

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر –

Université Saïda– Dr MoulayTahar–

Faculté des sciences



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de MASTER en biologie**

**Spécialité** : biotechnologie et génomique végétale

Par :Hadj Mohamed Zouaouia

---

### Les méthodes d'amélioration de la culture des céréales par voie biotechnologique

---

Soutenu, le 21/ 06/ 2023, devant le jury composé de

<b>Mme Hammou Bakhta</b>	Président
<b>Mme Fares Souria</b>	Examineur
<b>Melle Chikhi Amira</b>	Encadrante

2022/ 2023



*Je dedie ce travail à ...*

*Mes chères parents, mostepha et khaira*

*Mes frère, Youcef, Ahmed et Omar*

*Mes Adorables sœurs, Sabah, Maimouna et Chahrazed*

*Mon cher mari, Mohamed, Je tiens particulièrement à te  
remercier de m'avoir soutenu et accompagné tout au long  
de ce parcours.*

*À mes enfants bien-aimés, ma plus grande source de joie  
et d'inspiration*

*"Rayane, Anis et Chahine",*

*À tous mes enseignants de la spécialité BTV*

*Zouaouia*

## **Remerciements**

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma gratitude à Dieu pour Sa Bonté et Sa bénédiction, qui ont été d'un soutien moral et une source d'inspiration et de clarté tout au long de l'accomplissement de mon travail.*

*Mon respect et ma gratitude envers :*

*Ma encadrante : Docteur **Chikhi Amira** Pour sa clair voyance, soutient, Assistance, sens de la responsabilité et niveau aiguisé d'encadrement scientifique qui ont été d'un apport considérable dans mon approche du sujet et son traitement. Je ne vous remercierais*

*Je tiens à remercier les membres du jury,*

*Madame **Fares Souria** et Madame **Hammou Bakhta**, pour leur précieuse contribution à l'évaluation de mon travail.*

*Je remercie également*

*madame **Hachem Yasmina**, madame **Hassani Maya**. pour leurs paroles encourageantes et leur soutien précieux .*

*Mes Enseignants de la spécialité Biotechnologie et Génomique Végétale pour leurs pertinence, patience et disponibilité en qualité d'enseignants d'une abnégation inouïe.*

*Enfin, Mes remerciements à tout le staff pédagogique et administratif de notre Département.*

## Résumé :

Ce mémoire de master en biotechnologie explore les techniques utilisées pour améliorer la culture des céréales afin de relever les défis actuels tels que les changements climatiques, la diminution des terres arables et l'augmentation de la demande alimentaire mondiale. Les méthodes traditionnelles d'amélioration des céréales sont limitées par la variation génétique naturelle et la lenteur du processus. Par conséquent, la biotechnologie offre une approche prometteuse en permettant une identification rapide des caractéristiques génétiques souhaitables, la création de variétés résistantes et productives, et la production de céréales plus nutritives.

Le mémoire examine les méthodes classiques et modernes d'amélioration des plantes, y compris l'utilisation de marqueurs moléculaires et la culture *in vitro*. L'importance de l'amélioration des céréales par biotechnologie pour renforcer la sécurité alimentaire mondiale est soulignée, en particulier dans le contexte de la pandémie de COVID-19.

En conclusion, ce mémoire met en évidence le rôle crucial de la biotechnologie dans l'amélioration de la culture des céréales. Grâce à des approches biotechnologiques, il est possible de développer des variétés de céréales résistantes aux maladies, tolérantes à la sécheresse et à haut rendement, contribuant ainsi à assurer la sécurité alimentaire mondiale.

**Mots clés :** céréales, biotechnologie, culture *in vitro*, marqueurs moléculaires, COVID-19, sécurité alimentaire.

## Abstract:

This master's thesis in biotechnology explores the techniques used to improve cereal cultivation to address current challenges such as climate change, decreasing arable land, and increasing global food demand. Traditional methods of cereal improvement are limited by natural genetic variation and the slow process involved. Therefore, biotechnology offers a promising approach by enabling the rapid identification of desirable genetic traits, creating resilient and productive cereal varieties, and producing nutritionally enhanced crops.

The thesis examines both classical and modern methods of plant improvement, including the use of molecular markers and *in vitro* cultivation techniques. The importance of biotechnological advancements in cereal cultivation for enhancing global food security is emphasized, particularly in the context of the COVID-19 pandemic.

In conclusion, this thesis highlights the crucial role of biotechnology in cereal cultivation improvement. Through biotechnological approaches, it becomes possible to develop disease-resistant, drought-tolerant, and high-yielding cereal varieties, thereby contributing to global food security.

**Keywords:** cereals, biotechnology, *in vitro* culture, molecular markers, COVID-19, food security.

## الملخص:

يستكشف هذا البحث في علوم التكنولوجيا الحيوية التقنيات المستخدمة لتحسين زراعة الحبوب لمواجهة التحديات الحالية مثل التغيرات المناخية وتناقص الأراضي القابلة للزراعة وزيادة الطلب الغذائي العالمي. تقتصر الطرق التقليدية لتحسين الحبوب على التنوع الوراثي الطبيعي والعملية البطيئة المرتبطة بها. لذلك، توفر التكنولوجيا الحيوية نهجًا واعدًا عن طريق تمكين التعرف السريع على الصفات الوراثية المرغوبة، وخلق أصناف حبوب قوية ومنتجة، وإنتاج محاصيل أكثر تغذية.

يستعرض هذا البحث الطرق التقليدية والحديثة لتحسين النباتات، بما في ذلك استخدام العلامات الجزيئية وتقنيات الزراعة في الأنابيب. يؤكد أهمية التقدم التكنولوجي في زراعة الحبوب لتعزيز الأمن الغذائي العالمي، خاصة في سياق COVID-19

في الختام، يسلط الضوء على الدور الحاسم للتكنولوجيا الحيوية في تحسين زراعة الحبوب. من خلال النهج التكنولوجي، يصبح من الممكن تطوير أصناف حبوب مقاومة للأمراض، ومتحملة للجفاف، ومرتفعة الإنتاجية، وبالتالي المساهمة في الأمن الغذائي العالمي.

**الكلمات المفتاحية:** الحبوب، التكنولوجيا الحيوية، زراعة خارج الجسم، العلامات الجزيئية، كوفيد-19 ، الأمن الغذائي

## Table Des matières

Résumé .....	
ملخص .....	
Table des matière .....	
Liste des abréviations.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures .....	
Introduction.....	01

### Chapitre I : Généralité des céréales

I.	Définition des céréales .....	02
II.	Origine et historique de la céréaliculture .....	03
III.	Les types des céréales .....	04
	Le blé .....	04
	Le blé tendre .....	04
	Le blé dur .....	04
	Le maïs .....	04
	Le riz.....	05
	L orge .....	06
	Le sorgho .....	07
	Le seigle.....	07
	Le millet .....	08
IV.	Structure et composition de la graine de céréales .....	08
V.	Situation des céréalicultures .....	11
	a. La céréaliculture dans le monde .....	11
	b. La céréaliculture en Algérie .....	12

### Chapitre II : L'amélioration des plantes cas des céréales

I.	Définition .....	14
II.	Historique .....	14
III.	Chronologie de l'amélioration des plantes .....	14
IV.	Objectif de l'amélioration des plantes .....	17
	A. L'amélioration de la productivité .....	17
	B. L'adaptation des plantes au milieu .....	17
	C. La qualité.....	18
V.	Propriétés nutritionnelle des céréales améliorés .....	18
VI.	Qualité des céréales et exigence du processus .....	18
VII.	Les méthodes d'amélioration des plantes cas des céréales .....	19
VII.1.	Les méthodes classiques .....	20
	1.1. Domestication .....	20
	1.2. Sélection classique .....	21
	A.La sélection massale .....	22
	B. La sélection généalogique .....	23
	C. La sélection par méthode de Bulk .....	24
	D. La sélection par méthode SSD.....	24
	E. La rétrocroisement ou back cross .....	24
	F. La sélection conservatrice .....	26
VII.1.3.	Hybridation des plantes .....	27
	A. Hybridation intraspécifique .....	28
	B. Hybridation interspécifique .....	28
VII.2.	Les méthodes modernes ou biotechnologiques .....	29

VII.2.1	Définition de la biotechnologie .....	29
VII.2.2	Les types d'amélioration des génétique plantes .....	29
a)	La culture <i>in vitro</i> .....	30
b)	La transgénèse .....	34
c)	La mutagenèse .....	38
d)	L'hybridation somatique .....	39
e)	Le séquençage .....	39
f)	La sélection assistée par marqueurs moléculaires .....	40

## **Chapitre III : L'impact de la pandémie covid-19 et la guerre Russo Ukrainienne sur la céréaliculture**

I.	Introduction .....	44
II.	Définitions .....	44
	La sécurité alimentaire .....	44
	La pandémie .....	44
	Généralité sur la pandémie covid-19 .....	44
III.	La situation de la sécurité alimentaire.....	45
a.	Dans le monde .....	45
b.	En algerie.....	45
IV.	L'impact de la pandémie de covid-19.....	46
a.	Perturbation de la chaine d'approvisionnement .....	46
b.	Reduction de la main d'œuvre .....	47
c.	Volatilité des prix .....	48
d.	Insécurité alimentaire accrue .....	48
V.	L'impact de la pandémie de covid -19 sur la céréaliculture en particulier .....	49
VI.	L impact de la guerre Russo Ukrainienne sur la céréaliculture.....	49
VII.	Une crise au pire moment, compte tenue de l'évolution démographique de l'Afrique.	50
	Discussion Générale .....	52
	Conclusion.....	54
	Référence bibliographique .....	
	Annexe.....	

## Liste des abréviations:

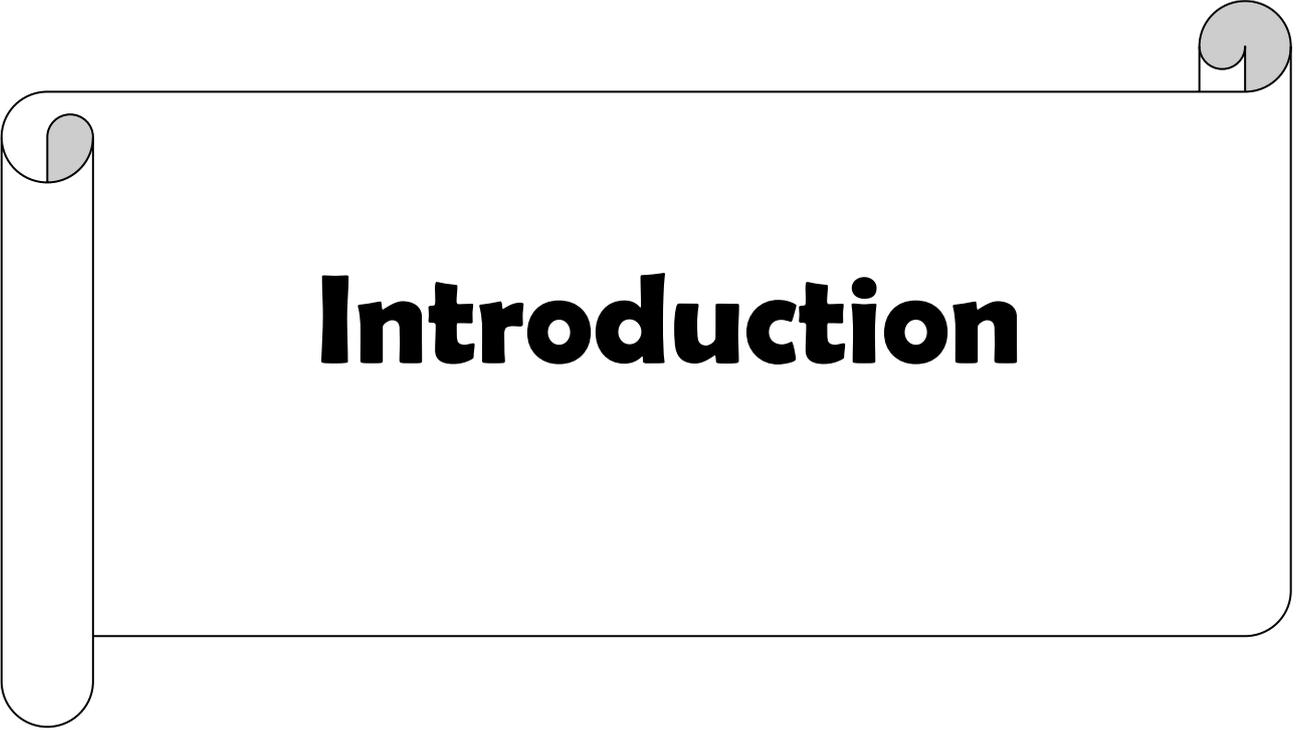
- ADN :** Acide Désoxyribo Nucléique
- AFLP :** Polymorphisme de longueur des fragments amplifiés
- ARNm :** Acide Ribo nucléique
- Bt :** Bacillus thuringiensis
- CEE :** Central and Eastern Europe
- CIC :** Conseil International des Céréales
- CNV :** Variabilité d'un nombre de copies
- D-ATP :** Deoxy Adénosine Triphosphate
- D-CTP :** Deoxy Cytidine Triphosphate
- D-GTP :** Deoxy Guanosine Triphosphate
- D-TTP :** Deoxy Thymidine Triphosphate
- EST :** Marqueur de Séquence Exprimé
- FAO :** Food and Agriculture Organization
- FDA :** Food and Drug Administration
- FFPI :** Fédération Française des Pétroliers Indépendants
- FMI :** Fonds Monétaire International
- IPC :** Indice Des Prix à la Consommation
- NGS :** Next Generation Sequencing
- OCDE:** Organisation de Coopération et de Développement Économiques
- OGM :** Organisme Génétiquement Modifié
- ONU :** Organisation des Nations Unies
- PAM :** Programme Alimentaire Mondiale
- PME :** Petites et Moyennes Entreprises
- QTL :** Quantitative Trait Locus
- RAPD :** Amplification Aléatoire d'ADN Polymorphe
- RFLP :** Polymorphisme de Longueur de Fragments de Restriction
- SAM:** Sélection Assistée par Marqueurs
- SAU :** Surface Agricole Utile
- SNP :** Polymorphisme Nucléotidique
- SSCP:** Polymorphisme de Conformation des Simple Brins
- SSD :** Single Seed Décent
- SSLP :** Simple Séquence Length Polymorphisme
- SSR:** Simple Séquence Repeat ou Polymorphisme de Microsatellite

## Liste des tableaux:

<b>Tableau 01</b> :Composition biochimique des grains de céréale.....	11
<b>Tableau02</b> :Avancées majeures en génétique et méthodes d'amélioration des plantes.....	15
<b>Tableau 03</b> :Techniques de culture <i>in vitro</i> et leurs principales applications.....	34
<b>Tableau 04</b> :Exemples de gènes majeurs de résistance aux maladies chez le blé tendre.....	43

## Liste des figures:

<b>Figure 01</b> : La taxonomie des céréales.....	02
<b>Figure 02</b> :Le blé tendre.....	04
<b>Figure 03</b> : Le blé dur.....	04
<b>Figure 04</b> : Le maïs.....	05
<b>Figure 05</b> : Le riz.....	05
<b>Figure 06</b> :L'org.....	06
<b>Figure 07</b> :Les organo.....	07
<b>Figure 08</b> : Le seigle.....	07
<b>Figure 09</b> : Le millet.....	08
<b>Figure 10</b> : Schéma d'un grain de céréales.....	09
<b>Figure 11</b> : Production céréalière, utilisation et stocks (2011-2021).....	12
<b>Figure 12</b> :Evolution des rendements céréaliers (Qx/Ha) en Algérie.....	13
<b>Figure 13</b> : L'échèle de temps de l'origine de l'amélioration des plantes .....	17
<b>Figure 14</b> : Les changements métaboliques concomitants à la domestication et à l'amélioration des céréalesprincipales.....	20
<b>Figure 15</b> : La sélection massale.....	22
<b>Figure 16</b> : La sélection généalogique.....	23
<b>Figure 17</b> : La sélection par méthode de Bulk.....	24
<b>Figure 18</b> : Rétrocroisement ou back cross dans d'un gène de résistance dominant.....	25
<b>Figure 19</b> : L'hybridation. ....	27
<b>Figure 20</b> :Les applications de la culture <i>in vitro</i> .....	33
<b>Figure 21</b> : Les différentesstratégies de transgénèse.....	36
<b>Figure 22</b> : Une technique d'obtention du maïs Bt. ....	37
<b>Figure 23</b> : Quelques gènes localisés sur les chromosomes de blé.....	40
<b>Figure 24</b> : Comparaison des principales techniques de marquage moléculaire.....	42
<b>Figure 25</b> : Interdépendances au sein de la chaîne d'approvisionnement mondiale et impacts de la COVID-19.....	47
<b>Figure 26</b> : évolution des prix des matières premières de janvier 2020 a aout2021.....	48
<b>Figure 27</b> : Évolution des cours du blé et du Brent en 2022 .....	50
<b>Figure 28</b> : chronologie des interventions en Ukraine par rapport au calendrier cultural .....	51



# **Introduction**

### **Introduction:**

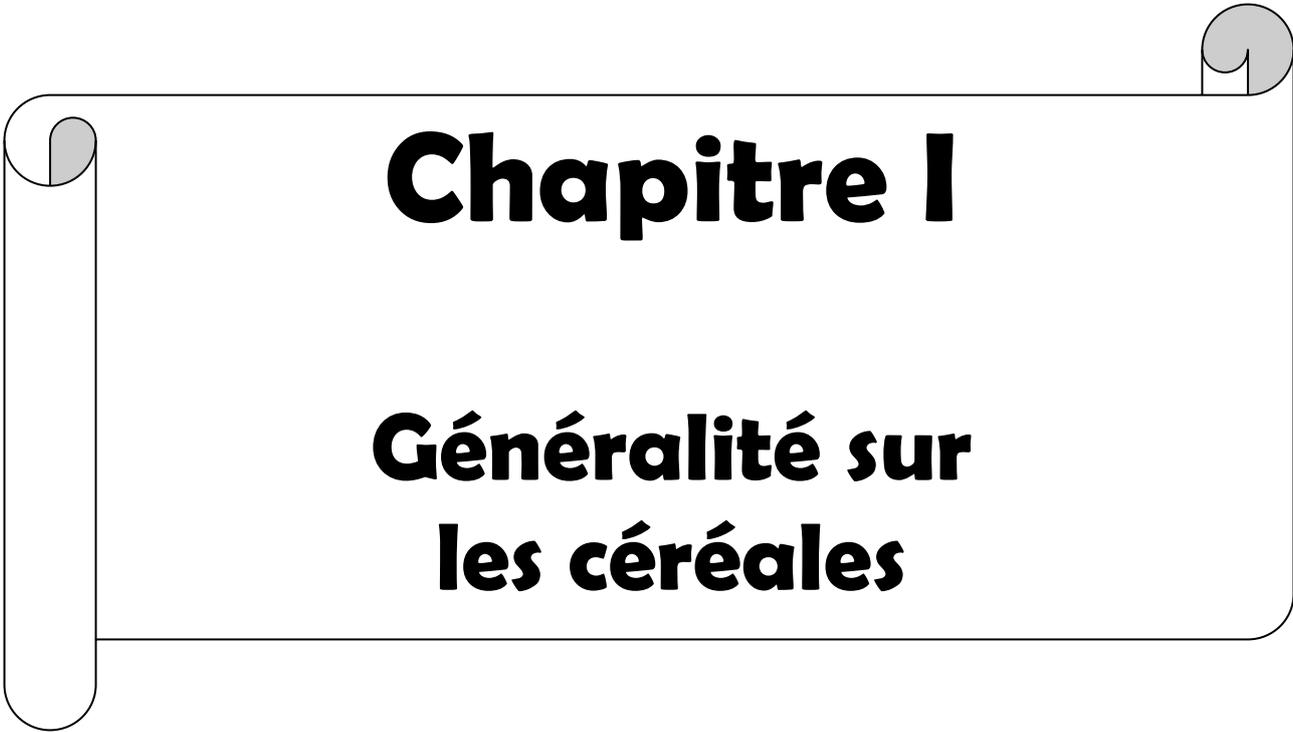
La culture des céréales est une activité vitale pour de nombreuses régions du monde, fournissant une grande partie des calories consommées par les humains et les animaux d'élevage. Cependant, nous sommes confrontés à de nombreux défis, tels que les changements climatiques, la diminution des terres arables et l'augmentation de la demande alimentaire mondiale (**FAO, 2018**). Pour faire face à ces défis, l'amélioration des céréales est nécessaire afin d'augmenter leur résistance aux maladies, leur tolérance à la sécheresse et leur rendement.

L'amélioration des céréales a été réalisée pendant des siècles par des méthodes traditionnelles, telles que la sélection de plantes individuelles pour la reproduction et la création de nouvelles variétés par hybridation (**Doe, 2005**). Cependant, ces méthodes prennent du temps et peuvent être limitées par la variation génétique naturelle.

C'est pourquoi l'utilisation de la biotechnologie pour améliorer la culture des céréales est devenue une option attrayante (**Smith et al., 2010**). Elle permet d'identifier rapidement les caractéristiques génétiques souhaitables dans les céréales, de créer de nouvelles variétés plus résistantes et productives, ainsi que de produire des céréales plus nutritives.

L'objectif de ce mémoire est d'examiner les différentes techniques de biotechnologie utilisées pour améliorer la culture des céréales et leur importance pour la sécurité alimentaire mondiale. On explore les méthodes classiques et modernes d'amélioration des plantes, ainsi que l'utilisation de marqueurs moléculaires pour accélérer le processus d'amélioration des céréales. Il est important aussi d'aborder les techniques culturales innovantes telles que la culture *in vitro*.

Enfin, on va examiner la situation de la sécurité alimentaire mondiale pendant la pandémie de COVID-19 et l'impact de la guerre Russo Ukrainienne sur la céréaliculture et comment l'amélioration de la culture des céréales par biotechnologie peut contribuer à renforcer la sécurité alimentaire dans le monde.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges showing a greyish shadow. The text is centered within the scroll.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les céréales**

**Généralité sur les céréales**

**I. Définition des céréales**

Une céréale est une plante cultivée principalement pour ses grains utilisés dans l'alimentation humaine et animale domestique (**Bénédictte, 2016**). La plupart des céréales appartiennent à la famille des Graminées (ou Poacées), notamment le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le maïs, le riz, le millet et le sorgho. Certains appartiennent à la sous-famille des *Festucoïdées*, tels que le blé, l'orge, l'avoine et le seigle, tandis que d'autres appartiennent à la sous-famille des *Panicoïdées*, comme le maïs, le riz, le sorgho et le millet. Une céréale distincte, le sarrasin, appartient à une autre famille, celle des Polygonacées (**Moule, 1971**).

Les céréales et leurs dérivés constituent les principales ressources alimentaires de l'humanité en raison de leur apport en énergie et de leur forte teneur en protéines. Elles sont principalement destinées à l'alimentation humaine, représentant environ 75% de la production agricole mondiale. Ces cultures jouent un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire en fournissant une source abondante de calories et de nutriments essentiels. De plus, elles contribuent à environ 15% des besoins énergétiques de la population mondiale. Outre leur utilisation dans l'alimentation humaine, les céréales sont également utilisées dans l'alimentation animale, représentant environ 40% de la production totale d'aliments pour animaux. Par ailleurs, elles trouvent des applications non alimentaires, notamment dans la production de biocarburants et de matériaux industriels (**FAO, 2019**).

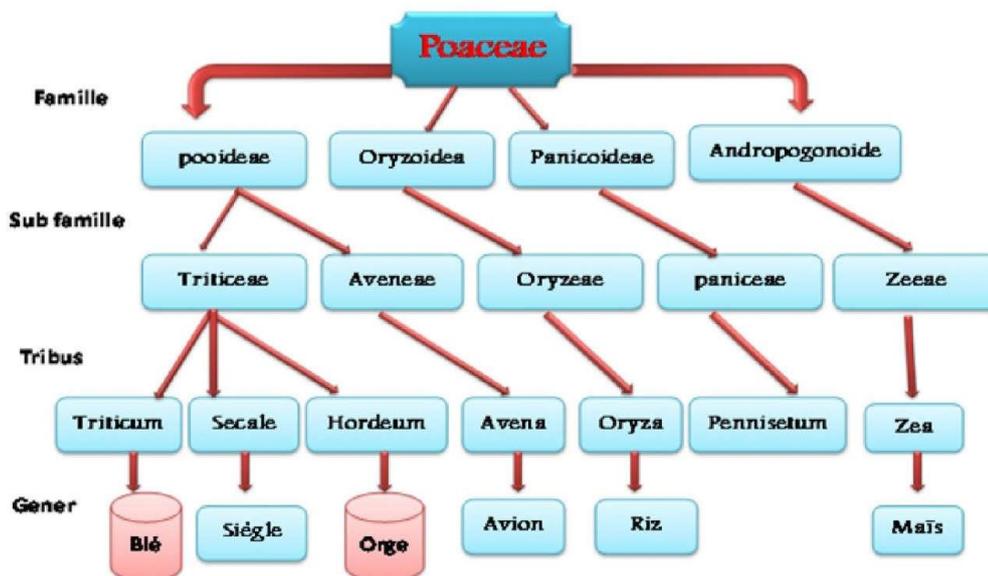


Figure 01 : La taxonomie des céréales. (Zibouche, 2016)

## II. Origine et historique de lacéréaliculture :

Les céréales, Cérès est le nom de la déesse romaine des champs qui a donné l'origine du mot céréales apparu au 19<sup>ème</sup> siècle, pour désigner ce que nos ancêtres appelaient jusqu'alors « les blés ». Cérès est la transposition, chez les Romains, de la déesse grecque Déméter. (Mesrane, 2018)

Les céréales ont une longue histoire d'utilisation par l'humanité, remontant à des milliers d'années. Leur origine peut être retracée dans différentes régions du monde, où elles ont joué un rôle clé dans le développement des civilisations. (Harlan, 1995)

Les premières traces de cultures céréalières remontent à l'époque du Néolithique. Des découvertes archéologiques indiquent que des céréales telles que le blé, le seigle, l'avoine et l'orge à six rangs étaient cultivées dans des régions telles que le Croissant fertile au Moyen-Orient. Ces cultures ont permis de passer d'une économie de chasse et de cueillette à une économie agricole basée sur l'agriculture et la sédentarisation des populations (Moule, 1971).

