

# Sommaire du CHAPITRE 5

## Le blé, le seigle et le triticales

### Le blé (*Triticum* L.)

Description de la plante: .....	2
Origines et évolution: .....	4
Écologie et méthodes de culture du blé: .....	8
Utilisation et usages : .....	10
Amélioration génétique et augmentation de la productivité de la culture du blé: .....	11
Statistiques sur la production de blé (FAOSTAT 2001, révisée) .....	12

### Le seigle .....

Statistiques de production mondiale de seigle (FAOSTAT 2001, révisée) .....	15
---	----

### Le Triticale: .....

Statistiques de production mondiale de triticales (FAOSTAT 2001, révisée) .....	17
---	----

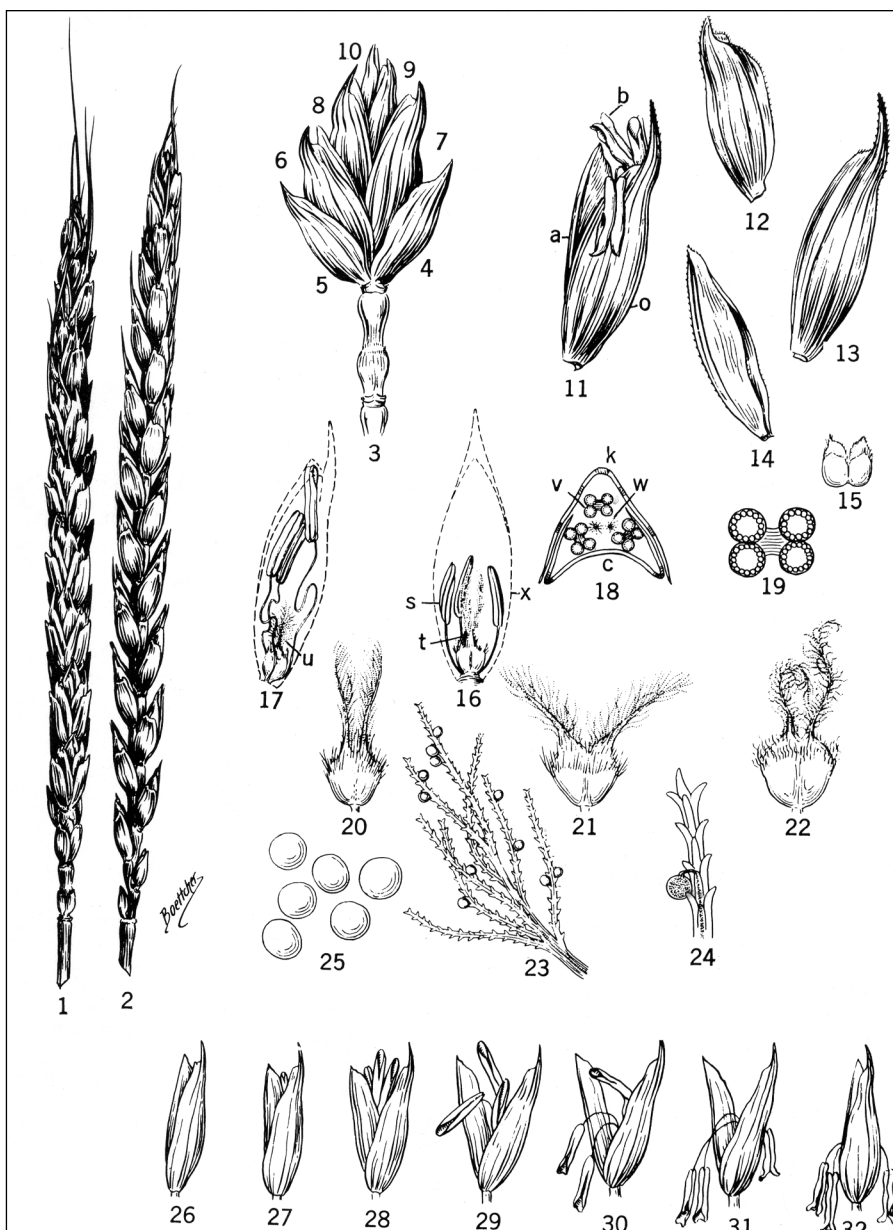
### Références .....

Le blé, la céréale dont la production mondiale en 2001 était légèrement moins élevée que celle du riz (582.7 TM pour le blé versus 592.8 TM pour le riz), a été l'une des premières plantes, avec l'orge, à être cultivée dans les régions du Moyen-Orient, il y a environ 10 000 ans. Le blé représente pour les civilisations occidentales, ce que le riz représente pour les peuples de l'Asie. Nonobstant son importance relative dans l'apport de la diète alimentaire des sociétés occidentales, par rapport au riz, celle-ci est moindre du fait que le blé n'est pas aussi omniprésent que le riz dans les repas de tous les jours. Trois espèces de blés appartenant à trois niveaux de ploïdie différents ont été utilisées par l'homme pour son alimentation. Mais aujourd'hui 90 % de la production mondiale nous est fournie par l'espèce hexaploïde, *T. aestivum* ( $2n = 42$ ) et environ 10% par l'espèce tétraploïde *Triticum turgidum* ( $2n=28$ ). Quant à l'espèce diploïde *Triticum monococcum* ( $2n = 14$ ), elle n'a vraiment été cultivée que dans les premières périodes de la préhistoire qui ont suivi la révolution agricole. Comme nous allons le voir, il y a une bonne raison pour le succès de la culture de *T. aestivum*. Plus que sa productivité élevée, par rapport aux deux autres espèces, c'est la qualité unique de sa farine pour la préparation de pain levain qui a déterminé son rôle dominant dans la culture de cette céréale.

### Description de la plante:

Les espèces de blé cultivées, quels que soient leurs niveaux de ploïdie, sont des plantes annuelles qui se reproduisent par autofécondation et qui possèdent une photosynthèse en  $C_3$ .

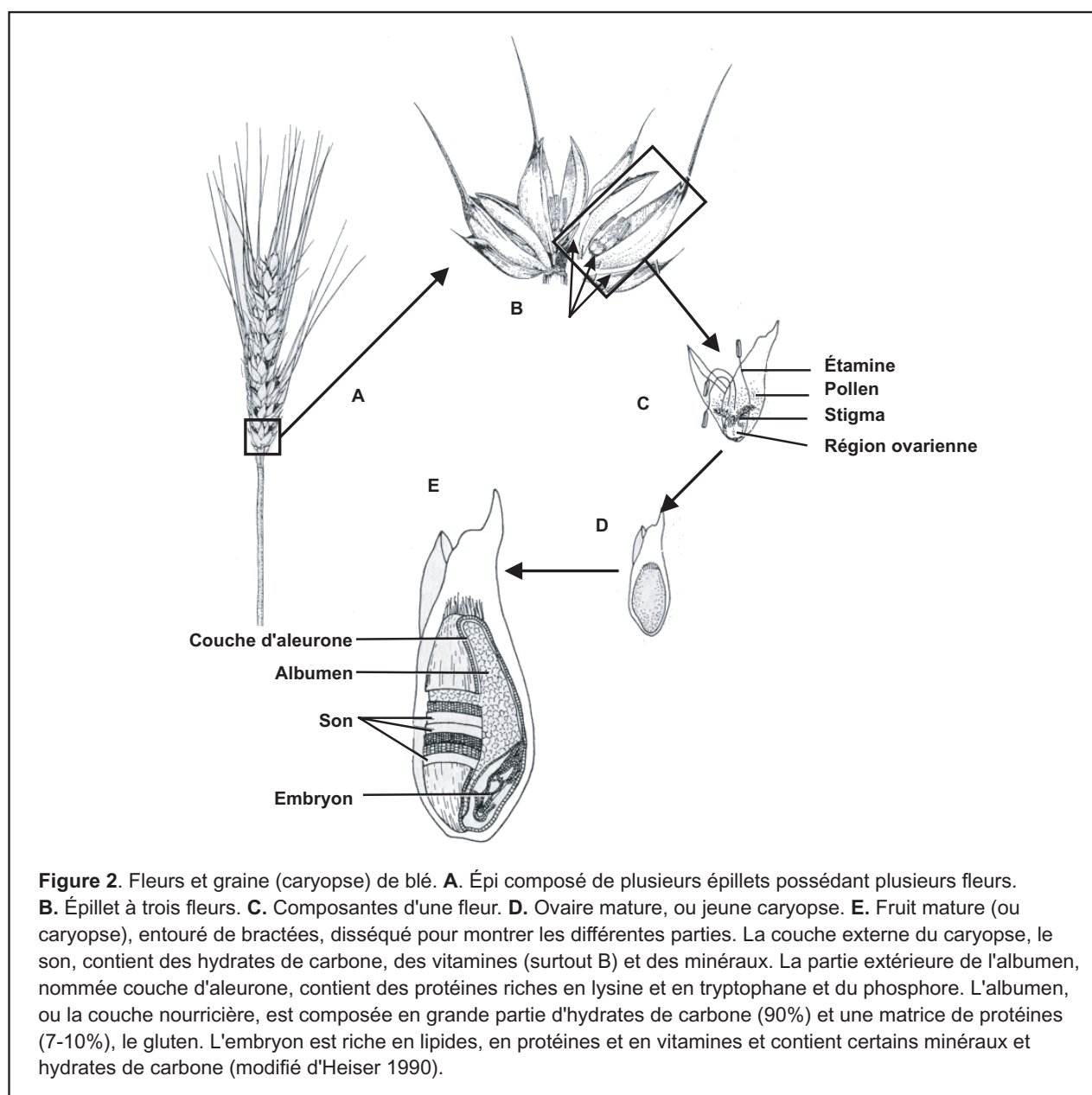
Lors de la germination des graines, il y a production de radicelles à partir de l'hypocotyle et de la première feuille à partir de l'épicotyle. Ensuite chaque plant développera, selon les variétés de blés, entre 6 et 25 tiges (chaumes) qui pousseront pendant la période de croissance végétative jusqu'à une hauteur maximale d'environ 1 m 70. Très rarement certaines variétés développent jusqu'à 60 chaumes. Les programmes d'amélioration modernes produisent maintenant, comme pour le riz, des variétés de haute productivité dites "semi-naines" qui



**Figure 1.-** Inflorescence du blé. 1. épillet vue dorsi-ventrale. 2. épillet vue latérale. 3. épillet vue latérale avec rachis. 4. glume supérieure. 5. glume inférieure. 6. 6 à 10. fleurs de différentes tailles. 11. fleur ouverte en vue latérale montrant anthères. 12. glume en vue latérale. 13. lemma en vue latérale. 14. paléa en vue latérale. 15. lodicules qui gonflent et ouvrent les glumes. 16. fleurs avant l'anthèse. 17. fleur durant l'anthèse montrant la position du pistil (u). 18. coupe transversale d'une fleur. 19. coupe transversale d'une étamine. 20. pistil avant l'anthèse. 21. pistil durant l'anthèse. 22. pistil après la fécondation. 23. portion du stigma avec grains de pollen. 24. extrémité du stigma. 25. grains de pollen. 26 à 32. fleurs dans les étapes successives de l'anthèse; le temps requis pour passer de l'étape 26 à 31 est d'environ 2 à 5 minutes et de l'étape 31 à 32 environ 15 à 40 minutes (adapté de Leonard & Martin 1963).

atteignent environ 1 mètre de hauteur. La croissance de la plante est déterminée car la floraison est synchronisée et produit un épi à l'apex de chaque chaume fertile après une période de croissance végétative qui peut être aussi courte que 40 jours pour les variétés hâtives (**Figure 1**).

