix, s'il doit répondre *a minima* à la période d'irrigation la plus aiguë, dépend aussi du temps de fonctionnement de l'installation selon les contraintes du matériel d'application, de l'organisation quotidienne, voire du confort recherché.

Le débit d'équipement résulte en effet du rapport entre le volume à apporter en période de pointe et le temps d'irrigation pendant cette période de pointe (typiquement 15 h/j avec un enrouleur, 20 h/j avec une irrigation localisée ou un pivot). Pour des questions de confort, on peut réduire le temps d'utilisation du matériel, par exemple pour éviter les arrosages certains jours, ou en pleine journée. Ceci augmente d'autant le débit d'équipement et donc les pertes de charge³³, à moins de surdimensionner les conduites (au prix d'un investissement supplémentaire).

Exemple

Considérons un enrouleur choisi pour irriguer 5 ha, avec une dose de 6 mm/j en période de pointe, une efficacité d'application de 70 %. Pour une utilisation normale de 15 h/j, le débit d'équipement doit être de 28,6 m³/h. Avec une conduite d'amenée de 500 m de long et de diamètre intérieur 90 mm, la perte de charge est de 10 m environ. Elle monte à 17 m pour une conduite de diamètre intérieur 80 mm, soit un surcoût de pompage pour apporter les 0,7 bar correspondant.

Réduire le temps d'irrigation par jour est possible en augmentant le débit (si la pompe le permet), par exemple avec une buse de plus gros diamètre. Les pertes de pression sont largement augmentées du fait des pertes de charge dans l'enrouleur et dans le système d'amenée.

32 Rappel : les pressions utilisées sont (sauf indication contraire) les pressions relatives, c'est-à-dire l'écart de pression par rapport à la pression atmosphérique.

33 Pour une canalisation donnée, les pertes de charge augmentent avec le carré du débit (voir chapitre 3, section « Pertes de charge dans les conduites sous pression », p. 76).

Étude de cas concret. Cas de l'enrouleur : impact du changement de débit (taille buse) ou du diamètre du polyéthylène

Avant d'irriguer à l'aide d'un enrouleur, il est nécessaire de choisir la buse du canon. On appelle taille de buse le diamètre intérieur de la sortie d'eau de la buse. En règle générale, il est fourni avec le matériel quatre à cinq tailles de buses différentes. Le choix de celle-ci a un impact direct sur le débit transporté. Si la ressource d'eau en amont est suffisante, augmenter la taille de la buse permet d'apporter plus vite la dose d'eau nécessaire, et donc d'avoir plus de souplesse dans l'organisation du travail en saison. En revanche, l'augmentation du débit dans un même diamètre de conduite, que ce soit entre la pompe et l'enrouleur ou sur la bobine, augmente les pertes de charges. Quel est l'impact d'un tel choix sur la consommation énergétique ?

Pour une pompe thermique, la Chambre d'agriculture d'Alsace a étudié la consommation énergétique de trois enrouleurs (diamètre extérieur en mm/longueur en m de 110/400, 125/500 et 140/500) équipés de quatre tailles de buse différentes (27,5 mm, 30 mm, 32,5 mm et 35 mm) pour une pression constante de 5 bars. L'objectif de l'essai était de chiffrer l'impact du choix de la buse sur le débit, dont l'augmentation induit une hausse de pression nécessaire à la pompe pour compenser les pertes de charges, qui agit à son tour sur la consommation énergétique du système.

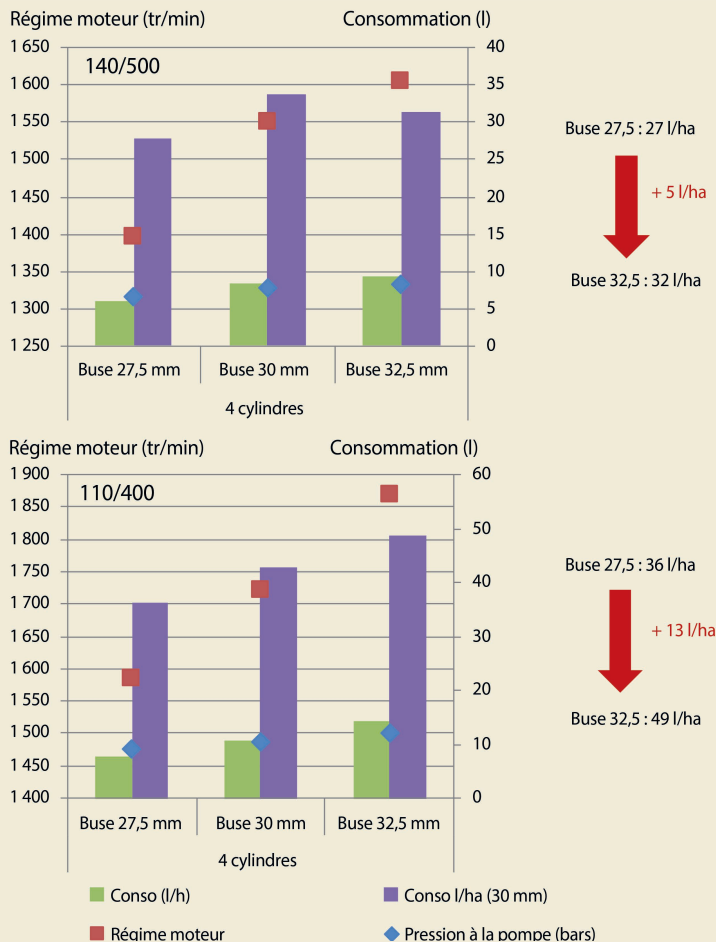


Figure 7.18. Impact du diamètre de la buse sur la consommation de gazole d'un enrouleur (source : Chambre régionale d'agriculture d'Alsace). La mesure de consommation de GNR (gazole non routier) a été réalisée pour un tour d'eau de 30 mm.

Pour l'enrouleur 110/400, il est constaté qu'une augmentation de diamètre de buse de 27,5 à 32,5 mm augmente la consommation de fuel de + 36 %. Pour un enrouleur 140/500, le changement de buse de 27,5 à 32,5 mm augmente la consommation de 18 %. Cette expérimentation montre l'importance d'adapter la taille de la buse à l'enrouleur (figure 7.18).

L'augmentation de la taille de la buse permet d'augmenter le débit, mais entraîne des pertes de charges plus importantes dans l'installation d'irrigation.

Une autre partie de l'expérimentation menée par la Chambre d'agriculture d'Alsace a été de travailler sur le diamètre du polyéthylène de l'enrouleur (figure 7.19). En effet, comme expliqué précédemment, plus le diamètre intérieur est faible, plus les pertes de charge sont importantes et par conséquent la consommation énergétique augmente.

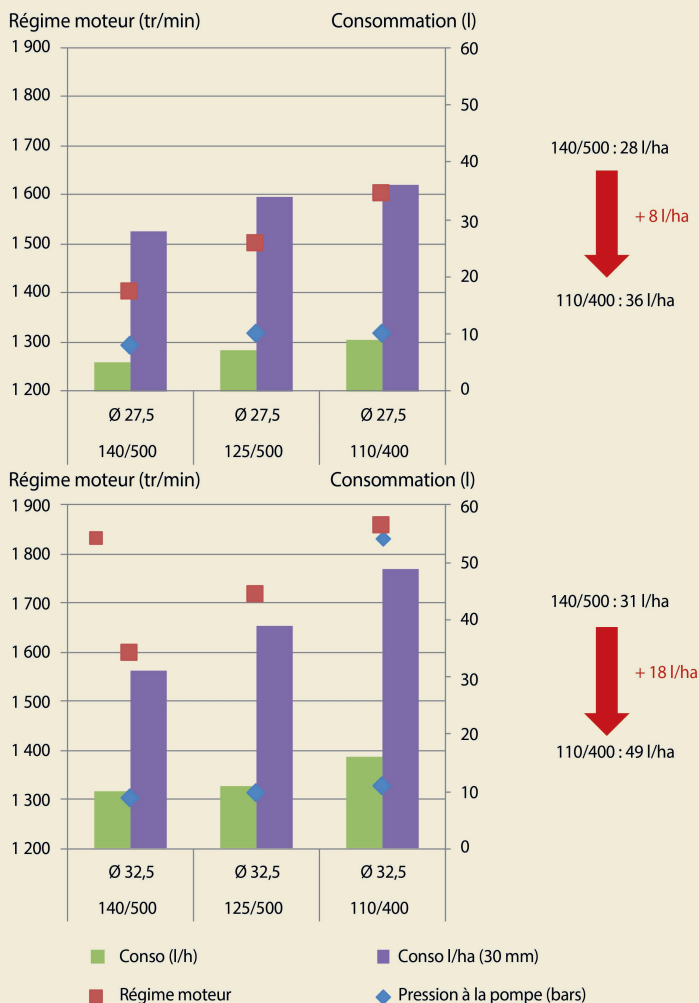


Figure 7.19. Impact du diamètre du polyéthylène (P) sur la consommation de gazole d'un enrouleur (source : Chambre régionale d'agriculture d'Alsace).

Une utilisation d'un diamètre de 110 mm au lieu de 140 mm pour une buse de 27,5 mm entraîne une augmentation de consommation de 8 l/ha pour une dose unitaire de 30 mm. Cette expérimentation montre l'intérêt de bien choisir son diamètre de polyéthylène à l'achat et de bien adapter sa buse en saison.

Le réseau de transport

Adaptation du réseau de transport au débit et à la pression demandés

La pression de service et le débit nécessaires au matériel d'application imposent les caractéristiques du réseau de transport à mettre en place. Celui-ci doit répondre à des normes de conception standards :

- la résistance à la pression en dynamique et en statique, en moyenne de 8 à 16 bars, avec des extrêmes de 6 à 25 bars ;
- la vitesse dans les canalisations (1 à 2,5 m/s) afin de respecter des règles de sécurité et de pertes de charge à ne pas dépasser (6 à 25 m de colonne d'eau/km).

Dans les réseaux les plus grands, les tours d'eau peuvent être une solution pour limiter le diamètre des conduites et donc leur coût.

Bon fonctionnement des appareillages de protection

Il s'agit de doter le réseau des appareillages de protection hydraulique nécessaires, ou de régler ou remplacer le matériel défectueux.

Cet appareillage hydraulique comprend :

- les appareillages de protection : vidanges, purgeur d'air qui vont participer au bon fonctionnement du réseau et préserver sa durée de vie ;
- les appareillages de régulation en complément de la régulation principale de la station de pompage, pour les réseaux les plus importants : vannes ou bornes, tubulures de bornes qui intègrent les compteurs de répartition, les régulateurs ou stabilisateurs de pression et les limiteurs de débit.

La station de pompage

L'optimum visé consiste à rechercher le rendement maximum des moteurs et des pompes, pour les plages de débit-pression les plus fréquemment appelées (sachant qu'un réseau individuel peut comporter plusieurs plages de fonctionnement, et qu'un collectif varie quasi constamment), pour fournir la pression et le débit exigés, en évitant les écrêtements de pression inutiles.

Dans le passé, les coûts énergétiques faibles incitaient surtout à répondre aux conditions les plus extrêmes. Actuellement, il s'agit de raisonner l'optimum économique en recherchant la meilleure efficacité énergétique pour les plages de débit-pression les plus usuelles.

Rendement des groupes

Groupes électropompes. On vérifiera les caractéristiques des pompes et des moteurs, afin d'analyser si elles répondent à la demande et de proposer les meilleurs rendements. Les rendements standards à rechercher sont de 75 à 80 % pour les pompes et de 92 à 94 % pour les moteurs, en comparant aux possibilités offertes par les constructeurs. En tenant compte des pertes d'énergie au niveau de la transmission, on arrive à des valeurs maximales de 70 à 75 % pour le groupe (et de 50 à 60 % en moyenne). La démarche sera plus pertinente si on dispose d'une connaissance précise ou historique des plages de fonctionnement des débits-pressions et de leur durée.

Dans le cas d'un diagnostic, on peut comparer les données historiques des constructeurs aux caractéristiques des installations en place, en les reconstituant à partir de mesures des points de débit-pression sur site, à l'aide d'un débitmètre portatif. Ces mesures permettront de juger si les caractéristiques sont

dégradées par usure ou tout simplement inadaptées au besoin. Des pertes de rendement d'un facteur 2 peuvent être observées entre rendement théorique et rendement mesuré, du fait du vieillissement des installations. Ceci implique directement un doublement des coûts énergétiques.

Groupes thermiques. Pour une pompe à moteur thermique, le rendement du moteur ne dépasse pas 30 à 35 %, et le rendement de l'ensemble du groupe (moteur + transmission + pompe) est au maximum de 20 à 25 %. Les mêmes remarques peuvent être faites que pour les groupes électriques, à savoir que le vieillissement des installations ou les mauvaises conditions d'utilisation peuvent dégrader fortement le rendement énergétique.

Il s'ensuit que, dans la pratique, les rendements sont plutôt de l'ordre de 50 à 60 % pour les groupes électriques, et de 15 à 20 % pour les groupes thermiques.

