



GLUTEN, ALIMENTATION ET SANTÉ

MARIE-FRANÇOISE SAMSON ET DOMINIQUE DESCLAUX

éditions
Quæ

GLUTEN, ALIMENTATION ET SANTÉ

MARIE-FRANÇOISE SAMSON ET DOMINIQUE DESCLAUX

Thématique santé / alimentation dans la collection Enjeux sciences

Le moustique, ennemi public n° 1 ?

S. Lecollinet, D. Fontenille, N. Pagès, A.-B. Failloux, 2022, 168 p.

Les zoonoses. Ces maladies qui nous lient aux animaux

G. Vourc'h, F. Moutou, S. Morand, E. Jourdain, B. Chalmel, 2021, 172 p.

Les virus. Ennemis ou alliés ?

S. Biacchesi, C. Chevalier, M. Galloux, C. Langevin, R. Le Goffic,
M. Brémont, 2017, 112 p.

Quel futur pour notre alimentation ?

Pierre Feillet, 2014, 168 p.

Pour citer cet ouvrage

Samson M.-F., Desclaux D., 2025. *Gluten, alimentation et santé*,

Versailles, Éditions Quæ, 120 p.

<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4144-6>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication. La procédure d'évaluation est décrite dans Prism.

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la direction pour la Science ouverte (Dipso) et le département Biologie et amélioration des plantes (BAP) d'INRAE.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com / www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN (papier) : 978-2-7592-4143-9

ISBN (PDF) : 978-2-7592-4144-6

ISBN (ePub) : 978-2-7592-4145-3

ISSN : 2267-3032



Sommaire

Gluten...	5
Testez vos connaissances sur le gluten	7
D'où vient le mot « gluten » ?	8
Au départ, une « humeur » dans le règne animal, végétal et minéral	8
Le gluten dans les traductions et la littérature	9
Les premières mentions du terme « gluten de blé »	10
Un lien tardif entre « gluten » et « protéines »	11
Le gluten est-il présent dans le grain des céréales ?	12
La tribu des <i>Triticeae</i>	14
Ne confondez pas les <i>Triticeae</i> entre elles !	14
Le gluten se fabrique à partir des protéines de réserve	15
Protéines ou colliers et bracelets ?	16
La connaissance des protéines des blés en quelques grandes étapes	18
Le gluten : un casse-tête pour les physiiciens	28
Des protéines nécessaires à la croissance de la plantule	31
À quoi sert le gluten dans l'alimentation ?	39
Comment se mesure la quantité de protéines capables de générer du gluten ?	39
La consommation quotidienne de gluten	41
Le gluten de blé : très tôt, un gage de qualité	42
Autant de boulangers, autant de pains, autant de glutens	43
Spaghettis et autres pâtes alimentaires contiennent-ils du gluten ?	44
Entre aliments paysans et aliments « industriels » : une différence de gluten ?	46
Le gluten, un adjuvant parmi d'autres dans les pains	48
Comment produire du gluten industriellement et pour quels usages ?	51
De l'amidon au gluten dans l'industrie d'hier	51
Comment les industriels extraient-ils aujourd'hui le gluten ?	52
Le gluten vital en industrie céréalière	53
Le gluten : un ingrédient des substituts de viande	54
Nos animaux consomment-ils du gluten ?	55
Gluten, pâte à modeler et autres utilisations non alimentaires	56
Zoom sur le gluten hydrolysé	57

Quels problèmes de santé avec le gluten ?	59
« Le gluten est à l'espèce humaine ce que l'engrais est aux plantes... »	59
Pour certains, un vrai problème de santé	61
La maladie coéliquaue	61
Les allergies	70
La sensibilité non coéliquaue au gluten ou au blé	71
Le gluten joue-t-il un rôle dans d'autres maladies ?	72
Quel intérêt de consommer des produits sans gluten ?	75
Les produits sans gluten : un marché en plein <i>boom</i>	75
Qui achète et pourquoi ?	77
Une liste d'ingrédients longue comme un jour sans pain	78
Les pâtes et biscuits sans gluten : moins d'additifs ?	81
Les produits sans gluten sont-ils ultratransformés ?	82
Se nourrir sans gluten, mais à quel prix ?	84
Qu'est-ce qui peut dégrader le gluten ?	85
La germination, le processus originel de dégradation	85
Bactéries, champignons, plantes, insectes : qui pour dégrader le gluten ?	85
Les « dégradeurs » de notre tube digestif	87
Les probiotiques ont-ils un intérêt dans le cas de la maladie coéliquaue ?	89
Sources naturelles de bactéries dégradant le gluten	89
La modification chimique ou microbiologique du gluten	91
Comment la fermentation peut dégrader le gluten ?	91
Le maltage	93
Comment influencer sur la quantité de gluten dès le grain ?	95
Une influence du mode cultural reconnue depuis longtemps	95
Beaucoup d'azote, beaucoup de gluten ?	96
Gluten et pesticides : que savons-nous ?	96
Le changement climatique : chance ou malchance pour les hypersensibles au gluten ?	98
Une sélection des variétés modernes très axée sur le gluten	98
Qu'en est-il des variétés dites « anciennes » ?	100
Peut-on produire des blés à teneur réduite, voire sans gluten ?	102
Quel avenir pour le gluten ?	111
Réponses au quizz	114
Bibliographie	115



Gluten...

Un petit mot... si souvent associé à de grands maux ! Ces grands maux, nous les avons côtoyés auprès des amis, collègues, connaissances. Leurs interrogations portaient sur nos recherches : « Que faites-vous dans vos labos pour nous, cœliaques, hypersensibles au gluten, allergiques ?... »

Nos réponses évasives trahissaient notre gêne. La question n'était pas traitée ou trop peu... Jusqu'au jour où Jean-François, paysan-boulangier, croisé au hasard d'un bout de champ, confie à voix basse : « Cela fait plusieurs fois que des gens qui m'achètent le pain m'expliquent qu'ils ne présentent pas les symptômes d'hypersensibilité habituellement éprouvés lorsqu'ils mangent du pain d'ailleurs. » Quelque temps plus tard, Roland rapporte le même constat, puis Michel, puis Guillaume, Jean-Jacques, François, Alexandra, Thierry, Vincent et bien d'autres ensuite. Tous sont paysans-meuniers, paysans-boulangers ou paysans-pastiers. Quel que soit le produit — farine, pain ou pâtes —, le constat de leurs clients est le même : « Plus digeste que celui des grandes surfaces ! »

« Pouvons-nous communiquer sur la meilleure digestion de nos produits ? » demandent-ils. Prudentes, nous répondons que le sujet des maux entourant le gluten est trop sérieux et que des recherches poussées s'imposent.

Dont acte. Début des recherches...

Première réunion : un rapide tour de table s'impose. Bien que rapportant les mêmes faits, ils ne se connaissent pas tous. Qu'ont-ils donc en commun ? Une passion pour les variétés « anciennes », une mouture à la meule de pierre, l'utilisation du levain pour ceux qui font du pain, un four à bois, un séchage à l'air libre pour ceux qui font des pâtes.

La plupart, nous les avons connus agriculteurs bio, 20 ans auparavant. C'était l'époque où ils recherchaient des variétés de blé tendre ou de blé dur adaptées à leur système en AB. Il est

vrai que les variétés inscrites au Catalogue national n'avaient pas été sélectionnées pour supporter des carences en azote, la concurrence d'adventices ou pour « faire de la paille », puisque certains étaient également éleveurs et recherchaient des variétés à paille haute pour la litière des animaux ou tout simplement pour améliorer leur sol en matière organique.

Les variétés modernes présentes au Catalogue ressemblaient à des Formules 1 conçues pour des exploits sur circuit à asphalte ultra lissé, mais circulant très mal sur chemins de terre plus cabossés...

Au gré du temps, chacun de ces paysans est devenu filière... Produire le grain, le moudre, en faire du pain ou des pâtes selon que le grain est blé tendre ou blé dur, cela les a passionnés et a suscité des questions pour chacune des étapes. Ils nous les ont posées... Ce livre est le leur. Ils ont questionné nos certitudes, nous ont conduits aux confins de nos disciplines, fait sortir de nos labos, invités dans leurs champs, dans leurs moulins, dans leurs fournils, fait oublier nos régimes pour goûter tous leurs produits. Ils ont discuté et rediscuté nos hypothèses, validé et revalidé un nombre incalculable de fois nos données.

Le lecteur, qu'il soit expert sur le gluten ou totalement ignorant du sujet, trouvera dans ce livre des anecdotes, détails croustillants ou autres informations inédites, mais toujours insérés avec le souci de la rigueur scientifique et issus d'une compilation bibliographique de la Genèse à nos jours !

Testez vos connaissances sur le gluten

Répondez aux questions suivantes par Vrai ou/et Faux :

1. Le gluten est présent dans les grains
de céréales *Vrai/Faux ?*
2. Le gluten est l'ingrédient magique
des industries agroalimentaires *Vrai/Faux ?*
3. Il ne faut plus manger de céréales..... *Vrai/Faux ?*
4. Le gluten est, comme son nom l'indique,
une glu utilisée comme colle par l'industrie . *Vrai/Faux ?*
5. Le gluten est un sous-produit
de l'industrie amidonnière..... *Vrai/Faux ?*
6. Le gluten était perçu comme
reliant règne animal et minéral *Vrai/Faux ?*
7. Les aliments sans gluten sont bénéfiques *Vrai/Faux ?*
8. Le gluten se fabrique à partir de protéines
de réserve des grains *Vrai/Faux ?*
9. Jacopo Bartolomeo Beccari, chimiste, est le premier
à avoir accolé le terme « gluten » au blé *Vrai/Faux ?*
10. Les variétés « anciennes » de blé n'ont pas
de gluten..... *Vrai/Faux ?*

Comparez vos réponses avec celles à la fin de l'ouvrage :

- *vous avez 10 réponses justes.* Bravo ! Vous connaissez très bien le sujet, mais pour devenir encore plus expert, poursuivez la lecture, car ce livre vous permettra d'accéder à des informations inédites.
- *entre 5 et 10 réponses justes.* Vous avez déjà de bonnes notions sur le gluten, mais n'hésitez pas à poursuivre votre lecture pour en apprendre encore plus...
- *entre 0 et 5 réponses justes.* Vous êtes motivé pour apprendre, puisque vous avez ce livre entre les mains ! Félicitations et ne vous arrêtez donc pas à cette première page !



D'OÙ VIENT LE MOT « GLUTEN » ?

Aujourd'hui étroitement associé aux céréales, le mot « gluten » a pourtant initialement été utilisé dans bien d'autres domaines comme la sphère chirurgicale ou la pédologie ! Dans tous les cas, ce mot mérite à lui seul une étude historique. Ses dérivés actuels, tels « agglutiner » ou « conglutiner », renseignent déjà sur sa définition.

AU DÉPART, UNE « HUMEUR » DANS LE RÈGNE ANIMAL, VÉGÉTAL ET MINÉRAL

Un ouvrage d'Othonis Brunfels datant de 1536 définit le gluten comme une « humeur », un fluide présent dans certains organes. En 1752, Albrecht von Haller le compare à un suc gluant, une « gelée tirée des os, de l'ivoire et des cornes », ou encore à une substance présente « dans les espaces que les fibres laissent entre elles ». Il en va ainsi du « gluten musculaire », dont une forte gélatinose serait signe d'une plus grande irritabilité des animaux (Whytt, 1759).

Ce terme, fort usité dans le domaine médical, désignait aussi le suc de plantes (l'ail est souvent cité ; Lieutaud, 1770) ou d'araignée (Danyzy, 1766), qui étaient employés pour soigner les plaies. Ses propriétés étaient reconnues en chirurgie : « il possède des propriétés extraordinaires, telles que celle de favoriser la réunion des os et leur endurcissement » (Lewis, 1775). Diderot et d'Alembert, dans leur *Encyclopédie* de 1751, associaient dans la définition du gluten les os et les pierres — « c'est par l'effet du gluten que les pierres diffèrent des terres » — ou soulignaient encore qu'il « unit les parties terrestres des os » et « lie les terres calcaires ».

Les pierres elles-mêmes étaient vues comme « des Terres étroitement unies par un gluten ». « C'est cette Terre qui étant liée par un gluten particulier y constitue dans les Animaux leur base, leur squelette, ou leurs os. Cette Terre conserve son caractère essentiel, même après que le gluten en a été chassé par le feu [...] ». Le gluten était même soupçonné de causer une différence de dureté entre les minéraux (Pott, 1753).

Un traité d'agronomie rajoute : « L'argile [...] est une terre visqueuse, grasse au toucher. Elle se divise promptement dans l'eau en parties très fines. Elle contient une humeur onctueuse qui lui est propre : le gluten » (Bellepierre *et al.*, 1761).

Dans le domaine agricole, le « gluten » ou la « glu » étaient définis comme une « composition visqueuse » utilisée alors comme piège (Furetière, 1686), ou servaient à désigner « le suc nourricier du bois formant en durcissant les couches ligneuses » (Duhamel du Monceau, 1764) ou encore « l'humeur » des arbres (gomme arabique).

LE GLUTEN DANS LES TRADUCTIONS ET LA LITTÉRATURE

Selon les traducteurs de Virgile, le mot *gluten* employé dans les *Géorgiques* (livre IV) est traduit par suc, gomme, substance visqueuse, colle ou glu. Dans la *Vulgate*, le terme « Glutino » (Isaïe 41,7) traduit le strong hébreu טַבַּח (*debeq*), qui a été lui-même traduit le plus souvent par « soudure ». Des ouvrages de 1775 le définissent comme « une gelée qui file entre les doigts » (Lafosse, 1775) ou encore « le lien qui unit les particules d'un corps : on dit glutineux d'une matière qui a la consistance d'un mucilage » (Lewis, 1775).

« Gluten » proviendrait du latin *glutinum* ou *gluo*, colle, gomme, glu, qui eux-mêmes viendraient du grec γλοιός (*gloiós*), γλία (*glía*), *glischros*, visqueux, gluant, collant (mais aussi tenace).

GLUTEN : UN MOT TRÈS CONSERVÉ ENTRE LES DIVERSES LANGUES

Français, Occitans, Allemands, Anglais, Néerlandais, Suédois, Espagnols, Slovènes, Tchèques, tous écrivent « gluten ». Les autres n'en sont pas loin, comme les Grecs qui prononcent *gluténí*, les Italiens, *glutine*, les espérantistes, *gluteno*, ou les Arabes, *jaloutin* (on entend un peu gélatine...).

Pour les Chinois, l'idéogramme 麸质 traduit le mot gluten. La première syllabe 麸 se dit *fū* et signifie fibre, la seconde 质 se prononce *zhi* et a de nombreuses significations (caractère, nature, qualité, plaine, mettre en gage, otage, Taïwan) pas toujours évidentes à relier au gluten...

LES PREMIÈRES MENTIONS DU TERME « GLUTEN DE BLÉ »

Il est très difficile d'identifier avec assurance le premier emploi du terme « gluten » pour désigner la masse visqueuse restante après hydratation de la farine de blé, malaxage et lavage de la pâte.

Jacopo Bartolomeo Beccari, chimiste, est considéré comme le premier utilisateur du terme « gluten » en lien avec le blé, dans son mémoire « Découverte du gluten » datant de 1728 (traduit par Roy, 1862). Dans cet extrait, il détaille le protocole utilisé :

« Le froment doit être de très bonne qualité ; on le broie d'une manière convenable, afin que le tamis le dégage entièrement du son : de cette manière on ne pourra soupçonner aucun mélange. Cette opération faite avec soin, on mêle la farine dans une eau très-pure et on la pétrit ; il ne reste plus alors qu'à laver soigneusement. Dans ce lavage, l'eau enlève toutes les parties qu'elle peut détacher, les entraîne avec elle et laisse les autres intactes. Celles-ci forment peu à peu une masse compacte, molle sans doute, mais d'une consistance remarquable, et qui fournit une colle très propre à différents usages. Remarquons en outre qu'il ne serait plus possible de la dissoudre dans l'eau. Quant aux autres parties, elles nagent quelque temps confondues avec le liquide, qui ressemble alors à du lait, mais bientôt elles descendent et se rassemblent au fond du vase, sans avoir toutefois la même force de cohésion que les premières ; elles ressemblent à une poudre toujours prête à s'élever confusément à la surface de l'eau ; rien n'a plus d'affinité avec l'amidon ; ces parties sont même un véritable amidon qui ne le cède point à l'amidon vulgaire, celui que les anciens préparaient par une si longue macération, et qui de nos jours ne coûte guère moins de temps et de travail. Comme il sera besoin, dans la suite de désigner ces parties distinctes, nous donnerons aux premières pour plus de clarté, le nom de glutineuses, et aux autres celui d'amylacées. »

Dans sa thèse sur le froment (autre nom pour désigner le blé tendre) et le gluten, Johannes Kessel-Meyer, en 1759, rappelle

la similarité avec le « gluten animal » et insiste sur les qualités d'assemblage de ce gluten de froment :

« il peut servir à coller des objets qu'on ne pourrait jamais faire adhérer fortement ensemble au moyen du gluten animal. Ainsi deux fragments de verre ou de fer, enduits de gluten de froment et appliqués l'un contre l'autre, pourront résister, après que cette colle sera convenablement séchée, à presque tous les efforts qu'on ferait pour les séparer. Pour ce qui regarde le cachet des lettres, jamais aucun des moyens imaginés dans ce but n'a surpassé l'emploi de notre gluten, puisqu'il reçoit d'une manière beaucoup plus nette et plus visible, l'impression du sceau, et qu'il ne peut être enlevé par l'eau sans que le papier se déchire ».

UN LIEN TARDIF ENTRE « GLUTEN » ET « PROTÉINES »

Le lien entre gluten et protéines n'est fait que tardivement puisque le terme « protéine » n'apparaît qu'en 1838 ! La paternité de ce terme semble attribuable à Jöns Jacob Berzelius (Hartley, 1951) qui, dans une lettre adressée à Gerardus Johannes Mulder, explique : « Le nom protéine que je vous propose pour l'oxyde organique de la fibrine et de l'albumine, je voulais le dériver de *proteios* parce qu'il paraît être la substance primitive ou principale de la nutrition animale que les plantes préparent pour les herbivores et que ceux-ci fournissent ensuite aux carnassiers. » Mulder s'en serait immédiatement servi dans son article paru quelques jours après, créant ainsi la confusion de paternité : « La matière organique, étant un principe général de toutes les parties constituantes du corps animal, et se trouvant, comme nous verrons tantôt, dans le règne végétal, pourrait se nommer *Proteine de proteios, primarius...* » (Hartley, 1951). Le terme grec πρωτελος (*proteios*), signifiant « qui occupe le premier rang »¹, indique que les protéines sont rapidement apparues comme les seules sources d'azote utilisables par l'homme, sans lesquelles la vie serait impossible.

1. <https://www.cnrtl.fr/etymologie/prot%C3%A9ine> (consulté le 10/07/2025).



LE GLUTEN EST-IL PRÉSENT DANS LE GRAIN DES CÉRÉALES ?

Pas du tout ! Le gluten n'existe pas tel quel dans un grain de blé. Il n'est pas présent non plus dans la farine. Toute sa magie réside dans le fait d'apparaître par la main de l'homme.

En effet, le gluten est un réseau (on parlera aussi de filet) de protéines, qui se constitue quand on mélange la farine à de l'eau et que l'on malaxe le tout pour former une pâte. Ce réseau se forme par la rencontre de certaines protéines présentes dans la farine et qui étaient, bien sûr, auparavant présentes dans le grain de céréales.

Dans quel endroit du grain ? Disséquons ensemble un grain de blé. Sur l'épi, il est logé dans des épillets et protégé par les glumes et les glumelles qui sont éliminées lors du battage (figure 1). Le grain a une forme ovoïde. Telle une grande cicatrice, un sillon parcourt toute sa longueur. À la base de la surface opposée à ce sillon se trouve le germe composé de deux parties : le scutellum et l'embryon. Le reste du grain est constitué de l'albumen, ou amande, entouré par une série de couches tissulaires qui forment le son. Parmi ces couches, on observe, de l'extérieur vers l'intérieur, le péricarpe externe, le péricarpe interne, la testa et la bande hyaline. Entre l'albumen et ces couches externes se trouve une couche de cellules appelée couche à aleurone. Elle est, avec l'embryon, l'unique tissu vivant du grain mature et permet son développement au cours de la germination. Cette couche est très riche en protéines, mais elle ne contient pas pour autant celles qui participent à la formation du gluten.

L'albumen est qualifié d'amylacé, car il est composé principalement d'amidon (environ 70 %). Il contient aussi des protéines (8 à 16 %) et notamment les protéines constitutives du gluten. Enfin, il contient d'autres composés plus minoritaires (pentosanes, cellulose, sucres libres, lipides, minéraux). Cet albumen est dit farineux chez le blé tendre, car il s'écrase, lors de la mouture, en farine, alors qu'il est dur chez le blé dur (comme son nom l'indique !) et s'écrase en semoule.

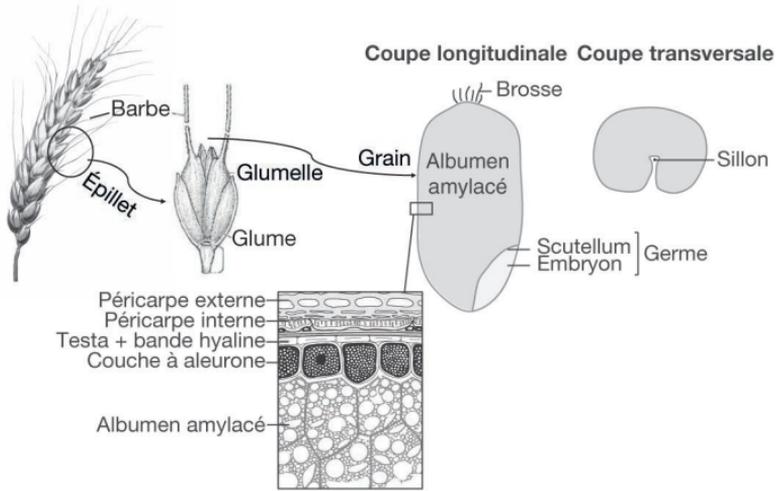


Figure 1. De l'épi au grain. Coupes longitudinale et transversale d'un grain de blé. Détail des couches périphériques du grain.

GRAIN OU CARYOPSE ?

Les spécialistes en botanique expliquent que le grain de blé n'est pas une graine, mais un fruit particulier nommé caryopse. La paroi mince du fruit, nommée péricarpe, est très fortement soudée à la paroi (testa) de la graine. La graine comprend la bande hyaline, la couche à aleurone, l'albumen amylicé et le germe. Ainsi, la graine n'est pas libre (comme dans le cas d'une graine de tournesol), mais toujours enserrée dans le fruit, qui est donc utilisé comme semence.

Le Codex Alimentarius² définit le gluten comme « une fraction protéique du blé, du seigle, de l'orge, de l'avoine ou de leurs variétés croisées et de leurs dérivés, à laquelle certaines personnes sont intolérantes et qui est insoluble dans l'eau et dans une solution de chlorure de sodium à 0,5 M », soit une concentration de 29 g/l.

2. Le Codex Alimentarius (ou Code alimentaire) est un programme mixte de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) fixant les normes de sécurité alimentaire qui servent de référence pour le commerce international des denrées alimentaires.



LA TRIBU DES *TRITICEAE*

Usuellement, on appelle « céréales » les plantes dotées d'épi(s) produisant des graines qui sont récoltées à maturité et peuvent être transformées en farine. Si quinoa et sarrasin répondent à cette définition, ce ne sont pas néanmoins des céréales à proprement parler, car ils n'appartiennent pas à la famille des Poacées (anciennement appelées Graminées), qui sont les seules, aux yeux des botanistes, à pouvoir s'appeler ainsi.

Les céréales cultivées sont rattachées à quatre sous-familles de ces Poacées : les *Pooideae* (comprenant notamment le blé, l'orge et le seigle, de la tribu des *Triticeae*, ainsi que l'avoine de la tribu des *Aveneae*), les *Ehrhartoideae* (riz et zizanie, de la tribu des *Oryzeae*), les *Panicoideae* (maïs, sorgho, millet, fonio) et les *Chloridoideae* (teff, éleusine).

Parmi ces espèces, seules celles qui appartiennent à la sous-famille des *Pooideae* contiennent des protéines permettant de développer du gluten ; ce n'est pas le cas des autres sous-familles.

NE CONFONDEZ PAS LES *TRITICEAE* ENTRE ELLES !

Comment ne plus confondre blé tendre et blé dur ?

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) est réduit en farine et utilisé pour fabriquer des pains et autres gâteaux, mais parfois peut être aussi utilisé pour l'alimentation animale et à des fins non alimentaires (p. ex., bioéthanol).

Le blé dur (*Triticum turgidum* subsp. *durum*), qui donne après broyage de la semoule (particules plus grosses que celles de la farine), est utilisé exclusivement pour l'alimentation humaine (semoule, pâtes, couscous, blé précuit).

Les autres espèces de *Triticeae* sont moins cultivées, comme le petit épeautre ou engrain (*Triticum monococcum* L.), le grand épeautre (*Triticum aestivum* subsp. *spelta*), proche cousin du blé tendre, ou l'amidonniér (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*), ancêtre du blé dur.

Toutes ces espèces se distinguent par leur génome et leur nombre de chromosomes. Mais elles ont en commun d'avoir toutes n jeux de 7 chromosomes provenant d'un ou plusieurs génomes « ancestraux » : A, B ou D issus d'espèces différentes. Ainsi, le petit épeautre possède 2 jeux de 7 chromosomes, soit 14 chromosomes au total, et les 2 jeux proviennent du génome A. On dit qu'il est diploïde AA (figure 2). L'amidonnier comme le blé dur présentent 4 jeux (AABB) de 7 chromosomes. Ils sont dits tétraploïdes. Par contre, le blé tendre et le grand épeautre sont hexaploïdes AABBDD (6 jeux de 7 chromosomes). Avec ses 42 chromosomes et ses plus de 107 000 gènes, le blé tendre n'a ainsi rien à envier à l'espèce humaine, qui exhibe ses quelques 23 chromosomes et seulement 22 000 gènes ! Quand on sait que les gènes codent pour des protéines, on comprend mieux pourquoi on s'intéresse de près aux protéines du blé...

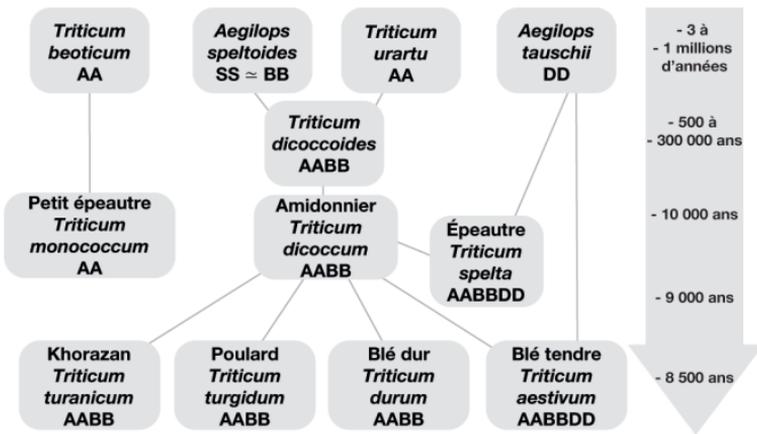


Figure 2. Histoire évolutive des blés. Il y a quelque 3 millions d'années, le croisement de *Triticum urartu* (AA) avec *Aegilops speltoides* (SS ou BB) aurait conduit à la formation de *Triticum dicoccoides* (AABB), puis de l'amidonnier et d'autres formes domestiquées (khorazan, poulard, blé dur). Le croisement de *Triticum dicoccum* avec *Aegilops tauschii* (DD) aurait donné naissance à l'épeautre (grand épeautre) et au blé tendre.

LE GLUTEN SE FABRIQUE À PARTIR DES PROTÉINES DE RÉSERVE

Les protéines de réserve sont accumulées lors de la croissance du grain sur l'épi. Chez le blé, elles ont pour noms : gliadines et gluténines. Elles constituent 80 % des protéines du grain et n'ont



d'autre fonction que de servir de source d'acides aminés, lors de la germination, pour assurer la croissance de la jeune plantule.

Il existe d'autres protéines dans le grain, qui ne sont pas des protéines de réserve, mais qui participent à la construction des cellules, au métabolisme du grain ou encore à sa défense. Beaucoup sont des enzymes.

PROTÉINES OU COLLIERS ET BRACELETS ?

Une protéine ou polypeptide est un enchaînement d'au moins 50 acides aminés liés entre eux par une liaison dite peptidique. On peut ainsi comparer une protéine, selon sa longueur, à un

ENTRE CARAT ET DALTON, UNE HISTOIRE DE POIDS...

Le poids (la masse) des bagues, bracelets ou colliers en or se mesure en carat. Ce terme est aussi utilisé comme unité de masse dans le commerce des pierres. Des sources attribuent l'étymologie de ce mot carat au nom arabe *qīrāṭ* signifiant graine de caroubier. En effet, dans l'Antiquité, la graine de caroubier était utilisée par les marchands comme unité de mesure, car elle était supposée avoir une masse régulière de 0,24 g. De nos jours, les professionnels utilisent le carat métrique : 1 carat égale 0,20 g.

Le poids (la masse) de ces mêmes « bagues, bracelets ou colliers » en acides aminés se mesure en dalton (symbole Da). La masse moléculaire moyenne d'un acide aminé étant d'environ 100 Da, la masse d'une protéine peut atteindre plusieurs millions de daltons pour les grosses protéines de type complexes enzymatiques. Les masses moléculaires des protéines sont souvent citées en kilodaltons (kDa).