L'épi est composé de 15 à 40 épillets dont les deux glumes enveloppent plusieurs fleurs (3 à 5 dépendant des variétés) dont certaines (1 à 3) avorteront avant la maturité. Chaque fleur hermaphrodite protégée par deux glumelles (palea et lemma), comprend un ovaire possédant un seul ovule, un stigmate divisé (bifide) plumeux et trois étamines (comprenant un filament et anthère). A la suite de l'autofécondation (cléistogamie) il y a formation d'un fruit indéhiscent, le caryopse. Le caryopse comprend plusieurs couches extérieures (l'exocarpe, le mésocarpe et l'endocarpe) qui proviennent du développement des parois de l'ovaire et de la graine proprement dite. La graine comprend une paroi (testa), une couche sous-jacente de cellules spécialisées (la couche d'aleurone), l'albumen (endosperme dans la terminologie anglaise), qui correspond environ 80 % du volume du fruit, où l'on retrouve l'amidon et le gluten (éléments de base pour la préparation des farines) et le germe (ou embryon) riche en huiles (**Figure 2**).



**Figure 2.** Fleurs et graine (caryopse) de blé. **A.** Épi composé de plusieurs épillets possédant plusieurs fleurs. **B.** Épillet à trois fleurs. **C.** Composantes d'une fleur. **D.** Ovaire mature, ou jeune caryopse. **E.** Fruit mature (ou caryopse), entouré de bractées, disséqué pour montrer les différentes parties. La couche externe du caryopse, le son, contient des hydrates de carbone, des vitamines (surtout B) et des minéraux. La partie extérieure de l'albumen, nommée couche d'aleurone, contient des protéines riches en lysine et en tryptophane et du phosphore. L'albumen, ou la couche nourricière, est composée en grande partie d'hydrates de carbone (90%) et une matrice de protéines (7-10%), le gluten. L'embryon est riche en lipides, en protéines et en vitamines et contient certains minéraux et hydrates de carbone (modifié d'Heiser 1990).

## Origines et évolution:

Notre compréhension de l'évolution des blés cultivés est le résultat de nombreuses études combinant l'archéologie aux recherches ethnobotaniques et phytogéographiques ainsi que les analyses morphologiques, anatomiques, génétiques, cytogénétiques et moléculaires menées au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Les études sur l'évolution du blé sont les plus poussées parmi celles réalisées sur les espèces cultivées. Toutes les espèces de blé spontanées et cultivées appartiennent au genre *Triticum* dont les quelques 27 espèces\* sont distribuées sur un vaste territoire qui s'étale de l'Asie centrale aux régions du bassin méditerranéen.

La plus grande partie des espèces spontanées sont diploïdes ( $2n = 14$ ), mais plusieurs espèces sont aussi tétraploïdes ( $2n = 28$ ). Par contre, l'unique espèce hexaploïde, *T. aestivum* ( $2n = 42$ ), possède tous les attributs d'une espèce domestiquée par l'Homme et aucune forme spontanée n'a été rapportée jusqu'à maintenant.

Les analyses cytogénétiques réalisées au début de ce siècle ont démontré que les espèces de *Triticum* formaient une série polyploïde avec une base chromosomique de sept (voir la section sur la description des mécanismes et l'évolution des allopolyploïdes). Les analyses cytogénétiques plus récentes appuyées par des analyses biochimiques qui utilisent des marqueurs telles que les formes moléculaires d'enzymes (alloenzymes) et des fragments d'ADN ont permis de retracer les progéniteurs des formes cultivées de blé et de mieux comprendre les processus de polyploïdie qui ont produit les diverses espèces spontanées et les formes cultivées de blé.

Les espèces diploïdes et tétraploïdes spontanées, respectivement, *T. monococcum* ssp. *boeoticum* ( $2n = 14$ ; engrain) et *T. dicoccum* ssp. *dicoccoides* ( $2n = 28$ ; amidonnier), dont les graines ont été cueillies depuis au moins 14 000 ans par les groupes humains du paléolithique au Moyen-Orient, ont été domestiquées par l'Homme à partir de 9 800 ans A.P. Les premières preuves de la domestication et culture de ces deux espèces par l'Homme nous viennent des sites archéologiques du centre-nord de la Syrie. L'apparition de modifications morphologiques au niveau du rachis de l'épi, qui ne permettent plus l'explosion et la dislocation des épillets des épis à maturité, est observée entre 9800 et 9000 années A.P. sur un nombre significatif d'échantillons de graines des deux espèces retrouvées dans les sites de Aswad (près de Damas) et de Abu Hureyra, 300 km au nord le long de l'Euphrate. Par la suite l'utilisation des formes domestiquées et leur culture s'est propagée à diverses autres régions du Moyen-Orient avec une dominance accrue de l'espèce tétraploïde cultivée *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum* dans les vallées et régions de l'ouest proches de la mer Méditerranée (Figures 3 & 4).

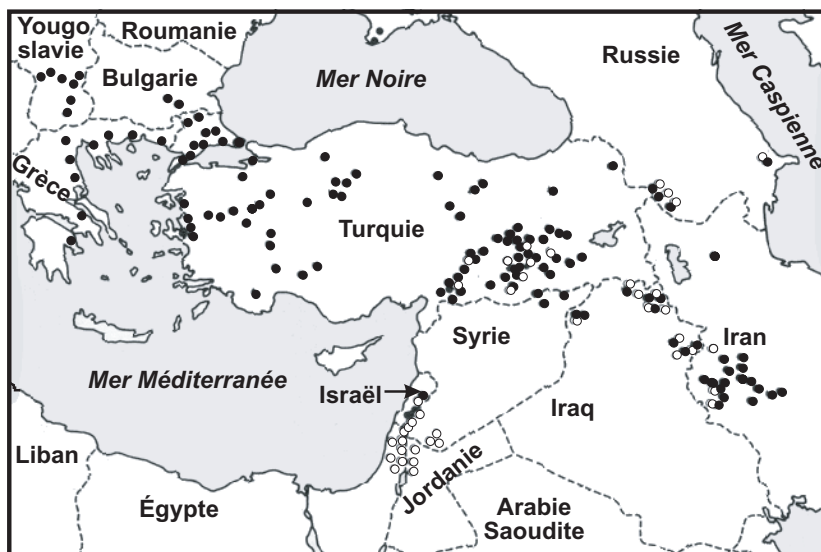
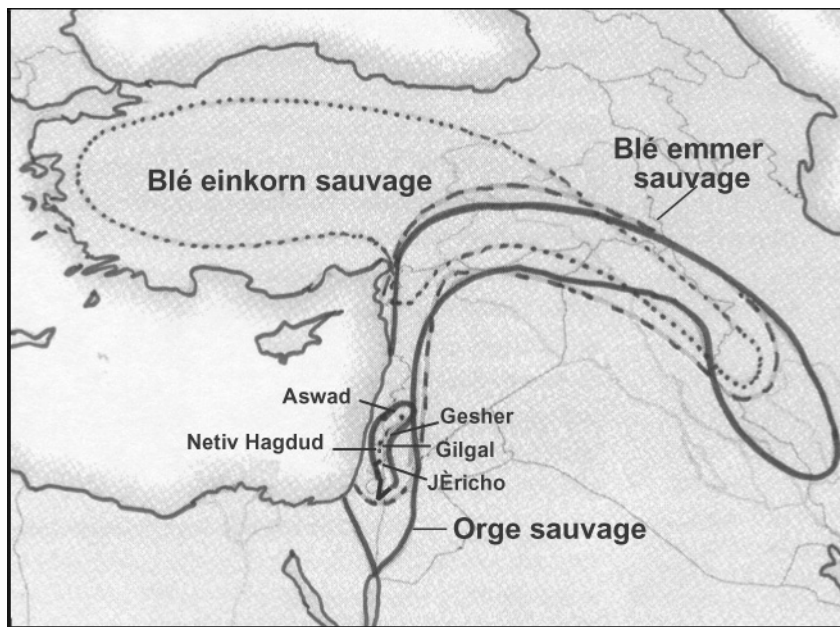


Figure 3. Aire de distribution du blé sauvage einkorn (●) et du blé sauvage emmer (○) (adapté de Heiser 1990).

\* incluant maintenant les taxons du genre *Aegilops* qui, du fait de leurs ressemblances génétiques et morphologiques aux espèces de *Triticum*, ont été transférées récemment dans le genre *Triticum*. Le nombre de 27 espèces est cité dans l'article de Feldman et Sears (1981) mais les spécialistes ne s'accordent pas toujours sur le nombre d'espèces qui ont été décrites pour ce genre. Certains considèrent, qu'en vue de leurs grandes similarités morphologiques et génétiques, plusieurs espèces devraient être regroupées, ce qui pourrait réduire leur nombre d'espèces à un chiffre aussi bas que 7 (Heiser 1990).



**Figure 4.** Répartitions géographiques des ancêtres sauvages du blé emmer, du blé einkorn et de l'orge. La petite superficie entourée de noir est le corridor Levantine, où ces trois céréales furent domestiquées il y a 10 000 à 9600 ans (adapté de Smith 1995).