Mais sur le plan environnemental, la comparaison entre les deux technologies n'est pertinente que si l'on se rapporte aux consommations d'énergie primaire. Ainsi, pour pouvoir disposer de 100 kWh pour un système d'irrigation donné (énergie utile), la quantité d'énergie primaire nécessaire sera de :

- dans le cas d'un groupe électrique dont le rendement est de 60 % : $100/0,6 = 167$ kWh d'énergie finale, soit, en multipliant par le coefficient de conversion, de l'ordre de 3,83, 640 kWh d'énergie primaire ;
- dans le cas d'un groupe thermique dont le rendement est de 20 % : $100/0,2 = 500$ kWh d'énergie finale, soit, en multipliant par le coefficient, de l'ordre de 1,75, 875 kWh d'énergie primaire.

Régulation principale et automatisation

Le couple automatisation et régulation par variateur de vitesse est le cœur du fonctionnement de la station, il permet d'adapter en permanence le débit développé pour répondre au débit appelé avec une consigne de pression stabilisée.

Pour une station de pompage comptant une seule consigne de débit-pression, voire plusieurs consignes disponibles sur une même pompe (dénivelée ou couverture intégrale), la variation de vitesse n'aura aucun intérêt, elle sera même énergivore (3 % par rapport à un démarrage classique), et dans le dernier cas il s'agira surtout de privilégier le point de fonctionnement le plus fréquent.

Dans les autres cas, le groupe à vitesse variable adapte donc sa réponse à la demande ou déclenche les différents groupes à vitesse fixe en fonction de la demande et apporte l'appoint en débit nécessaire. La technique par variateur de fréquence pour le groupe à vitesse variable est actuellement la plus performante (retour d'expérience de 15 à 20 ans). Il faudra par contre être attentif à l'adaptation du moteur pour répondre à cette technique.

Comme pour la variation électromagnétique, le variateur de fréquence permet au groupe électro-pompe d'adapter sa vitesse en fonction du débit appelé dans le réseau.

On peut situer les gains de rendement des différentes techniques par rapport à celle de la variation de fréquence (Weber, 2015) : comparaison variateur de fréquence/seuils de déclenchement manodébitmétrique ou vanne motorisée : gain de 15 à 20 % au minimum. Ces systèmes ne comportent en fait aucune régulation, soit qu'ils écrètent la pression excédentaire (vanne motorisée), soit que la consigne de pression varie en permanence (seuils de déclenchement) indépendamment de la demande.

La différence de puissance entre les courbes pleines (figure 7.20) représente le gain d'énergie provenant de l'utilisation d'un groupe en vitesse variable par rapport au même groupe en vitesse fixe.

Une partie de l'énergie électrique utilisée par le groupe en vitesse fixe (transformée en énergie mécanique, HMT) va alors être dissipée au niveau de la vanne de régulation en sortie de station. Le groupe à vitesse variable, quant à lui, va adapter la vitesse de rotation du groupe électropompe en fonction du débit appelé dans le réseau, tout en gardant une HMT constante. Il n'y a donc pas d'énergie dissipée au niveau d'une vanne de régulation.

Comparaison variateur de fréquence/variateur électromagnétique de type Sulzer : gain de 5 %. Le variateur Sulzer est une solution ancienne et robuste, mais actuellement moins performant que le variateur de fréquence.

Pour simuler les gains de consommation énergétique, on reconstitue les puissances sollicitées et les durées de sollicitations dans les différentes situations (figure 7.21).

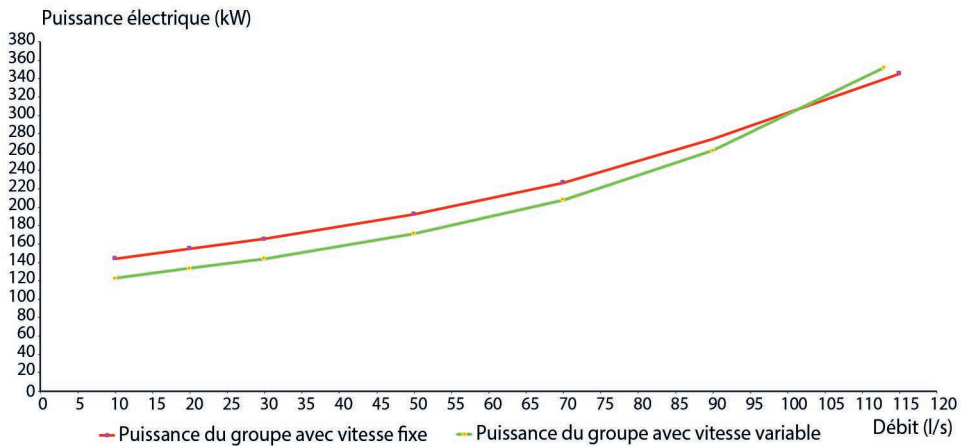


Figure 7.20. Comparaison des puissances électriques d'un même groupe électropompe en vitesse variable et en vitesse fixe.

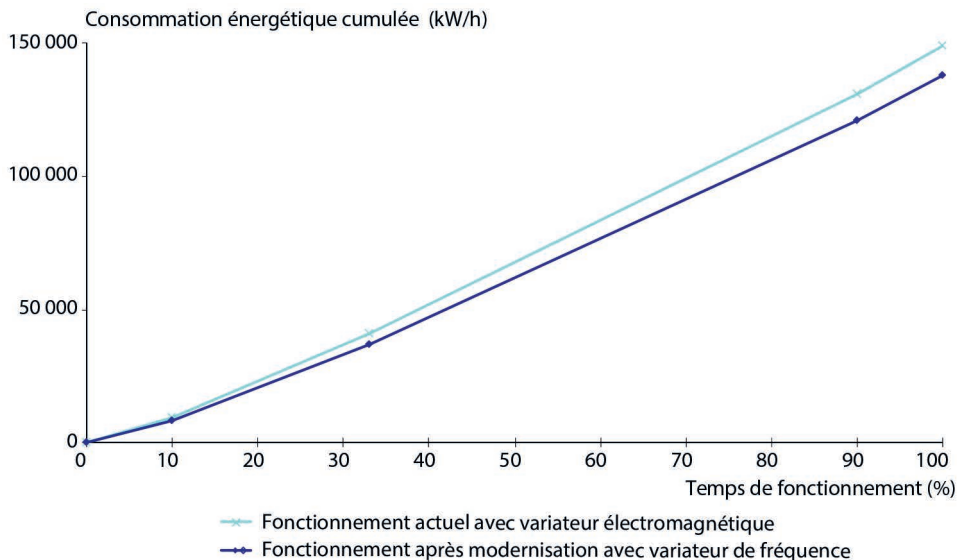


Figure 7.21. Comparaison variateur électromagnétique/variateur de fréquence.

Régulation des faibles débits (groupe Jockey)

Les situations de faible débit ou de veille de la station de pompage doivent faire l'objet d'une attention particulière. Dans tous les cas, la station de pompage doit pouvoir être fonctionnelle dans les cas de faibles débits (15 % du débit nominal), mais il s'agit là de juger si la durée de fonctionnement à faible débit est telle qu'elle justifie de faire appel à un équipement spécifique de type groupe Jockey. On s'appuiera sur une appréciation historique (au mieux) ou empirique des plages de faible débit.

À titre d'exemple, l'ajout d'un groupe Jockey avec variateur de fréquence en complément d'un variateur de fréquence principal apporte une réduction de consommation de 5 % au minimum (Weber, 2015).

Le gain peut être bien supérieur, il sera fonction du temps de sollicitation du groupe Jockey et de la puissance du groupe de régulation de la station principale.

La figure 7.22 illustre les économies d'énergie que procure un groupe Jockey en variation de vitesse par rapport à une pompe principale en variation de vitesse. La différence entre les deux courbes montre les différences de puissance électrique en petit débit. L'utilisation d'un groupe Jockey prend alors tout son sens.

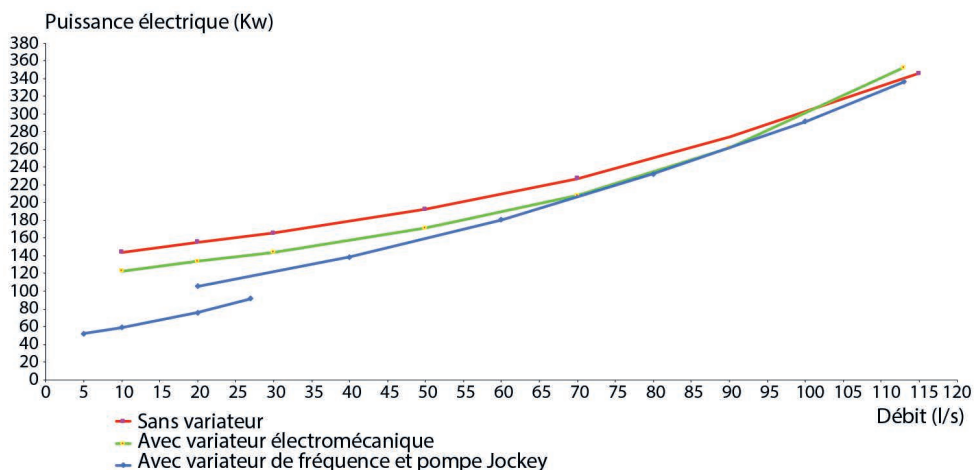


Figure 7.22. Comparaison des besoins en puissance d'une station de pompage sans variateur de vitesse, avec variateur électromagnétique et avec variateur de fréquence + groupe Jockey.

Consignes de pression différenciées

La dernière étape est d'étudier les consignes de pression différenciées par plage de débit, l'énergie nécessaire étant directement proportionnelle à la pression de consigne exigée.

Cette opération consiste à programmer avec l'automate une consigne de pression par plage de fonctionnement des groupes, 2 niveaux pour 2 groupes, 3 niveaux pour 3 groupes :

- une consigne de pression basse pour les faibles débits, c'est-à-dire le groupe Jockey ;
- une consigne de pression intermédiaire pour le variateur de vitesse principal seul ;
- une consigne de pression haute ou rythme de croisière dès enclenchement de ou des vitesses fixes, c'est-à-dire lorsque les débits sont au plus fort.

Le tableau 7.9 compare consigne de pression différenciée/consigne de pression fixe et montre un gain de l'ordre de 6 % avec la régulation par consignes différenciées par rapport à une consigne unique en sortie de station (d'après Weber, 2015).

Cet échelonnement repose sur le principe que le réseau de transport génère d'autant moins de pertes de charges que le débit est faible. Les consignes de pression seront ajustées au cas par cas à partir de la programmation de l'automate.

NB : option opérationnelle en devenir, il s'agirait d'asservir la consigne de pression de la station de pompage à des capteurs de pression télétransmis répartis sur les points les plus défavorables du réseau de transport afin d'adapter en temps quasi réel la consigne de pression et le besoin.

Tableau 7.9. Pourcentage d'économie d'une régulation par asservissement de consignes différenciées par rapport à une consigne unique en sortie de station. Station de Bonrepos Libaros (Hautes-Pyrénées).

Débit (l/s)	0 à 20 l/s	20 à 74 l/s	74 à 128 l/s	128 à 148 l/s	Total
Groupes en fonctionnement	Jockey VV	VV	VV + VF	VV + VF + Jockey VF	
Temps de fonctionnement moyen (h)	611	1184	236	262	/
Avec consignes de pression différenciées					
Consignes (mCE)	150	178	191	191	/
Puissance électrique moyenne (kW)	31,7	135,9	286,4	377,1	/
Consommation moyenne (kWh)	19 369	160 906	67 590	98 800	346 665
Sans consignes de pression différenciées					
Consignes (mCE)	191	191	191	191	/
Puissance électrique moyenne (kW)	41,9	147,7	286,4	377,1	/
Consommation moyenne (kWh)	25 601	174 877	67 590	98 800	366 868
Économies réalisées					
Économies réalisées (kWh)	6 232	13 971	0	0	20 203
Sur la base de 0,07 €/kWh en 2014	436 €	978 €	0 €	0 €	1 414 €
Pourcentage d'économie théorique de la régulation par consignes différenciées par rapport à une consigne unique en sortie de station					6 %

VV : variateur de vitesse ; VF : variateur de fréquence.

Le diagnostic des installations

Dans le cadre du volet irrigation du projet EDEN (Du capteur à l'indicateur : les entrepôts de données spatiales au service de l'évaluation des performances énergétiques des entreprises agricoles), Arvalis-Institut du végétal, la Chambre d'agriculture de Haute-Garonne, Irstea, la CACG et la Chambre d'agriculture du Lot-et-Garonne, avec le soutien financier du ministère de l'Agriculture, de l'Agence de l'eau Adour-Garonne et du Conseil régional, ont travaillé sur les consommations et les niveaux de charges énergétiques d'installations d'irrigation situées en Haute-Garonne et dans le Lot-et-Garonne de 2012 à 2016 (Donnat *et al.*, 2017).

L'objectif de ce projet était de mettre au point des méthodes de diagnostic sur la consommation, l'efficacité de l'eau et les performances énergétiques des installations d'irrigation individuelles et collectives. Trois installations d'irrigation individuelles utilisant respectivement un enrouleur, un pivot et une couverture intégrale ont été suivies en continu à l'aide de capteurs de pression (figures 7.23 à 7.25). L'objectif était de cerner les parties de l'installation les plus énergivores.