Dans d'autres régions du monde, différentes céréales ont émergé et ont joué un rôle crucial dans le développement des civilisations. Par exemple, le riz est originaire d'Asie, où il a été cultivé depuis plus de 7 000 ans. Le riz a été une culture vitale pour de nombreuses civilisations asiatiques, fournissant une source alimentaire essentielle pour des millions de personnes (Huang et al., 2012).

De même, le maïs est originaire des Amériques, où il a été domestiqué il y a environ 9 000 ans. Les civilisations précolombiennes d'Amérique centrale et du Sud, telles que les Mayas et les Aztèques, ont prospéré grâce à la culture du maïs. Cette culture était à la base de leur alimentation, de leur économie et de leur culture, et elle était considérée comme sacrée (Smith, 1995).

Les céréales ont également joué un rôle majeur dans les civilisations anciennes de l'Égypte et de la Mésopotamie. Le blé, en particulier, était une culture fondamentale dans ces régions. Il était utilisé pour produire du pain, une denrée de base dans l'alimentation quotidienne des populations. Le blé était également vénéré et associé à des rituels religieux et à des divinités (Redding, 2011).

L'origine des céréales est donc étroitement liée à l'histoire de l'agriculture et du développement des civilisations à travers le monde. Leur domestication et leur utilisation ont permis aux populations humaines de passer d'une économie de subsistance à une production agricole plus durable. Aujourd'hui, les céréales restent l'une des principales sources de nourriture pour l'humanité, fournissant des calories et des nutriments essentiels à des millions de personnes dans le monde (FAO, 2019).

### III. Les types des céréales

#### Le blé

Le terme "blé" désigne plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum*. Il s'agit de plantes annuelles de la famille des graminées ou Poacées, cultivées dans de nombreux pays. Le blé est une monocotylédone et fait partie des trois grandes céréales avec le maïs et le riz. Les deux espèces les plus cultivées sont le blé dur (*Triticum durum*) et le blé tendre (*Triticum sativum*). Le blé dur est une espèce connue depuis l'antiquité et appartient au groupe tétraploïde du genre *Triticum*, comprenant de nombreuses espèces (Bousba, 2012).

**Le blé tendre**, (*Triticum aestivum*) est apparu il y a 7 000 à 9 500 ans par la domestication des blés. Les botanistes classent le blé tendre dans le groupe des blés hexaploïdes ( $2n = 42$ ). Le blé hexaploïde *Triticum sativum* avec un génome (BBAADD), semble être apparu après la domestication des blés diploïdes et tétraploïdes (Belagrouz, 2013).

**Le blé dur** (*Triticum durum*) est une espèce allo tétraploïde ( $2n = 28$ , AABB) qui trouve son origine dans l'hybridation suivie d'un doublement chromosomique entre *Triticum Urartu* (génome AA) et une espèce voisine d'*Aegilops speltoides* (génome BB) (Huang et al., 2002). Les blés durs, caractérisés par des grains très durs mais un faible taux de gluten et une teneur élevée en amidon, sont utilisés pour la production de pâtes alimentaires (Mouellef, 2010).



**Figure 02:** Le blé tendre  
(Abecassis ., 2015)



**Figure 03:** Le blé dur  
(Abecassis ., 2015)

#### Le maïs

Le maïs appartient à famille des Poaceae, sous-famille des Andropogonoïdæ, tribu des Maydeadont les genres sont caractérisés par des épillets unisexués, soit dans des inflorescences différentes, soit réunis dans une même inflorescence. Cette tribu comprend 8 genres, 5 d'Asie (*Coix*, *Polytoca*, *Sclerachne*, *Chionachne*, *Trilobachne*) de faible importance et 3 américaines (*Zea*, *Tripsacum*, *Euclaena*) (Baudoin et al ., 2002).

Le genre *Zea* comprend 5 espèces, dont l'espèce cultivée *Zea mays* et 4 parents sauvages, tous originaires d'Amérique tropicale et appelés *téosintes*. (Brink et Belay, 2006).

Le maïs, *Zea mays sp.* ( $2n=20$ ), est une plante herbacée cultivée comme une plante annuelle, mais pouvant se comporter comme une plante bisannuelle. Elle se reproduit par fécondation croisée (allogamie) contrairement à la plupart des céréales (Belalia, 2010).



**Figure 04:** Le maïs (Delvaux, 2014)

## Le riz

Le riz cultivé d'origine asiatique, *Oryza sativa L.*, constitue la première céréale de consommation humaine et la nourriture de base de plus de la moitié de l'humanité. Cette plante présente une grande diversité morpho-physiologique, héritage de deux domestications indépendantes et reflet de l'adaptation des cultivars à des écosystèmes variés (irrigué, inondé, pluvial, flottant ou de mangrove). Deux sous espèces, *japonica et indica* ont émergé à partir de formes annuelles d'*Oryza arufipogon*, à travers ces deux processus de domestication qui ont débuté respectivement il y a plus de 10 000 ans, au nord et au sud de l'Himalaya (Guiderdoni et al., 2006).

Le riz récolté, ou riz décortiqué pour éliminer l'enveloppe qui entoure les grains et le rendre comestible. On obtient ainsi du riz complet, aussi appelé riz cargo. Ce riz de couleur marron, est très nourrissant mais nécessite une cuisson longue (40-45 minutes).

Pour obtenir du riz blanc, les grains sont passés dans une meule, qui élimine le son et le germe, avant d'être polis. Les grains peuvent également être précuits (étuvés) pour les rendre incollables. Ces transformations lui font perdre des vitamines mais il cuit plus rapidement (10-15 minutes). En fonction des caractéristiques morphologiques du grain (longueur/épaisseur), on distingue 4 types de riz : les riz ronds, les riz moyens, les riz longs et les riz très longs. (Julien et al., 2014).



**Figure 05 :** Le riz (Clémentine., 2018)

**L'orge:**

*Hordeum vulgare* est l'une des plus anciennes céréales cultivées sur terre. Les études génétiques, incluant les analyses récentes en Biologie moléculaire confirment que l'orge cultivée actuellement a évolué à partir de *Hordeum spontaneum* L. Espèce d'orge spontanée présente encore au Proche et Moyen-Orient qui porte des épis à deux ou six rangs (**Boungab ., 2013**).

Elle est cultivée pour ses grains qui sont utilisés dans l'alimentation humaine et animale, ainsi que pour la production de malt utilisé dans l'industrie brassicole. L'orge est largement cultivée dans de nombreux pays, notamment dans les régions tempérées, en raison de sa capacité à s'adapter à des conditions de croissance variées (**FAO, 1995**).



**Figure 06:** L'orge (Cinzia., 2009).

**Le sorgho :**

*Sorghum bicolor* appartient à la famille des *Poaceae* (graminées) et à la tribu des *Andropogonaceae*. Le sorgho est diploïde avec un nombre de chromosomes de  $2n=20$ . Bien qu'il soit autogame, le sorgho présente un faible taux d'allogamie, variant de 5 à 15% (Gaoussou, 2003). Les variétés de sorgho africain se caractérisent par leur grande taille, ce qui les rend sensibles à la verse, et par des feuilles espacées qui ne favorisent pas le développement des maladies cryptogamiques. Une particularité des sorghos africains est leur sensibilité à la photopériode. Ainsi, la durée de leur cycle varie en fonction de la date de semis, avec une même variété de sorgho pouvant passer de 90 à 170 jours de cycle (Gaoussou, 2003).

Le sorgho est une plante rustique originaire d'Afrique et est la cinquième céréale la plus produite dans le monde. Il est principalement cultivé dans les régions subsahariennes, aux États-Unis et en Inde. Autrefois principalement consommé par les hommes, il est aujourd'hui principalement utilisé comme aliment pour le bétail. Le sorgho est riche en protéines et en amidon, et est consommé sous forme de galettes, de semoule, de bouillie ou de pains dans de nombreux pays africains. Il est également utilisé dans la composition de biscuits dans les pays occidentaux (Julien et al., 2014).



**Figure 07:** Le sorgho (Fannie, 2019)

**Le seigle :**

*Secale cereale L.* est une plante bisannuelle adaptée aux sols pauvres et aux climats rigoureux. Bien qu'il soit possible d'en faire d'excellent pain, sa production est relativement marginale. En effet, en raison de sa faible teneur en gluten, le seigle est généralement utilisé en combinaison avec des farines de blé à haute teneur en gluten. Il est considéré comme l'une des céréales les plus hautes et les plus rustiques (Bénédictte, 2016)



**Figure 08:** Le seigle (Konig ., 2020).

## Le millet

Le millet est une céréale cultivée depuis des millénaires en Asie et en Afrique, où elle joue un rôle important dans l'alimentation. Cette céréale est caractérisée par une grande panicule lâche, penchée d'un côté. Au Moyen âge, le millet était largement consommé en Europe sous forme de galettes et de bouillies, mais il a progressivement été remplacé par le maïs et la pomme de terre. De nos jours, le millet est principalement destiné à l'alimentation animale (**Audrey, 2014**).



**Figure 09: Le millet (olivianadre,2019)**

## IV. Structure et Composition des Grains de Céréales

Les céréales jouent un rôle essentiel dans l'alimentation humaine depuis des millénaires. Pour comprendre en quoi elles sont si importantes, il est crucial de connaître leur structure et leur composition. Le fruit de céréale est botaniquement appelé caryopse .et se compose de trois parties anatomiques majeures:le péricarpe, l'endosperme et le germe

De plus, certaines espèces conservent leurs glumes ou enveloppes protectrices, tandis que d'autres les perdent lors de la récolte.

### Structure des grains de céréales

1. Le péricarpe : Le péricarpe, également appelé balle ou enveloppe, constitue la couche externe du grain. Il contient une grande quantité de fibres et peut varier en épaisseur selon les espèces de céréales. (**Belghith-Fendri et al., 2016**)
2. L'endosperme : L'endosperme est la partie principale du grain en termes de quantité et d'utilisation alimentaire. Il représente jusqu'à 75% du poids total du grain il est principalement composé d'amidon et de protéines. Contrairement au péricarpe, il est pratiquement dépourvu de fibres. (**Gallagher et al., 2020**)
3. Le germe : Le germe entoure le scutellum et l'embryon du grain. Il est riche en huiles, protéines et vitamines. Contrairement à l'endosperme, le germe contient également des quantités significatives de fibres( **Zhang et al., 2019**).

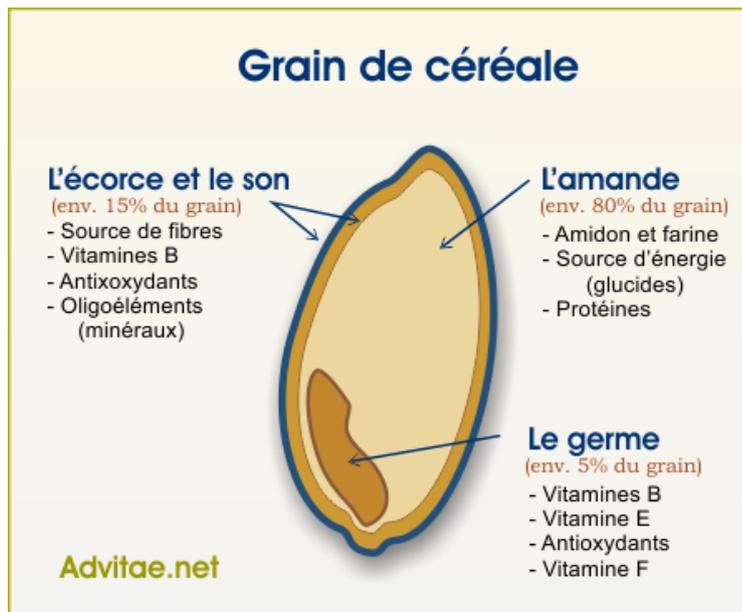


Figure10 : Schéma d'un grain de céréales (www.Advitae.net)

### Composition des grains de céréales:

1. **Glucides**: Les céréales sont reconnues pour leur teneur élevée en glucides principalement de l'amidon, ce qui en fait une source essentielle d'énergie dans l'alimentation humaine.

Cependant, il est important de noter que les fractions de protéines des céréales sont souvent déficientes en quantité et en profil d'acides aminés essentiels ceux que le corps humain ne peut pas produire lui-même et qui doivent être obtenus à partir de l'alimentation. Par conséquent, il est recommandé de combiner les céréales avec d'autres sources de protéines complémentaires, telles que les légumineuses, les noix ou les produits laitiers, afin de fournir un apport équilibré en acides aminés (Wrigley et al., 2019).

### L'influence des glucides des céréales sur la santé :

#### Régulation de la glycémie :

Les glucides complexes présents dans les céréales, sont digérés plus lentement que les glucides simples, ce qui permet de maintenir une glycémie plus stable. Cela est particulièrement important pour les personnes atteintes de diabète ou souhaitant prévenir le développement de cette maladie. Une étude de 2020 a démontré que la consommation de céréales complètes était associée à une diminution du risque de diabète de type 2 (Afshin et al., 2020).

Satiété et gestion du poids : Les céréales complètes contiennent des fibres qui augmentent la sensation de satiété, ce qui peut réduire la surconsommation alimentaire. Une revue systématique de 2021 a conclu que la consommation de céréales complètes était associée à un indice de masse corporelle (IMC) plus bas et à une réduction du risque d'obésité (Aune et al., 2021).

Prévention des maladies cardiovasculaires : Les glucides des céréales peuvent jouer un rôle protecteur contre les maladies cardiovasculaires. Des études épidémiologiques ont montré une association inverse entre la consommation de céréales complètes et le risque de maladies cardiovasculaires. Une méta-analyse récente de 2022 a confirmé que la consommation de céréales complètes était associée à une réduction du risque de maladies cardiovasculaires (**Ye et al., 2022**).

2. **Fibres alimentaires** : qui se présentent sous forme soluble et insoluble dans l'eau. Les fibres alimentaires sont des composés végétaux qui ne sont pas digérés par les enzymes de notre corps. Elles jouent un rôle crucial dans la santé digestive et offrent plusieurs avantages pour la santé.

Les fibres solubles, présentes notamment dans l'avoine et l'orge, forment un gel lorsqu'elles sont mélangées à l'eau. Elles aident à réguler la glycémie en ralentissant l'absorption des glucides, ce qui peut être bénéfique pour les personnes atteintes de diabète ou pour la prévention de cette maladie.

De plus, les fibres solubles contribuent à réduire le taux de cholestérol sérique en se liant au cholestérol et en favorisant son élimination.

Les fibres insolubles, présentes notamment dans le son de blé et le riz brun, apportent du volume aux selles et favorisent un transit intestinal régulier. Elles aident à prévenir la constipation et peuvent jouer un rôle dans la prévention des maladies du côlon. (**Anderson et al., 2014**).

3. **Nutriments** : Les grains de céréales contiennent également des vitamines, des minéraux essentiels tels que le fer, le zinc, le magnésium, les vitamines B (thiamine, riboflavine, niacine, acide folique) et la vitamine E. et d'autres composés bioactifs tels que des caroténoïdes, de l'acide phytique et des lignanes. Certains de ces composés ont des effets antioxydants et peuvent contribuer à la protection contre les maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires, le cancer et les maladies neurodégénératives. Les antioxydants des céréales peuvent également avoir des effets anti-inflammatoires et protéger les cellules contre le stress oxydatif (**Salehi et al. 2018**)

**Tableau 01:** Composition biochimique des grains de céréale. (Claude, 2017).

Céréale	Protéines %NX5,7	Lipides%	Amidon%	Cellulose %	Minéraux%
<b>Blé (USA)</b>	16,0	2,9	74,1	2,6	1,8
<b>Blé (Europe)</b>	10,5	2,6	78,6	2,5	1,8
<b>Seigle</b>	13,8	1,4	79,7	2,6	2,2
<b>Orge</b>	11,8	1,8	78,1	5,3	3,1
<b>Avoine</b>	11,6	5,2	69,8	10,4	2,9
<b>Riz (paddy)</b>	9,1	2,2	71,2	10,2	7,2
<b>Riz (cargo)</b>	11,0	2,7	83,2	1,2	1,8
<b>Riz (blanchi)</b>	9,8	0,5	88,9	0,3	0,6
<b>Maïs (corné)</b>	11,1	4,9	80,2	2,1	1,7
<b>Maïs (denté)</b>	10,6	4,6	81,0	2,2	1,6

## V. Situation de la céréaliculture :

### a. Dans le monde :

La culture des céréales représente un secteur économique important elle est liée à l'évolution des superficies, des productions et par conséquent des rendements obtenus (FAO, 2020).

Entre 2015 et aujourd'hui, la situation de la céréaliculture dans le monde a connu des évolutions importantes, comme en témoignent les données et études disponibles.

Selon les chiffres de la FAO, la production mondiale de céréales a augmenté au cours de cette période. En 2015, la production totale de céréales était d'environ 2 526 millions de tonnes, tandis qu'en 2020, elle atteignait près de 2 768 millions de tonnes (FAO, 2021). Cette augmentation s'explique en partie par l'expansion des superficies cultivées, l'adoption de pratiques agricoles améliorées et les progrès technologiques.

Cependant, il convient de noter que la production céréalière a été affectée par des facteurs tels que les conditions climatiques, les catastrophes naturelles et les conflits. Par exemple, certaines régions ont connu des sécheresses prolongées, des inondations ou des conflits armés, ce qui a entraîné des baisses de production dans ces zones spécifiques (FAO, 2019).

En ce qui concerne les échanges internationaux de céréales, la demande mondiale a continué de croître. Selon les estimations de la FAO, les échanges mondiaux de céréales ont atteint un niveau record de 472 millions de tonnes en 2021-2022, soit une augmentation de 0,8% par rapport à l'année précédente (FAO, 2021). Les pays exportateurs de céréales, tels que les États-Unis, l'Australie, la France, le Canada, l'Argentine, la Russie et l'Ukraine, ont joué un rôle essentiel dans la satisfaction de cette demande croissante (FAO, 2021).

En ce qui concerne les prix des céréales, ils ont connu des fluctuations au cours de cette période. Les variations des prix peuvent être influencées par des facteurs tels que l'offre et la demande, les conditions climatiques, les politiques commerciales et les facteurs économiques mondiaux. Par exemple, en 2015, les prix des céréales ont connu une baisse en raison d'une offre abondante et de bonnes perspectives de récolte (FAO, 2015). Cependant, les prix peuvent également être influencés par des facteurs imprévus, tels que les conditions météorologiques défavorables ou les perturbations du marché.



Figure 11: Production céréalière, utilisation et stocks (2011-2021) (Bulletin FAO 2021).

## b. La situation de la céréaliculture en Algérie

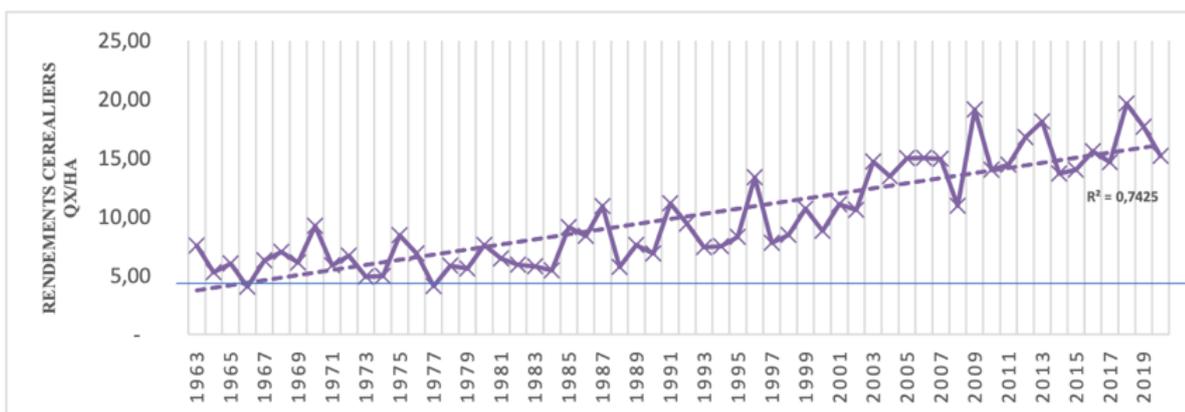
L'Algérie est caractérisée par une superficie agricole utile (SAU) de 7,14 millions d'hectares, dont près de la moitié est laissée en jachère chaque campagne agricole (FAO, 2015). Depuis l'époque coloniale jusqu'à aujourd'hui, la sole céréalière occupe en moyenne entre 2,4 et 3,2 millions d'hectares, ce qui représente 28 à 40% de la SAU (FAO, 2015). Parmi les différentes cultures céréalières, le blé dur est celui qui occupe la plus grande superficie, avec une moyenne d'environ 1,27 million d'hectares, suivi de l'orge avec une moyenne de 800 000 hectares et le blé tendre avec une moyenne de moins de 500 000 hectares. La superficie consacrée à l'avoine se stabilise autour d'une moyenne de 80 000 hectares (FAO, 2019).

En ce qui concerne la production de céréales, elle varie entre 2,6 et 3,3 millions de tonnes en moyenne depuis l'indépendance nationale, avec des fluctuations en fonction des conditions climatiques, notamment la pluviométrie et les épisodes de sécheresse. Certaines années, la production dépasse la moyenne nationale, comme en 2019 où elle a atteint 5,6 millions de tonnes. Les rendements céréaliers ont également connu une augmentation progressive au fil des années, passant d'une moyenne de moins de 10 quintaux par hectare (Qx/Ha) dans les années 1960-1970 à une moyenne de plus de 10 Qx/Ha, soit un rendement moyen de 15 Qx/Ha (FAO, 2019).

En ce qui concerne la consommation, les produits céréaliers sont une composante essentielle de l'alimentation en Algérie. Selon une étude du ministère de l'Agriculture, les produits céréaliers fournissent plus de 60% de l'apport calorique et 75 à 80% de l'apport protéique de la ration alimentaire de la population algérienne. La consommation moyenne de produits céréaliers s'élève à environ 205 kg par habitant et par an (**Masbah et al.,2019**).

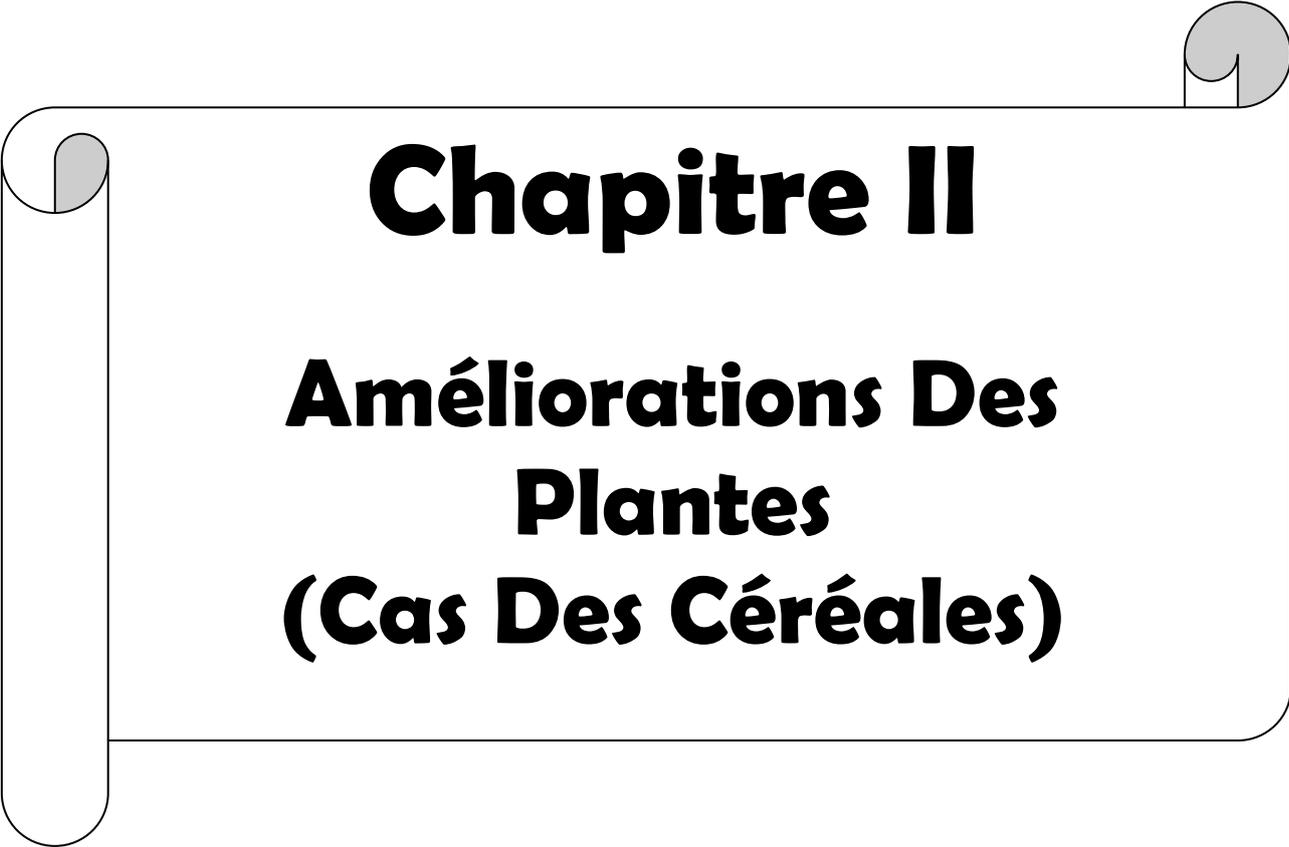
Enfin, il convient de souligner que les importations de produits céréaliers en Algérie revêtent une importance significative. Selon les statistiques du Ministère du Commerce de l'Algérie publiées en 2022, les produits céréaliers représentent plus de 40% de la valeur totale des importations alimentaires du pays. Cette donnée met en évidence l'ampleur des échanges internationaux nécessaires afin d'assurer un approvisionnement adéquat en céréales dans le pays.