L'évolution des formes tétraploïdes est un peu plus compliquée du fait que l'on reconnaît deux groupes de formes cultivées issus de croisements entre espèces différentes. La première des espèces cultivées, *Triticum timopheevi*, est associée aux régions des montagnes Zagros et Taurus. Cette espèce possède une distribution très limitée et l'on a retracé sa culture seulement dans les régions adjacentes au Caucase. Il n'y a pas de données archéologiques précises pour déterminer le lieu ou la période initiale de sa culture. Sa culture a en effet été abandonnée subséquentement au profit de l'espèce tétraploïde *T. dicoccum* ssp. *dicoccum*. Les analyses cytogénétiques et biochimiques récentes indiquent que cette espèce a été domestiquée à partir de l'espèce spontanée *Triticum timopheevi* ssp. *araraticum* avec laquelle elle partage la combinaison génomique AAGG. Les analyses cytogénétiques et biochimiques indiquent que l'espèce spontanée proviendrait d'un croisement naturel entre les espèces diploïdes spontanées *T. monococcum* ssp. *boeoticum* (AA) et *Triticum aucheri* (GG) suivi d'une duplication chromosomique sous des conditions naturelles (**Figures 5-7**).

Tel que décrite ci-haut, la deuxième espèce tétraploïde cultivée il y a déjà environ 9 800 années est *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum* qui a évolué à partir des formes spontanées de *T. turgidum* ssp. *dicocoides*. Les analyses cytogénétiques et biochimiques indiquent que cette dernière sous-espèce est issue d'un croisement naturel entre les espèces diploïdes spontanées *T. monococcum* ssp. *boeoticum* (A) et, soit *T. longissimum*, soit *T. speltoïdes* (= *Aegilops speltoïdes*), et peut être aussi *T. bicornis* (BB), suivi d'une duplication du complément chromosomique de l'hybride. Les analyses biochimiques effectuées jusqu'à présent ne permettent pas de déterminer avec précision laquelle des ces trois espèces comportant le génome BB est impliquée dans le croisement naturel ayant précédé à la polyploïdisation. Ces trois espèces étant très variables et présentant de grandes similitudes génétiques entre elles, il a été proposé que le génome B puisse être un génome hybride complexe ou plusieurs espèces auraient été impliquées préalablement par le biais de croisements et de rétro croisements entre les taxons concernés.

Toutes les formes diploïdes et tétraploïdes de blés cultivées, qui ont été discutées jusqu'à présent, présentent des épis qui ont perdu la capacité de dissémination à maturité. Par contre, toutes ces formes possédaient des glumelles fortement rattachées aux caryopses à maturité. Une deuxième modification est apparue parmi les formes cultivées de céréales lors du processus de domestication: la présence de glumelles qui se détachent facilement à la maturité des épis. Cette mutation qui est sous contrôle génétique mendélien simple, est un attribut

**Figure 5.**

**Évolution du blé**

D'après Feldman, M. & E.R. Sears (1981).  
Scientific American 244(1): 102-112.

Nombre chromosomique	Espèces sauvages	Espèces cultivées
2n = 14 (diploïde)	<p><i>T. monococcum boeoticum</i> (= <i>T. aegilopoides</i>, <i>T. boeoticum</i>) génome AA. (Montagnes Zagros-Taurus, Balkans)</p> <p><i>T. monococcum urartu</i> (= <i>T. urartu</i>) génome AA. (sud-ouest Asie)</p>	<p><i>T. monococcum monococcum</i> (= <i>T. monococcum</i>) "Einkorn" (AA)</p>
2n = 28 (tétraploïde)	<p><i>T. turgidum dicoccoides</i> (= <i>T. dicoccoides</i>) génome AABB. (Syrie, sud-est du Liban, nord-ouest Israël)</p> <p><i>T. timopheevi araraticum</i> (= <i>T. timopheevi</i>, = <i>T. araraticum</i>) génome AAGG. (sud-ouest Iran, nord-ouest Irak, sud-est Turquie)</p>	<p><i>T. turgidum</i> (= <i>T. dicoccum</i>) (AABB) "Emmer"</p> <p><i>T. timopheevi timopheevi</i> (AAGG)</p>
2n = 42 (héxaploïde)	-	<p><i>T. aestivum</i> (= <i>T. vulgare</i>) (6,000 A.J.C., ouest de l'Iran)</p>

important facilitant la séparation des glumelles des caryopses au moment du battage des épis avant que les caryopses ne soit moulus en farine. Cette séparation préalable permet de réduire la quantité de silice et de fibres non digestibles de la farine ce qui augmente sa valeur nutritive et culinaire. Cette mutation est apparente lors de l'évolution d'une nouvelle sous-espèce, *T. turgidum* ssp. *durum*, qui fait son apparition entre 9000 et 8000 années A.P. dans les sites archéologiques de Can Hasan (Turquie), Tell Aswad (Syrie) et, par après, dans plusieurs autres sites archéologiques du Moyen-Orient allant de la côte méditerranéenne (Israël) à l'Iran occidental. Cette sous-espèce remplace rapidement *T. turgidum* ssp. *dicoccum* qui disparaît des sites archéologiques vers 3500 années A.P.

La plus importante espèce de blé, l'espèce hexaploïde *Triticum aestivum* (2n = 42) n'a pas de représentant hexaploïde spontané (**Figures 6-7**). Cette espèce fait sa première apparition dans les sites archéologiques des plaines du Moyen-Orient il y a environ 8000 années A.P. et présente les mêmes modifications observées chez l'espèce tétraploïde cultivée *T. turgidum* ssp. *durum*. Les analyses cytogénétiques, corroborées par les analyses biochimiques, montrent que cette espèce est issue d'un croisement naturel entre l'espèce cultivée *T. turgidum* ssp. *durum* (2n = 28; AABB) et *T. tauschii* ssp. *strangulata* (DD) (syn. = *Aegilops squarrosa*) suivi d'une duplication du nombre chromosomique. Les connaissances de la distribution de ces deux espèces, nous fournissent des raisons valables pour suggérer que ce croisement ait bel et bien impliqué une forme cultivée de blé tétraploïde. La distribution de *T. tauschii* ssp. *strangulata*, située dans une région plus à l'est que celle des formes sauvages de *T. turgidum*, ne coïncide pas avec celle des formes sauvages de *T. turgidum* ssp. *dicoccoides*. Le contact entre ces espèces n'aurait pu être établi que lorsque les formes cultivées de *T. turgidum* auraient été cultivées dans les régions qui se situent dans l'aire de distribution de *T. tauschii*. Les analyses génétiques prouvent aussi que c'est *T. tauschii* qui est responsable de la qualité du gluten qui permet à la farine de l'hybride hexaploïde de produire le pain levain. C'est la qualité accrue de sa farine qui a déterminé le succès de l'implan-

Figure 6. Évolution du genre *Triticum*

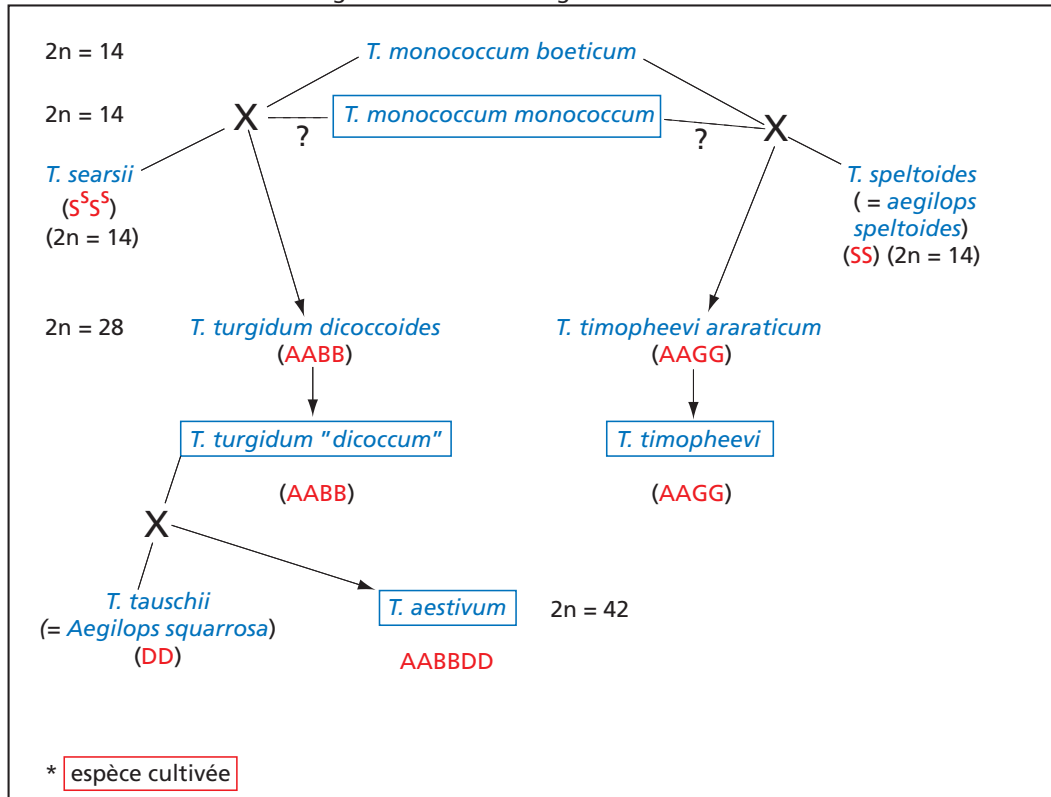
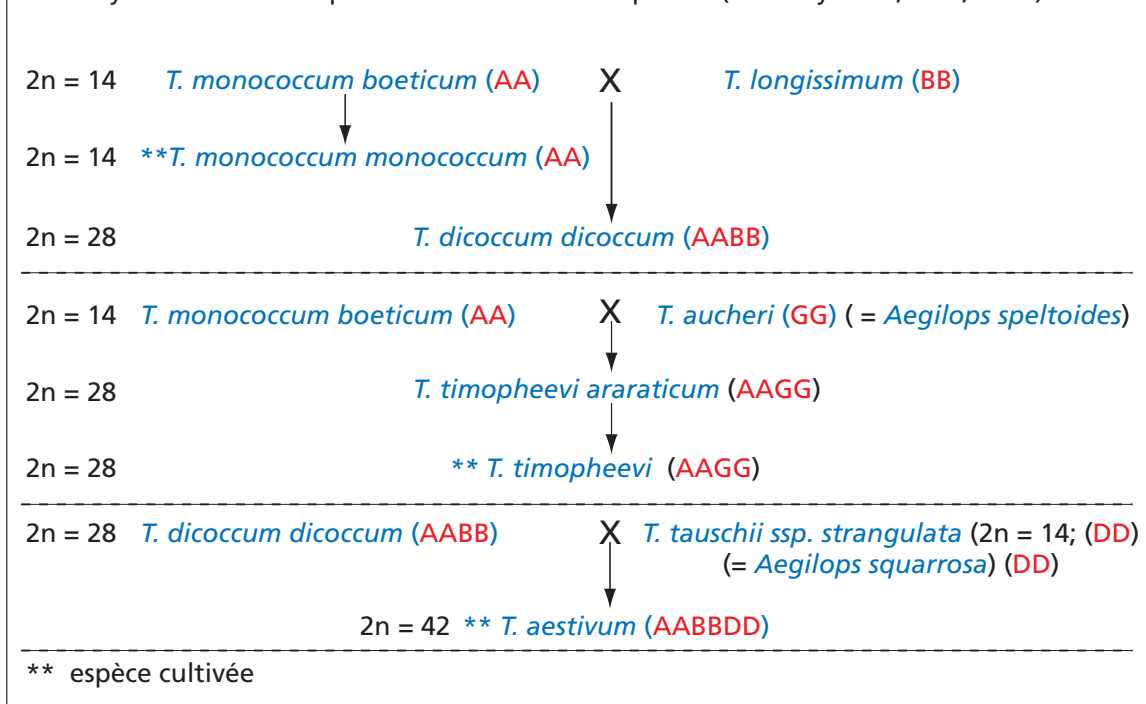


