

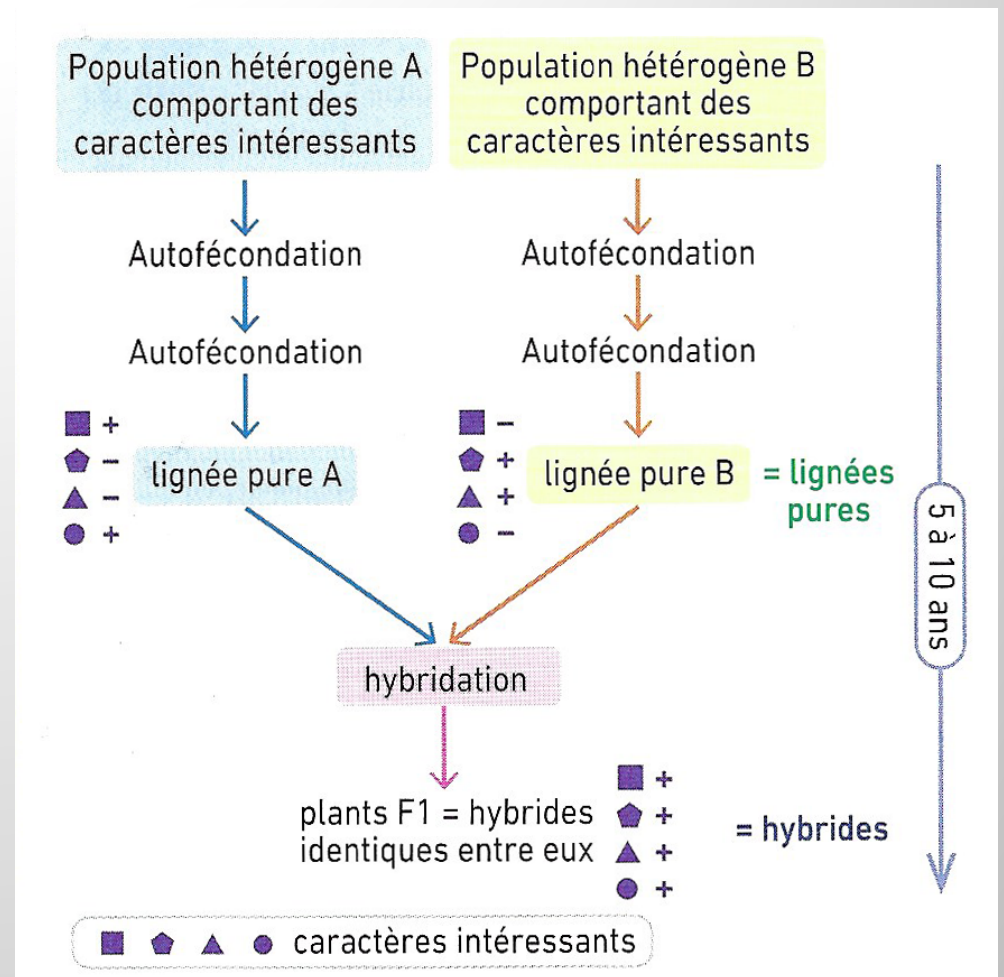
II. L'accélération du processus de domestication

La sélection empirique exercée durant des millénaires ne repose que sur l'observation et le tri des plantes par les agriculteurs. À la fin du XIX^e siècle, les ressources végétales deviennent un enjeu stratégique dans les sociétés industrialisées. Il faut produire plus, plus vite, plus homogène. La communauté scientifique se saisit alors de la question des semences, et révolutionne leur production.

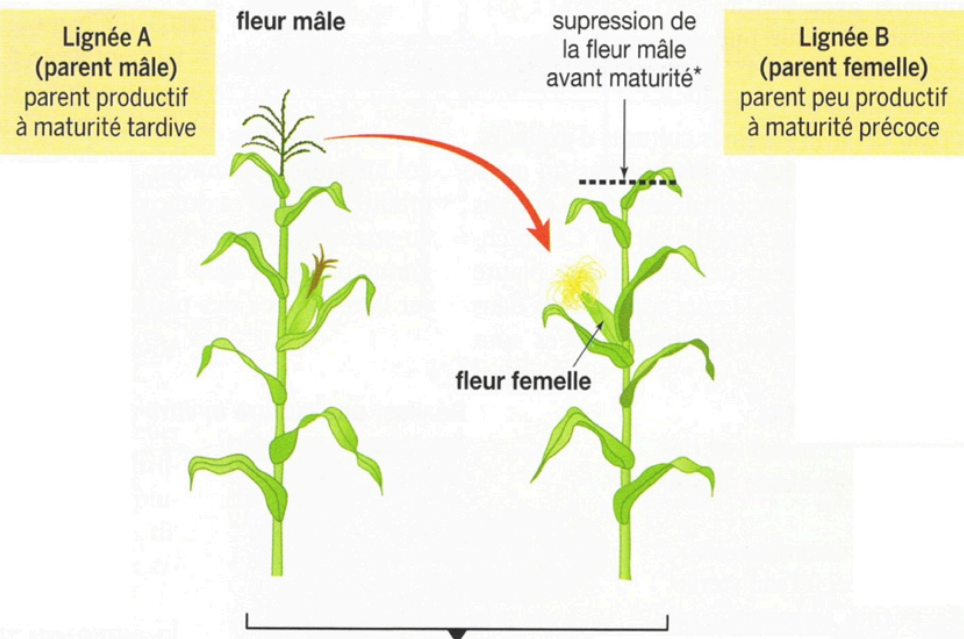
1) La technique de l'hybridation de lignées pures

L'hybridation de lignées pures

Au cours du xx^e siècle, le recours à l'hybridation entre variétés se développe massivement. L'hybridation simple résulte du croisement entre deux lignées pures. Elle produit la génération F1 à l'origine d'une population aux caractéristiques homogènes et présentant un gain de vigueur, par rapport aux deux parents.




