

# Sélection végétale et création variétale

# Programme

- Introduction
- Méthodes de sélection et d'amélioration des plantes
  - Lignées pures
  - Populations
  - Hybrides
  - Variétés synthétiques
  - Clones
- Production commerciale de semences et de plants
- Aspects légaux de l'amélioration végétale

# Introduction

- Amélioration des plantes: art et science de de création de variétés de plantes répondant de mieux en mieux aux besoins de l'homme (Gallais, 2011).
- Une des composantes principales d'un programme d'amélioration: la méthode de sélection.
- Quelles sont les méthodes de sélection?
- Comment choisir la méthode de sélection?
  - Caractéristiques biologiques et génétiques de l'espèce
  - Objectifs a atteindre
  - Outils et matériel disponible

# Introduction

- Caractéristiques biologiques et génétiques de l'espèce
  - Système de reproduction
- Objectifs à atteindre
  - Qu'est ce qu'on veut améliorer?
  - Quel est le déterminisme génétique du/des caractères ciblés?
  - Quelle type de variétés?
- Outils et matériel disponible
  - Ressources génétiques
  - Outil moléculaire
  - Culture in vitro

# Introduction

- Caractéristiques biologiques et génétiques de l'espèce

- Système de reproduction

- Reproduction sexuée

- Autogamie (exemples)

- Allogamie (exemples)

- Systèmes mixtes

- Possibilité de contrôle de l'hybridation à grande échelle (dioïcie, monoïcie, stérilité male, autoincompatibilité....)