Le dalton est l'unité de mesure de la masse moléculaire correspondant au douzième de la masse d'un atome de carbone, soit $1,660\ 539\ 067 \times 10^{-24}$ g. C'est John Dalton (1766-1844), chimiste et physicien britannique, qui créa cette unité. Après avoir pour la première fois décrit une anomalie de la vision qui affectait la perception des couleurs dont il souffrait lui-même et à laquelle on donna le nom de daltonisme, il eut l'idée de génie de la théorie atomique, dans laquelle il proposa d'attribuer un poids à chaque atome (1 à l'atome d'hydrogène, 7 à l'atome d'oxygène, 5 à l'atome d'azote, etc.).

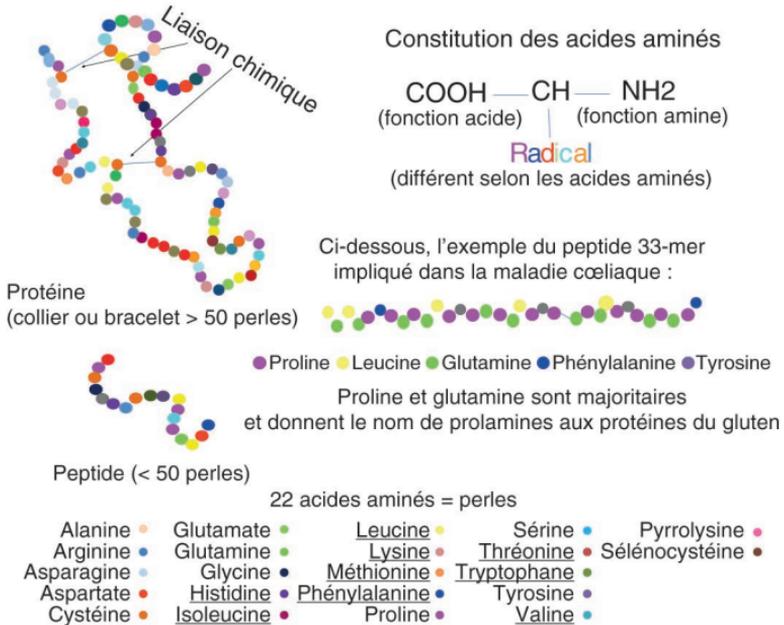


Figure 3. Des « perles » d'acides aminés pour faire des « colliers » et des « bracelets » de protéines ; formule chimique des acides aminés et composition du peptide 33-mer impliqué dans le déclenchement de la maladie cœliaque. Les acides aminés soulignés correspondent à ceux qui sont essentiels pour l'homme, qui ne peut pas les synthétiser.

collier ou un bracelet de perles, où chaque perle serait un acide aminé (figure 3 ; voir aussi encadré). En deçà de 50 perles ou acides aminés, on parle de peptide. À ce propos, un des peptides les plus connus pour son implication dans la maladie cœliaque est le 33-mer (nommé ainsi car il possède 33 acides aminés). Les protéines peuvent avoir des longueurs très différentes, constituées de tout ou partie des 22 « couleurs » (types) d'acides aminés existantes formant autant de combinaisons et motifs. Chez les plantes, sur les 22 possibilités, seuls 20 acides aminés sont présents (la pyrrolysine et la sélocystéine ne se rencontrent que chez certains microorganismes ou enzymes). En ce qui nous concerne, nous, humains, neuf de ces acides aminés sont dits « essentiels » (soulignés dans la figure 3), car ils ne sont pas produits par notre métabolisme et doivent être apportés directement par l'alimentation. Les plantes sont, pour leur part, capables de synthétiser l'ensemble de ces 20 acides aminés.

L'ordre dans lequel s'enchaînent les acides aminés définit la structure primaire de la protéine. La structure secondaire est, elle, dictée par les liaisons chimiques entre les groupements latéraux d'acides aminés voisins. Enfin, la structure tertiaire correspond au repliement de la protéine dans l'espace (dans une structure tridimensionnelle qui serait comparable à un collier qui s'emmêle dans un sac), et c'est elle qui donne à la protéine ses propriétés fonctionnelles. Certaines protéines peuvent s'associer entre elles pour former un multimère ou polymère. Les protéines individuelles qui le constituent sont considérées comme des monomères ou sous-unités, l'agencement entre elles donnant la structure quaternaire (cela correspondrait à des colliers ou bracelets qui s'accrochent entre eux).

LA CONNAISSANCE DES PROTÉINES DES BLÉS EN QUELQUES GRANDES ÉTAPES

Il est acquis aujourd'hui que le gluten se fabrique à partir des protéines de réserve. Or il a fallu attendre 1728 pour que Beccari qualifie de « glutineuse » la masse collante qu'il isole de la farine de blé, et sans pour autant faire de lien avec les protéines. Et pour cause ! Le mot protéine n'est apparu que plus tardivement, comme on l'a vu.

En 1819, Gioacchino Taddei montre que le gluten est composé de deux substances, l'une plus abondante, soluble dans l'alcool, à laquelle il donna le nom de *gloioidina*, l'autre insoluble et qu'il désigna par le nom de *zimoma*. Ce résidu insoluble fut aussi dénommé « albumine de plante » par Jöns Jacob Berzélius en 1826, « glutine » par Nicolas Théodore de Saussure, en 1833, et par Jean-Baptiste Dumas et Auguste Cahours, en 1843 (Osborne et Vorhees, 1894).

Ce n'est qu'en 1838 que le mot « protéine » est prononcé pour la première fois. Et ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle - début du XX^e siècle, avec Thomas B. Osborne, que les termes « gliadine » et « gluténine » furent stabilisés pour décrire les deux parties du gluten, extractibles et résiduelles respectivement (Osborne et Vorhees, 1894). Dans son livre *The Proteins of the Wheat Kernel* paru en 1907, il compile les données antérieures sur les protéines du blé et le gluten, et détaille ses propres expérimentations.

Auteurs		Protéines du blé			
Osborne, 1907	Albumines Solubles dans l'eau	Globulines Solubles dans l'eau salée	Gliadines Solubles dans l'alcool dilué (70 %)		Gluténines Solubles dans des solutions acides ou basiques très diluées
Shewry <i>et al.</i> , 1986			Prolamines		
			Riches en soufre α , β , γ -gliadines + gluténines de faible poids moléculaire	Pauvres en soufre ω -gliadines	Gluténines de haut poids moléculaire
Morel <i>et al.</i> , 2000	F5	F4 α , β , γ -gliadines	F3 ω -gliadines et albumines de haut poids moléculaire	F2 Petits et moyens polymères de gluténines	F1 Gros polymères de gluténines

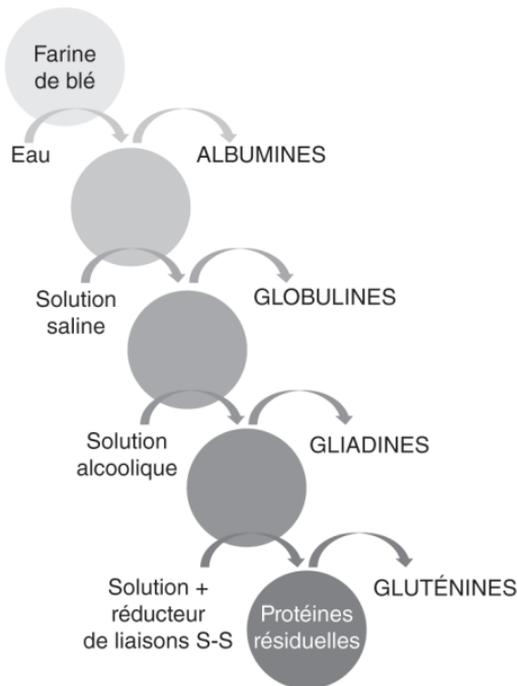


Figure 4. Schéma d'extraction séquentielle des protéines du blé et classification des protéines du blé selon différents auteurs.

Il distingue les albumines solubles dans l'eau, les globulines dans les solutions salines, les gliadines solubles dans l'alcool dilué (70 %) et, enfin, une dernière catégorie non soluble dans les solvants précédents, les gluténines, solubles uniquement dans les solutions acides ou basiques très diluées. Il démontre aussi que ces deux derniers types de protéines sont nécessaires pour former le gluten. Il indique que les gliadines et les gluténines sont des protéines de l'albumen, non présentes dans le germe et représentant 80 % des protéines totales du grain.

Au cours du ^{xx}e siècle, les avancées de la science bousculent la classification d'Osborne. En 1986, Peter R. Shewry et d'autres chercheurs de la station expérimentale de Rothamsted (Royaume-Uni) suggèrent de se baser sur la structure moléculaire des protéines, plutôt que sur des propriétés d'extractibilité et de solubilité mal définies, pour distinguer trois familles de protéines de réserve : les prolamines pauvres en soufre, les prolamines riches en soufre et les prolamines de haut poids moléculaire (voir tableau de la figure 4). Ce terme de prolamine est issu de la contraction des noms de deux acides aminés : proline et glutamine. Donc, comme leur nom l'indique, les prolamines sont particulièrement riches en ces deux acides aminés. La proline a une structure un peu particulière par rapport à celle des autres acides aminés. Cette particularité provoque des coudes dans la chaîne peptidique qui vont gêner l'action des enzymes digestives.

Les protéines de réserve des blés

Le gluten est obtenu à partir des protéines de réserve des céréales cultivées, c'est-à-dire essentiellement du blé tendre (*Triticum aestivum*), du blé dur (*Triticum durum*), de l'épeautre (*Triticum spelta*), du petit épeautre (*Triticum monococcum*), de l'orge (*Hordeum vulgare*) et du seigle (*Secale cereale*).



Vous pouvez scanner le QR code pour voir la vidéo d'animation « Le gluten, qu'est-ce que c'est ? ». © Studio Double, INRAE, 2022.

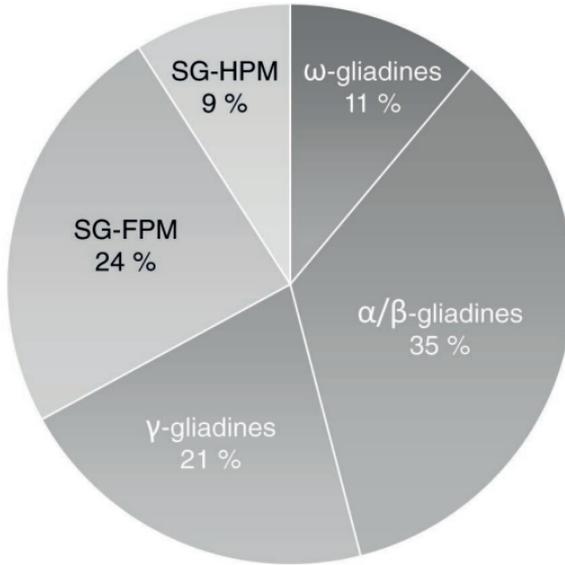


Figure 5. Proportions moyennes de chaque famille de protéines de réserve du blé. SG-FPM : sous-unités gluténines de faible poids moléculaire ; SG-HPM : sous-unités gluténines de haut poids moléculaire.

Bien que ce ne soit évidemment pas leur fonction première, les protéines de réserve des blés se révèlent capables de donner au gluten ses propriétés viscoélastiques, qui se retrouvent dans la pâte. En effet, la pâte à pain possède à la fois les propriétés des liquides (viscosité) et des solides (élasticité), d'où ce terme de viscoélasticité.

Au niveau moléculaire, le gluten est composé de plus de 100 protéines — monomères, oligomères et polymères — différentes (Xhaferaj et Scherf, 2024). Ce sont, comme nous l'avons vu, essentiellement des gliadines et des gluténines.

Les gliadines : championnes de viscosité et d'extensibilité

Dans le grain, les gliadines sont dites monomériques, car non liées entre elles (à l'inverse des gluténines qui sont toujours associées entre elles !), et représentent 50 à 70 % des protéines de réserve (figure 5). Elles confèrent à la pâte ses propriétés de viscosité et d'extensibilité (voir encadré).

Elles présentent une diversité de taille et de composition en acides aminés, qu'on classe en quatre grands groupes (figure 6).

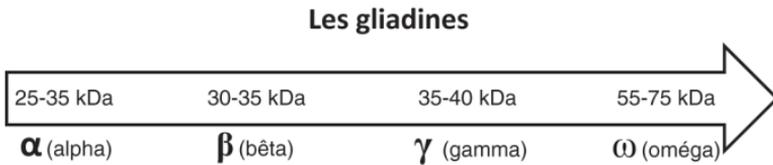


Figure 6. Masses moléculaires en kilodaltons des différents groupes de gliadines.

Comme les α (alpha) et β (beta)-gliadines présentent plusieurs similitudes dans leur structure et leur nombre d'acides aminés, elles sont généralement regroupées et nommées collectivement α/β -gliadines. Depuis peu, elles sont appelées seulement alpha.

Les α/β , auxquelles s'ajoutent les γ (gamma)-gliadines, sont majoritaires, tandis que les ω (oméga)-gliadines sont moins nombreuses :

- les α/β - et γ -gliadines peuvent être vues comme des bracelets de 260 à 330 perles et pesant entre 25 et 40 kDa. La proportion de perles de glutamine et proline (30-40 % de glutamine et 15-20 % de proline) est un peu moins importante que chez les ω -gliadines. Par contre, des perles orange de cystéine (acide aminé soufré) sont présentes (6 pour les α/β - gliadines et 8 pour les γ -gliadines), permettant de relier des parties du bracelet entre elles (en établissant des liaisons disulfures intramoléculaires). Ces α/β - et γ -gliadines sont classées dans les prolamines riches en soufre ;

- les ω -gliadines ressemblent à des colliers constitués de 370 à 420 perles (acides aminés), mais qui n'ont pas de perle orange de cystéine et qui sont assez lourds à porter (leur masse moléculaire est comprise entre 55 et 75 kDa selon les sources). Parmi les perles utilisées, on trouve majoritairement les acides aminés glutamine (40-50 %), proline (20-30 %) et phénylalanine (8-9 %). Elles appartiennent au groupe des prolamines pauvres en soufre (en raison de cette absence de cystéine).

QU'EST-CE QUE L'EXTENSIBILITÉ DE LA PÂTE ?

Une pâte, faite de farine de blé et d'eau, peut être étirée. Elle va se déformer, s'allonger jusqu'à un point de rupture. On dit alors que la pâte est extensible.

Ce degré d'extensibilité ou capacité à s'étirer sans déchirure peut être apprécié au laboratoire par des tests rhéologiques menés en étirant la pâte entre deux crochets ou en insufflant de l'air dans une boule de pâte jusqu'à la rupture, comme dans le test avec l'alvéographe Chopin.

Le boulanger est en capacité d'apprécier cette qualité au cours des différentes étapes de la panification, en observant et en étirant la pâte dès la fin du pétrissage ou en évaluant sa capacité d'allongement lors du façonnage.

Les gluténines : premières au championnat d'élastique

Les gluténines constituent l'autre fraction des protéines de réserve. Dans le grain, elles sont associées entre elles et forment des polymères de taille et de masse variables.

Ainsi, on distingue :

- des bracelets composés d'environ 260 à 330 perles, qui représentent les sous-unités gluténines de faible poids moléculaire ou SG-FPM (de masse moléculaire 30-45 kDa) ;
- des colliers composés d'environ 520 à 850 perles et dénommés sous-unités gluténines de haut poids moléculaire ou SG-HPM. Ils appartiennent à la catégorie des prolamines de haut poids moléculaire (de masse moléculaire 60-100 kDa).

Quatre-vingts pour cent des gluténines sont des bracelets appartenant à la famille des prolamines riches en soufre. Comme les gliadines, elles sont constituées majoritairement de perles de proline (entre 10 et 20 %) et de glutamine (30 à 40 %). Les perles orange (cystéines) présentes peuvent se relier entre elles par des liaisons disulfures sur le même collier (intramoléculaires). Les perles orange qui se situent aux extrémités du collier ou du bracelet peuvent s'associer à des perles orange d'autres bijoux (liaisons intermoléculaires), pour former ces très longs colliers que sont les polymères. La masse de ces polymères peut atteindre

plusieurs millions de daltons. Les gluténines confèrent à la pâte son élasticité (voir encadré).

D'autres céréales, tels l'orge, le seigle et l'avoine, possèdent aussi des prolamines, mais nommées différemment (hordéines pour l'orge, sécalines pour le seigle, avénines pour l'avoine).

QU'EST-CE QUE L'ÉLASTICITÉ DE LA PÂTE ?

L'élasticité est la capacité de la pâte à reprendre totalement ou partiellement sa forme après une déformation plus ou moins intense.

Elle peut se vérifier à différentes étapes de la panification.

En général, le boulanger l'apprécie un peu avant la mise au four, par une légère pression du pouce sur la pâte : si l'empreinte du doigt s'efface rapidement, c'est-à-dire si la pâte reprend de suite sa forme initiale, cela signifie que le pâton peut supporter un temps de fermentation plus important sans risques de relâchement, on peut alors retarder l'enfournement. Par contre, si l'empreinte du doigt reste visible, les risques d'affaissement des pâtons à la mise au four sont importants, il est donc urgent d'enfourner !

Les gluténines jouent un rôle prépondérant dans l'expression de l'élasticité (ou ténacité).

Quel rapport avec la génétique ?

Chez le blé tendre, la plupart des gliadines sont codées par des gènes localisés sur les bras courts des chromosomes 1A, 1B, 1D et 6A, 6B (figure 7). Il existe cependant des γ -gliadines qui sont codées par des gènes situés sur les chromosomes 3B et 3D.

Les « bracelets » de gluténines (SG-FPM) sont aussi codés au niveau des bras courts des chromosomes 1A, 1B et 1D, tandis que les « grands colliers » de gluténines (SG-HPM) le sont au niveau des bras longs des chromosomes 1A, 1B et 1 D.

Orge et hordéines

L'orge (*Hordeum vulgare*) fait partie, avec le petit épeautre (*Triticum monococcum*) et l'amidonnié (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccum*), des cultures fondatrices du Néolithique,

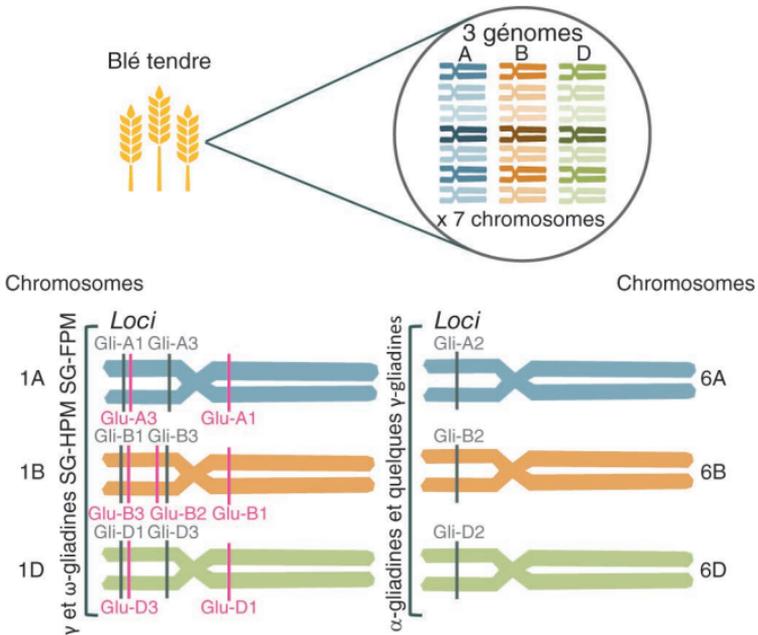


Figure 7. Localisation des gènes codant pour les gliadines et les gluténines du blé tendre sur les chromosomes 6 et 1 des génomes A, B et D.

c'est-à-dire des premières espèces domestiquées par les premières communautés d'agriculteurs de l'Holocène, il y aurait environ 12 000 ans.

Le grain d'orge est assez semblable à celui du blé, quoiqu'un peu plus allongé. L'orge est une céréale dite « vêtue » car, au moment du battage, les enveloppes du grain ne sont pas éliminées mais y adhèrent encore. Un décortilage est alors nécessaire pour mettre le grain à nu. L'orge est utilisée pour produire du malt servant à la fabrication de la bière et pour l'alimentation animale. Une toute petite partie est destinée à l'alimentation humaine. On la retrouve dans des céréales de petit-déjeuner ou consommée dans des soupes (orge perlé).

Dans l'orge, le gluten est composé d'hordéines. Les hordéines pauvres en soufre sont de type C, tandis que les prolamines riches en soufre sont de type γ et B. Les hordéines de haut poids moléculaire sont les hordéines D.

Seigle et sécals

Le grain de seigle est assez semblable à celui du blé. Du Moyen Âge au XIX^e siècle, il était consommé sous forme de pain (pain noir) et représentait la deuxième céréale la plus cultivée en France. Aujourd'hui, il est cultivé le plus souvent en agriculture biologique. Il est transformé en farine ou utilisé dans des boissons alcoolisées (bière, whisky, vodka).

Les prolamines du seigle sont appelées sécals (voir aussi encadré, pour le cas du triticale). Les sécals pauvres en soufre sont les ω -sécals, les riches en soufre sont les γ -40 k et les γ -75 k sécals. Enfin, on trouve également des sécals de haut poids moléculaire.

LE TRITICALE : UN CROISEMENT BLÉ × SEIGLE

Le triticale est issu d'un croisement entre blé et seigle, afin de combiner la productivité du premier et la rusticité du second. Son utilisation est quasi exclusivement l'alimentation animale. Pour l'utiliser en panification, sa faible teneur en protéines oblige à le mélanger. Les protéines de réserve du triticale sont constituées de gluténines de faible et de haut poids moléculaire provenant des génomes AABB du blé, de sécals de haut poids moléculaire et de γ -75 k sécals codées par le génome RR du seigle, ainsi que des ω -sécals et gliadines, des γ -40 k sécals et des α/β - et γ -gliadines.

Avoine et avénines

Le règlement européen en cours n° 41/2009 relatif à la composition et à l'étiquetage des denrées alimentaires convenant aux personnes souffrant d'une intolérance au gluten stipule que la plupart, mais non la totalité, de ces personnes peuvent inclure l'avoine dans leur régime alimentaire sans effets nocifs pour leur santé. Cependant, des recherches sont actuellement en cours sur ce point. La vigilance se situe aussi sur la possibilité de contamination de l'avoine par du blé, du seigle ou de l'orge lors de la récolte, du transport ou du stockage des céréales. L'étiquette des produits doit stipuler le risque de contamination des produits contenant de l'avoine par du gluten.

L'Afdiag (l'Association française des intolérants au gluten) préconise de n'utiliser que les produits à base d'avoine, revêtus du logo « Épi barré » et qui sont contrôlés et analysés (figure 8). La présence d'avoine est en outre stipulée sous le logo, pour le cas des cœliaques qui y sont sensibles.



FR-000-000

Figure 8. Le logo « Épi barré » apposé sur les produits céréaliers sans gluten. OATS-FR-000-000 : l'Afdiag indique la présence d'avoine sous le logo.

À la différence des autres céréales de la tribu des *Triticeae*, l'avoine contient surtout des globulines qui représentent plus de 50 % de ses protéines (figure 9). Elle contient aussi des albumines (1 à 12 %) et une petite fraction de protéines de réserve constituée de prolamines, appelées avénines (4 à 15 %), et de glutélines³ (< 10 %) en quantité bien inférieure à celle des protéines pouvant former le gluten chez les blés, l'orge et le seigle. Les avénines ne semblent pas contenir de peptides (épitopes) responsables de la maladie cœliaque, que l'on peut trouver dans le gluten des blés, de l'orge et du seigle. Les différentes classes de protéines sont synthétisées dans le tableau 1.

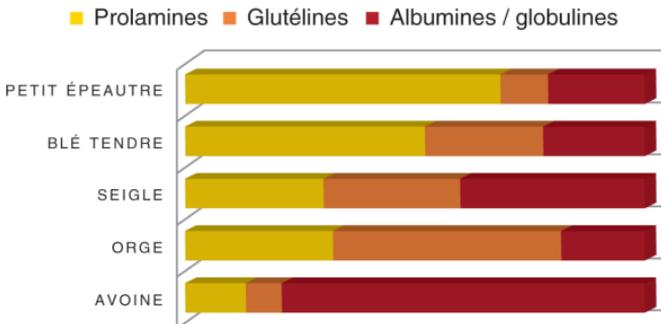


Figure 9. Proportions de prolamines, glutélines et albumines/globulines chez différentes céréales.

3. Les glutélines sont les protéines les plus difficiles à extraire. Chez le blé, elles sont appelées gluténines.

Tableau 1. Les protéines de réserve du blé, de l'orge et du seigle : dénomination, masses moléculaires, proportions et structures.

Espèces	Protéines	Masses moléculaires	Proportions des protéines de réserve	Structures
	Prolamines riches en soufre			
Blé	γ-gliadines	30-45 kDa 25-35 kDa	70-80 %	Monomères
	α-gliadines			Monomères
	Gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM) de type B et C			Polymères
Orge	B-hordéines et γ-hordéines	32-45 kDa	80 %	Agrégées, monomères
Seigle	γ-sécalines	40-75 kDa	80 %	Polymères
	Prolamines pauvres en soufre			
Blé	ω-gliadines	55-75 kDa	10-20 %	Monomères
	Gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM) de type D			Agrégées, polymères
Orge	C-hordéines	40-72 kDa	10-15 %	Monomères
Seigle	ω-sécalines	48-55 kDa	10-15 %	Monomères
	Prolamines de haut poids moléculaire			
Blé	Gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM)	65-90 kDa	6-10 %	Polymères
Orge	D-hordéines	> 100 kDa	2-4 %	Polymères
Seigle	Sécalines de haut poids moléculaire	> 100 kDa	2 %	Polymères

LE GLUTEN : UN CASSE-TÊTE POUR LES PHYSICIENS

Bien que consommé par les humains depuis des millénaires, le gluten n'en garde pas moins sa part de mystère. Il est classé par les physiciens dans les « matières molles », c'est-à-dire ni liquides ni vraiment solides, au même titre que les crèmes, mousses ou gels utilisés dans des domaines aussi variés que l'alimentaire, les cosmétiques ou encore le bâtiment. Une de leurs caractéristiques principales est leur viscoélasticité. En effet, « lorsqu'elle est déformée, la matière molle ne réagit pas tout à fait comme les

liquides qui s'écoulent. Ni d'ailleurs comme les solides qui eux retrouvent leur forme première lorsque la contrainte mécanique est relâchée, si cette dernière n'est pas trop forte »⁴. Ce qui est le cas du gluten, qui n'est ni liquide — il ne s'écoule pas — ni solide, car il peut notamment s'étirer tel un chewing-gum.

Caractériser les propriétés mécaniques de cette pâte élastique et collante n'est pas chose aisée. Le gluten est insoluble dans l'eau et il est nécessaire d'utiliser des détergents, aussi appelés tensio-actifs, pour solubiliser dans l'eau gliadines et gluténines. Or, « cette manipulation a un impact sur certaines interactions physiques et chimiques essentielles aux propriétés mécaniques du gluten⁵ ». Il est donc nécessaire de concevoir de nouveaux protocoles d'extraction des protéines du gluten. Des équipes du CNRS et d'INRAE de Montpellier ont mis au point un solvant, qui permet d'obtenir des échantillons représentatifs de ces protéines en partie hydrophobes. De plus, ce solvant permet, notamment en jouant sur la température, de faire varier la composition des échantillons en gliadines et en gluténines, afin de mieux comprendre l'influence de ces protéines sur la structure et les propriétés du gluten. À partir de ces échantillons, les scientifiques ont prouvé que le gluten se comporte comme un gel et ont même réussi à reconstituer des gels de gluten de composition et de rigidité variables dans l'eau.

Au contraire de la plupart des gels, le gluten demeure dans un état proche de l'état dit critique avec des propriétés particulières, notamment une extensibilité extrême. Il se reforme très rapidement quand on le cisaille. Il présente ainsi des propriétés d'autocicatrisation. « Cette caractéristique est liée aux liaisons entre gliadines et gluténines — des ponts disulfures entre deux atomes de soufre et des liaisons hydrogène — qui permettent de former un maillage dynamique capable de se réorganiser sous la contrainte⁶ » (voir encadré).

4. <https://lejournald.cnrs.fr/nos-blogs/focus-sciences/comprendre-lextreme-extensibilite-du-gluten> (consulté le 12/06/2025).

5. *Ibid.*

6. *Ibid.*



LES LIAISONS CHIMIQUES

Une liaison chimique est une interaction plus ou moins durable et forte entre deux atomes proches, au sein d'une même molécule ou entre molécules. Il existe différents types de liaisons dans et entre les protéines de céréales.

On trouve des liaisons fortes, d'énergie élevée, comme les liaisons covalentes, dans lesquelles deux atomes partagent deux électrons. C'est le cas des liaisons ou ponts disulfures (S-S). Elles s'établissent entre les cystéines d'une même protéine (liaison S-S intramoléculaire) ou entre celles de deux protéines (liaison S-S intermoléculaire), ou encore entre une protéine et un composé possédant un groupement sulfhydryl (-SH). Ce type de liaison est difficile à rompre et nécessite pour cela l'emploi d'un réducteur. Les liaisons non covalentes sont de plus faible énergie et plus faciles à briser.

Celles-ci sont de plusieurs types :

- les liaisons hydrogène, qui se forment dans les protéines, entre l'oxygène du C=O d'une liaison peptidique et l'hydrogène du N-H d'une autre liaison peptidique. Elles jouent ainsi un rôle dans la mise en place de la structure secondaire. Elles peuvent aussi exister entre les groupements latéraux des acides aminés de deux protéines voisines. En présence d'eau, des liaisons hydrogène peuvent se rompre et se reformer entre la protéine et l'eau ;
- les liaisons hydrophobes, qui sont le fait des groupements latéraux apolaires de certains acides aminés (glycine, alanine, valine, leucine, isoleucine, méthionine, proline, phénylalanine, tryptophane). Ces groupements qui « fuient » l'eau se rapprochent dans des zones hydrophobes, à l'intérieur de la protéine, contribuant à la structure tertiaire ;
- les liaisons ioniques ou électrostatiques, qui se mettent en place entre des acides aminés de charge opposée, par exemple entre la lysine et l'acide aspartique ou l'acide glutamique. Les résidus chargés sont rares dans les domaines répétitifs des protéines du gluten, mais des liaisons ioniques peuvent se former entre les résidus d'acides aminés dans les domaines globulaires (aux extrémités des protéines de réserve).