Hybridation par fécondation croisée



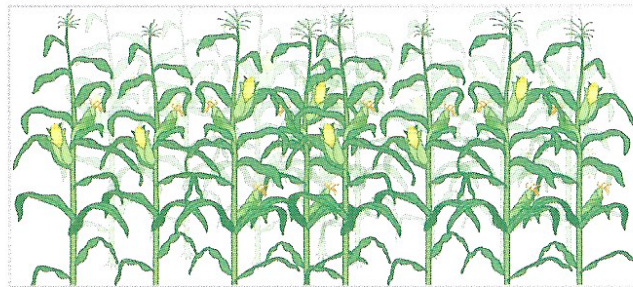
On dispose de 2 lignées pures de Maïs issues de 7 générations d'autofécondations successives. La fécondation croisée entre ces deux lignées permet d'obtenir un hybride.

Hybride AB
plantes productives
à maturité précoce



C Champ de production de semences de maïs : rang de pieds mâles (à gauche) et rangs de pieds femelles castrés (à droite).

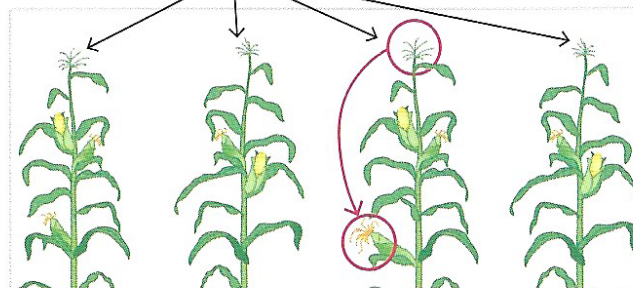
L'obtention préalable de lignées pures



plantes
génétiquement
très diversifiées
0 %
d'homozygotie



plantes
1^{re} génération
50 %
d'homozygotie



plantes
2^e génération
75 %
d'homozygotie

autofécondations successives
jusqu'à 7 générations

**lignée pure fixée
homozygotie ≈ 100 %**

Sélection
et
autofécondation

Au début du XXe siècle on produit des **variétés hybrides** en utilisant la **technique de l'hybridation de lignées pures** ce qui permet une homogénéisation génétique des populations pour chaque variété et une hausse des rendements.

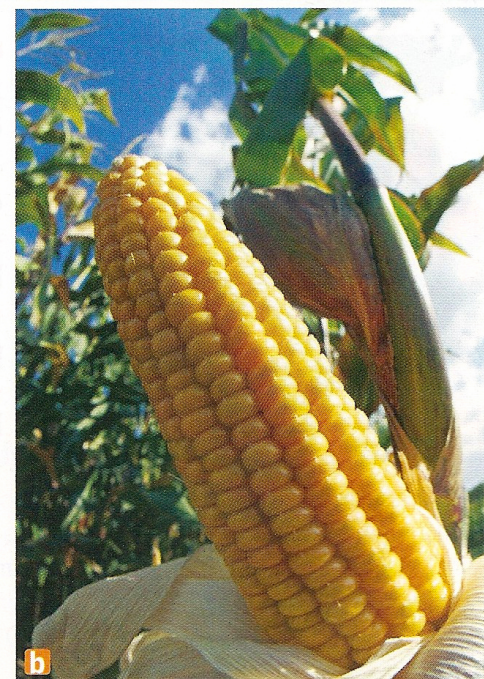
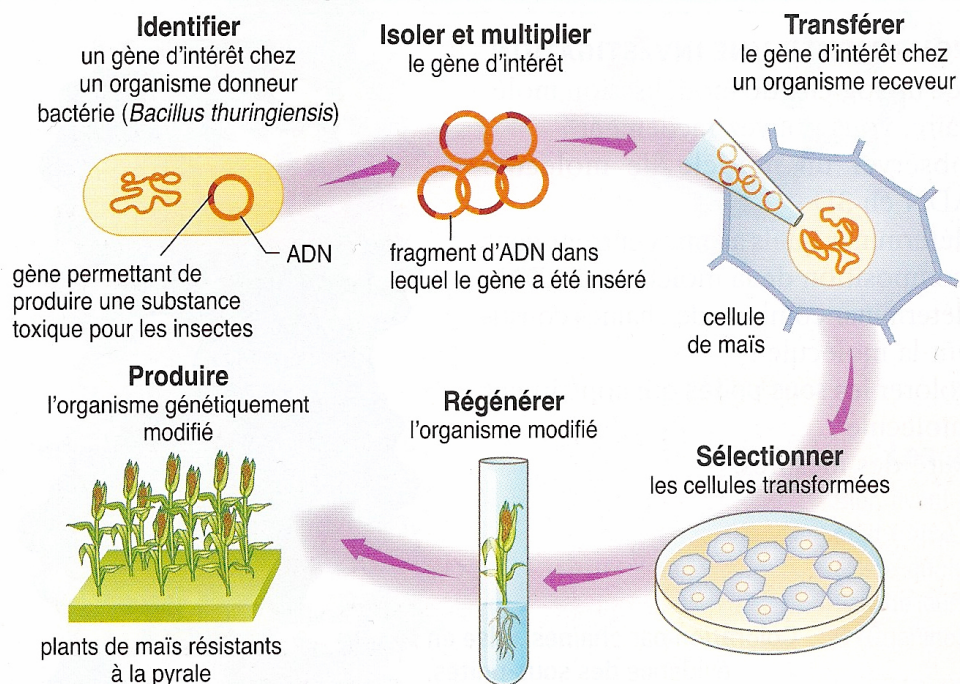
2) La technique de la transgénèse

Exemple d'une nouvelle variété de maïs

La bactérie *Bacillus thuringiensis* est connue pour son activité « insecticide » contre un insecte ravageur, la pyrale (a). Le gène (ADN) responsable de cette propriété peut être transféré dans des cellules du maïs. Ces cellules, après culture, produiront des plants entiers résistants à la pyrale (b). Ces derniers seront triés de façon à privilégier les plants qui expriment le mieux les gènes transférés, puis éventuellement croisés en vue de produire des variétés à haute valeur commerciale. La dissémination de tels **OGM** dans la nature est aujourd'hui l'objet d'un débat controversé.