- Reproduction asexuée

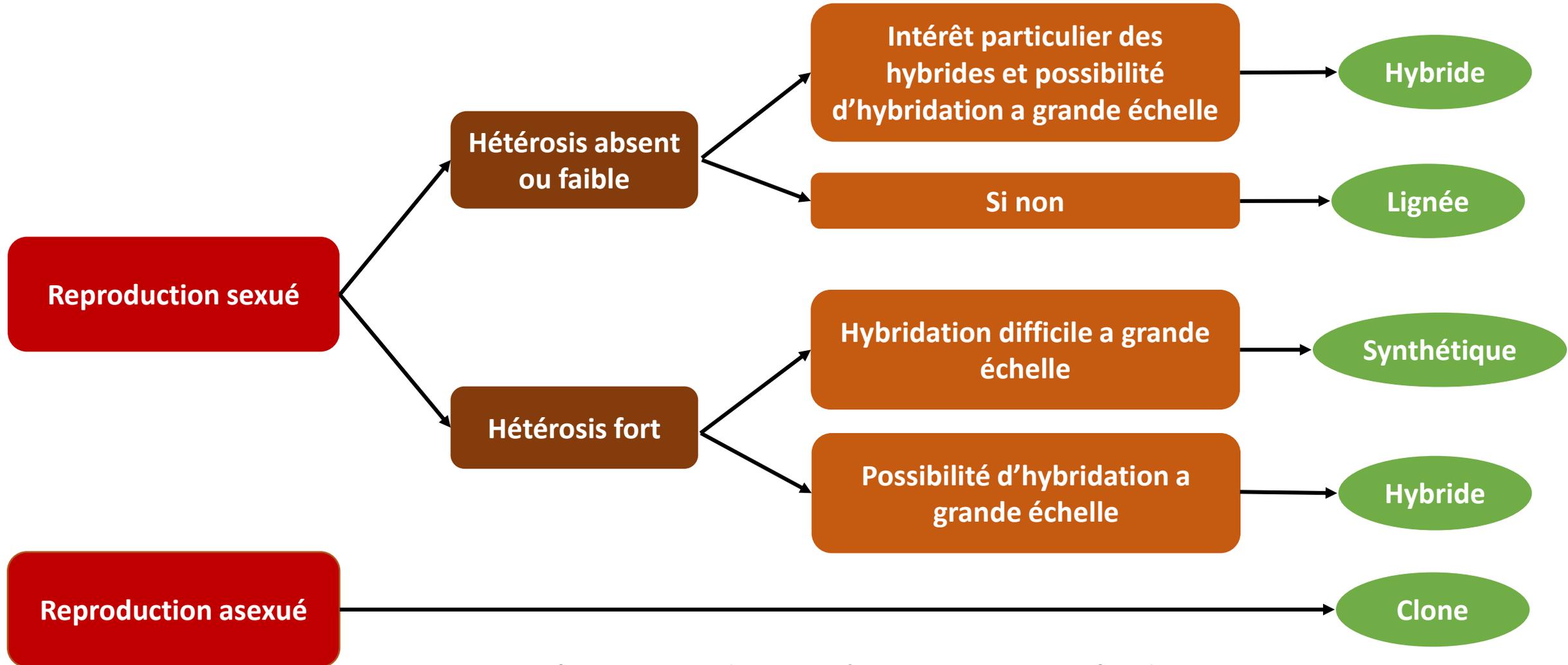
- Propagation végétatif

- Apomixie

# Introduction

- Objectifs a atteindre
  - Qu'est ce qu'on veut améliorer?
    - Rendement
    - Résistance aux maladies
    - Tolérance aux stressés abiotiques
    - Qualité du fruit
  - Quel est le déterminisme génétique du/des caractères ciblés?
    - Simple/complexe
    - La part de l'additivité, de la dominance....
    - Héritabilité du caractère
    - Importance du phénomène d'hétérosis
- Quelle type de variétés?
  - Lignée pure
  - Hybride
  - Synthétique
  - Population
  - Clone

# Introduction



Critères de choix d'un type variétal

# Types de variétés cultivées actuellement

Type de variétés	Type de reproduction	Type de culture	Espèces
Hybrides	Allogame	GC	Betterave, maïs, seigle, tournesol
		CM	Artichaut, carotte, choux, concombre, courgette, épinard, melon, navet, oignon, pastèque, radis
	Semi-allogame	GC	Colza
	Autogame	GC	Riz, sorgho, tabac, blé, orge
		CM	Piment, tomate
Synthétique	Allogame	GC	Féverole, dactyle, fétuque, ray-gras, luzerne, trèfle blanc et violet
	Semi-allogame	GC	Colza
Lignées	Autogame	GC	Avoine, blé, lin, orge, pois, riz, soja, triticales, lentille, pois-chiche
		CM	Haricot, laitue, pois
	Semi-allogame	GC	Colza
Clones		GC	Pomme de terre

CG: grandes cultures, CM: cultures maraichères

# Méthodes de sélection pour la création de lignées pures

1. Sélection généalogique (*pedigree selection*)
2. Méthode des *bulks* (*bulk selection*)
3. Filiation monograine ou Single Seed Descent (SSD)
4. Méthode avec haplodiploïdisation
5. Rétrocroisement (*Backcross*)

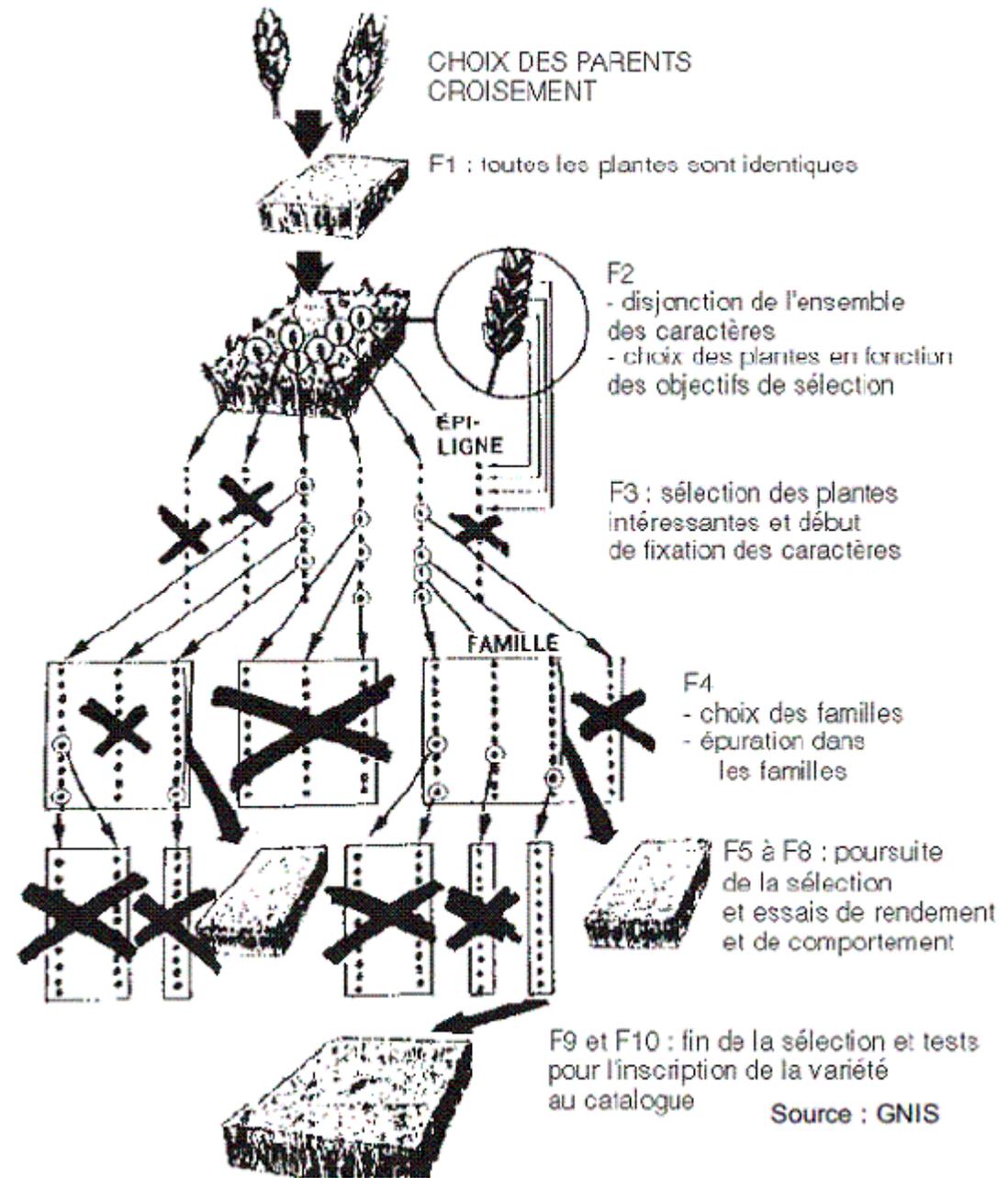
# 1. La sélection généalogique (pedigree sélection)