Figure 7. Evolution des espèces cultivées de blé basée sur les analyses électrophorétiques d'allozymes et sur les séquences d'ADN du chloroplaste (Doebly 1991, 1992, 1995)



tation de la culture de cette espèce de blé et sa prépondérance comme céréale des régions tempérées bien plus que sa productivité accrue qui n'était pas évidente ni très différente des formes cultivées de blé tétraploïde dans les premières périodes de sa culture. Deux formes cultivées de *T. aestivum* sont considérées comme étant les premières à être cultivées au Moyen-Orient. Le type "spelta" produit un épi mince sur un rachis qui a tendance à se

désarticuler à maturité et dont les glumelles offrent une certaine résistance pour se détacher du caryopse. Ce type se retrouve dans certains sites archéologiques du Moyen-Orient à des périodes remontant à 7000 années A.P. L'autre forme est le blé à épis compacts de petites dimensions (forme "club" ou "compactum"). Elle est retrouvée systématiquement dans tous les sites archéologiques du sud-est de la Turquie entre 5500 et 4500 années A.P. Ces formes, classifiées au rang d'espèces jusqu'en 1960, sont considérées maintenant comme les formes les plus primitives de *T. aestivum*. Les analyses cytogénétiques et moléculaires démontrent qu'elles possèdent le génome AABBDD et des similitudes génétiques étroites avec les autres formes cultivées de *T. aestivum*.

### Écologie et méthodes de culture du blé:

Les formes spontanées de blés ayant été impliquées dans l'évolution des formes cultivées sont originaires de régions possédant des climats variables allant de tempérés chauds (bassin méditerranéen) à tempérés froids (régions montagneuses et hauts plateaux du centre-ouest de l'Asie) avec un régime de pluies variable mais souvent limitant pendant la période de croissance. Cette variabilité se reflète dans les formes cultivées qui, dépendant de leurs origines, se sont adaptées aux conditions de régimes climatiques qui couvrent l'éventail des régions subtropicales (en altitude) aux climats tempérés froids. L'Homme a donc sélectionné de façon consciente ou inconsciente les variétés en fonction des conditions locales et le processus de sélection a produit un très grand nombre de variétés locales, telles que répertoriées déjà par les civilisations grecques et romaines, 2000 à 1000 années av. J.C.

Pour la culture du blé, les labours sont nécessaires afin de préparer les sols pour y semer les graines à la volée. Les premiers cultivateurs du néolithique se sont vite aperçus que les plants de blé semés sur un sol amendé étaient plus productifs que ceux poussant sous des conditions naturelles. L'utilisation d'outils primitifs pour labourer les sols est apparue progressivement à mesure que le processus de sédentarisation s'accroissait. Les habitants des premiers villages primitifs, habités par quelques familles, probablement utilisaient un outil aussi rudimentaire qu'un bâton à fouir à pointe aiguisée car, les besoins alimentaires pouvaient être satisfaits par des plantations sur des surfaces limitées. Les premières charrues primitives qui sont retrouvées dans les fouilles archéologiques datent d'environ 7500 ans. Ces charrues ancestrales ainsi que l'utilisation d'animaux de labours pour déplacer des charrues plus performantes sont bien reproduites par des fresques sumériennes et hittites datées de 6500 à 3500 années. Ces améliorations sur les instruments de labours répondaient à une demande d'efficacité accrue afin de répondre aux pressions démographiques provoquées par des sociétés urbaines plus développées et en expansion constante. La croissance du blé, particulièrement pendant la phase végétative, est dépendante d'un apport régulier d'eau aux racines. Sous des conditions de pluviométrie restreinte pendant la période de croissance, la production de blé est réduite et très aléatoire d'une saison à une autre. Les premiers agriculteurs n'ont probablement pas pratiqué l'irrigation comme telle mais ont planté des céréales et des légumineuses sur des dépôts alluviaux en bordure immédiate des rivières et des lacs là où la nappe phréatique est maintenue suffisamment près de la surface pour favoriser la croissance des cultures. L'irrigation consciente au moyen de canaux permettant le transport d'eau vers des champs labourés plus éloignés, en marge de cette zone alluviale ou lacustre, ne fait son apparition qu'à partir de 7000 années A.P. et est abondamment documentée par la suite par des fresques des civilisations hittites et sumériennes. La grande diversité de variétés de blés cultivés tétraploïdes et hexaploïdes présente au Moyen-Orient a facilité la dispersion et l'implantation de cette culture vers l'Europe centrale et au nord et à l'ouest du bassin méditerranéen. Les conditions climatiques des basses terres de l'Europe centrale et du nord correspondaient à celles des régions montagneuses et des plateaux en altitude de plusieurs régions du nord et de l'est du Moyen-Orient (est de la Turquie, montagnes Zagros et Taurus, Plateau iranien, région du Caucase). L'expansion de la culture du blé dans les régions plus chaudes du bassin

---

\* La nomenclature pour classer les espèces de blés spontanés et cultivés peut paraître confuse pour le non-initié. Un très grand nombre de synonymes ont été proposés au cours des années pour nommer la même espèce et les noms pour le même taxon peuvent aussi être différents si l'on favorise un système de classification européen ou un système anglo-américain. Les analyses cytogénétiques et croisements contrôlés ont aussi démontré que les différences génétiques entre les taxons cultivés et spontanés sont, dans la plupart des cas, très peu marquées. Ceci se reflète par la tendance actuelle de classer les formes spontanées et cultivées correspondantes dans la même espèce en reléguant chacune de ces formes au rang de sous-espèce.



méditerranéen (incluant l'Égypte) a certainement été favorisée par la présence de variétés de blé sélectionnées préalablement dans les basses terres des régions du Moyen-Orient rapprochées de la zone Méditerranée (région levantine).

L'expansion de la culture des blés tétraploïdes et hexaploïdes vers les régions du nord de l'Europe et vers les zones de la Méditerranée occidentale, initiée à partir du 6<sup>e</sup> millénaire av. J.C. et réalisée sur une période relativement courte de 3000 ans (voir chapitre sur les origines de l'agriculture), a favorisé une nouvelle explosion de variation parmi les formes cultivées. Cette multiplication de nouvelles variétés est particulièrement importante dans les régions centrales de l'Europe le long de l'axe du Danube où de nombreuses variétés possédant des épis morphologiquement très différents ont été retrouvées dans les sites archéologiques datant de cette période.

De nos jours, la culture du blé est effectuée sur tous les continents et dans des régions possédant une grande diversité de climats, excepté dans les régions tropicales humides. En 2001, près de 21% de toutes les terres agricoles étaient destinées à la culture du blé. Bien que le blé ne puisse être cultivé sous les conditions de climats tropicaux humides, des cultures de blé ont été établies avec succès dans les régions équatoriales en altitude où les conditions ressemblent plus aux régimes des climats subtropicaux saisonniers. Sa culture s'est aussi étendue aux régions de climats tempérés froids, s'approchant des latitudes de 60° N et 55° S, par le biais de variétés hâtives qui bouclent leurs cycles de croissance et de reproduction en 60-80 jours. Les statistiques pour 2001 font état de la présence de plus de 20 000 variétés de blé répertoriées pour les diverses régions productrices de blé.

Sous des conditions d'apport d'eau adéquat, la production de blé est optimale quand elle est effectuée sur des sols à texture moyenne (loameux) ou légère proprement amendés, mais elle est fortement réduite sur des sols argileux lourds qui ont tendance à retenir trop d'eau en surface ou à devenir trop compact à l'assèchement. La production du blé est favorisée sur des sols à pH neutres ou légèrement acides (pH 7.5-6.0) mais sa productivité diminue fortement à des pH inférieurs à 5.5. Contrairement à l'orge, la croissance du blé est affectée par des excès de salinité (en particulier, sols riches en Na<sup>+</sup>) bien que certaines variétés tolérantes aient été sélectionnées récemment.