DES PROTÉINES NÉCESSAIRES À LA CROISSANCE DE LA PLANTULE

Le gluten provient des protéines de réserve qui, au départ, ne sont pas destinées à être ingérées par les humains. Mais à quoi servent donc ces protéines de réserve pour la plante ?

Le grain de blé semé en terre va germer, notamment en se servant de ses protéines de réserve, qu'il dégrade en acides aminés. Cette dégradation se fait grâce à plusieurs familles d'enzymes (les protéases). Le processus commence dès que la graine se trouve dans des conditions favorables de température et d'humidité. Le grain qui est à l'état sec et ne contient guère plus de 10 à 15 % d'eau va devoir s'imbiber pour que la germination débute. En quelque 72 heures, sa masse va passer de 55 mg environ à un peu plus de 80 mg. Cette prise d'eau va déclencher dans le germe la production d'une hormone, l'acide gibbérellique, qui induit, au niveau de la couche à aleurone (voir figure 1), la synthèse d'enzymes. L'action combinée d'enzymes synthétisées *de novo* et d'enzymes déjà en place va permettre la dégradation des protéines stockées dans l'albumen amylicé et ainsi libérer des acides aminés et des petits peptides pour le développement de la racicule (petite racine). Dans le même temps émerge le coléoptile, future tige de la plante. Ce coléoptile grandit et d'autres racines apparaissent.

Les étapes de l'accumulation des protéines de réserve

La jeune plantule poursuit son développement. Ses racines s'allongent pour assurer l'ancrage de la plante et sa nutrition, la partie aérienne s'étoffe et des tiges secondaires apparaissent. S'ensuit alors une phase pendant laquelle les tiges vont s'allonger à leur tour. Dès le début, le futur épi est présent au sommet de chaque tige et mesure quelques millimètres. Il se développe progressivement. Une fois cette étape de croissance des tiges et de l'épi terminée, ce dernier va émerger de la gaine foliaire qui l'enveloppe.

L'épi est constitué d'épillets renfermant quatre fleurs, qui vont donner chacune potentiellement un grain après fécondation. Sitôt celle-ci assurée, les grains se développent rapidement. Leur taille triple en quatre jours. Les protéines y sont synthétisées dès le

LES POLYMÈRES DE GLUTÉNINES DANS LE GRAIN

On ne connaît pas actuellement la structure exacte des polymères de gluténines dans le grain, mais le modèle le plus récent suggère un squelette constitué de gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) liées par des liaisons S-S « tête-queue » (liaison entre l'extrémité N-terminal d'une sous-unité et l'extrémité C-terminal d'une autre). Sur ce squelette viendraient se fixer, au niveau des SG-HPM de type y, des chaînes de gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM).

Leur masse moléculaire va de 100-150 000 à 1×10^6 daltons. Leur composition en sous-unités de gluténines varie selon la taille, avec plutôt des SG-FPM pour les petits polymères et jusqu'à 30 % de SG-HPM pour les plus gros. Des liaisons non covalentes (liaisons hydrogène, interactions hydrophobes et ioniques) participent à la cohésion de ces agrégats. On ne sait pas comment ce processus de polymérisation est contrôlé, mais on sait qu'il est influencé par l'environnement (fertilisation, conditions climatiques) et la composition allélique en gluténines.

Pour le dire de manière plus imagée, on ne connaît pas la manière dont les colliers et bracelets de gluténines s'enchevêtrent dans un grain de céréale. Le modèle le plus récent suggère que les plus grands colliers sont reliés les uns aux autres par les perles orange situées aux extrémités. Toujours au niveau de ces extrémités, des bracelets de gluténines peuvent se fixer en latéral *via* d'autres perles orange, pour former comme une résille de colliers et bracelets. Ces perles orange ont comme des petits crochets qui leur permettent de s'accrocher fermement les unes aux autres.

Il faut imaginer que, dans une résille, il existe en moyenne plus de bracelets que de colliers. La résille peut se replier sur elle-même grâce à des perles aimantées, collantes ou auto-agrippantes, qui vont interagir avec d'autres perles de même nature.

Selon le grain de blé et son environnement, les résilles de gluténines peuvent être agencées différemment. N'oublions pas que d'autres bracelets sont présents dans le grain de blé, ce sont les gliadines. Ces bracelets sont indépendants des résilles dans le grain.

dixième jour après la floraison. Cette accumulation va se poursuivre pendant une trentaine de jours. La synthèse de l'amidon se fait en parallèle de celle des protéines. Environ 40 à 45 jours après la floraison, le grain jusqu'alors vert et turgescent va peu à peu se déshydrater et devenir dur, jaune et assez sec pour être récolté. C'est au cours de cette période de dessiccation que les gluténines synthétisées précédemment sous forme de monomères, puis associées dans de petits polymères, vont former de plus grosses structures stabilisées par des liaisons disulfures. Pour reprendre l'analogie avec les colliers et bracelets, ceux-ci vont s'associer pour former une « résille » (voir encadré précédent).

Les deux acides aminés prépondérants dans les protéines du gluten sont, nous l'avons vu, la glutamine et la proline. La glutamine contient l'azote nécessaire à la germination des céréales. La proline permet un repliement dense des brins de protéines dans l'albumen amylicé des céréales, assurant un stockage optimal de la réserve d'azote (Wieser *et al.*, 2023).

Comment passe-t-on des protéines de réserve au gluten ?

Lors de la mouture, les « résilles » stockées dans le grain se retrouvent accessibles, de même que les « bracelets » de gliadines et les « colliers » de ω -gliadines. Dès qu'on ajoute de l'eau et qu'on malaxe la pâte, ils vont être soumis à rude épreuve avec des risques de se casser et de s'abîmer. Les « résilles » peuvent alors se réorganiser avec d'autres « résilles » pour former un filet. Les gliadines vont se prendre dans le filet et contribuer à le renforcer et à le complexifier.

Globalement, on sait que les gluténines de haut poids moléculaire ont tendance à avoir une structure étendue, tandis que les gliadines et les gluténines de faible poids moléculaire adoptent une forme plus compacte. Ainsi, certains auteurs⁷ proposent d'imaginer les gluténines comme de longues cordes, sur lesquelles glissent les gliadines sous forme de minuscules boules (figure 10).

7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818124004213?via%3Dihub> (consulté le 12/06/2025).

POUR ALLER PLUS LOIN

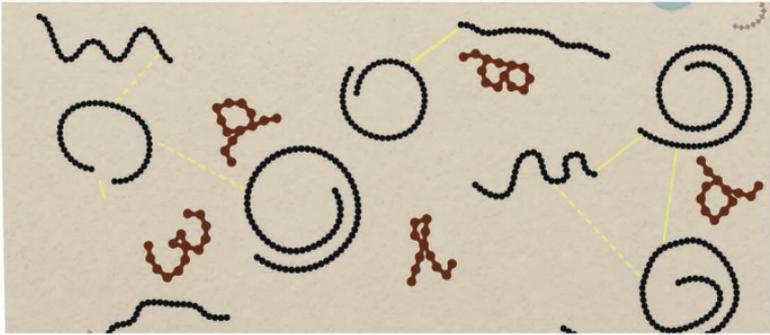
La portion centrale des gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) est en spirale et correspond au domaine répétitif. Ce domaine est riche en glutamine. Comme toutes les protéines, les SG-HPM possèdent une extrémité N-terminale et une extrémité C-terminale. Ces extrémités ont une structure globulaire stabilisée par des liaisons non covalentes. La particularité de ces extrémités réside dans le fait qu'elles possèdent des cystéines qui vont leur permettre d'établir des liaisons disulfures avec d'autres SG-HPM ou avec des gluténines de faible poids moléculaire (SG-FPM) pour former des polymères. Ces polymères de gluténines, présents dans la farine, vont interagir entre eux lors de l'hydratation et du malaxage pour former le gluten de la pâte.

D'où provient l'élasticité du gluten ?

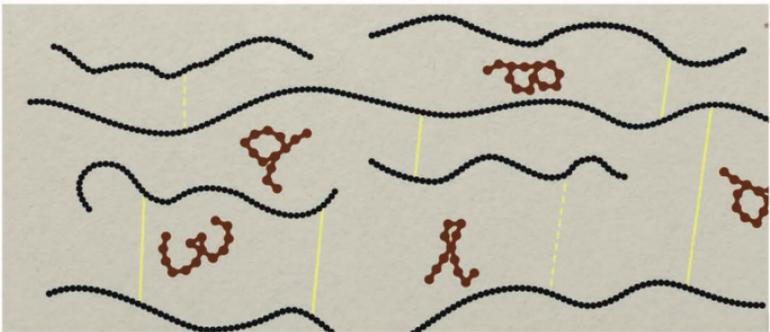
De la même manière que l'on ne connaît pas l'arrangement exact des gluténines et des gliadines dans le grain, on ne le connaît pas, non plus, dans la pâte. Dans les deux cas, ces agencements sont purement spéculatifs, même si les travaux de recherche ont permis au cours de ces 40 dernières années d'imaginer des modèles.

Plusieurs hypothèses sont évoquées (hormis le nom « *loop and train* » qui est utilisé, les autres noms donnés aux hypothèses sont imaginés ici pour aider à la compréhension) :

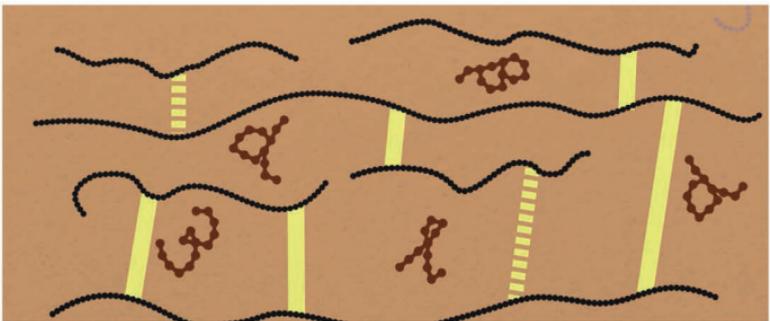
- l'hypothèse « Queue du marsupilami », où le domaine central répétitif des gluténines qui forme une spirale pourrait se comporter comme un ressort et expliquer l'élasticité du réseau de gluten ;
- l'hypothèse « Pelote de laine », où les gros polymères de gluténines seraient tellement enchevêtrés que cela contribuerait à l'élasticité ;
- l'hypothèse « Limace », où les plus petits polymères de gluténines et les gliadines seraient responsables de la composante visqueuse ;
- l'hypothèse « *Loop and Train* », qui est actuellement l'une des plus citées et que nous détaillerons plus bas ;
- l'hypothèse la plus récente de l'hyperagrégation.



Hydratation + pétrissage : les gluténines se « déplient » et de nouvelles liaisons se forment.



Cuisson : les liaisons se solidifient.



Gluténines



Gliadines

Figure 10. Évolution de la forme des protéines et de leurs liaisons au cours de l'hydratation, du pétrissage et de la cuisson. © Studio Double.

Zoom sur l'hypothèse *Loop and Train*

Les caractéristiques générales de la viscosité et élasticité du gluten peuvent être expliquées par le modèle *Loop and Train* (Belton, 1999 et 2005), qui est maintenant largement répandu.

Au niveau de la résille, les perles vertes de glutamine pourraient s'accoler à des perles vertes d'une résille voisine. Elles formeraient alors une zone dite *train* ou « glutamine ZIP », en référence à la fermeture Éclair. Parfois, au niveau de certaines perles, la liaison ne tiendrait pas bien et il y aurait formation d'une « boucle » lâche (figure 11). Des bracelets (gliadines) pourraient aussi s'associer grâce aux phénomènes d'attraction qui se produisent entre certaines perles.

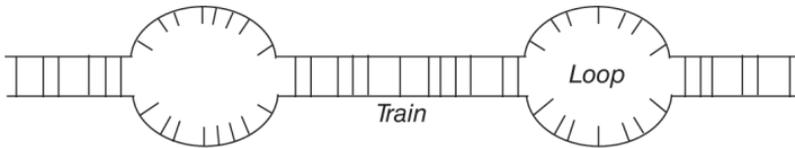


Figure 11. Hypothèse *Loop and Train*. D'après Belton, 1999 et 2005.

Cette hypothèse propose que l'hydratation des protéines de la farine conduise à la formation de liaisons hydrogène régulières entre les glutamines des domaines répétitifs de SG-HPM adjacentes. La poursuite de l'hydratation entraînerait le remplacement de certaines des liaisons hydrogène interchaînes par des liaisons hydrogène avec l'eau, ce qui conduirait à un équilibre entre les régions alignées (*train*) et les régions en « boucle » (*loop*). Cet état d'équilibre serait perturbé lors de l'application d'une force et il y aurait retour à l'équilibre lorsque la force serait relâchée (propriété d'élasticité). Lorsque la force appliquée serait trop grande, il pourrait y avoir rupture irréversible des liaisons.

Comment gliadines et gluténines interagissent ?

Les SG-FPM pourraient interagir entre elles ou avec les gliadines au niveau de leur domaine central, grâce à des liaisons hydrophobes et électrostatiques. Leurs extrémités C-terminal permettraient des liaisons disulfures avec d'autres SG-FPM

pour former des oligomères ou de prendre part aux polymères de SG-HPM.

Les α/β - et γ -gliadines auraient la capacité d'interagir entre elles ou avec les gluténines par le biais d'interactions hydrophobes et électrostatiques. Et ce, à différents niveaux de la molécule.

Les ω -gliadines seraient capables de s'associer entre elles ou potentiellement avec les SG-HPM par des liaisons hydrogène au niveau de leur domaine répétitif.

L'hypothèse de l'hyperagrégation

Elle fait intervenir des interactions physiques et chimiques. Ce modèle présente trois niveaux de complexité. Au niveau I, le niveau moléculaire, se trouvent les polymères de gluténines présents dans le grain, liés par des liaisons covalentes et très dépendants de la composition allélique en gluténines et en molécules dites « terminatrices » qui vont déterminer leur taille. Au niveau II ou mésoscopique, les polymères s'associent dans des structures plus ou moins importantes par le biais d'enchevêtrements stabilisés par des liaisons hydrogène et des S-S supplémentaires. Les agrégats produits ont une taille inférieure à 100 μm , qui est dictée par la quantité et la taille des polymères de niveau I. De plus, les polymères longs et flexibles s'agrègeraient plus facilement que les polymères courts et rigides. À ce stade, on ne sait pas comment les propriétés des polymères sont reliées à la composition en sous-unités gluténines et quel est le rôle des gliadines. Ce phénomène interviendrait dans le grain, mais aussi lors de la phase de repos de la pâte à la suite du pétrissage. Le modèle envisage un niveau III ou macroscopique, avec des agrégats de taille élevée (> 100 μm) associés par de nouveaux enchevêtrements. Dans ces édifices, les liaisons covalentes ne sont plus prédominantes et leur formation est influencée par les paramètres du procédé : degré de cisaillement, contraintes. Il apparaît aussi que d'autres composés de la farine comme les lipides ou les arabinoxylanes participeraient à l'enchevêtrement.

QUE RETENIR ?

- Le gluten n'est pas un constituant des grains de céréales et des farines. C'est un réseau qui se forme à partir des protéines de la farine quand on fait une pâte (figure 12).
- Les blés, l'orge, le seigle et le triticale possèdent les protéines du gluten. L'avoine aussi, mais en très faible proportion par rapport aux autres céréales.
- Les protéines du gluten sont en fait les protéines de réserve de ces céréales. Elles sont synthétisées dans l'épi dix jours après la floraison, en même temps que l'amidon. Ces protéines servent de réserve d'acides aminés pour la germination du grain, qui donnera la future plantule.
- Ces protéines de réserve sont nommées prolamines du fait de leur richesse en deux acides aminés prépondérants : proline et glutamine.
- Chez le blé, les protéines de réserve sont aussi appelées gliadines et gluténines.
- Les gliadines ont un impact dans l'allongement, l'extensibilité de la pâte, tandis que les gluténines jouent sur la résistance, l'élasticité de la pâte.
- Les polymères de gluténines sont parmi les structures protéiques les plus complexes trouvées dans la nature. Ils forment le squelette du réseau de gluten. Les gliadines remplissent ce squelette.
- La structure du gluten est en trois dimensions.

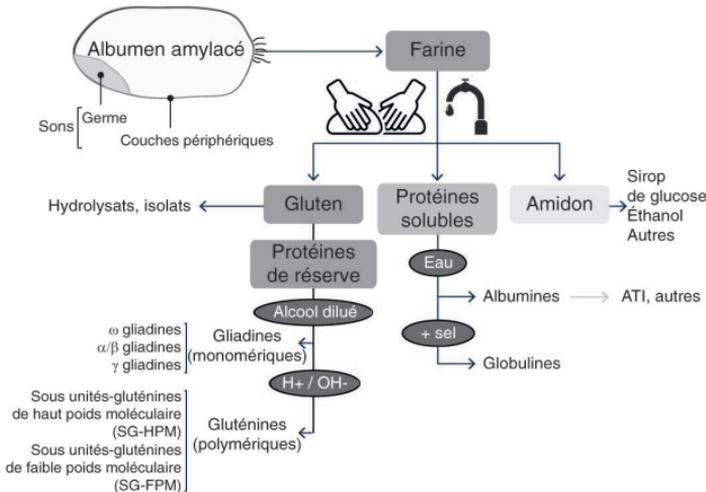


Figure 12. Le grain de blé : produits et co-produits.



À QUOI SERT LE GLUTEN DANS L'ALIMENTATION ?

Le gluten se développe dès que nous fabriquons une pâte. Il est dès lors présent dans le pain, les pâtes alimentaires et un grand nombre de produits, tels les viennoiseries, les gâteaux, les biscuits, les crackers, les biscottes, les crêpes, le pain azyme. On peut aussi ajouter à cette liste les hosties et les confiseries enrobées de feuille d'hostie, comme les calissons ou le nougat, ou encore les feuilles de brick ou de pâte filo. Et il ne faut pas oublier la chapelure, ce qui exclut les aliments panés d'un régime sans gluten. Enfin, il convient aussi d'inclure des préparations où un ajout de farine a lieu, comme dans les sauces à base de roux (p. ex., la béchamel), les pommes dauphine (mélange de pâte à choux et de purée de pommes de terre) ou encore les gnocchis. D'autres produits, non issus de la farine, tels couscous, boulgour, freekeh (grains de blé récoltés verts et séchés), céréales de petit-déjeuner⁸, orge perlé ou grains de blé précuits contiennent aussi les protéines du gluten.

Interrogeons-nous dans un premier temps sur les diverses façons de mesurer la quantité de protéines du gluten dans les grains et les farines, et attardons-nous sur la fabrication du pain et des pâtes alimentaires, qui sont les plus consommés.

COMMENT SE MESURE LA QUANTITÉ DE PROTÉINES CAPABLES DE GÉNÉRER DU GLUTEN ?

D'un point de vue commercial, la qualité du blé et de la farine repose d'abord sur leur teneur en protéines totale. Cette teneur en protéines ne suffit pourtant pas à prédire la qualité des blés.

8. Certaines céréales de petit-déjeuner sous forme de flocons (*flakes* en anglais), fabriquées à partir de riz, contiennent bien du gluten. Les protéines de blé ajoutées y fournissent non seulement les protéines nécessaires aux allégations nutritionnelles, mais elles permettent également de lier les composants et contribuent à la solidité des flocons.

D'autres informations sont nécessaires telles que la teneur en gluten humide et en gluten sec, qui vont rendre compte de la capacité de rétention d'eau de la pâte et de sa force. Vous pouvez, chez vous, effectuer cette détermination à partir d'une quantité connue de farine additionnée d'eau salée. La pâte ainsi obtenue est laissée au repos quelques minutes, puis lavée sous un filet d'eau salée. La boule de gluten restante est essorée et pesée, pour donner la quantité de gluten humide. Cette boule est ensuite séchée, puis pesée. On obtient ainsi la quantité de gluten sec.

En laboratoire et dans l'industrie, la mesure de la quantité de gluten humide a été automatisée et permet aussi d'évaluer la force du gluten. Un équipement (le Glutomatic®) façonne automatiquement une boule de gluten. Celle-ci est pesée (gluten humide), puis insérée dans une boîte comprenant deux compartiments séparés par un tamis. Cette boîte est soumise à une centrifugation conformément à une méthode standardisée. En fin de centrifugation, on mesure la quantité de gluten restant dans la partie supérieure du tamis.

L'indice de gluten est calculé en divisant la masse de gluten restée dans le compartiment supérieur par celle du gluten humide, le tout multiplié par 100. Plus la valeur est élevée, plus la force du gluten est grande. En effet, un gluten fort va peu ou pas se déliter et résister à la centrifugation. À l'inverse, un gluten faible va se désagréger et passer tout ou partie au travers du tamis sous l'effet de la force centrifuge. Après la pesée, les portions de gluten des deux compartiments sont rassemblées et mises à sécher pour déterminer la quantité de gluten sec.

Ne nécessitant que peu de matière première (10 g) et réalisable sur un simple broyat de grains entiers, cette mesure de l'indice de gluten est effectuée à tous les niveaux de la filière : les sélectionneurs l'utilisent à des stades précoces de la sélection pour évaluer le potentiel technologique des blés, les organismes stockeurs pour classer les blés selon leur utilisation finale et les meuniers pour faire des mélanges répondant aux exigences des utilisateurs de farines (figure 13).

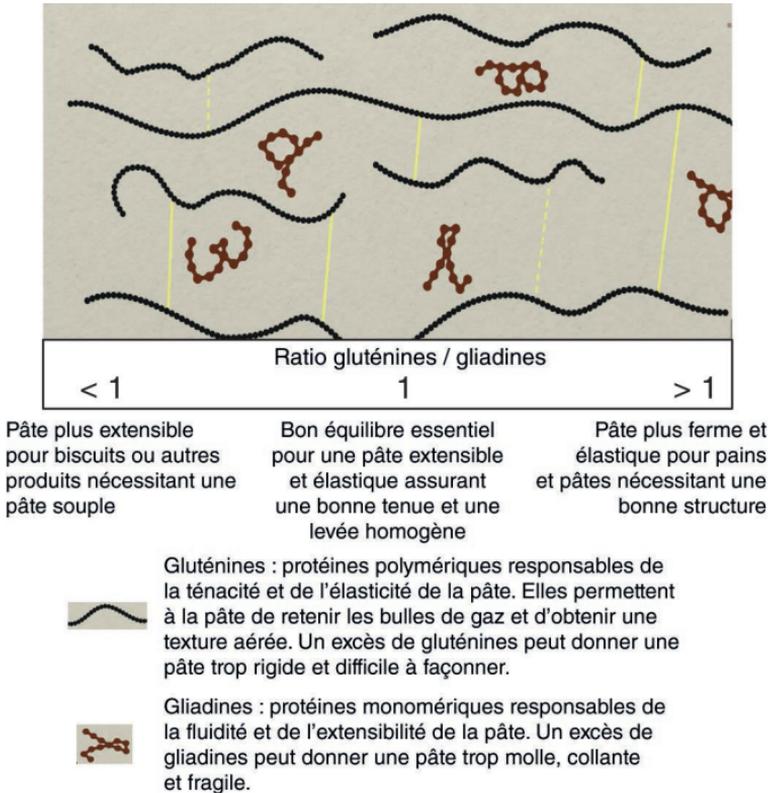


Figure 13. Le ratio gluténines/gliadines. Ce ratio est souvent mesuré dans l'industrie agroalimentaire pour adapter les farines aux différents usages (pain, gâteaux, pâtes, etc.). Ainsi, en boulangerie, on privilégie un ratio gluténines/gliadines plus élevé qu'en pâtisserie. © Studio Double.

LA CONSOMMATION QUOTIDIENNE DE GLUTEN

Les céréales apportent environ 55 % des calories consommées dans le monde et le blé est celle qui est la plus cultivée. Les aliments à base de blé fournissent jusqu'à 20 % des besoins énergétiques de la population mondiale.

La consommation de gluten varie selon les pays. Elle est très fortement liée à la consommation de blé, d'orge et de seigle. La consommation de blé moyenne dans le monde est voisine de 66 kg/tête/an (Bradauskiene *et al.*, 2023),

mais avec de grandes disparités selon les régions (Afrique : 49 kg/personne/an ; Amérique du Sud : 57 kg/personne/an ; Europe : 110 kg/personne/an) et selon les pays (44 kg/personne/an au Japon et 200 kg/personne/an en Tunisie). Entre 1961 et 2018, elle a augmenté en Asie et en Afrique ($\times 1,57$) du fait de la croissance démographique, notamment de la Chine, et aussi du fait que les populations urbaines, avec de plus forts revenus, délaissent les céréales traditionnellement consommées dans le pays au profit du blé. Dans le même temps, elle a diminué en Europe, en Amérique du Nord, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

En France, en 2023, la consommation des principaux produits céréaliers par les Français était estimée par personne et par an, à : 38 kg de pain, 8,2 kg de pâtes, 5 kg de biscuits, 3,3 kg de gâteaux, 4,9 kg de viennoiseries, 5,8 kg de pain de mie et de biscottes et 1,4 kg de couscous⁹. Cela correspond à environ 2,9 kg de gluten par personne et par an, soit de l'ordre de 8 g par jour sans compter les autres sources (céréales de petit-déjeuner, sauces, crêpes...). Ces chiffres sont une estimation moyenne, car il existe des différences liées à l'âge ou au sexe, les personnes de plus de 55 ans consommant, par exemple, plus de pain que les 20-30 ans et les hommes plus que les femmes. Pour comparaison, en 1900, la consommation de pain était de 900 g/jour/personne, ce qui revient à 80 g de gluten par jour sans compter les autres sources.

LE GLUTEN DE BLÉ : TRÈS TÔT, UN GAGE DE QUALITÉ

Un rapport de M. Chevallier sur le gluten-granulé de MM. Véron et cité par Roy (1862) insiste sur le fait que la qualité des farines est liée à leurs proportions plus ou moins grandes de gluten : celles contenant une quantité « moyenne » de gluten donnent une pâte qui « lève bien et un pain de bonne qualité » et celles

9. Pour l'ensemble des données : <https://www.intercereales.com/actualites/ledition-2024-des-chiffres-cles-de-la-filiere-cerealiere-est-parue>. Pour les pâtes : <https://www.cfsi-sifpaf.com/sifpaf-chiffres-cles.php>. Pages toutes deux consultées le 30/01/2025.

contenant du gluten en « grande quantité » donnent du pain « plus nutritif ». Parmi ces dernières, le rapport cite expressément les farines de blé dur d'Odessa.

Ce gage de qualité semble différemment apprécié selon les espèces de céréales. En effet, Beccari, comme le physicien Kessel-Meyer, tentent d'extraire, en vain, « ce genre de colle si tenace » de la farine d'orge, d'avoine, de seigle, de châtaigne, de fèves. Bien qu'ils retrouvent « une bouillie visqueuse semblable à celle dont nous nous servons pour coller les papiers », ils insistent pour dire qu'elle n'a rien de commun avec la colle issue du froment. Ils estiment aussi que la partie amylacée du froment l'emporte sur les autres farines « par un fait particulier : c'est que celles-ci ne se coagulent point toutes dans le même espace de temps, et n'acquièrent point la même consistance ».

AUTANT DE BOULANGERS, AUTANT DE PAINS, AUTANT DE GLUTENS

L'acte de fabriquer du pain s'appelle « panification » et ce terme recouvre un ensemble de pratiques très diverses qui, toutes, transforment un mélange d'eau et de farine en une pâte, puis en pain après cuisson. Schématiquement, la panification se déroule en 5 étapes : pétrissage, pointage, façonnage, apprêt et cuisson.

Lors du pétrissage, farine, eau, levure ou levain et sel sont mélangés, soit à la main, soit avec un pétrin. C'est au cours de cette première étape que le gluten se forme. Le boulanger obtient une masse élastique et visqueuse, remplie d'air et dont les caractéristiques vont dépendre de celles de la farine, de l'intensité et de la durée du procédé.

Pour le pointage, la pâte est laissée au repos pour un temps de fermentation. La levure ou les microorganismes du levain entrent en action, la pâte commence à lever, sa structure change (augmentation de l'élasticité et de la ténacité) et des arômes se développent. La durée du pointage est variable selon la méthode utilisée et selon la température de la chambre de fermentation ou du fournil.

Au cours des étapes de fermentation, les levures dégradent les sucres de la farine en gaz carbonique et en alcool éthylique. Le gluten qui s'est formé lors du pétrissage va emprisonner le dégagement gazeux dans des alvéoles structurant la mie et le volume du pain.

À la fin du pointage, la pâte est divisée en pâtons ayant tous le même poids. Le divisage ou pesage se fait à la main ou avec des équipements de découpage. Cette opération un peu brutale entraîne une perte de souplesse de la pâte, qui nécessite de reconstituer sa structure par un boulage. Pour cela, chaque pâton est légèrement retravaillé et mis au repos pendant une période de détente.

L'étape suivante est celle du façonnage qui va permettre de donner au pain sa forme définitive, en lui faisant subir une série d'écrasements et d'étirements pour redonner du corps à la pâte.

Enfin, intervient la fermentation finale ou apprêt, au cours duquel le pâton lève. Juste avant la cuisson, le pâton est scarifié à l'aide d'une lame (grigne) à des fins esthétiques, mais aussi pour diriger de façon uniforme les gaz libérés lors de la cuisson. Au cours de celle-ci, les alvéoles gazeuses vont se dilater et, dans le même temps, l'amidon va gélatiniser et le gluten coaguler, fixant ainsi la forme du pain et la structure de la mie. Une fois cuit, le pain est laissé au repos (ressuage) pour qu'il refroidisse et permettre au gaz carbonique et la vapeur d'eau de s'échapper.

SPAGHETTIS ET AUTRES PÂTES ALIMENTAIRES CONTIENNENT-ILS DU GLUTEN ?