Ces chiffres et données soulignent l'importance de la céréaliculture en Algérie et l'effort continu visant à améliorer les rendements et la production pour assurer la sécurité alimentaire du pays.



Source : Réalisée par nous-mêmes sur la base des données des statistiques du MADR (1963/2020)

**Figure12:**Evolution des rendements céréaliers (Qx/Ha) en Algérie (**Bekkis et Benmehala, 2023**).



# **Chapitre II**

## **Améliorations Des Plantes (Cas Des Céréales)**

### **I. Définition:**

L'amélioration des plantes est définie comme étant l'art et la science de la création de variétés. Du point de vue génétique, elle peut être considérée comme l'ensemble des processus qui, à partir d'un groupe d'individus (population, écotype) n'ayant pas certains caractères au niveau recherché, permet d'obtenir un autre groupe d'individu –variété apportant un progrès (Gallais, 1990).

### **II. Historique:**

Depuis les débuts de l'agriculture, les êtres humains sélectionnent les meilleures semences pour les replanter ; c'est ce que l'on peut appeler l'amélioration des plantes. Cela nous a permis de devenir sédentaires et de nous nourrir pendant des milliers d'années.

Puis, dans les années 1900, on observe un tournant : l'amélioration des plantes devient une science appliquée et se déplace de la ferme aux laboratoires.

Après la Seconde Guerre mondiale, une accélération de l'industrialisation de l'agriculture en général se met en route, on la qualifiera plus tard de Révolution verte. Les semences n'y font pas exception. L'Europe, affaiblie par la guerre, doit trouver un moyen de nourrir sa population, la recherche se concentre sur l'amélioration des plantes et la génétique.

Les années passent et on ne cesse d'innover. Progressivement, ce qui entait du ressort du secteur public devient le travail de sélectionneursprives. Les semences créées dans les stations de recherche sont désormais enregistrées dans un catalogue et appartiennent à leur créateur. Comme pour toute invention, on leur applique des brevets et des droits de propriété intellectuelle.

Puis, dans les années 1990, ce qui répondait tout d'abord au besoin de nourrir le monde est devenu une façon pour les grandes multinationales de faire du profit. La circulation des semences, reconnues par la FAO comme un « patrimoine commun de l'humanité » en 1983 est paradoxalement de plus en plus restreinte. (Bouchet, 2018).

### **III. Chronologie de l'amélioration des plantes:**

Plusieurs découvertes et avancées majeures ont marqué l'histoire de la génétique et de la sélection des plantes, le tab 02 illustre les principales découvertes liées à la génétique ainsi que les outils et méthodes utilisés pour améliorer les plantes.

**Tableau 02 : Avancées majeures en génétique et méthodes d'amélioration des plantes : Une vue d'ensemble" (Galla, 2018).**

1694	Camerarius montre l'effet du pollen et reconnaît les deux sexes chez les plantes.
1769	Koelreuter montre l'intérêt des croisements entre espèces et intra-espèces pour produire de la variation et met en évidence la vigueur hybride
1830.	Le Couteur réalise la première sélection d'une lignée pure de blé.
1856.	Louis de Vilmorin introduit la sélection généalogique.
1859	Darwin formule l'hypothèse de la sélection naturelle.
1866	Mendel découvre les lois de l'hérédité.
1869	Miescher isole pour la première fois une substance, la nucléine, qui est en fait l'ADN.
1876	Galton réalise une approche statistique de la liaison parent-enfant.
1879	Flemming décrit et nomme tous les stades de la mitose.
1880	Hertwig et Strasburger montrent la fusion du noyau de l'ovule et de celui du spermatozoïde.
1883-1892	Weismann introduit les notions de soma et de germen.
1888	Waldeyer propose le terme de chromosomes.
1889.	Altman renomme la nucléine en acide nucléique.
1900.	De Vries, Correns, von Tschermak redécouvrent les lois de Mendel.
1902.	Sutton observe la méiose et formule la théorie chromosomique de l'hérédité.
1903-1909	Johannsen introduit les notions de lignée pure, de génotype et de phénotype, d'héritabilité au sens large et propose le terme de gène.
1902-1909	Garrod propose la perte d'enzyme comme raison des maladies métaboliques héréditaires.
1905-1908	Nilsson-Ehle introduit la théorie des facteurs multiples.
1906	De Vries propose le terme de mutation.
1906.	Bateson introduit les termes d'allélomorphes, d'hétérozygote, d'homo-zygote et de génétique.
1908	Shull introduit le concept de variétés hybrides (entre lignées) chez le maïs.
1908-1909	Hardy et Weinberg donnent les lois de la panmixie.
1910	Keeble et Pellew proposent une explication de l'hétérosis par dominance complète.
1912-1913	Morgan valide la théorie chromosomique de l'hérédité.
1912.	Nilsson-Ehle redécouvre la sélection généalogique et propose la méthode des bulks
1917.	Jones propose la création d'hybrides doubles chez le maïs.
1918	Fisher introduit le modèle de la génétique quantitative.
1920.	Le premier hybride double de maïs est réalisé à grande échelle aux États-Unis.
1921	Wright fonde la génétique des populations et la théorie de la sélection naturelle.
1922	Harlan et Pope proposent le back-cross

1927-1928	Muller induit des mutations artificielles par rayons X chez la drosophile et Stadler chez l'orge.
1934.	Gavaudan et Blakeslee découvrent l'effet de la colchicine pour le doublement chromosomique.
1937	Fisher développe les bases statistiques de l'expérimentation.
1937	Lush introduit la notion d'héritabilité au sens restreint.
1939	Goulden propose la sélection généalogique par single seed descent
1941	Beadle et Tatum formulent l'hypothèse « un gène - une enzyme ».
1944	Avery, MacLeod et McCarty montrent que l'ADN est le support de l'hérédité.
1949	Malécot publie Les Mathématiques de l'hérédité
1952	Chase découvre des embryons haploïdes chez le maïs et propose leur utilisation pour la sélection du maïs.
1953	Watson et Crick découvrent la structure en double hélice de l'ADN.
1955	Première variété hybride de maïs franco-américain en France.
1956	Kornberg découvre l'ADN-polymérase.
1957	Crick propose le passage de l'ADN aux protéines via l'ARN.
1960	Jacob et Monod mettent en évidence des gènes régulateurs.
1962	Crick, Watson et Wilkins reçoivent le prix Nobel de médecine pour leurs travaux sur le code génétique.
1964	Guha et Maheswari obtiennent des embryons par culture <i>in vitro</i> d'anthères.
1969	Arber découvre les enzymes de restriction.
1970	Borlaug reçoit le prix Nobel de la paix pour la révolution verte avec la mise au point de variétés de blé semi-naines.
1975	Première variété hybride de tournesol en France.
1977	Sanger met au point une méthode de séquençage de l'ADN.
1983	Première plante transgénique (tabac).
1983	Pelletier et son équipe réussissent l'échange entre génotypes de colza entre mitochondries et de chloroplaste par fusion de protoplastes.
1990	Début de séquençage du génome humain (achevé en 2003).
1994	Obtention de la tomate transgénique 'Flavr Savr' (Calgene, Inc.).
1995	Séquençage du génome d'une bactérie <i>Haemophilus influenzae</i>
1995	Début de commercialisation du maïs transgénique Bt.
1996	Séquençage du premier génome d'un organisme eucaryote <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
1999	Séquençage du chromosome 22 chez l'humain.
2000	Meuwissen formule la sélection génomique.
2002	Séquençage du génome du riz.
2002	Début de la biologie de synthèse.
2008	Découverte des petits ARN, de leur rôle dans la régulation des gènes.
2013	Développement de la méthode d'édition du génome par CrispR-Cas9.

## Les origines de l'amélioration des plantes:

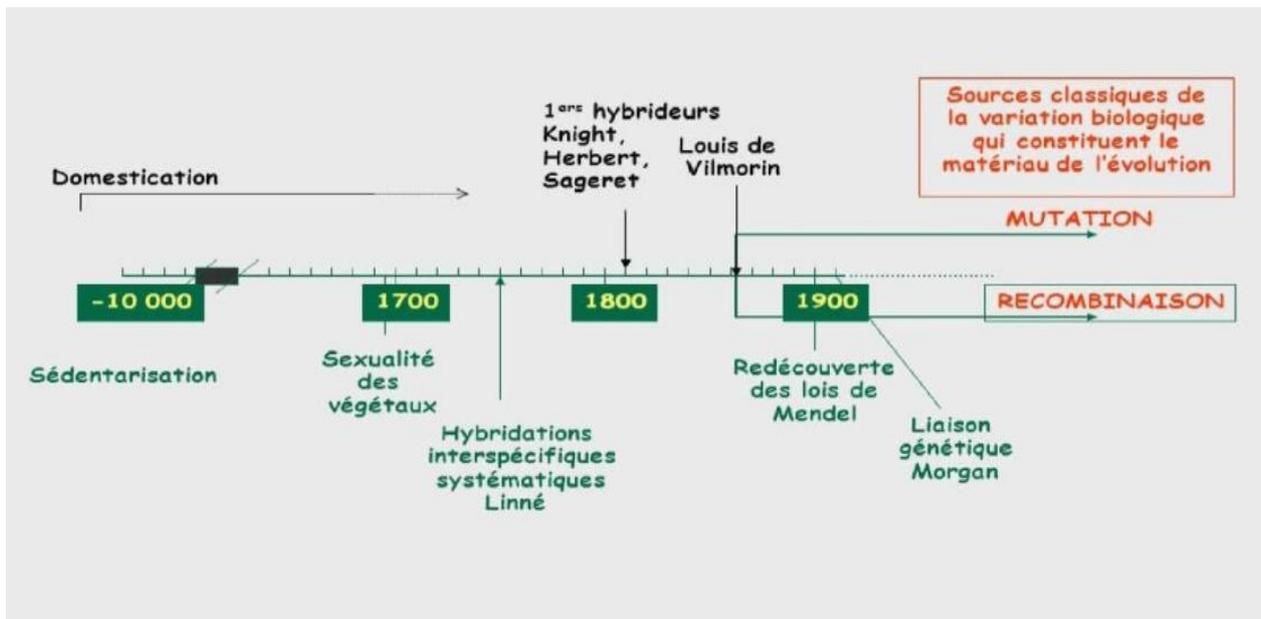


Figure 13 : L'échèle de temps de l'origine de l'amélioration des plantes. (Baaziz ., 2017).

### IV. Objectifs de l'amélioration des plantes :

#### A. L'amélioration de la productivité :

Le potentiel de production peut être amélioré par la sélection. Un rendement supérieur peut être obtenu par une accumulation des gènes favorables pour ce caractère dans une plante et/ou par une modification de l'architecture de la plante pour lui permettre de mieux utiliser les ressources du milieu dans lequel elle se développe (lumière, eau, minéraux du sol etc.).

#### B. L'adaptation des plantes au milieu

La sélection a permis d'étendre la zone de culture des espèces en les adaptant à des conditions climatiques nouvelles comme le froid et la sécheresse ou d'autres stress climatiques comme la verse due au vent et l'inondation.

La résistance aux maladies aux insectes et à d'autres ravageurs permet d'augmenter et de stabiliser la production. Cette résistance peut nous économiser les frais de traitements par des pesticides et réduire les risques de pollution chimique.

### Résistance des céréales aux maladies :

Les maladies peuvent sérieusement réduire la qualité des grains. Les maladies fongiques peuvent avoir un impact important sur la qualité des grains (en particulier la taille des grains) car elles peuvent être actives sur les feuilles pendant le remplissage des grains ou infecter directement l'épi. Les ravageurs peuvent réduire le rendement et la qualité des grains. Les dommages post-récolte causés par les insectes peuvent constituer un problème majeur .

Les mycotoxines résultant de la croissance fongique sur les grains posent un problème sérieux de sécurité pour les grains provenant de certains environnements.

Le développement de céréales résistantes aux ravageurs et aux maladies offre une opportunité majeure pour améliorer la productivité des céréales. Dans de nombreux environnements, une seule maladie peut être associée à des pertes très importantes de rendement en grains. L'amélioration des variétés résistantes par sélection a été une stratégie majeure pour augmenter les rendements des céréales. Les céréales transgéniques présentant un niveau élevé de résistance aux maladies peuvent étendre les options disponibles par rapport à l'amélioration conventionnelle des plantes.

### **C. La qualité:**

Le matériel végétal utilisé pour créer de nouvelles variétés est soumis à des tests rigoureux de qualité. La qualité boulangère est une nécessité pour les variétés de blé. La couleur, la texture, la forme et la taille du fruit, le goût etc. Sont des caractères importants que les sélectionneurs doivent prendre en considération. (Salmi ., 2020).

### **V. Propriétés nutritionnelles des céréales améliorées :**

La biotechnologie offre de nouvelles possibilités de manipulation des propriétés nutritionnelles des céréales. Comprennent la réduction des bactéries cariogènes (favorable à la santé dentaire), une teneur en énergie réduite et la stimulation de bactéries bénéfiques dans le côlon. La teneur en sucre peut également influencer la qualité du grain pour différents produits. Les fructanes, en tant que fibres solubles, sont considérés comme importants pour la nutrition humaine. L'amidon, constituant majeur des grains, a un impact significatif sur la qualité nutritionnelle. Les amidons résistants, qui ne sont pas digérés dans l'intestin, jouent un rôle critique dans l'incidence de certaines maladies humaines, comme les maladies cardiovasculaires. Les polysaccharides de la paroi cellulaire peuvent également être importants, agissant comme des fibres solubles ou insolubles selon leur composition dans le produit céréalier. Les fibres solubles peuvent réduire le risque de maladies cardiovasculaires, tandis que les fibres insolubles contribuent à réduire le risque de cancers du côlon.

### **VI. Qualité des céréales et exigences du processus:**

le rôle potentiel de la biotechnologie. Le traitement des céréales implique une large gamme de techniques avec des exigences très différentes en matière de matières premières.

Plusieurs des principaux processus de transformation des céréales seront décrits dans le but d'identifier les principales opportunités d'application de la biotechnologie pour améliorer la qualité du traitement des céréales.

### **A. Le broyage:**

Le broyage des céréales est un processus complexe influencé par la structure anatomique du grain. La manipulation génétique pour améliorer la qualité du broyage est limitée en raison des multiples caractéristiques du grain qui contribuent à sa performance. Des facteurs

tels que la forme du grain, l'adhérence des couches externes, la dureté et la couleur ont une influence significative sur le broyage des céréales (**Henry, 2001**).

### **B. La cuisson:**

La cuisson des céréales, en particulier du blé, nécessite une qualité optimale pour répondre aux exigences des boulangeries industrielles modernes. La biotechnologie offre des possibilités d'amélioration en ciblant les composants clés tels que les protéines, l'amidon et les polysaccharides des parois cellulaires. Les propriétés viscoélastiques des pâtes de blé sont principalement influencées par les protéines, tandis que l'amidon et les pentosanes des parois cellulaires jouent également un rôle important dans la qualité de cuisson. La dégradation de l'amidon par les amylases est essentielle, et les pentosanes des parois cellulaires ont un impact significatif sur la qualité du pain (**Henry, 2001**).

### **C. La maltage :**

La maltage est la première étape du traitement des céréales destinées à être utilisées dans la brasserie et la distillation. Le maltage des céréales, plus précisément de l'orge, est un processus de germination. Le taux de germination et les changements de composition de l'orge pendant le maltage sont potentiellement des objectifs importants pour la biotechnologie. (**Henry, 2001**).

### **D. Extrusion :**

L'extrusion (production à l'aide de températures élevées et de pressions) des produits céréaliers est un processus de plus en plus important dans la production d'une large gamme de produits, notamment les aliments snacks, les céréales pour le petit-déjeuner et les aliments pour animaux. Les propriétés de transformation requises sont complexes, mais elles peuvent être améliorées grâce à l'application de la biotechnologie. (**Henry, 2001**).

## **VII. Les méthodes d'amélioration des plantes :cas des céréales :**

Trois stratégies ont été adoptées pour améliorer les céréales. La première est l'amélioration des plantes, qui implique le croisement de génotypes contrastés pour générer de nouvelles combinaisons de gènes, suivies de la sélection des plus adaptées. De plus, des génotypes exotiques ou des espèces sauvages étroitement apparentées (c'est-à-dire croisables) peuvent être utilisés comme sources de gènes spécifiques (par exemple, pour la résistance aux ravageurs ou aux contraintes abiotiques). Cette approche n'implique pas la biotechnologie.

La deuxième stratégie repose toujours sur l'amélioration classique des plantes, mais des éléments de biotechnologie (culture de tissus, régénération) sont utilisés pour rendre le processus plus efficace et permettre l'incorporation de gènes provenant de parents sauvages avec lesquels il n'est pas facile de les croiser.

La troisième stratégie est le génie génétique : l'insertion de gènes spécifiques pour améliorer la résistance, les performances agronomiques, la qualité ou le rendement. (**Khushetal.,2001**)

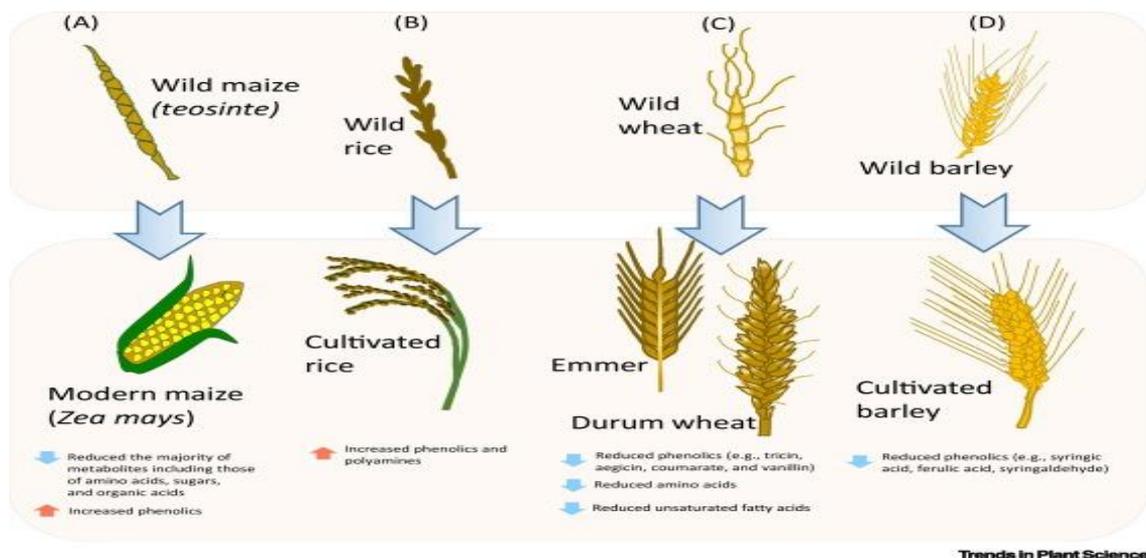
## VII.1. Les méthodes classiques:

### 1.1 Domestication:

**Définition:** La domestication est généralement considérée comme le point final d'un continuum qui commence par l'exploitation des plantes sauvages, se poursuit par la culture de plantes sélectionnées à partir des plantes sauvages mais pas encore génétiquement différentes des plantes sauvages, et se termine par la fixation, grâce à la sélection humaine, de différences morphologiques et donc génétiques distinguant un cultivar de son progéiteur sauvage. Ces différences constituent le syndrome de la domestication et rendent généralement le cultivar moins capable de survivre dans la nature, dépendant ainsi de l'homme pour sa croissance et sa reproduction. Les caractéristiques du syndrome de la domestication comprennent la perte de la dispersion, l'augmentation de la taille (surtout de la partie récoltée de la plante), la perte de la dormance des graines et la perte de la protection chimique ou mécanique contre les herbivores (Pickersgill, 2007).

### La domestication des céréales :

Le terme de domestication des céréales désigne un processus évolutif résultant d'une sélection systématique, consciente, effectuée par l'homme pour transformer l'organisation de la production des graines des Graminées. Les stratégies adaptatives des formes spontanées reposent sur l'imbrication d'hétérogénéités temporelles variées (libération des graines caduques au fur et à mesure) alors que les céréales sont récoltées en une fois (les graines mûres ne tombent pas), stockées (la germination est bloquée pendant les premiers stades de conservation), la germination des semences est rapide et simultanée [libération totale des «dormances»), réduction des obstacles mécaniques (enveloppes réduites, perméables)]. (Pernès, 1986).



**Figure 14 :** Les changements métaboliques concomitants à la domestication et à l'amélioration des céréales principales. (Aseeikh, Saleh, et al., 2021)

La partie supérieure du panneau inférieur montre les changements morphologiques dans les cultures (A) maïs, (B) riz, (C) blé et (D) orge. La partie inférieure du panneau inférieur montre les changements métaboliques associés à la domestication primaire et secondaire dans le blé ainsi que la domestication dans le maïs, le riz et l'orge.

## 1.2 La sélection classique:

La sélection classique : méthodes de croisement entre des plantes présentant des caractéristiques souhaitées pour produire des descendants combinant ces caractéristiques souhaitées. Les méthodes décrites par ce terme général comprennent la sélection, le croisement, le sauvetage d'embryon, l'hybridation somatique, la variation somaclonale, la mutation et la sélection cellulaire. La sélection classique peut impliquer à la fois des plantes non-OGM et des plantes génétiquement modifiées (**Steiner et al., 2013**).

En premier lieu, il faut définir les critères de ce choix, ensuite, il faut disposer d'un éventail de choix assez large, c'est-à-dire de plantes suffisamment différentes entre elles c'est ce qu'on appelle la variabilité de départ. Plus cette variabilité est importante, plus on a de chances de trouver les plantes correspondantes à nos exigences et enfin utiliser la méthode de sélection la mieux adaptée à l'espèce. (**Chetmi ., 2009**).

Lors de la réalisation des programmes de sélection, quelques chercheurs avaient pu isoler des formes hexaploïdes parfaitement valables. On peut citer, parmi d'autres, les blés *Zorba* et *Weique* (issus de croisements Blé x Seigle, résistants aux Rouilles et à l'*Oïdme*), *Agrus* (issu de croisement Blé x Agropyron, résistant à la Rouille noire) . La confrontation, par croisement, de ces lignées avec des Blés a montré qu'il s'agissait en réalité de lignées étaient aussi vigoureuses et aussi fertiles que des Blés, donc utilisables en culture (**Cauderon, 1978**).

### Objectif de sélection:

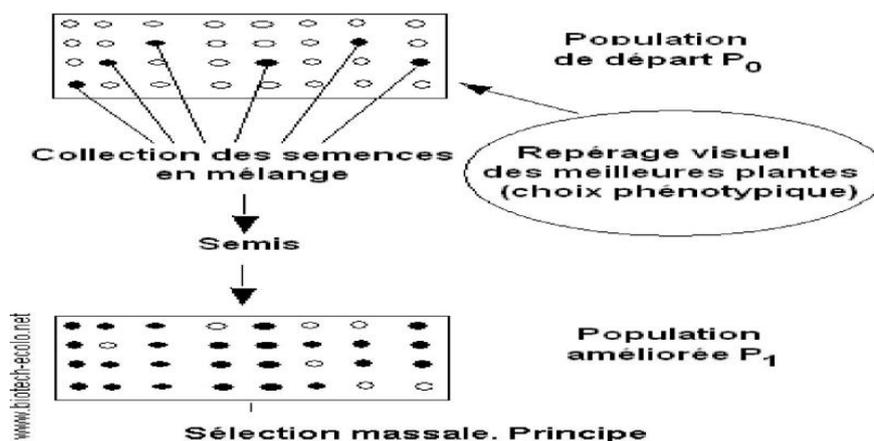
L'objectif est de créer de nouvelles populations cultivables (variétés lignées) présentant des caractéristiques supérieures, tout en conservant le potentiel génétique des plantes de départ, en vue d'autres progrès les sélectionneurs de plantes peuvent aider les agriculteurs à augmenter la production alimentaire en créant de nouvelles variétés mieux adaptées à leurs systèmes de culture choisis. Au cours des 200 dernières années, les agriculteurs étaient eux-mêmes les sélectionneurs de plantes.

Les sélectionneurs cherchent comme critère de sélection la création de variétés génétiquement résistantes aux parasites et aux agents pathogènes. Ils s'intéressent particulièrement aux maladies : rouille, fusariose, septoriose, oïdium, piétin-échaudage, piétin-verse et l'hémintho sporiose (maladies cryptogamiques). La résistance variétale est une méthode de lutte rarement durable et difficile, en raison de l'adaptation des parasites aux gènes de résistance, obligeant le sélectionneur à modifier sans cesse les variétés pour surmonter la virulence des parasites (**Hallab et Rahmouni, 2016**).