- Généalogique: les générations sont suivies: la généalogie de chaque plante sélectionnée peut être retracée jusqu'à la  $F_2$
- **Principe:**
  - Réunir dans un même génotype, à l'état homozygote, le maximum de gènes favorables initialement présents chez l'un ou l'autre parent
  - Isoler des lignées transgressives = ayant plus de gènes favorables que le meilleur parent
  - $F_1$  contient tous les gènes favorables mais à l'état hétérozygote
  - Sélectionner au fur et à mesure de la fixation pour amener les gènes favorables à l'état homozygote (**méiose + fécondation**)
  - Mais, nombre très élevé de loci + Taille limitée des  $F_2$ : Impossible de représenter tous les génotypes + Fixation de gènes défavorables
  - Population large + plusieurs cycles de sélection

Nombre de loci	Nombre de génotypes en $F_2$
1	3
2	9
5	243
10	59 000
20	3 500 000 000
n	$3^n$

# Réalisation pratique

Année	Taches
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification des parents et réalisation des croisements</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Culture des F<sub>1</sub>, en faible densité pour favoriser la production maximale de graines</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Culture des F<sub>2</sub> (1000 à 1500/population), en faible densité pour faciliter l'évaluation</li> <li>• Sélection inter et intra-population et récolte des meilleurs plantes séparément</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Culture des F<sub>3</sub> en épi-ligne suffisamment espacées</li> <li>• Sélection inter et intra-familiale (3 à 5 plantes/ligne)</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Culture des F<sub>4</sub> en épi-ligne suffisamment espacées</li> <li>• Sélection inter et intra-familiale</li> <li>• Pour les meilleures familles: récolte de plantes individuelles pour avancer à la génération suivante, le reste est récolté pour réaliser les essais préliminaires de rendement</li> </ul>
6-7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F<sub>5</sub>, F<sub>6</sub>: Poursuite de la fixation et sélection inter-familiale (familles plus homogènes)</li> <li>• Essais de rendement préliminaires</li> </ul>
8-9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• F<sub>7</sub>, F<sub>8</sub>: Poursuite de la fixation et sélection inter-familiale</li> <li>• Essais de rendement à grande échelle (multi-locaux)</li> </ul>