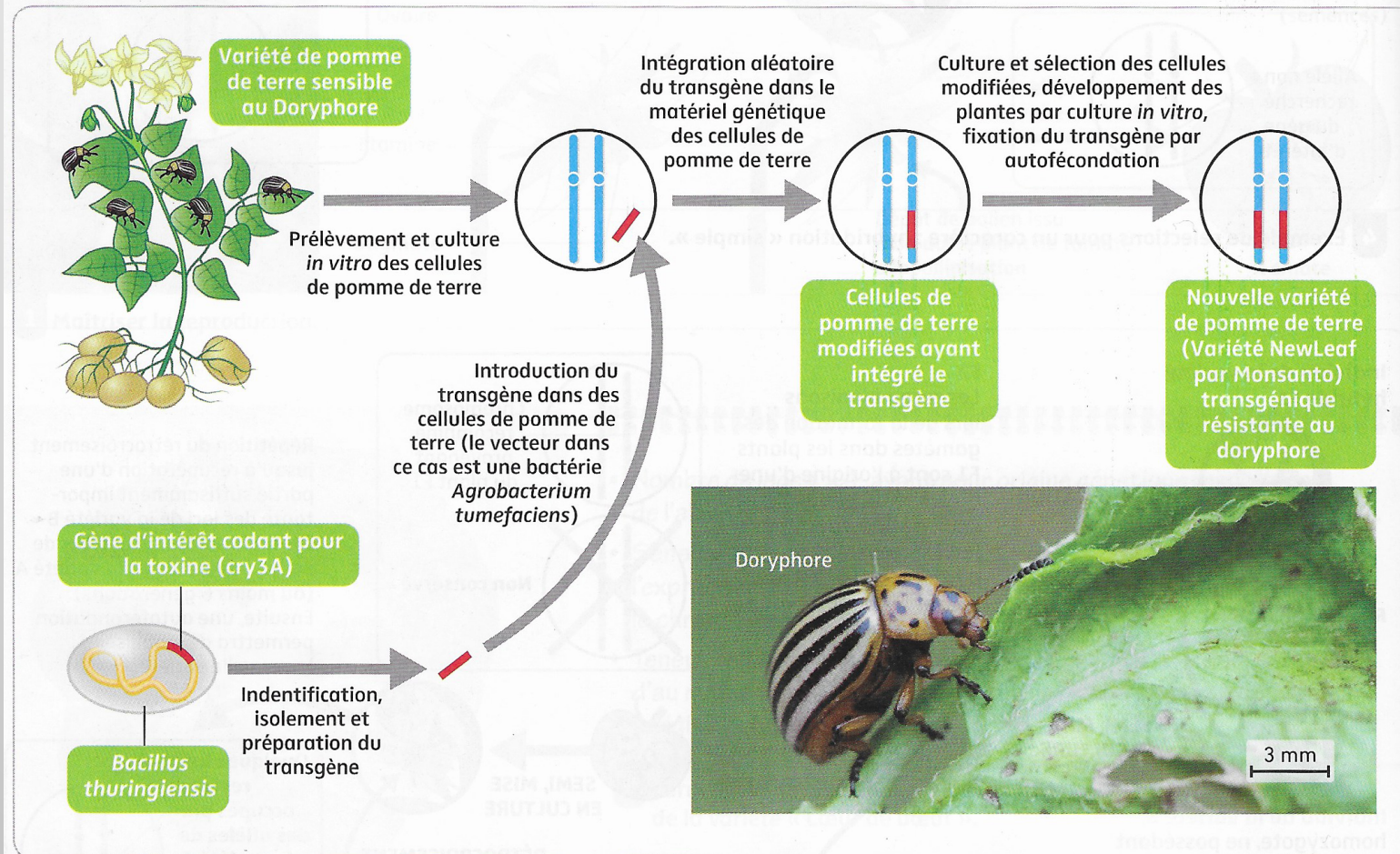


Les étapes de la fabrication d'un OGM



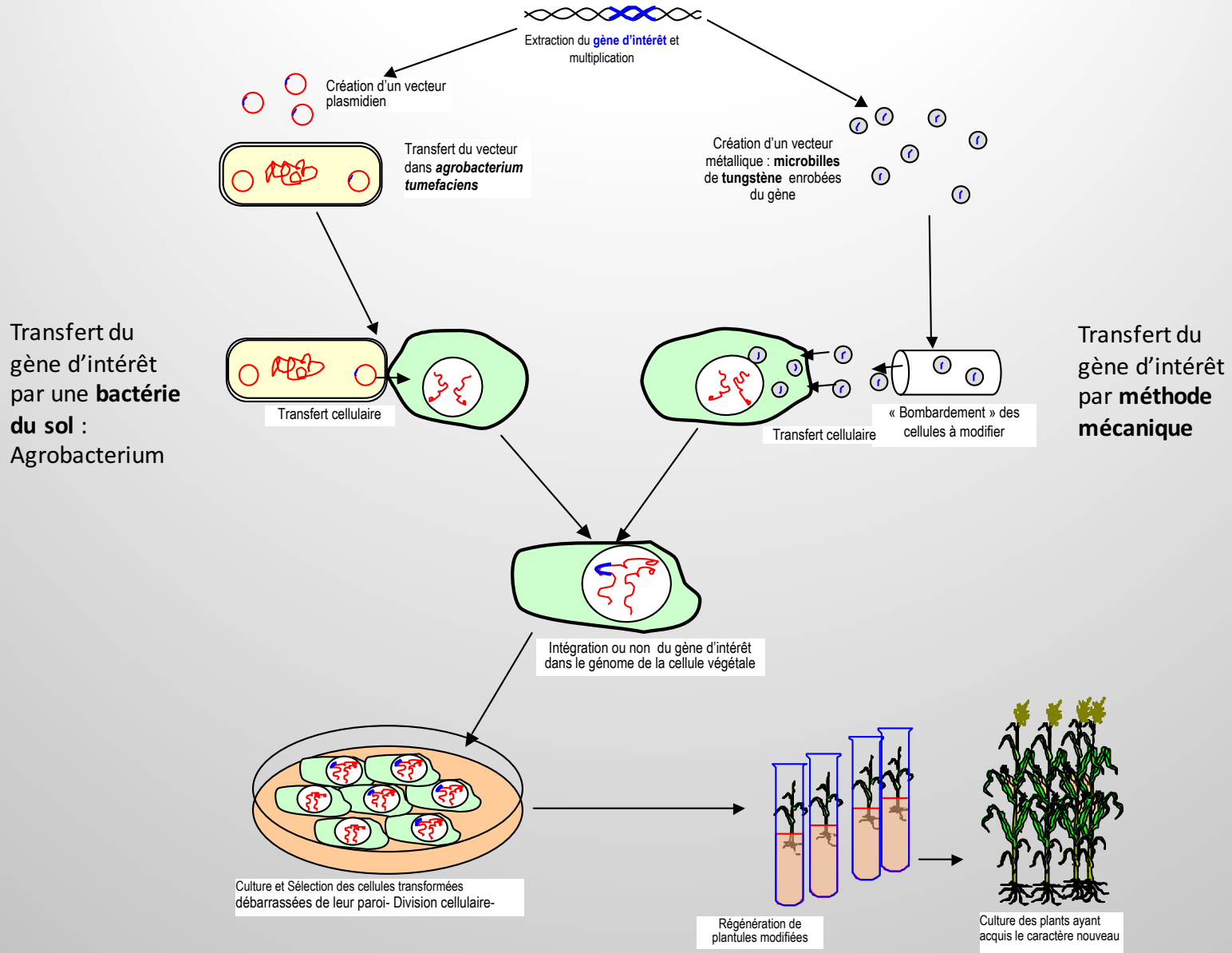
Exemple d'une nouvelle variété de pommes de terre

Les pommes de terre cultivées sont sensibles à un insecte ravageur, le Doryphore. *Bacillus thuringiensis*, une bactérie, produit une toxine agissant comme un insecticide sur les insectes (perturbation des flux ioniques intestinaux).



La transgénèse a permis la création de nouvelles variétés de pommes de terre.

Schéma de la transgénèse par deux méthodes



Plante OGM	Caractéristique apportée par le(s) transgène(s)	Avantages	Risques/problèmes	Statut
Maïs « BT »	Production d'une protéine insecticide d'origine bactérienne contre la pyrale (insecte ravageur)	Réduction des coûts d'usage d'insecticides chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Mortalité accrue des insectes pollinisateurs et auxiliaires • Sélection d'insectes résistants à la protéine insecticide 	Commercialisé aux États-Unis depuis 1995
Colza « Round-up ready »	Tolérance à une forte quantité d'herbicide	Permet de désherber les champs après la germination du colza	<ul style="list-style-type: none"> • Transfert des gènes de résistance à l'herbicide à d'autres plantes • Utilisation accrue d'herbicide 	Commercialisé aux États-Unis depuis 1997
Tomate « Mac Gregor »	Augmentation de la durée de conservation de plusieurs semaines	Facilite le transport et la commercialisation	L'absence de pourrissement rend difficile la perception de la fraîcheur du fruit	Commercialisé aux États-Unis depuis 1994