## Les types de sélection:

### A. La sélection massale:

La sélection massale est la méthode de sélection de plantes la plus primitive et la plus simple de toutes. La méthode offre une progression très lente au fil du temps en ce qui concerne les changements phénotypiques souhaitables en raison de l'absence de contrôle de la reproduction. Lorsque les allèles désirables étaient fixés, le progrès était interrompu jusqu'à ce que des liaisons de répulsion serrées soient converties en couplage ou que de nouveaux allèles apparaissent par mutation ou introgression. L'algorithme de base de la sélection de plantes est une structure sur laquelle presque toutes les méthodes peuvent être généralisées. Les éléments de l'algorithme procèdent de manière progressive avec un certain chevauchement d'activités parallèles : objectifs de sélection → acquisition de germoplasme → accouplements et sélection contrôlés récurrents → tests des meilleures populations candidates → augmentation du nombre de propagules/graines → sortie d'une nouvelle variété. (Orton, 2020).



**Figure15:** La sélection massale (Boaziz ., 2017).

Le meilleur archétype pour la sélection des espèces de cultures à pollinisation croisée est le maïs. Depuis sa domestication il y a 8000 à 10 000 ans, une gamme remarquable de variantes morphologiques et physiologiques a été commercialisée. Des cultivars ont également été sélectionnés qui présentent une vaste gamme d'adaptation climatique. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, la sélection massale était utilisée pour l'amélioration du maïs. Depuis lors, l'intégration de la sophistication technique dans la sélection du maïs s'est rapidement développée, commençant par la méthode épi-sur-rang, puis les hybrides double-croisement et enfin les cultivars hybrides F1 (Orton, 2020)

Concernant le riz, des études ont démontré l'efficacité de la sélection massale pour augmenter le rendement des variétés (Luo et al. 2011), améliorer la résistance aux maladies comme la pyriculariose (Fujita et al. 2013), ainsi que pour développer des variétés adaptées à différentes conditions de culture, telles que les régions à haute altitude (Yan et al., 2015) ou les zones inondées (Mackill et al., 2012).

**B. Sélection généalogique:**

Cette méthode consiste à choisir les individus d'après les caractéristiques de leur descendance. En partant d'une F2 très homogène, des autofécondations successives et des éliminations importantes aboutissent à la création d'une lignée très fortement homozygote pour ses caractères. Vu que le sélectionneur se base uniquement sur l'aspect phénotypique, il court le risque de ne remarquer si un caractère intéressant se manifeste à l'état récessif hétérozygote, c'est pourquoi, au départ sont réunis des géniteurs très semblables. (Vespa, 1984).

Cette méthode a conduit à la création de plus de 90% des variétés des céréales à paille, inscrites aux catalogues des pays de la C.E.E. et des autres pays céréaliers. (Bonjean et Picard, 1990).

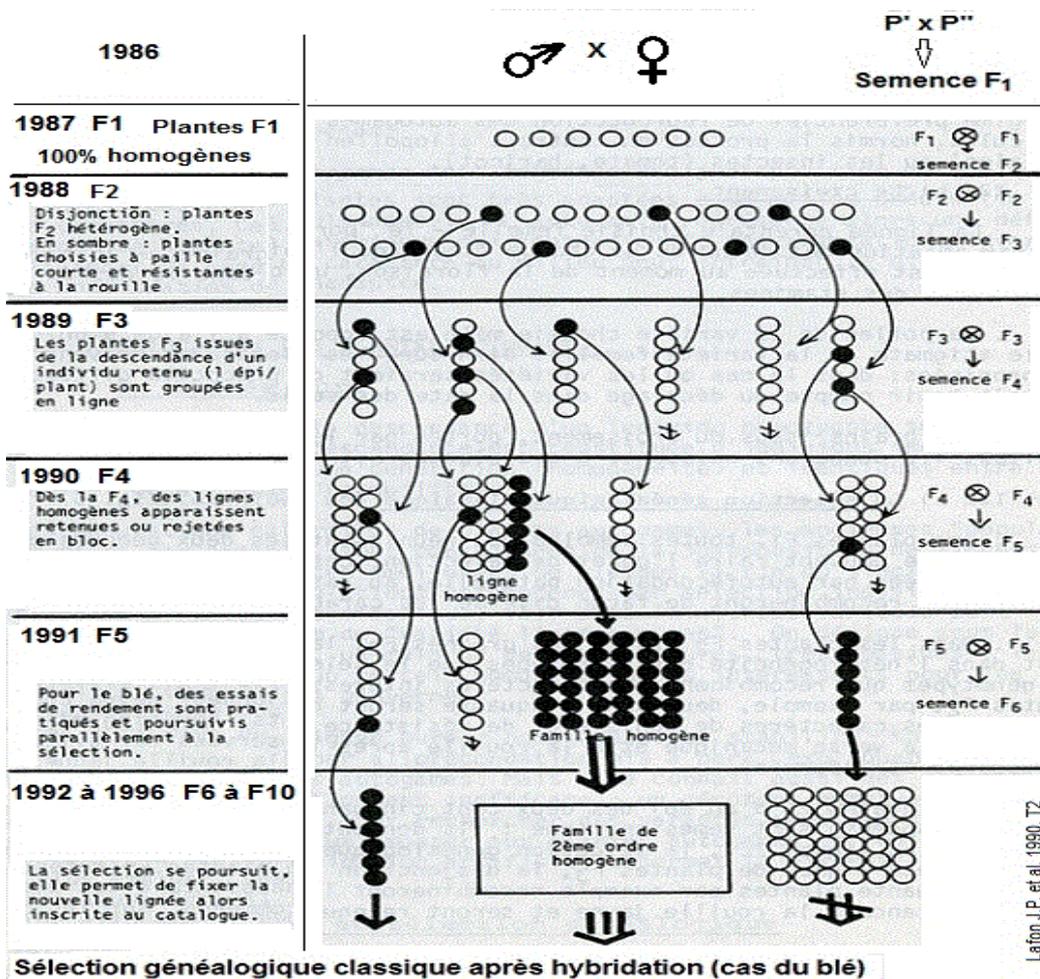


Figure 16: sélection généalogique (Biotech-ecolo.net).

### C. Sélection par méthode de Bulk :

C'est une sélection après une phase d'autofécondation sans sélection. Le passage d'une génération à l'autre est réalisé par récolte en mélange (bulk) de l'ensemble des grains d'une génération et prélèvement aléatoire des grains pour constituer la génération suivante.

Ce processus se poursuit jusqu'en F5 ou F6. La sortie se fait alors par sélection généalogique (Gallais ., 1990).

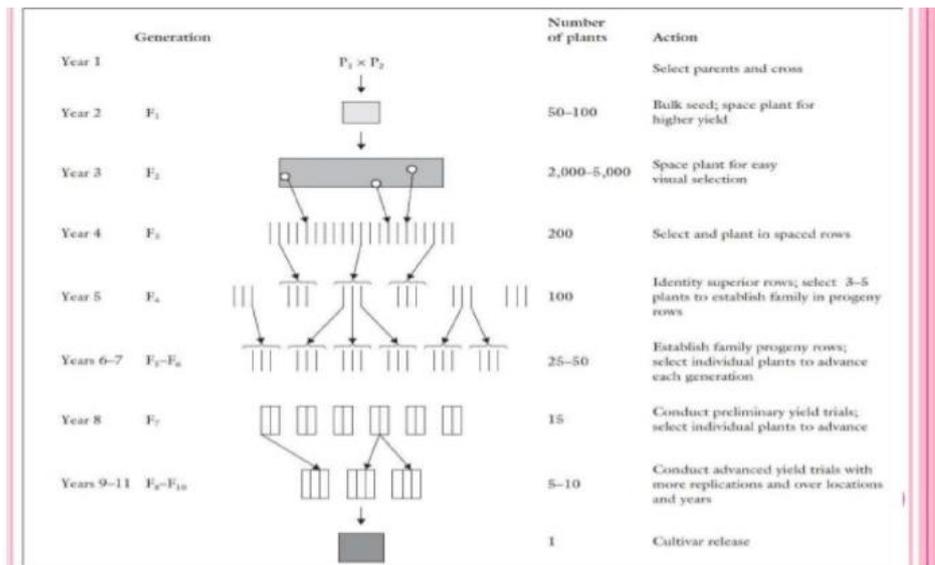


Figure 17 : La sélection par méthode de Bulk. (Boaziz ., 2017).

### D. Sélection par méthode SSD (Single Seed Décent)

C'est une méthode inventée récemment par Brim en 1966 pour le soja. Elle consiste à accélérer les premières générations d'autofécondation en ne pratiquant aucune sélection, en semant un ou deux graines par plante F2 puis plante F3, F4 de telle sorte que l'effectif des plantes reste constant de la F2 à la F4, de niveau d'homozygotie ayant augmenté. Cette méthode ne fait agir que le hasard pendant la première phase. Comme pour la « Bulk », chaque F5 sera constituée d'un certain nombre d'épis ligne (2 à 3 épis ligne) provenant de la plante F précédente et l'on retombe donc dans un semblant de sélection généalogique.

C'est une méthode rapide « légère », son désavantage principal est la part importante du hasard qui risque de conserver beaucoup de matériel inintéressant. (Boubekeur ., 2005).

### E. Rétrocroisement ou back cross

Le rétrocroisement est une méthode utilisée pour améliorer une lignée élite en ajoutant un ou quelques gènes d'un parent donneur. Il s'agit de croiser des hybrides (F1 ou leur descendance) avec l'un des parents d'origine. Cette méthode complète les approches d'élevage antérieures telles que la sélection généalogique, la sélection en masse, la sélection de la graine unique et la double haploïdie. Elle est utilisée pour ajouter des gènes de résistance aux maladies, de résistance aux herbicides ou des caractères de qualité finale à une variété établie afin de

répondre aux exigences du marché. L'objectif est d'améliorer la valeur de la variété sans perturber son génotype de base.

Généralement, le Back-cross est utilisé lorsqu'une variété possédant des caractéristiques désirables présente une faiblesse qui peut être corrigée par l'introduction d'un ou de quelques gènes. L'objectif de Back-cross est de restituer au parent récurrent (variété adaptée) tous ses gènes, sauf le ou les gènes qui contrôlent la caractéristique à transférer. (Zahour., 1992).

C'est une forme d'hybridation récurrente, durant laquelle une caractéristique désirable est transférée à une variété adaptée et productive. L'hybride F1 est recroisé avec le parent récurrent. C'est le back cross 1. Le produit de ce croisement servira de partenaire pour le back cross 2. Au 5ème ou 6ème back cross une autofécondation à lieu. (Chetmi., 2009).

Par une série de recroisements par le Blé, en sélectionnant dans les descendance pour des caractères de l'espèce étrangère, on a alors isolé des lignées d'addition, c'est-à-dire des individus possédant le stock diploïde complet du Blé avec, en addition, le ou les chromosome(s) responsable(s) des caractères soumis à la sélection. Si, sur le plant théorique, ces lignées marquaient un progrès énorme, puisqu'elles permettaient de préciser le déterminisme des caractères transférés, leur utilisation en culture restait aléatoire. Elles étaient morphologiquement très proches du Blé mair elles étaient presque toujours ou moins fertiles, ou moins stables. (Cauderon, 1978).

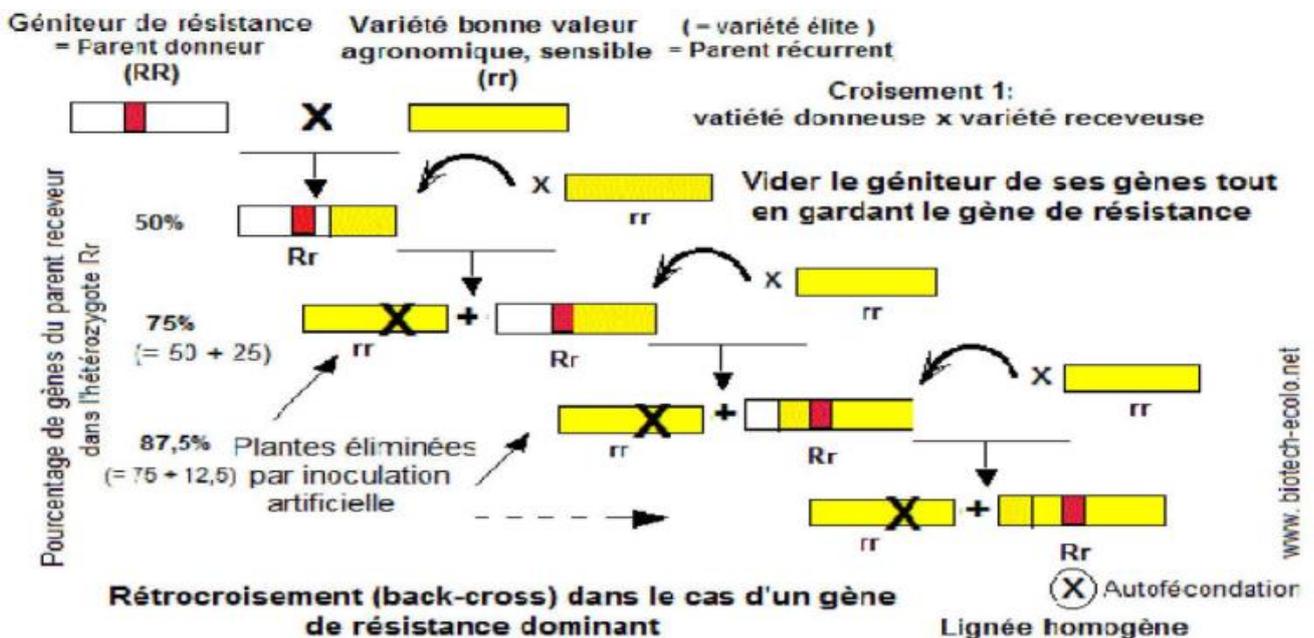


Figure 18: Rétrocroisement ou back cross dans d'un gène de résistance dominant.

(Boaziz, 2017).

**F. Sélection conservatrice:**

Elle consiste à produire des semences en quantité suffisante tout en conservant les caractères génétiques originaux : La sélection conservatrice valorise la sélection créatrice 22 et assure la diffusion de variétés nouvelles ou cultivées. C'est ainsi qu'elle élimine à chaque génération les variations pouvant apparaître, quelques soient d'origine génétique ou d'origine accidentelle.

Actuellement dans les pays où la recherche agronomique est très avancée, la création de banques de gènes permet de conserver les variétés et les espèces importantes, et aussi de sauvegarder celles qui sont menacées de disparition. (**Hallab et Rahmouni, 2016**)

La maintenance des variétés (sélection conservatrice, élevage de conservation) consiste à préserver la variété dans sa forme originale, voire à l'améliorer sans perdre ses caractéristiques distinctives et son individualité. Comme la maintenance des variétés de plantes autogames nécessite une technique différente de celle utilisée pour le matériel génétique, ces deux sujets doivent être traités séparément. Il existe également une différence essentielle entre la maintenance des variétés améliorées et celle des variétés locales (variétés régionales). (**Haan, 1953**).

La plupart des céréales à paille (blé, orge, avoine, riz) sont des plantes autogames (ce qui limite les risques d'hybridation), très fortement homozygotes, ce qui rend plus aisé le maintien de l'identité génétique au cours des multiplications. Pour ces plantes, la sélection conservatrice est de type généalogique.

### 1.3 Hybridation des plantes:

#### Définition:

L'hybridation consiste à croiser deux plantes ayant des caractères différents et complémentaires. On crée ainsi la descendance de nouvelles combinaisons qui seront des parents de sélection. On cherchera là où les plantes qui regroupe un maximum de caractères intéressants, provenant de chacun des parents. (Simon et al . ,1989).

#### L'hybridation

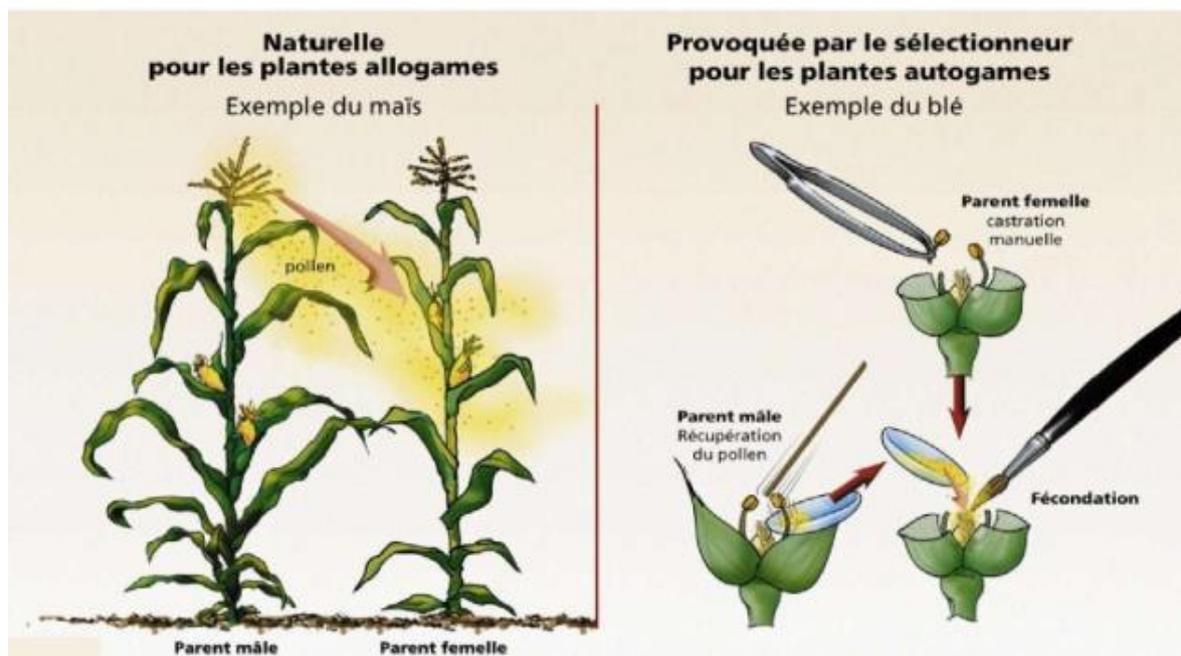


Figure19 : L'hybridation.(Becquet et al . , 2011).

L'hybridation des céréales est une pratique courante dans l'agriculture pour améliorer les caractéristiques des cultures céréalières telles que le rendement, la résistance aux maladies et aux ravageurs, la qualité nutritionnelle, etc. L'objectif de l'hybridation est de croiser deux variétés parentales distinctes pour créer une descendance (hybride) qui combine les meilleurs traits des parents.

Le processus d'hybridation des céréales implique généralement les étapes suivantes :

**Sélection des parents** : Les chercheurs identifient des variétés parentales qui possèdent des caractéristiques souhaitées. Par exemple, une variété peut être choisie pour sa résistance aux maladies, tandis qu'une autre peut être choisie pour son rendement élevé.

**Croisement**: Les fleurs mâles d'une variété parentale sont pollinisées avec les fleurs femelles de l'autre variété parentale. Cela peut être réalisé manuellement en transférant le pollen d'une plante à l'autre, ou par des moyens naturels tels que le vent ou les insectes.

Production des hybrides: Les plantes hybrides résultantes du croisement sont cultivées. Ces hybrides combinent les caractéristiques des deux parents et peuvent présenter une amélioration significative par rapport aux variétés parentales d'origine.

Sélection et multiplication: Les hybrides sont évalués pour leurs performances agronomiques et leurs caractéristiques souhaitées. Les meilleurs hybrides sont sélectionnés pour la multiplication afin de produire des semences commerciales.

Il est important de noter que l'hybridation des céréales se fait principalement entre variétés de la même espèce. Par exemple, le maïs hybride est obtenu en croisant différentes variétés de maïs. Cela diffère de la modification génétique des organismes (OGM), où des gènes provenant d'espèces différentes peuvent être introduits dans une culture céréalière.

L'hybridation des céréales a contribué de manière significative à l'amélioration des rendements et à l'adaptation des cultures aux conditions locales. Cela a joué un rôle important dans l'augmentation de la production alimentaire pour répondre aux besoins croissants de la population mondiale.

## Les types d'hybridation :

### A. Hybridations intra spécifiques :

Selon **Demarly et Sibi ., 1989**. Hybridations intraspécifiques est la plus courante, elle consiste à un croisement de deux lignées pures de la même espèce. Elle est facile à réaliser et ne pose pas de problèmes d'ordre.

Les génotypes sont croisés à l'intérieur d'une même espèce avec un ou plusieurs partenaires qui apportent des qualités complémentaires ou qui intensifient, par l'effet cumulatif,

Les performances de chaque génotype, lorsqu'on veut compléter entre deux parents tout un ensemble de caractéristiques.

Dans la tribu des Triticeae, on reconnaît généralement deux sous tribus : Hordeineae, Triticineae. Chez cette dernière, outre le genre *Triticum* (sensu stricto), on a coutume de distinguer quatre autres genres, *Aegilops*, *Agropyron*, *Secale*, *Haynaldia*, qui constituent une source de gènes d'un intérêt agronomique certain: par exemple des résistances aux maladies, au froid, à la sécheresse, etc..., d'un type parfois nouveau, souvent supérieur à ce que l'on connaît chez le Blé (résistances non-spécifiques, plus générales, à certains parasites, par exemple). D'où l'idée, déjà forte ancienne, puisqu'elle remonte au début de ce siècle, de recourir à l'hybridation interspécifique dans les programmes d'amélioration du Blé. (**Cauderon, 1978**).

### B. Hybridations interspécifiques

On pratique cette méthode lorsque les caractères recherchés n'existent pas au sein de l'espèce, par exemple la rusticité. Dans ce cas, on utilise souvent les plantes issues d'espèces voisines, généralement sauvages. (**Demarly et Sibi., 1989**).

La majorité des cultures hybrides proviennent de croisements intraspécifiques ou interspécifiques. Cependant, les hybrides intergéniques offrent de plus grandes possibilités de créer des variations utiles, bien que cela soit complexe et chronophage. Le triticale est la première espèce de culture commerciale créée à partir d'un hybride intergénique entre le genre du blé (*Triticum spp.*) et le seigle (*Secale cereale*). Le triticale combine les qualités agronomiques du blé et du seigle pour donner une culture de céréales plus robuste, adaptée à des conditions climatiques et des sols variés, et offrant une meilleure qualité nutritionnelle et de panification que le seigle seul. Malgré les difficultés rencontrées lors des premières tentatives au XIXe siècle, le triticale est maintenant une espèce artificielle réussie. (Murphy, 2007).

## VII.2. Les méthodes modernes (biotechnologiques):

### VII.2.1 Définition de la biotechnologie :

La biotechnologie est définie comme l'utilisation de processus biologiques, d'organismes ou de systèmes pour développer ou créer des applications technologiques dans différents domaines tels que l'agriculture, la médecine et l'industrie (Wu et al., 2021).

Elle implique l'exploitation du pouvoir des organismes vivants ou de leurs composants pour produire des biens, des services ou des connaissances. La biotechnologie englobe un large éventail de techniques telles que le génie génétique, la culture de tissus et la fermentation, afin de manipuler et modifier les systèmes biologiques dans un but bénéfique (Huang et al., 2021). Ses applications ont le potentiel de révolutionner diverses industries et de contribuer aux avancées dans les domaines de la santé humaine, de la durabilité environnementale et de la production alimentaire. (Huang, He et Wang, 2021).

**La biotechnologie verte** est l'application des techniques de biotechnologie aux processus agricoles dans le but de développer des solutions plus respectueuses de l'environnement par rapport à l'agriculture industrielle traditionnelle. Un exemple concret est la modification génétique d'une plante pour qu'elle puisse produire elle-même un pesticide, réduisant ainsi la nécessité d'utiliser des pesticides externes. (Levin, 2003).

### L'amélioration génétique des plantes:

L'amélioration des plantes peut être définie comme la modification des caractères des plantes par l'homme pour mieux les adapter à ses besoins. De point de vue génétique, elle correspond à l'ensemble des opérations qui permettent de passer d'un groupe d'individus n'ayant pas certaines caractéristiques à un nouveau groupe, plus reproductible, apportant un progrès. Il s'agit de réunir dans un même individu le maximum de gènes favorables. (Salmi, 2020).

### VII.2.2 Les types de l'amélioration génétique

L'amélioration variétale est un mécanisme très délicat et long qui tient compte de divers facteurs; génétiques, physiologiques et pédoclimatiques. Cette amélioration peut utiliser les techniques de la génétique, du génie génétique, de la biochimie, de la physiologie et de la biotechnologie.

L'objectif final de cette amélioration est d'obtenir un matériel végétal performant haut producteur, tolérant aux stress environnementaux. (Chalbi et Demarly, 1991), donnant satisfaction à l'utilisateur et au consommateur, parfaitement homogène pour l'inscription au catalogue officiel des nouvelles variétés (Bensalem et Monneveux., 1993).

### a) Culture *in vitro*

La culture de tissus, la nouvelle technologie permet la multiplication ou le clonage de manière rapide d'une plante particulièrement productive sans attendre sa floraison et sa reproduction sexuelle. Initialement développée à grande échelle pour les orchidées, la culture de tissus a été perfectionnée pour diverses plantes, allant des séquoias aux pommes de terre.

La culture *in vitro* permet de cultiver des tissus ou des fragments d'organes isolés d'une plante tels que des apex, des bourgeons, des nœuds pouvant régénérer des pousses en milieu nutritif et en conditions axéniques (sans aucun contaminant biologique). Mais aussi des racines ayant une croissance de type infini, ou encore des feuilles maintenues en survie.

Cette technique permet également de cultiver des cellules isolées avoir même des protoplastes capables de se diviser, de former des cals, des tissus organisés et même de régénérer une plante entière. La culture *in vitro* permet donc d'utiliser toutes les potentialités régénératrices d'une plante (Lachachi, 2010).