Les pâtes alimentaires sont confectionnées à partir de blé dur. Le blé dur se caractérise par une teneur en protéines souvent plus élevée que celle du blé tendre, par un grain un peu plus allongé et par une amande vitreuse, de couleur jaune ambré.

Avant d'être transformé en pâtes, le blé dur est moulu pour donner des semoules dont la taille est un peu plus importante (160 à 630 μm) que celle des particules de farine (moins de 160 μm). On parle de pastification pour aborder les 3 étapes de fabrication des pâtes : hydratation/malaxage, extrusion et séchage.

Lors de la première, la semoule est donc hydratée, mais pas trop, et malaxée pour donner un mélange « sableux ». Dès ce stade, les protéines du gluten commencent à réagir.

Ce mélange est ensuite poussé par une vis sans fin vers une filière (ou moule), qui va donner aux pâtes leur forme définitive (petits trous pour les spaghettis, demi-lune pour les torsades, etc.). Au cours de cette étape nommée extrusion, le mélange « sableux » se transforme sous l'effet de la pression de la vis, le réseau de gluten se met en place, la pâte se forme et devient lisse et souple.

Les pâtes sont ensuite séchées à basse (50-55 °C), haute (60-80 °C) voire très haute températures (90-110 °C), avant d'être ensachées pour leur commercialisation. Lors de cette phase de séchage, le réseau de gluten va se figer sous l'effet de la chaleur autour des granules d'amidon, les empêchant d'être exposés à la surface des pâtes et libérés dans l'eau de cuisson (voir encadré). Le séchage à basse température est long (24 heures), il préserve la couleur et la valeur nutritionnelle. C'est un séchage utilisé pour des pâtes artisanales ou haut de gamme. Le séchage à très haute température est un séchage rapide (quelques heures) qui va renforcer le réseau protéique, lorsque la teneur en protéines est un peu faible. Il va donner des pâtes un peu plus colorées (brun/rouge). Il est très utilisé dans l'industrie pour des pâtes de qualité courante. Le séchage à haute température constitue une solution intermédiaire.

POURQUOI LES PÂTES COLLENT-ELLES PARFOIS ?

Au moment de la cuisson, si le réseau de gluten n'est pas assez important ou assez résistant, il va peiner à emprisonner les granules d'amidon en train de gonfler, qui migrent alors vers la surface des pâtes. Cela se traduit par des pâtes qui collent entre elles. Une partie de l'amidon est aussi relarguée dans l'eau de cuisson sous forme de matière blanche. Pour éviter ces désagréments, les industriels de la filière pâtes alimentaires recherchent des blés durs avec une forte teneur en protéines (14 % de la matière sèche) et présentant certaines caractéristiques génétiques, ou utilisent des séchages à très haute température pour rendre le réseau de gluten plus résistant. C'est en effet le gluten qui permet aux pâtes d'être fermes en bouche et d'avoir un bel aspect.

ENTRE ALIMENTS PAYSANS ET ALIMENTS « INDUSTRIELS » : UNE DIFFÉRENCE DE GLUTEN ?

Les paysans-boulangers et les paysans-pâtisseries sont des hommes (ou des femmes)-filierière ! Ils cultivent les céréales, puis les transforment directement sur leur ferme en farine et/ou semoule, et enfin, en pain et/ou pâtes.

Depuis la période « covid » et la distinction entre activités jugées « non essentielles » et les autres, des reconversions professionnelles en grand nombre sont notées vers ce genre de métiers, mais aussi vers le métier d'artisans boulangers qui s'approvisionnent très localement auprès de paysans-meuniers.

Les pionniers parmi ces paysans-transformateurs, qui étaient déjà impliqués dans des projets de recherche participative, ont remarqué que certains de leurs clients, se considérant hypersensibles au gluten, affirment pouvoir consommer à nouveau du pain ou des pâtes achetés *via* ces circuits de production et de distribution, sans éprouver de symptômes de « mal-être ». Ils se sont alors tournés vers des chercheurs (INRAE) et des acteurs du développement en région Occitanie (Biocivam 11) pour essayer de comprendre ce qui différencie leurs produits de ceux des filières plus « classiques ». Leurs questionnements ont fait naître le projet de recherche « Gluten : Mythe ou réalité ? » financé, entre autres, par la Fondation de France (2015-2017, 2018-2021).



Vous pouvez scanner le QR code pour voir la vidéo d'animation « "Industriel" ou paysan, quel pain privilégier pour les hypersensibles au gluten ? ».

© Studio Double.

Fabrication du pain et des pâtes : des étapes très différentes

Le constat de départ était que les produits paysans se démarquaient des produits industriels dès l'étape de production de la matière

première. Aux champs, les paysans-transformateurs cultivent en bio des blés « anciens » ou des blés-populations, tandis que l'industrie utilise des variétés lignées pures issues de la sélection moderne, cultivées le plus souvent en agriculture conventionnelle.

Ils se différencient aussi par les procédés de première et de seconde transformations. Les paysans privilégient la mouture sur moulins à meules de pierre, tandis que les minotiers industriels fractionnent le blé sur des moulins à cylindres. Lors de la transformation en pains, les paysans-boulangers plébiscitent les levains naturels, les fermentations longues et la cuisson au feu de bois. Les boulangers traditionnels et l'industrie utilisent des levures commerciales adaptées à des temps de fermentation courts ou à des fermentations différées à froid, suivies d'une cuisson dans des fours électriques.

Des différences existent aussi entre pâtes alimentaires artisanales et industrielles. Les paysans/artisans ont des pratiques moins normées, plus empiriques, avec un moindre contrôle des températures et des pressions d'extrusion. Ils pratiquent un séchage des pâtes à basse température ou à température ambiante. Les industriels de leur côté ont depuis longtemps fait le choix d'un séchage à haute ou très haute température (> 60 °C), pour garantir des pâtes ayant une très bonne tenue à la cuisson et à la surcuisson.

Un gluten plus « compact » dans les produits industriels ?

Telle était la question posée au départ ! Si le gluten du pain et des pâtes industriels est « compact », ses protéines sont-elles alors plus difficiles à extraire et moins susceptibles d'être attaquées par les enzymes digestives, provoquant ainsi des troubles digestifs ?

Après de nombreuses analyses de laboratoire comparant les produits paysans et les produits industriels, il s'est avéré que les produits (pains ou pâtes) des paysans contiennent des protéines plus faciles à extraire (plus solubles)¹⁰ que les produits industriels.

10. Protéines aisément extraites par un solvant contenant un détergent (dodécylsulfate de sodium ou SDS). Ce détergent rompt les liaisons de faible énergie du réseau de gluten contenu dans le pain ou les pâtes.

Pour extraire les protéines de ces produits industriels, il faut en effet utiliser un solvant chimique beaucoup plus puissant¹¹.

Le pain artisanal, plus digeste que le pain industriel ?

Comme nous l'avons dit, les principales différences entre ces produits sont les variétés de blés utilisées, les types de moulins et les méthodes panification.

Les résultats d'études scientifiques montrent que, parmi ces différences, c'est essentiellement la méthode de panification qui joue un rôle majeur sur la solubilité et la digestibilité des protéines. Des pains fabriqués à partir d'une farine obtenue sur moulin à meules de pierre ont ainsi plus de protéines aisément solubilisables que des pains confectionnés avec une farine « industrielle » issue d'un moulin à cylindres¹². Une fermentation longue, associée à l'utilisation de levain, conduit également à une quantité plus importante de protéines aisément solubles. Bien que des différences existent entre les levains des paysans-boulangers, la solubilité des protéines de leur pain reste toujours supérieure à celle des pains à la levure.

En ce qui concerne les pâtes alimentaires, l'effet le plus important sur la solubilité des protéines est celui du séchage. Le séchage à très haute température comme pratiqué par l'industrie conduit à davantage d'insolubilisation des protéines, même après cuisson, que le procédé artisanal.

Pour ce qui est de la digestibilité de ces protéines, les tests actuels se font *in vitro* au laboratoire ou dans un digesteur artificiel, censé mimer la digestion gastro-intestinale humaine. Ces tests montrent que les pains paysans ont plus de protéines aisément digérées *in vitro* que les pains industriels.

LE GLUTEN, UN ADJUVANT PARMIS D'AUTRES DANS LES PAINS

Améliorants, correcteurs ou régulateurs sont des termes utilisés en boulangerie pour désigner l'ensemble des produits naturels

11. Contenant un agent réducteur qui rompt les liaisons disulfures.

12. Les farines sont à un même taux d'extraction, toutes des T80.

ou de synthèse qui permettent de corriger les défauts des farines ou de faciliter les opérations de fabrication. Ces termes, qui n'ont pas de définitions légales, renvoient aux appellations plus formelles d'additifs, d'auxiliaires technologiques et d'adjuvants.

Le gluten fait partie des adjuvants, au même titre que le malt, les farines de fèves ou de soja. Ces quatre adjuvants sont les seuls autorisés dans le pain de tradition française, avec une enzyme (l'alpha-amylase fongique) (figure 14). En revanche, plus d'une centaine d'additifs, d'auxiliaires technologiques et d'adjuvants sont autorisés par la réglementation française pour les autres types de pain.

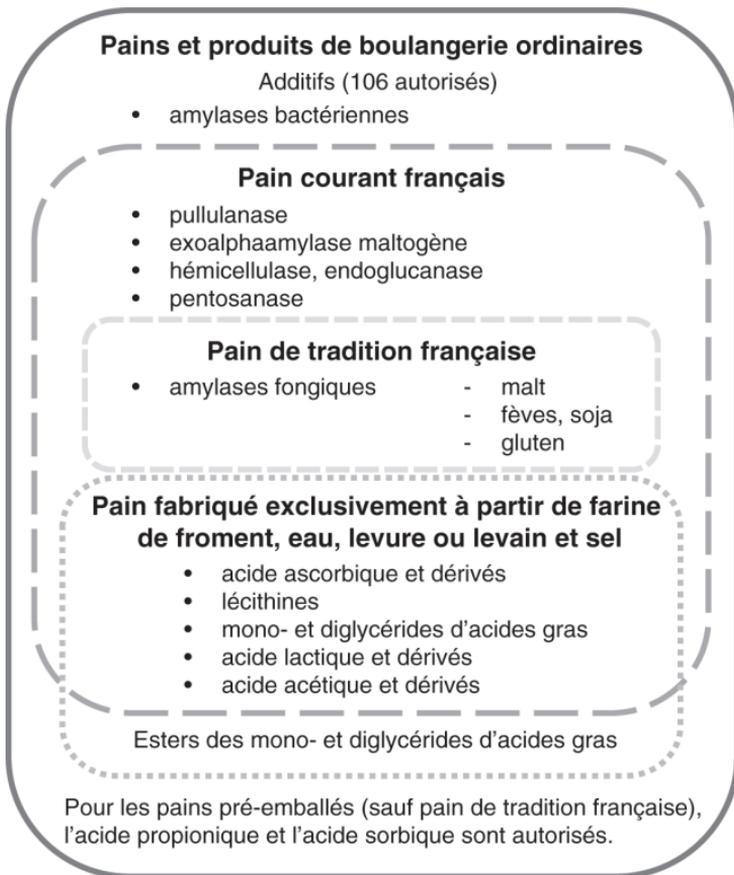


Figure 14. Additifs autorisés dans les différents types de pains fabriqués en France.

En tant qu'adjuvant, le gluten est rajouté à celui naturellement présent dans la farine et provient de l'industrie amidonnière, comme nous le détaillerons dans le prochain chapitre. Pour les boulangers et pâtisseries, il n'est pas considéré comme un additif étant donné que l'on en trouve déjà dans la farine. Le boulanger peut l'incorporer à ses préparations sans limitation de dose. Le meunier quant à lui peut en rajouter dans les farines, à condition d'indiquer le dosage.

Le gluten est ajouté en panification courante pour renforcer la pâte dans certains procédés tels que la pousse contrôlée (ralentissement de l'activité des levures par le froid de façon contrôlée, afin de programmer la pousse de la pâte pendant la nuit), la surgélation ou les procédés industriels. Il est employé aussi lors des panifications spéciales, notamment lorsque la pâte se trouve fragilisée du fait de la présence de sons, de farines d'autres espèces ou encore dans la fabrication de pains de type pain de mie, qui contiennent du lait, du sucre et des matières grasses. Il peut être aussi incorporé en quantités importantes dans des pains de régime pour amener la teneur en protéines à 20 % de la matière sèche du pain cuit. Sa capacité d'absorption de l'eau améliore le moelleux et la durée de conservation.

QUE RETENIR ?

- En France, la consommation de gluten liée au pain, pâtes, viennoiseries et gâteaux est de l'ordre de 8 g par jour et par personne, sans compter les sources cachées (sauces, produits préparés).
- Le gluten qui s'est formé lors du pétrissage va emprisonner le dégagement gazeux dans des alvéoles structurant la mie et le volume du pain.
- Élastique et résistant, le réseau de gluten est essentiel à la panification : il se déforme considérablement lors de la fermentation à la suite de la formation de bulles de gaz carbonique, mais sans se rompre, et permet ainsi d'obtenir des pains aérés et des gâteaux moelleux.
- La structure du gluten est figée par la cuisson, dans le cas du pain, et par le séchage, dans celui des pâtes alimentaires.
- Quand il est assez important ou assez résistant, le réseau de gluten empêche l'amidon de s'échapper lors de la cuisson des pâtes et de les rendre collantes.



COMMENT PRODUIRE DU GLUTEN INDUSTRIELLEMENT ET POUR QUELS USAGES ?

Il convient de distinguer les aliments qui contiennent naturellement du gluten de ceux dans lesquels le gluten est délibérément incorporé pour ses propriétés épaississantes, liantes ou texturantes. Et il faut aussi distinguer les produits qui contiennent des traces de gluten, car ils renferment de l'amidon ou des extraits de malt d'orge pas tout à fait exempts de protéines. Le gluten incorporé dans un très grand nombre de produits industriels est en fait un sous-produit de la production d'amidon.

DE L'AMIDON AU GLUTEN DANS L'INDUSTRIE D'HIER

La Société d'encouragement pour l'industrie nationale proposa, en 1855, deux prix : l'un de six mille francs pour celui qui, dans la fabrication de l'amidon à partir de farine de blé, parviendrait à séparer l'amidon sans altérer le gluten ; l'autre de trois mille francs pour celui qui trouverait le moyen d'utiliser les eaux des amidonniers, eaux qui étaient une cause grave d'insalubrité, en en extrayant soit le gluten, soit la matière albumineuse qu'elles contenaient (Chevallier, cité par Roy, 1862). En effet, jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'amidon était produit à partir du blé grossièrement écrasé ou à partir de résidus de meunerie, mélangés à de l'eau avant d'être laissés à fermenter. Cette pratique entraînait une putréfaction et des odeurs nauséabondes qui reléguaient les amidonneries loin des habitations.

En 1936, l'ingénieur Émile Martin proposa un nouveau procédé de préparation de l'amidon, sans les désagréments et qui avait le mérite de produire plus d'amidon et de valoriser les coproduits et les effluents (Martin, 1936). Ainsi, Martin suggéra d'utiliser des farines de froment (blé tendre) et des gruaux (broyats) plus ou moins raffinés, des remoulages ou des sons (les deux sont

aussi des résidus plus ou moins grossiers issus du broyage), pour en faire une pâte de type pâte à pain qui était ensuite lavée au-dessus d'un tamis pour isoler d'une part l'amidon et d'autre part le gluten. L'amidon était lavé, séché et utilisé pour apprêter les tissus. Les eaux de lavage étaient aussi conservées. Martin préconisait d'utiliser le gluten frais en panification pour améliorer la durée de conservation du pain, en particulier en été. Il le conseillait aussi pour panifier de la farine de pomme de terre, de maïs ou d'avoine. Pour ces utilisations en panification, il recommandait de le sécher à une température n'excédant pas 50 °C. Séché à des températures plus élevées, le gluten était destiné à être incorporé dans des potages pour améliorer leur qualité nutritionnelle ou broyé grossièrement pour en faire une chapelure. Le gluten frais se conservait quelques jours mais, passé ce temps, il s'aigrissait et se liquéfiait. Il pouvait alors être utilisé, mélangé à du son, pour nourrir les animaux ou comme colle à papier. Les eaux de lavage étaient utilisées pour faire des boissons ou distillées pour produire de l'alcool.

COMMENT LES INDUSTRIELS EXTRAIENT-ILS AUJOURD'HUI LE GLUTEN ?

De nos jours, pour extraire l'amidon à partir du blé, on part toujours de la farine, mélangée à de l'eau pour fabriquer une pâte. Cette pâte est ensuite lavée et les différents constituants — amidon, gluten et fibres — sont isolés par centrifugation, avant d'être purifiés dans des circuits séparés. Le gluten humide obtenu est séché à une température inférieure à 70 °C, pour ne pas détériorer les propriétés fonctionnelles des protéines. On obtient ainsi le « gluten vital » de blé qui, lorsqu'il est réhydraté, retrouve ses propriétés fonctionnelles.

Tout cela se fait dans des usines qui vont consommer énormément d'eau (10 à 12 m³ d'eau par tonne de blé traitée) et rejeter des eaux usées, chargées en matière organique (demande en oxygène de 40 à 60 kg par tonne). Il faut ajouter à cela la consommation d'électricité pour la purification et le séchage des produits. L'impact environnemental est donc très important.

LE GLUTEN VITAL EN INDUSTRIE CÉRÉALIÈRE

Le gluten vital, ainsi préparé par l'industrie, est aussi nommé gluten commercial. Il contient plus de 80 % de protéines, moins de 10 % d'eau et une quantité variable d'amidon, de lipides et de fibres (Codex Alimentarius). L'amidon résiduel est piégé dans le réseau de gluten et sa quantité peut être réduite par un lavage plus long ou plus intensif. Les lipides s'associent aux protéines du gluten, lors de sa formation, par des liaisons hydrophobes. Comme nous l'avons déjà vu, les protéines qui le composent sont pour moitié des gliadines et pour le reste des polymères de gluténines liés entre eux. Il contient une faible quantité de protéines solubles dans l'eau, qu'il piège dans son réseau. Bien qu'il soit insoluble dans l'eau et de nature très hydrophobe, il peut absorber deux fois son poids sec en eau pour former une masse viscoélastique. Il peut être utilisé tel quel après séchage ou subir des modifications chimiques ou enzymatiques pour être rendu soluble.

Selon les lots, il semblerait que les caractéristiques du gluten vital peuvent assez fortement varier, notamment en ce qui concerne la teneur totale et la composition en protéines. Il se présente sous la forme d'une poudre de couleur beige crème, d'une grande coulabilité.

Il est utilisé pour l'amélioration des farines destinées à la panification, en particulier dans certains procédés de panification (procédés industriels, surgélation). Il a l'avantage d'augmenter la teneur en protéines, d'accroître la force de la pâte, sa tolérance au pétrissage et sa machinabilité.

Il permet aussi d'améliorer le volume et la texture des pains. Enfin, sa capacité d'absorption d'eau permet d'augmenter le rendement de production et la durée de conservation des produits.

Il est peu ou pas utilisé en biscuiterie, pour laquelle on recherche précisément des farines pauvres en gluten, afin d'assurer une stabilité dimensionnelle des biscuits (il faut qu'ils aient tous la même taille pour rentrer dans le paquet !).

Le goût du gluten vital est plutôt « fade » ou légèrement connoté « céréales ». Cette saveur peut être altérée par un goût « rance »

dû à une trop forte proportion de lipides résiduels, qui peuvent s'oxyder dans de mauvaises conditions de transformation ou de stockage.

LE GLUTEN : UN INGRÉDIENT DES SUBSTITUTS DE VIANDE

En raison de sa richesse en protéines et de sa capacité à lier (fixer les lipides et retenir l'eau), il est aussi souvent utilisé dans des produits carnés (charcuterie, salaison, etc.), mais également en substitution de ces produits !

Une tradition ancienne en Asie : le seitan

Le seitan, prisé en Asie et par les végétariens, n'est ni plus ni moins que du gluten pur, cuit et mitonné comme de la viande. Les Anglo-Saxons le nomment *wheat meat*, littéralement viande de blé. Son origine est ancienne, il était consommé par des moines bouddhistes en Chine comme substitut de viande dès le VI^e siècle. Les Japonais l'ont produit à leur tour et le nomment *fu*.

Le terme *seitan* quant à lui a été proposé par le père de la macrobiotique, le Japonais Georges Ohsawa, au début des années 1960. Le terme vient de deux mots japonais : *sei* qui signifie « fait de » et *tan* qui veut dire « protéine ». Il est préparé soit à partir de farine de blé soit à partir de gluten en poudre (farine de gluten). Dans le cas de la farine de blé, il est nécessaire de réaliser une pâte avec de la farine et de l'eau et, après un temps de repos, de la pétrir sous un filet d'eau pour éliminer l'amidon. Dans le cas d'une utilisation de gluten pur, celui-ci est mélangé à de l'eau et la pâte obtenue est pétrie. Dans les deux cas, la masse de gluten est plus ou moins étirée, puis rassemblée avant d'être pochée à l'eau bouillante et cuisinée comme de la viande (rôtie, braisée, frite).

D'autres préparations végétariennes

Au début du XX^e siècle aux États-Unis, John Harvey Kellogg met au point un premier substitut de viande baptisé Protose, destiné aux végétariens. Ce substitut, composé de beurre de cacahuète et de gluten, a été commercialisé jusqu'en 2000.

L'idée du seitan a conduit les industriels à utiliser les protéines de blé pour élaborer des substituts de viande. Seules ou associées avec des farines de légumineuses, elles sont texturées pour donner des produits qui ressemblent le plus souvent à du poulet (aiguillettes, escalopes, bouchées) ou à des tranches de rôti.

Beaucoup de préparations végétariennes de type galettes ou boulettes contiennent du gluten, de la farine de blé ou des protéines de blé, associés à d'autres ingrédients comme des légumes, des légumineuses, d'autres céréales sans gluten ou des pseudo-céréales.

COMMENT ÉVALUER LA QUALITÉ NUTRITIONNELLE D'UNE PROTÉINE ? LE TOFU ET LE SEITAN

La détermination de la composition en acides aminés essentiels ou indispensables (AAI) et la mesure de leur digestibilité permettent d'évaluer la qualité nutritionnelle d'une protéine alimentaire en calculant un score appelé DIAAS (*Digestible Indispensable Amino Acid Score* ; FAO, 2013). Une protéine affichant un score de 100 permet de couvrir efficacement les besoins en AAI. Le score du seitan a été comparé à celui d'un autre aliment asiatique, le tofu, obtenu à partir de la coagulation des protéines du soja. Le score du seitan se révèle très bas (30) tandis que celui du tofu est voisin de 100, alors même que les deux produits présentent une bonne digestibilité de leurs protéines. Ce score très bas du seitan s'explique par une très faible teneur en lysine du blé servant à le confectionner¹³.

NOS ANIMAUX CONSOMMENT-ILS DU GLUTEN ?

Après le secteur de la boulangerie, celui de l'alimentation animale est un gros utilisateur de gluten. Celui-ci est d'abord utilisé pour sa teneur en protéines et pour ses capacités liantes et texturantes.

13. <https://www.uca.fr/recherche/sciences-et-societe/la-minute-recherche/tofu-et-seitan-deux-aliments-traditionnels-avec-un-apport-proteique-de-qualite-contrastee> (consulté le 11/06/2025).

En outre, c'est un ingrédient très digestible. Il est digéré à 99 % lorsqu'il fait partie de la ration des animaux de compagnie. Il est utilisé dans les aliments secs, humides et semi-humides, ainsi que dans les snacks et les friandises. Dans les aliments humides et semi-humides, il est incorporé pour ses propriétés d'hydratation et de texture.

La croissance de l'aquaculture mondiale est telle que les ingrédients protéiques traditionnels des aliments pour poissons, comme la farine de poisson, se raréfient. Les protéines végétales se présentent ainsi comme une alternative. Le gluten offre, outre un taux de protéines très concentré, d'excellentes propriétés de liaison à l'eau et une digestibilité très élevée des protéines. De plus, en raison de sa teneur élevée en glutamine, il présente un profil d'acides aminés intéressant pour ce type d'aliments.

En tant que substitut des protéines laitières, il est très utilisé dans des aliments d'allaitement pour veaux, mais aussi pour agneaux, porcelets et autres jeunes animaux. On l'emploie alors sous forme soluble (hydrolysé par voie enzymatique ou acide).

GLUTEN, PÂTE À MODELER ET AUTRES UTILISATIONS NON ALIMENTAIRES

Le gluten de blé est utilisé par ailleurs pour plusieurs applications non alimentaires. Depuis une trentaine d'années, la recherche s'est beaucoup focalisée sur son emploi pour fabriquer des films alimentaires, des bioplastiques, des colles ou pour l'enduction des papiers (traitement de surface destiné à améliorer leur qualité).

Les protéines de blé et le gluten hydrolysés, produits à l'échelle industrielle, sont utilisés dans les produits cosmétiques et de soins, aussi bien pour les humains que pour les animaux, par rapport à leurs propriétés moussantes et émulsifiantes. On les trouve dans les shampoings et les après-shampoings, les produits de soin de la peau et les bases lavantes.

La farine de blé est aussi employée pour la fabrication de pâtes à modeler pour les enfants.

Enfin, pour remplacer le formaldéhyde largement utilisé pour la fabrication de panneaux de bois agglomérés, et aujourd'hui très décrié pour ses émanations gazeuses, de nombreuses équipes de recherche s'intéressent aux propriétés du gluten de blé et proposent son utilisation pour réaliser des panneaux de bois respectueux de l'environnement.

ZOOM SUR LE GLUTEN HYDROLYSÉ

Le gluten de blé peut être soumis à une hydrolyse (coupure des liaisons entre les acides aminés) enzymatique ou acide pour améliorer sa solubilité, modifier ses propriétés physicochimiques ou faciliter la libération d'acides aminés comme la proline, la leucine et l'acide glutamique. Les enzymes utilisées ou l'action de l'acide vont permettre de couper les protéines du gluten en fragments de quelques dizaines d'acides aminés, ce qui va favoriser sa digestibilité. Sous cette forme, il est utilisé principalement en nutrition animale dans les aliments d'allaitement des veaux. Pour l'alimentation aquacole, le produit a la même valeur nutritionnelle que le gluten vital, mais sans les propriétés viscoélastiques.

Dans les produits alimentaires, le gluten de blé hydrolysé est un composant des poudres de nutrition sportive et est utilisé dans le secteur de la boulangerie et de la confiserie. Il peut également améliorer la densité et la texture du produit.

Il possède des propriétés lavantes, moussantes et sert aussi de régulateur de pH. L'industrie cosmétique l'utilise dans des produits capillaires et les produits de lavage pour le corps.



QUE RETENIR ?

- Le gluten est un coproduit de la production d'amidon.
- La production d'amidon se fait à partir d'une pâte de farine et d'eau, qui est ensuite lavée pour séparer le gluten et l'amidon.
- Le gluten sec ou gluten vital issu des industries amidonnières contient plus de 80 % de protéines.
- Les propriétés épaississantes, liantes, texturantes du gluten sont appréciées par tous les industriels et pas seulement ceux de l'agroalimentaire.
- Le gluten peut être hydrolysé par voie enzymatique ou chimique en fragments utilisés dans les industries alimentaires, en nutrition animale, mais aussi dans le secteur de l'hygiène.
- Les protéines de blé et le gluten entrent dans la composition des substituts de viande.



QUELS PROBLÈMES DE SANTÉ AVEC LE GLUTEN ?

Une plongée dans les archives rend bien compte de l'importance de la littérature scientifique sur le sujet du gluten. Depuis 1683, près de 143 000 publications, mentionnant ce mot clef, sont recensées sur le moteur de recherche Aureli d'INRAE¹⁴. D'environ 500 publications par an dans les années 1990, nous sommes passés à près de 8 000 publications annuelles actuellement (figure 15) ! Alors que, jusqu'aux années 2000, moins de 15 % de ces publications étaient reliées à la santé (mot clé « *Health* » présent dans les publications), aujourd'hui plus de 60 % d'entre elles s'intéressent au gluten sous le prisme de la santé.

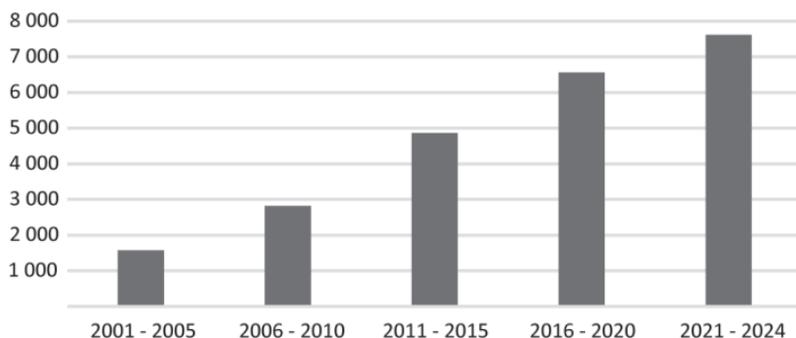


Figure 15. Évolution du nombre de publications éditées par an depuis 2001 sur la thématique du gluten.

« LE GLUTEN EST À L'ESPÈCE HUMAINE CE QUE L'ENGRAIS EST AUX PLANTES... »

En 1759, Kessel-Meyer, dans sa thèse sur le froment et le gluten (Roy, 1862), attribuait au gluten de blé les mêmes propriétés médicales qu'un sérum, expliquant ainsi que le blé, mieux que

¹⁴. Consultation au 01/08/2025.

toutes les autres céréales, « suffit à la conservation de notre vie ». En tant que chimiste, M. Payen (cité par Roy, 1862) insistait sur les propriétés « éminemment nutritives » du gluten, rappelant lui aussi la supériorité du froment sur les autres céréales. Surnommé « viande végétale », le gluten de froment panifié était réputé « aliment bienfaisant » dans des cas aussi divers que « les tempéraments lymphatiques », « les constitutions débiles », « les cas d'affections gastriques et intestinales », l'obésité, le diabète, « la faiblesse des organes de la digestion » et l'asthme. Il était reconnu pour son action directe sur la composition du sang dont « il augmente la richesse et accélère le mouvement », et sur les muscles dont il était censé augmenter sensiblement le volume et la force. « On peut dire que le gluten est à l'espèce humaine ce que l'engrais est aux plantes » (Durand, date non connue).