Riz doré	Augmentation de la teneur en vitamine A	Réduction des carences en vitamine A (qui touchent 200 millions de personnes)	L'obtention d'un effet implique de consommer 9 kg de riz cuit par jour	En développement

4 Quelques exemples de plantes transgéniques ou plantes OGM (organismes génétiquement modifiés). Les agriculteurs qui souhaitent utiliser des plantes OGM doivent racheter des semences chaque année auprès de leur fournisseur. Ils sont donc dépendants d'un faible nombre d'entreprises (il existe une dizaine de fournisseurs importants de semences OGM dans le monde). Parfois, comme dans le cas du riz doré, plusieurs transgènes doivent être introduits pour obtenir le nouveau caractère voulu.

En France, l'importation d'une centaine d'OGM est autorisée mais leur culture y est interdite depuis 2008.

Dans les années 1980-90 la mise au point de nouvelles biotechnologies permet la production de **plantes génétiquement modifiées** : la **technique de transgénèse** permet de s'affranchir des barrières génétiques entre espèces et d'inscrire dans le génome d'une plante un nouveau caractère héréditaire comme la résistance à une maladie ou un ravageur.

Cette méthode consiste à insérer un **gène d'intérêt** directement dans le génome de la cellule-œuf d'une espèce que l'on souhaite modifier afin de lui permettre d'exprimer un **nouveau caractère héréditaire**.