### Activité antioxydante des grains de céréales *in vivo*:

Bien que les expériences *in vitro* indiquent de grandes capacités antioxydantes des céréales à grains entiers, il est questionnable de savoir si les méthodes sous-estiment la capacité antioxydante physiologique. Plusieurs études ont été réalisées afin d'évaluer la bioactivité des phytochimiques des grains de céréales, principalement sur des animaux et des humains. Le potentiel antioxydant des céréales peut être amélioré *in vitro* par l'action de la fermentation et de la digestion gastro-intestinale *in vitro* des céréales, ce qui est significativement corrélé à leur teneur totale en composés phénoliques (Masisi et al., 2016).

Jusqu'à présent, il n'est pas possible de réaliser une propagation de masse pour toutes les cultures. Dans le cas des céréales, les succès sont beaucoup moins nombreux.

La culture *in vitro* d'explants ou de fragments prélevés sur la plante permet différentes applications :

### La micro-propagation:

Elle permet de reproduire un individu et le multiplier en très grand nombre, à partir de cellules ou d'un fragment d'organe. Elle se réalise par exemple à partir de nœuds, de pousses axillaires et s'apparente au bouturage des jardiniers. Mis en culture, ces tissus se développent et donnent une plante entière grâce à l'usage séquentiel de milieux nutritifs adaptés.

La micro-propagation présente de nombreux avantages, tels que la production rapide de plantes en grande quantité, la conservation de la génétique d'une plante spécifique et la production de plantes exemptes de maladies. Elle est largement utilisée pour la propagation de plantes ornementales, de fruits, de légumes et même d'espèces menacées.

La culture nécessite une incubation dans des conditions contrôlées, comprenant une plage de température optimale, une humidité adéquate, une qualité de lumière ainsi qu'une intensité et une durée de la photopériode. (Murphy, 2007).

Selon Smith et al. (2018), la propagation de masse n'est pas réalisable pour toutes les cultures jusqu'à présent. En ce qui concerne les céréales, les réussites sont rares et limitées.

Une procédure efficace de multiplication clonale pour six variétés de riz cultivées en Argentine a été développée en utilisant des cultures de méristèmes apicaux, et la stabilité génétique des plantes micropropagées a été vérifiée par analyse d'isozymes (Medina et al., 2004).

### La culture de méristèmes

Les méristèmes sont formés de cellules non différenciées, à l'origine de tous les tissus de la plante. L'intérêt des méristèmes réside dans le fait que ce sont des structures indemnes de virus. Leur culture va permettre de régénérer des plantes saines.

Tout comme avec d'autres espèces végétales, il est possible de cultiver des apex de pousses isolées de céréales et de les propager indéfiniment. Dans la plupart des céréales, il existe un potentiel limité de multiplication végétative, car elles sont efficacement propagées par les graines. Cependant, il peut être intéressant de cloner des géotypes individuels *in vitro* dans certaines occasions, par exemple la multiplication de transformants avant le transfert en sol ou de lignées à fertilité réduite. De plus, les cultures de talles *in vitro* peuvent être maintenues à basse température pour le stockage du matériel génétique. (Lazzeri & Shewry, 1993).

### L'obtention d'embryons somatiques

L'embryogénèse somatique est la production d'embryons à partir de cellules non germinales (par exemple cellules méristématique) soumises à un traitement hormonal. Après cette induction, il se produit une multiplication des cellules suivie d'une différenciation progressive des embryons.

L'embryogénèse somatique et la biologie de la transformation sont des éléments critiques et centraux dans la transformation et l'édition du génome du maïs. La capacité de régénérer une plante fertile à partir d'une seule cellule végétative est une exigence fondamentale pour toutes les méthodes de transformation des plantes. Les embryons somatiques *in vitro* sont les résultats différenciés d'un parent explant dérivé de petits groupes de cellules ou de cellules individuelles, qui peuvent être régénérés en plantes entières en tant que clones génétiques indépendants. Ce processus de développement constitue la base centrale de toutes les approches actuelles de transformation et d'édition du génome dans le maïs. (Kausch et al., 2021).

La régénération des tissus céréaliers se produit principalement par embryogénèse somatique, avec des embryons somatiques similaires morphologiquement aux embryons zygotiques formés à partir de la surface des cals embryogénèse. Cependant, dans certains cas, la régénération semble se produire par organogénèse, où des apex de pousse sont formés superficiellement sur les tissus des cals. Comme l'organogénèse est généralement également

associée à l'embryogenèse, les pousses observées peuvent en réalité se développer à partir des méristèmes apicaux d'embryons somatiques "désorganisés" (Lazzeri & Shewry, 1993).

### **Le sauvetage des embryons:**

Les embryons obtenus après la fécondation peuvent être prélevés, mis en culture *in vitro* et donner un nouvel individu. Le sauvetage d'embryons consiste à prélever un embryon précocement, à le cultiver *in vitro*, soit pour accélérer les cycles végétatifs, soit parce qu'il ne pourrait pas se développer dans les tissus maternels, par exemple lorsqu'il résulte d'un croisement interspécifique.

Les techniques de sauvetage d'embryons ont permis l'introduction de nombreuses caractéristiques agronomiques importantes des espèces sauvages dans les céréales cultivées, et elles présentent un grand potentiel. Dans la tribu des Triticeae, de nouvelles combinaisons génétiques ont été créées pour produire des amphiploïdes synthétiques fertiles (produits homozygotes résultant du doublement des chromosomes d'hybrides interspécifiques ou intergéniques). (Lazzeri & Shewry, 1993).

Dans la littérature, il existe seulement quelques études spéciales axées sur l'évaluation de l'état histologique des embryons de céréales à leur stade critique d'autonomie relative. La différenciation du scutellum et de l'apex de la pousse est identifiée comme une étape cruciale, sur la base des travaux réalisés sur le blé, le riz et l'orge. Cette étape de différenciation représente une phase plus générale de l'organogenèse dans le développement de l'embryon de céréale. (Kruglova et al., 2020).

### **L'haplodiploïdisation:**

L'haplodiploïdisation consiste à obtenir des individus haploïdes doublés à partir de cellules reproductrices. Ces cellules germinales contiennent une seule copie du génome (cellules haploïdes) au lieu des deux présentes dans les cellules somatiques (cellules diploïdes). Au cours de la régénération de la plante, on obtient le doublement à l'identique du génome haploïde par application d'un composé chimique, la colchicine, extrait du colchique.

Les doubles haploïdes permettent aux sélectionneurs de produire des génotypes complètement homozygotes à partir de parents hétérozygotes en une seule génération. L'utilisation de la production de doubles haploïdes en sélection dépend largement du fait qu'une culture particulière soit autogame ou allogame. Les variétés d'espèces autogames, notamment les céréales à grains petits comme le blé, l'orge et le riz, sont généralement des génotypes homozygotes. Dans ce cas, les doubles haploïdes pourraient devenir de nouvelles variétés en une seule étape en "fixant" le produit d'un croisement sans avoir besoin de rétrocroisements. Alternativement, les doubles haploïdes peuvent être utilisés dans d'autres croisements.

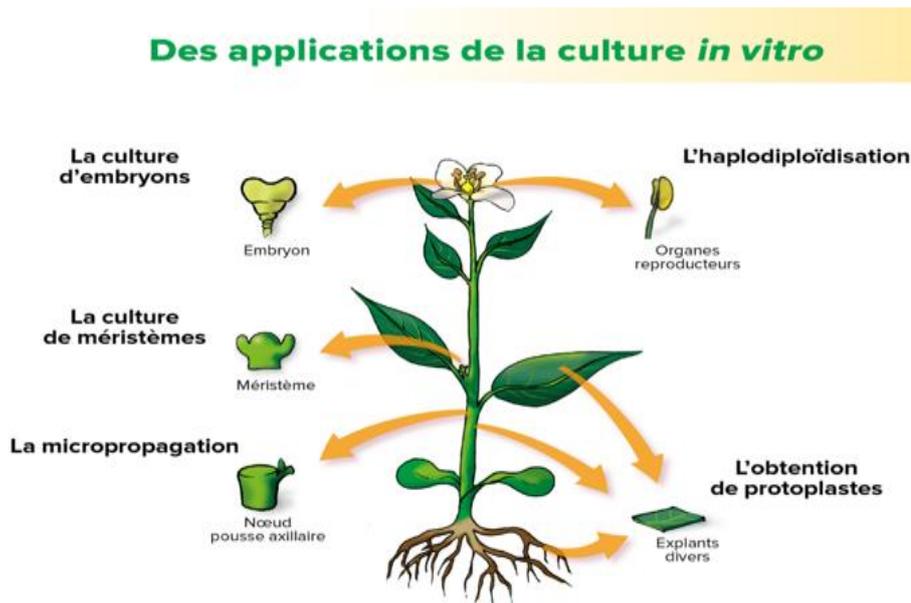
Dans les cultures allogames, telles que le maïs, les lignées de doubles haploïdes peuvent être utilisées comme parents pour la production d'hybrides au lieu des lignées de reproduction véritablement consanguines produites traditionnellement par plusieurs générations de consanguinité (pour des discussions sur les systèmes de sélection haploïdes, (Lazzeri & Shewry, 1993).

### L'obtention de protoplastes:

Les protoplastes sont des cellules débarrassées de la paroi pectocellulosique par hydrolyse enzymatique. Ils peuvent être obtenus à partir de différents tissus d'une plante, de préférence des limbes de jeunes feuilles. Limités seulement par la membrane cytoplasmique, les protoplastes peuvent fusionner ce qui permet de créer de nouvelles variétés, d'introduire des caractères à hérédité cytoplasmique.

Des plantes transgéniques peuvent être obtenues à partir de protoplastes transformés par électroporation. Cette méthode permet d'introduire de l'ADN nu (construction génique) dans les protoplastes par l'utilisation d'un champ électrique de haut voltage qui rend perméable leur membrane cytoplasmique.

Les protoplastes peuvent être isolés à partir de cellules de céréales en utilisant les mêmes méthodes que celles utilisées pour les espèces dicotylédones herbacées, mais il est beaucoup plus difficile d'induire leur division. La régénération à partir de protoplastes de céréales était un objectif majeur en culture de cellules végétales pendant près de 15 ans, et ce n'est qu'en 1986 qu'il a été rapporté la production de plantes fertiles de céréales (riz) à partir de protoplastes (Lazzeri & Shewry, 1993).



© GNIS-PEDAGOGIE.ORG

**Figure 20:** Les Applications de La culture *in vitro* (Becquet et al., 2011).

**Tableau 03** :Les techniques de culture *in vitro* et leurs principales applications. (Lachachi, 2010).

Techniques de culture <i>in vitro</i>	Application
- Culture d'embryons zygotiques.	- Sauvegarde de génotypes.
- Embryogenèse somatique.	- Production transformation génétique.
- Culture des nœuds et de bourgeons.	- Rajeunissement microboutures.
- Culture d'apex.	- État sanitaire et rajeunissement.
- Microgreffage.	- État sanitaire et rajeunissement.
- Micro propagation.	- Rajeunissement et production.
- Androgenèse et gynogenèse.	- Amélioration (haploïdes).
- Culture de cellules isolées.	- Modèle d'études et de recherches.
- Culture des tissus, des cals.	- Substances pharmacologiques.

### **b- La transgénèse:**

#### Définition:

La transgénèse est un outil du génie génétique, qui complète les méthodes traditionnelles d'amélioration des plantes quand ces dernières se heurtent à des impossibilités. Il s'agit en fait du transfert par transformation génétique d'une version « construite » d'un gène. De nos jours, de nombreux génomes ont été intégralement séquencés dont le génome humain. Il est donc désormais possible d'isoler une séquence d'ADN codant une protéine d'intérêt. (**Benabdoun, 2020**).

La génomique, la transformation des plantes et l'édition du génome sont interdépendantes pour réaliser des recherches approfondies sur le génome et adapter des voies complexes. Cette plateforme puissante a entraîné une demande croissante de créer, tester et cultiver des plantes dont le génome a été édité sans utilisation de transgènes. Les réactifs d'édition du génome sont efficaces lorsqu'ils sont utilisés *in vivo* et permettent de récupérer des plantes dont le génome a été modifié de manière stable. L'amélioration des méthodes de transformation est essentielle pour générer un grand nombre de modifications génomiques nécessaires à l'élevage moléculaire avancé. La capacité d'"éditer à volonté" dépend des capacités de transformation et de leur biologie. (**Kausch et al., 2021**).

Le maïs et le riz ont été les premiers à être transformés en 1988, suivis du blé et de l'avoine en 1992, du sorgho en 1993 et de l'orge en 1994. Dans les premières études, l'ADN était introduit dans des protoplastes isolés par électroporation ou par traitement au polyéthylène glycol. Actuellement, la méthode la plus couramment utilisée pour les céréales est le bombardement des tissus avec des microparticules revêtues d'ADN plasmidique, bien que

certain succès aient été signalés en utilisant l'*Agrobacterium*. Les cultures de tissus dérivés d'embryons immatures, d'embryons matures, de microspores et de tissus basaux sont ciblées pour le bombardement, selon le type de céréale à transformer. (Kausch et al., 1999).

Le maïs transgénique est devenu un élément important de la production mondiale de maïs et de l'agriculture moderne. Parmi les vingt-six cultures génétiquement modifiées (GM) "biotechnologiques" cultivées commercialement dans le monde, les variétés de maïs GM représentent le deuxième secteur le plus important (après le soja), avec une superficie de 60,9 millions d'hectares, soit 32% du total mondial (Kausch et al., 2021).

### Les différentes stratégies de transgénèse:

#### □ Introduire un nouveau caractère:

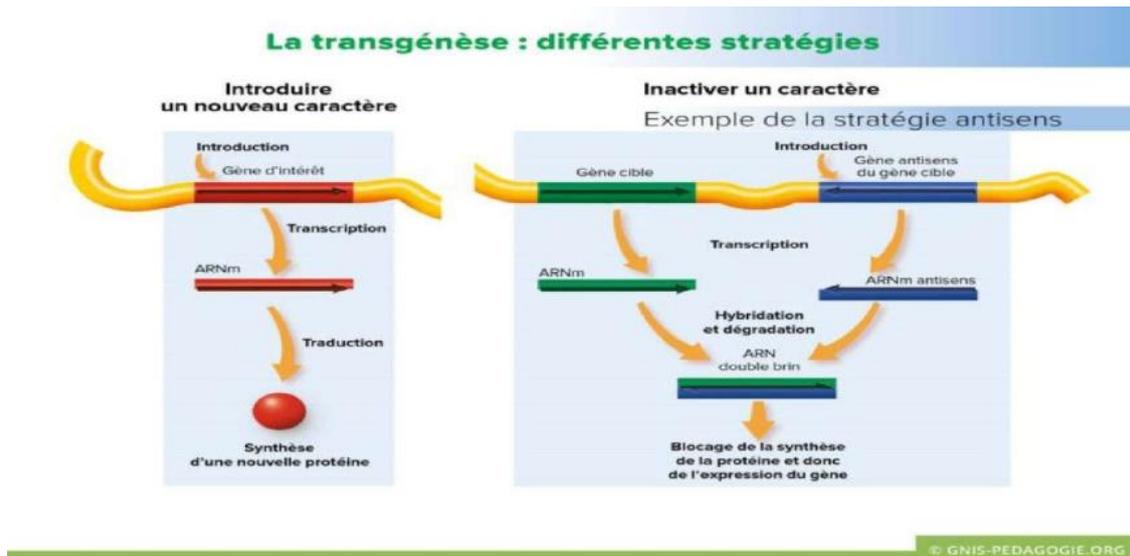
C'est un cas où le transfert de gènes s'accompagne d'un transfert de caractère. Une copie du gène d'intérêt est introduite dans la plante. Son expression, par l'intermédiaire d'un ARN messager, entraîne la production d'une protéine, responsable du nouveau caractère. Les exemples dans ce domaine sont nombreux : introduction d'un gène de résistance à des insectes, à des pathogènes, à des herbicides, modification de la composition des graines, production de molécules d'intérêt industriel ou pharmaceutique. (Khater, 2020).

Des exemples dans le contexte de la transgénèse pour introduire un caractère dans des espèces céréalières

- Dans le riz (*Oryza sativa*), la transgénèse a été utilisée pour introduire un gène de résistance aux maladies, comme le gène Xa21 qui confère une résistance au flétrissement bactérien causé par *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (Song et al., 1995).
- Dans le blé (*Triticum aestivum*), des chercheurs ont introduit un gène de résistance à la rouille du blé (*Puccinia triticina*), une maladie fongique grave, afin de renforcer la capacité du blé à résister à cette maladie (McIntosh et al., 1995).
- Dans l'orge (*Hordeum vulgare*), la transgénèse a été utilisée pour introduire un gène de tolérance à la sécheresse, tel que le gène DREB1, pour améliorer la résistance de l'orge aux conditions de stress hydrique (Mane et al., 2009).

#### Inactiver un caractère:

Dans ce cas, il n'y a plus à proprement parler de transfert de gènes, on agit sur l'expression d'un gène déjà présent dans la plante. La stratégie anti sens est la voie la plus couramment utilisée. Elle consiste à bloquer l'expression d'un gène cible. Une copie « inversée » de ce gène est introduite, d'où le nom de la technique. Les ARN messagers (ARNm) produits par la copie originelle du gène et par celle introduite sont complémentaires. Ils s'hybrident donc et forment une molécule d'ARN double brin. Cette molécule aberrante est dégradée. Ainsi l'expression du gène est bloquée et le caractère ne s'exprime plus. Cette technique a permis d'obtenir des espèces végétales à teneur en lignine réduite, des tomates et des melons à maturation retardée. (Belattar, 2021).



**Figure 21:** Les différentes stratégies de transgénèse (Belattar , 2021).

Des exemples dans le contexte de la transgénèse pour inactiver un caractère dans des espèces céréalières :

- a transgénèse a été utilisée avec succès pour inactiver le gène responsable de la synthèse de l'amidon dans le maïs (*Zeamays*) (Smith et al., 2004). Cette approche a permis de produire des variétés de maïs à faible teneur en amidon, ce qui présente un intérêt pour certaines applications industrielles et alimentaires (Jones et al., 2006).
- Pour inactiver la synthèse de l'acide phytique dans le riz (*Oryza sativa*), des chercheurs ont utilisé la transgénèse pour introduire un ARN interférent ciblant les gènes responsables de cette voie métabolique (Shi et al., 2016).
- Dans le blé tendre (*Triticum aestivum*), la transgénèse a été utilisée pour supprimer l'expression du gène codant pour la protéine responsable de la sensibilité au gluten chez les personnes atteintes de la maladie cœliaque (Gil-Humanes et al., 2010).
- Des études ont également été menées sur l'avoine (*Avena sativa*) pour inactiver le gène responsable de la synthèse de la lécithine dans le but de réduire la teneur en lipides et d'améliorer la qualité nutritionnelle des grains (Järvi et al., 2018).

### Les méthodes de la transgénèse:

#### □ Les méthodes dites directes comme la biolistique:

Consiste à bombardier les cellules de la plante par des particules de tungstène ou d'or, de diamètre micrométrique, elles-mêmes enrobées d'ADN ; ou par introduction d'ADN dans des protoplastes (cellule végétale sans paroi pecto cellulosique) par action d'un agent chimique ou d'un champ électrique (électroporation). Il faut ensuite parvenir à régénérer une plante entière à partir de cette cellule végétale transformée.

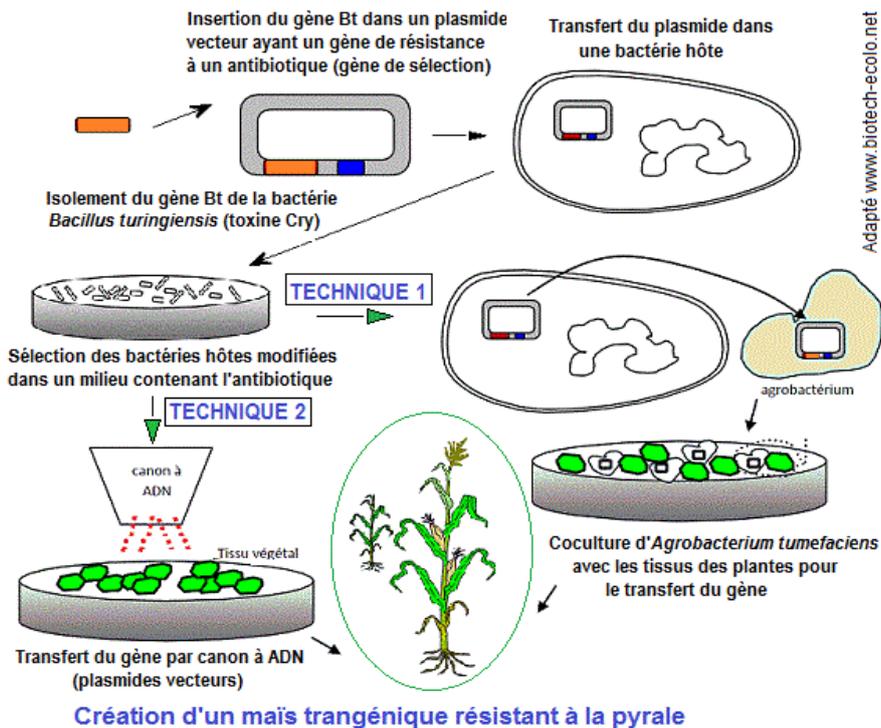
### □ Les méthodes dites indirectes :

Utilisent des agents bactériens, le vecteur le plus souvent utilisé est la forme désarmée d'*Agrobacterium tumefaciens*, Cette bactérie pathogène à l'état sauvage cause, chez les plantes infectées, la formation de tumeurs principalement au niveau du collet (zone de transition entre le système racinaire et la tige feuillée). Cette maladie appelée galle du collet ou « crown-gall » résulte du transfert d'une partie d'un ADN plasmidique de la bactérie (ADN-T) dans le génome de la plante. C'est l'expression des gènes de virulence (vir) dans les agrobactéries qui permet le transfert de l'ADN-T dans les cellules végétales. (Benabdoun ., 2020).

**Exemple :** Le Maïs B résistant aux insectes.

Les maïs Bt sont des variétés de maïs qui ont été modifiées génétiquement par l'ajout du gène leur conférant une résistance aux principaux insectes nuisibles du maïs, entre autre une pyrale: la pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis*. Le terme Bt fait référence au *Bacillus thuringiensis* dont on a extrait le gène codant la toxine Cry1Ab. En 2003, la surface de maïs transgénique Bt plus tolérante à un herbicide, occupe 12,3 millions d'hectares, correspondant à 18 % de la surface d'OGM totale cultivés dans le monde

La pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*, est un papillon redouté des agriculteurs : ses larves se développent dans les plants de maïs, faisant chuter les rendements quand l'infestation est massive. Pour contrer ce ravageur, un maïs Bt résistant aux attaques de la pyrale a été mis sur le marché en 1996. Un laboratoire désire produire du maïs Bt par génie génétique afin de le commercialiser auprès des semenciers. (Anonyme, 2012).



**Figure 22:** Une technique d'obtention du maïs Bt. ([www.biotech-ecolo.net](http://www.biotech-ecolo.net)).

### **c) La mutagenèse :**

#### Définition :

La mutagenèse est un acte technique employé par les biologistes et les sélectionneurs pour créer de la diversité génétique à des fins de recherche ou de création variétale. Les mutations obtenues sont alors qualifiées de mutations provoquées ou de mutations induites. Diverses techniques ont été employées depuis le début du XXe siècle. Elles ont participé à l'amélioration des connaissances et donné naissance à de nombreuses variétés.

Ces techniques, dites conventionnelles utilisant des méthodes physiques (rayons, particules) ou chimiques, sont encore largement exploitées même si elles sont progressivement remplacées par d'autres dans une recherche de meilleure efficacité (Alain, 2014).

#### **Les types de mutagenèse :**

Mutagenèse est une méthode de création de variabilité génétique induisant des mutations par l'emploi d'agents chimiques, physiques ou biologiques de manière aléatoire ou ciblée. (Alain, 2014).

**La mutagenèse aléatoire :** consiste à soumettre des cellules végétales à des agents mutagènes (agents chimiques ou physiques (rayons X ou ultraviolets)). Ces agents vont provoquer dans le matériel génétique des lésions dont la réparation imparfaite crée les mutations. Il n'y a ici aucun contrôle sur les mutations générées (nature, lieu) (Cornu, 2011).

**Mutagenèse chimique :** L'emploi des méthodes de mutagenèse chimique a une histoire quelque peu différente. Elle est liée à celle des gaz de combat (ypérite) utilisés pendant la première guerre mondiale. L'analyse de l'effet des substances chimiques sur les organismes vivants a longtemps été couverte par le secret militaire, retardant ainsi les applications au domaine civil. Au cours des années 40, la connaissance des effets des agents mutagènes chimiques progresse et le mode d'action sur la cellule et l'ADN est rapidement caractérisé. (Alain, 2014).

#### **Les applications de la mutagenèse pour la création de diversité génétique dans les céréales:**

- Pour le riz (*Oryza sativa*), une étude a été réalisée pour induire des mutations génétiques à l'aide d'agents mutagènes chimiques tels que l'EMS (méthanesulfonate d'éthyle) afin de générer une diversité génétique pour la sélection de traits améliorés (Shahid et al., 2011).
- Dans le blé (*Triticum aestivum*), des recherches ont été menées pour induire des mutations à l'aide de rayonnements ionisants tels que les rayons gamma ou les rayons X, afin de créer des populations mutantes pour l'identification de traits agronomiques souhaitables (Ayana et al., 2009).
- L'orge (*Hordeum vulgare*) a également fait l'objet d'études de mutagenèse pour générer une diversité génétique. Par exemple, une étude a utilisé des agents mutagènes chimiques tels que l'EMS pour induire des mutations et créer une collection de lignées mutantes pour l'analyse de traits spécifiques (Talamè et al., 2018).