Toujours dans le cadre de ce projet, 39 installations d'irrigation ont été suivies ponctuellement en plus des trois installations suivies en continu. L'ensemble de ces suivis a permis d'obtenir des valeurs moyennes de consommation énergétique en kWh par m³ pompé des installations d'irrigation en fonction du type de matériel (figure 7.26). L'échantillon analysé se situe en vallée de Garonne. Attention tout de même, en cas de dénivelée, la valeur du ratio kWh/m³ sera obligatoirement plus élevée que ces données.

Dans le cadre de cette étude, aucun système de goutte-à-goutte n'était représenté chez les agriculteurs.

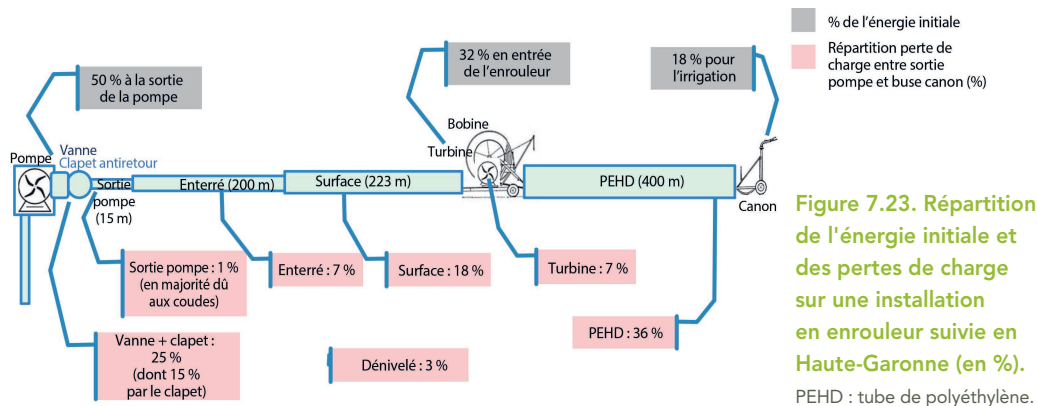


Figure 7.23. Répartition de l'énergie initiale et des pertes de charge sur une installation en enrouleur suivie en Haute-Garonne (en %).

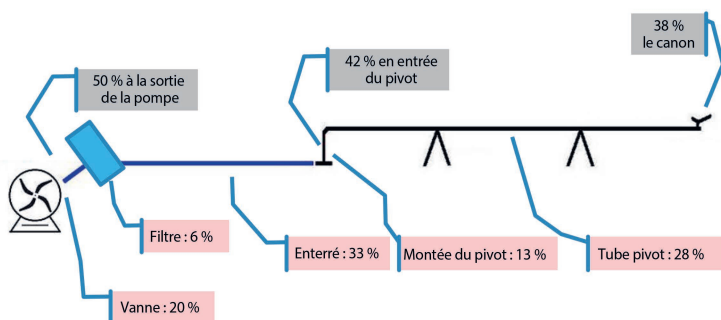


Figure 7.24. Répartition de l'énergie initiale et des pertes de charge sur une installation en pivot suivie en Haute-Garonne (en %).

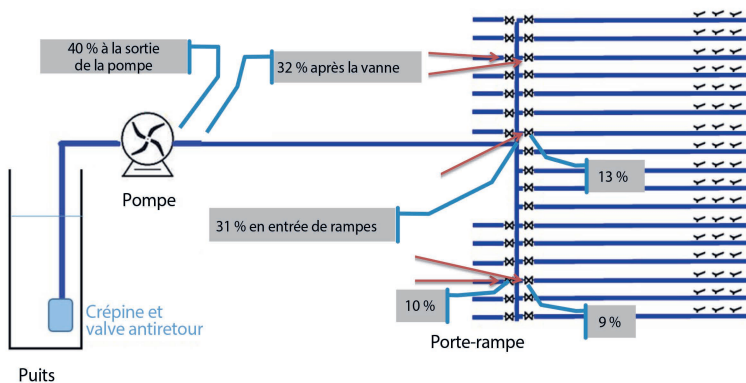


Figure 7.25. Répartition de l'énergie initiale et des pertes de charge sur une installation en couverture intégrale suivie en Haute-Garonne (en %).

Une installation expérimentale en goutte-à-goutte a été suivie dans le cadre du projet EDEN par Irstea en partenariat avec la CACG. Il s'agit de la ferme expérimentale de la Mirandette à Masseube (Gers). Toutefois, sur ce site les trois parcelles installées en goutte-à-goutte enterré sont reliées à une borne d'irrigation du réseau de Labarthe Masseube.

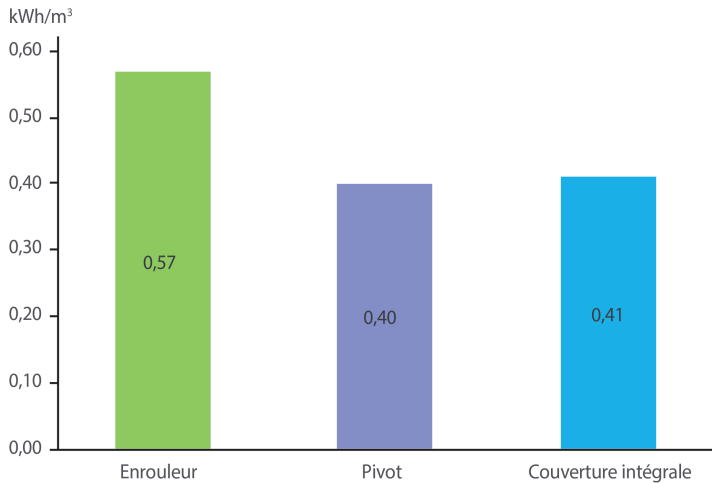


Figure 7.26. Moyenne des consommations énergétiques (en kWh/m³) des 42 installations suivies dans le projet EDEN, par type de matériel (enrouleur, pivot et couverture intégrale).

Il n'est donc pas possible, comme sur les installations en aspersion, d'intégrer le pompage dans les pertes d'énergie. Le schéma des points de mesure de pression sur le dispositif est représenté dans la figure 7.27.

En regardant en détail une irrigation, on note la part importante de la perte de charge due à l'injecteur d'engrais, qui consomme 1,5 bar de perte de charge en moyenne lorsque les trois parcelles sont en irrigation simultanée, et 0,5 bar lorsqu'une seule parcelle est en irrigation. Par contre, la perte de charge dans le filtre à sable et tamis n'est que de 0,4 bar. Les pressions de services du goutte-à-goutte enterré sont de 2,5 bars sur les parcelles ayant de la gaine rigide (100 et 150 GR) et de 1,3 bar sur la parcelle ayant de la gaine souple (100 GS).

Il est important de noter qu'avec une pompe adaptée, le goutte-à-goutte est un système très économe en énergie (il demande moins de 2 bars de pression de service en entrée du système).

Sur les installations déjà en place, un premier diagnostic de la consommation énergétique est possible. Il suffit de relever les compteurs d'eau et d'électricité avant et après une position d'irrigation. Il est conseillé de choisir une position « médiane » (ni la plus éloignée de la pompe, ni la plus proche) et, dans les parcelles à dénivelée, de prendre une dénivelée moyenne. Il faut ensuite diviser le relevé compteur électrique par le relevé compteur eau pour obtenir son ratio en kWh/m³. La valeur de kWh/m³ de l'installation ne dépend pas exclusivement des pertes de pression dans les tuyaux, mais également de la dénivelée de la parcelle et de la distance de la parcelle au point de prélèvement.

C'est pourquoi il est important de comparer des parcelles qui ont le même niveau de contrainte, en utilisant les standards de perte de charge. Par exemple, considérons une perte de charge maximale de $p = 25 \text{ m/km}$. On ramène l'ensemble à des hauteurs d'eau avec le calcul :

$$C = \text{Hasp} + \text{dénivelée} + p \times \text{distance moyenne}$$

Avec Hasp + dénivelée = hauteur physique entre la ressource et la parcelle, charge minimale irréductible,

$p \times \text{distance moyenne}$: perte de charge moyenne.

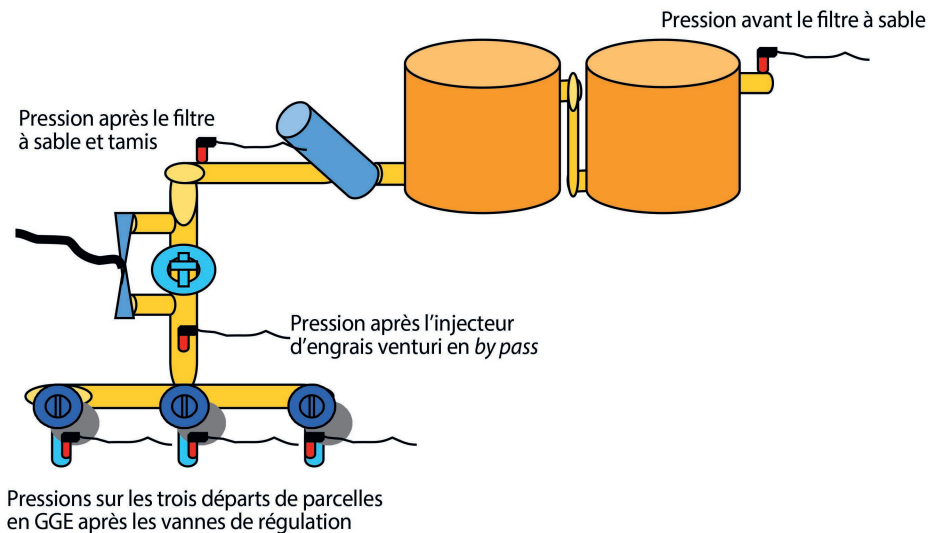


Figure 7.27. Schéma des points de mesure de pression sur un dispositif d'irrigation en goutte-à-goutte alimenté par une borne collective d'irrigation.

Types de ressource énergétique et tarification

Tarification électrique

Quelques données générales

Acteurs du marché de l'énergie. Dans l'esprit du grand public, le marché de l'électricité en France a longtemps été et reste encore l'apanage d'un seul acteur, dirigé par l'État, EDF (Électricité de France), présent sur tous les secteurs du marché, de la production à la fourniture du client en passant par la distribution.

Cette image du marché a certes été majoritairement vraie de 1945 aux années 2000, mais la situation a depuis fortement évolué. Depuis la réorganisation initiée par la loi 2000-108 du 10 février 2000 ouvrant les champs de la libéralisation du marché de l'énergie, deux évolutions majeures ont vu le jour :

- la création de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) en mars 2000, qui veille au bon fonctionnement des marchés de l'électricité (et du gaz) en France, au bénéfice du consommateur final et en cohérence avec les objectifs de la politique énergétique ;
- la loi NOME a été promulguée, instituant une nouvelle organisation du marché de l'électricité en France (loi n° 2010-1488 du 7 décembre 2010).

Depuis, le marché est désormais pour partie libéralisé. Il est divisé en trois grandes catégories d'acteurs sous la houlette de la CRE : **les producteurs, les achemineurs, les fournisseurs.**

Comme son nom l'indique, le *producteur* est celui qui produit l'énergie. Il détient les actifs de production nommés « centrales » (nucléaires, hydroélectriques, éoliens, photovoltaïques, thermiques, etc.).

EDF, qui possède la totalité des capacités de production nucléaires et la grande majorité des principales capacités hydrauliques, reste le principal producteur de manière très majoritaire, plus de 80 % de la production française en 2017.

Il existe cependant d'autres producteurs à dimension industrielle, notamment les hydrauliciens SHEM et CNR ou encore les régies locales d'électricité.

Le modèle français laisse également de la place aux producteurs autonomes. Historiquement, il s'agit principalement d'acteurs de la petite hydroélectricité qui possèdent une ou plusieurs microcentrales. Il existe plus de 2 400 centrales hydroélectriques en France.

L'essor des énergies renouvelables depuis une dizaine d'années a permis à de nouveaux acteurs d'apparaître, notamment dans le domaine de l'éolien et du photovoltaïque (Quadran, Akuo, etc.). De plus, avec quelques panneaux photovoltaïques sur le toit de sa maison ou sur un hangar, n'importe quel particulier ou agriculteur peut devenir producteur.

L'*acheminement* de l'électricité est une activité régulée sans concurrence. Elle consiste en la gestion du réseau (lignes et postes) tant sur le plan matériel que sur l'équilibre production/consommation. Elle se décline en deux niveaux :

- le transport assuré par RTE (pour Réseau de transport d'électricité), qui concerne le réseau haute tension (supérieur à 20 kVA) ;
- la distribution assurée par Enedis (pour Électricité Réseau Distribution France), qui concerne le réseau basse et moyenne tension (jusqu'à 20 kVA), pour 95 % de la distribution.

Sur certaines parties du territoire, la distribution peut être assurée par les ELD (entreprises locales de distribution), également appelées « régies », pour 5 % de la distribution.

Le *fournisseur* est l'acteur qui vend l'énergie au consommateur professionnel ou particulier. Son activité est purement commerciale ; il achète de l'électricité aux fournisseurs et la revend aux consommateurs.

Pendant de longues années, le marché de la fourniture d'électricité a été réglementé par l'État français avec EDF comme unique fournisseur. Mais l'ouverture du marché, qui a commencé en 1999 suite à une directive européenne et qui s'est accélérée en 2016 avec la fin des tarifs réglementés supérieurs à 36 kVA pour les professionnels et les collectivités, permet désormais à un nombre croissant d'acteurs de concurrencer l'opérateur historique. Parmi la vingtaine de fournisseurs actifs auprès des professionnels, nous pouvons citer Total, Engie, Eni, Énergie d'ici, E. Leclerc.