Pour cette raison, on chercha rapidement à extraire le gluten et à en faire l'objet de recherches cliniques. Ainsi, le gluten granulé entrainé dans la composition de potages maigres ou gras fournis aux malades, qui les digéraient « parfaitement bien ». M. Bricheteau ajoutait que « le gluten granulé s'associe très bien au lait, association qui fournit un aliment doublement restaurant » (cité par Roy, 1862).

Le rapport de la commission de la Gélatine à l'Académie des sciences de Paris, le 2 août 1841, et de M. Bouchardat (cité par le Roy, 1862), professeur d'hygiène à la faculté de médecine de Paris, insistait sur les propriétés « éminemment nutritives » du gluten, suggérant de le panifier. Il observait que la « semoule de pain de gluten » remplaçait avantageusement toutes les pâtes connues, telles que vermicelle, tapioca, etc., et que le pain de gluten était « d'une excessive légèreté » et pouvait se conserver des années entières, sans altération.

Le gluten devait même remplacer le froment dans les recettes. Ainsi, dans le régime alimentaire du diabétique, la farine de gluten est mentionnée comme substitut à celle de froment, défendue (Roy, 1862) ! Elle était en effet indiquée dans les aliments permis, sous forme de potages à la pâte au gluten, au gluten granulé pur, à la semoule ou au vermicelle de gluten, toujours sans pain

ni farine. Les pâtisseries devaient être préparées avec de la farine de gluten, au lieu de la farine ordinaire.

POUR CERTAINS, UN VRAI PROBLÈME DE SANTÉ

Kessel-Meyer pointe dans sa thèse l'extrême ténacité « de la substance glutineuse du froment », pouvant rendre malade des « compagnons d'armes », et dénonce les inconvénients éprouvés par « ces petits corps d'enfants, que l'on sature de bouillie composée de farine et de crimon, préparée à l'eau chaude ou au lait ». Il conclut par le proverbe : « La gueule en tue plus que le glaive » et rappelle que les anciens ne donnaient jamais aux malades, « dans les fièvres », aucune décoction de froment.

Les médecins danois Simon Paulli et Vormius (Roy, 1862) attribuent à l'usage du pain de blé les engorgements du foie et de la rate, les douleurs néphrétiques et arthritiques, et, chez les « grands et les riches, la gravelle et la goutte ». C'est pour cette raison qu'ils conseillent, à ceux qui sont affligés de la goutte, l'usage du pain de seigle au lieu du pain de froment.

Aujourd'hui encore, le gluten et son impact sur la santé humaine font l'objet de débats importants. Trois types de pathologies distinctes sont liées au blé ou au gluten (du blé, de l'orge et du seigle) : la maladie cœliaque, les allergies et la sensibilité non cœliaque au gluten ou plus largement au blé (SNCG ou SNCB).

LA MALADIE CŒLIAQUE

La maladie est observée dès le 1^{er} siècle apr. J.-C. par un médecin grec (Paveley, 1988). En 1888, elle est décrite par un pédiatre anglais comme amenant chez l'enfant des troubles digestifs, de la diarrhée et un retard de croissance. Ce n'est qu'en 1950 qu'un médecin hollandais fait le lien avec le blé. Jusqu'aux années 1990, la maladie était toujours peu connue et considérée comme une pathologie infantile, prédominante en Europe de l'Ouest.

C'est une pathologie qui toucherait environ 1 % de la population mondiale. En fait, la prévalence de cette maladie serait comprise

entre 0,5 et 2 %, tous les pays du globe n'étant pas touchés de la même manière.

De plus, ce chiffre varie selon le mode de dépistage. Il est plus élevé (1,25 %) lorsque le diagnostic se fait par sérologie (recherche de marqueurs dans le sang) que par biopsie (0,77 %), technique plus invasive et plus lourde à mettre en œuvre. En Europe, le chiffre est d'environ 1,1 %, avec des disparités selon les pays : plus faible en Grèce (0,18 %) ou en Allemagne (0,22 %), ou plus fort en Suède (2,56 %) (Bradauskiene *et al.*, 2023). Hors Europe, quelques chiffres sont disponibles par continent, dont l'Afrique (0,42 %), l'Asie (0,69 %) et l'Amérique (0,42 % au sud et 0,53 % au nord).

La prévalence pourrait augmenter dans certains pays avec une occidentalisation du régime alimentaire, notamment en Chine ou en Afrique. En effet, si la consommation de blé a diminué en Europe, en Amérique du Nord et en Australie-Nouvelle-Zélande entre 1961 et 2018, elle a augmenté en Afrique et en Asie, où la croissance de la population est forte et où les produits à base de blé sont plébiscités par les populations urbaines dont les revenus augmentent.

Pourquoi cette augmentation du nombre de personnes souffrant de la maladie cœliaque dans le monde ? Certains pensent qu'elle est corrélée à la consommation de blé, mais d'autres mettent aussi en avant des facteurs comme les infections, les changements qualitatifs ou quantitatifs intervenant au niveau de la flore intestinale (microbiote). Cette augmentation pourrait être aussi le résultat d'une exposition locale à des cofacteurs environnementaux ou à des variations ethniques. Enfin, elle serait liée à une meilleure prise en compte des symptômes qui conduit à davantage de tests de dépistage. En effet, il est avéré qu'une partie de la population ne serait pas diagnostiquée, car elle souffrirait de symptômes non invalidants. On estime que, pour un cas diagnostiqué, 5 à 10 autres ne le seraient pas. Et là encore, il existe une grande inégalité entre les pays, certains étant plus actifs que d'autres pour faire du dépistage. De surcroît, le délai entre l'apparition des symptômes et le diagnostic peut s'avérer long. Il n'y a pas si longtemps, il pouvait être d'une dizaine d'années, et parfois plus

pour les femmes chez qui l'anémie ou les douleurs abdominales pouvaient être reliées à des problèmes gynécologiques.

MEILLEURS OUTILS DE DIAGNOSTIC OU RÉELLE AUGMENTATION DES CAS ?

Certains ont suggéré que la récente augmentation de la maladie coéliquaie était simplement due à de meilleurs outils de diagnostic. Cependant, une étude basée sur la recherche d'anticorps anti-gluten sur une collections de sérums prélevés entre 1948 et 1954 et conservés congelés, ainsi que sur des sérums de personnes vivantes aujourd'hui, montre que l'incidence de la maladie coéliquaie est actuellement quatre fois plus importante. Il apparaît aussi qu'une maladie coéliquaie non diagnostiquée est associée à un risque accru de cancer et de mortalité. Enfin, selon les auteurs de l'étude, le nombre de malades non diagnostiqués a considérablement augmenté durant ces 50 dernières années aux États-Unis.

Qu'est-ce qui déclenche cette maladie ?

La maladie n'existe que si trois conditions sont réunies : une prédisposition génétique (détaillée ci-dessous), l'ingestion de gluten ou de protéines de réserve dans le cas de la céréale consommée entière ou concassée (blé précuit, orge perlée, petit épeautre, boulgour, couscous) et des facteurs environnementaux.

Revenons à la prédisposition génétique : une très grande majorité (90 %) des personnes souffrant de la maladie coéliquaie possède un gène appelé *HLA-DQ2*, et la plupart des autres portent un gène similaire nommé *HLA-DQ8*. Ces gènes codent pour des protéines de même nom qui alertent le corps et notamment les cellules immunitaires lorsque des fragments de gluten sont ingérés. Cela pousse le système immunitaire à se défendre, mais celui-ci attaque également des tissus sains. On estime que 40 % de la population caucasienne possèdent les gènes qui codent pour les molécules *HLA-DQ2* et/ou *HLA-DQ8*.

Il semblerait que le gluten ne provoque pas la réaction tout seul. Les cellules de l'intestin joueraient un rôle majeur en libérant une enzyme qui viendrait modifier les fragments de gluten, les rendant encore plus visibles et reconnaissables par le système

immunitaire. On pensait jusqu'à récemment que les cellules de l'intestin étaient uniquement les victimes de l'inflammation, on se rend compte qu'elles sont aussi responsables du processus. Cette étape est le déclencheur de l'attaque auto-immune (voir encadré).

Les gliadines peuvent adhérer à la muqueuse de l'estomac, ne pas être entièrement digérées par les enzymes intestinales et devenir des peptides aux activités toxiques pour les cellules, entraînant notamment une augmentation de la perméabilité intestinale et une modulation du système immunitaire.

Dans les formes les plus sévères, cela se traduit par une destruction des villosités intestinales qui tapissent la paroi de l'intestin grêle. Cette destruction est préjudiciable à l'individu, car c'est à ce niveau que va se faire l'absorption des nutriments (acides aminés, glucose, minéraux...) résultant de la dégradation des aliments.

Existe-t-il différents degrés d'atteinte des malades ?

La maladie revêt différentes formes : classique, non classique et subclinique.

La forme classique est la plus fréquente chez les jeunes enfants de moins de 5 ans. Elle se manifeste par des diarrhées chroniques, une augmentation des lipides dans les selles, une perte d'appétit et de poids, une distension abdominale et une fonte musculaire. Chez le nourrisson et le jeune enfant, cela engendre un retard de croissance du fait d'une mauvaise absorption des nutriments.

La forme non classique est la plus fréquente dans le reste de la population et se présente sans les signes d'une mauvaise absorption des nutriments. Elle se manifeste par des troubles intestinaux non spécifiques de la maladie, comme des douleurs abdominales récurrentes, des ballonnements, de la diarrhée ou de la constipation, pouvant évoquer un syndrome de l'intestin irritable. Elle se manifeste aussi par des signes extra-intestinaux (anémie, fatigue chronique, augmentation des enzymes hépatiques) ou des déficits nutritionnels (carences en vitamines, minéraux, fer, zinc), de l'arthrite, une perte des cheveux, de l'urticaire chronique.

La forme subclinique est silencieuse, elle est identifiée lors d'un dépistage.

MALADIE AUTO-IMMUNE, SYSTÈME HLA ET MALADIE CŒLIAQUE

Une maladie est dite auto-immune lorsque l'organisme réagit contre lui-même. Cela est dû à un dérèglement du système immunitaire qui conduit celui-ci à s'attaquer aux constituants normaux de l'organisme. Chez l'homme, le complexe majeur d'histocompatibilité (CMH), appelé aussi HLA (*Human Leucocytes Antigens*), est le système de reconnaissance du soi. Des gènes du système HLA codent pour des protéines qui sont exprimées à la surface de cellules impliquées dans l'immunité. Certaines de ces cellules agissent comme des intermédiaires en présentant les antigènes (agresseurs) à d'autres cellules qui, elles, vont déclencher une réponse immunitaire appropriée selon le type d'agression : production d'anticorps, libération de médiateurs chimiques toxiques.

La maladie cœliaque survient chez des patients possédant des gènes qui codent pour des molécules dites HLA-DQ2 dans 90 à 95 % des cas ou HLA-DQ8 dans une minorité d'autres cas. Le fait d'exprimer ces molécules HLA-DQ2 et HLA-DQ8 ne suffit pas pour déclarer la maladie, car 30 à 40 % des individus de race blanche des populations occidentales les expriment et seulement 4 % seront atteints. De ce fait, le typage HLA systématique n'est pas pratiqué pour diagnostiquer la maladie, il viendra seulement la confirmer. L'absence de ces molécules chez un individu permet de rejeter la suspicion de maladie cœliaque à plus de 99 %.

Des facteurs environnementaux additionnels sont à prendre en compte comme les infections contractées à un moment donné, la dose de gluten ou l'état du microbiote. La maladie peut se développer à tout âge. Les personnes qui ont des ascendants porteurs de la maladie auraient 10 à 15 % de risque de la développer à leur tour.

Quels sont les mécanismes de la maladie cœliaque ?

Lors de l'ingestion d'un aliment, les protéines qui le composent sont d'abord attaquées au niveau de la cavité buccale par de premières enzymes, puis au niveau de l'estomac par l'enzyme pepsine, et ensuite découpées au niveau de l'intestin par les enzymes digestives sécrétées par le pancréas et par les cellules

de la bordure en brosse de la paroi interne de l'intestin grêle. Ce découpage (nommé protéolyse) va libérer des acides aminés (perles, pour reprendre notre métaphore) et des peptides (bouts de bracelets ou de colliers). Ces peptides sont ensuite redécoupés dans les cellules de la paroi intestinale en acides aminés, qui passent alors dans la circulation sanguine pour être recyclés dans de nouvelles protéines.

Dans le cas du gluten, cette dégradation est incomplète, car les protéines qui le composent sont riches en proline et en glutamine, deux acides aminés extrêmement difficiles à digérer. C'est précisément cette teneur élevée en proline et en glutamine qui empêche une dégradation complète des protéines du gluten par les enzymes digestives. Le gluten est néanmoins réduit en peptides plus ou moins longs qui persistent dans la partie haute de l'intestin grêle.

Il est clair que différents peptides issus de la dégradation des protéines du gluten sont impliqués dans la maladie. Ils vont déclencher une cascade de réactions adverses qui aboutissent entre autres à la destruction des villosités intestinales.

POURQUOI DES PEPTIDES NOCIFS ?

On distingue deux types de peptides impliqués dans la maladie coéliqua :

- les « toxiques », qui vont abîmer la muqueuse intestinale indépendamment d'une reconnaissance par le système HLA ;
- les « immunogènes », qui vont être reconnus, se lier aux molécules DQ2/DQ8 et stimuler une réponse immunitaire.

Toutes les protéines du gluten (gliadines et gluténines du blé, hordéines de l'orge, sécalines du seigle, protéines de réserve du triticale) possèdent leurs propres jeux de peptides toxiques et immunogènes n'ayant pas tous le même degré de toxicité/immunogénicité et qui déclencheront de réponse immunitaire seulement chez certains individus.

Les α - (et particulièrement celles codées par le génome D du blé tendre) et γ -gliadines sont dégradées en peptides ayant un fort effet immunotoxique. Parmi ceux-ci, un peptide de 33 acides aminés

.../...

.../...

appelé 33-mer¹⁵, issu d'une α 2-gliadine, a été identifié comme particulièrement actif. Ce peptide est reconnu par le système immunitaire de la quasi-totalité des malades cœliaques. Les peptides immunogènes issus de la dégradation du gluten sont capables de passer du tube digestif (lumière intestinale) vers la muqueuse de la paroi intestinale. Dans le cas d'individus atteints de maladie cœliaque, ce passage est facilité par la réponse immunitaire induite par l'ingestion de gluten qui va alors augmenter la perméabilité de la barrière intestinale. Au niveau de la muqueuse intestinale, la transglutaminase tissulaire 2 (tTG2) va modifier les peptides. Cette enzyme, la tTG2, cible préférentiellement les motifs QXP des peptides (Q : glutamine ; X : n'importe quel acide aminé ; P : proline) et transforme la glutamine en un autre acide aminé, l'acide glutamique. La réaction est une « désamidation ». La glutamine, qui était neutre, devient un acide glutamique chargé négativement. La tTG2 peut aussi, par une réaction de « transamidation », se coupler au peptide pour créer un complexe tTG2-peptide. La désamidation renforce la reconnaissance et la liaison entre le peptide et les molécules HLA-DQ2 et HLA-DQ8, fixées sur les cellules chargées de présenter le peptide désamidé à d'autres cellules, les lymphocytes T CD4+. Le complexe tTG2-peptide est lui aussi présenté aux lymphocytes T CD4+. Ces lymphocytes T vont à leur tour activer des lymphocytes B chargés de produire des anticorps dirigés contre la tTG2 et contre le peptide désamidé, et qui vont passer dans la circulation sanguine. D'autres familles de cellules immunitaires vont être mobilisées pour produire des médiateurs chimiques ou cytokines, comme l'interféron γ ou des interleukines, qui vont créer un milieu inflammatoire et provoquer une destruction plus ou moins importante des villosités intestinales.

Qu'en est-il de l'avoine ?

Des études montrent que les avénines seules n'induisent pas de réponses immunitaires chez la plupart des patients atteints de la maladie cœliaque. Toutefois, chez certaines personnes (< 10 %),

15. Le 33-mer est un peptide de 33 acides aminés situés entre les positions 56 et 88, identifié chez une α 2-gliadine.

l'ingestion d'avoine (100 g/jour) pendant 3 jours mobilise les lymphocytes T spécifiques de l'avenine dans le sang. La moitié de ces patients a présenté au moins un symptôme digestif dû à une consommation quotidienne élevée d'avoine (100 g) et à une quantité élevée de fibres. De plus, ces lymphocytes T reconnaissent aussi les hordéines, et une ingestion d'orge (et non de blé ou de seigle) pouvait les stimuler plus efficacement que l'avoine. La conclusion est que la consommation quotidienne allant jusqu'à 100 g d'avoine non contaminée est insuffisante pour provoquer une rechute clinique chez les patients atteints de maladie cœliaque. Une explication plausible de la faible immunotoxicité de l'avoine serait sa faible teneur en proline et son absence de peptides résistants à la protéolyse avec plus de 10 résidus d'acides aminés.

Comment dépister la maladie cœliaque ?

Le diagnostic de cette maladie repose, en première instance, sur la recherche dans le sang d'anticorps spécifiques de la maladie : dosage des anticorps de classe A (IgA) totaux et anti-tTG2 ou dosage des IgG anti-tTG2 en cas de déficit en IgA, et dans certains cas (jeunes enfants), dosage des anticorps (IgA ou IgG) anti-peptide désamidé. Par le passé, d'autres types d'anticorps ont été recherchés : anti-gliadines, anti-réticuline, mais les tests se sont révélés peu sensibles. Les anticorps anti-endomysium (l'endomysium est une composante du tissu musculaire intestinal) peuvent être recherchés, mais le test est coûteux et le résultat très lié au savoir-faire de l'opérateur.

Chez l'adulte, la confirmation se fait au moyen de biopsies pratiquées au niveau de la partie haute de l'intestin grêle. La biopsie ou prélèvement d'un fragment de tissu ou d'organe pour une observation ensuite au microscope est une technique invasive qui ne peut être utilisée à des fins de dépistage. Le degré d'atteinte de la muqueuse et des villosités intestinales varie d'un individu à l'autre et est classé en 4 stades de 0 à 3 (classification de Marsh). Au stade 0, la muqueuse et les cellules épithéliales apparaissent intactes (jusqu'à 30 % des personnes souffrant de dermatite herpétiforme ou d'ataxie au gluten sont dans ce cas) ; au stade 1, le nombre de lymphocytes intra-épithéliaux (LIE) augmente ; au stade 2,

ce sont les LIE et l'hypertrophie des cryptes qui augmentent ; au stade 3, les événements précédents sont complétés par une atrophie des villosités plus ou moins prononcée.

À ces différents tests de diagnostic peut s'ajouter le typage HLA (recherche des antigènes qui s'expriment à la surface des cellules d'un individu et qui permettent de reconnaître ses propres cellules) et la mesure de l'efficacité du régime sans gluten.

EN QUOI LES ANTICORPS ET LYMPHOCYTES SONT-ILS CONCERNÉS ?

Un anticorps ou immunoglobuline (Ig) est une protéine produite par le système immunitaire d'un organisme vivant (homme ou animal) en réponse à un agent pathogène ou étranger (antigène). Les anticorps sont chargés, lors de contacts ultérieurs, de reconnaître et de neutraliser l'agent étranger. Il existe plusieurs classes d'immunoglobulines circulant dans le sang : les IgG (les plus nombreuses), les IgA, les IgE, les IgD et les IgM. Leur structure de base est constituée de deux chaînes polypeptidiques formant un Y. Deux autres chaînes courtes sont associées aux bras du Y. La taille de ce Y varie légèrement d'une classe d'Ig à l'autre. Les IgA sont formées par l'association de deux Y, tandis que les IgM sont constituées de cinq Y reliés entre eux en couronne. Les anticorps sont produits et dirigés contre des fragments de l'antigène appelés épitopes. Chaque bras court des Y possède des sites de reconnaissance spécifiques de ces épitopes. Quand l'antigène est une protéine, les épitopes sont des séquences peptidiques.

Les lymphocytes sont des cellules du système immunitaire. On distingue des lymphocytes B et T. Les lymphocytes B sont chargés de produire les anticorps, tandis que les lymphocytes T remplissent plusieurs fonctions : présentation des antigènes, destruction de cellules infectées, intermédiaires ou auxiliaires dans des réactions immunitaires.

Quels sont les traitements et les autres formes de la maladie ?

Le traitement de la maladie réside dans un régime strict sans gluten. À côté des manifestations intestinales, la maladie peut revêtir une forme neurologique, l'ataxie au gluten, ou une forme dermatologique, la dermatite herpétiforme.

L'ataxie au gluten est une atteinte neurologique qui se traduit par une perte de la maîtrise de l'équilibre et de la coordination des mouvements. Elle s'explique par le fait que la stimulation du système immunitaire amenée par l'ingestion de gluten produit des anticorps nuisibles aux neurones du cervelet.

La dermatite herpétiforme est une maladie de la peau se caractérisant par une éruption cutanée vésiculeuse chronique et des démangeaisons intenses. Certains patients atteints de dermatite présentent une atrophie des villosités intestinales.

LES ALLERGIES

Les céréales contenant des protéines de gluten font partie d'un des 14 groupes d'allergènes à déclaration obligatoire (arachide, fruits à coque, céleri et produits contenant du céleri, lait et produits contenant du lait, œuf...). Les allergies aux céréales affectent en Europe 4 à 10 % des travailleurs des minoteries et des boulangeries, 6 % des jeunes enfants et 3 à 4 % des adultes.

Les protéines du blé peuvent provoquer des allergies après inhalation de particules de farine, contact ou ingestion de produits alimentaires. Cela se traduit, selon la voie de sensibilisation, par de l'asthme ou des rhinites (p. ex., asthme du boulanger), de l'urticaire ou des problèmes de peau (dermatite atopique), des problèmes digestifs ou par une anaphylaxie alimentaire induite par l'effort ou un choc anaphylactique (voir encadré).

La fraction albumines/globulines est la plus sensibilisante, le plus souvent par ingestion ou inhalation. Les gliadines et les gluténines sont aussi des allergènes impliqués dans différentes pathologies comme la dermatite atopique, fréquente chez les très jeunes enfants, ou l'urticaire et l'anaphylaxie chez l'adulte. Chez quelques patients, certaines protéines du gluten ne déclenchent une réaction (anaphylaxie alimentaire induite par l'effort) que si elles ont été ingérées avant un effort physique intense (course à pied, cyclisme) ou modéré (marche, jardinage). La réaction allergique survient dans ce cas-là généralement 1 à 2 heures après l'ingestion de céréales. Les symptômes peuvent aller de l'urticaire au choc anaphylactique.

Des cas d'allergie en réaction à des cosmétiques (shampoings, produits capillaires, crèmes anti-âge) contenant des protéines de blé ou des hydrolysats de protéines du blé existent.

QU'EST-CE QU'UNE ALLERGIE ?

L'allergie est une réponse immunitaire exagérée ou inappropriée et immédiate à un allergène sans toxicité propre (p. ex., pollen, protéines alimentaires) et qui se traduit par des troubles cutanés, des symptômes respiratoires, gastro-intestinaux jusqu'au choc anaphylactique.

Lors d'un premier contact avec l'allergène, l'organisme de certaines personnes va fabriquer un type particulier d'anticorps, des immunoglobulines E (IgE). Ce n'est que lors d'un second contact que vont se produire les manifestations allergiques.

La fixation de l'allergène sur les IgE va alors entraîner une série de réactions immunologiques, déclenchant la libération de médiateurs chimiques dans l'organisme qui vont provoquer une réaction pathologique aiguë (asthme, eczéma...).

LA SENSIBILITÉ NON CÉLIAQUE AU GLUTEN OU AU BLÉ

La sensibilité non cœliaque au gluten (SNCG) ou plus généralement au blé (SNCB) est une pathologie qui toucherait 0,6 à 13 % de la population (Catassi *et al.*, 2023). Le chiffre exact est inconnu, car beaucoup de gens cessent d'ingérer des produits à base de blé sans consultation médicale préalable et il n'existe pas de marqueur biochimique simple permettant d'établir le diagnostic. La proportion de personnes qui établissent leur propre diagnostic est forte, de l'ordre de 20 à 30 % ; ce sont principalement des femmes et de jeunes adultes.

Le diagnostic est établi dès lors que la maladie cœliaque et l'allergie ont été écartées. Les symptômes sont divers. Ils peuvent être gastro-intestinaux, musculaires (douleurs), dermatologiques (eczéma) ou neuropsychiques. Certains symptômes peuvent faire penser au syndrome de l'intestin irritable, comme les douleurs abdominales, les ballonnements, la diarrhée ou la constipation.



Le spectre des symptômes neuropsychiques est vaste : migraines, fatigue chronique, irritabilité, sensation d'esprit embrumé, dépression.

Plusieurs composés ont été pointés du doigt : les protéines du gluten (taille des polymères de gluténines), certaines albumines/globulines comme les ATIs (inhibiteurs d'enzymes, *Amylase/Trypsin Inhibitors*) ou les WGA (glycoprotéines localisées dans le germe de blé, *Wheat Germ Agglutinins*) ou encore des sucres fermentescibles (FODMAPs, *Fermentable Oligo-, Di-, Monosaccharides And Polyols*) que l'on retrouve dans les céréales mais aussi dans les fruits et les légumes (voir encadré).

LE GLUTEN JOUE-T-IL UN RÔLE DANS D'AUTRES MALADIES ?

Selon diverses sources, le gluten pourrait être impliqué dans d'autres maladies : la polyarthrite rhumatoïde, la fibromyalgie, l'autisme ou la schizophrénie. Dans le cas de ces dernières, il a été suggéré que des peptides du gluten et de la caséine du lait, notamment un peptide dérivé des α -gliadines du blé appelé gliadorphin-7 ayant une activité opioïde, traverseraient la barrière intestinale pour se retrouver dans la circulation sanguine et passer ensuite la barrière hématoencéphalique, provoquant des troubles au niveau du système nerveux. Ces derniers seraient liés au fait que les fragments de gluten, dérivés d' α -gliadines, auraient une activité opioïde. Ces allégations n'ont été ni prouvées ni réfutées.

POUR ALLER PLUS LOIN : FODMAPs ET ATIs

Les FODMAPs (*Fermentable Oligo-, Di- and Mono-saccharides And Polyhydric alcohols*) sont des glucides et des polyols (alcools de sucre) mal absorbés dans l'intestin grêle. Ils provoquent chez certaines personnes des désagréments intestinaux : gaz, ballonnements, douleurs abdominales, modifications du transit (diarrhée ou constipation), qui sont les marqueurs du syndrome du côlon irritable. Les FODMAPs non digérés captent l'eau dans le gros intestin et sont fermentés par les bactéries du microbiote intestinal. Cette fermentation provoque une augmentation des gaz et liquides intestinaux au niveau des parois intestinales, se traduisant par une série de désagréments (ballonnements, troubles du transit...) communs aux troubles liés au gluten. Parmi les oligosaccharides incriminés, on retrouve les fructanes très présents dans les produits à base de blé, de seigle ou d'orge, ou le lait d'avoine.

Les ATIs (*Amylase/Trypsin Inhibitors*) sont des protéines du blé et des céréales. Elles représentent environ 4 % des protéines totales et appartiennent à la catégorie des albumines/globulines qui sont des protéines ayant des fonctions structurales, métaboliques ou défensives. Parmi ces dernières, certaines, comme les ATIs, ont la capacité d'inhiber les enzymes hydrolytiques des insectes ou des microorganismes pathogènes. Les ATIs sont aussi capables d'inhiber l'amylase et la trypsine des ravageurs et pathogènes. Elles jouent un rôle dans l'eczéma et l'asthme des boulangers, ainsi que dans les allergies alimentaires. Des études *in vitro* et *in vivo* chez l'animal montrent qu'elles pourraient également jouer un rôle dans certains troubles intestinaux, comme la maladie cœliaque ou la sensibilité non cœliaque au gluten.

QUE RETENIR ?

- Les protéines du gluten peuvent déclencher différents types de réactions physiologiques adverses et une grande variété de symptômes chez les personnes sensibles (tableau 2).
- Les maladies les plus communément associées à l'ingestion de gluten sont la maladie cœliaque, la dermatite herpétiforme, l'ataxie au gluten, l'allergie au blé et la sensibilité au gluten non cœliaque.
- La maladie cœliaque ou l'entéropathie au gluten est le trouble de santé lié au gluten le plus connu. Il est estimé qu'elle touche environ 1 % de la population. Actuellement, le seul traitement consiste à maintenir un régime sans gluten strict.
- La maladie cœliaque est déclenchée par certaines séquences peptidiques rencontrées chez les protéines du gluten, en particulier les gliadines.
- Les protéines du gluten seules ne suffisent pas à provoquer la maladie cœliaque, il faut que l'individu soit prédisposé génétiquement.
- Certaines séquences peptidiques déclenchent une série de réactions immunitaires, qui conduisent à l'atrophie des villosités intestinales.
- La maladie cœliaque serait liée à la résistance de certains peptides à l'action d'enzymes de la digestion.
- Les albumines et les globulines, qui ne sont pas des protéines du gluten, peuvent être dangereuses pour les gens présentant une allergie au blé.

Tableau 2. Implication des protéines de réserve du blé dans différentes pathologies.

		Sensibilité non cœliaque au gluten	Dermatite herpétiforme	Allergie	Maladie cœliaque
Gluténines		✓			✓
	SG-FPM	✓		✓	✓
Gliadines	ω -gliadines	✓		✓	✓
	α/β -gliadines	✓	✓	✓	✓
	γ -gliadines	✓		✓	



QUEL INTÉRÊT DE CONSOMMER DES PRODUITS SANS GLUTEN ?