**d) Hybridation somatique:**

Le protoplaste est apte à recevoir tout élément étranger sans l'identifier comme un «non-soi». On peut donc agglomérer deux protoplastes appartenant à des espèces, à des genres... et même à des règnes biologiques différents. On appelle cette opération fusion somatique. La cellule d'addition et de recombinaison résultante peut, avec certaines restrictions, régénérer un individu dit «hybride somatique». (**Demarly et Sibi, 1996**).

Les sélectionneurs de plantes ont produit des céréales améliorées en combinant des gènes désirables issus de la diversité génétique naturelle. Cependant, la variabilité au sein de plusieurs des principales céréales a été réduite car les variétés locales ont été remplacées par des variétés à lignée pure. Afin de compenser cet effet et de fournir une variabilité génétique supplémentaire, les sélectionneurs se tournent désormais vers l'incorporation de gènes provenant d'espèces sauvages apparentées ou d'autres genres. Lorsque les espèces sauvages sont étroitement apparentées à l'espèce cultivée (par exemple *Hordeum vulgare* et *H. spontaneum*), des croisements sexuels standard peuvent être réalisés pour introduire une diversité génétique pour les caractéristiques agronomiques. Lorsque les espèces sauvages sont plus éloignées ou lorsqu'une variation génétique attrayante existe dans d'autres genres, les croisements standards ne seront pas possibles et des techniques de transfert de gènes seront nécessaires. La meilleure technique établie pour le transfert de gènes étrangers (par croisement intergénérique) est le sauvetage d'embryons hybrides, mais deux techniques plus récentes, telles que la fécondation *in vitro* et l'hybridation somatique (fusion de protoplastes), pourraient également avoir des applications (**Lazzeri & Shewry, 1993**).

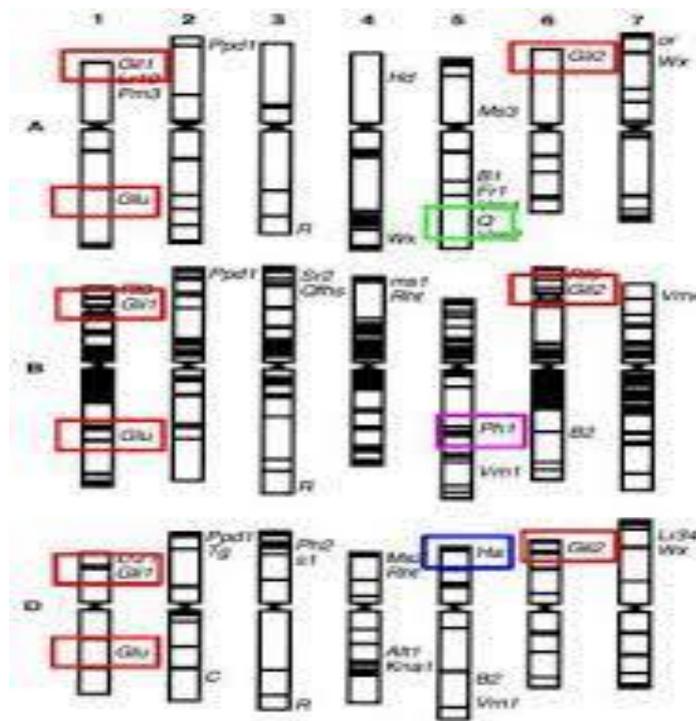
**e) Séquençage:**

Suite à la découverte de la structure de l'ADN en 1953 par Jim Watson et Francis Crick, différentes méthodes de séquençage de l'ADN se sont développées à partir de la fin des années 1970. Le séquençage de l'ADN consiste à déterminer l'ordre d'enchaînements des nucléotides d'un fragment d'ADN. Il permet ainsi d'obtenir, à partir du génome d'un individu, l'ensemble des informations issues des séquences d'ADN qui composent son matériel génétique.

Toutes les techniques de séquençages existantes ont un point commun: elles se basent sur les connaissances qui ont été acquises depuis une trentaine d'années sur les mécanismes de réplication de l'ADN avec l'utilisation de l'ADN polymérase. Cette enzyme est capable de synthétiser un brin complémentaire d'ADN à partir d'un brin matrice. Elle a l'avantage d'avoir une activité correctrice, c'est à dire qu'à chaque incorporation d'une nouvelle base, la polymérase vérifie que cette base est la bonne, ce qui limite le taux d'erreurs. On peut estimer ce dernier à une erreur toutes les 3 milliards de bases. Depuis une dizaine d'années, des nouvelles technologies dites de séquençage « haut débit » ou « nouvelle génération » (Next-Generation Sequencing : NGS) ont été développées et commercialisées. Ces nouvelles technologies améliorent considérablement la rapidité et le coût du séquençage entraînant une augmentation exponentielle du nombre de séquences produites (**Vannier, 2017**).

La séquence du génome de tout organisme est essentielle pour comprendre sa biologie et son utilité. Les plantes ont des génomes nucléaires diversifiés, complexes et parfois très

étendus, ainsi que des génomes mitochondriaux beaucoup plus petits et des génomes de chloroplastes plus conservés. Les séquences des génomes des plantes soutiennent notre compréhension de la biologie végétale et servent de plateforme clé pour la sélection génétique et l'amélioration des plantes cultivées afin d'assurer la sécurité alimentaire. Le développement de la technologie de séquençage à longue lecture a été une avancée majeure pour soutenir le séquençage et l'assemblage précis des génomes des plantes au niveau chromosomique. Ces résultats contribuent à la conservation de la biodiversité, à l'adaptation aux changements climatiques et à l'amélioration de la durabilité de l'agriculture, ce qui favorise la sécurité alimentaire et nutritionnelle (Henry, 2022).



**Figure 23:** Quelques gènes localisés sur les chromosomes de blé. (Levesque et Madre, 2013)

#### f) Sélection par les marqueurs moléculaire :

##### Définition de marqueurs moléculaires :

Les marqueurs moléculaires sont un type de marqueur génétique composé d'un fragment d'ADN qui sert de repère pour suivre la transmission d'un segment de chromosome d'une génération à une autre types de marqueurs

Un marqueur moléculaire est un locus polymorphe qui renseigne sur le génotype de l'individu qui le porte. Les marqueurs moléculaires correspondent donc au polymorphisme révélé au niveau de l'ADN. L'analyse de ce polymorphisme par les techniques de biologie moléculaire s'adresse à l'ensemble du génome, qu'il soit ou non traduit en protéines, et est indépendante des conditions de l'environnement (Langridge et al., 2001). En outre, le nombre de marqueurs observables est théoriquement illimité et le génotype d'une plante peut être déterminé à un stade très précoce, aussitôt que le matériel est disponible pour l'extraction de l'ADN (Eagles et al., 2001). Ces marqueurs seront d'une grande importance dans l'amélioration

des cultures à valeur agronomique et dans les programmes de sélection assistée par marqueurs chez les céréales (**Dekkers, Hospital, 2002**).

### Présentation d'un "Bon" marqueur :

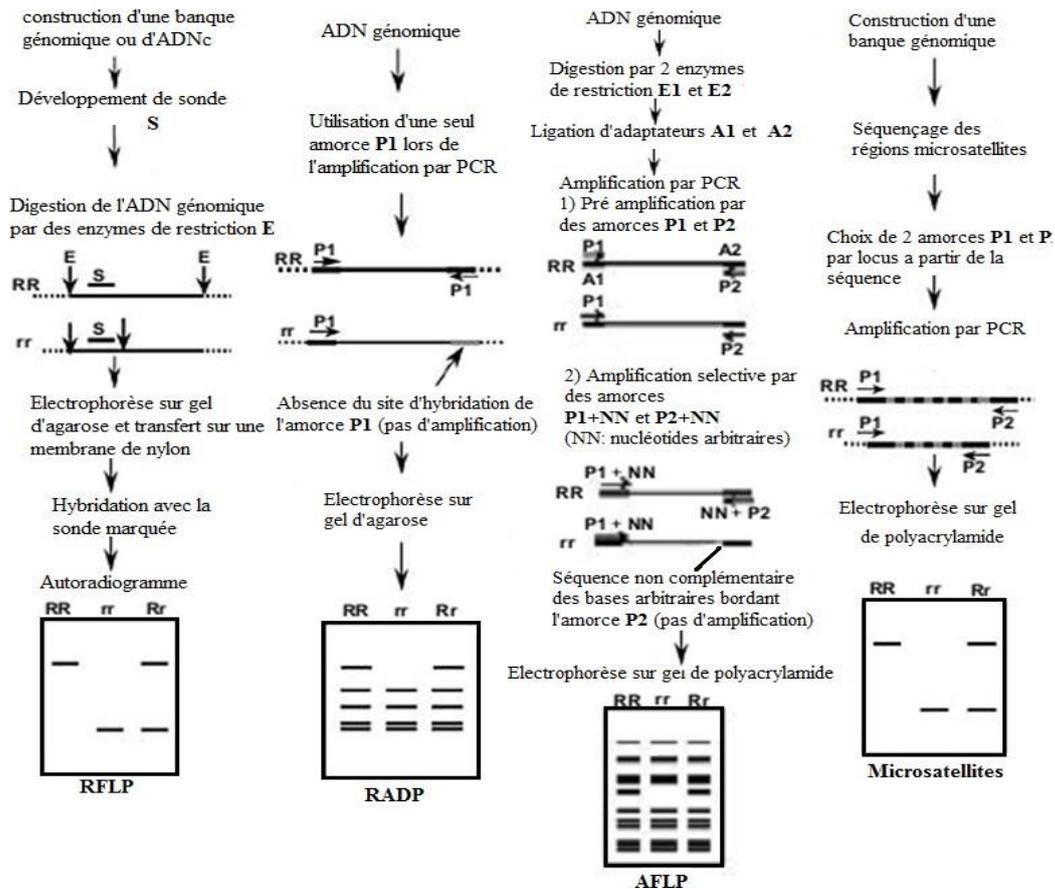
Selon **Devienne (1999)** un marqueur génétique "idéal" est:

- **Polymorphe**: La matière première du généticien est la variabilité,
- **Multi-allélique**: C'est-à-dire possédant plusieurs allèles (donc des séquences d'ADN différentes) sur un même locus (**Plomion, 2003**).
- **Co-dominant**: L'hétérozygote présente simultanément les caractères des deux parents homozygotes, il peut être distingué chacun des homozygotes parentaux.
- **Nonépistasique**: Son génotype peut être "lu" à partir de son phénotype quel que soit le génotype aux autres locus. La codominance et la nonépistasie peuvent être respectivement définies comme l'absence d'interaction intra et inter locus.
- **Neutre**: Les substitutions alléliques au locus marqueur n'ont pas d'autres effets phénotypiques (et donc éventuellement électifs) que ceux qui permettent de déterminer son génotype. Dans leur très grande majorité les polymorphismes moléculaires sont neutres.
- **Insensible au milieu** : Le génotype peut être inféré à partir du phénotype quel que soit le milieu.

Il existe différents types de moléculaires

- RFLP : Polymorphisme de longueur de fragments de restriction
- AFLP : Polymorphisme de longueur des fragments amplifiés
- SSLP : Simple séquence length polymorphisme
- RAPD : Amplification aléatoire d'ADN polymorphe
- SNP : Polymorphisme nucléotidique
- SSCP : Polymorphisme de conformation des simples brins
- EST : Marqueur de séquence exprimé
- CNV : Variabilité du nombre de copies
- VNTR : Séquence répétée
- SSR : Simple séquence repeat ou polymorphisme de microsatellite

Les plus utilisés sont les marqueurs RFLP, RAPD, AFLP. (**Anonyme, 2021**)



**Figure 24 :** Comparaison des principales techniques de marquage moléculaire.

(Najimiet al., 2003)

Les marqueurs moléculaires jouent un rôle crucial dans la recherche et le développement de variétés de céréales résistantes aux maladies. L'utilisation de marqueurs moléculaires permet d'identifier rapidement et précisément les gènes responsables de la résistance aux maladies dans les plantes.

L'importance des marqueurs moléculaires réside dans leur capacité à accélérer le processus de sélection des variétés de céréales résistantes. Au lieu de devoir attendre plusieurs cycles de reproduction pour observer les caractéristiques souhaitées, les marqueurs moléculaires permettent de détecter rapidement les gènes de résistance. Cela permet aux chercheurs et aux sélectionneurs de développer plus efficacement des variétés résistantes aux maladies, en réduisant le temps et les coûts associés.

La résistance aux maladies est essentielle dans la culture des céréales, car les maladies peuvent causer d'importantes pertes de récoltes et réduire la productivité agricole. Les céréales résistantes aux maladies offrent une meilleure sécurité alimentaire, une stabilité économique pour les agriculteurs et contribuent à la durabilité environnementale en réduisant l'utilisation d'intrants chimiques tels que les pesticides.

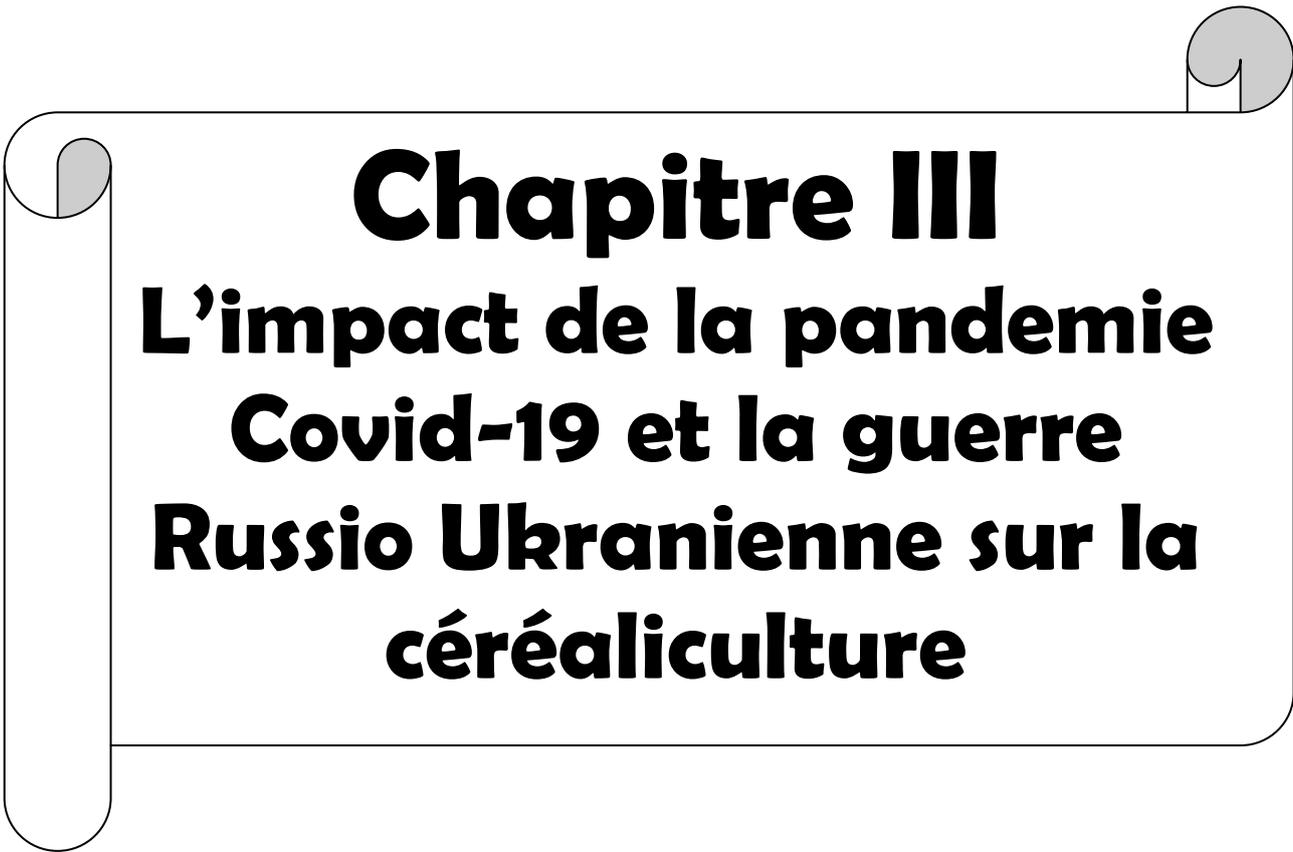
En utilisant les marqueurs moléculaires, les chercheurs peuvent également suivre la présence et la propagation de la résistance aux maladies dans les populations de plantes, ce qui est essentiel pour surveiller et prévenir l'apparition de nouvelles souches de pathogènes.

On peut distinguer pour certaines maladies, comme l'oïdium et les rouilles brune et jaune, deux types de résistance: La résistance spécifique et la résistance non spécifique.

La résistance spécifique est généralement mono génique et dominante. Elle s'exprime dès le stade plantule et se caractérise par une très grande spécificité race/cultivar. Cette résistance résulte d'une interaction spécifique entre un gène de résistance de la plante hôte et un gène d'avirulence du pathogène. Elle a l'inconvénient d'être rapidement surmontée par le pathogène et donc d'être peu durable.

La résistance non spécifique (appelée encore résistance adulte) est caractérisée par la sensibilité des jeunes plantules mais la résistance des plantes adultes lorsqu'elles sont inoculées par un mélange de races actuelles du pathogène. Cette résistance s'exprime donc au stade adulte de certaines variétés et conduit à un ralentissement du développement de la maladie. Ces variétés conservent généralement un bon niveau de résistance durant plusieurs années de culture en différents lieux. Cette résistance a été détectée chez les cultivars de blé qui ne possèdent aucun gène majeur connu ou ayant des gènes majeurs devenus inefficaces. Bien que la génétique de la résistance non spécifique, soit principalement quantitative, ont rapporté que des gènes majeurs uniques peuvent être impliqués dans cette résistance. En effet, ces auteurs ont montré dans leur étude que la résistance adulte à la rouille jaune est contrôlée par un seul gène majeur Yrns-b1 localisé sur le chromosome 3BS. Le nombre de gènes majeurs impliqués dans les résistances adultes aux maladies qui sont bien caractérisés (Lr12, Lr13, Lr34, Lr35, Lr46, Yr18, Yr28, Yrns-B1, Sr2, Sr22) reste faible en comparaison avec les gènes à résistancespécifique. D'autres auteurs ont montré que la résistance adulte à l'oïdium et à la rouille brune est gouvernée par 2 à 3 gènes à effets additifs prédominants. Contrairement aux caractères à déterminisme simple, les caractères quantitatifs polygéniques sont soumis aux influences conjointes de différents facteurs génétiques (QTL) et de facteurs environnementaux (Najimi et al, 2003).

**Tableau: Exemples de gènes majeurs de résistance aux maladies et aux insectes cartographiés au cours des cinq dernières années, au moyen des marqueurs moléculaires chez le blé tendre. (Voir annexe).**

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is unrolled on the left side, and there are two small circular tabs on the top edge, one on the left and one on the right. The text is centered within the scroll.

**Chapitre III**  
**L'impact de la pandémie**  
**Covid-19 et la guerre**  
**Russio Ukrainienne sur la**  
**céréaliculture**

## I. Introduction

Le Corona virus se propage à un rythme très rapide, provoquant des endommagements considérables et persistants sur tous les secteurs sans exception. Néanmoins l'ampleur de l'impact ainsi que les pertes résultant de la pandémie diffèrent d'un secteur à l'autre et d'un pays à l'autre, mais ce qui compte le plus pour les peuples pendant les crises c'est de faire face à leurs besoins alimentaires plus que tout autre besoin. De ce fait, en se posant la question,

Quel est l'impact de la pandémie sur la sécurité alimentaire?

## II. Définitions

### La sécurité alimentaire:

Lors du Sommet mondial de l'alimentation de 1996, la sécurité alimentaire a été définie de la façon suivante: "La sécurité alimentaire existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active."

L'analyse de la sécurité alimentaire repose sur trois piliers: les disponibilités alimentaires, l'accès à l'alimentation et l'utilisation des aliments (**OMS, PAM, & UNICEF, 2019**).

### La pandémie:

Une pandémie est définie par l'OMS comme "la propagation mondiale d'une nouvelle maladie" (**Pujawan& Bah, 2022**).

La pandémie se réfère à la propagation rapide et étendue d'une infection à travers plusieurs pays ou continents, touchant un nombre considérable de personnes (**Horton, 2020**). Elle se distingue des épidémies qui sont des foyers de maladies limités à une région spécifique.

### Généralité sur la COVID-19 :

Selon la FAO (2020), depuis fin 2019 et début 2020, une épidémie de la COVID-19, une maladie infectieuse causée par un corona virus récemment découvert, s'est rapidement répandue à l'échelle mondiale, entraînant un nombre considérable de victimes et de malades, ainsi que la mise en place de mesures de confinement et d'atténuation. Ces mesures comprennent la distanciation sociale, la restriction des déplacements de personnes et la fermeture partielle d'infrastructures telles que les routes, les ports, les aéroports, les usines, les commerces et les banques, ce qui a paralysé l'économie mondiale.

La COVID-19, également connue sous le nom de coronavirus disease 2019, est une maladie infectieuse causée par le coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère 2 (SARS-CoV-2). Elle a été identifiée pour la première fois à Wuhan, en Chine, en décembre 2019, et s'est depuis propagée à l'échelle mondiale, donnant lieu à une pandémie (**OMS, 2021**).

Le virus SARS-CoV-2 se transmet principalement d'une personne à l'autre par le biais de gouttelettes respiratoires produites lorsqu'une personne infectée tousse, éternue, parle, chante ou respire. Il peut également se propager en touchant des surfaces ou des objets contaminés par le virus, puis en se touchant le visage, en particulier la bouche, le nez ou les yeux (OMS, 2021).

Les symptômes courants de la COVID-19 comprennent la fièvre, la toux, la fatigue, les courbatures, les maux de gorge, la perte du goût ou de l'odorat, la congestion nasale, les maux de tête et les difficultés respiratoires. Certaines personnes infectées peuvent présenter des symptômes légers à modérés, tandis que d'autres peuvent développer des formes plus graves de la maladie, pouvant entraîner une pneumonie, une insuffisance respiratoire, voire la mort (CDC, 2021).

Les mesures préventives clés pour réduire la propagation de la COVID-19 comprennent le lavage fréquent des mains avec du savon et de l'eau, l'utilisation de désinfectant pour les mains à base d'alcool, le port d'un masque facial dans les lieux publics, la pratique de la distanciation physique en maintenant une distance d'au moins un mètre avec les autres, et la limitation des contacts sociaux et des déplacements non essentiels (PubMed, 2021).

### **III. La situation de la sécurité alimentaire pendant le covid -19 :**

#### **A. Dans le monde :**

La pandémie COVID-19 est une crise sanitaire et humaine qui menace la sécurité alimentaire et la nutrition de millions de personnes dans le monde.

Avant le début de cette pandémie, plus de 820 millions de personnes souffraient d'insécurité alimentaire chronique. Les dernières données disponibles montrent que la sécurité alimentaire de 135 millions de personnes a atteint un seuil critique ou pire. D'ici la fin de l'année, ce nombre pourrait quasiment doubler en raison des conséquences de la COVID-19. De même, le nombre d'enfants de moins de cinq ans souffrant d'un retard de croissance s'élève aujourd'hui à 144 millions, soit plus d'un enfant sur cinq dans le monde. Quelque 47 millions d'enfants souffrent d'émaciation. Tous ces chiffres pourraient augmenter rapidement. À la fin du mois de mai, 368 millions d'écoliers ne bénéficiaient plus des repas scolaires quotidiens dont ils dépendaient. La pandémie pourrait faire basculer environ 49 millions de personnes dans l'extrême pauvreté en 2020. Chaque fois que le produit intérieur brut mondial baisse d'un point de pourcentage, 700 000 nouveaux cas de retard de croissance sont à déplorer. Ces effets de revenu, combinés à d'autres chocs d'offre, pourraient entraîner une augmentation rapide du nombre de personnes en situation d'insécurité alimentaire ou nutritionnelle aiguë dans les trois ou quatre mois à venir. (UN., 2020).

#### **B. En Algérie:**

La sécurité alimentaire de l'Algérie est en grande partie dépendante de deux facteurs fortement impactés par la pandémie de la covid-19 : les finances publiques et le marché mondial des produits alimentaires. Le poids des importations dans la satisfaction des besoins alimentaires du pays témoigne de cette sensibilité aux perturbations du fonctionnement de ce marché

mondial. A partir de ce constat, quatre points de fragilité sont susceptibles d'être directement impactés par la crise économique engendrée par la pandémie : la demande locale pour les produits alimentaires et la sécurité alimentaire des ménages économiquement vulnérables ; la production agricole et alimentaire nationale ; les chaînes logistiques locales d'approvisionnement des marchés en denrées alimentaires ; ainsi que les importations alimentaires (**Daoudi & Bouzid, 2020**)

En mars 2020, l'Algérie a connu une forte augmentation de la demande de produits alimentaires, notamment de semoule, de farine, de céréales sèches et de pâtes, en raison des inquiétudes des familles quant à la pénurie alimentaire alimentée par les médias et les réseaux sociaux. Par conséquent, ces produits sont devenus indisponibles et leurs prix ont augmenté. Les ministères de l'agriculture et du commerce ont réagi à ces événements en intensifiant les mesures de contrôle pour prévenir les monopoles et la spéculation, et rééquilibrer le marché.