Éléments de langage « électriques » à usage de l'irrigant. L'irrigant, comme tout consommateur d'énergie, s'adresse à un fournisseur afin de pouvoir utiliser la ressource énergétique nécessaire à son installation. Dans la relation contractuelle liant l'utilisateur (l'irrigant) et le fournisseur, trois éléments sont à considérer :

- le point de connexion de l'utilisateur coïncide avec la limite de propriété entre les ouvrages électriques de l'utilisateur et les ouvrages électriques du réseau de distribution. Il est souvent matérialisé par un appareil de coupure (disjoncteur ou porte-fusibles) permettant d'arrêter la circulation du courant électrique. Il coïncide généralement avec le point de livraison ;
- le point de livraison à l'utilisateur est dénommé par le fournisseur. Ce point coïncide généralement avec le point de comptage (compteur). Il est systématiquement indiqué sur les factures ;

– le coût de l'énergie (la facture) : la facture d'électricité est composée d'un abonnement, additionné à un prix du kWh qu'il convient de multiplier par la consommation pour obtenir le montant total. Toutefois, le prix de l'électricité n'est pas unique, puisqu'il dépend de l'offre souscrite auprès du fournisseur de son choix, de l'option tarifaire et de la puissance de compteur.

À titre d'exemple, l'acheminement d'énergie Enedis³⁴ retient la segmentation suivante pour les utilisateurs de connexion en soutirage :

- pour les consommateurs et les fournisseurs d'électricité :
 - C1 : point de connexion auquel est associé un contrat CARD³⁵,
 - C2 : point de connexion raccordé en HTA, auquel est associé un contrat unique et pour lequel la reconstitution des flux est assurée *via* la courbe de charge mesurée,
 - C3 : point de connexion raccordé en HTA, auquel est associé un contrat unique et pour lequel la reconstitution des flux est assurée *via* la courbe de charge profilée,
 - C4 : point de connexion raccordé en BT > 36 kVA et auquel est associé un contrat unique,
 - C5 : point de connexion raccordé en BT ≤ 36 kVA et auquel est associé un contrat unique ;
- en irrigation, les segments de puissance les plus répandus sont les C2, C3 et C4. Au travers de ces contrats uniques (à la différence du contrat CARD), l'utilisateur s'adresse directement à un fournisseur. Ce fournisseur est l'interlocuteur privilégié pour la vie du contrat : facturation, mise en service, résiliation, changement de fournisseur, etc.

Besoin en énergie électrique : la spécificité du profil irrigant

Dans tout système de production et de fourniture d'eau sous pression, la consommation en énergie est directement liée à la consommation en eau (son usage). Par distinction avec un profil de producteur d'eau à usage d'alimentation en eau potable, la production d'eau sous pression à usage d'irrigation *via* des réseaux de distribution d'eaux brutes, outre un niveau de pression requis en sortie de station plus élevé (jusqu'à 25 bars), présente deux particularités principales.

La première de ces particularités est la saisonnalité de la consommation. La période d'irrigation s'étend d'une manière générale sur une période de 2 à 4 mois, de mai à septembre en France. Il peut également exister des besoins en pompage pour le remplissage de retenues de stockage et, dans ce cas, le besoin en énergie électrique peut débuter en hiver ou au printemps, selon la tension sur la ressource en eau et sa disponibilité. Il en résulte un profil de consommation énergétique caractéristique de l'activité d'irrigation. À titre d'exemple, la figure 7.28 présente une courbe de consommation énergétique type liée à l'activité d'irrigation.

La seconde particularité est la variation interannuelle. Les consommations en énergie dépendent de l'assolement et des besoins en eau des plantes et de fait peuvent connaître une grande variabilité en fonction de l'année climatique. Le suivi de la consommation énergétique d'un exploitant de réseau sous pression depuis 2001 montre cette variation pouvant aller du simple au double (figure 7.29).

³⁴ Enedis met à disposition des professionnels, en ligne et en toute transparence, un catalogue des prestations (descriptifs et tarifs : https://www.enedis.fr/sites/default/files/Enedis-NOI-CF_16E.pdf). Enedis met également à disposition un glossaire (<https://www.enedis.fr/faq/glossaire>) afin d'aller plus loin dans la compréhension de certaines notions.

³⁵ Contrat CARD : il s'agit d'un contrat passé entre un consommateur et un distributeur d'électricité. Ce contrat couvre uniquement l'acheminement d'électricité. Il doit donc être complété par un second contrat passé avec un ou plusieurs fournisseurs d'électricité. Le contrat CARD concerne essentiellement les entreprises et collectivités locales (© Enedis 2020).

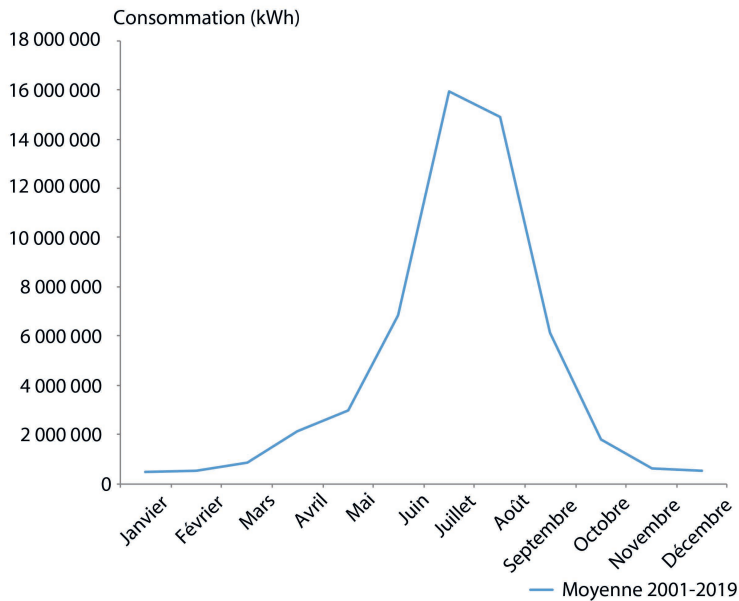


Figure 7.28. Profil annuel type de consommation en énergie pour la production d’eau brute sous pression à destination d’un usage d’irrigation (ensemble de réseaux collectifs du sud-ouest de la France en gestion CACG) (source : CACG, 2020).

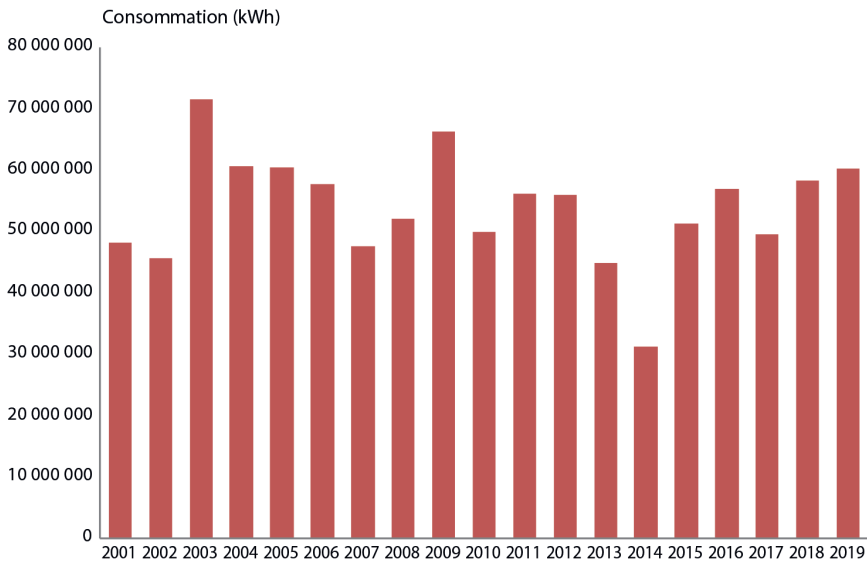


Figure 7.29. Consommation annuelle en énergie électrique de tous les sites CACG C2-C3-C4-C5 (réseaux collectifs du sud-ouest de la France en gestion CACG) (source : CACG, 2020).

Composition d'une facture d'électricité

La figure 7.30 identifie toutes les composantes détaillées dans ce chapitre sur une facture d'électricité, résultant d'un groupement d'achat mené par la CACG en 2016.

De manière très schématique, le prix du kWh se compose d'un tiers pour la production (la part mise en concurrence), un tiers pour l'acheminement et un tiers pour les taxes.

L'acheminement est financé par le **tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité (Turpe)**. Ce Turpe est partagé entre RTE, gestionnaire du réseau de transport d'électricité, Enedis, gestionnaire du réseau de distribution sur 95 % du territoire, et les distributeurs non nationalisés, gestionnaires du réseau de distribution sur les 5 % restants.

Les Turpe sont élaborés au sein de la Commission de régulation de l'énergie (CRE), et sont appliqués à tous les utilisateurs en HTA (haute tension A) et BT (basse tension), quel que soit leur fournisseur d'énergie.

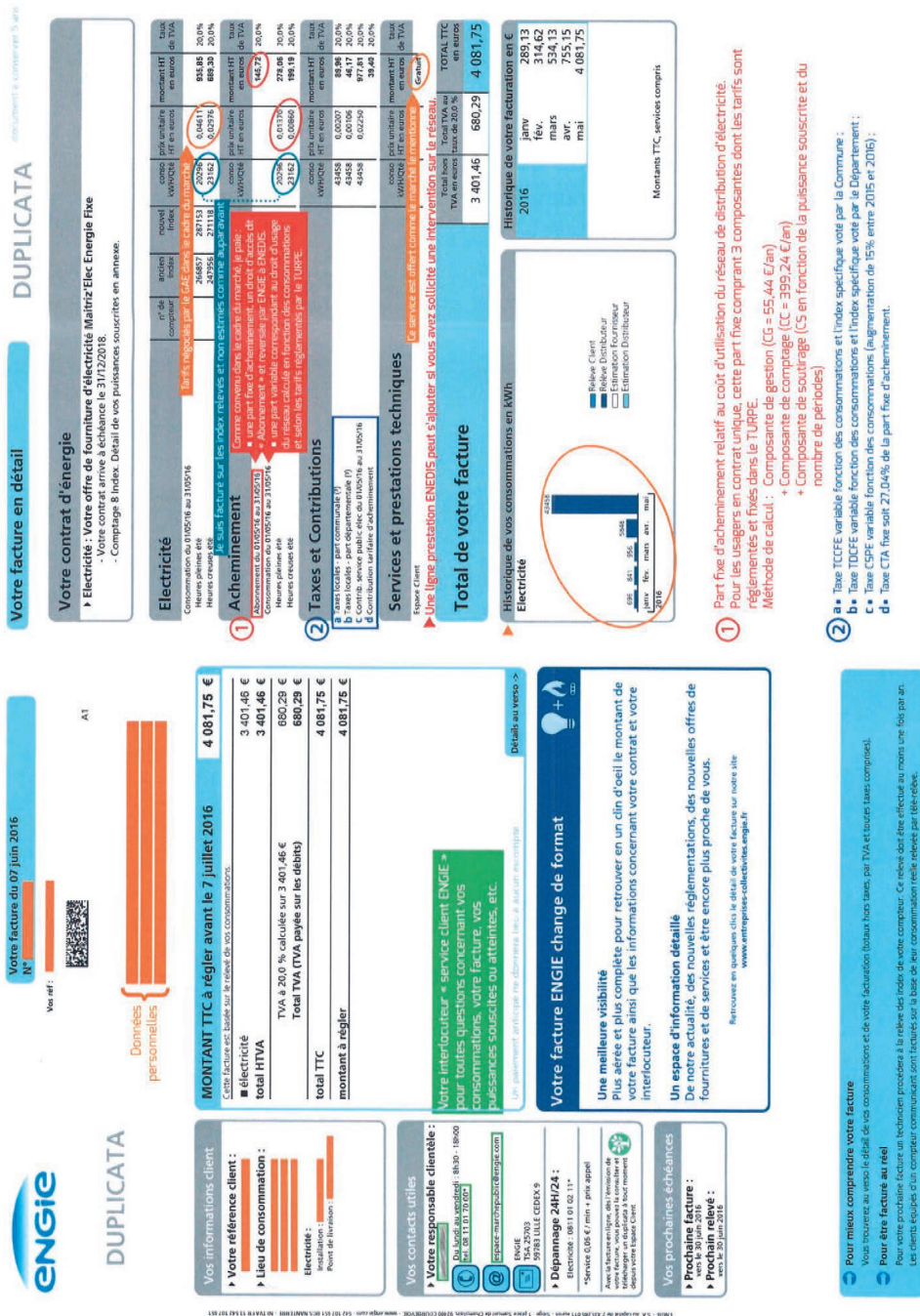
Le Turpe est facturé par les gestionnaires de réseaux aux fournisseurs d'électricité, qui le répercutent sur leurs factures aux utilisateurs. Pour les points de connexion C2 à C5, le Turpe est payé directement via la facture d'électricité que le fournisseur reverse ensuite au gestionnaire de réseau (contrat unique).