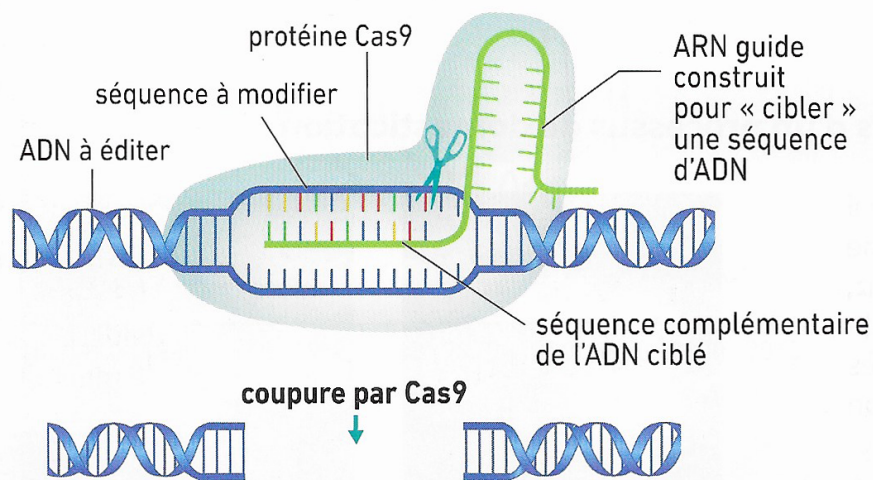
3) L'édition génomique grâce à la technique CRISPR-Cas9

CRISPR-Cas9 des ciseaux moléculaires au service de la création de nouvelles variétés

En 2012, deux chercheuses, Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier, publient les résultats obtenus sur la création de nouveaux allèles dans une cellule grâce à un complexe moléculaire associant un brin d'ARN et une enzyme Cas9, capable de découper l'ADN (A). Ce complexe baptisé CRISPR-Cas9 est très polyvalent : introduit dans une cellule hôte, il permet d'inactiver des gènes cibles ①, de créer de nouveaux allèles (modification ou édition de gènes) ②

ou d'insérer de nouveaux gènes ③. Il est maintenant utilisé dans de nombreux domaines dont celui de l'amélioration des plantes, à l'origine de nouvelles variétés aux propriétés intéressantes : résistance à des maladies fongiques chez le blé tendre par inactivation d'un gène ; insertion de gènes favorisant le rendement dans des variétés de tomates sauvages choisies pour leur résistance aux maladies.

Jennifer Doudna : Américaine
Emmanuelle Charpentier : Française
Prix Nobel de chimie 2020

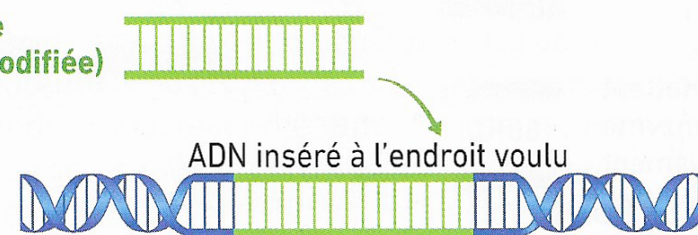


Différentes actions possibles :

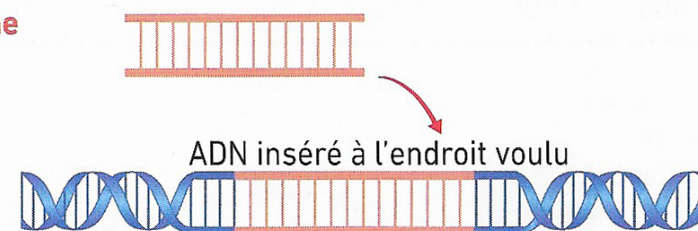
① Gène à inactiver



② Nouvel allèle (séquence modifiée)