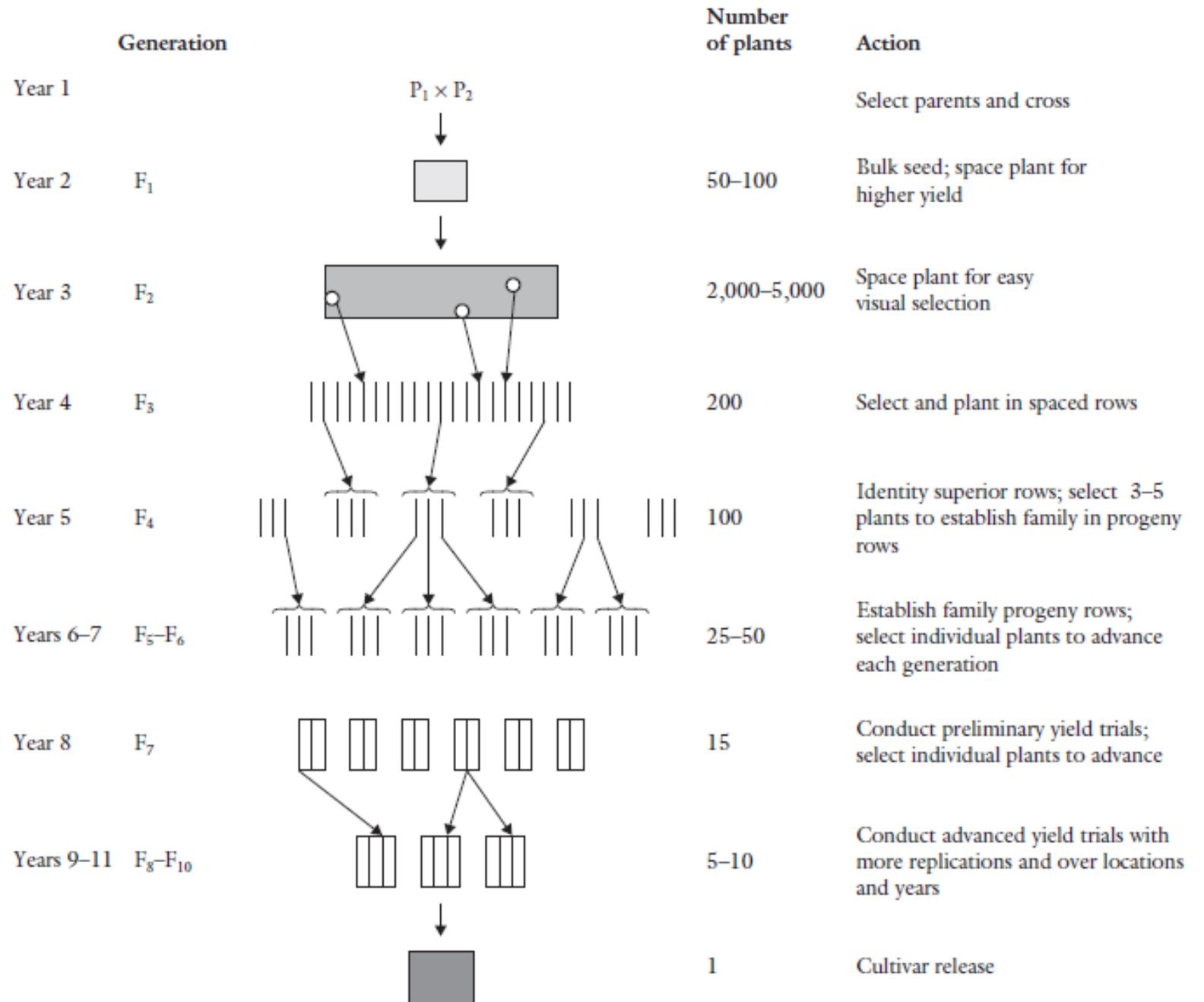


# Exemple d'effectifs et de taux de sélection chez le blé

Génération	Effectif évalué	Effectif sélectionné	Intensité de sélection (%)
F1	700 croisements		
F2	1 050 000 plantes	20 000	2
F3	20 000 familles	2 000	10
F4	2 000 familles	400 à 500	20-25
F5	500 familles	100 à 200	20-25
F6	100 à 200 lignées	< 50	< 25
F7	< 50 lignées	< 10	< 20

## Un autre exemple de schéma de sélection généalogique

Remarquez la variation dans les effectifs et les taches dans chaque génération



# 1. La sélection généalogique (*pedigree selection*)

- **Avantages:**

- Efficace pour améliorer les caractères fortement héritable
- Les essais à grande échelle sont réalisés sur un nombre limité de lignées
- Les lignées sélectionnées vers la fin sont très bien connues, puisque évaluées depuis la  $F_2$