Le Turpe est réévalué tous les 4 ans environ, avec une évolution annuelle de ses prix.

Concrètement, les composantes d'acheminement du Turpe qu'un irrigant retrouve sur sa facture d'électricité sont la composante de gestion (CG), la composante de comptage (CC) et la composante de soutirage (CS). Elles viennent constituer la part fixe d'acheminement.

La composante suivante de la facture concerne la fourniture. Les taxes et contributions applicables sont les suivantes :

- la contribution tarifaire d'acheminement (CTA) est une contribution fixe dont le montant est égal à 27,04 % de la partie fixe du tarif d'acheminement appliqué par les gestionnaires des réseaux de distribution d'électricité. Elle finance les droits spécifiques relatifs à l'assurance vieillesse des personnels des secteurs régulés relevant du régime des industries électriques et gazières ;
- la contribution au service public de l'électricité (CSPE) est une contribution variable dans la mesure où elle s'applique au volume d'énergie consommé. Fixée à 22,5 €/MWh au 1^{er} janvier 2016, elle est supportée par tous les consommateurs d'électricité (avec des dispositions de droit à taux réduit dans certaines conditions). Elle finance les charges liées à plusieurs missions de service public de l'électricité (Médiateur national de l'énergie, Tarif de première nécessité, frais liés à l'obligation de rachat d'énergie électrique « verte » pour certains fournisseurs historiques) ;
- la taxe sur la valeur ajoutée s'applique à 5,5 % sur l'abonnement et la CTA et à 20 % sur la part proportionnelle (y compris la CSPE), pour une puissance souscrite inférieure ou égale à 36 kVA ; et à 20 % sur l'ensemble de la facture, pour une puissance souscrite supérieure à 36 kVA ;
- les TCCFE et la TDCFE : ces taxes, dites communale/départementale sur la consommation finale d'électricité, étant fixées au niveau communal ou départemental, diffèrent dans leur montant en fonction du taux validé par la collectivité considérée, dans la fourchette établie par l'État (laquelle fourchette est définie par les lois de finances). Dans les faits, on observe que la collectivité décide d'un coefficient qui est ensuite multiplié par le montant de la taxe choisi par l'État. À noter, les montants diffèrent également en fonction de la puissance souscrite par les professionnels (le montant sera différent entre une puissance entre 36 et 250 kVA, et une puissance souscrite inférieure à 36 kVA). Enfin, elles ne s'appliquent pas aux « gros consommateurs », c'est-à-dire ceux qui ont souscrit une puissance supérieure à 250 kVA.



La tarification du kWh. Depuis l'ouverture du marché de l'énergie électrique à la concurrence pour les professionnels, une grande diversité de formules tarifaires existe. Parmi elles, on peut citer :

- avec un abonnement ou sans abonnement ;
- avec ou sans engagement de consommation (en kWh) sur la durée du contrat : lorsqu'un engagement de consommation annuelle est contracté, des pénalités peuvent s'appliquer au-delà et en deçà dudit volume ;
- avec une facturation prévisionnelle ou réelle.

Dans tous les cas, le tarif du kWh s'exprime dans la majorité des cas sur la base des périodes horosaisonnnières suivantes, en cohérence avec la définition des périodes du distributeur (Enedis par exemple).

Tableau 7.10. Périodes horosaisonnnières Enedis.

Tension d'alimentation	Segment Enedis	Désignation des postes horosaisonniers Turpe
HTA	C2	PTE
HTA	C2	HPH
HTA	C2	HCH
HTA	C2	HPE
HTA	C2	HCE
HTA	C3	PTE
HTA	C3	HPH
HTA	C3	HCH
HTA	C3	HPE
HTA	C3	HCE
BT	C4	HPH
BT	C4	HCH
BT	C4	HPE
BT	C4	HCE

Mémento. Les 5 classes temporelles en tarif HTA CU LU

La saison haute* : du 1^{er} novembre au 31 mars inclus

PTE (pointe) :

- soit fixe de décembre à février inclus, 2 h le matin (entre 8 h et 12 h) et 2 h le soir (entre 17 h-21 h) ;
- soit mobile : 15 jours par an (déterminés par RTE la veille pour le lendemain).

HCH (heure creuse saison haute) : 8 h/jour de 21 h 30 à 7 h 30

HPH (heure pleine saison haute) : 16 h/jour hors HCH et PTE

La saison basse, ou « été »* : du 1^{er} avril au 31 octobre inclus

HCE ou HCB (heure creuse saison basse) : 8 h/jour de 21 h 30 à 7 h 30

HPE ou HPB (heure pleine saison basse) : 16 h/jour hors HCE

* Tous les dimanches sont en heures creuses.

Même si les fournisseurs d'électricité ont des outils de vérification de leurs factures avant émission, les bons réflexes de contrôle très rapides peuvent être résumés :

- vérification du calcul de la TVA ;
- vérification du tarif du kWh appliqué par période ;
- en cas de pénalité appliquée, vérifier que la puissance souscrite affichée sur la facture est bien celle signée lors de la contractualisation.

Éléments de contexte du marché de l'énergie

Hyper-volatilité. Après une année 2016 qui a vu les cours de l'électricité s'effondrer sous les 30 €/MWh, l'année 2017 a vu une remontée des cours qui s'est accentuée en 2018 pour atteindre les 60 €/MWh. De plus, l'année 2018 a été marquée par une très forte volatilité des cours qui rend difficile la lisibilité à long terme des dépenses énergétiques. Cette remontée des cours associée à une forte volatilité est due à plusieurs phénomènes, en particulier les longs arrêts maintenance des centrales nucléaires et une instabilité géopolitique.

Depuis la loi NOME. La loi NOME, nouvelle organisation du marché de l'électricité, promulguée le 7 décembre 2010, prévoit les conditions de l'ouverture du marché et de l'organisation de la concurrence pour les clients professionnels et les collectivités. Cette loi est également à l'origine du régulateur du marché, la Commission de régulation de l'énergie (CRE), et du mécanisme d'accès régulé à l'électricité nucléaire historique (Arenh).

En ce qui concerne les irrigants, la principale mesure liée à la loi NOME est la fin annoncée des tarifs régulés de l'électricité pour les tarifs verts et tarifs jaunes au 1^{er} janvier 2016. Depuis cette date, chaque client professionnel ou collectivité a l'obligation de demander une offre de fourniture à un tarif non régulé à son fournisseur, EDF ou fournisseur alternatif.

Cette mesure complexifie le fonctionnement du marché de l'électricité, mais offre des possibilités de mise en concurrence des différents fournisseurs.

Arenh. L'Arenh, accès régulé à l'énergie nucléaire historique, est un mécanisme mis en place par la loi NOME pour promouvoir la concurrence entre les fournisseurs alternatifs et l'opérateur historique EDF. Ce dernier étant le seul à détenir des actifs de production nucléaires, il bénéficie d'un avantage concurrentiel. Aussi, il lui est imposé de mettre à disposition de ses concurrents 100 TWh (1/4 de la production nucléaire) au prix de 42 €/MWh.

Pendant plusieurs années, les prix du marché ont évolué sous le seuil de 42 €/MWh, aussi les fournisseurs alternatifs ne se sont pas rués sur les 100 TWh disponibles, préférant se fournir directement sur le marché. Mais la forte remontée des cours de l'électricité en 2017 et 2018 a rendu très compétitives les offres basées sur une fourniture Arenh au point de dépasser le plafond en 2018. La loi NOME avait prévu ce cas, qui a conduit à une répartition des droits Arenh au prorata des demandes.

Ce mécanisme est aujourd'hui critiqué de toutes parts, à la fois par EDF qui demande une réévaluation à la hausse du montant de l'Arenh et par les fournisseurs alternatifs qui demandent un déplafonnement de l'Arenh.

Marché de capacité. Face au risque de *black-out* (coupure d'électricité massive) lorsque les températures sont rigoureuses en hiver et que le réseau subit de fortes tensions avec une consommation qui flambe, il a été décidé de mettre en place un dispositif visant à financer les centrales électriques mobilisables en période de crise. Ces centrales, thermiques principalement mais également hydrauliques, nécessitent un fort entretien toute l'année pour un fonctionnement très ponctuel en hiver. Le mécanisme de capacité, entré en vigueur le 1^{er} janvier 2017, consiste donc à vendre aux enchères des capacités de production. D'un côté, les producteurs cherchent un complément de rémunération pour entretenir leurs installations, de l'autre, les fournisseurs cherchent à garantir leur approvisionnement en énergie en tout temps.

La première enchère, fin 2016, pour définir le montant de la capacité en 2017 a atteint 10 €/kW. Pour la capacité 2019, les dernières enchères de 2018 avoisinent 18 €/kW.

Le mécanisme de capacité visant à garantir la fourniture en hiver, il ne devrait en théorie affecter qu'à la marge la facture des irrigants. Néanmoins, certains fournisseurs d'électricité l'appliquent toute l'année.

Leviers d'optimisation de la facture énergétique

Stratégie d'achat. Depuis la mise en concurrence rendue obligatoire pour les professionnels (puissance supérieure à 36 kVA) le 1^{er} janvier 2016, des stratégies d'achat se sont organisées, et s'affinent depuis tant du côté des usagers que des fournisseurs, qui se sont structurés pour y répondre. Parmi elles, on note l'existence des offres de groupe pour les structures de droit privé, et des groupements de commandes pour les structures de droit public.

Quelle que soit la structuration, l'objectif visé est le poids du groupement en faveur du meilleur prix, avec mutualisation des coûts de passation pour les structures de droit public.

Exemple du groupement d'achat d'électricité initié par la CACG en 2017

La Compagnie d'aménagement de Gascogne (CACG) a initié et porte, depuis le 23 juin 2017, un groupement de commandes pour l'achat d'électricité (GAE) réunissant des entités publiques et privées du monde de l'irrigation. Il a pour objet la passation et la signature des marchés de fourniture et d'acheminement d'électricité et des services associés pour les besoins propres de ses membres.

Ce GAE irrigation est situé dans les départements français de l'Aveyron, de la Charente, de la Vendée, des Pyrénées-Atlantiques, des Hautes-Pyrénées, du Tarn-et-Garonne, du Gers, du Lot-et-Garonne, de la Haute-Garonne, des Landes, du Tarn, du Lot, de l'Aude et de l'Ariège. Créé pour une durée illimitée, il se base sur le fondement de l'article 8-VII du Code des marchés publics, désormais abrogé et remplacé par l'article 28 de l'ordonnance n° 2015-899 du 23 juillet 2015, lui-même abrogé et remplacé par les articles L. 2113-6 à L. 2113-8 du Code de la commande publique.

Ce groupement est composé en 2020 de 206 membres, il totalise plus de 600 points de livraison et concerne les segments C2, C3, C4 et C5. Cela représente près de 200 MW de souscrits. Finalement, cela a généré une économie moyenne pour chaque usager de 3 à 5 % sur la facture annuelle.

Pour fixer les idées, prenons le cas d'un adhérent du GAE, l'ASA de Miradoux (32) en 2019. Pour 130 l/s souscrits (et 20,4 bars de pression de départ), une surface irriguée de l'ordre de 220 ha, l'apport d'irrigation de 1 600 m³/ha a représenté un coût énergétique de 130 €/ha pour un montant global de 0,086 €/kWh.

Optimisation des consommations par période. Ce type d'optimisation est basé sur l'analyse des besoins de consommations, axés préférentiellement en heures creuses. Sa mise en place sera soumise aux contraintes agroclimatiques, comme celles sur la ressource en eau.

Optimisation des puissances souscrites. La plupart des fournisseurs proposent aujourd'hui ce type de services, annuellement dans leur proposition tarifaire ou à la demande. Le premier niveau d'optimisation réside à s'affranchir du paiement de pénalité de dépassement de puissance, par non-souscription sur une période tarifaire. Le second niveau, impliquant une analyse plus fine, consiste à optimiser son tarif en fonction des besoins, observés sur une chronique de 5 ans minimum.

Capacité d'effacement. En réponse à un signal externe reflétant l'état du système électrique ou les prix sur les marchés de l'énergie, un consommateur peut « effacer », c'est-à-dire réduire ponctuellement sa consommation électrique. Historiquement, un signal tarifaire était envoyé par le fournisseur d'électricité aux sites concernés (tarifs EJP et Tempo). En France, les capacités d'effacement peuvent être mobilisées soit par des signaux tarifaires sur les offres de marché ou les Tarifs réglementés de vente d'électricité (TRV), soit par des opérateurs non liés aux fournisseurs des sites effacés.

Taux réduit de la CSPE. La CSPE peut représenter de 15 à 25 % des coûts d'électricité à taux plein (22,5 €/MWh). Pouvoir prétendre à un taux réduit représente donc une source d'économie non négligeable. Pour être éligible, il faut justifier d'une activité industrielle (code NAF) et électro-intensive. À ce titre, cette mesure parafiscale peut concerner toute entreprise agricole qui peut justifier des deux critères précités.

Toutes les informations sur les conditions d'éligibilité et les modalités d'accès sont disponibles auprès des douanes.

Production d'électricité (à partir d'énergies renouvelables). L'autoconsommation électrique, c'est tout simplement produire sa propre électricité. Cela a notamment pour avantage une baisse de sa facture d'électricité. Ce mode de consommation est encadré par une loi depuis février 2017 avec un cadre juridique et une définition officielle.