Dans certaines régions du monde les méthodes employées pour la culture du blé n'ont pas beaucoup changé depuis les temps préhistoriques. Dans un premier temps, on note par contre des améliorations importantes qui ont surtout favorisé les pays industrialisés. Elles ont été apportées aux différentes phases et processus associés à la culture du blé, à la moisson, à l'entreposage des graines et à la préparation des farines et des produits dérivés. À partir de 1850, la Révolution Industrielle a permis le développement d'équipements de labour et de moisson mécanisée qui ont de beaucoup réduits les besoins de main d'œuvre des pays industrialisés tout en augmentant de façon significative les rendements par hectare. Le processus de mécanisation des diverses étapes allant des labours à la moisson du blé s'est fortement accéléré à partir de 1945 et de nos jours les investissements en machineries d'une ferme américaine ou canadienne productrice de blé se chiffrent à plusieurs centaines de milliers, voir plusieurs millions de dollars. Cette mécanisation a réduit les besoins et les coûts de main d'œuvre. Elle a aussi permis une augmentation spectaculaire des rendements par hectare lorsqu'elle s'accompagne de pratiques agricoles et d'entreposage adéquats ainsi que de l'utilisation de variétés de blé certifiées. Par exemple, des rendements de 10 à 16 tonnes de graines de blé par hectare sont couramment produits dans une ferme mécanisée du Manitoba ou de l'Iowa ; par contre, un fermier d'un pays du Tiers-Monde, n'ayant pas accès à ces ressources, obtiendra dans les meilleures conditions une production n'excédant que rarement une tonne par hectare. La contrepartie des avantages de cette mécanisation est l'utilisation accrue des ressources énergétiques non-renouvelables que requière la fabrication et l'utilisation de ces équipements. Plusieurs études récentes démontrent que dans ces conditions 2 à 5 fois plus d'énergie est dépensée par hectare de culture que celle produite par les denrées récoltées sur cette surface.

Les variétés de blé sont divisées en deux groupes. Le premier, responsable d'environ 92 % de la production mondiale de blé est celui des variétés de "blés tendres" qui regroupent toutes les variétés issues de l'espèce hexa-

ploïde *T. aestivum*. Ces variétés au nombre de plus de 20 000 sont destinées à la production de farines utilisées à la fabrication de pain et de gâteaux. Le deuxième groupe est celui des "blés durs" qui correspond aux quelques 400 variétés des blés tétraploïdes regroupés sous *T. turgidum* ssp. *durum*. La farine issue de ces variétés est destinée surtout à la préparation de pâtes alimentaires tels que les macaronis, spaghetti et nouilles.

Les variétés de blés, aussi bien des espèces tétraploïdes ou hexaploïde, sont aussi regroupées en variétés de printemps et variétés d'hiver. Les variétés dites de "printemps" sont plantées relativement tôt au printemps et la récolte se fait au commencement de l'automne. Ces variétés sont généralement hâtives avec un cycle de croissance de 70 à 90 jours. Les variétés de printemps sont utilisées dans les régions de climats froids tels que le Nord des États-Unis et le Canada. Les variétés dites "d'hiver" sont généralement semées en automne et la récolte est faite en été. Le cycle de croissance des plants est plus long et s'étale environ entre 100 et 140 jours. Ces variétés sont utilisées dans les régions à climats plus doux ou la température moyenne hivernale ne descend pas au-dessous de 0°C.

### Utilisation et usages :

De nos jours, le blé est utilisé principalement pour l'obtention de farines destinées à la fabrication de différents types de pain, de gâteaux, de pâtes et comme accompagnement dans divers mets culinaires. L'engrain (blé diploïde) et l'amidonner (blé tétraploïde) ont été les premiers blés à être cultivés. De nos jours, ce dernier ne représente plus que 8 % de la production mondiale et est relégué à la préparation de pâtes alimentaires et de certains types de gâteaux et préparations culinaires. Les raisons de l'importance accrue de la production du blé hexaploïde réside dans la qualité de sa farine. Cette farine est surtout destinée à la production du pain levain qui est devenu l'aliment de base des civilisations et peuples occidentaux. La farine du blé hexaploïde est produite à partir de l'albumen de la graine et elle possède deux protéines aux propriétés particulières qui en formant un complexe avec l'amidon composent le gluten. Ces deux protéines, la gliadine et la gluténine, sont filamenteuses, hygroscopiques (très avides d'eau) et, lorsque hydratées, possèdent une très grande élasticité, particulièrement lorsqu'elles se retrouvent dans des proportions équivalentes comme c'est le cas pour le gluten de l'espèce hexaploïde. Bien que ces deux protéines constituent généralement moins de 10 à 15 % de la farine, elles absorbent à elles seules près de 50 % de l'eau ajoutée à la farine au cours de la préparation de la pâte à pain. Lors de la fermentation de cette pâte provoquée par l'ajout de la levure, le CO<sub>2</sub> libéré est séquestré et maintenu à l'intérieur de la masse spongieuse de la pâte d'amidon qui lève grâce à l'élasticité et aux propriétés extensibles de la gliadine et de la gluténine. Au cours de la cuisson la masse spongieuse du gluten fige avant que le CO<sub>2</sub> soit libéré des alvéoles, ce qui rend la mie de pain légère et agréable à la consommation. La farine des espèces diploïdes et tétraploïdes ne possède pas ces propriétés car son gluten est déficitaire en gluténine, le rapport gliadine: gluténine étant environ de 0,8 : 0,2.

Dans les premiers temps qui ont suivi au développement de l'agriculture, les caryopses de blé ainsi que ceux d'autres céréales, étaient moulu de façon très grossière à l'aide de pilons arrondis dans des moulins à bras primitifs creusés dans la pierre. Une proportion importante des glumelles (pour les formes de blés possédant des glumelles fortement rattachées aux caryopses) et du son était incorporée à une farine grossière et colorée qui était ensuite cuite et consommée en forme de gruau. A l'époque des premières civilisations sumériennes et hittites, dans la période comprise entre le 6<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> millénaire av. J.C., on voit apparaître des meules de pierre à mouvement circulaire sur pivot assistés par des animaux de trait. Plus tard les animaux sont remplacés par l'énergie hydraulique. Ce dernier type de moulin, dans des formes plus élaborées et à plus grande échelle, a été utilisé le long des cours d'eau pour préparer les farines jusqu'au début du 19<sup>e</sup> siècle. Le développement des minoteries mécanisées au cours du 19<sup>e</sup> siècle a révolutionné tous les aspects rattachés au rendement et à l'efficacité dans la récupération et la séparation des diverses composantes de la farine et de ses dérivés. Des séries de rouleaux d'acier aux cannelures à dimensions variables remplacent l'unique meule de pierre. Ceci permet de séparer de façon plus complète et avec moins de pertes le son et le germe de l'albumen par tamisage. L'albumen est par la suite moulu progressivement à travers plusieurs séries de rouleaux rapprochés en parallèle pourvus de cannelures qui deviennent de moins en moins profondes. Dans une première étape ce procédé permet de sépa-

rer par tamisage les particules extérieures grossières, auxquelles sont encore rattachés des fragments de son, des nodules d'amidon, la semolina. La semolina peut être utilisée directement à ce stade pour la fabrication de certaines pâtes alimentaires (et du couscous) si elle provient d'un blé tétraploïde. La semolina est progressivement moulue jusqu'à l'obtention d'une farine légèrement colorée tandis que les éléments plus grossiers sont réincorporés au broyage pour une seconde, et parfois une troisième phase de séparation. De nos jours, la farine est par la suite blanchie par l'ajout d'un mélange de dioxyde de chlore ( $\text{ClO}_2$ ), de chlorure de nitrosyle ( $\text{NOCl}$ ) et de peroxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ). Le produit final est une farine blanche et fine. Le son et le germe sont récupérés séparément et sont généralement utilisés comme suppléments alimentaires pour le bétail.

L'avènement des minoteries modernes à haut rendement qui se sont multipliées dès le début du 20<sup>e</sup> siècle ont rendu accessible la farine blanche à toutes les couches de la société et celle-ci a été adoptée très rapidement par les habitants des régions urbaines et rurales. Un avantage de la farine blanche, qui a gagné la faveur des producteurs, vendeurs intermédiaires, boulangers et consommateurs, est sa capacité accrue de conservation par rapport aux farines obtenues par le broyage traditionnel sur meules de pierre. Cette dernière a tendance à devenir rance très rapidement du fait qu'elle contient des résidus d'huiles issues du germe et de la couche d'aleurone qui ne peuvent être éliminés avec autant d'efficacité pendant le broyage. Par contre, la farine obtenue par des moyens traditionnels ou la farine brune (de blé entier) sont plus nutritives que la farine blanche. Elles contiennent plus d'éléments minéraux et de vitamines (complexe B, en particulier) issues du son et du germe, ainsi que des protéines additionnelles riches en lysine et tryptophane provenant de la couche d'aleurone. Pour corriger ces carences, les règlements dans beaucoup de pays exigent que la farine blanche soit "enrichie" à la minoterie avec un mélange de vitamines B<sub>1</sub> (thiamine), riboflavine, niacine et de minéraux tels que du calcium et du fer dans la forme de pyrophosphate de fer et de sodium (ce dernier produit étant un antioxydant qui réduit aussi la rancidité à long terme). Si la farine est destinée à produire du pain croûté (baguettes ou ficelles françaises), des alpha-amylases et des beta-amylases sont aussi ajoutées à la farine pour accélérer la transformation de l'amidon en produits intermédiaires tels que la dextrine et la maltose qui faciliteront la formation de croûte à la cuisson. Dans certains pays en développement, où l'accès aux protéines par la population est limité pour des raisons socio-économiques, la farine de blé est aussi enrichie en protéines par l'ajout de la farine de soya, de celles d'autres légumineuses ou d'un certain pourcentage (environ 2-5 %) de farine de poisson.

Si dans la plupart des pays en développement la production de blé est destinée dans sa quasi-totalité à l'alimentation humaine directe, ce n'est pas le cas des pays industrialisés. Dans ces pays une partie importante de la production, parfois jusqu'à 45 %, est utilisée pour l'alimentation du bétail ou est destinée à l'élaboration de produits industriels. C'est le cas des États-Unis et du Canada où 20 à 30 % de la production ne quittera pas la ferme, 5 à 9 % de cette production étant destinée aux semences de la prochaine récolte et le reste à l'alimentation des animaux de ferme. Environ 15 % de la production de blé aux États-Unis est aussi utilisée pour l'extraction d'amidon et de gluten qui serviront à la fabrication de colles à bois et pour l'industrie du nettoyage, à la distillation d'alcools et comme ajout (activateur) au malte d'orge destiné à la fabrication de la bière.