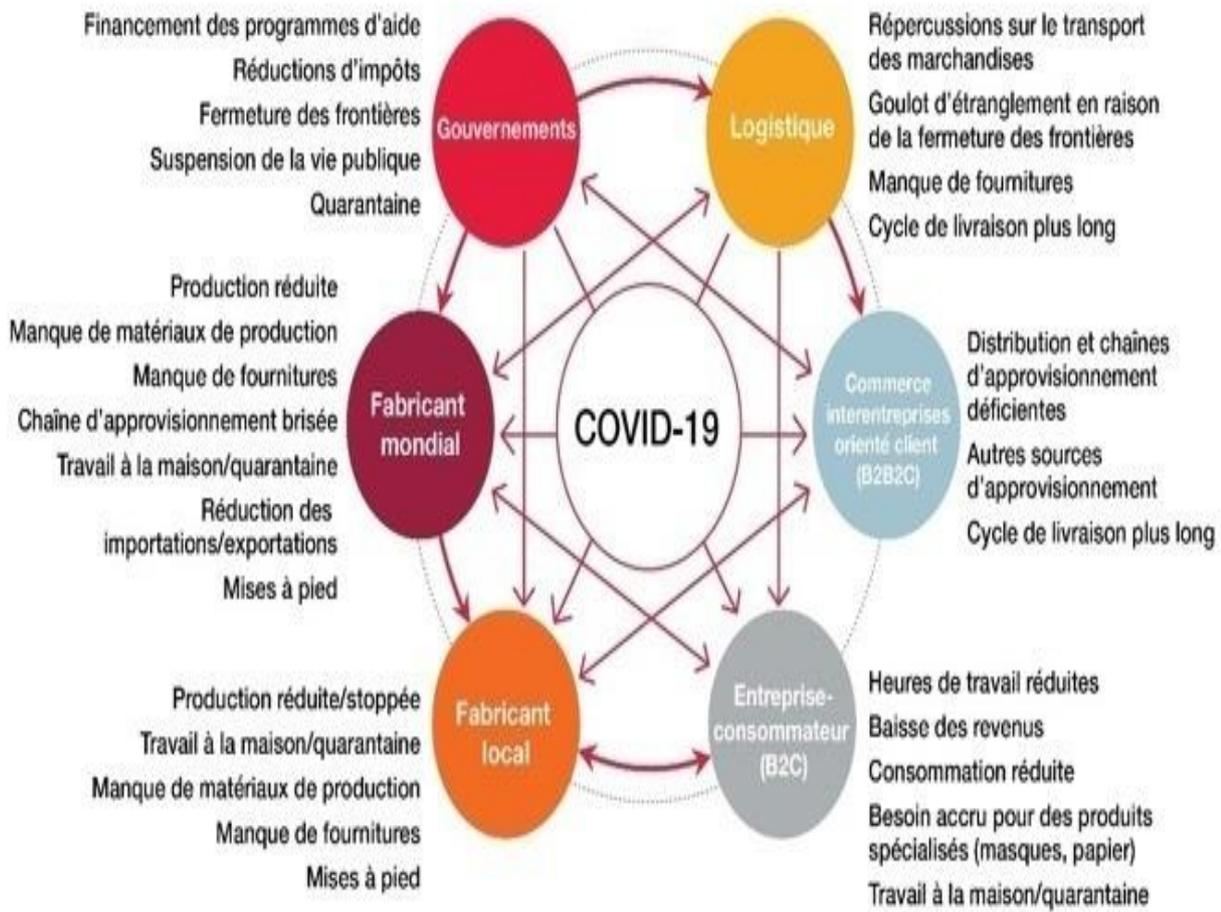
En Algérie (comme dans le reste du monde) les mesures de quarantaine ont également contribué à un impact négatif sur les quantités de cultures agricoles saisonnières dans certaines régions. Par exemple, en raison des mesures de quarantaine, les agriculteurs ont été temporairement contraints de quitter leur emploi par crainte de contracter le virus. Les heures de travail ont été réduites pour certains, tandis que d'autres ont souffert d'un manque de semences et d'engrais nécessaires en raison de leur rareté sur le marché. Tout cela a finalement eu un impact considérable sur les quantités de cultures agricoles (**Mouloudj et al., 2020**)

#### **IV. L'impacte de la pandémie de covid 19**

##### **A. Perturbations de la chaîne d'approvisionnement :**

Le terme "chaîne d'approvisionnement" (Supply Chain) désigne l'ensemble des organisations et des procédures dans différentes entreprises telles que les fournisseurs, les fabricants et les distributeurs qui collaborent avec l'ensemble de la chaîne de valeur pour obtenir différents matériaux, les transformer en produits finaux et les distribuer aux consommateurs. La chaîne d'approvisionnement détermine comment les opérations peuvent être menées de manière efficace pour obtenir les fournitures adéquates, au bon endroit et au bon moment (**Arji, Goli et al., 2023**).

La pandémie de Covid-19 a entraîné des perturbations durables dans les chaînes d'approvisionnement mondiales. Alors que la demande mondiale a rapidement rebondi avec la réouverture des économies, l'offre a du mal à suivre, ce qui a entraîné une augmentation significative des prix des matières premières. Les facteurs responsables de cette situation comprennent l'inadéquation entre l'offre et la demande, les conditions météorologiques, les perturbations liées à la Covid-19, les décisions de l'OPEP+, les catastrophes naturelles et les grèves de travailleurs. Cette hausse des prix des matières premières affecte les fabricants dépendants de ces matières premières, impactant également le prix et la disponibilité des biens intermédiaires et de la main-d'œuvre. (**Arji, Goli et al., 2023**).



**Figure 25:** Interdépendances au sein de la chaîne d’approvisionnement mondiale et impacts de la COVID-19(**cgi.com**)

### B. Réduction de la main-d'œuvre agricole:

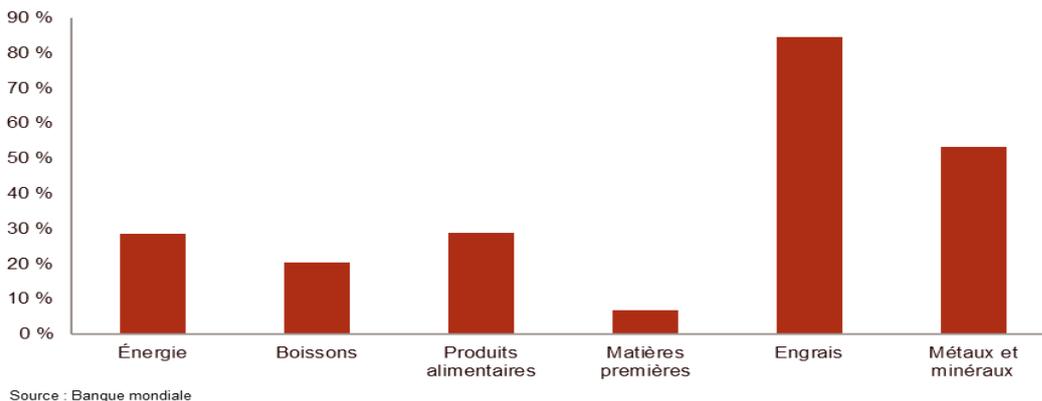
Les mesures de distanciation sociale et les restrictions de mobilité ont entraîné une pénurie de main-d'œuvre agricole, en particulier pour les travaux saisonniers tels que la plantation et la récolte des cultures céréalières. Cela a eu un impact négatif sur la production et la récolte des céréales, réduisant ainsi la disponibilité des produits sur le marché.

Selon **Benmihoub et al. (2019)**, Les chaînes d’approvisionnement ont enregistré des perturbations et des ruptures en raison des restrictions imposées au transport de marchandises et au déplacement de la main-d’œuvre: l’industrie céréalière française a subi une pénurie de main-d’œuvre et de camions de transport ; le fonctionnement des ports fut gravement perturbé par l’absence de dockers ou par les opérations de désinfection ; les contrôles sanitaires aux frontières et les mises en quarantaine ont sévèrement impacté le transport de biens alimentaires (frais notamment) ; la fermeture des frontières a entraîné des pénuries de main-d’œuvre migrante et menacé par conséquent les récoltes (cas du Canada et des pays de l’Europe occidentale).

### C. Volatilité des prix:

La pandémie de Covid-19 a entraîné une volatilité des prix des céréales sur les marchés mondiaux. Les perturbations de l'offre et de la demande, combinées à l'incertitude économique, ont conduit à des fluctuations significatives des prix des céréales. Cette situation a eu un impact majeur sur la capacité des populations vulnérables à accéder à des aliments de base abordables. Les prix instables des céréales ont rendu plus difficile pour ces populations d'obtenir une alimentation adéquate, exacerbant ainsi les problèmes de sécurité alimentaire (**Benhibou, 2019**).

**Graphique 1 : Évolution des prix des matières premières de janvier 2020 à août 2021**



**Figure 26:** évolution des prix des matières premières de janvier 2020 a aout 2021  
(**Mouloudj et al., 2020**)

### D. Insécurité alimentaire accrue

La pandémie a également aggravé la vulnérabilité des populations déjà confrontées à l'insécurité alimentaire. Les pertes d'emplois, la diminution des revenus et l'augmentation des prix des denrées alimentaires ont rendu l'accès aux céréales plus difficile pour de nombreuses personnes, en particulier dans les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire.

Selon la **FAO (2020)**, la pandémie de Covid-19 est une crise mondiale qui touche déjà le secteur de l'alimentation et de l'agriculture. Les perturbations causées par la pandémie de Covid-19 mettent désormais en péril la sécurité alimentaire de milliards de personnes. La demande alimentaire et donc la sécurité alimentaire sont fortement affectées en raison des contraintes de déplacement, du faible pouvoir d'achat, et ont un impact énorme sur les groupes de population les plus vulnérables. À mesure que les cas d'infection augmentent, les gouvernements prennent des mesures et des procédures plus efficaces et globales pour freiner la propagation du virus, ce qui influence le système alimentaire mondial. On s'attend à ce que la pandémie de Covid-19 ait des répercussions sanitaires et économiques importantes en Afrique. (**Mouloudj et al., 2020**)

## V. L impacte de la pandémie de covid 19 sur la céréaliculture en particulier

La pandémie de COVID-19 a eu un impact significatif sur la sécurité alimentaire dans le monde, y compris dans le secteur des céréales

Les mesures de confinement, les restrictions de voyage et les fermetures d'entreprises ont perturbé les systèmes de production, de transformation et de distribution des céréales, entraînant des difficultés d'accès aux semences, aux engrais, aux intrants agricoles et aux marchés de vente pour les agriculteurs (**Mouloudj et al., 2020**). Cette situation a eu un impact significatif sur la production et la disponibilité des céréales.

L'industrie céréalière a connu des perturbations majeures de sa chaîne d'approvisionnement lors des hivers 2013/14 et 2019/20 en raison de conditions météorologiques défavorables et d'un environnement commercial difficile pour l'achat de céréales (**Mouloudj et al., 2020**). Ces événements mettent en évidence la nature instable et risquée du monde actuel, avec une probabilité croissante d'événements ayant des répercussions à grande échelle, tels que les changements climatiques, les événements météorologiques extrêmes, les épizooties et les pandémies.

Selon l'indice de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (**FAO**), les prix des céréales ont augmenté de 5,1% sur les marchés par rapport à août et de 13,6% sur un an. Cette augmentation des prix témoigne des perturbations sur les marchés mondiaux des céréales.

Ces perturbations peuvent avoir des conséquences graves sur la sécurité alimentaire, en particulier dans les pays fortement dépendants des importations alimentaires. Les restrictions de mouvement, les fermetures de frontières et les problèmes logistiques entravent le flux régulier des produits alimentaires, ce qui peut entraîner une augmentation des prix, une baisse de la disponibilité des produits et une insécurité alimentaire accrue.

Il est donc essentiel de prendre en compte ces risques et de repenser la structure et la gouvernance des chaînes d'approvisionnement alimentaire pour faire face aux perturbations à grande échelle (**Mouloudj et al., 2020**)

En raison de multiples facteurs nous sommes en 2023 et ces perturbations sont déjà présentes

## VI. L impact de la guerre Russo Ukrainienne sur la céréaliculture

Le 24 février 2022, la Russie a envahi l'Ukraine.

la Russie et l'Ukraine, classées respectivement 13ème et 61ème plus grandes économies du monde en termes de PIB, et le grenier du monde, n'arrive jamais à un bon moment (**Ali et al., 2022**)

Cette invasion a eu lieu à une époque où le monde était déjà confronté à la pandémie de Covid-19 et aux séquelles de la crise financière mondiale de 2008. En général, les marchés boursiers et les matières premières réagissent de manière rapide à l'invasion russe, mais

l'intensité de la crise qui s'ensuit est nettement inférieure à celle du Covid-19 et de la crise financière mondiale. Les deux matières premières les plus touchées sont le blé et le nickel, en raison du statut prépondérant des deux pays en tant qu'exportateurs de ces matières premières. (Izzeldin et al., 2023)

les prix ont augmenté de 7,5 % en janvier 2022 en glissement annuel, et la Réserve fédérale américaine prévoit plusieurs relèvements de son taux directeur en 2023. (Ali et al., 2022)

Les pénuries alimentaires causées par la guerre ont des répercussions sur les prix des denrées alimentaires partout dans le monde, avec les économies en développement où vivent les plus pauvres qui sont les plus touchées. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) rapporte que l'Indice des prix alimentaires mondiaux (FPI) a atteint en moyenne 159,3 points en mars 2022, soit une augmentation de 17,9 points (12,6 %) par

rapport à février. Il s'agit du niveau le plus élevé depuis sa création en 1990. La dernière augmentation reflète de nouveaux records historiques pour les huiles végétales (248,6 points) et les céréales (170,1 points), soulignant l'effet direct négatif conflit. (Economicobservatory.com)

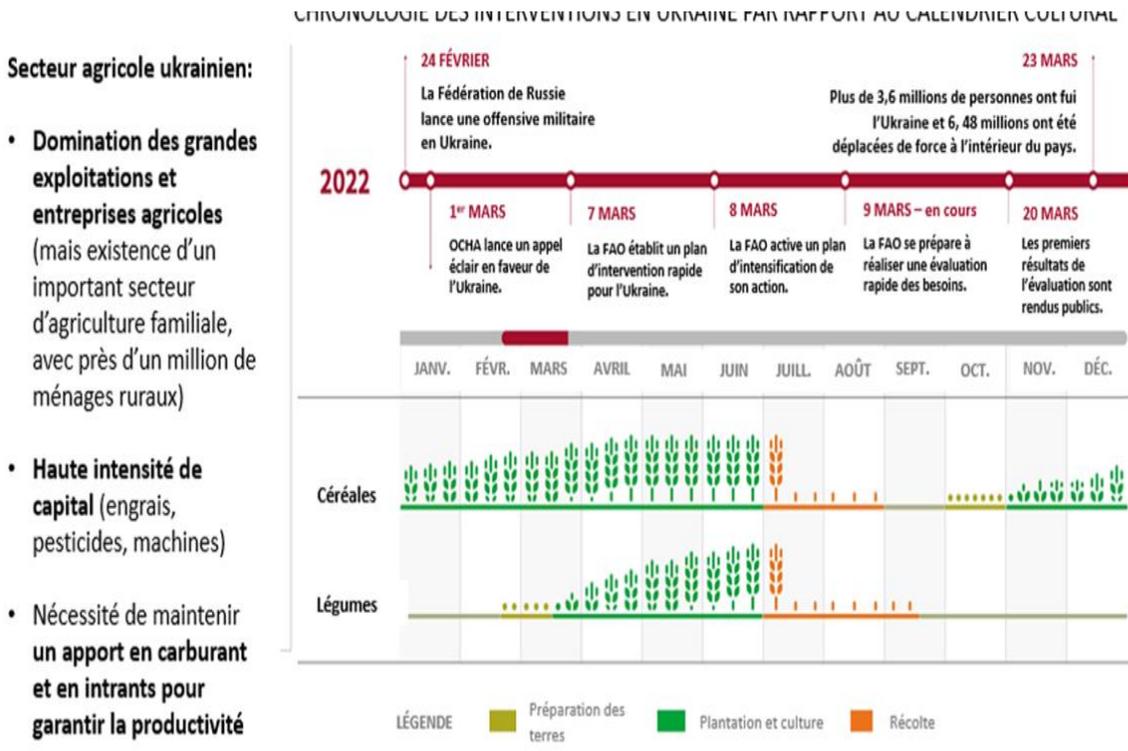


**Figure 27:** Évolution des cours du blé et du Brent en 2022 (Ali et al., 2022)

## VII. Une crise au pire moment, compte tenu de l'évolution démographique de l'Afrique:

Une sécurité alimentaire déjà fragilisée en 2022 par le conflit « russo-ukrainien », alors que la population du continent africain est de l'ordre de 1,3/1,4 milliard, ne peut que susciter questions et inquiétudes lorsque l'on sait que la population de ce même continent devrait compter, en 2050, un milliard de plus d'habitants. Et ce chiffre est une moyenne entre les prévisions démographiques les plus optimistes et les plus pessimistes. Certains diront: 2050 c'est loin ou, encore: peut-on faire confiance aux démographes et à leurs prévisions ?. A la différence des prévisions économiques, souvent mises à mal par des circonstances particulières comme la Covid-19, ou des situations imprévisibles comme l'invasion de l'Ukraine par la Russie, les faits montrent qu'à l'échelle d'une génération (25- 30 ans), ces prévisions se vérifient, avec une marge d'erreur de +ou - 10 %. C'est pourquoi il est intéressant de voir comment évolue la démographie des 16 pays africains les plus dépendants de la Russie et de l'Ukraine pour leur approvisionnement en blé, entre 2022 et 2050.

Les pénuries alimentaires causées par la guerre ont des répercussions sur les prix des denrées alimentaires partout dans le monde, avec les économies en développement où vivent les plus pauvres qui sont les plus touchées. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) rapporte que l'Indice des prix alimentaires mondiaux (FPI) a atteint en moyenne 159,3 points en mars 2022, soit une augmentation de 17,9 points (12,6 %) par rapport à février. Il s'agit du niveau le plus élevé depuis sa création en 1990. La dernière augmentation reflète de nouveaux records historiques pour les huiles végétales (248,6 points) et les céréales (170,1 points), soulignant l'effet direct négatif du conflit. (**Economicsobservatory.com**)



**Figure28** : chronologie des interventions en Ukraine par rapport au calendrier cultural (Maximo, 2022)

**Discussion Générale:**

Notre alimentation sur la planète Terre provient des plantes dont le système de chlorophylle convertit l'énergie du soleil en une forme que nous pouvons consommer. Ainsi, les plantes sont notre source de nourriture, que ce soit directement ou indirectement par le biais de sources moins efficaces telles que les animaux, la volaille ou les poissons.

Alors que certains aliments proviennent des plantes dans la nature, la grande majorité provient de la culture des céréales, des racines, des tubercules et des légumineuses. Les céréales à elles seules représentent 49% des protéines consommées par les humains. Dans la plupart des pays d'Asie et d'Afrique, les céréales contribuent à plus de 80% de l'apport en protéines alimentaires. Le riz, le blé et le maïs sont prédominants parmi les céréales et, au cours des 40 dernières années, leur production a augmenté en moyenne de 2,5 fois. La population mondiale est passée de 2,8 à 5,8 milliards de personnes au cours des mêmes 40 années, et devrait doubler à nouveau au cours des 40 à 50 prochaines années.

La biotechnologie, l'emploi des outils de la biologie cellulaire et moléculaire pour modifier génétiquement les cultures et améliorer la production alimentaire, jouera un rôle important et croissant dans le combat incessant pour produire suffisamment de nourriture pour une population mondiale en croissance constante. Plusieurs de ces approches vont s'ajouter et contribuer à l'amélioration génétique conventionnelle en plus de s'attaquer à des problèmes environnementaux et de stabiliser la production alimentaire. Il faut se rappeler que la biotechnologie n'en est qu'à ses premiers balbutiements et que les approches seront grandement améliorées et utilisées plus efficacement dans l'avenir, tout cela pour le plus grand bien de l'humanité. **(Kasha, 1999).**

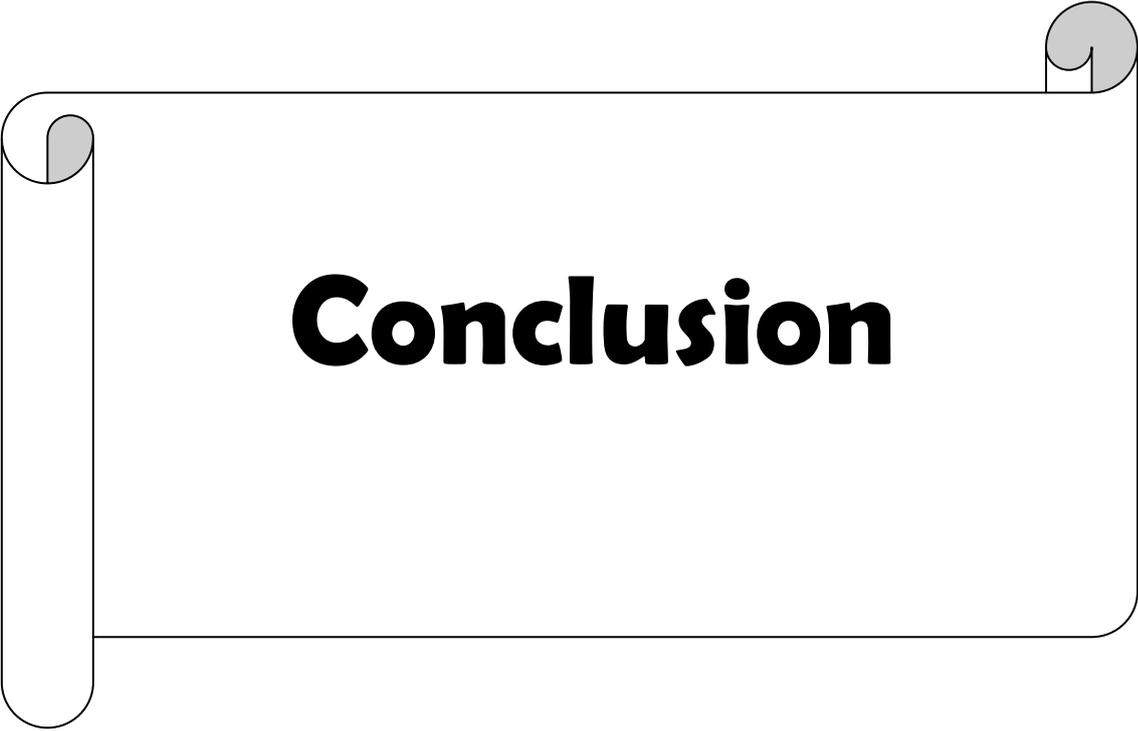
La biotechnologie des céréales présente plusieurs défis et risques. Les coûts d'investissement sont élevés et le temps nécessaire pour que les produits biotechnologiques atteignent le marché est long. De plus, l'évaluation des effets des transgènes sur les performances agronomiques peut prendre plusieurs années dans le processus de sélection.

D'autres risques incluent l'incertitude quant à la rentabilité des concepts technologiques au début du développement, les problèmes de propriété intellectuelle limitant l'exploitation des technologies clés et l'incertitude réglementaire et de l'acceptation des consommateurs. De plus, l'expiration des brevets peut rapprocher le délai entre l'approbation réglementaire et la concurrence des produits génériques. Cependant, ces produits génériques doivent démontrer leur équivalence chimique et biologique par rapport aux produits brevetés. Malgré ces défis, la biotechnologie des céréales offre des opportunités pour l'amélioration des caractéristiques agronomiques, de la qualité des grains et d'autres aspects.

La protection par brevet et les connaissances spécifiques des entreprises peuvent devenir des avantages concurrentiels importants.

Il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la conception des produits de biotechnologie des céréales afin de minimiser les risques et de maximiser les avantages potentiels. **(Morris et Bryce, 2000).**

La pandémie de COVID-19 et la crise ukrainienne ont remis à l'ordre du jour, pour tous, la question de "l'urgence alimentaire". Si la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire fait l'unanimité dans ce domaine, il est nécessaire, pour mieux se préparer à ces enjeux du "temps long et court", d'agir maintenant et d'aller plus loin que de simples ajustements à la marge. De plus, ces nouvelles politiques doivent accompagner "un double changement de paradigme", celui du modèle alimentaire et des systèmes productifs agricoles et halieutiques. La mise en place d'une politique transversale de la sécurité alimentaire en Algérie et dans le monde apparaît alors comme indispensable pour promouvoir et réussir cette nouvelle dynamique (**Ferroukhi et al. 2022**).



**Conclusion**

## **Conclusion**

Pris ensemble, la génomique, l'édition du génome et les technologies avancées de transformation des plantes constituent la plateforme nécessaire pour l'amélioration avancée des cultures céréalières. Les profondeurs des génomiques fonctionnelles fourniront la base pour de nouvelles approches visant à poser des questions fondamentales en biologie végétale. Elles permettront également le développement rapide de nouvelles variétés de cultures avec des traits spécifiques ayant une valeur marchande et une importance pour notre environnement. De plus, elles sous-tendront probablement une grande partie de l'amélioration future des cultures dans de nombreuses cultures céréalières différentes. À terme, ces technologies et approches seront appliquées à toutes les plantes. (**Kausch et al., 2021**)

Les pénuries alimentaires surviennent plus fréquemment en raison des pertes imprévisibles de rendement des cultures causées par des stress biotiques et abiotiques. Avec les avancées en biologie moléculaire et en technologie des marqueurs, une nouvelle ère d'élevage moléculaire a émergé, accélérant considérablement le rythme de l'élevage des plantes. La technologie de génotypage à haut débit et les plateformes de phénotypage ont permis des analyses à grande échelle des associations entre marqueurs et traits, tels que les études d'association **pangénomiques**, pour disséquer précisément l'architecture génétique des traits des plantes. La cartographie à grande échelle des locus de caractères agronomiquement importants, le clonage et la caractérisation des gènes, l'exploitation des variations naturelles et la sélection génomique ont ouvert la voie à l'élevage assisté par la génomique. Avec la disponibilité de plus en plus de jeux de données génomiques informatifs, il devient une technique prometteuse pour accélérer le cycle d'élevage en vue d'améliorer les cultures.