La farine de céréales ou le gluten vital sont incorporés par les industriels de l'agroalimentaire dans de nombreux produits où leur présence ne se soupçonne pas forcément, comme des soupes, des sauces, des charcuteries, des snacks à base de pomme de terre ou encore des bonbons gélifiés. Certaines barres hyperprotéinées ou boissons pour sportifs renferment parfois des peptides issus de gluten hydrolysé. Il est donc difficile, pour des personnes intolérantes au gluten, de l'éviter. Une solution : la consommation de produits sans gluten.

LES PRODUITS SANS GLUTEN : UN MARCHÉ EN PLEIN BOOM

Il est fréquent que médias et réseaux sociaux exhibent des sportifs, célébrités ou autres influenceurs déclarant avoir exclu le gluten de leur alimentation et vantant l'amélioration de leurs performances ou de leur bien-être. On ne compte plus les reportages pointant du doigt les méfaits supposés du gluten. Tout cela a pu faire naître ou entretenir un doute dans l'esprit des consommateurs. Des soignants se sont joints au concert, comme un cardiologue américain affirmant, au travers d'un best-seller, que les blés modernes sont devenus toxiques, qu'ils sont addictifs et poussent les gens à manger davantage, suggérant ainsi un lien avec les problèmes d'obésité. Ces affirmations ont été réfutées par de nombreux scientifiques, spécialistes reconnus des céréales, qui ont conclu que la grande majorité des études menées dans le monde ne permettaient pas d'établir un lien entre la consommation d'aliments à base de céréales et les maladies cardiovasculaires, le diabète, la prise de poids ou la mortalité en général. Malgré cela, les ventes de produits sans gluten ont décollé, quittant les rayons des boutiques spécialisées en diététique ou des pharmacies pour se retrouver dans ceux des supermarchés.

Beaucoup de consommateurs ont volontairement abandonné les produits contenant du gluten et se sont mis à le traquer dans les produits alimentaires proposés par l'industrie.

Le marché des produits sans gluten est passé en quelques années d'un marché de niche spécialisé à une tendance plus générale dans le secteur alimentaire mondial, portée par une industrie alimentaire plus développée et plus réactive, désireuse d'exploiter tout nouveau créneau. Sur la période 2015-2020, le marché a crû de 10,4 % et on projette qu'il devrait passer de 5,6 milliards de dollars en 2020 à 33 milliards de dollars en 2034.

Pendant ce temps, l'effort de recherche s'est intensifié, aussi bien du côté académique que du côté industriel, pour permettre à ces derniers de commercialiser des produits capables de séduire un plus large public. Le nombre d'articles scientifiques consacrés aux pains et pâtes sans gluten a été multiplié par 2 entre 2012 et 2022.

L'étiquetage des produits contenant du gluten ou susceptibles d'en contenir est obligatoire depuis 2005. Selon le Codex Alimentarius, peuvent être étiquetés « sans gluten » les produits alimentaires qui en contiennent moins de 20 mg/kg. La demande pour ce type de produits concerne avant tout le remplacement des aliments qui en contiennent le plus, comme les pains, les pâtes, les biscuits et les farines. Ces quatre catégories de produits peuvent être partiellement prises en charge par l'Assurance maladie en cas de maladie cœliaque correctement diagnostiquée.

Les produits sans gluten sont désormais accessibles facilement. Vitaux pour les patients souffrant de la maladie cœliaque ou d'allergies, ils sont devenus nécessaires pour nombre de personnes en recherche de bien-être, souhaitant perdre du poids, améliorer des performances sportives ou réduire certains troubles (acné, endométriose...). Pour beaucoup, les aliments sans gluten bénéficient d'un « halo de santé » : ils sont perçus comme plus sains, moins caloriques et moins transformés.

Pour les reconnaître, il suffit de rechercher l'épi barré figurant sur l'emballage. En France et en Europe, ce logo est protégé par les associations de malades cœliaques et son utilisation par les

industriels se fait avec l'accord préalable de celles-ci (Afdiag en France¹⁶). Les industriels s'engagent alors à respecter la teneur maximale en gluten, fixée depuis 2008 à 20 mg/kg (200 mg/kg auparavant) ; à faire contrôler la teneur en gluten de leurs produits par des laboratoires indépendants avec des tests approuvés par le Codex Alimentarius ; à transmettre les résultats à l'Afdiag, qui va les contrôler. Depuis 2009, l'Europe a proposé une nouvelle catégorie : celle des produits « pauvres en gluten » dont la teneur est comprise entre 20 et 100 mg/kg. Cette catégorie vise à offrir davantage d'options aux personnes qui peuvent tolérer des niveaux de gluten légèrement plus élevés sans effets néfastes sur la santé. La législation diffère selon les pays. Ainsi, aux États-Unis¹⁷, seule l'appellation *gluten-free* existe et ne peut être apposée que sur les aliments qui ne contiennent intrinsèquement pas de gluten (comme les carottes crues ou le jus de pamplemousse [sic]), et sur les aliments dont les ingrédients sont des céréales contenant potentiellement du gluten mais dont celui-ci a été éliminé (comme l'amidon de blé), à condition que sa teneur ne dépasse pas 20 mg/kg. Les aliments avec des céréales complètes ou raffinées contenant du gluten (comme l'épeautre, la farine de blé) ne peuvent pas s'en prévaloir, ni ceux contenant 20 mg/kg ou plus de gluten suite à un contact croisé avec des céréales qui en contiennent. L'Australie et la Nouvelle-Zélande ont adopté une norme plus stricte, exigeant que les produits *gluten-free* n'en contiennent aucune trace.

QUI ACHÈTE ET POURQUOI ?

La proportion de gens qui évitent/bannissent le gluten de leur alimentation est variable. En 2013 par exemple, 30 % des Américains se déclaraient intéressés par un régime sans gluten. Soixante-cinq pour cent pensent aussi que ce régime est plus sain et 27 % le choisissent pour perdre du poids (Jones, 2017).

16. <https://www.afdiag.fr>.

17. <https://www.federalregister.gov/documents/2013/08/05/2013-18813/food-labeling-gluten-free-labeling-of-foods> (consulté le 01/08/2025).



En France, selon des données de l'enquête Nutrinet collectées en 2016, sur un peu plus de 20 000 personnes, 10,31 % d'entre elles éviteraient le gluten et 1,65 % de façon stricte. Selon une autre enquête réalisée en Angleterre en 2019, parmi les personnes qui évitent le gluten, 76 % le font parce qu'elles ont la maladie cœliaque, 8 % parce qu'elles sont intolérantes au gluten, 10 % parce qu'elles vivent avec une personne cœliaque et seulement 6 % pour d'autres raisons (Vriesekoop *et al.*, 2020).

Parmi ces autres raisons vient en tête la perception que le régime sans gluten est plus sain, qu'il peut procurer un bien-être et un confort physique immédiats et sur le long terme. Vient ensuite la volonté de perdre du poids. Parmi ces consommateurs, on retrouve beaucoup de femmes, plutôt jeunes. En France et dans différents pays, les consommateurs qui font le choix d'une alimentation sans gluten pour des raisons liées au bien-être ont recours à d'autres pratiques qui, pour eux, vont dans le même sens : plus de fruits et légumes, moins d'alcool et de produits gras et sucrés, mais aussi moins de produits laitiers. Ces mêmes personnes privilégient les produits issus de l'agriculture biologique, les circuits courts et évitent les aliments ultratransformés.

UNE LISTE D'INGRÉDIENTS LONGUE COMME UN JOUR SANS PAIN

Soixante-dix pour cent des aliments consommés par les Français contiendraient du gluten. On rappelle que, dans les produits à base de blé, comme le pain ou les gâteaux, le réseau de gluten se développe lors du pétrissage et de la formation de la pâte. Une structure protéique tridimensionnelle est créée, qui apporte de l'élasticité au mélange. Ce réseau piège aussi le gaz carbonique (CO₂) produit lors de la fermentation, dans le cas du pain, ou généré par la levure chimique dans le cas des gâteaux. Les bulles de gaz formées vont alors s'expanser tout en étant contenues par le réseau et provoquer la levée de la pâte. Lors de la cuisson, le réseau se fige, contribuant ainsi à la stabilité du produit. Ces propriétés uniques rendent le gluten presque indispensable

à la formulation de produits tels que le pain ou les gâteaux. Dans le cas des produits type « pain sans gluten », la fabrication est un défi, car rien ne peut rivaliser avec les protéines du blé, mais des formulations complexes vont permettre de s'en approcher.

Si la liste des ingrédients est restreinte dans un pain de tradition française — une farine de blé panifiable, de l'eau, du sel, un levain ou une levure, et éventuellement d'autres farines (farines de fève 2 % max., farine de soja 0,5 % max., farine de blé malté 0,3 % max.) —, il n'en va pas de même pour leurs analogues sans gluten vendus dans le commerce. Parfois, une vingtaine d'ingrédients sont nécessaires pour obtenir un pain.

Quelles farines pour du sans-gluten ?

Se passer de gluten nécessite d'avoir recours à d'autres céréales et d'autres ingrédients ou additifs. L'élément principal est le plus souvent un amidon, comme dans les pains à base de blé (l'amidon est le constituant majeur de la farine de blé). Celui du maïs est l'ingrédient principal dans environ 60 % des recettes (Roman *et al.*, 2019). Il est très souvent associé à une farine de riz blanc (dans 30 % des formulations). L'amidon de maïs donne des pains avec un volume important, mais avec une texture plutôt sèche et friable. D'autres types d'amidon sont parfois incorporés dans des proportions plus faibles, comme le tapioca, la fécule de pommes de terre ou des amidons modifiés. D'autres farines peuvent venir compléter la liste des ingrédients de base, comme des farines de riz complet ou de sarrasin.

Ces ingrédients de base sont une réalité commerciale, mais la littérature scientifique fait état d'essais avec des farines de céréales autres que le riz ou le maïs : sorgho, millet, teff ; de pseudo-céréales : amarante, quinoa, chia ; de légumineuses (pois chiches, pois, soja) ; ou encore de châtaignes. Les légumineuses sont intéressantes sur le plan nutritionnel (teneur en protéines plus élevée et composition en acides aminés différente et complémentaire de celle des céréales), mais, si elles sont utilisées en proportions trop importantes, les études sensorielles révèlent qu'elles apportent de l'amertume ou des goûts inhabituels mal perçus par les jurys et les consommateurs.

Comment épaissir et retenir l'eau ?

Des agents de texture (hydrocolloïdes) sont incorporés dans plus de 80 % des recettes pour leurs propriétés épaississantes et leur forte capacité à retenir l'eau. Ils permettent aussi d'augmenter la viscosité du mélange, afin de mieux retenir les gaz de fermentation et la levée de la pâte. Le plus fréquemment utilisé est l'hydroxypropyl méthylcellulose (HPMC). Les gommes de xanthane, de guar ou de caroube sont aussi utilisées, car elles présentent une meilleure capacité de rétention d'eau. Des pectines sont parfois ajoutées, mais moins fréquemment que le psyllium (plantain des Indes), reconnu aussi pour ses effets bénéfiques sur la santé (traitement des diarrhées et de la constipation, régulation de la glycémie et de la lipidémie).

Quelles protéines rajouter ?

À côté de l'amidon et des ingrédients structurants, les protéines les plus fréquemment incorporées proviennent de l'œuf, entier ou blanc, ou du soja. On peut citer aussi les protéines de pois, de lupin ou de lait. L'ajout de protéines permet en outre de développer des arômes lors de la cuisson, par le biais de la réaction de Maillard.

Pourquoi rajouter du sucre ?

La plupart des pains sans gluten contiennent des sucres ajoutés : saccharose le plus souvent, glucose, fructose, sirops d'origines diverses (betterave, canne à sucre, sirop de maïs, de riz ou d'agave). Les sucres sont ajoutés pour servir de « carburant » aux levures et amener le développement d'arômes et de la coloration lors de la cuisson, toujours par le biais de la réaction de Maillard.

Certains rajoutent aussi du gras...

Des huiles et des matières grasses sont également incorporées afin de renforcer la sensation d'humidité en bouche, d'améliorer la texture (pains moins durs, mie plus souple) ainsi que la durée de conservation, très souvent jugée décevante. Les huiles de colza/canola, tournesol et soja sont les plus utilisées devant l'huile d'olive, la margarine ou l'huile de palme.

... et encore de nombreux additifs

Parmi les ingrédients mineurs, on retrouve :

- des émulsifiants utilisés pour stabiliser les bulles et les uniformiser dans la pâte, ou encore pour limiter les pertes en eau au cours du temps. Parmi les plus employés, on trouve les mono- et diglycérides d'acides gras et les lécithines ;
- les conservateurs comme l'acide propionique, le glycérol, les sorbates ;
- des agents levants, naturels comme les levures et les levains, ou chimiques comme le bicarbonate de sodium ;
- des acides pour améliorer la conservation en diminuant le pH et pour produire du CO₂ avec le bicarbonate ;
- des arômes ;
- des graines entières ou broyées de lin, tournesol, sésame, pavot, chia ou courge qui vont apporter des oméga-3 et des oméga-6 et masquer certains goûts désagréables ;
- des fibres en plus des hydrocolloïdes, pour enrichir les pains sur le plan nutritionnel et pour augmenter la capacité de rétention d'eau (inuline, fibres de pomme ou de betterave) ;
- des enzymes pour former des liaisons entre les polymères entrant dans la composition du pain ou pour produire des sucres pour les levures ;
- du sel...

Et de l'eau, dont la proportion varie, selon les ingrédients ajoutés, de 50 à 220 %.

LES PÂTES ET BISCUITS SANS GLUTEN : MOINS D'ADDITIFS ?

Contrairement au pain, les pâtes alimentaires et les biscuits ont des listes d'ingrédients beaucoup plus courtes. Dans le cas des pâtes alimentaires, la substitution du blé dur par 100 % de légumineuses (pois chiches, lentilles) est maintenant fréquente. Cependant, la grande majorité des pâtes sont élaborées à partir de farine de riz ou de maïs ou encore de mélanges des deux. Dans quelques cas, on retrouve des émulsifiants (mono- et diglycérides d'acides gras). La composition des biscuits est également plus « légère », dans

la mesure où la pâte n'est pas levée. Là encore, les ingrédients de base sont l'amidon de maïs et la farine de riz, additionnés de sucre, de matières grasses, de levure chimique et de sel.

LES PRODUITS SANS GLUTEN SONT-ILS ULTRATRANSFORMÉS ?

Sur le plan organoleptique, des efforts ont été réalisés par les industriels pour améliorer les propriétés des produits sans gluten. À propos du pain, les critiques les plus fréquentes portent sur la texture qualifiée de dure et de friable, sur l'aspect des alvéoles parfois très grosses, sur le goût qualifié de fade ou de « carton ». Les reproches concernent aussi sa conservation. Les pâtes alimentaires sont, pour leur part, jugées plus proches, voire équivalentes aux analogues contenant du gluten.

Sur le plan nutritionnel, les produits sans gluten apparaissent de qualité inférieure à celle des équivalents qui en contiennent (pains, pâtes, biscuits, gâteaux, snacks, pizza). L'élimination du blé, de l'orge et du seigle conduit à des produits type pain ou gâteaux ayant souvent une teneur en protéines plus faible, de 30 à 60 % de moins, du fait de l'utilisation d'amidon comme ingrédient principal dans la majorité des recettes et de farines de riz aux teneurs en protéines plus basses que le blé (6 % de la masse sèche totale du grain en moyenne contre 10 % pour le blé). Ces produits se caractérisent aussi par moins de fibres, de vitamine B, de fer, de zinc et de potassium, du fait de l'utilisation de farines raffinées, qui sont en outre moins intéressantes sur le plan de la prévention des maladies cardiovasculaires. Beaucoup de ces produits élaborés à partir de riz et de maïs seraient plus gras, plus sucrés et contiendraient plus de sodium.

Si l'on considère leur index glycémique (IG, voir encadré), les farines utilisées pour la confection d'aliments sans gluten ont des IG très variables. Celui de la farine de lupin par exemple est bas (15), celui des farines de pois chiche ou de fonio est compris entre 35 et 55 respectivement, tandis que celui de la farine de riz complète est élevé (75) et grimpe encore si celle-ci est blanche. Les féculés (pomme de terre, tapioca, maïs, riz)

ont un IG très élevé, de l'ordre de 95. Par comparaison, une farine de blé raffinée de type T45 (figure 16) possède un IG de 85 et celui-ci chute à 65 pour une farine semi-complète de T110. Ainsi, pour les pâtes alimentaires, les produits sans gluten à base de farine de maïs et de riz ont un IG supérieur à celui des produits à base de semoule de blé dur. À l'inverse, l'emploi de farines de légumineuses donne des produits avec des IG en dessous des produits avec gluten.

Ces inconvénients peuvent être corrigés par l'apport de protéines, de fibres, d'arômes ou de graines.

Si ces produits présentent un réel bénéfice pour les personnes atteintes de maladie cœliaque, leur effet sur la perte de poids n'est pas avéré. Par contre, si l'adhésion à un régime sans gluten s'inscrit dans une hygiène de vie plus saine comprenant plus de fruits et de légumes, plus de graines et de légumineuses, plus d'activité physique et moins d'alcool, d'aliments gras et sucrés, sans recours à des aliments ultratransformés, un bénéfice peut être alors attendu.

L'INDEX GLYCÉMIQUE

L'index ou indice glycémique, dont l'abréviation est IG, donne une indication sur la capacité d'un aliment à augmenter la glycémie, c'est-à-dire la concentration de glucose dans le sang. Il est compris entre 1 et 100 (plus le chiffre est proche de 100 et plus les glucides de l'aliment consommé passent rapidement dans le sang). Les régimes actuels privilégient les aliments à IG faible (< 55).

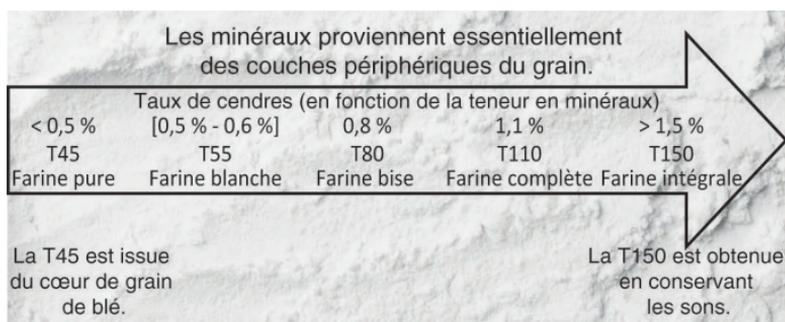


Figure 16. Types de farines en fonction de la teneur en matières minérales ou cendres.

SE NOURRIR SANS GLUTEN, MAIS À QUEL PRIX ?

De nombreuses enquêtes ont comparé les prix des produits avec et sans gluten. En 2015, nous avons réalisé, avec nos collègues (Abécassis et Samson, 2015), une comparaison entre pâtes alimentaires, provenant de différentes sources d'approvisionnement en ligne (sites de vente de boutiques spécialisées dans le sans-gluten, le bio, sites de vente de grandes enseignes de supermarchés). Les données montraient que les pâtes alimentaires sans gluten étaient 5 fois plus chères que les pâtes à base de blé dur. La comparaison a été renouvelée en 2023 et les données montrent que la différence est toujours importante, les pâtes de blé dur étant 4,8 fois moins chères. D'autres études réalisées dans le monde montrent aussi que les produits sans gluten sont plus coûteux, de 200 à 400 %, voire parfois jusqu'à 500 %. Ce coût majoré s'explique par le prix plus élevé des matières premières, des analyses et contrôles plus fréquents, un investissement de recherche et une moindre quantité produite.

Toutefois, il existe de grandes disparités selon les fabricants et le lieu d'achat. Si leur disponibilité a fait l'objet de critiques par le passé de la part des consommateurs, celle-ci s'améliore. En effet, les actions menées par l'Afdiag et l'augmentation du nombre de personnes intéressées ont contraint les grands groupes de l'agroalimentaire à les rendre accessibles dans les supermarchés. Le *boom* du commerce en ligne a aussi permis de rendre le sans-gluten encore plus visible.

QUE RETENIR ?

- Le marché des produits sans gluten est en plein essor.
- La liste des ingrédients des produits sans gluten est toujours plus longue que celle des produits avec gluten.
- Les produits sans gluten sont plus chers.
- Les espèces telles que l'amarante, le sarrasin, le maïs, le millet, le quinoa, le riz, le sorgho, le soja, le teff ne contiennent pas de protéines de gluten et sont donc adaptées aux personnes atteintes de la maladie cœliaque ou souffrant d'une intolérance au gluten.



QU'EST-CE QUI PEUT DÉGRADER LE GLUTEN ?

Malgré 10 000 ans de coexistence, les aliments riches en gluten restent nouveaux pour l'homme : nous ne disposons pas des enzymes capables de dégrader complètement les protéines constitutives du gluten. Quelles seraient ces enzymes ? Des peptidases (appelées aussi protéases ou enzymes protéolytiques) dénommées gluténases.

LA GERMINATION, LE PROCESSUS ORIGINEL DE DÉGRADATION

On s'attend à ce que la dégradation des protéines qui constituent le gluten se produise dans des environnements où elles sont naturellement présentes, c'est-à-dire dans les grains de céréales et dans les organismes qui l'utilisent comme source principale de nourriture. Les protéases endogènes des céréales qui hydrolysent les protéines de réserve, y compris celles du gluten, sont synthétisées pendant la germination. L'endopeptidase à cystéine B₂ de l'orge, bien étudiée, coupe au niveau des résidus glutamine et préfère les protéines intactes comme substrat. Une combinaison de cette endopeptidase à cystéine d'orge et d'une protéase bactérienne de *Flavobacterium meningosepticum*-PEP s'est avérée efficace pour détoxifier les protéines du gluten.

BACTÉRIES, CHAMPIGNONS, PLANTES, INSECTES : QUI POUR DÉGRADER LE GLUTEN ?

Diverses espèces de bactéries, de champignons, de plantes et d'insectes possèdent des peptidases ou gluténases capables de dégrader le gluten (voir encadré).



POUR ALLER PLUS LOIN

Les peptidases capables de dégrader le gluten appartiennent à différentes familles parmi lesquelles on va trouver :

- des métallopeptidases, dont l'élastase LasB¹⁸, qui hydrolyse efficacement les molécules de gluten, mais produit une multitude de petits peptides immunogéniques pouvant activer les cellules T spécifiques du gluten de patients cœliaques ;
- des protéases à sérine dont la plupart dégrade le gluten. Cependant, la majorité de ces enzymes sont inefficaces contre de nombreuses séquences immunogènes du gluten. Les exceptions sont une enzyme de *Rothia* spp. (bactérie commensale qui habite la cavité buccale humaine) active contre le peptide immunogène 33-mer, et deux enzymes (subtilisines S8) de *Bacillus licheniformis* ;
- des carboxypeptidases à sérine (S9). Un actinomycète du sol (bactérie filamenteuse) produit cette enzyme qui clive les peptides 33-mer ainsi que des gliadines intactes. Sa forme active a été produite dans *Streptomyces lividans* TK24, une souche source de protéines pour l'alimentation humaine. D'autres peptidases de cette famille S9 sont spécifiques du clivage après les résidus de proline, ce qui les rend très synergiques avec les protéases digestives humaines. Ces enzymes proviennent d'une large gamme de bactéries environnementales et d'archées. Toutes ces enzymes peuvent détoxifier le peptide 33-mer, mais diffèrent sur le plan de leur activité hydrolytique et de leur stabilité, dans des conditions gastro-intestinales artificielles *in vitro* (avec pH acide, protéases pancréatiques et peptidases membranaires de la muqueuse de l'intestin grêle) ;
- les peptidases dégradant le gluten sont également présentes dans les organismes impliqués dans la décomposition de la matière organique, tels que les champignons ou encore des insectes comme le ver de farine jaune et autres insectes céréaliers apparentés qui s'alimentent principalement de protéines de réserve des céréales.

18. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00253-021-11263-5> (consulté le 13/06/2025).

Toutes ces gluténases qui génèrent des coupures dans les protéines, en plus des coupures effectuées par les enzymes digestives (cf. *infra*), peuvent être utilisées pour produire des aliments à gluten dégradé, à partir de matières premières contenant du gluten. Elles ont aussi été suggérées comme thérapie orale. Cette thérapie enzymatique orale est considérée comme prometteuse dans le cas de pathologies liées au gluten.

Par contre, l'utilisation de telles enzymes sur de la farine empêche la formation du réseau de gluten et la fabrication de pain levé.

LES « DÉGRADEURS » DE NOTRE TUBE DIGESTIF

Il existe des milliers d'espèces bactériennes qui peuplent le tube digestif humain. Plusieurs de ces bactéries peuvent potentiellement dégrader le gluten. Leur étude est difficile, car une même espèce bactérienne peut avoir des activités de dégradation des protéines très différentes selon la souche étudiée et les communautés bactériennes sont aussi très diverses selon les parties du tube digestif.

Huit cents espèces de bactéries de notre bouche !

La digestion des aliments commence dans la cavité buccale et il est démontré que les 800 espèces procaryotes qui y vivent ont la capacité de dégrader le gluten. Parmi elles, les espèces du genre *Rothia*, *Actinomyces odontolyticus*, *Neisseria mucosa* et *Capnocytophaga sputigena* se sont révélées très actives contre la gliadine ou le peptide immunogène 33-mer.

Bien que leurs activités soient assez faibles, la forte abondance des espèces de *Streptococcus* pourrait néanmoins contribuer elle aussi, de manière substantielle, à la capacité globale de dégradation des gliadines dans la bouche.

Dans le litre de salive que nous produisons par jour, les subtilisines émises par les bactéries qui s'y trouvent commencent probablement à dégrader les protéines du gluten. Avalée, la salive fournit ainsi également des substrats aux bactéries du tube digestif inférieur.

L'estomac : une zone quasi stérile ?

Le pH de l'estomac, après un repas, est compris entre 2 et 4. Cela limite considérablement les groupes bactériens qui peuvent y être actifs ou même endurer ses conditions difficiles et rester en vie. Le microbiote gastrique est malgré tout diversifié et comprend des espèces des genres *Streptococcus*, *Propionibacterium*, *Lactobacillus*, *Staphylococcus*, *Prevotella*, *Veillonella*, *Rothia* et *Haemophilus*. Bien qu'il existe très peu d'informations sur la capacité des bactéries de l'estomac à dégrader le gluten, il convient de noter que des espèces de *Rothia* peuvent avoir une activité à faible pH et pourraient donc être impliquées dans la dégradation du gluten qui y a lieu.

L'intestin grêle : le nœud du problème

La dégradation des nutriments se poursuit dans les zones successives de l'intestin grêle que sont le duodénum, le jéjunum et l'iléon. De nombreux produits de dégradation y sont absorbés, l'intestin grêle remplissant aussi de fortes fonctions immunomodulatrices. C'est pour cela que la maladie coéliquaue y est déclenchée.

Les conditions dans le duodénum peuvent être difficiles pour certaines bactéries, car il contient des niveaux élevés de protéases humaines et d'acides biliaires. C'est probablement la raison pour laquelle le nombre de bactéries est plus faible dans le duodénum et augmente dans le jéjunum et l'iléon.

Pour étudier les communautés bactériennes de l'intestin grêle, il est nécessaire de procéder à une biopsie. Très peu d'études ont donc été réalisées. Il semblerait néanmoins que 15 espèces bactériennes présentes dans cette partie du tube digestif ont pu hydrolyser le peptide 33-mer, 60 % d'entre elles étant des lactobacilles.

Plus de 1 500 espèces de bactéries dans le côlon

L'étude des matières fécales renseigne sur les bactéries présentes dans le côlon. Dans cette partie finale du tube digestif, leur nombre est très élevé (10 fois plus que dans l'intestin grêle).

Certaines bactéries fécales ont une activité protéolytique : *Propionibacterium*, *Clostridium*, *Streptococcus*, *Bacillus* et *Staphylococcus*. Pour autant, l'importance de l'activité de dégradation des prolamines dans le côlon est discutable, car l'activité dommageable des épitopes dérivés du gluten commence dans le duodénum.

LES PROBIOTIQUES ONT-ILS UN INTÉRÊT DANS LE CAS DE LA MALADIE CŒLIAQUE ?

Actuellement, le rôle du microbiote intestinal (ou flore intestinale) dans la maladie cœliaque n'est pas clairement compris. Plusieurs études ont rapporté des changements dans la composition du microbiote intestinal, la « dysbiose intestinale », chez des patients atteints de cette maladie par rapport aux sujets sains. Une composition équilibrée du microbiote commensal humain a été ainsi considérée comme cruciale pour le développement d'un système immunitaire sain ; il n'est cependant pas évident si la dysbiose intestinale est la cause ou l'effet de la maladie cœliaque.

Les probiotiques ont été considérés comme une stratégie pour moduler le microbiote intestinal chez les patients atteints de cette pathologie. Ils pourraient digérer les protéines du gluten en petits polypeptides non immunogènes et empêcher les polypeptides immunogènes d'accéder à la muqueuse intestinale, tout en régulant le système immunitaire. Des cocktails de probiotiques incluant différentes souches de bactéries (bifidobactéries, lactobacilles, streptocoques) ont montré leur efficacité pour réduire l'inconfort lié à la consommation de gluten. Ces cocktails, ajoutés lors de la transformation des céréales, pourraient prédigérer les gliadines et ainsi les rendre tolérables. L'effet synergique est important car les souches prises individuellement ne sont pas capables de détoxifier les gliadines.

On ne s'attend donc pas à ce que les probiotiques fournissent un remède rapide pour des maladies complexes telles que la maladie cœliaque, mais plutôt qu'ils en atténuent la gravité et les symptômes. Néanmoins, le comité médical de l'Afdiag ne confirme pas leurs éventuels bénéfices.

SOURCES NATURELLES DE BACTÉRIES DÉGRADANT LE GLUTEN

L'interaction avec un microbiote environnemental diversifié et abondant est importante pour la prévention des maladies non transmissibles à médiation immunitaire. Par exemple, une

végétation diversifiée autour des habitations, en particulier des arbustes et des plantes à fleurs, est associée à des changements liés à la santé dans la composition du microbiote intestinal. L'effet des bactéries environnementales sur les allergies a été associé à leurs effets immunomodulateurs.