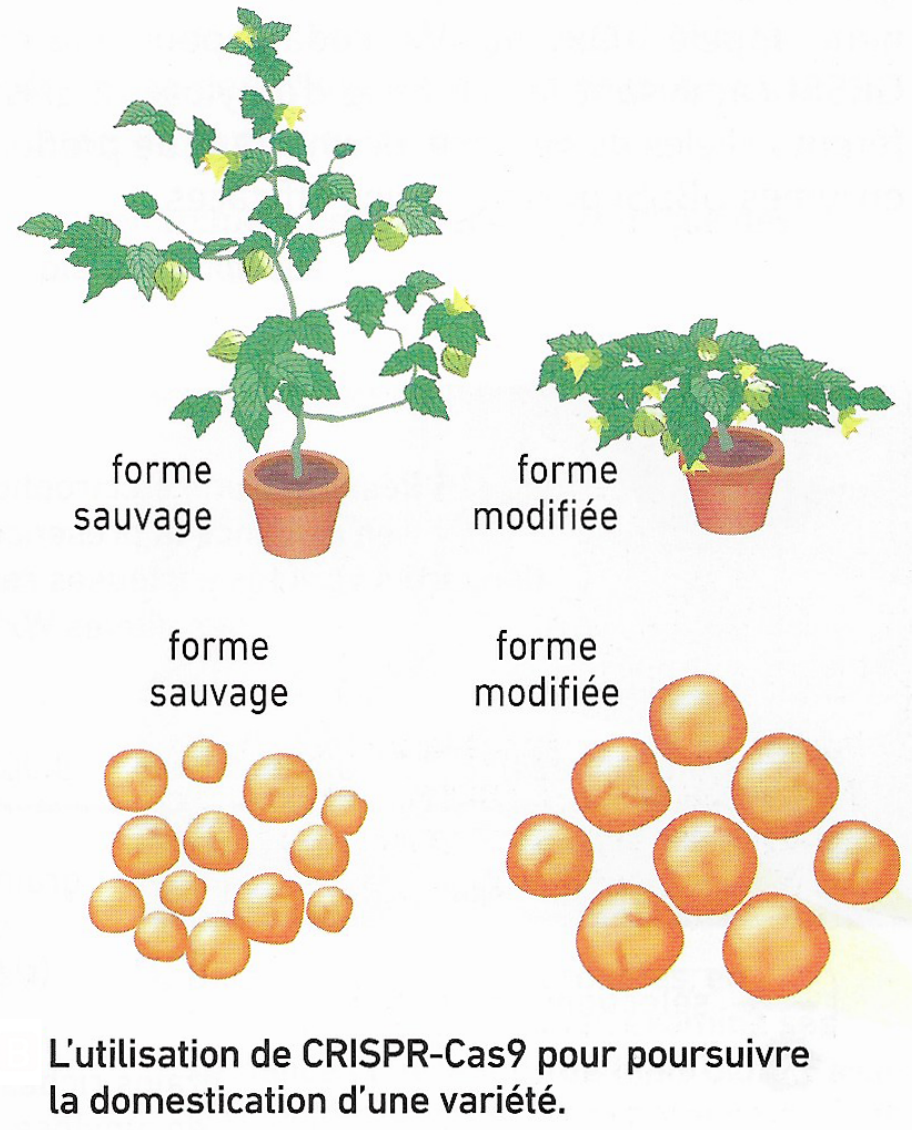


③ Nouveau gène d'intérêt

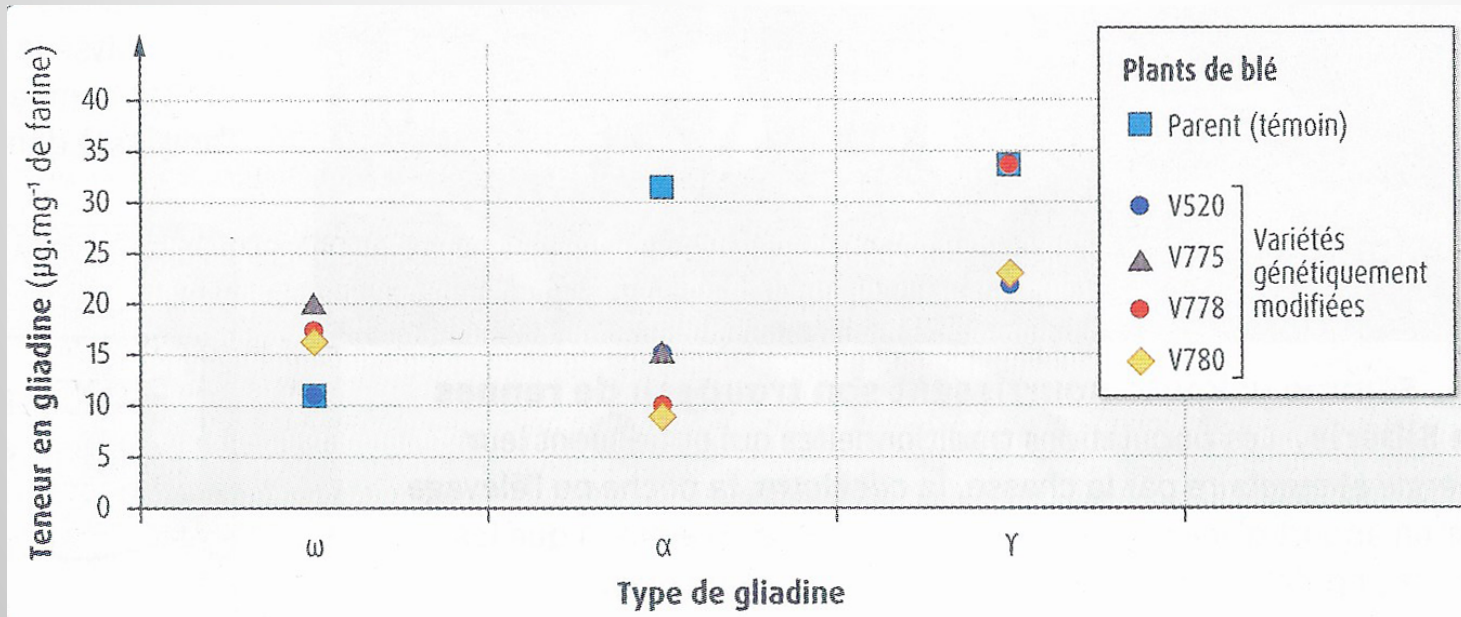


Exemple d'application de la méthode CRISPR-Cas9 chez la tomate domestiquée

Physalis pruinosa est une espèce apparentée à la tomate qui est considérée comme étant « semi-domestiquée » ; ses fruits sont petits (2 cm de diamètre) et ils tombent au sol. La plante a tendance à s'étaler en se développant, nécessitant de conserver une distance minimale d'un mètre entre les individus et ne facilitant pas la récolte des fruits. En s'appuyant sur la carte génétique de la tomate, une équipe de chercheurs américains a utilisé CRISPR-Cas9 pour modifier différents gènes chez *Physalis* de manière à améliorer ses caractéristiques. En deux ans, ils ont obtenu les résultats ci-dessous