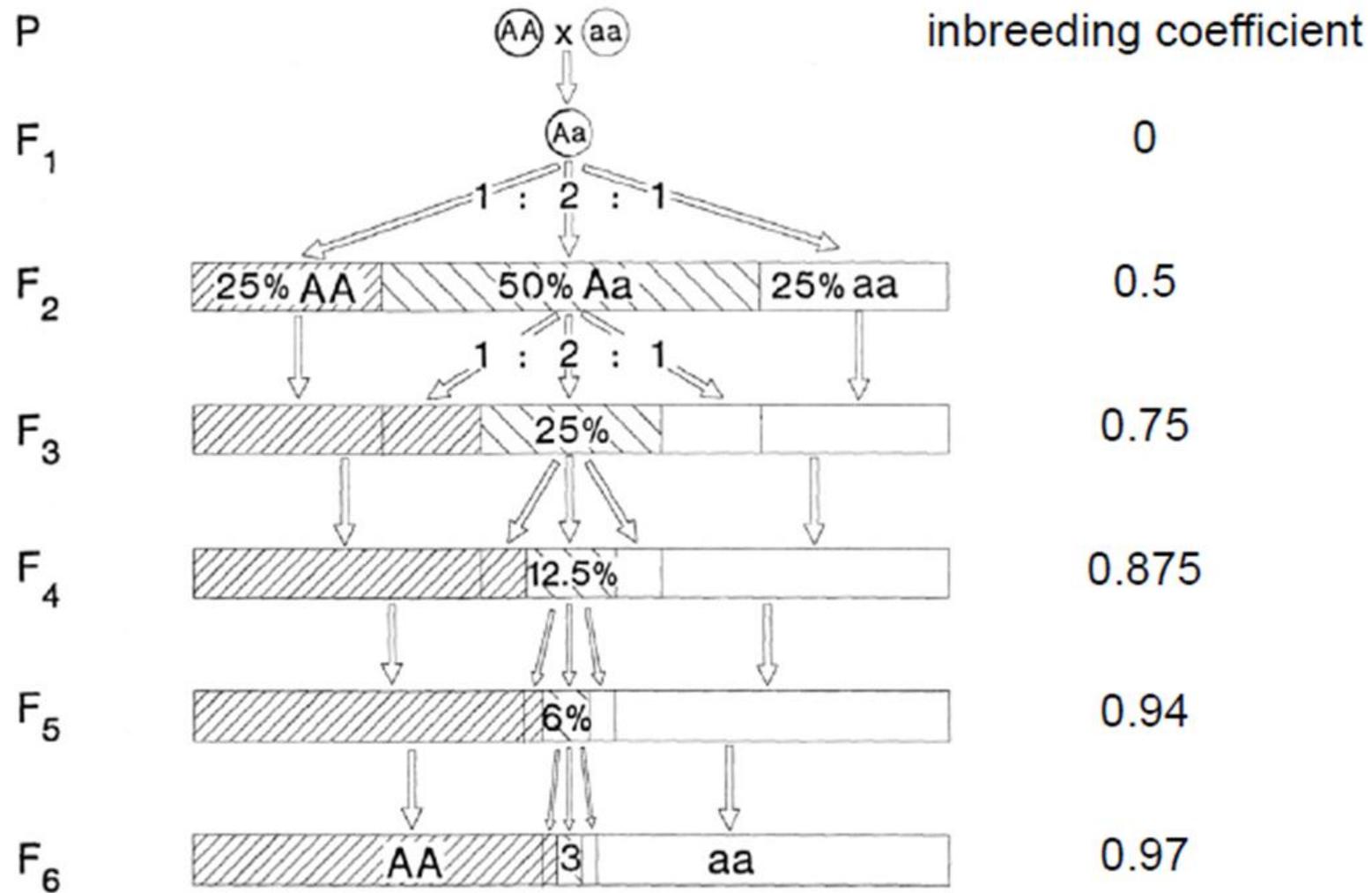
- **Inconvénients:**

- Longue cycle de sélection avec un grand volume de travail et de données à acquérir et à gérer
- Perte de la variabilité par dérive génétique
- Faible efficacité de recombinaison après la  $F_2$
- Une sélection sur la vigueur des plantes biaisée par l'hétérosis

# Méthode des *bulks*

- La sélection artificielle est retardé jusqu'aux générations avancées d'autofécondation ( $F_5$ ,  $F_6$ )
- C'est la sélection naturelle qui s'exerce
- Durant cet intervalle, le passage d'une génération à la suivante se fait par multiplication en masse
  - Récolte en vrac (***bulk***) de la génération actuelle
  - Semis d'une partie de la récolte pour constituer la génération suivante
- Une fois un niveau acceptable d'homozygocie est atteint ( $F_5$  ou  $F_6$ ), la sélection artificielle peut commencer
- La sélection entre populations (croisements) peut commencer avant (dé la  $F_2$ )
- Densité de semis conventionnelle jusqu'à la première génération de sélection artificielle ( $F_5$  ou  $F_6$ )