Des études empiriques ont montré que les bactéries étaient le principal contributeur à l'activité protéolytique dans les sols. Il a été démontré que les isolats bactériens de *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium* et *Cytophaga* étaient d'importants agents de protéolyse et les principales sources d'activité peptidasique du sol.

Les légumes-racines, comme les carottes, navets, pommes de terre, étant en contact direct avec le sol, partagent une partie du microbiote environnant. Dans des conditions *in vitro* de laboratoire, des bactéries provenant de légumes-racines ont pu dégrader le gluten et détoxifier les épitopes immunogènes toxiques impliqués dans la maladie cœliaque. Ces groupes bactériens sont similaires ou même identiques aux bactéries dégradant ces substrats dans le duodénum (intestin) et les fèces.

Il est donc possible que ces souches soient introduites dans le tube digestif avec de la nourriture. Actuellement, il n'est pas possible d'estimer si ces bactéries habitent le tube digestif de manière stable, peut-être avec des substrats alimentaires spécifiques requis, ou si elles sont constamment introduites avec de la nourriture.

Il est également probable que l'activité de dégradation du gluten puisse être réalisée par des enzymes qui dégradent généralement certaines protéines riches en proline, telles que la kératine, le collagène et l'élastine. Nous avons déjà vu que l'élastase de *Pseudomonas aeruginosa* peut dégrader le gluten. La dégradation du gluten par des élastases gastro-intestinales humaines a aussi été décrite.

Les microbiotes buccaux des chasseurs-cueilleurs et des agriculteurs traditionnels ont été observés différents des nôtres : les espèces microbiennes trouvées préférentiellement chez les chasseurs-cueilleurs sont souvent considérées aujourd'hui comme

des pathogènes buccaux. Or il est possible que ces microbes perçus comme pathogènes puissent contribuer à la dégradation des peptides dérivés du gluten.

LA MODIFICATION CHIMIQUE OU MICROBIOLOGIQUE DU GLUTEN

Il est possible de modifier certains acides aminés (c'est-à-dire remplacer une perle du filet...) pour rendre le gluten moins toxique. Cela peut se faire par voie chimique ou en utilisant des microorganismes.

Concernant la voie chimique, le gluten peut être désamidé en conditions acides, ce qui transforme les glutamines en acide glutamique. À pH très acide, ce procédé est très employé dans l'industrie pour modifier les propriétés du gluten et en particulier améliorer sa solubilité. En pratique, ce processus chimique requiert l'utilisation de fortes concentrations en acides qui altèrent la structure des protéines et affaiblit le réseau de gluten. Il génère aussi des goûts amers. Et s'il réduit la toxicité, il peut, à l'inverse, induire des problèmes d'allergie.

La voie microbiologique va modifier les propriétés biologiques des protéines grâce à des enzymes, les transglutaminases. Celles-ci peuvent provenir de plantes, mais le plus souvent elles sont issues de microorganismes (transglutaminases mTG). Elles catalysent dans ce cas la formation de liaisons et les glutamines ainsi liées ne sont plus reconnues par la transglutaminase tissulaire (tTG2) impliquée dans la maladie cœliaque. La toxicité de la farine de blé peut être réduite de cette façon, toutefois l'innocuité d'une telle pratique n'est pas démontrée.

COMMENT LA FERMENTATION PEUT DÉGRADER LE GLUTEN ?

Au cours du xx^e siècle, la panification avec des levures dites de boulangers (*Saccharomyces cerevisiae*) et des procédés de fermentation rapide a largement remplacé les méthodes ancestrales au

levain pour des questions de rentabilité, d'uniformisation des goûts des consommateurs ou de praticité.

Le levain est une pâte en fermentation obtenue en mélangeant tout simplement de la farine (ou des céréales broyées) et de l'eau. Il n'y a aucun apport volontaire de microorganismes, bactéries ou levures. Chaque boulanger perpétue son levain (on dit qu'il le « rafraîchit ») par des ajouts réguliers d'eau et de farine, ce qui permet aux bactéries lactiques et aux levures naturellement présentes dans la farine, dans le fournil ou sur ses mains, de se retrouver ensemble et d'assurer la levée de la pâte à pain.

Lors de la fermentation, les bactéries lactiques du levain acidifient la pâte (baisse du pH), ce qui fragilise le réseau de gluten et favorise l'action des protéases de la farine. Les gluténines de faibles poids moléculaires sont partiellement hydrolysées tandis que les gliadines, qui ont une sensibilité moindre à la protéolyse, sont moins dégradées. La sensibilité à la dégradation des gliadines diminue selon l'ordre γ -, α - et ω -gliadines. La moindre sensibilité de ces dernières est relative à leur forte teneur en proline. Cette dégradation limitée des protéines du gluten lors de la fermentation au levain s'accompagne d'une réduction de la quantité de sucres fermentescibles (FODMAPs), de l'activité des inhibiteurs trypsiques (ATIs) et de la teneur en phytates. On remarque aussi que les protéines sont mieux digérées *in vitro* et que les fibres solubles et les composés phénoliques solubles sont plus nombreux. Cela irait de pair avec une diminution de l'index glycémique.

Les bactéries lactiques interviennent non seulement dans l'acidification de la pâte, mais elles jouent aussi un rôle sur l'accumulation de composés de faible poids moléculaire, comme le glutathion. Des réactions d'échange entre le glutathion et les protéines du blé entraînent alors leur dépolymérisation par la réduction des ponts disulfures, une augmentation de leur solubilité et l'exposition des sites de clivage aux enzymes protéolytiques.

Lorsqu'un boulanger démarre un nouveau levain, la colonisation microbienne est rapide et la pâte est envahie par une espèce de levure en 5 « rafraîchis », et par deux ou trois espèces de bactéries après 10 à 20 rafraîchis. Les espèces microbiennes qui

s'installent varient selon les boulangers et boulangères, mais ne semblent dépendre ni du blé utilisé ni du type de mouture. Des études sur la diversité des levains ont été menées dans le cadre de recherches participatives impliquant des paysans, des artisans et des industriels des filières pain¹⁹.

LE MALTAGE

Le maltage consiste à faire germer puis sécher les grains de céréales. Il débute par l'étape de trempage des grains dans l'eau pendant 40 à 60 heures, qui permet d'activer la germination.

Lorsque les grains commencent à émettre des racines et tiges, ils sont brassés régulièrement dans des cuves ou tambours pendant 4 à 6 jours. L'amidon du grain est alors transformé en sucres simples et libère des arômes. Cette étape s'achève lorsque la racine atteint la taille du grain, formant ce qu'on nomme le malt vert.

Les grains germés sont ensuite soumis à une forte chaleur, qui stoppe la germination et les sèche. La température et la durée de séchage vont influencer sur la couleur, et le goût et l'arôme du malt. Les racines sont séparées du grain par un processus de dégermage.

Comme indiqué dans un chapitre précédent (voir « Des protéines nécessaires à la croissance de la plantule »), l'action combinée d'enzymes synthétisées *de novo* et d'enzymes déjà en place permet la dégradation des protéines stockées dans l'albumen amylicé et libère des acides aminés et des petits peptides. Le maltage peut être ainsi l'une des méthodes les plus applicables à la préparation à grande échelle de produits à faible immunogénicité du gluten dans l'industrie de transformation des aliments, mais non destinés aux malades coéliqués. Il peut même améliorer la fermentation du levain lorsque le processus de maltage n'est pas complètement arrêté. Le levain peut également être combiné au maltage pour réduire davantage l'immunogénicité du gluten.

19. Michel E., Sicard D., 2018. Projet Bakery : ferments d'innovation en boulangerie française, <https://hal.science/hal-04599427> (consulté le 14/07/2025).



QUE RETENIR ?

- Il existe des bactéries, des champignons, des plantes et des insectes capables de dégrader les protéines du gluten.
- Ces organismes capables de dégrader les protéines du gluten peuvent être utilisés pour produire des aliments à gluten dégradé ou comme thérapies, mais pas dans le cas de la maladie coéliquue.
- Le levain fragilise le réseau de gluten.
- Une fermentation longue au levain produit des pains avec des glutens moins compacts et plus digestes que ceux issus d'une fermentation courte avec levure.



COMMENT INFLUER SUR LA QUANTITÉ DE GLUTEN DÈS LE GRAIN ?

La quantité de gluten qui pourra être générée par un blé est fortement liée à sa teneur en protéines, et celle-ci dépend beaucoup des conditions dans lesquelles le blé est cultivé. De même, le travail de sélection variétale peut être axé sur cette dimension-là.

UNE INFLUENCE DU MODE CULTURAL RECONNUE DEPUIS LONGTEMPS

Les anciens avaient déjà remarqué que tous les blés ne contenaient pas une égale quantité de gluten et que celle-ci variait avec le territoire, les engrais et la température moyenne de l'année de récolte (Peyrat, 1854). Certains avaient notamment repéré que le blé contenait d'autant plus de gluten « que le pays dans lequel il a été récolté joint à une température élevée et sèche un sol d'ailleurs plus fertile ».

Ainsi, les blés des pays méridionaux étaient parfois assez mal considérés car, « brûlés par un soleil trop ardent », ils présentaient l'inconvénient de se « racornir » et de donner plus de son. Ceux de contrées plus septentrionales, cultivés sur un sol plus fertile, étaient jugés comme « rendant moins de son, moins d'amidon, mais beaucoup plus de mucilage et de gluten ». La pâte obtenue montrait « une grande finesse spongieuse » (Beccari, 1728). Cependant, cet avis n'était pas totalement partagé puisque certains estimaient que la qualité des préparations alimentaires obtenues à partir des blés durs récoltés dans les contrées méridionales était supérieure (Payen, cité par Roy, 1862) !

Des débats avaient aussi lieu entre blés d'Odessa et blés français. Certaines analyses concluaient à une quantité supérieure de gluten contenu dans les farines des blés d'Odessa par rapport aux farines françaises.

BEUCOUP D'AZOTE, BEUCOUP DE GLUTEN ?

L'azote est un macronutriment indispensable à la croissance et au développement des plantes. Il est notamment le fameux N du radical amine de chaque acide aminé (cf. figure 3). Son rôle est donc majeur pour la synthèse des protéines.

Apporter de l'azote aux céréales, autrement dit pratiquer une fertilisation azotée, permet d'accroître la teneur en protéines des grains. D'une manière générale, un apport important d'azote favorise la synthèse des gliadines et des gluténines de hauts poids moléculaires, ce qui se traduit par une qualité technologique du blé plus proche de celle recherchée par les industriels.

La quantité de gliadines augmente plus rapidement que les gluténines et le ratio gluténines/gliadines est donc le plus souvent réduit. Il est souvent conseillé aux agriculteurs de fractionner l'apport d'azote en plusieurs fois au long du cycle de la culture ou de l'apporter tardivement en fin de cycle. Ces pratiques augmentent particulièrement les protéines du gluten.

En général, les grains de céréales cultivées selon le cahier des charges de l'agriculture biologique ont une teneur en protéines du gluten moindre que les grains cultivés en agriculture conventionnelle avec apport d'azote minéral.

GLUTEN ET PESTICIDES : QUE SAVONS-NOUS ?

Le lien entre gluten et pesticides est difficile à prouver, mais il mérite qu'on s'y attarde un peu.

Pour ce qui est du glyphosate et de la maladie cœliaque, l'existence d'une corrélation est fortement soupçonnée entre cette molécule chimique présente dans une majorité des herbicides et la recrudescence des cas d'intolérance au gluten²⁰. Le glyphosate inhibe une enzyme (5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase), qui est une enzyme de la voie de biosynthèse des

20. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3945755/#S0001> (consulté de 09/06/2025).

acides aminés aromatiques (tryptophane, tyrosine et phénylalanine), chez les bactéries, archées et les plantes. Chez les plantes, les acides aminés aromatiques représentent jusqu'à 35 % de leur masse sèche. Breveté à l'origine comme antimicrobien (Monsanto Technology LLC), le glyphosate s'est avéré perturber les bactéries intestinales chez les animaux, tuant préférentiellement les formes bénéfiques et provoquant une prolifération de pathogènes. Deux autres propriétés du glyphosate ont également un impact négatif sur la santé humaine : la chélation de minéraux tels que le fer et le cobalt, et l'interférence avec les enzymes du cytochrome P450, qui jouent de nombreux rôles dans l'organisme.

Des études sur l'exposition au glyphosate chez les poissons carnivores ont révélé des effets indésirables dans tout le système digestif (Senapati *et al.*, 2009 ; Samsel et Seneff, 2013). Les activités protéasique, lipasique et amylasique ont diminué dans l'œsophage, l'estomac et l'intestin de ces poissons. Les auteurs ont également observé une « perturbation des plis muqueux et un désordre de la structure des microvillosités » dans la paroi intestinale, ainsi qu'une sécrétion exagérée de mucine dans tout le tube digestif. Ces caractéristiques rappellent fortement la maladie cœliaque. Ainsi, les données recueillies sur les poissons suggèrent que le glyphosate pourrait interférer avec la dégradation de protéines complexes dans l'estomac humain, laissant de plus gros fragments de blé dans l'intestin, qui déclencheront alors une réponse auto-immune, conduisant aux défauts de la paroi de l'intestin grêle, similaires à ceux des patients cœliaques.

Dans le lien entre pesticides et inflammation, il semblerait que ceux-ci peuvent perturber le microbiote intestinal, favorisant potentiellement des problèmes digestifs qui peuvent être confondus avec une sensibilité au gluten.

Quant à la contamination des céréales, il se pourrait que les résidus de pesticides dans le blé et autres céréales aggravent les symptômes chez des personnes déjà sensibles.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CHANCE OU MALCHANCE POUR LES HYPERSENSIBLES AU GLUTEN ?

Les stress thermiques, que ce soient des températures très élevées ou au contraire très basses, entraînent généralement une réduction de la taille des grains, de leur teneur en amidon et de leur poids. Par conséquent, on observe en relatif une plus grande proportion de protéines totales, mais surtout un accroissement des ω -gliadines et des très gros polymères de SG-HPM. Ces réponses peuvent varier selon la période et la durée du stress thermique.

Ce sont essentiellement les gliadines qui s'accroissent et dans une moindre mesure les gluténines, rendant ainsi le ratio gluténines/gliadines plus faible.

Outre la température, le manque d'eau sur la culture de céréales va influencer sur les caractéristiques des gluténines. Ainsi, les températures élevées et la sécheresse, de plus en plus fréquentes partout dans le monde, augmentent très significativement la taille des polymères de gluténines de hauts poids moléculaires et peuvent être une malchance pour les hypersensibles.

UNE SÉLECTION DES VARIÉTÉS MODERNES TRÈS AXÉE SUR LE GLUTEN

Pour être inscrite sur la liste A²¹ du Catalogue national des semences et des plants et pouvoir ainsi être commercialisée, une variété de blé doit satisfaire plusieurs tests permettant d'évaluer sa valeur agronomique, technologique et environnementale.

Parmi les critères technologiques susceptibles de nous intéresser ici, on trouve, pour le blé tendre, la teneur en protéines du grain, la force boulangère (W) et le rapport ténacité/extensibilité (P/L) (évalués par l'alvéographe Chopin), la note de panification française, la quantité de gluten humide et la valeur de l'indice de gluten, et le temps de chute de Hagberg. À ces critères sont parfois rajoutées des analyses plus spécifiques tel le test européen

21. Variétés dont les semences peuvent être multipliées et commercialisées en France et dans l'Union européenne.

de machinabilité pour les variétés ayant une valeur moyenne de force boulangère. C'est dire si le gluten est étudié de près.

D'après la valeur des critères, les variétés vont être réparties en classes technologiques :

- A', blé ayant des caractéristiques technologiques originales dont l'intérêt est attesté par des utilisateurs reconnus et représentatifs ;
- A, blé de force ou améliorant ;
- BPS, blé panifiable supérieur ;
- BP, blé panifiable ;
- BAU, blé autres usages (que la panification française).

Le marché des blés biscuitiers peut aussi être visé par les sélectionneurs. Contrairement aux farines destinées à faire du pain, les farines biscuitières se caractérisent par leur faible teneur en gluten et leur faible absorption d'eau, deux critères recherchés en biscuiterie. Le test biscuitier permet de mesurer l'aptitude d'un blé à répondre aux exigences de la biscuiterie, à savoir produire des biscuits aux textures croustillantes, légères et aux dimensions maîtrisées.

Les blés durs, quant à eux, sont classés en trois classes technologiques distinctes :

- BDE, blé dur élite de haute qualité ;
- BDQ, blé dur de bonne qualité ;
- BDS, blé dur de qualité standard.

Pour déterminer la classe à laquelle appartient le blé dur, les résultats de l'évaluation de sa qualité technologique (mesure de la teneur en protéines et de la couleur des semoules, résultat du test de sédimentation SDS) sont comparés à ceux de témoins cultivés dans des conditions similaires (mêmes années, mêmes sites).

Si depuis de nombreuses années l'amélioration du rendement reste la cible principale des sélectionneurs de blé, ceux-ci ont donc aussi largement travaillé sur les protéines du gluten afin d'améliorer la qualité technologique requise par la meunerie et la boulangerie industrielles (teneur en protéines plus élevée et W élevé), sans se soucier de l'impact sur la santé de ces nouvelles variétés.

En effet, l'industrialisation des procédés de panification, et actuellement l'important développement d'enseignes boulangères qui

parfois se contentent de cuire le pain surgelé qui leur est livré, nécessitent des teneurs en protéines de plus en plus élevées et des glutens de plus en plus tenaces.

Bien que les chiffres fluctuent d'une année sur l'autre, on voit que les sélectionneurs maintiennent leur effort pour proposer annuellement à l'inscription des variétés nouvelles (tableau 3).

Tableau 3. Nombre de variétés de céréales à paille inscrites par an en liste A au Catalogue national.

Céréales	2020	2021	2022	2023	2024
Avoine	8	4	3	2	1
Blé dur	6	1	2	4	3
Blé tendre	20	33	30	43	44
Orge	29	17	24	12	21
Triticale	2	3	4	7	8
Riz	1	1	1	1	1

QU'EN EST-IL DES VARIÉTÉS DITES « ANCIENNES » ?

Les paysans-meuniers et les paysans-boulangers prônent les variétés « anciennes » (développées avant les années 1950) ou locales et les mélanges de populations. Pour autant, ces variétés anciennes sont-elles plus « digestes » que les variétés « modernes » ?

Des études scientifiques (dont Ravel *et al.*, 2023 ; Samson *et al.*, 2023) ont essayé de relier la date d'inscription d'une variété dans le Catalogue national à sa nocivité, dans le cas de la maladie cœliaque, ou à sa digestibilité, dans le cas de l'hypersensibilité. Elles montrent toutes que la sélection variétale ne s'est accompagnée ni d'une augmentation significative de la quantité totale de protéines du grain ni d'une augmentation de la quantité de gluten. En fait, l'augmentation des rendements en grains a été contrebalancée par une diminution de la teneur en protéines (De Santis *et al.*, 2017 ; Pronin *et al.*, 2020).

Par contre, la proportion relative des différentes familles de protéines dans le grain a changé. L'effort des sélectionneurs aurait abouti à une diminution de la proportion de gliadines, au profit d'une augmentation de la teneur en gluténines chez les variétés modernes. Ainsi, la proportion d' ω -gliadines, en

particulier l' ω -5 responsable de l'anaphylaxie alimentaire induite par l'effort, aurait diminué.

Enfin, d'autres pistes suggèrent que la taille des polymères de gluténines, plus importante dans les variétés modernes, serait une des causes de la mauvaise digestibilité du gluten (Branlard *et al.*, 2019a et b). Il semblerait toutefois que, plus encore que les facteurs génétiques, ce serait surtout la composante environnementale (élévation des températures, déficit en eau) qui serait à l'origine de l'augmentation de la taille de ces polymères.

Concernant la date d'inscription (« l'âge » des variétés) et la prévalence des épitopes impliqués dans la maladie cœliaque, aucune étude ne permet d'indiquer que la sélection des blés aurait favorisé ces épitopes. Si l'on considère la digestibilité des protéines du pain, celle-ci n'apparaît pas reliée à la date d'inscription de la variété (Ravel *et al.*, 2023).

Une étude (Samson *et al.*, 2023 ; Desclaux *et al.*, 2024), comparant du pain fabriqué à partir de variétés modernes et du pain fabriqué à partir de variétés anciennes dans les mêmes conditions, ne met pas en évidence de différence de solubilité des protéines (figure 17). Par contre, les pratiques de transformation jouent, comme on l'a vu, un rôle prépondérant.

Précisons que ces variétés dites anciennes sont absolument tout aussi contre-indiquées pour les malades cœliaques.

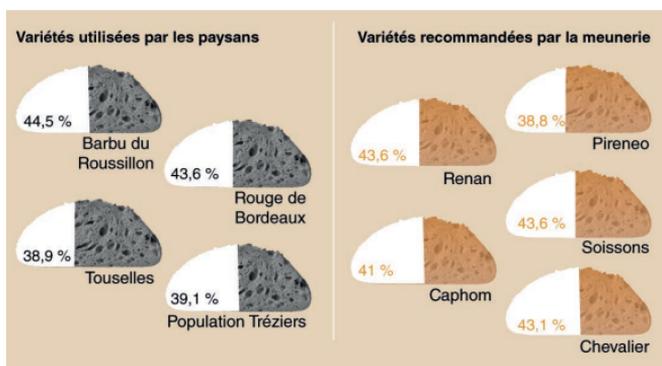


Figure 17. Proportion de protéines aisément extraites à partir du pain en fonction de la variété. On notera toutefois qu'il est impossible de conclure à l'existence d'une différence entre les variétés recommandées par la meunerie et celles utilisées par les paysans. © Studio Double.

PEUT-ON PRODUIRE DES BLÉS À TENEUR RÉDUITE, VOIRE SANS GLUTEN ?

Rappelons tout d'abord qu'un régime sans gluten est la façon la plus efficace et la plus saine de s'alimenter dans le cas de la maladie cœliaque et des autres pathologies liées au gluten ou au blé. Les scientifiques explorent toutefois des voies pour réduire ou éliminer l'allergénicité, la toxicité des protéines du gluten (et du blé), tout en conservant les propriétés technologiques. Diverses pistes sont examinées.

La sélection variétale conventionnelle est-elle prometteuse ?

Les conservatoires ou « banques de gènes » du monde entier contiennent des espèces cultivées et sauvages de céréales de type diploïdes, tétraploïdes et hexaploïdes. Ces collections sont une source inestimable pour analyser les relations entre les gènes et les protéines du gluten, l'apparition de variants d'épitopes et l'immunogénicité dans la maladie cœliaque qui en résulte.

Selon les espèces, la variation génétique au sein d'une espèce et donc entre les variétés peut être limitée en ce qui concerne le potentiel immunostimulant des gliadines. C'est le cas par exemple du blé tendre et du blé dur. Même s'il existe des différences entre les variétés, aucune variété n'a été identifiée comme étant sans danger pour les patients atteints de la maladie cœliaque. Le grand épeautre (*Triticum aestivum* subsp. *spelta*) n'est pas non plus sans danger pour les malades cœliaques bien que certaines variétés d'épeautre possèdent plus d' α -gliadines du génome B, qui contiennent moins d'épitopes que le blé tendre.

Le blé farro (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccum*) semblerait mieux toléré. En effet, certaines variétés de farro provoqueraient une prolifération bien moindre des lignées de lymphocytes T chez certains patients atteints de la maladie cœliaque.

Le petit épeautre, qui est diploïde (*Triticum monococcum*, génome A), permet de fabriquer des produits présentant de bonnes caractéristiques nutritionnelles et une bonne qualité boulangère, et qui se sont avérés tolérés par des patients sensibles. Il n'en demeure pas moins proscrit dans le régime sans gluten.

POURQUOI EST-IL DIFFICILE DE CRÉER DES VARIÉTÉS DE BLÉ TENDRE *LOW GLUTEN* ?

Comme vu précédemment, le blé tendre est hexaploïde et contient 3 génomes : A, B et D, qui sont chacun dupliqués. Ces génomes contiennent un nombre très important (plusieurs dizaines voire centaines) de gènes codant pour les gluténines et les gliadines et dispersés sur un grand nombre de *loci*, c'est-à-dire d'endroits différents. Cela complique fortement la sélection de variétés à très faible teneur en gluten.

La présence du génome D dans le blé hexaploïde *Triticum aestivum* fournit des protéines de gluten supplémentaires, qui améliorent considérablement ses propriétés boulangères par rapport au blé tétraploïde (type blé dur), en particulier les sous-unités de gluténine de haut poids moléculaire. Cependant, c'est ce même génome D qui code également des gliadines, qui ont été signalées comme hautement immunogènes.

Des croisements sont ainsi réalisés à partir de ces diverses espèces. Les espèces et les variétés de céréales ne possèdent pas toutes la même quantité d'épitopes impliqués dans la maladie cœliaque. Il est possible d'utiliser, dans des programmes de sélection variétale, celles qui en expriment peu pour développer des variétés présentant une faible toxicité. Ainsi, plusieurs équipes de recherche ont obtenu des lignées de blé tendre ayant moins d' α -gliadines et de surcroît pas d'épitope 33-mer.

Les sélectionneurs peuvent aussi chercher à diminuer la teneur en albumines et globulines dans les protéines totales. En effet, 20 % des albumines et globulines correspondent à des ATIs, particulièrement résistants aux enzymes de la digestion, et qui, en inhibant la trypsine, conduisent à une augmentation de peptides non digérés.

Cependant, la sélection conventionnelle à elle seule ne peut pas générer une variété de blé à faible teneur en gluten, ne contenant que des gliadines avec des épitopes non immunogènes et donc sans danger pour les malades cœliaques. Étant donné la complexité structurelle des gènes codant pour les gliadines, le nombre élevé de copies de ces gènes qui se répartissent en

blocs rend extrêmement difficile l'application de techniques de sélection conventionnelles pour obtenir de telles variétés de blé (voir encadré).

Le défi est de modifier les gènes codant pour des protéines du gluten de type gliadines, qui portent les épitopes majeurs impliqués dans la maladie cœliaque, tout en laissant les gènes des protéines du gluten de type gluténines, responsables de la qualité technologique des blés, largement intacts.

Que peut apporter un blé synthétique ?

Les variétés de blé tendre se différencient beaucoup plus par leurs génomes A et B que par leur génome D. Afin d'accroître la diversité génétique du blé tendre, des programmes cherchent donc à travailler sur ce génome D.

Le processus consiste à croiser un blé tétraploïde de type AABB (blé dur, par exemple) avec *Aegilops tauschii* (ancêtre du génome D), puis à sauver l'embryon triploïde (ABD) et à doubler les chromosomes, en utilisant la colchicine pour générer des individus hexaploïdes (AABBDD). Une sélection minutieuse de divers donneurs d'*Aegilops tauschii*, par exemple pauvres en gliadines toxiques, pourrait générer de nouveaux blés synthétiques au gluten faiblement immunogène. Ces blés synthétiques peuvent ensuite être utilisés dans des programmes de présélection pour être croisés avec des variétés élités, pour combiner intérêt agronomique et intérêt santé.

La mutagenèse : quelle efficacité ?

Il s'agit d'une technique qui provoque des mutations aléatoires, non ciblées, dans le génome des plantes, avec l'espoir que ces mutations modifient les zones du génome impliquées dans la production de protéines du gluten.

La mutation chimique : peu de résultats ?

Afin d'induire des mutations au niveau de l'ADN, on utilise un produit chimique : l'éthyle méthane sulfonate (EMS). L'EMS transforme les nucléotides G/C en A/T. Employé pour induire des mutations au niveau des gènes codant pour les α -gliadines et γ -gliadines, il peut induire des mutations faux-sens et modifier les

épitopes responsables de la maladie cœliaque. Ces épitopes ainsi modifiés ne seraient plus reconnus par les cellules présentatrices d'antigènes. Des mutations non-sens peuvent aussi intervenir, tronquant la protéine et modifiant alors certains épitopes ou empêchant la traduction de l'ADN en protéines.

Les mutations EMS sont détectées à l'aide d'une approche appelée *Targeting Local Lesions IN Genomes (TILLING)*. La détection des mutations induites est désormais couramment effectuée par séquençage de l'ADN soit du génome complet, soit d'un sous-ensemble du génome, soit produit avec des enzymes de restriction, soit à l'aide d'approches telles que la capture d'exome. En pratique, peu de gènes de gliadines mutés ont été obtenus.

L'irradiation gamma

L'irradiation gamma provoque la plupart du temps des cassures de brins d'ADN simples ou doubles. Les cassures de brins doubles sont réparées par un mécanisme propre à la cellule, et qui est relativement sujet aux erreurs.

La plupart des erreurs conduisent à de petites délétions, bien que des substitutions de paires de bases, des inversions et de petites insertions puissent également être observées. L'irradiation gamma a donc le potentiel de muter des épitopes, ou même de supprimer plusieurs gènes de gliadine.

Dans l'orge, des accessions irradiées aux rayons gamma dépourvues d'hordéines B ont été croisées avec des accessions dépourvues d'hordéines C et une lignée d'origine éthiopienne dépourvue d'hordéines D pour produire une variété à très faible teneur en gluten, avec une réduction de la teneur en hordéines en dessous de 5 mg/kg, ce qui lui permet d'être classée comme « sans gluten ». Des croisements et sélections ultérieurs avec des variétés commerciales ont donné lieu à une variété avec de bonnes caractéristiques de maltage et de brassage (désormais commercialisée sous le nom de Kebari). Il est intéressant de noter que, dans plusieurs pays, les produits fabriqués avec cette variété ne peuvent pas être commercialisés légalement comme étant sans gluten, uniquement parce qu'il s'agit d'une orge.

Pour le blé, une stratégie similaire est basée sur le criblage de populations de blé haploïde irradiées aux rayons gamma, telles que celles créées au Royaume-Uni à partir du cultivar commercial ‘Paragon’.