# Références Bibliographiques



**Références Bibliographiques**

- Afshin, A., et al. "Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses." *The Lancet*, vol. 393, no. 10170, 2020, pp. 434-445.
- Ali, Abdelaaziz Ait, et al. "Les répercussions économiques de la guerre en Ukraine pour l'Afrique et le Maroc." *PlicyCenterFor The New South, Policy Bref* (2022).
- Alseekh, S., Fernie, A. R., & Provart, N. J. (2021). Domestication of crop metabolomes: desired and unintended consequences. *Trends in Plant Science*, 26(6), 650-661.
- Anderson, J.W., Baird, P., Davis Jr, R.H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., ... & Williams, C.L. "Health Benefits of Dietary Fiber." *Nutrition Reviews*, vol. 67, no. 4, 2014, pp. 188-205.
- Arji, Goli, et al. "Identifying resilience strategies for disruption management in the healthcare supply chain during COVID-19 by digital innovations: A systematic literature review." *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. [Volume Number], no. [Issue Number], 2023, p. 101199.
- Aune, D., et al. "Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies." *BMJ*, vol. 373, 2021, article n919
- Ayana, M. G., Ali, F., & Siddique, K. H. M. (2009). Radiation-induced mutagenesis in wheat: A review. *International Journal of Plant Biology & Research*, 1(1), 1-14.
- Baudoin, J-P, Demol, J., Louant, B-P., Maréchal, R., Mergeai, G., & Otoul, E. "Amélioration des plantes. Application aux principales espèces cultivées en régions tropicales." *Les presses agronomiques de Gembloux*, 2002, 584p.
- Bekkis, Soumeiya, Mohamed Amine Benmehaia, and Ahcène Kaci. "Price Transmission in the Wheat Market in Algeria: Threshold Cointegration Approach." *International Journal of Food and Agricultural Economics (IJFAEC)* 11.1 (2023): 17-32.
- Belagrouz, Abdenour. "Analyse du Comportement du Blé Tendre, Variété El Wifak (*Triticum aestivum* L.) Conduite en Labour Conventionnel, Travail Minimum et Semis Direct sur les Hautes Plaines Sétifiennes." *Obtenir le diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif*, 2012/2013.
- Belalia, Nawel. "Détection des OGM dans l'agriculture et l'alimentation en Algérie : cas du maïs transgénique." *Mémoire de magister en biotechnologies végétales, École nationale supérieure agronomique - El Harrach - Alger*, 2010.
- Belghith-Fendri, L., Chaari, F., Cherif-Silini, H., Ghorbel, A., Jemmali, A., & Kharrat, M. "Valorization of Durum Wheat Straw by the Production of Cellulose Nanocrystals." *Industrial Crops and Products*, vol. 89, 2016, pp. 507-519.
- Bénédicte Henrotte., (2016). *Itinéraires BIO Le magazine de tous les acteurs du bio*. Ed. resp. Philippe Grogna - Avenue Comte de Smet de Nayer 14, 5000 Namur. Bimestriel janvier– février . Dépôt : Turnhout. P201134n°26.
- BENMIHOUB, Ahmed. "Impacts de la pandémie du Coronavirus sur la sécurité alimentaire."

## *Références Bibliographiques*

---

- Bouchet, Marie. "Amélioration des plantes et systèmes semenciers : conséquences sur la diversité des semences." Tordjman, Hélène. "La construction d'une marchandise : le cas des semences." *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, vol. 63e année, no. 6, 2008, pp. 1341-1368.
- Boungab, Karima. "La rayure réticulée de l'orge (*Hordeumvulgare* L.) dans le Nord-Ouest Algérien : importance, morphologie et pouvoir pathogène chez *Pyrenophorateres f. teres* et recherche de moyens de lutte." Thèse de doctorat es-sciences, Université d'Oran, 2013.
- Bousba, Ratiba. "Caractérisation de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur (*Triticum durum* desf) : analyse de la physiologie et de la capacité en production." Obtention du doctorat es science en biologie végétale, Université Mentouri Constantine, 2012.
- Brink M et Belay., (2006). *Ressources végétales de l'Afrique tropicale 1.Céréales et légumes secs*. Fondation PROTA, Wageningen, Pays-Bas .328p.
- Cauderon, Y. "Hybridation interspécifique et amélioration du blé." (1978).
- CDC. (2021). *Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*. Récupéré de <https://www.cdc.gov/>
- Couaillier, Julien. "A la croisee des chemins: la filierecerealierefrancaise." *ECONOMIE ET HUMANISME* 380 (2007): 26.
- Daoudi, Ali, and Amel Bouzid. "La sécurité alimentaire de l'Algérie à l'épreuve de la pandémie de la COVID-19." *Les cahiers du CREAD* 36.3 (2020): 185-207.
- Diawaara, Gaoussou. "Diagnostic participatif de la production du sorgho et tests multilocaux à Kaniko." Mémoire de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'Institut polytechnique de Formation et de Recherches Appliquées IPR/IFRA, Université du Mali IPR/IFRA, 2003.
- Doe, J. "Traditional methods in cereal breeding." *Journal of Crop Improvement*, vol. 19, no. 1, 2005, pp. 15-86.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). "La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2019." Available at <http://www.fao.org/publications/sofa/2019/fr/>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). "Perspectives de l'alimentation." Accessed 19 May 2023. Available at <http://www.fao.org/perspectives/en/>
- FAO. "Barley." *FAO Statistical Yearbook*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1995.
- FAO. (2015). *Perspectives de l'alimentation 2015*. Consulté le 19 mai 2023, à l'adresse <http://www.fao.org/3/a-i4622f.pdf>
- FAO. (2020). *L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2020. Se prémunir contre les ralentissements et les fléchissements économiques*. Rome, FAO.
- FAO. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2018: Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition*. Rome: FAO, 2018.
- Ferroukhi, Sid Ahmed, et al. "Les politiques de soutien à l'agriculture et la pêche en Algérie-une prospective stratégique vers la sécurité alimentaire durable 2035." *Les cahiers du CREAD* 38.3 (2022): 379-412.
- Food and Agriculture Organization (FAO). "The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction." FAO, 2019.
- Fujita, D., Santos, R. S., Ebron, L. A., Telebanco-Yanoria, M. J., & Kobayashi, N. (2013). *Pyriculariaoryzae* resistance in rice cultivars developed using a modified mass selection method. *Euphytica*, 190(1), 91-105.

## Références Bibliographiques

- Gallagher, E., Gormley, T.R., & Arendt, E.K. "Cracking the Complexity of Cereal Science: A Review of Structure and Functionality in Breadmaking Processes." *Journal of Cereal Science*, vol. 93, 2020, article 102993.
- Gallais, A. (2018). Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes. Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes, 1-288.
- Gallais, André. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Elsevier Mason SAS, 1990.
- Gil-Humanes, J., et al. "Production of wheat gluten-free breads by RNAi." *Plant Biotechnology Journal*, vol. 8, no. 9, 2010, pp. 913-924.
- Guiderdoni, Emmanuel, Breitler, Christophe, & Cirad, Jean. "Apports de la transgénèse à l'amélioration du riz : l'exemple du riz doré." *Le Sélectionneur Français*, no. 57, 2006, pp. 57-68.
- Gupta, S., et al. *In Vitro Plant Breeding: Principles and Methods*. New York, NY: Springer, 2018.
- Haan, Herman. "Maintaining varieties of self-fertilized crop plants." *Euphytica*, vol. 2, 1953, pp. 37-45.
- Hallab, Aicha et Asma Rahmouni. "Croisement intra spécifique de quelques variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.)." *Mémoire de recherche, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila*, 2016.
- Harlan, Jack R. "The living fields: Our agricultural heritage." Cambridge University Press, 1995.
- Henry, R. (2022). Long-read sequencing and chromosome-level assembly of plant genomes. In *Advances in Plant Genomics and Applications* (pp. 181-193). Springer.
- Henry, R. J. (2001). Biotechnology, cereal and cereal products quality. In *Cereals Processing Technology* (pp. 53-76).
- Horton, R. "Offline: 2019-nCoV outbreak—early lessons." *The Lancet*, vol. 395, no. 10221, 2020, pp. 322-324.
- Huang, Q., He, Y., & Wang, Y. "Applications of biotechnology." *Advances in Industrial Biotechnology*, Springer, 2021, pp. 1-15.
- Huang, S., Sirikhachornkit, A., Su, X., Faris, J., Gill, B., Haselkorn, R., & Gornicki, P. "Genes Encoding Plastid Acetyl-CoA Carboxylase and 3-Phosphoglycerate Kinase of the *Triticum/Aegilops* Complex and the Evolutionary History of Polyploidy Wheat." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, 2002, pp. 8133-8138.
- Huang, Xuehui, et al. "A map of rice genome variation reveals the origin of cultivated rice." *Nature*, vol. 490, no. 7421, 2012, pp. 497-501
- Izzeldin, Marwan, et al. "The impact of the Russian-Ukrainian war on global financial markets." *International Review of Financial Analysis* 87 (2023): 102598.
- Järvi, M., et al. "Reduced level of antisense-inhibited-lipid transfer protein in oat seeds induces a compensatory increase in 7S globulin." *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 128, 2018, pp. 93-101.
- Johnson, C. D., et al. *Molecular Markers in Plant Breeding and Biotechnology*. New York, NY: Springer, 2015.
- Jones, C., et al. "Low-starch maize: from genetics to applications." *Trends in Biotechnology*, vol. 24, no. 10, 2006, pp. 427-433.

## Références Bibliographiques

- Julien Couaillier ;Audrey Pinault ; ÉmelineLebouteiller et CélineMiquelard., (Septembre 2014) – L16. Conçu et réalisé par biovivadéveloppement durable
- Kasha, Ken J. "Biotechnology and World Food Supply." *Genome*, vol. 42, no. 4, 1999, pp. 642-645.
- Kasha, Ken J. "Biotechnology and world food supply." *Genome* 42.4 (1999): 642-645
- Kausch, Albert P., et al. "Maize tissue culture, transformation, and genome editing." *In Vitro Cellular &DevelopmentalBiology-Plant*, vol. 57, no. 4, 2021, pp. 653-671.
- Khush, Gurdev S. "Green revolution: preparing for the 21st century." *Genome*, vol. 44, no. 3, 2001, pp. 646-655. DOI: 10.1139/g01-037.
- Kruglova, N. N., et al. "Embryo of flowering plants at the critical stage of embryogenesis relative autonomy (by example of cereals)." *Russian Journal of DevelopmentalBiology*, vol. 51, 2020, pp. 1-15
- Lazzeri, Paul A., and Peter R. Shewry. "Biotechnology of cereals." *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, vol. 11, no. 1, 1993, pp. 79-146.
- Levin, D. "The Biotechnology Revolution." *The Biotech Age: The Business of Biotech and How to Profit From It*, Wiley, 2003, pp. 23-50.
- Luo, Y., Zhao, H., Zhang, R., & Wu, Y. (2011). Mass selection for grain yield in rice. *Euphytica*, 178(3), 427-435.
- Mackill, D. J., Ismail, A. M., Singh, U. S., Labios, R. V., Paris, T. R., & Pinson, S. R. (2012). Development and rapid adoption of submergence-tolerant (Sub1) rice varieties. *Advances in Agronomy*, 115, 299-352.
- Mane, A. V., Saini, R. K., &Arora, R. (2009). Engineering drought tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) by expression of the DREB1A transcription factor under the control of an abscisic acid-inducible promoter. *Planta*, 231(3), 679-690.
- Masbah, Harrag, and Boulfred Youssef. "La sécurité alimentaire en Algérie Une étude analytique sur les céréales Food security in Algeria An analyticalstudy on cereals."
- Masisi, Kabo, Trust Beta, and Mohammed H. Moghadasian. "Antioxidant properties of diverse cereal grains: A review on *in vitro* and *in vivo* studies." *Food Chemistry*, vol. 196, 2016, pp. 90-97.
- Maximo, T. C. "Impact du conflit russo-ukrainien sur la sécurité alimentaire mondiale et questions connexes relevant du mandat de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)(p. 20)." (2022).
- McIntosh, R. A., et al. "Catalogue of gene symbols for wheat: 2000." *Wheat Information Service* 91 (2001): 1-44.
- McIntosh, R. A., Wellings, C. R., & Park, R. F. (1995). *Wheat rusts: An atlas of resistance genes*. CSIROPublishing.
- Medina, R., et al. "Genetic stability in rice micropropagation." *Biocell*, vol. 28, no. 1, 2004, pp. 13-20.
- Mesrane, Dihia. "L'évolution de la production de blé dur (*Triticum durum*) dans la Daïra de Bouira et El Hachimia." *Mémoire de Master*, Université de Bouira, 2018.
- Mouellef, Adra. "Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique." *Mémoire de magistère en Biotechnologies Végétales (École Doctorale)*, Université Mentouri, Constantine, 2010, p. 04.
- Moule, C. "Céréales." *La Maison Rustique*, Paris, 1971.

## Références Bibliographiques

- Moule, Peter. *The Cultivation of Cereals: A Historical and Technological Overview*. Cambridge University Press, 1971.
- Mouloudj, Kamel, Ahmed Chemseddine Bouarar, and Hamid Fechit. "The impact of COVID-19 pandemic on food security." *Les cahiers du CREAD* 36.3 (2020): 159-184.
- Murphy, Denis. *Plant Breeding and Biotechnology: Societal Context and the Future of Agriculture*. Cambridge University Press, 2007.
- Najimi, Bouchra, et al. "Applications des marqueurs moléculaires dans l'amélioration du blé tendre pour la résistance aux maladies et aux insectes." *BASE* (2003).
- OMS, PAM et Unicef. "L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2019. Se prémunir contre les ralentissements et les fléchissements économiques." Rome, FAO, 2019.
- OMS. (2021). *Maladie à coronavirus (COVID-19) : conseils au grand public*. Récupéré de <https://www.who.int>
- Orton, T. J. "Chapter 5-Mass Selection and the Basic Plant Breeding Algorithm." Livre intitulé "Plant Breeding and Biotechnology: Societal Context and the Future of Agriculture." Elsevier, 2020, pages 85-95.
- Pernès, J. (1986). L'allogamie et la domestication des céréales: l'exemple du Maïs (*Zeamays L.*) et du Mil (*Pennisetum americanum L.*) K. Schum. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 133(1), 27-34.
- Pickersgill, B. (2007). Domestication of plants in the Americas: Insights from Mendelian and molecular genetics. *Annals of Botany*, 100(5), 925-940.
- Pujawan, I. Nyoman et Alpha Umaru Bah. "Supply chains under COVID-19 disruptions: literature review and research agenda." *Supply Chain Forum: An International Journal*, vol. 23, no. 1, Taylor & Francis, 2022.
- Redding, Richard W. "The Origins of Agriculture in the Near East." *Current Anthropology*, vol. 52, no. S4, 2011, pp. S221-S235.
- Shahid, M. Q., Sun, J., Wei, C., Zhang, P., Liu, L., Wu, J., ... & Liu, X. (2011). Induced genetic variations in rice (*Oryza sativa L.*) for the selection of superior agronomic traits in the mutant lines. *Australian Journal of Crop Science*, 5(8), 977-983.
- Shi, J., et al. "RNA interference of the rice phytic acid transporter gene *OsSTP6* results in seedling lethality." *Rice*, vol. 9, no. 1, 2016, article no. 37.
- Smith, A. B., et al. "Biotechnology in agriculture and forestry." In: Smith AB, Johnson CD (eds.), *Biotechnology in Agriculture and Forestry*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- Smith, A.B., et al. "Inactivation of the starch synthase gene in maize endosperm increases the heterogeneity of starch granules." *Journal of Biological Chemistry*, vol. 279, no. 8, 2004, pp. 6550-6557.
- Smith, Bruce D. "The Emergence of Agriculture." *Scientific American*, vol. 273, no. 2, 1995, pp. 48-53.
- Smith, J., Johnson, A., & Davis, C. "Challenges in mass propagation of crops: A focus on cereals." *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 45, no. 3, 2018, pp. 123-136.
- Song, W. Y., et al. "A receptor kinase-like protein encoded by the rice disease resistance gene, *Xa21*." *Science* 270.5243 (1995): 1804-1806.
- Steiner, H. Y., Halpin, C., Jez, J. M., Kough, J., Parrott, W. A., Underhill, L., ... & Liu, Y. G. (2013). Editor's choice: evaluating the potential for adverse interactions within genetically engineered breeding stacks. *Plant physiology*, 161(4), 1587-1594.

- Talamè, V., Bovina, R., Sanguineti, M. C., Tuberosa, R., Lundqvist, U., & Salvi, S. (2018). TILLING of barley cultivars with EMS-induced mutations. *Barley Genetics Newsletter*, 48, 7-10.
- UN. The Impact of COVID-19 on Food Security and Nutrition. New York, NY: United Nations, 2020.
- UN., (Juin, 2020). Note de synthèse : L'impact de la COVID-19 sur la sécurité alimentaire et la nutrition.
- Wrigley, C., Békés, F., & Bushuk, W. "The Gluten Proteins of Wheat: Structure and Functionality in Baking and Pasta Making." *Journal of Cereal Science*, vol. 89, 2019, article 102800.
- Wrigley, C., Corke, H., & Seetharaman, K. "Cereals and Grains: Nutritional and Health Benefits." Wiley-Blackwell, 2019.
- Wu, J., Chen, X., Guan, M., & Shan, J. "Biotechnology." *Comprehensive Natural Products II: Chemistry and Biology*, Elsevier, 2021, pp. 411-437.
- Yan, W., Li, Y., Agrama, H., Luo, D., Gao, F., Lu, X., ... & Xie, J. (2015). Association mapping of stigma and spikelet characteristics in rice (*Oryza sativa* L.). *Molecular breeding*, 35(1), 16.
- Ye, E. Q., et al. "Association between whole grain intake and risk of cardiovascular disease: evidence from a meta-analysis of prospective cohort studies." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 62, no. 1, 2022, pp. 174-184.
- Zhang, Y., Guo, S., Tian, Y., Wang, G., Zeng, X., Zhang, H., ... & Li, D. "Wheat Germ, Its Components, and Applications in Nutrition and Food Industry: A Comprehensive Review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 59, no. 5, 2019, pp. 817-831.

### Les sites internet :

- <http://advitae.net/articles-sante/1.Alimentation-et-Nutrition/Pain-blanc-cereales-raffinees-sucre-blanc-calories-vides-ou-poisons-lents.115.htm>
- <https://www.cgi.com/fr/blog/reinventer/trois-approches-reponses-proactives-repercussions-chaine-approvisionnement>
- <https://www.economicsobservatory.com/how-is-the-war-in-ukraine-affecting-global-food-prices>
- <https://www.economicsobservatory.com/how-is-the-war-in-ukraine-affecting-global-food-prices>
- <https://www.biotech-ecolo.net/amelioration-plantes-autogames.html>
- "Perturbations de la chaîne d'approvisionnement" (2021) disponible sur <https://xn--agrirponse-f7a.ca/situations-recentes/perturbations-de-la-chaine-d-approvisionnement/>



**Annexe**

**Tableau 04** : Exemples de gènes majeurs de résistance aux maladies et aux insectes cartographiés au cours des cinq dernières années, au moyen des marqueurs moléculaires chez le blé tendre. (Najimi et al ., 2003).

Caractère	Gènes de résistance	Nombre et Type de marqueurs	Localisation chromosomique	Type de population
Résistance à la mouche de Hesse	<i>H3</i>	1RAPD	5A	(Liso)
	<i>H5</i>	2RAPD	1A	“
	<i>H6H</i>	3RAPD	5A	“
	<i>9H1</i>	2RAPD	5A	“
	<i>0H1</i>	2RAPD	5A	“
	<i>1H1</i>	2RAPD	1A	“
	<i>2H1</i>	2RAPD	5A	“
	<i>3H1</i>	1RAPD	6D	“
	<i>4H1</i>	1RAPD	5A	“
	<i>6H1</i>	1RAPD	5A	“
	<i>7H2</i>	1RAPD	5A	“
<i>1</i>	1RAPD	2RL	“	
Résistance au Puceron russe	<i>Dn1</i>	1SSR	7DS	(Liso)et(F <sub>2</sub> )
	<i>Dn2</i>	1RFLP	7DL	(F <sub>2</sub> )
		4RAPD/2SCAR	“	(Liso)et(F <sub>2</sub> )
		RAPD	“	(F <sub>2</sub> )
	<i>Dn4</i>	1SSR	7DS	(Liso)et(F <sub>2</sub> )
		1SSR	7DS	(F <sub>2</sub> )
		1RFLP	1DS	(F <sub>2</sub> )
		1	1DS	(F <sub>2</sub> )
		RFLPSSR	1DS	(F <sub>2</sub> )
		3 RAPDRAPD/ SCARPCR-	7DS	(F <sub>2</sub> )
<i>Dn5</i>	RFLP	“	(Liso)et(F <sub>2</sub> )	
	1SSR	7DS	(F <sub>2</sub> )	
	1SSR	7DS	(Liso)et(F <sub>2</sub> )	
<i>Dn6</i>	SSR	7DS	(F <sub>2</sub> )	
<i>Dn8</i>	1SSR	7DS	(Liso)et(F <sub>2</sub> )	
<i>Dn9</i>	1SSR	1DL	(Liso)et(F <sub>2</sub> )	
Résistance à la Rouille jaune	<i>Yr10</i>	RFLP	1BS	(Liso)
	<i>Yr15</i>	1RFLP	1BS	(Liso)
		1RAPD	1B	(Liso)
	<i>Yr17</i>	1SSR	1B	(Liso)
		SSR/RAPD	1B	(Liso)
		1RAPD/1 SCAR	2A	(Liso)
	<i>Yr18(APR)</i>	RFLP	7DS	(LR)
	<i>Yr26</i>	3SSR	1BS	(F <sub>2</sub> )
	<i>Yr28(APR)</i>	RFLP	4DS	(LR)
	<i>YrH52</i>	SSR	1B	(F <sub>2</sub> )
<i>Yrns-B1(APR)</i>	1	1B	(F <sub>2</sub> )	
	RFLPSSR	3BS	(F <sub>3</sub> )	

<b>Résistance à la rouille brune</b>	<i>Lr3</i> <i>Lr10</i>  <i>Lr13</i> (APR) <i>Lr19</i> <i>Lr21</i> <i>Lr23</i> <i>Lr27</i>  <i>Lr28L</i> <i>r31</i> <i>Lr34</i> (APR)  <i>Lr35</i> (APR) <i>Lr39L</i> <i>r47</i> <i>LrTr</i>	1RFLP 1RFLP 1STS 3RFLP, 3 SSR AFLP/1STS RFLP 2RFLP 2RFLP  1 RAPD/1STS 2 RFLP 1RFLP 3RFLP, RAPD 3RFLP/ 1STS 3SSR 1 PCR SSR	6BL 1AS 1AS 2B 7DL 1DS 2BS 3BS  4BL 7DS 7BL,1DS 2B 2DS 7A 4BS	(F <sub>2</sub> ) cartographie (Liso) (F <sub>2</sub> ) délétion/recombinaison (Liso) (Liso) (F <sub>2</sub> ) (F <sub>3</sub> ) (F <sub>3</sub> ) cartographie (LR) (F <sub>2</sub> ) (F <sub>2</sub> ) (BC) (F <sub>2</sub> )
<b>Résistance Durable à la rouille noire</b>	<i>Sr2</i> (APR)	1STS 2RFLP	3B 3BS,6DS	lignéesen sélection (LR)
<b>Résistance à l'oïdium</b>	<i>Pm</i> <i>Pm1</i>  <i>Pm1c</i> <i>Pm4a</i> <i>Pm4a&amp;Pm4bPm4b</i> <i>Pm6</i>  <i>Pm13</i> <i>Pm21P</i> <i>m24Pm</i> <i>26MIR</i> <i>E</i>	1RFLP 1RFLP 1RAPD/STS 1AFLP 1AFLP 1STS 6AFLP 3RFLP RFLP RAPD,RFLP, STS RAPD/2 SCAR2AFLP,3SS RRFLP SSR	2B 7AL 7AL 7AL 2AL 2AL 2AL 2B 2BL 3B,3D 6AL/6VS 1DS 2BS 6AL	(LR) (Liso) (Liso) (Liso) (F <sub>3</sub> ) (F <sub>2</sub> ) (HD) (Liso) (Liso) (LR) (F <sub>2</sub> ) (F <sub>2</sub> ) (F <sub>2</sub> )et(LR) (F <sub>3</sub> )
<b>Résistance aux caries</b> ( <i>Tilletia tritici</i> et <i>T.laevis</i> )	<i>Bt-</i> <i>10Bt-</i> <i>11</i>	1 PCR 1RAPD		(F <sub>2</sub> ) (F <sub>4</sub> ,F <sub>5</sub> )
<b>Résistance à La septoriose</b> ( <i>Septoria tritici</i> )		1AFLP	non déterminée	(LR)

(Liso) = Lignées quasi-isogéniques;

(F<sub>2</sub>) et (F<sub>3</sub>)=Les descendances F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub> respectivement ;

(HD) = Les haploïdes doublés ;

(LR) = Les populations de lignées recombinantes ;

(BC) = Les populations issues de rétro-croisements ou backcross .