La loi prévoit ainsi deux types d'autoconsommation dont la principale différence est la gestion des excédents d'électricité. La première est l'autoconsommation totale, pour laquelle les surplus d'électricité sont injectés dans le réseau gratuitement, ou perdus dans le cas d'une installation en site isolé. La seconde est l'autoconsommation partielle.

Se distinguent également :

- une opération d'autoconsommation individuelle : elle est le fait pour un producteur, dit « auto-producteur », de « consommer lui-même et sur un même site tout ou partie de l'électricité produite par son installation ». La part d'électricité autoconsommée peut l'être soit instantanément, soit après une période de stockage ;
- l'opération d'autoconsommation est collective lorsque « la fourniture d'électricité est effectuée entre un ou plusieurs producteurs et un ou plusieurs consommateurs finals liés entre eux au sein d'une personne morale et dont les points de soutirage et d'injection sont situés en aval d'un même poste public de transformation d'électricité de moyenne en basse tension ».

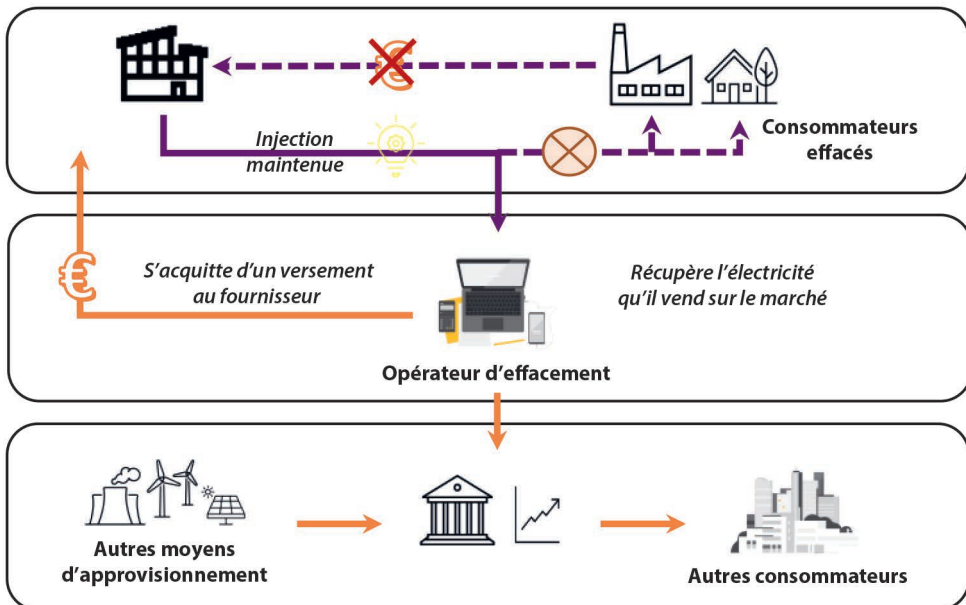


Figure 7.31. Transferts physiques et financiers.

Liens utiles

Site officiel de la Commission de régulation de l'énergie française : <https://www.cre.fr/>
 Marché de l'électricité en France : <https://www.enedis.fr/le-marche-de-lelectricite-en-france>
 Tarif d'acheminement de l'électricité en France :
<https://www.enedis.fr/le-tarif-dacheminement-de-lelectricite-turpe>
 Liste des fournisseurs d'électricité en France :
<https://www.energie-info.fr/l-electricite-et-le-gaz-en-france/>
 Fiscalité de l'énergie en France : <https://www.ecologie.gouv.fr/fiscalite-des-energies>

Coût de l'énergie thermique

Le coût de l'énergie thermique va dépendre de la valeur du litre de gazole, montant d'une grande variabilité en fonction de la conjoncture économique (pression de l'offre et de la demande sur la valeur du brut, taxation des États pour l'utilisateur final, etc.).

La conversion des litres de gazole en kWh d'énergie finale répond à la règle :

1 kWh = 3 600 kJoules, ou encore 3,6 MJoules.

La densité énergétique du gazole est de 40,3 MJoules par litre.

Pour résumer, 1 kWh d'énergie finale correspond à la consommation de 0,089 litre de gazole.

Approche environnementale et comparaison des sources d'énergie

Évaluation environnementale d'un système irrigué

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. L'ACV inclut de multiples critères environnementaux sur l'utilisation des ressources primaires ou la dégradation des milieux. L'analyse est menée globalement, à partir d'inventaires des flux moyens en provenance et à destination du système étudié : apports d'eau, d'énergie primaire, de matières premières, et émissions de gaz à effet de serre, rejets dans le sol, dans l'eau, etc. L'inventaire doit inclure d'une part la phase de production des équipements et leur devenir après utilisation, d'autre part la phase d'exploitation. L'impact de la phase de production est d'autant plus faible que la durée de vie est longue.

Pour les systèmes d'irrigation, on peut définir différentes unités fonctionnelles pour évaluer l'impact global de l'irrigation. Par exemple, la production de 1 kg de bœuf aura un impact différent selon le mode d'élevage et d'alimentation, qui pourra avoir recours ou non à des filières irriguées.

Pour comparer deux modes d'irrigation, nous devons considérer la même unité fonctionnelle – par exemple 1 kg de matière sèche produite. Il s'agit alors de calculer l'impact moyen de chaque système d'irrigation pour obtenir cette même production.

Pour l'impact environnemental lié au prélèvement d'eau, on s'attend à ce que le goutte-à-goutte soit largement plus favorable, compte tenu de l'efficacité atteignable (voir valeurs standards pour l'enrouleur et le goutte-à-goutte dans la section « Efficacité des différents systèmes d'irrigation », p. 286). Le volume d'eau utilisé pour la phase de production du matériel est généralement négligeable sur l'ensemble du cycle de vie.

Si on considère maintenant l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre, on calcule l'indicateur « rejets de CO₂ ou équivalents », exprimé en grammes de CO₂-équivalent (gCO₂e). Il inclut tous les rejets de gaz à effet de serre, en les ramenant à des gCO₂e tenant compte du potentiel de

réchauffement global de chaque substance. Cet indicateur doit inclure tout le cycle de vie des ressources utilisées pour le système étudié, jusqu'au recyclage ou l'incinération. On raisonne sur des standards moyens, tout en étant conscient de la variabilité des impacts selon les chaînes de production ou de recyclage.

Pour les systèmes d'irrigation, il s'agit notamment de la phase de production des matériels (production des gaines d'irrigation, des bobines et tuyaux d'enrouleur, etc.), du devenir des matériaux après usage (ex. : recyclage des gaines) et de la phase d'exploitation (production d'énergie de pompage essentiellement). La durée de vie d'un équipement est un paramètre essentiel pour l'amortissement de l'impact de la phase de production.

L'exemple qui suit illustre le calcul pour deux systèmes d'irrigation possibles pour une même culture.

Exemple d'impact carbone et eau de deux systèmes d'irrigation à la parcelle (enrouleur vs goutte-à-goutte enterré sur 5 ha)

Considérons une parcelle de 250 m sur 200 m (5 ha), cultivée en maïs, en région montpelliéraine, avec soit un enrouleur avec un canon, soit un système de goutte-à-goutte enterré. On considère une évapotranspiration de référence de 180 mm pour le mois de pointe (juillet), $kc = 1,15$. L'alimentation en eau est assurée par un forage dans un aquifère, à une profondeur de 30 m.

L'« empreinte carbone » de l'irrigation du kg de maïs produit peut être estimée à partir de la masse de chaque matériau dont est constitué l'équipement, divisée par le nombre de kg de maïs produit sur toute la durée de vie de l'équipement. Il faut ajouter à cela l'empreinte énergétique du pompage.

Dans cet exemple, nous prenons un groupe de pompage avec une pompe immergée. Pour un mètre cube d'eau, il faut apporter une charge égale à la hauteur de relevage plus les pertes de charge dans le transport jusqu'au matériel d'application, plus la pression nécessaire en entrée du matériel d'application. L'énergie correspondante est obtenue en multipliant cette charge par le poids d'un mètre cube.

L'énergie électrique consommée s'obtient en divisant l'énergie hydraulique par le rendement énergétique du système de pompage. L'empreinte associée dépend du type d'énergie primaire utilisée (nucléaire, combustion hydrocarbures, éolienne, photovoltaïque, hydroélectrique, etc.). L'existence de réseaux maillés basés sur une combinaison de sources primaires amène à définir un mix énergétique moyen tenant compte de ces combinaisons. En 2019, pour le mix énergétique français, le taux d'émission moyen est pris à $74 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$. À titre de comparaison pour le diesel ou le gazole, le taux d'émission moyen est évalué à $330 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ (source : Base bilan GES de l'Ademe). L'impact carbone des différents matériaux dépend des filières (matière primaire ou issue du recyclage notamment). Les estimations dans les tableaux 7.11 et 7.12 s'appuient sur les valeurs moyennes publiées par l'Ademe pour l'année 2017.

Tableau 7.11. Impact carbone de l'irrigation. Comparaison de l'enrouleur et du goutte-à-goutte enterré.

Technique	Enrouleur	Goutte-à-goutte enterré
Choix de dimensionnement Parcelle 5 ha	Longueur de bobine 200 m, PE 70 (épaisseur PE : 5,2 mm) Poids enrouleur : 700 kg, dont tuyau 200 kg de PE Débit d'équipement $30 \text{ m}^3/\text{h}$, pression au forage 10 bars Efficacité d'application 70 %	Longueur de gaine : 62 500 m (625 rampes de 100 m tous les 80 cm), débit de $2 \text{ l/h}/50 \text{ cm}$ – gaine 17/20 mm Débit d'équipement de $18 \text{ m}^3/\text{h}$ (parcelle divisée en 14 secteurs) Station de tête 180 kg, dont 126 acier, 18 aluminium, 36 PE. Pression en entrée 3,5 bars Efficacité d'application 100 %
Impact carbone station de pompage	Hypothèse durée de vie 15 ans, conduite de forage + refoulement 50 m, fonte en acier recyclé DN100 (épaisseur fonte 6 mm) Acier + fonte 600 kg, cuivre 20 kg, PE/PVC 10 kg Total $607 \text{ kg CO}_2\text{e}$, soit $8 \text{ kg CO}_2\text{e/ha/an}$	Hypothèse durée de vie 15 ans, conduite de forage + refoulement 50 m, fonte en acier recyclé DN80 (épaisseur fonte 5 mm) Acier + fonte 380 kg, cuivre 15 kg, PE/PVC 8 kg Total $420 \text{ kg CO}_2\text{e}$, soit $5,6 \text{ kg CO}_2\text{e/ha/an}$

Impact carbone système d'irrigation	220 kg PE : 587 kg CO ₂ e 440 kg acier : 415 kg CO ₂ e Avec une durée de vie de 10 ans : 20 kg CO₂e/an/ha	6 500 kg de PE (gaine + goutteurs + station) : 18 200 kg CO ₂ e 126 kg acier : 118 kg CO ₂ e 18 kg Al : 10 kg CO ₂ e Avec une durée de vie de 15 ans : 240 kg CO₂e/an/ha
	Pour l'énergie : pompe 11 kW 0,70 kWh/m ³ (hypothèse de rendement global 50 %), soit 27 300 kWh/an, ce qui donne 404 kg CO₂e/an/ha	Pour l'énergie : pompe 5kW 0,30 kWh/m ³ (hypothèse de rendement global 50 %), soit 9 000 kWh/an, ce qui donne 133 kg CO₂e/an/ha
Impact carbone (forage + système d'application + fonctionnement)	432 kg CO₂e/an/ha Soit au total 31 gCO ₂ /kg de maïs produit (hypothèse 140 qx/ha)	379 kg CO₂e/an/ha Soit au total 27 gCO ₂ /kg de maïs produit (hypothèse 140 qx/ha)
Impact eau	Volume annuel 39 000 m ³ , soit environ 0,56 m³/kg	Volume annuel 30 000 m ³ , soit environ 0,43 m³/kg

Tableau 7.12. Éléments pour le calcul de l'impact carbone.

Quantité	Unité	Valeur
Masse volumique PE	kg/m ³	950
Masse volumique acier	kg/m ³	7 800
Masse volumique fonte	kg/m ³	7 000
Valeurs unitaires d'impact carbone		
PE (polyéthylène)	kg CO ₂ e/t	2 916
PVC	kg CO ₂ e/t	1 446
Métal ferreux recyclé	kg CO ₂ e/t	938
Métal ferreux (filière vierge)	kg CO ₂ e/t	2 200
Aluminium recyclé	kg CO ₂ e/t	562
Cuivre (filière recyclage)	kg CO ₂ e/t	1 304
Diesel ou gazole pur	gCO ₂ e/kWh	330
Mix énergétique France	g/kWh	74

Logiquement, compte tenu de l'efficacité d'application atteignable, l'impact « eau » est plus faible pour l'irrigation localisée, à condition d'avoir une bonne homogénéité d'application et un pilotage adapté au besoin des plantes.

Pour l'impact carbone, la fabrication des gaines a un impact très élevé qui pèse fortement sur le bilan (rejets supérieurs aux rejets liés au fonctionnement), alors que pour l'enrouleur, système mobile, l'impact de la fabrication (ramené à l'unité de référence, soit 1 kg de maïs produit) est beaucoup plus faible que l'impact lié au pompage. Ainsi, l'impact carbone total est équivalent entre les deux systèmes.