# Evolution de l'homozygocie dans une population autogame



# Schéma de sélection en bulks

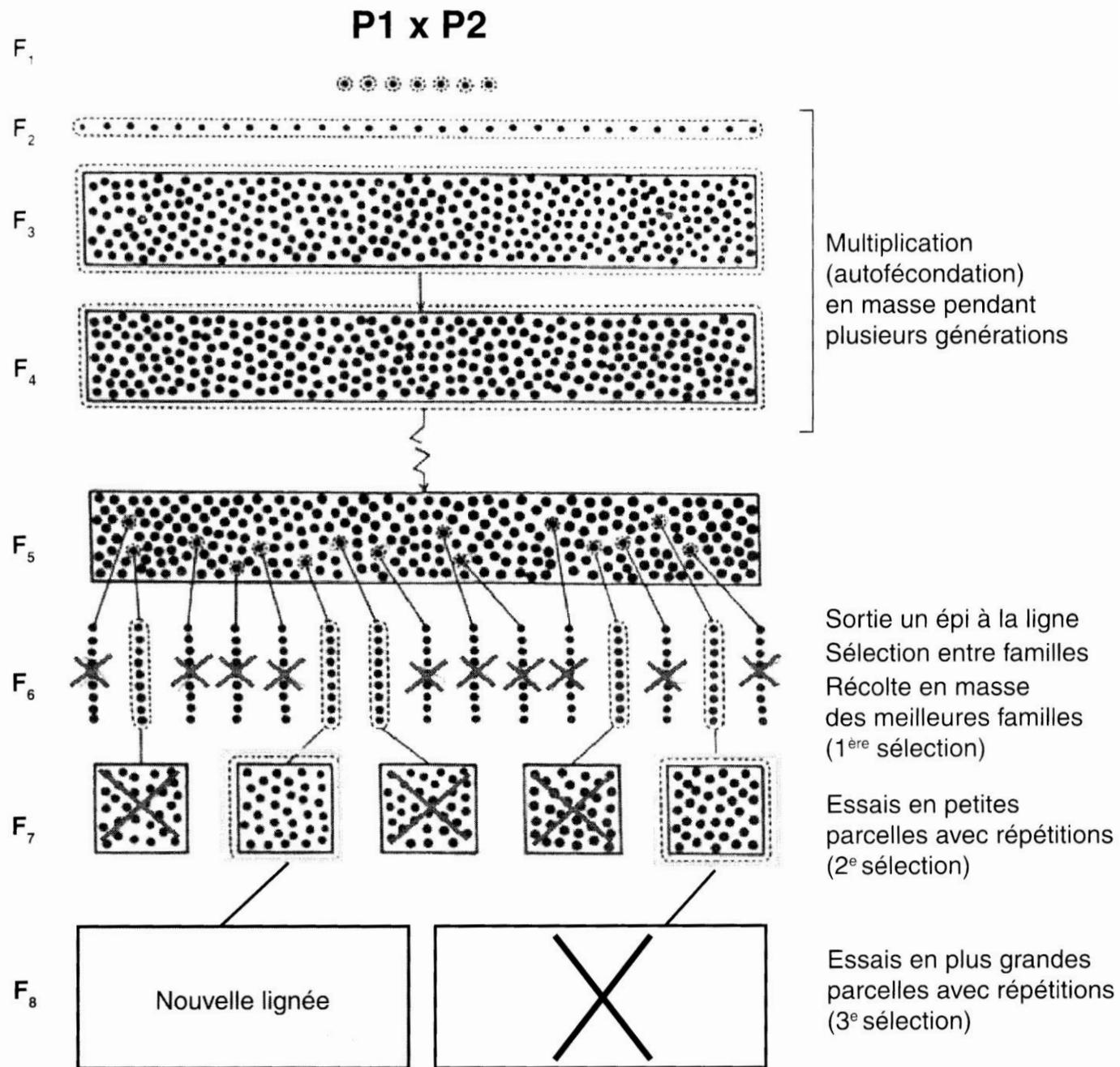
**Exemple:** Sélection pour la résistance au froid chez le blé (Nilsson-Ehle, 1912)

**Lignée productive  
mais sensible au  
froid**



**Lignée résistante  
mais moins  
productive**

**Sélection naturelle :** seulement les plantes qui survivent au froid de l'hiver peuvent passer à la génération suivante



# Méthode des *bulks*

- Théories de la génétique des populations:
  - Fixation = inbreeding (consanguinité)
  - Sélection naturelle: fitness =  $s + f$
  - Dérive génétique
- Les populations bulk peuvent être cultivées dans différents environnements en rotation (maladies, sécheresse, salinité, froid, stress thermique....)
- La sélection naturelle peut aussi favoriser des génotypes indésirables (ex: hauteur, précocité, + petits grains > - grains plus gros).
- Le sélectionneur peut intervenir pour éliminer les individus indésirables
- Pratiquer cette méthode dans les conditions normales de culture