Les lignées de délétion

Il existe des variétés de blé dans lesquelles des chromosomes entiers ou des parties de chromosomes ont été supprimés (par croisement de lignées monosomiques avec des lignées tétrasomiques, ou par introgression de lignées étrangères ajoutées ou transloquées dans la variété ‘Chinese Spring’ pour induire des délétions).

Un ensemble de ces lignées de délétion de la variété de blé hexaploïde ‘Chinese Spring’ a été utilisé pour tester les effets des délétions individuelles sur la réduction des épitopes responsables de la maladie cœliaque et sur les propriétés technologiques des lignées obtenues. La suppression du locus 6D codant pour l’ α -gliadine chez une de ces lignées de délétion a permis de réduire la réponse immunitaire contre les épitopes Gli α -1 et Gli α -3. Cette perte d’ α -gliadines a eu des conséquences sur le plan technologique en modifiant les propriétés de la pâte qui devient moins extensible et plus rigide. Par contre, les propriétés technologiques ont été conservées pour d’autres pâtes fabriquées à partir de lignées de délétion ciblant les ω -gliadines, γ -gliadines et SG-FPM sur le chromosome 1DS, tandis que certains épitopes ont été supprimés.

Les approches transgéniques : espoir déçu ?

Jusqu’à récemment, le blé était considéré comme une culture difficile à transformer génétiquement ; le bombardement de particules était couramment utilisé, malgré ses nombreux inconvénients en termes de qualité des plantes générées, qui comprenaient de multiples insertions avec des réarrangements complexes. De plus, seule une gamme limitée de variétés pouvait être utilisée. Le développement de souches super virulentes d’*Agrobacterium tumefaciens*, ainsi que des changements dans les composants du milieu et l’introduction de nouvelles techniques ont amélioré l’efficacité des procédures. La percée majeure a été

faite en 2014 en utilisant le blé tendre blanc américain ‘Fielder’. Cette nouvelle technologie mise en œuvre au NIAB (National Institute of Agricultural Botany, Cambridge, Royaume-Uni) a été utilisée pour étendre la gamme de variétés de printemps et d’hiver du Royaume-Uni pouvant être transformées et pour soutenir une plateforme de transformation du blé à haut débit.

L’interférence ARN

L’interférence par ARN (ARNi) permet d’inactiver spécifiquement la traduction d’un ARN messenger au niveau du ribosome, empêchant ainsi l’expression et la synthèse d’une protéine donnée.

Cette technique a été utilisée pour limiter l’expression des gliadines. Cela a fortement impacté la quantité des γ - et α -gliadines et, dans une moindre mesure, celle des ω -gliadines du grain. Des taux de réduction de l’ordre de 97 % pour les gliadines ont été obtenus selon les lignées produites et leur aptitude à la panification a été conservée (Gil-Humanes *et al.*, 2014).

Les tests sur les cellules T ont démontré une réduction de 10 à 100 fois des épitopes des α -gliadines, γ -gliadines et ω -gliadines reconnus par des molécules DQ2 et DQ8. La régulation négative des γ -gliadines a entraîné une augmentation d’autres protéines du gluten dans les céréales, mais peu ou pas d’effet n’a été constaté sur la force de la pâte ou les propriétés du gluten et de l’amidon.

L’ARNi a également été utilisé pour supprimer les homologues *DEMETER* (*DME*) dans le blé. Le gène *DME* code une ADN glycosidase 5-méthylcytosine qui déméthyle les régions promotrices des gliadines et des SG-FPM dans l’albumen du blé. Cette déméthylation est essentielle à l’activation des gènes pendant le développement de l’albumen. Les plantes transgéniques *DME* ARNi ont montré un degré élevé de suppression de la transcription *DME*, ce qui a entraîné une réduction de plus de 75 % de la quantité de prolamines immunogènes.

Il convient toutefois de noter que ces stratégies nécessitent une intégration stable de l’ARNi dans le génome, ce qui donne lieu à une plante génétiquement modifiée (GM). Elle est donc soumise aux réglementations nationales et internationales pertinentes en matière d’OGM.

Les nouvelles techniques génomiques sont-elles prometteuses ? Aujourd'hui, les nouvelles techniques d'édition du génome explorent aussi la possibilité de créer un blé à faible teneur en gluten et possiblement sans danger pour les cœliaques. On parle d'édition du génome lorsque l'on cherche à corriger, remplacer, insérer, retirer une ou plusieurs lettres qui composent l'ADN d'un génome, avec une grande précision. Cette édition peut se faire à l'aide de « ciseaux moléculaires ».

Les approches d'édition du génome visent à induire des mutations uniquement dans des zones choisies du génome. Ces méthodes comprennent les méganucléases, les nucléases à doigts de zinc, les TALEN et CRISPR-Cas9. Le statut réglementaire des plantes et des produits végétaux dérivés de l'édition génomique est actuellement en discussion dans l'Union européenne.

L'inactivation ou la suppression de certains gènes pourrait éliminer les fragments de protéines (épitopes) qui déclenchent la maladie cœliaque chez les individus génétiquement prédisposés. La technique CRISPR-Cas9 qui permet « d'éteindre » un gène ou de le modifier a été testée pour réduire l'expression des gliadines. Ainsi, des lignées de blé génétiquement modifiées — et cultivées en serre — ont vu leur teneur en α -gliadines réduite de 32 à 82 %, tandis que l'immunoréactivité a été réduite de 85 %. Un autre blé génétiquement modifié par cette technique a été obtenu ciblant les γ - et les ω -gliadines et a atteint une réduction de 70 et 90 % de ces gliadines, respectivement. Enfin, des croisements entre des lignées génétiquement modifiées ont été réalisés pour combiner toutes les mutations de gliadines dans un seul génotype de blé tendre.

Il ne faut pas oublier que les variétés produites par ces nouvelles techniques génomiques (dites NGT²²) sont considérées comme des OGM et que la teneur en gluten reste au-delà du seuil autorisé par la réglementation (> 20 mg/kg). La qualité technologique des farines semble satisfaisante.

22. NGT2 : plantes qui ne remplissent pas les critères permettant de considérer qu'elles pourraient être obtenues naturellement ou par sélection conventionnelle.

Pourquoi la sélection d'une orge *low gluten* semble plus facile ?
 L'orge a un génome moins complexe que le blé tendre : elle est diploïde et possède uniquement 4 familles d'hordéines : B-, C-, D- et γ -hordéines. Les gènes codant pour ces hordéines se trouvent tous sur le bras court du chromosome 1H et respectivement au niveau des *loci* Hor 2, 1, 3 et 5. Ils sont donc relativement liés et proches (12,6 cM séparent les deux premiers et seulement 0,2 cM séparent Hor2 de Hor5), et codent pour un nombre réduit de protéines (une seule protéine de 105 kDa pour le Hor3 par exemple, et trois petites protéines pour le Hor5). Le chromosome 5H posséderait un gène de déméthylase requis pour l'expression des C-hordéines dans l'albumen.

Des variétés repérées comme possédant des mutations à ces divers *loci* servent de géniteurs dans des schémas de croisements classiques. Elles ont permis, en étant croisées entre elles, d'obtenir de nouvelles variétés d'orge « *ultra-low gluten* » avec des niveaux d'hordéines très en deçà (< 5 mg/kg) de la limite imposée par le Codex, qui est de 20 mg/kg pour des produits sans gluten. En outre, il semble que la forme du grain et sa taille sont similaires aux meilleures variétés d'orge utilisées en malterie. Bien que l'orge ne soit plus une composante majeure de notre diète occidentale, les produits issus de l'orge, incluant le malt et la bière, sont communément utilisés et considérés parfois comme « ingrédients cachés », avec les conséquences que cela peut avoir pour les personnes cœliaques ou intolérantes au gluten.

Gluten et acrylamide

L'acrylamide se forme au moment de la cuisson à haute température de certains aliments riches en asparagine (un des 22 acides aminés déjà rencontrés au premier chapitre) et en amidon, telles les céréales. Cette molécule est reconnue comme cancérogène. Des travaux ont montré un lien entre la quantité de gluten d'une pâte et la quantité d'acrylamide pouvant se former. Une équipe de la station expérimentale de Rothamsted (Royaume-Uni) a mis au point un blé présentant une réduction conséquente de sa teneur en asparagine, *via* la technique CRISPR-Cas9.



QUE RETENIR ?

- Les engrais et les pesticides, en particulier les herbicides, sont considérés comme ayant un rôle dans l'augmentation de la prévalence des sensibilités au blé.
- Les engrais azotés augmentent la quantité de protéines du gluten dans le blé.
- Les stress thermiques et hydriques subis par la culture du blé génèrent une quantité de protéines plus importante, une augmentation des gliadines ainsi que des gluténines de haut poids moléculaire.
- Il est préférable de consommer des céréales n'ayant subi aucun traitement chimique en culture et après récolte.
- Une stratégie alternative pour la production d'aliments à base de blé sans gluten consiste à développer des variétés de blé avec moins ou pas de fragments de protéines (épitopes) déclencheurs de la maladie coéliquaue.
- Actuellement, il n'existe pas de variétés de blé adaptées aux malades coéliquaues.
- Une variété d'orge contenant moins de 20 mg/kg de gluten a été obtenue par des techniques d'irradiation aux rayons γ .
- L'utilisation de l'ARNi dans le blé a permis de diminuer la quantité de gliadines exprimées dans le grain, sans altérer considérablement les propriétés de la pâte. Néanmoins, la plante est considérée comme génétiquement modifiée.



QUEL AVENIR POUR LE GLUTEN ?

Vaste sujet que le gluten, qui ouvre le champ des possibles ! Nous prenons le parti de ne pas conclure ce livre (ce qui pourrait signifier que le tour du sujet a été fait, or c'est loin d'être le cas !), mais optons plutôt pour des perspectives.

Le gluten, nous en consommons depuis des siècles et pourtant il occupe toujours la une des médias ! Il est, pour beaucoup, un précieux allié, tandis que pour d'autres il s'avère redoutable.

Il est un allié dans la mesure où les gliadines et les gluténines qui le constituent sont capables de créer un réseau efficace qui emprisonne les gaz, contribue à la coloration des produits finis, retient la quantité d'eau nécessaire à la conservation du produit et est suffisamment structurant pour convenir à de très nombreux usages. Le gluten semble donc toujours promis à un bel avenir...

Cependant, la fonction première des protéines complexes qui le constituent n'est pas de nous nourrir... mais bien de fournir les acides aminés, briques de base nécessaires à la plante pour qu'elle germe et se développe. Si on estime que la domestication du feu par l'homme date de 400 000 ans et celle des blés cultivés de 8 500 ans, la consommation de blé correspondrait à 8 jours si on ramène la domestication du feu à 1 an. Ce laps de temps relativement court expliquerait-il le fait que certaines populations ne se sont pas encore complètement adaptées à la consommation de ces protéines de céréales et que certains en voient leur vie très affectée ?

Dans les dix dernières années, un effort remarquable a été fait par les médecins sur la reconnaissance de symptômes d'hypersensibilité ou d'allergie, et par les associations de malades cœliaques telle l'Afdiag pour sensibiliser et contraindre la réglementation à évoluer, ainsi que par les chercheurs au niveau national et international. Mais à chaque avancée de la science, de nouvelles questions apparaissent. Il semble donc indispensable de poursuivre les recherches, car des questions à de multiples niveaux restent en suspens.

Il semble surtout nécessaire de les poursuivre conjointement dans de nombreuses directions, en associant les équipes des domaines végétal, animal et du monde de la santé qui s'ignorent encore beaucoup trop. Il s'agirait de croiser génétique des céréales (p. ex., recherche de variétés de blé plus digestes) et génétiques animale et humaine (p. ex., meilleure connaissance des allèles causaux des pathologies) ; agronomie (p. ex., impact des pratiques culturales sur la qualité des protéines) et nutrition (p. ex., qualité organoleptique et nutritionnelle des produits sans gluten) ; biochimie (p. ex., assemblage des polymères de gluténines dans le grain, interactions entre protéines du gluten et les autres composés du grain, rôle des ATIs) et microbiologie végétale et microbiologie humaine (p. ex., étude concertée des microbiomes des plantes, des animaux et des humains) ; sociologie (p. ex., tendance de régimes) et médecine (p. ex., amélioration du dépistage).

Il semble également important de croiser monde industriel et monde paysan, de manière à partager sur les pratiques de chacun et à les faire évoluer de manière vertueuse (notamment en évitant de rajouter du gluten dans les produits industriels, ou en limitant l'ultratransformation des produits sans gluten). Un vrai dialogue est nécessaire pour lever les défis actuels.

L'enjeu aussi pour le futur va être de sortir le gluten d'ornières dans lesquelles il se retrouve trop souvent par effet de *buzz* médiatiques.

Il y a des risques importants pour un individu de cesser de consommer des céréales sans un avis médical autorisé. Des risques tout aussi importants existent pour un individu de ne pas être diagnostiqué correctement et de poursuivre la consommation de céréales. Le problème est sérieux. Les pouvoirs publics semblent en prendre désormais la mesure.

Il est important de rappeler que, pour la majorité des gens, les céréales ne sont pas nocives et contribuent à une alimentation équilibrée. Elles se distinguent par leur polyvalence et leur densité énergétique et surtout par leur facilité de culture et de stockage. La spécificité de leurs apports nutritionnels réside dans leur richesse en glucides complexes, en fibres, en vitamines du

groupe B, en magnésium, fer et zinc. Les protéines des céréales sont carencées en certains acides aminés comme la lysine et riches en acides aminés soufrés (cystéine, méthionine), et de fait, sont à consommer avec des légumineuses qui sont très complémentaires.

La diversification de l'assiette est au cœur des enjeux alimentaires de demain. On méconnaît aujourd'hui les espèces de céréales ou de pseudo-céréales tels le millet, le sorgho, le teff, l'éleusine, le fonio, le sarrasin, l'amarante ou le quinoa, qui ne contiennent pas de protéines de gluten et semblent donc adaptées aux personnes atteintes de la maladie cœliaque ou souffrant d'une intolérance au gluten.

Les préoccupations environnementales ont mis l'accent sur l'importance d'un régime alimentaire plus sain, faisant la part belle aux protéines végétales. Parmi celles-ci, on retrouve celles du blé. À ce jour, les industries de la meunerie et de la boulangerie sont toujours les premières utilisatrices dans le monde de protéines de blé sous forme de gluten ajouté (plus de 47 % des utilisations), avec un marché qui progresse de 2 % par an. Le deuxième marché le plus important pour les protéines de blé est celui de l'alimentation aquacole (presque 27 %), avec une croissance d'environ 10 % par an. Vient ensuite la demande de protéines de blé pour l'alimentation des animaux de compagnie (environ 16 %). Bien que relativement faible, la demande de protéines de blé pour le marché des substituts de viande augmente de 10 % par an.

L'augmentation de la demande en protéines de blé devrait être stimulée par l'adoption croissante de régimes alimentaires à base de plantes (végétaliens ou flexitariens) et par l'accroissement de la population âgée (incorporation de protéines dans des aliments diététiques). Mais bien malin qui peut prédire avec assurance l'évolution de la demande en gluten dans les prochaines années sur ces divers secteurs !

Enfin, il faut rappeler que les problèmes de santé que connaissent les hypersensibles, les personnes allergiques ou les cœliaques pourraient ne pas être dus uniquement à la présence de gluten. Les FODMAPs ainsi que les ATIs ont été évoqués mais d'autres pistes seraient intéressantes à creuser. À l'instar de cet ouvrage, la plupart des chercheurs focalisent leurs travaux sur les impacts des étapes de production des céréales ou de transformation.

Nous ne savons presque rien des impacts éventuels du stockage ou du transport, par exemple. Or, là aussi entre pratiques industrielles et pratiques artisanales, les différences sont importantes !

Depuis « l'humeur onctueuse à consistance spermatique » jusqu'aux dernières techniques d'édition du génome, nous avons tenté de présenter un panorama à presque 360 degrés et de plus de 500 années, depuis les premières mentions du terme « gluten » dans la sphère médicale jusqu'aux confins des connaissances les plus actuelles à son sujet. Mais les recherches sur la thématique demeurent foisonnantes et des avancées majeures sont en cours. Ces avancées sont porteuses d'un très grand espoir pour les personnes atteintes de la maladie coéliquae, allergiques ou hypersensibles. Nous ne pouvons que vous inciter à vous tenir régulièrement au courant sur le sujet !

Réponses au quizz

- 1. Faux** (cf. chapitre « Le gluten est-il présent dans les grains de céréales ? »)
- 2. Vrai** (cf. chapitres « À quoi sert le gluten dans l'alimentation ? » et « Comment produire du gluten industriellement et pour quels usages ? »)
- 3. Faux** (cf. « Quel avenir pour le gluten ? »)
- 4. Vrai** (cf. chapitre « Comment produire du gluten industriellement et pour quels usages ? »)
- 5. Vrai** (cf. chapitre « Comment produire du gluten industriellement et pour quels usages ? »)
- 6. Vrai** (cf. chapitre « D'où vient le mot "gluten" ? »)
- 7. Vrai/faux** (cf. chapitre « Quel intérêt de consommer des produits sans gluten ? »)
- 8. Vrai** (cf. « Le gluten se fabrique à partir des protéines de réserve » et « La connaissance des protéines des blés en quelques grandes étapes »)
- 9. Vrai** (cf. « Les premières mentions du terme "gluten de blé" » et « La connaissance des protéines des blés en quelques grandes étapes »)
- 10. Faux** (cf. « Qu'en est-il des variétés dites "anciennes" ? »)



Bibliographie

Abecassis J., Samson M.-F., 2015. Pasta and gluten: facts and fakes. Word Pasta Day, Scientific Consensus Conference, oct. 2015, Milan, Italie, <https://hal.science/hal-01837495> (consulté le 14/07/2025).

Bellepierre de Neuve-Église L.J., Rousselot de Surgy J.P., Mélin A.J., 1761. *L'agronomie et l'industrie, ou Corps général d'observations, faites par les sociétés d'agriculture, du commerce & des arts, établies chez les diverses nations*. Tome 2 / *Avec des questions sur les éclaircissements nécessaires, pour l'intelligence des différents principes de ces arts*. Tome premier, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9643833f>.

Belton P.S., 1999. Mini review: on the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 29 (2), 103-107, <https://doi.org/10.1006/jcsr.1998.0227>.

Belton P.S., 2005. New approaches to study the molecular basis of the mechanical properties of gluten. *Journal of Cereal Science*, 41 (2), 203-211, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.06.003>.

Bradauskiene V., Vaiciulyte-Funk L., Martinaitiene D., Andruskiene J., Verma A.K. *et al.*, 2023. Wheat consumption and prevalence of celiac disease: Correlation from a multilevel analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63 (1), 18-32, <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1939650>.

Branlard G., Faye A., Méléard B., Le Gouis J., Oury F.-X., Ravel C., 2019a. Quelle hypothèse approfondir pour appréhender la sensibilité non céliaque au gluten ? 1. L'abondance du gluten et la diversité des prolamines. *Industrie des céréales*, 211, 34-37.

Branlard G., Rhazi L., Méléard B., Le Gouis J., Ravel C., 2019b. Quelle hypothèse approfondir pour appréhender la sensibilité non céliaque au gluten. 2. Les polymères des gluténines. *Industrie des céréales*, 212, 26-29.

Brunfels O., 1536. *Herbarum vivae Eicones ad naturae imitationem summa cum diligentia et artificio effigiatae, una cum effectibus earumdem par Othonem Brunfelsium recens editae, etc.* — *Novi Herbarii tomus II — Tomus Herbarii Othonis Brunfelsii [posthumus] corollariis opera*, Strasbourg, Johann Schott éditeur, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10929842/f394.image.r=gluten>.

Catassi C., Catassi G., Naspi L., 2023. Nonceliac gluten sensitivity. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 26 (5), 490-494, <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000925>.

Danyzy A.-H., 1766. *Histoire de la Société royale des sciences*, Lyon, Chez Benoît Duplain, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1092977x/f443.image.r=gluten#>.

De Santis M.A., Giuliani M.M., Giuzio L., De Vita P., Lovegrove A., Shewry P.R., Flagella Z., 2017. Differences in gluten protein composition between old and modern durum wheat genotypes in relation to 20th century breeding in Italy. *European Journal of Agronomy*, 87, 19-29, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.04.003>.

Desclaux D., Canaguier E., Avit V., Boury-Esnault A., Menguy E., Moinet K., Younso A., Samson M.F., 2024. Peasant vs. Industrial durum wheat pasta: Impact of each processing step on protein solubility and digestibility. *Food Research International*, 178, 113937, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113937>.

Diderot D., d'Alembert, 1751. *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Table, t. 1*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k327830h/f856.item.r=gluten.zoom>.

Duhamel Du Monceau H-L., 1764. *De l'exploitation des bois, ou Moyens de tirer un parti avantageux des taillis, demi-futaies et hautes-futaies... Partie I : avec la Description des arts qui se pratiquent dans les forests...*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k54962675.r=gluten?rk=42918;4>.

Durand, non daté. *Aperçu sur les produits alimentaires au gluten panifié de Durand et Cie à Toulouse...*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9760301m/fl4.image.r=gluten?rk=42918;4>.

Furetière A., 1686. *Factum pour messire Antoine Furetière, abbé de Chalivoy. Contre quelques-uns de l'Académie Française*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k8728826b/fl41.image.r=gluten>.

Gil-Humanes J., Pistón F., Altamirano-Fortoul R., Real A., Comino I. *et al.*, 2014. Reduced-gliadin wheat bread: An alternative to the gluten-free diet for consumers suffering gluten-related pathologies. *PLoS ONE*, 9 (3), e90898, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090898>.

Hartley H., 1951. Origin of the Word 'Protein'. *Nature*, 168 (4267), 244, <https://doi.org/10.1038/168244a0>.

Jones A.L., 2017. The gluten-free diet: fad or necessity? *Diabetes Spectrum*, 30 (2), 118-123, <https://doi.org/10.2337/ds16-0022>.

Lafosse, 1775. *Dictionnaire raisonné d'hippiatrique, cavalerie, manège et maréchallerie*, tome 1, Paris, Boudet, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96095172/f75.image.r=gluten>.

Lewis W., 1775. *Connoissance pratique des médicamens les plus salutaires, simples & composés, officinaux & extemporanés ou magistraux, internes & externes, &c. ou Nouveau dispensaire. Tome 1 / ... Par M. Lewis. Ouvrage traduit de l'anglois*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9766917d/f174.image.r=gluten>.

Lieutaud J., 1770. *Précis de la matière médicale, contenant les connoissances les plus utiles, la nature, les vertus & les doses des médicamens, tant simples qu'officinaux, usités dans la pratique actuelle de la médecine, avec un grand nombre de formules éprouvées. Tome 2 / . Traduction de la seconde partie du Précis de la médecine pratique publiée en latin. Par M. Lieutaud, Nouvelle édition à laquelle on a ajouté un Traité des alimens et des boissons*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97662066>.

Martin E., 1836. *L'Art de l'amidonnier rendu salubre, nouveau procédé utilisant le gluten et la matière sucrée et propre à être joint aux exploitations rurales, brasseries, distilleries, meuneries, vermicelleries, etc.*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k98046462>.

Morel M.H., Dehlon P., Autran J.C., Leygue J.P., Bar-L'Helgouac'h C., 2000. Effects of temperature, sonication time, and power settings on size distribution and extractability of total wheat flour proteins as determined by size-exclusion high-performance liquid chromatography. *Cereal Chemistry*, 77 (5), 685-691. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.5.685>.

Osborne T.B., Voorhees C.L., 1894. Proteids of the wheat kernel. *Journal of the American Chemical Society*, 16 (8), 524-535.

Paveley W.F., 1988. From Aretaeus to Crosby: a history of coeliac disease. *British Medical Journal*, 297 (6664), 1646-1646, <https://doi.org/10.1136/bmj.297.6664.1646>.

Peyrat A., 1854. *Du gluten et de son emploi*, Paris, Rignoux, Imprimeur de la Faculté de médecine, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k61286810>.

Pott J.H., 1753. *Lithogéognosie, ou Examen chymique des pierres et des terres en général et du talc, de la topaze et de la stéatite en particulier, avec une Dissertation sur le feu & sur la lumière, ouvrages traduits de l'allemand*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9764628j/f452.item.r=gluten>.

Pronin D., Börner A., Weber H., Scherf K.A., 2020. Wheat (*Triticum aestivum* L.) breeding from 1891 to 2010 contributed to increasing yield and glutenin contents but decreasing protein and gliadin contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68, 13247-13256, <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02815>.

Ravel C., Lavoignat M., Bancel E., 2023. Améliorer le blé pour limiter les intolérances au gluten. *Médecine des maladies métaboliques*, 17 (7), 576-581, <https://doi.org/10.1016/j.mmm.2023.09.004>.

Roman L., Belorio M., Gomez M., 2019. Gluten-free breads: The gap between research and commercial reality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18 (3), 690-702, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12437>.

Roy U.R., 1862. *Historique du gluten. Découverte de ce produit alimentaire* (1^{re} partie), Imprimerie de Blanchard (Châtelleraut), <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bd6t5412435r?rk=42918;4>.

Samsel A., Seneff S., 2013. Glyphosate, pathways to modern diseases II: Celiac sprue and gluten intolerance. *Interdiscip Toxicol.*, 6 (4), 159-184, <https://doi.org/10.2478/intox-2013-0026>.

Samson M.F., Boury-Esnault A., Menguy E., Avit V., Canaguier E., [...] Chiffolleau Y., Akermann G., Moinet K., Desclaux D., 2023. Farmer vs. industrial practices: Impact of variety, cropping system and process on the quality of durum wheat grains and final products. *Foods*, 12 (5), 1093, <https://doi.org/10.3390/foods12051093>.

Senapati T., Mukerjee A.K., Ghosh A.R., 2009. Observations on the effect of glyphosate based herbicide on ultra structure (SEM) and enzymatic activity in different regions of alimentary canal and gill of *Channa punctatus* (Bloch). *Journal of Crop and Weed*, 5 (1), 236-245.

Shewry P.R., Tatham A.S., Forde J., Kreis M., Mifflin B.J., 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*, 4 (2), 97-106, [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(86\)80012-1](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(86)80012-1).

Taddei G., 1819. Ricerche sul glutine di frumento. In : *Giornale di fisica, chimica e storia naturale* (G. Brugnatelli, ed.), tome 2, 360-361, https://books.google.fr/books?id=JyQgAQAAMAAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=Taddei&cf=false.

von Haller A., 1752. *Éléments de physiologie, ou Traité de la structure et des usages des différentes parties du corps humain*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9609559d>.

Vriesekoop F., Wright E., Swinyard S., de Koning W., 2020. Gluten-free products in the UK retail environment. Availability, pricing, consumer opinions in a longitudinal study. *International Journal of Celiac Disease*, 8 (3), 95-103, <https://doi.org/10.12691/ijcd-8-3-5>.

Whytt R., 1759. *Essais physiologiques, contenant I. Des recherches sur les causes du mouvement des fluides dans les très petits vaisseaux des animaux. II. Des observations sur la sensibilité & sur l'irritabilité des parties du corps animal, à l'occasion du Mémoire de M. Haller sur ce sujet, Traduits de l'Anglois par M. Thébault...*, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9780871j/f304.image.r=gluten>.

Wieser H., Koehler P., Scherf K.A., 2023. Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chemistry*, 100 (1), 23-35, <https://doi.org/10.1002/cche.10572>.

Xhaferaj M., Scherf K.A., 2024. Gluten is not gluten. *Nutrients*, 16 (16), 2745, <https://doi.org/10.3390/nul16162745>.

Crédits iconographiques

Photo de couverture : © monticellllo (Adobe Stock 396077674).

Pages intérieures : les figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 14, 15 et 16 sont des autrices.

Fig. 1, épi de blé : © LaCozza (Adobe Stock 210545803).

Fig. 8 : logo Afdiag.

Fig. 10, 13 et 17 : © Studio Double.

Fig. 11 : schéma des autrices d'après Belton P.S., 1999 et 2005.

Fig. 12 : le robinet : © Graficriver (Adobe Stock 315704961)
et les mains / pâte à pain : © Juicy Studios LTD
(Adobe Stock 531413827)

Fig. 16, fond de farine : © Thodsaphol Tamklang
(Adobe Stock 112888761).

Responsable éditoriale : Véronique Véro

Coordination éditoriale : Anne-Lise Prodel

Édition : Mickaël Legrand

Assistante d'édition (réalisation des figures) : Farah Dekiouk

Mise en page :  EiLoCom

Réalisation de la couverture : Hélène Bonnet

Dépôt légal : septembre 2025



Omniprésent dans les médias et sur les emballages alimentaires, le gluten fait parler de lui.

Issu de l'hydratation et du malaxage de la farine de blé, d'orge ou de seigle, ses propriétés technologiques sont nombreuses. Pourtant, il suscite autant d'intérêt que de méfiance.

Cet ouvrage explore la place du gluten dans l'histoire et fait le point sur les connaissances actuelles. Il en présente la structure, les méthodes de production, les multiples usages. Les produits sans gluten, les pathologies associées aux protéines des blés et les solutions pour en réduire la toxicité sont aussi abordés.

Les céréales anciennes contiennent-elles du gluten? Est-il différent de celui des industriels? Se digère-t-il mieux? Autant de questions s'adressant aux consommateurs avertis et aux professionnels des filières céréalières qui offrent un tour d'horizon aussi complet que rigoureux sur le sujet.

Biologiste et biochimiste, **Marie-Françoise Samson** effectue des recherches à INRAE sur les protéines des céréales, entre sélection variétale et transformation alimentaire.

Dominique Desclaux, agronome, conduit des travaux en biologie et amélioration des céréales à INRAE. Elle mène des recherches participatives sur les variétés adaptées à l'agriculture biologique et sur les enjeux depuis les semences jusqu'à l'assiette.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

INRAE

16 €

ISBN : 978-2-7592-4143-9



9 782759 241439

ISSN : 2267-3032

Réf. : 03012