L'impact de la fabrication de la station de pompage est relativement faible par rapport à son impact de fonctionnement. Ceci pousse à remplacer des pompes au rendement trop faible, à ajuster le point de fonctionnement pour viser le rendement optimal (voir le rôle des variateurs de vitesse, section « La régulation principale et l'automatisation », p. 326), à réduire la pression de pompage lorsque c'est possible, à réduire les volumes utilisés, ce qui de fait réduira l'énergie de pompage nécessaire.

Comparaison énergie électrique et thermique

Le tableau 7.13 a pour objectif de résumer la comparaison entre les deux types d'énergie, électrique et thermique, à partir d'un exemple synthétique. Il décline les différentes composantes du prix de revient pour l'agriculteur (énergie utile, énergie finale) et les incidences environnementales pour une consommation en eau identique (énergie primaire et impact carbone).

Cet exemple a valeur de méthodologie qui peut être adaptée en fonction des différentes caractéristiques des installations (énergie utile requise, volume consommé, rendement, etc.).

Dans l'exemple considéré, il s'agit d'apporter 250 mm d'eau sur 1 ha avec une pression de 10 bars en tête du système d'irrigation (comprenant l'élévation de la ressource et la pression de départ de la station), et de faire la comparaison entre un système de pompage électrique et un système thermique.

Tableau 7.13. Comparaison énergie électrique et énergie thermique à partir d'un cas concret : coût (en rouge) et incidences environnementales (en vert).

Cas d'étude		
Apport de 250 mm/ha (soit 2 500 m ³ par ha) à une pression de 10 bars	Groupe de pompage électrique	Groupe de pompage thermique
Énergie utile en kWh	694 kWh	694 kWh
Rendement du groupe	0,60	0,20
Énergie finale en kWh	1 157 kWh	3 472 kWh
Énergie finale en MJoules		12 500 MJoules
Densité énergétique gazole		40,3 MJoules/litre
Volume gazole consommé		310 litres
Prix de l'électricité (base 01 2020) (avec abonnement optimisé)	0,09 €HTVA/kWh	
Prix du gazole (base 01 2020)		0,95 € HTVA/litre
Coût de l'énergie finale consommée		
Par ha	104 €HTVA	295 € HTVA
Par m ³	0,04 €HTVA	0,12 € HTVA
Taux d'émission moyen en gCO ₂ e/kWh	74 gCO ₂ e/kWh (base mix énergétique français)	330 gCO ₂ e/kWh (base diesel-gazole pur)
Impact carbone	86 kg/ha	1 146 kg/ha
Coefficient de conversion : Énergie primaire/énergie finale	3,83	1,75
Énergie primaire en kWh	4 431 kWh	6 076 kWh

Dans les 2 cas, l'énergie utile est la même : c'est celle qui permet d'élever 2 500 m³ à 10 bars. Et puisqu'il faut 100 kJoules/m³ pour élever la pression de 1 bar (voir l'exemple dans la section « Indicateurs d'efficacité énergétique »), l'énergie utile est :

100 kJoules × 10 × 2 500 = 2 500 000 kJoules, soit sur la base de 3 600 kJoules/kWh = **694 kWh**.

L'énergie finale est calculée à partir de l'énergie utile en tenant compte du rendement du groupe motopompe, généralement bien meilleur pour un groupe électrique.

Ainsi, l'énergie finale :

- pour l'installation électrique représente 694 kWh/0,60 de rendement, soit **1 157 kWh**, ce qui correspond à un indicateur de **0,46 kWh/m³** ;
- pour l'installation thermique représente 694 kWh/0,20 de rendement, soit **3 472 kWh**, ce qui correspond à un indicateur de **1,39 kWh/m³**.

Du point de vue de l'utilisateur, c'est l'énergie finale qui retient l'attention, puisque c'est elle qui est facturée à l'agriculteur.

Le coût de l'énergie thermique est simple à évaluer (c'est le coût du carburant) ; dans notre exemple, pour un prix du gazole de 0,95 € HTVA/litre (cette base très volatile peut être amenée à varier de façon substantielle), on arrive à 12 centimes d'euros HTVA par m³ d'eau utilisé. Pour l'énergie électrique, le coût de la fourniture est nettement plus attractif, de l'ordre de 4 centimes d'euro HTVA par m³ d'eau utilisé. Comme exposé plus haut, l'optimisation de la tarification électrique reposera sur la qualité de la consultation, et surtout sur l'adaptation de l'abonnement à l'utilisation envisagée, très variable selon les types de contrats. L'avantage économique de l'électrique pour l'irrigant peut donc paraître un peu exagéré ici, il s'agira de l'adapter au cas par cas.

L'impact carbone correspond au taux d'émission moyen du kWh de l'énergie finale considérée ; dans l'exemple, l'impact de la solution thermique est plus de 13 fois supérieure à la solution électrique.

L'énergie primaire est obtenue en utilisant le coefficient de conversion dont on a parlé plus haut. On constate que l'énergie primaire est supérieure de plus d'un tiers en thermique par rapport à l'électrique. En effet, malgré un coefficient de conversion plus intéressant en thermique, le rendement est trop pénalisant quant à l'énergie finale nécessaire.

Du point de vue des conséquences environnementales, le choix d'un système électrique est le plus pertinent (impact carbone et énergie primaire). La seule remarque importante est que l'usage de l'électricité a pour conséquence de concentrer géographiquement la pollution sur les zones de production, alors que l'usage du gazole provoque une pollution plus diffuse.

Sur le plan environnemental, au-delà de ce choix, on peut espérer améliorer les choses en bonifiant le rendement des groupes motopompes, en recherchant les configurations les mieux adaptées en matière de débit et pression, en s'attachant à la meilleure efficacité en eau.

Enfin, dans la pratique, les contraintes de terrain sont le plus souvent dominantes. On préférera presque toujours l'alimentation électrique lorsque celle-ci est disponible à proximité (facilité de raccordement) compte tenu du confort de fonctionnement ; les systèmes thermiques ont l'avantage de la souplesse pour les situations isolées ou temporaires, ou quand il s'agit de multiplier les points de prélèvements distants.

L'application numérique, avec un exemple présenté dans le tableau 7.14, permet d'adapter, au cas par cas, les différentes situations tant techniques (consommation en eau, besoin en énergie, rendement des groupes) qu'économiques (évolution du prix du kWh, du prix du litre de gazole, bases de CO₂e, coefficient de conversion en énergie primaire).

Tableau 7.14. Impacts économique et environnemental : comparaison de l'énergie électrique et de l'énergie thermique.

Hypothèses de base ⁽¹⁾					
Volume/hectare (m ³ /ha)	2 500				
Pression nécessaire (HMT en bars) ⁽²⁾	10				
				Pour l'utilisateur	
				Énergie électrique	Énergie thermique
	Énergie utile en kWh/ha	100 kJoules × (HMT) × (m ³ /ha)/3 600 kJoules		694	694
	Rendement du groupe	Rendement moyen du groupe (ou proposer calcul)		0,60	0,20
	Énergie finale en kWh/ha			1 157	3 472
	Énergie finale en MJoules/ha	1 kWh × 3 600/1 000			12 500
	Volume de gazole consommé en litre/ha	Énergie finale en MJoules/densité énergétique du gazole (40,3 MJoules/litre)			310
Prix de l'électricité : € HTVA/kWh	0,09	Coût de l'énergie finale consommée/ha en €	Énergie finale en kWh × prix du kWh en € HTVA	104	
Prix du gazole : HTVA/litre	0,95		Volume du gazole consommé × prix du gazole en € HTVA		295
		Coût de l'énergie finale consommée/m ³ en €	Montant par ha/volume par ha en m ³	0,04	0,12
				Pour l'environnement	
Base mix énergétique français en gCO ₂ e/kWh	74	Impact carbone en kg/ha	Taux d'émission moyen en gCO ₂ e/kWh énergie finale/1 000	86	
Base diesel-gazole pur en gCO ₂ e/kWh	330		Taux d'émission moyen en gCO ₂ e/kWh énergie finale/1 000		1 146
Coefficient de conversion énergie primaire-finale en électrique	3,83	Énergie primaire en kWh/ha	Énergie primaire = énergie finale en kWh × coefficient de conversion électrique	4 433	
Coefficient de conversion énergie primaire-finale en thermique	1,75		Énergie primaire = énergie finale en kWh × coefficient de conversion thermique		6 076

⁽¹⁾ Les valeurs en rouge peuvent être ajustées au cas par cas. ⁽²⁾ HMT : hauteur manométrique totale.

» Cette application est disponible pour les calculs au lien suivant : <https://guide-irrigation.g-eau.fr>

Références bibliographiques

- Abouziena H.F., El-Saeid H.M., Amin A.A.E., 2014. Water loss by weeds: a review. *International Journal of ChemTech Research*, 7, 323-336.
- Agrimaroc, 2018. Gestion de la contrainte pluviométrique pour l'amélioration de la production végétale et de l'efficacité d'utilisation de l'eau. <https://www.agrimaroc.net/2018/07/21/gestion-de-la-contrainte-pluviometrique-pour-lamelioration-de-la-production-vegetale-et-de-lefficiency-dutilisation-de-leau/5/>
- Ali A.B., Hong L., Elshaikh N.A., Basheer A.K. Haofang Y., 2016. Impact of center pivot sprinkler speed and water regimes on potato crop productivity. *International Journal of Agriculture and Biology*, 18, 1174-1180.
- Benouniche M., Kuper M., Hammani A., Boesveld H., 2014. Making the user visible: analysing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance. *Irrigation Science*, 32, 405-420.
- Bonachela S.F., Orgaz F., Villalobos F.J., Fereres E., 2001. Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrigation Science*, 20, 65-71.
- Carrión F., Montero J., Tarjuelo J.M., Moreno M.A., 2014. Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain. *Water Resources Management*, 28, 5073-5089.
- Cheviron B., Serra-Wittling C., Dominguez Bohorquez J.D., Molle B., Lo M., Elamri Y., Delmas M., 2020. Efficience et optimisation de l'irrigation : le modèle Optirrig. *Revue Science Eaux et Territoires, Économies d'eau en irrigation*, 34, 66-71. <http://www.set-revue.fr/efficience-et-optimisation-de-lirrigation-le-modele-optirrig>.
- Debaeke P., Willaume M., Casadebaig P. Nolot J.M., 2008. Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. *Innovations agronomiques*, 2, 19-36. <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/3486/35130/file/3-Debaeke.pdf>
- Deumier J.M., Georges J., Granier J., Weber J.J., 2011. Connaissance, adaptation et amélioration de la gestion collective de l'eau avec des collectifs d'irrigants de Midi-Pyrénées par le développement et l'utilisation de méthodes et d'outils adaptés. Projet régional CASDAR Eau 2008-2009-2010.
- Donnat E., Boffety D., Bimonte S., André G., Capdeville J., Deumier J.M. et al., 2017. Du capteur à l'indicateur : les entrepôts de données spatiales au service d'une meilleure maîtrise des consommations énergétiques des entreprises agricoles. *Innovations agronomiques*, 55, 201-214.
- Fader M., Shi S., von Bloh W., Bondeau A., Cramer W., 2016. Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 953-973.
- Gabriel J.L., Munoz-Carpena R., Quemada M., 2012. The role of cover crops in irrigated systems: water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155, 50-61.
- Granier J., Deumier J.M., 2013. Efficience hydraulique et énergétique : les nouveaux critères de performances pour les systèmes d'irrigation du futur. *Sciences, eaux et territoires*, 11, 30-35.
- Hassanli A.M., Ahmadrada S., Beecham S., 2010. Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97, 357-362.
- Howell T.A., 2003. Irrigation efficiency. In: *Encyclopedia of Water Science*, Marcel Dekker, New York, 467-472.
- Hsiao T.C., Steduto P., Fereres E., 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25, 209-231.
- Israelsen O.W., 1950. *Irrigation: Principles and Practices*, John Wiley and Sons, New York, 471 p.
- Jara J., Stockle C.O., Kjelgaard J., 1998. Measurement of evapotranspiration and its components in a corn (*Zea mais* L.) field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 131-145.
- Kambou D., Xanthoulis D., Ouattara K., Degré A., 2014. Concepts d'efficacité et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique). *BASE [en ligne]*, 18, 108-120. <https://popups.uliege.be:443/1780-4507/index.php?id=10862>
- Lamm F.R., Manges H.L., 2000. Partitioning of sprinkler irrigation water by a corn canopy. *Transaction of the ASAE*, 43, 909-918.