# Méthode des *bulks*

- **Avantages:**

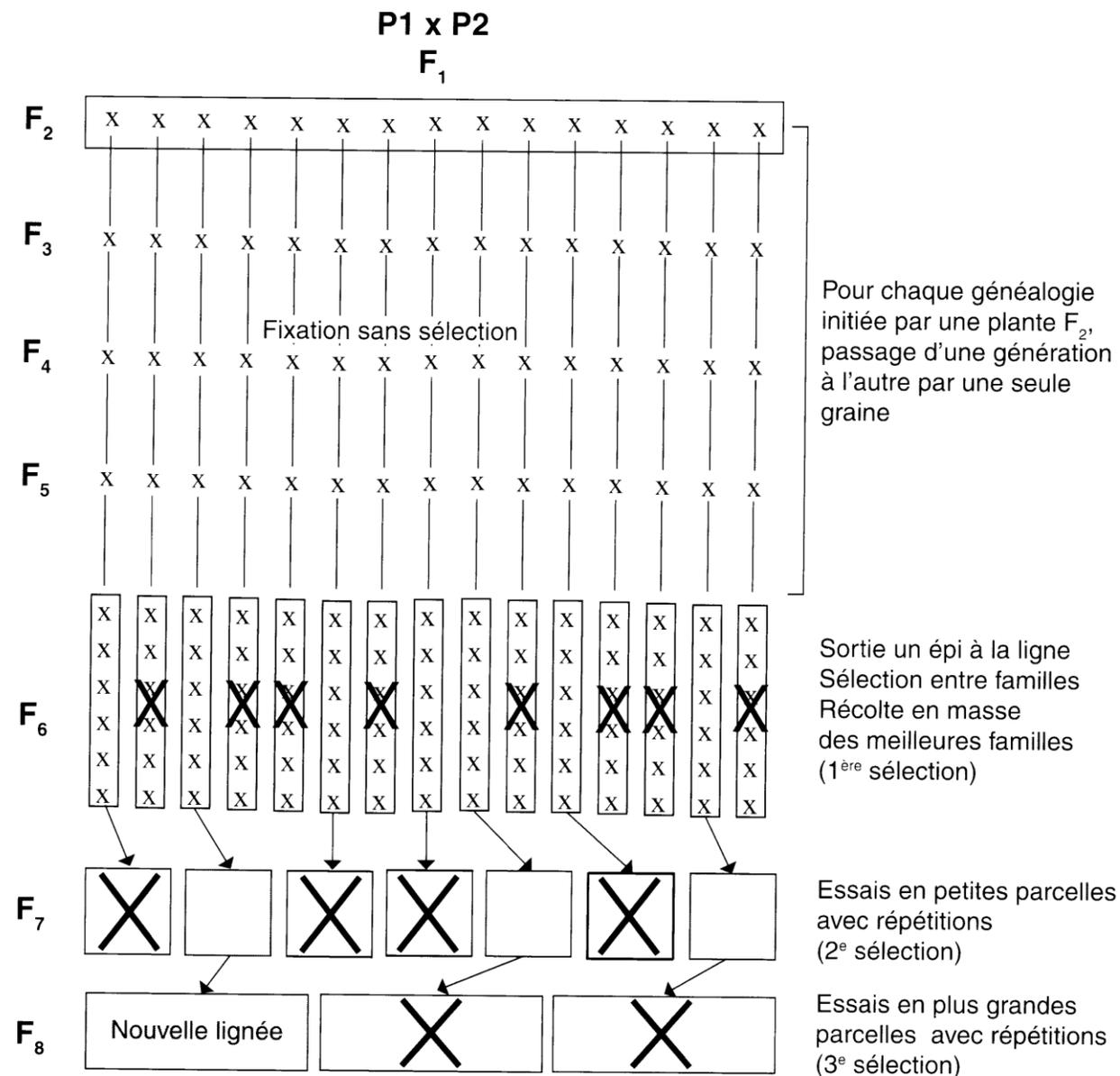
- Phase de fixation simple, non laborieuse, et peu coûteuse: possibilité d'augmenter le nombre de croisements
- Permet l'exploitation de la sélection naturelle: développement de variétés bien adaptées à l'environnement ciblé

- **Inconvénients:**

- Perte de variabilité par dérive génétique
- La sélection naturelle peut favoriser des génotypes indésirables

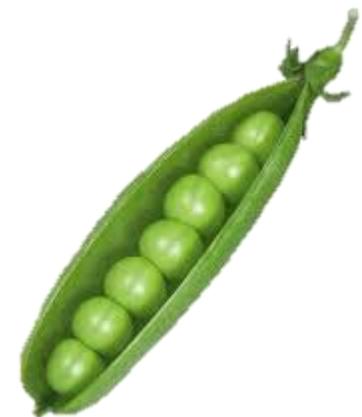
# Single Seed Descent (SSD)

- Méthode de sélection généalogique différée
- Fixation puis sélection dans les conditions normales de culture
- Conserve le maximum de variabilité quand on passe de la  $F_2$  aux lignées
- Efficace pour la sélection de caractères moins héritable
- Procédure: dériver une seule lignée par plante  $F_2$
- Comment?
  - Ressemer une seule graine de chaque plante à chaque génération
- Après la fixation, le processus de sélection est équivalent à celui de la méthode des bulks