Exemple de création variétale à l'aide de CRISPR-Cas9 : le cas du gluten



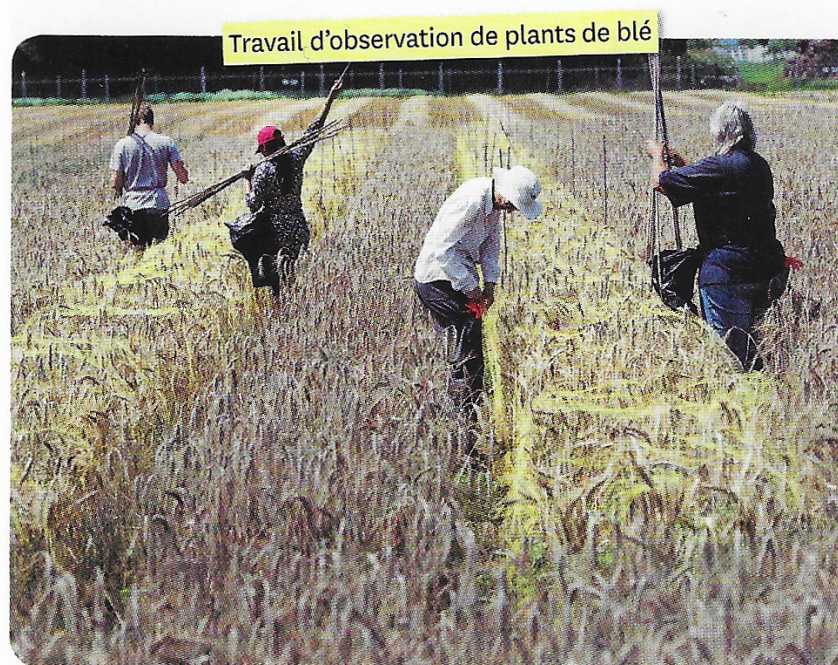
Les patients atteints d'une maladie coéliqua auto-immune sont contraints de modifier leur alimentation à la suite d'une intolérance au gluten. L' α -gliadine est une protéine de la famille du gluten retrouvée en grande quantité (69 %) dans la farine de blé et responsable de lésions importantes de l'intestin chez les malades. La technique d'édition du génome Crispr-Cas9 a été utilisée par des chercheurs pour créer des plants de blés capables de produire des grains à teneur faible en α -gliadine.

Au XXI^e siècle on pratique la création de variétés nouvelles par **édition génomique** à l'aide de la **technique CRISPR-Cas9** : on introduit des allèles ou des gènes de caractères agronomiquement intéressants dans des variétés anciennes (voire sauvages) qui sont plus robustes que les récentes.

On aboutit à une domestication ciblée et accélérée (quelques années seulement).

4) Nouvelles technologies de sélection artificielle :