### **Amélioration génétique et augmentation de la productivité de la culture du blé :**

Au-delà de 25 000 variétés de blés ont été répertoriées au cours des dix dernières années dans le monde. Près de 70% de celles-ci ont vu le jour au 20<sup>e</sup> siècle. Jusqu'aux premières années du 20<sup>e</sup> siècle, la plupart des variétés existantes avaient été sélectionnées à partir d'individus provenant d'un nombre restreint de variétés anciennes issues initialement d'adaptations aux conditions locales de climats et de sols. Ces variétés avaient été sélectionnées, la plus part du temps, de façon inconsciente par les premiers agriculteurs. Graduellement, par la suite, les cultivateurs ont sélectionné dans leurs champs les graines de plantes individuelles qui montraient une vigueur de croissance particulière et une production accrue par rapport au reste des plants de leurs récoltes. Ces plantes pouvaient être issues de mutations ou de croisements fortuits. Étant donné que le blé est auto fécondé, toutes les graines issues de ses plantes produisaient des individus identiques à celles-ci, permettant ainsi à l'agriculteur perspicace de se constituer un stock important de semences en quelques récoltes. A partir du 18<sup>e</sup> siècle des croisements intentionnels en vue de la production de nouvelles variétés de blés (et d'autres céréales) ont été effectués mais avec peu de succès. Il a fallu attendre la redécouverte des lois de Mendel au tout début du 20<sup>e</sup> siècle.

cle pour établir des programmes d'amélioration génétique qui utilisaient les connaissances sur les mécanismes héréditaires et les nouvelles techniques cytogénétiques et de croisement. Ces programmes d'amélioration ont permis de canaliser les efforts dans la sélection appropriée des progéniteurs afin d'obtenir par hybridation des variétés plus productives, porteuses de traits agronomiques désirables et moins susceptibles aux maladies. Dès 1907, un des premiers succès des généticiens américains fût l'obtention de nouvelles variétés de blé résistantes aux rouilles de la tige causées par le champignon *Puccinia graminis* qui ravageaient les cultures de variétés traditionnelles. A partir de cette période et au cours des quatre décennies suivantes, des programmes d'amélioration génétiques furent menés dans plusieurs pays producteurs de blé d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Australie. Plusieurs centaines de nouvelles variétés améliorées furent produites, particulièrement au niveau de la résistance aux agents pathogènes et insectes, par exemple, à la mouche de la tige (*Phytophaga destructor*) qui faisait des ravages dans les plantations de blé dans les régions du centre-sud des États-Unis. Ces nouvelles variétés ont aussi été améliorées dans leurs caractéristiques agronomiques, une meilleure tolérance aux conditions de températures basses et à la sécheresse ainsi qu'au niveau des propriétés de panification et de la qualité et quantité de protéines de la farine. La contribution des améliorateurs et généticiens permirent de doubler les rendements par hectare de blé en Amérique du Nord entre 1920 et 1950.

A partir de 1950, un effort remarquable a été réalisé au niveau international pour améliorer la production de blé, particulièrement dans les pays du tiers-monde. En 1943, la Fondation Rockefeller, répondant à un appel d'aide du gouvernement mexicain pour augmenter la production agricole de ce pays a mis sur pied un centre de recherches, le CIMMYT ("Centro Internacional de Mejoramiento para el Maiz y el Trigo") situé au Mexique et comportant de nombreuses stations expérimentales. Les recherches effectuées par ce centre, avec la collaboration des agronomes du Mexique, des États-Unis et des chercheurs de l'Université du Manitoba au Canada, ont permis de doubler la production de blé du Mexique en moins de 20 ans. Les succès les plus significatifs ont été l'obtention par hybridation de nombreuses variétés résistantes aux rouilles et autres maladies fongiques et virales qui ravageaient les variétés traditionnelles mexicaines et, surtout, l'obtention de variétés **semi-naines** de blé de haut rendement. Ces variétés issues de croisements entre variétés traditionnelles et des variétés naines provenant de l'Asie, telle que la variété Norin-10 produite au Japon, sont plus résistantes à la verse du fait qu'elles possèdent des chaumes plus robustes due à la présence d'entrenœuds renforcés et plus rapprochés. L'avantage de cette structure est que la chaume peut soutenir un épi plus lourd suite à l'ajout d'engrais azotés, ce qui n'était pas le cas pour les plants plus élancés des variétés traditionnelles. Près d'une centaine de variétés semi-naines adaptées à diverses conditions climatiques furent produits par le CIMMYT au cours des années 60 et 70 et ont contribué à l'essor de la révolution verte dans les pays du tiers-monde. Plusieurs de ces variétés furent introduites avec succès dans d'autres pays tels que le Pakistan et l'Inde, dans des régions jusqu'alors relativement marginales pour la culture du blé. L'utilisation de ces variétés a permis au Pakistan de produire suffisamment de blé pour subvenir à ses propres besoins. Dans certaines régions du nord de l'Inde la production de blé, grâce aux nouvelles variétés semi-naines, a augmenté de 8 fois et ce pays s'approche rapidement de l'autosuffisance pour cette céréale. La FAO a annoncé qu'à partir de 1999 la production de blé de l'Inde a systématiquement dépassé celles des États-Unis de 8-15 MTM. Le succès remporté par le programme d'amélioration du CIMMYT fut récompensé par le prix Nobel de la Paix qui fut décerné en 1970 au directeur du programme, le Dr Norman E. Borlaug, pour sa contribution exceptionnelle à l'agriculture mondiale.

### Statistiques sur la production de blé (FAOSTAT 2001, révisée)

La production mondiale de blé en 2001 était de 582,7 MTM répartie dans 123 pays. Les 12 pays producteurs les plus importants étaient en ordre décroissant: la Chine (93,5 MTM), l'Inde (68,5 MTM), les États-Unis (53,3 MTM), la Fédération Russe (46,9 MTM), la France (31,7 MTM), l'Allemagne (22,9 MTM), **le Canada (21,3 MTM)**, l'Australie (23,7 MTM), l'Ukraine (21,3 MTM), le Pakistan (19,0 MTM), la Turquie (16,0 MTM) et le Royaume-Uni (11,6 MTM). En 2001, la superficie mondiale des terres agricoles destinées à la production de blé était de 213.8 millions d'hectares, équivalent à près de 21 % de toutes les terres cultivables du globe. Le rende-

ment moyen par hectare était de 2,73 TM. Des pays comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas et la France avaient des rendements de 6,6 à 7,5 TM/ha, des pays comme les États-Unis, le Canada et l'Australie produisaient en moyenne de 1,5 à 2,8 TM/ha, tandis que certains pays du Tiers-Monde (Algérie, Bolivie et Lesotho) produisaient moins de 1 TM par hectare.

## Le seigle

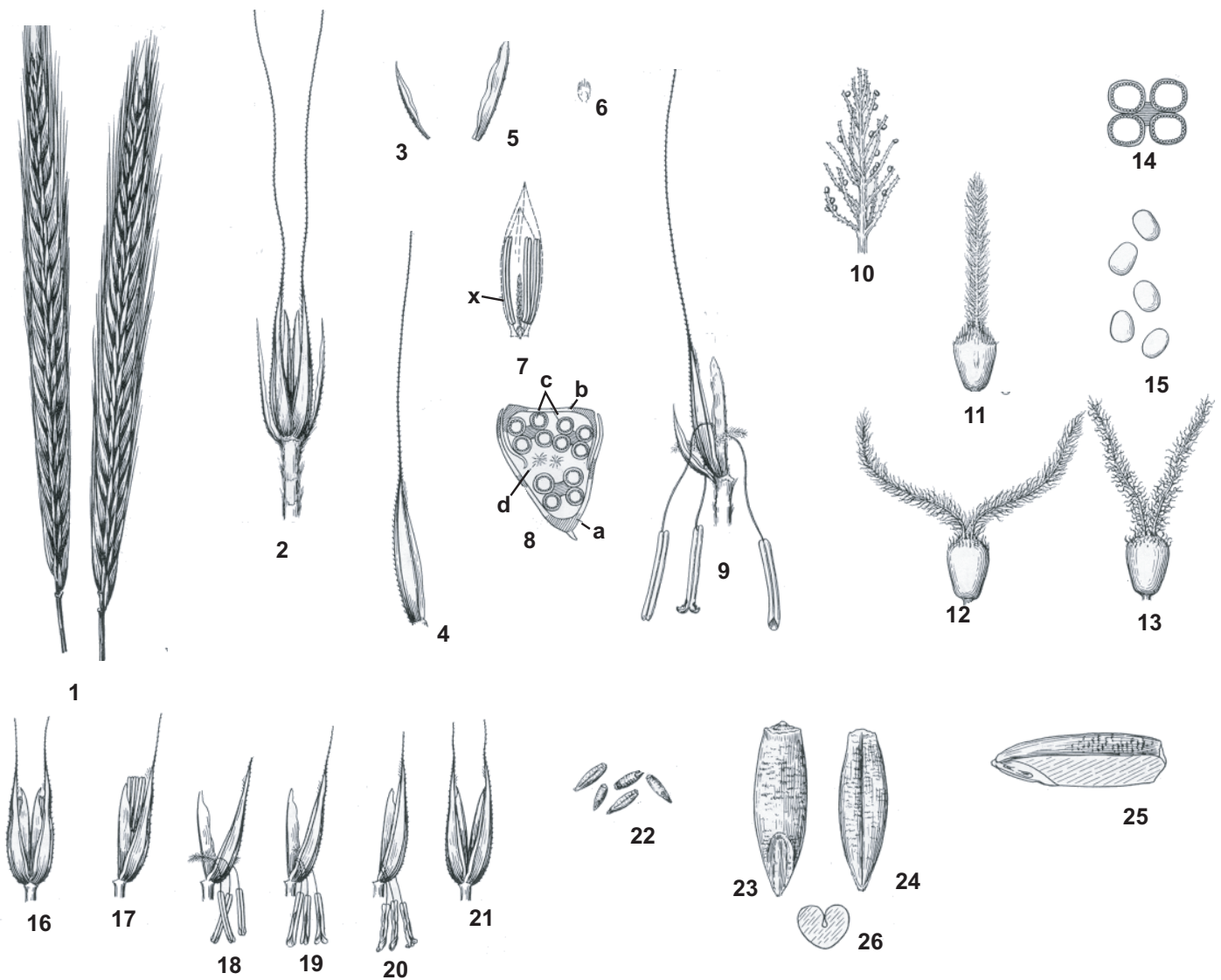
Le seigle (*Secale cereale* L.) est originaire du Moyen-Orient, mais, conjointement avec l'avoine, il est considéré une céréale de culture dite "secondaire", car sa domestication a été retardée en comparaison au blé et à l'orge. L'ancêtre du seigle est *Secale montanum* Guss (2n=14)\*, une espèce vivace morphologiquement très variable, distribuée sur un vaste territoire allant des régions montagneuses des Balkans et de l'Anatolie Turque au Caucase (Asie centrale). Les analyses génétiques et cytogénétiques, renforcées par les analyses comparatives plus récentes d'allozymes et d'ADN, confirment que cette espèce spontanée est l'ancêtre des formes cultivées de seigle. De plus, il a été démontré que les deux espèces s'hybrident spontanément dans certaines régions de l'Anatolie Turque.