- Lankford B., 2006. Localising irrigation efficiency. *Irrigation and Drainage*, 55, 345-362.
- Lecina S., 2016. Farmerless profit-oriented irrigation scheduling strategy for solid sets. I: Development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142,
- Li J., Rao M., 2001. Crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, III.
- Merchan D., Causapé J., Abrahão R., García-Garizábal I., 2015. Assessment of a newly implemented irrigated area (Lerma Basin, Spain) over a 10-year period. I: Water balances and irrigation performance. *Agricultural Water Management*, 158, 277-287.
- Meyer N., Bergez J.E., Constantin J., Justes E., 2019. Cover crops reduce water drainage in temperate climates: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39.
- Molle B., 1998. Programme régional d'appui technique aux irrigants d'Aquitaine. Compte-rendu des actions 1992-1997. Pivots et rampes frontales. Rapport Cemagref.
- Molle B., Huet L., Granier J., 2009. Composition et état du parc de matériels d'irrigation en France. Rapport Cemagref, UMR G-Eau. Convention avec la DGPAAT, ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 93p.
- Molle B., Tomas S., Hendawi M., Granier J., 2012. Evaporation and wind drift losses during sprinkler irrigation influenced by droplet size distribution. *Irrigation and drainage*, 61, 240-250.
- Normand B., 2006. L'esquive : une solution pour réduire la vulnérabilité à la sécheresse estivale ? *Terre-Net media*, 17 novembre 2006. <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/mais-secheresse-esquive-217-35765.html>
- Ortiz J.N., de Juan J.A., Tarjuelo J.M., 2010. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield. *Biosystems Engineering*, 105, 367-379.
- Playan E., Salvador R., Faci J.M., Zapata N., Martinez-Cob A., Sanchez I., 2005. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management*, 76, 139-159.
- Ruelle P., Mailhol J.C., Itier B., 2004. Évaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion en condition de fort déficit hydrique. *Ingénieries*, 38, 13-20.
- Salman M., Bunclark L., AbuKhalaf M., Borgia C., Guarnieri L., Hoffmann O. et al., 2016. *Renforcement de l'efficience et de la productivité de l'eau à usage agricole à l'échelle africaine et mondiale. Évaluation de la situation, de la performance et de la portée de la collecte de l'eau pour l'agriculture en Ouganda, au Burkina Faso et au Maroc*, FAO, 49 p. <https://www.fao.org/3/i5976f/i5976f.pdf>
- Serra-Wittling C., Molle B., 2017. Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. Rapport pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Irstea, 150 p. <http://www.g-eau.fr/index.php/fr/umr-geau/actualites/item/758-etude-irstea-2017-sur-l-evaluation-des-economies-d-eau-potentielles-a-la-parcelle-realisables-par-la-modernisation-des-systemes-d-irrigation-c-serra-wittling-et-b-molle>
- Van Halsema G.E., Vincent L., 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*, 108, 9-15.
- Weber J.J., 2015. Étude préalable à la modernisation de la concession d'État. Rapport CACG pour la Draaf et la région Midi-Pyrénées, avril 2015.
- Weber J.J., Granier J., 2012. Irrigation. Optimiser l'efficience de l'eau du transport à l'application. *Perspectives agricoles*, 387, 38-41.
- Weber J.J., Lopez J.-M., Dejean C., 2018. Dispositif expérimental d'irrigation en goutte-à-goutte sur grande culture : 6^e année d'expérimentation et synthèse du projet EDEN. Rapport d'études 2017, 62 p.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Liste des auteurs

Gilles Belaud, Institut Agro Montpellier, 2, place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex,
gilles.belaud@supagro.fr

Sami Bouarfa, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5,
sami.bouarfa@inrae.fr

Alain Bouthier, Arvalis-Institut du végétal, retraité

François Charron, Institut Agro Montpellier, 2, place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex,
francois.charron@supagro.fr

Bruno Cheviron, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, bruno.cheviron@inrae.fr

Caroline Coulon, AFEID (Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage), 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

Cyril Dejean, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5,
cyril.dejean@inrae.fr

Magalie Delmas, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

François Dubocs, CA26 (Chambre départementale d'agriculture de la Drôme), 145, avenue Georges Brassens, CS 30418, 26504 Bourg-lès-Valence Cedex, francois.dubocs@drome.chambagri.fr

Patrice Garin, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, patrice.garin@inrae.fr

Sophie Gendre, Arvalis-Institut du végétal, 6, chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège,
s.gendre@arvalis.fr

François Gontard, BRL Ingénierie, 1105, avenue Pierre Mendès France, BP 94001, 30001 Nîmes Cedex 5, francois.gontard@brl.fr

Jacques Granier, INRAE, retraité décédé

Jean-Vincent Heckenroth, SCP (Société du canal de Provence), 3099, route Cézanne, 13100 Le Tholonet, jean-vincent.heckenroth@canal-de-provence.com

Delphine Leenhardt, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, delphine.leenhardt@inrae.fr

Sébastien Loubier, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, sebastien.loubier@inrae.fr

Jean-Philippe Luc, CACG (Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), chemin de Lalette, CS 50449, 65004 Tarbes Cedex, jp.luc@cacg.fr

Bruno Molle, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, bruno.molle@inrae.fr, retraité

Sylvie Morardet, INRAE, UMR G-Eau, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, sylvie.morardet@inrae.fr

Alice Ract Madoux, SCP (Société du canal de Provence), 3099, route Cézanne, 13100 Le Tholonet, alice.ractmadoux@canal-de-provence.com

Jérémy Nouvian, SCP (Société du canal de Provence), 3099, route Cézanne, 13100 Le Tholonet, Jeremy.nouvian@canal-de-provence.com

Frédéric Rossel, Institut Agro Montpellier, 2, place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex, frederic.rossel@supagro.fr

Pierre Ruelle, AFEID (Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage), 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, pierre.ruelle@inrae.fr, retraité

Séverine Tomas, INRAE, UMR G-EAU, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, severine.tomas@inrae.fr

Nicolas Urruty, SCP (Société du canal de Provence), 3099, route Cézanne, 13100 Le Tholonet, nicolas.URRUTY@canal-de-provence.com

Jean-Jacques Weber, CACG (Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne), chemin de Lalette, CS 50449, 65004 Tarbes Cedex, retraité

Claire Wittling, INRAE, UMR G-EAU, 361, rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, claire.wittling@inrae.fr

Liste des auteurs de la 3^e édition

La présente édition reprend en très grande partie le travail des auteurs de la 3^e édition.

Chapitre 1. Groupe « Pilotage de l'irrigation » : J. Puech (Inra), animateur, H. Arnal (CNABRL), Ph. Beyries (Cemagref), J. Boussaguet (SUAD 31), A. Choisnel (Météorologie Nationale), M. Decrop (CACG), J. Dubalen (BCMA), G. Duboin (ITCF), C. Isbérie (Cemagref), P. Peyremorte (SCP), R. Specty (Météorologie nationale), P. Vaysse (CTIFL).

Groupe « Conduite de l'irrigation » : J.-M. Deumier (ITCF), animateur, B. Balas (CCAG), E. Belluau (BRL), J. Boussaguet (CDA 31), A. Bouthier (ITCF), C. Isbérie (Cemagref), B. Itier (Inra), B. Lacroix (AGPM), A. Merrien (Cetiom), V. Perarnaud (Météo-France), P. Peyremorte (SCP), P. Ruelle (Cemagref), R. Specty (Météo-France). Ont aussi contribué : B. Ailliot (CDA 28), F. Le Doré (BRL), A.-M. Martinez et J.-P. Ramal (Cirame), P. Revol (Cemagref), B. Rivoire (CDA 42).

Chapitre 2. Groupe « Matériel d'irrigation par aspersion » : J. Dubalen (BCMA), animateur, J.-P. Bordes (SUAD 81), J. Boussaguet (SUAD 31), F. Carayon (CRA Midi-Pyrénées), R. Chatelain (École de l'eau de Flamarens), J.-C. Chossat (Cemagref), M. Decrop (CACG), O. de Galbert (Cemagref), M. Guiot (BRL), J.-M. Lescot (Cemagref), A. Malaval (Cemagref), J. Prim (SUAD 47), L. Rieul (Cemagref).

Groupe « Pivot » : B. Molle (Cemagref) animateur, B. Alliot (CDA 28), P. Augier (Cemagref), M. Bassez (Trame), D. Baudequin (Cemagref), B. Brémond (Cemagref), B. Bossis (CDA 17), M. Cassou (GRCETA-SFA), M. Delcros (CDA 40), G. Desfontaines et F. Le Dore (BRL), M. Histel (Otech), M. Habersack (CDA 64), Y. Pénadille (Cemagref), J. Prim (CDA 47), R. Piton (Ardepi), M. Prouzet (GRCETA-SFA), L. Rieul (Cemagref), J. Weber (CCAG),

Chapitre 3. Groupe « Irrigation localisée » : P. Vaysse (CTIFL), animateur, J.-N. Bertrand (GDA Ventoux), B. Cabibel (Inra), J.-C. Chossat (Cemagref), M. Decroix (Cemagref), J.-L. Douillet (LEPA Rodilhan), M. Guiot (BRL), C. Isbérie (Cemagref), M. Panine (BRL), Y. Penadille (Cemagref), P. Peyre-morte (SCP), J. Prim (SUAD 47), J. Puech (INRA), P. Revol (Cemagref), L. Rieul (Cemagref), avec la participation du groupe CSMMA.

Chapitre 4. Groupe « Irrigation gravitaire » : D. Renault (Engref) animateur, P. Berthome (Cemagref), B. de Carmantrand (Agence de l'eau, RMC), J. Grangier (agriculteur à Tarascon), M. Lefevre (CDA 13), J.-P. Luc (ENSA Montpellier), J.-C. Mailhol (Cemagref), P. Peyremorte (SCP), G. Richard (DDAF Arles), G. Tron (SCP). Ont aussi contribué les partenaires du programme Artemis (Acquisition de références techniques et économiques sur les matériels d'irrigation de surface, Bouches du Rhône).

Chapitre 5. Groupe « Stations de pompage » : D. Baudequin (Cemagref) animateur, J. Bassez (BCMA), J. Bous-saguet (CDA 31), M. Chaix (KSB), D. Colin (CDA 79), M. Crespo (Leroy Sommer), P. Delcros (CDA 40), G. Decausies (Sica Duret), J. Dubalen (BCMA), G. Duval (Groupe Coopératif Occitan), J.-P. Lemery (Peme-Gourdin), M. Lesbats (CCAG), J.-P. Luc (Ensam), M. Monjoint (KSB), M. Moreau (AFCP), B. Ould Salek (Cemagref), J. Prim (SUAD 47), H. Vedie (Ensam), M. Vovard (Ingersoll Dresser Pompes).

Liste des relecteurs

Thierry Bordin, CRA (Chambre régionale d'agriculture), Centre-Val de Loire

Bernard Rivoire, CA 42 (Chambre d'agriculture de la Loire)

Dominique Rollin, CGAAER (Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux), AFEID (Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage)

Crédits des photos de couverture

Photo du haut : © white78 (Adobe Stock 167210988)

Photo du bas : domaine public/ Wikicommons / Surface irrigation system using siphon tubes. 2000.

Photo by Dan Ogle, USDA Natural Resources Conservation Service. <http://photogallery.nrcs.usda.gov/Index.asp>

Vignette de gauche : © romaset (Adobe Stock 314810706)

Vignette de droite : © Madeleine Carroué 0008889-viticulture.jpg / Irstea

Suivi éditorial / édition : Juliette Blanchet

Mise en page :  **EliLoCom**

Maquette de la couverture : Laetitia Perotin-Meslay

Impression : CPI France

Dépôt légal : août 2022

GUIDE PRATIQUE DE L'IRRIGATION

4^e édition

Le contexte du changement climatique et de la transition agroécologique renforce l'exigence d'un usage sobre de l'eau en agriculture.

L'irrigation fait l'objet de nombreux débats quant à l'amélioration de ses performances tant technologiques qu'agronomiques et environnementales. Elle représente l'un des moyens de s'adapter et d'atténuer les effets du changement climatique. Pour qu'elle puisse pleinement jouer ce rôle, tout en prenant en compte la durabilité des milieux aquatiques et des ressources en eau et en énergie, une meilleure connaissance des matériels, des outils existants et de leur utilisation est nécessaire.

La quatrième édition de ce guide pratique présente les notions de base en hydraulique, les stations de pompage, les différentes techniques d'irrigation (aspersion, localisée, de surface) et illustre l'efficacité de l'irrigation en eau et en énergie. Elle propose aussi des outils actualisés d'analyse et d'aide à la décision en matière de gestion et de conduite de l'irrigation (depuis l'échelle du territoire jusqu'à la parcelle).

De nombreux liens vers des contenus numériques comme des calculatrices hydrauliques ou des exemples de cas concrets viennent compléter l'ensemble.

Cet ouvrage a été élaboré sous la coordination de l'Afeid (Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage), en étroite collaboration avec les organismes de recherche-développement et les instituts techniques. Il s'adresse aux acteurs de l'irrigation et de la gestion de l'eau, agriculteurs, conseillers en développement, ingénieurs, techniciens.

Ingénieure et docteure en agronomie, **Claire Wittling** a étudié les services écosystémiques des sols en lien avec l'eau. Actuellement ingénieure de recherche à INRAE, ses travaux portent sur l'amélioration de l'efficacité et de la productivité de l'irrigation.

Ingénieur agronome et docteur en mécanique, **Pierre Ruelle** a mené des recherches à Irstea sur le pilotage de l'irrigation et sa gestion à différentes échelles, en collaboration avec des agroéconomistes.

Quæ
Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quæ.com


CACG
Valorisons votre territoire

BRL
Groupe

SCP

ARVALIS
Institut du végétal

AFEID
Association Française
pour l'Eau, l'Irrigation
et le Drainage

INRAE

**L'INSTITUT
agro**

Prix : 39 €

ISBN : 978-2-7592-3245-1



9 782759 232451

Réf. : 02759