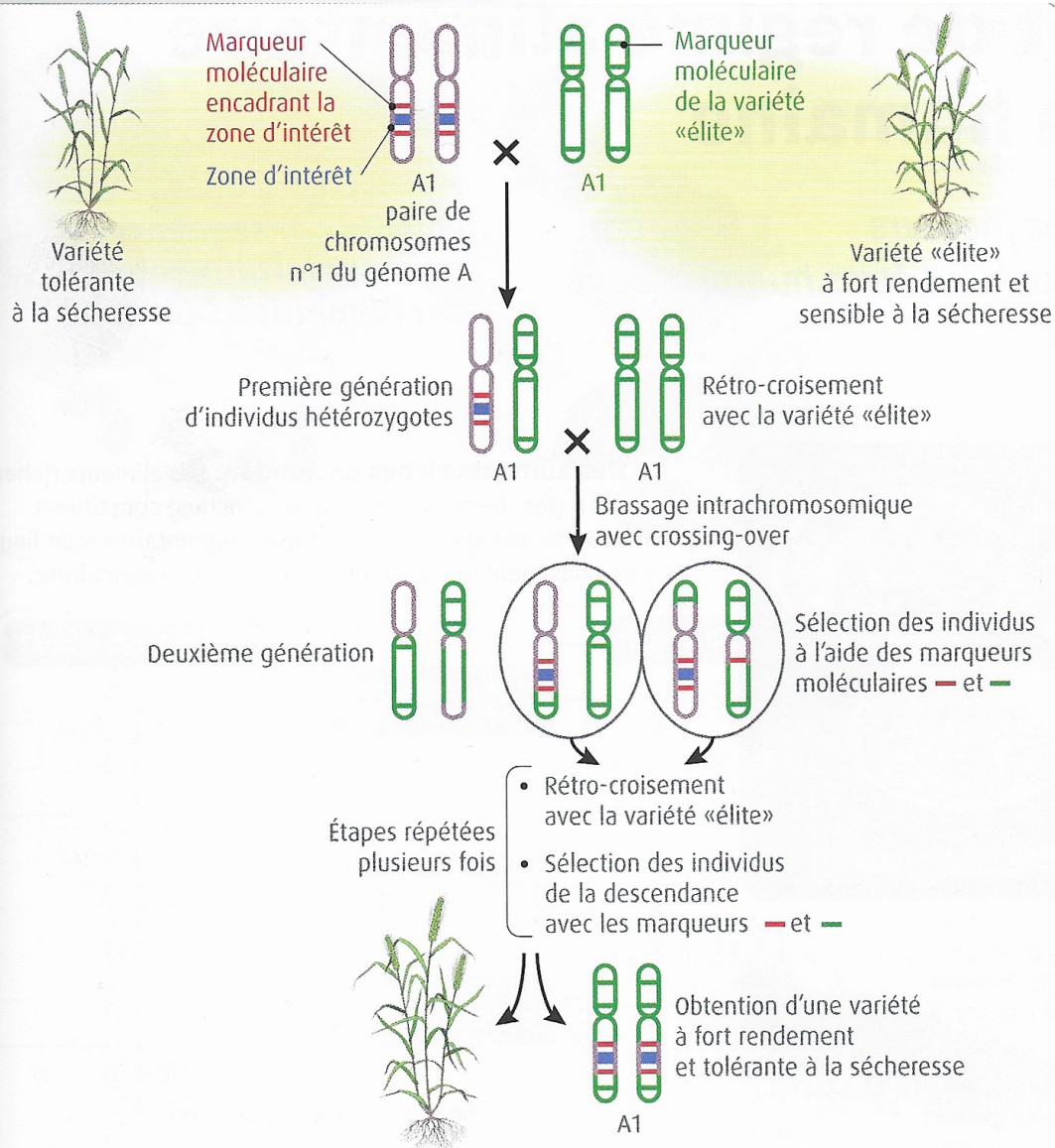
Le phénotypage haut-débit



1 **Caractérisation de plants de blé et de maïs en cours de sélection.** La mise au point artificielle de nouvelles variétés utilise les mêmes principes que l'évolution biologique : à partir d'une importante diversité, on cherche à sélectionner les individus présentant des caractères intéressants (quantité et qualité, résistance aux maladies, etc.), lesquels deviendront les parents de la nouvelle variété. Le phénotypage des descendants d'un croisement est une étape cruciale mais chronophage : les sélectionneurs et les chercheurs travaillent donc conjointement à la mise en place de plateformes partagées de caractérisation automatisée des plantes : on parle de phénotypage haut-débit.

Dispositif mécanique équipé de capteurs permettant de caractériser le développement des plantes et les produits de la récolte, et les conditions environnementales (météo, ressources du sol).

Sélection par marqueurs génétiques

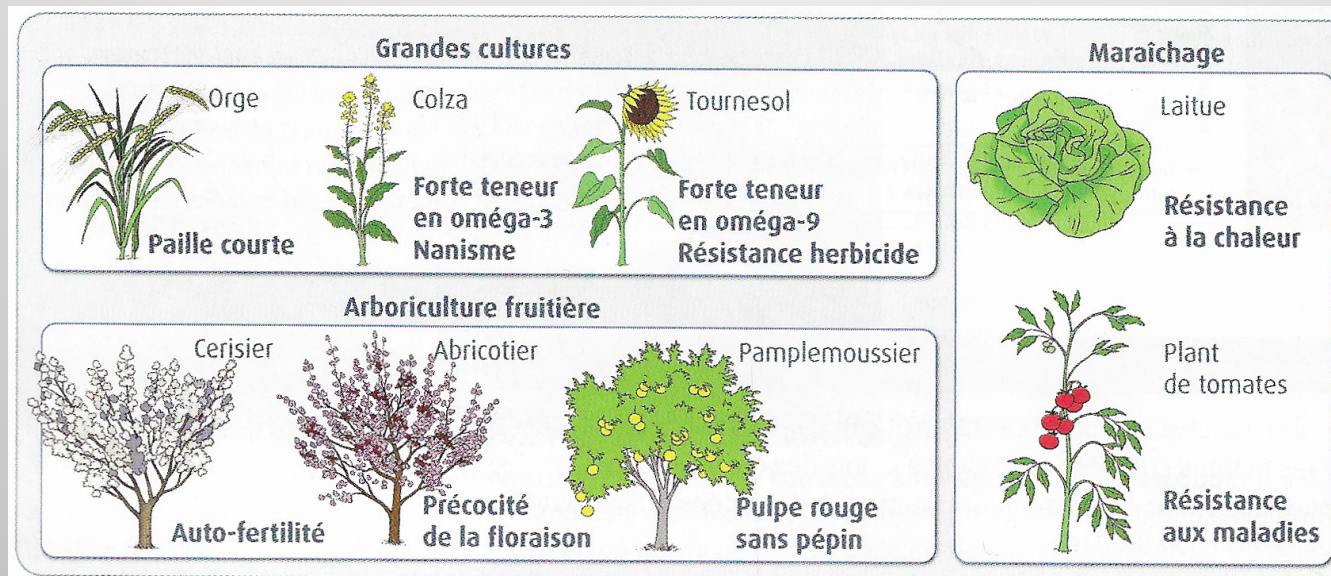


4 La sélection assistée par marqueur.

Afin d'accélérer la création de nouvelles variétés, les sélectionneurs utilisent en routine le génotypage et la sélection assistée par marqueurs. Cette technique utilise des marqueurs génétiques facilement identifiables avant même que les plantes grandissent. Ils sont associés à des zones chromosomiques définissant des caractères d'intérêt et on peut tester facilement au niveau moléculaire si tel ou tel individu possède ces marqueurs. Ci-contre, une seule paire de chromosomes sur les 21 paires que compte le caryotype du blé tendre est représentée. Deux marqueurs encadrent la zone chromosomique d'intérêt impliquée dans la tolérance à la sécheresse. Les rétrocroisements successifs avec le parent à fort rendement permettent d'éliminer progressivement dans la descendance les portions du génome sans intérêt agronomique du parent tolérant à la sécheresse.

Bilan sur les différentes sources de diversité utilisées par les sélectionneurs

Sources de diversité biologique	Exemple
Variétés existantes	Utilisation de variétés anciennes gardées dans des conservatoires comme parentes de variétés modernes (ex. : pomme).
Espèces sauvages apparentées	Utilisation d'espèces sauvages présentant des caractères originaux pour former de nouvelles variétés (ex. : pomme). Implique que la biodiversité sauvage soit conservée.
Mutations spontanées	Elles sont rares, mais sont à l'origine de la grande majorité des caractères visibles dans la diversité des plantes alimentaires.
Mutations induites	En utilisant des agents mutagènes, on augmente la fréquence de mutation en espérant faire survenir des mutations donnant les caractères intéressants (voir doc 3).
Espèces éloignées	Par transgénèse ou par édition du génome, des gènes intéressants provenant d'espèces éloignées sont intégrés dans le génome des plantes que l'on souhaite modifier. En France, la culture de ces plantes génétiquement modifiées n'est pas autorisée.



Exemple de la mutation induite

Exemples de caractères obtenus par mutations induites à l'aide d'agents mutagènes. Ils doivent ensuite faire l'objet d'un programme de sélection pour être associé à d'autres caractères intéressants.