Pendant la période de 6 000 ans qui a suivi à la domestication de l'orge et du blé, le seigle spontané était présent uniquement comme "mauvaise herbe" accompagnatrice dans les champs de culture de ces céréales. Les fouilles archéologiques effectuées à Tell Abu Hureyra (Syrie du Nord) rapportent seulement la présence d'épillets provenant d'épis explosifs de *S. montanum* pendant une période de 7 000 à 5 500 années av. J.C. Les premières preuves de modifications de l'épi provoquées par un processus de domestication ne sont clairement évidentes qu'à Catal Hüyük (Turquie) pour des dates remontant à la période de l'Âge de Bronze, soit vers 2 000 av. J.C.(4,000 A.P.). En Europe, les premières preuves tangibles de sa culture remontent à 1 800-1 500 années av. J. C., tel que rapporté suite aux fouilles archéologiques en Slovaquie, en Hongrie, en Allemagne et en Pologne.

Le seigle est une espèce annuelle, diploïde (2n = 14) ayant un port ressemblant à celui du blé mais qui, contrairement aux autres céréales majeures, est principalement, bien que non exclusivement, de fécondation croisée (allogame). A maturité le port du seigle peut atteindre 1,80 cm, bien que des variétés à croissance végétative plus réduite aient été sélectionnées au cours des dernières décennies. La croissance est déterminée et les épis sont produits de façon synchronisée à l'apex des chaumes fertiles. Un seul épillet, inséré à chaque nœud du rachis, contient 3 fleurs dont seulement deux sont en général fertiles. Environ 20 à 30 épillets forment l'épi. Les fleurs sont hermaphrodites et d'une structure semblable à celles du blé et de l'orge, mais les glumelles s'entrouvrent à l'anthesis et les étamines deviennent exposées ce qui facilite la fécondation croisée. Les caryopses, plus allongés et plus étroits que ceux de l'orge et le blé, sont fortement invaginés sur leur longueur (**Figure 8**). Cette espèce possède une photosynthèse en C<sub>3</sub> et est, parmi les céréales majeures des régions tempérées, celle qui est adaptée aux conditions climatiques et édaphiques les plus extrêmes. Les graines peuvent germer à des températures de 1° C et la plante arrive à produire ses graines à des températures aussi basses que 12° C. Le seigle est unique parmi les céréales principales pour son adaptation aux sols acides de type podzolique possédant des pH entre 3.8 et 4.5. Son système racinaire, très développé et très ramifié, peut atteindre plus de 2 m de longueur ce qui permet à la plante de croître sur des sols sablonneux et dans des habitats relativement secs. Toutes ces particularités font du seigle une céréale adaptée à des conditions climatiques et édaphiques qui sont défavorables à la croissance du blé. Il n'est donc pas étonnant que le seigle ait été considéré "le blé des pauvres" dans les régions les plus septentrionales de l'Europe et dans les régions où la pluviométrie est limitée.

---

\* Une deuxième espèce spontanée, *Secale anatolicum*, distribuée dans les régions montagneuses du sud-est de la Turquie, est mentionnée dans la littérature comme étant aussi impliquée dans l'évolution du seigle. Les analyses génétiques et biochimiques indiquent que cette espèce est très proche génétiquement de *S. montanum* et que ce taxon devrait être intégré comme unité infra spécifique à cette dernière.



**Figure 8.** Inflorescence du seigle: 1. Deux épillets en vue latérale. 2. Épillet vue dorsale attaché au rachis. 3. Glume en vue latérale. 4. Lemma en vue latérale. 5. Paléa en vue latérale. 6. Lodicules. 7. Coupe longitudinale d'une fleur durant l'an-thèse montrant la position du gynécée et de l'androcée. 8. Coupe transversale d'un épillet. 9. Vue latérale d'un épillet durant l'an-thèse, avec une glume. 10. Extrémité du stigma. 11 à 13. Pistil (ovaire et stigma) avant, pendant et après l'an-thèse. 14. Coupe transversale d'une anthère. 15. Grains de pollen. 16. Deux fleurs en vue latérale. 17 à 20. Fleur durant les étapes successives de l'an-thèse. 21. Deux fleurs après l'an-thèse. 22. Caryopses (graines). 23. Caryopse en vue dorsale montrant l'embryon. 24. Caryopse en vue ventrale. 25. Caryopse en coupe longitudinale-latérale montrant l'albumen et l'embryon . 26. Caryopse en coupe transversale (modifié de Léonard & Martin 1963).

Contrairement au blé, la farine produite à partir des caryopses de seigle n'a pas la qualité des protéines du gluten pour produire du pain levain. Bien que plus riche en lysine que celle du blé, la concentration de protéines de la farine de seigle est plus basse que celle du blé et le rapport gliadine:gluténine du gluten est fortement déséquilibré. De plus à cause de la structure des caryopses allongés, il est difficile de séparer le germe et les couches du péricarpe de l'albumen lors de la préparation des farines. Par conséquent, la farine qui en résulte est colorée et devient rance très rapidement. Cette farine produit des pains lourds, difficiles à digérer, et il est coutume de la mélanger à part égale avec de la farine de blé pour produire des pains plus légers qui sont vendus comme pains de seigle. Ces particularités réduisent l'importance de cette céréale et sa production n'a jamais été très élevée dans les régions favorables à sa culture. En Amérique du Nord, bien plus qu'en Europe, une proportion importante de sa production, qui peut atteindre certaines années plus de 70 % de la production locale, est des-

tinée à l'alimentation du bétail. À cause de sa rusticité et de son système racinaire particulièrement développé, le seigle est aussi planté pour contrôler l'érosion de certains sols fragiles et en pente. Environ 10-15 % de la production est aussi destinée à la fermentation et production de whisky de seigle (rye whisky) en Amérique du Nord et de gin hollandais aux Pays-Bas. L'intérêt pour le seigle s'est accentué au cours des trois dernières décennies du fait que cette espèce rustique a pu être croisée avec le blé pour obtenir le premier hybride inter générique créé par l'homme, le Triticale.

### Statistiques de production mondiale de seigle (FAOSTAT 2001, révisée)

La production mondiale du seigle en 2001 était de 22,7 MTM distribuée sur 9,7 millions d'hectares dans 58 pays. Les principaux pays producteurs étaient, en ordre décroissant : la Fédération Russe (6,0 MTM), l'Allemagne (5,2 MTM), la Pologne (4,9 MTM), le Bélarus (1,5 MTM) et l'Ukraine (1,5 MTM). **Le Canada était placé en 15<sup>me</sup> place avec une production de 193,000 TM**. La production moyenne par hectare était de 2,35 TM et, dépendant des pays, variait entre 5,8 (Allemagne, Royaume-Uni) et 0.05 TM par hectare ( Pérou, Bolivie).

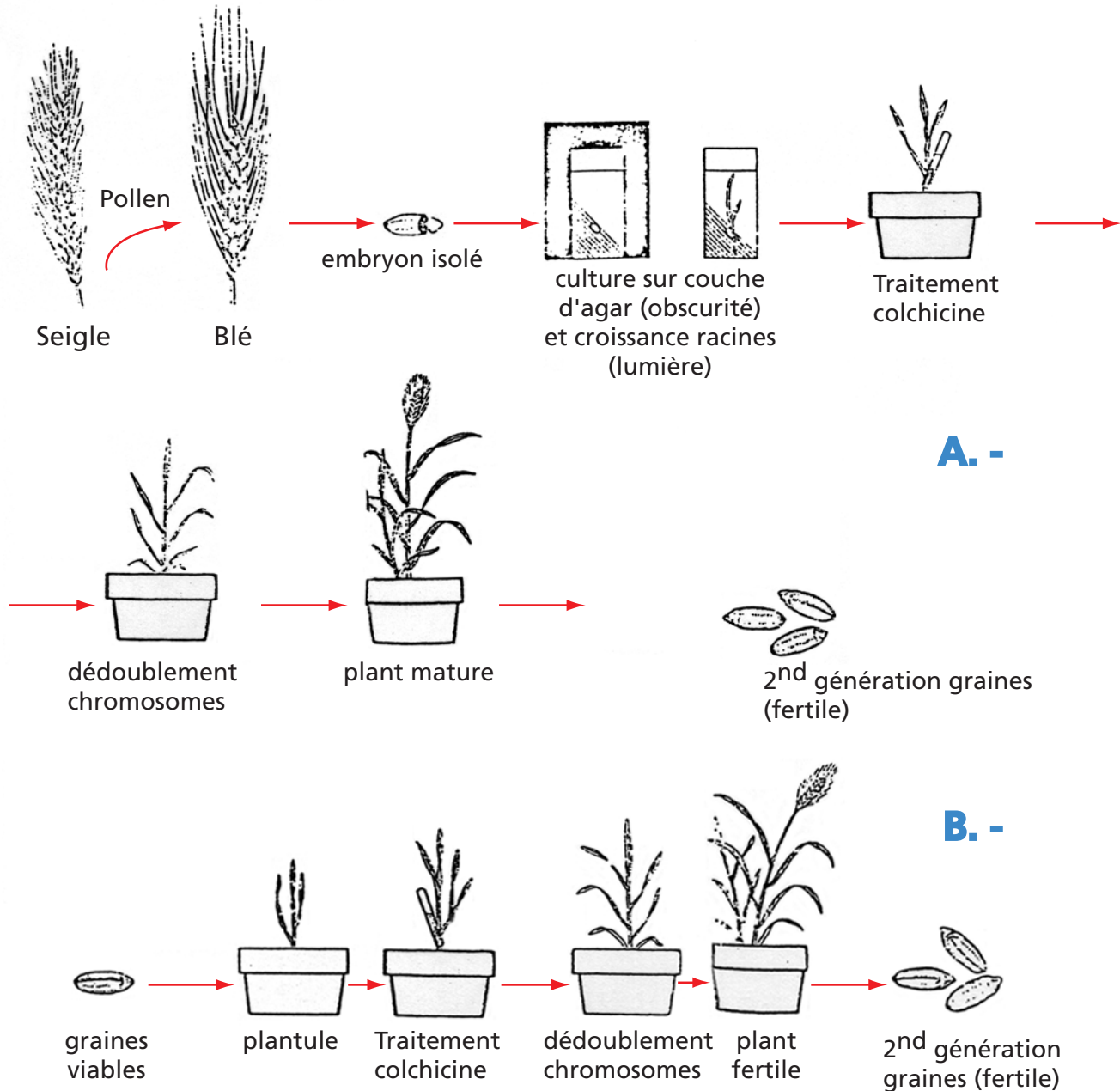
### Le Triticale:

Parmi les céréales majeures des régions tempérées, le blé et le seigle sont reconnus comme étant les plus similaires du point de vue morphologique et génétique, ce qui leur a valu d'être placés dans la même sous-tribu Triticineae. Depuis déjà plus d'un siècle, les agronomes et généticiens ont essayé de croiser ces deux espèces afin de combiner les qualités de la farine du blé à la rusticité et à l'adaptation aux conditions extrêmes de climats et de sols du seigle. Les premiers croisements intentés en 1876 par l'Anglais A. Stephen Wilson ont produit une plante hybride qui était malheureusement stérile. En 1889, l'Allemand W. Rimpau a amélioré la situation en obtenant un hybride partiellement fertile mais de très basse productivité. A partir de 1935, un programme de croisements ambitieux fut établi en Suède par le généticien très connu A. Muntzing, mais les méthodes conventionnelles n'ont produit que des hybrides dont la fertilité était très basse, voire nulle. Ce n'est qu'en 1937 avec l'apport de la colchicine, un alcaloïde extrait d'un crocus (*Colchicum autumnale*, Fam. Liliaceae), qui interfère avec les divisions des cellules mitotiques, que le Français Pierre Givaudon obtient le premier hybride amphiploïde fertile par le biais d'une duplication du complément chromosomique. À partir de 1959, un programme de collaboration étroite fut lancé entre les chercheurs de l'Université du Manitoba au Canada et du CYMMIT au Mexique. Ce programme eu comme but de produire des variétés commerciales de *Tritico X secale* dont le nom vernaculaire est devenu triticale. Tenant compte des différences entre les deux espèces, tant dans le nombre que dans la morphologie de leurs chromosomes, la technique utilisée impliquait la polyploïdisation à l'aide de la colchicine et l'isolement et la culture *in vitro* de l'embryon. Ce qui a eu comme résultat de contre-carrer les effets négatifs provoqués par l'incompatibilité embryon-albumen qui affecte la viabilité des embryons hybrides lors de la germination (**Figure 9**). La première variété commerciale de triticale hexaploïde produite, nommée "Armadillo", a été obtenue à la suite d'un programme rigoureux de sélection des progénitures issues d'un croisement entre une variété semi-naine tétraploïde de blé et une variété commerciale de seigle. Par la suite d'autres variétés de triticale octoploïdes ont été obtenues en doublant le complément chromosomique d'hybrides résultant de croisements de blés hexaploïdes et de seigle .

Deux sortes de variétés de triticales peuvent être produites dépendant des sources des plantes utilisées pour les croisements. Les triticales primaires impliquent des croisements entre des plantes de blés tétraploïdes ou hexaploïdes et des plantes de seigle, tandis que les triticales secondaires sont, soit le résultat d'hybridations entre triticales primaires, soit le produit d'un croisement entre un triticale et une variété ou cultivar de seigle ou de blé qui n'était pas impliquée dans la formation initiale de ce partenaire triticale. Plusieurs des triticales produits dans des périodes récentes sont des triticales secondaires.

Les triticales qui ont été certifiées comme variétés ou cultivars commerciales produisent des caryotypes qui ont

la même teneur en protéines que le blé mais des concentrations de lysine et de tryptophane plus élevées. Les triticales poussent avantageusement sous des conditions climatiques marginales ou limitantes pour la culture du blé. Dans ces régions, la production des triticales est significativement plus élevée que celle des deux parents et, dans certains cas, peut même approcher celle du blé planté sous des conditions non-limitantes. Bien que la farine préparée à partir des caryopses de triticales ne possède pas la même qualité du gluten que celle du blé pour produire du pain levain, elle est très améliorée par rapport à celle du seigle. Dans certains pays producteurs,



**Figure 9.-** Les graines issues d'un croisement entre le blé et le seigle sont normalement stériles bien qu'elles peuvent germer et produire des plantules. Dans le cas où les graines issues des croisements ne peuvent germer (à cause d'incompatibilités entre l'embryon et l'albumen) on utilise la culture d'embryons issus de graines immatures (14 à 20 jours après la fertilisation). Ces embryons sont cultivés in vitro sur couche d'agar à l'obscurité en présence de substances nutritives et l'enracinement des plantules est effectué à la lumière. Par la suite, l'on applique de la colchicine sur le méristème ce qui provoque une interférence de la division mitotique qui résulte en une duplication du nombre chromosomique (polyploïdie). Les plantes qui sont issues de ce traitement sont fertiles et produisent des graines de triticales viables (A). La culture d'embryons n'est pas nécessaire dans le cas où les graines issues du croisement germent et produisent des plantules viables (B) (modifié de Hulse & Spurgeon 1974).



la farine des triticales est mélangée à celle du blé et ce mélange peut se substituer sans diminution de qualité appréciable à la farine provenant exclusivement du blé.

### **Statistiques de production mondiale de triticales (FAOSTAT 2001, révisée)**

La production mondiale de triticales pour 2001 a été estimée par la FAO à 11,7 MTM répartie dans 23 pays. Les principaux pays producteurs sont, en ordre décroissant: l'Allemagne (3,5 MTM), la Pologne (2,7 MTM), La Chine (1,65 MTM), la France (1,12 MTM) et l'Australie (0,8 MTM). Le rendement par hectare a varié entre 6 TM (Allemagne, Suisse, BENELUX) et 1,3 TM (Australie, Portugal). La superficie couverte par la culture du triticales en 2001 était d'environ 3,1 millions d'hectares. En 2001 seulement 48 % de la production était destinée à l'alimentation du bétail. Cette proportion représente une réduction de près de 28 % par rapport à 1970 et nous indique que cette céréale joue un rôle de plus en plus important dans l'alimentation humaine directe.

### **Références**

- Appels, R. , Baum, M,& Ladugah, E. S. (1992) Wide crosses in cereals. *Annu. Rev. Plant Physiol. & Mol. Biol.* 43: 117-143
- Chen, K. *et al.* (1976) Fraction I protein and the origin of polyploid wheats. *Science* 190 : 1304-1306.
- Cocking, E. C. & M. R. Davey (1987) Gene transfer in cereals. *Science* 236 (4806): 1259-1262.
- De la Pena, A. *et al.* (1987) Transgenic rye plants obtained by injecting DNA into young floral tillers. *Nature* 325: 274-276.
- Dvorak, J. & Zhang, H.-B. (1990) variation in repeated nucleotide sequences sheds light on the phylogeny of the wheat B and G genomes . *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 87: 9640-9644.
- Feldman, M. & E. R. Sears (1981) The wild gene resources of wheat. *Scientific American* 244 (1): 102-112.
- Gepts, P. (1993) The use of molecular and biochemical markers in crop evolution studies. *Evol. Biol.* 27: 51-94.
- Goodman, R. M. *et al.* (1987) Gene transfer in crop improvement. *Science* 236: 48-54.
- Gustafson, J. P. (1976) The evolutionary development of Triticales: the wheat-rye hybrid. *Evol. Biol.* 9 : 107-135.
- Harlan, J. R. (1992) *Crops and man*. A.S.C.A.S., Madison, Wisconsin. pp. 107-121; pp. 171-189.
- Harlan, J. R. (1987) *Les plantes cultivées et l'Homme*. Presses Universitaires de France, Paris. Ch. 6: pp. 155-186; Ch. 8: pp. 211-236.
- Harlan, J. R. *et al.* (1973) Comparative evolution of cereals. *Evolution* 27: 311-325.
- Heiser, C. B. (1990) *Seeds to civilization: The story of man's food*. Freeman, San Francisco. pp. 67-79.
- Hulse, J. H. & D. Spurgeon (1974) Triticales. *Scientific American* 231(2): 72-81.

- Janick, J. *et al.* (1974) *Plant Science*. W. H. Freeman, San Francisco, California. pp. 355-359.
- Kislev, M. E. (1984) Emergence of wheat agriculture. *Paleorient* 10: 61-70.
- Lewington, A. (1990) *Plants for people*. Oxford Univ. Press. New York.
- Mori, N. *et al.* (1995) Wheat phylogeny determined by RFLP analysis of nuclear DNA. *Theor. Appl. Genet.* 90: 129-134.
- Petersen, L. *et al.* (1994) Genetic diversity among wild and cultivated barley as revealed by RFLP. *Theor. Appl. Genet.* 89: 676-681.
- Potrychus, I. (1992) Gene transfer in plants: Assessment of published approaches and results. *Annu. Rev. Plant Physiol. & Mol. Biol.* 42: 205-225.
- Power, J. F. & R. F. Follett (1987) Monoculture. *Scientific American* 256(3): 78-87.
- Reitz, L. P. (1970) New Wheats and social progress. *Science* 169: 952-955.
- Simpson, B. B. & Ogorzaly, M. C. (1995) *Economic Botany : Plants of our world*. McGraw Hill, Inc., New York. 2ème édition). pp. 172-177; pp. 499, 500, 655.
- Smith, B. D. (1996) The emergence of Agriculture. *Scientific American Library*. HPHLP. New York. pp. 69-71; pp. 1184-100.
- Waisel, Y. (1987) Evolution of erect growth in domesticated wheat: possible effects of grazing. *Oecologia* 73 : 630-632.
- Zohary, D. & Hopf, M. (1988) *Domestication of plants in the old world*. Oxford Univ. Press, Londres & New York.
- Zohary, D. (1969) The progenitors of wheat and barley in relation to domestication and agricultural dispersal in the old world. In " *The domestication of plants and animals* (Ucko, P. *et al.* editeurs).pp. 47-66.