# Single Seed Descent (SSD)

- Il est très probable que certaines plantes  $F_2$  ne donnent pas de lignées
- Solution: semer plus d'une graine par plante
  - Single spike descent
  - Single pod descent
- Les lignées développés par la méthode SSD = *Recombinant Inbred Lines* (RILs)



# Single Seed Descent (SSD)

- **Avantages**

- Meilleur maintien de la variabilité génétique jusqu'à l'obtention des lignées
- Possibilité de réaliser plusieurs générations par an (2 à 4)

- **Inconvénients**

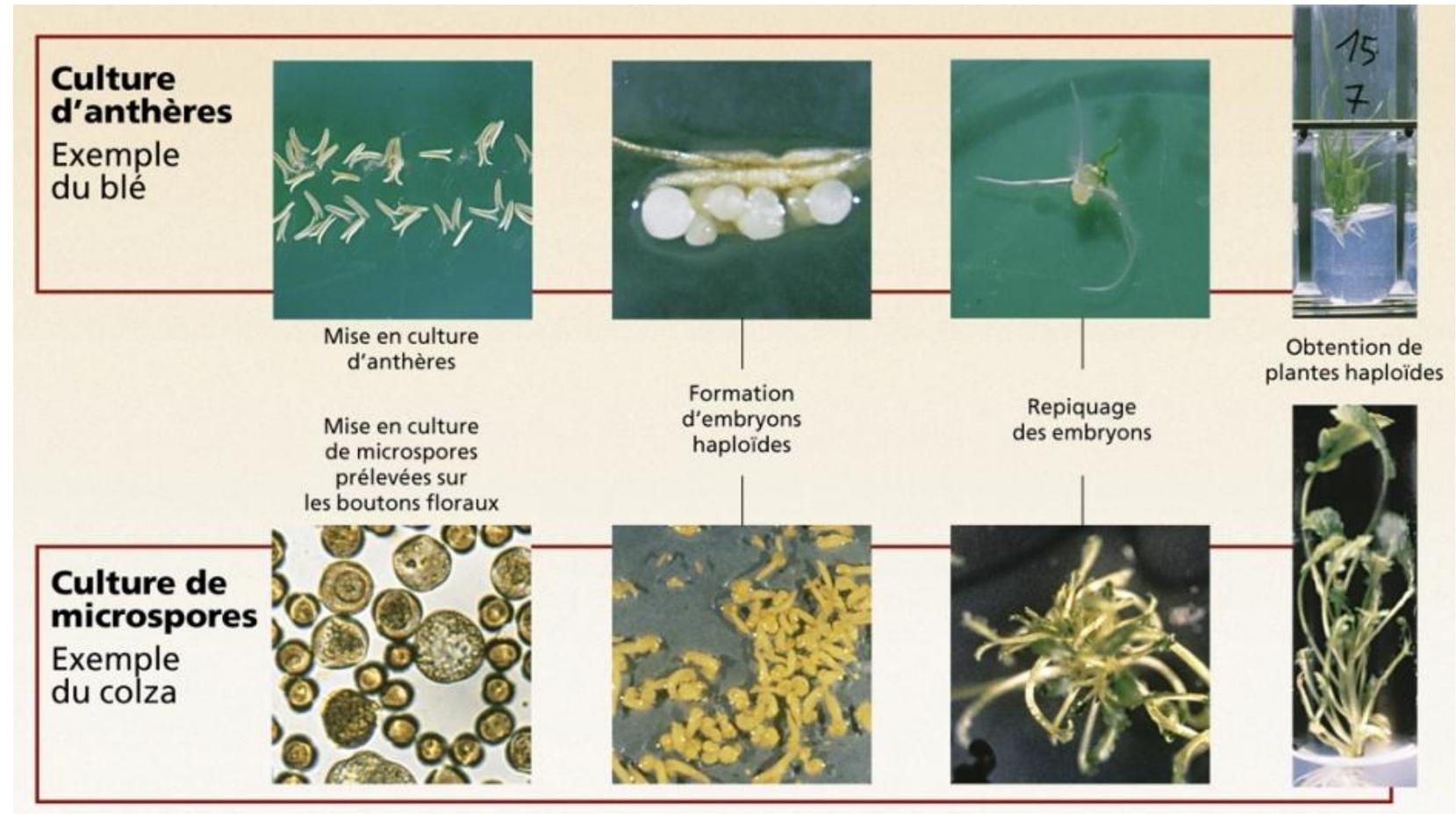
- Absence de sélection durant les premières générations: beaucoup de lignées présentent des défaut majeurs

# Méthode avec haplodiploïdisation

## Méthode de sélection généalogique différée

### Haplodiploïdisation:

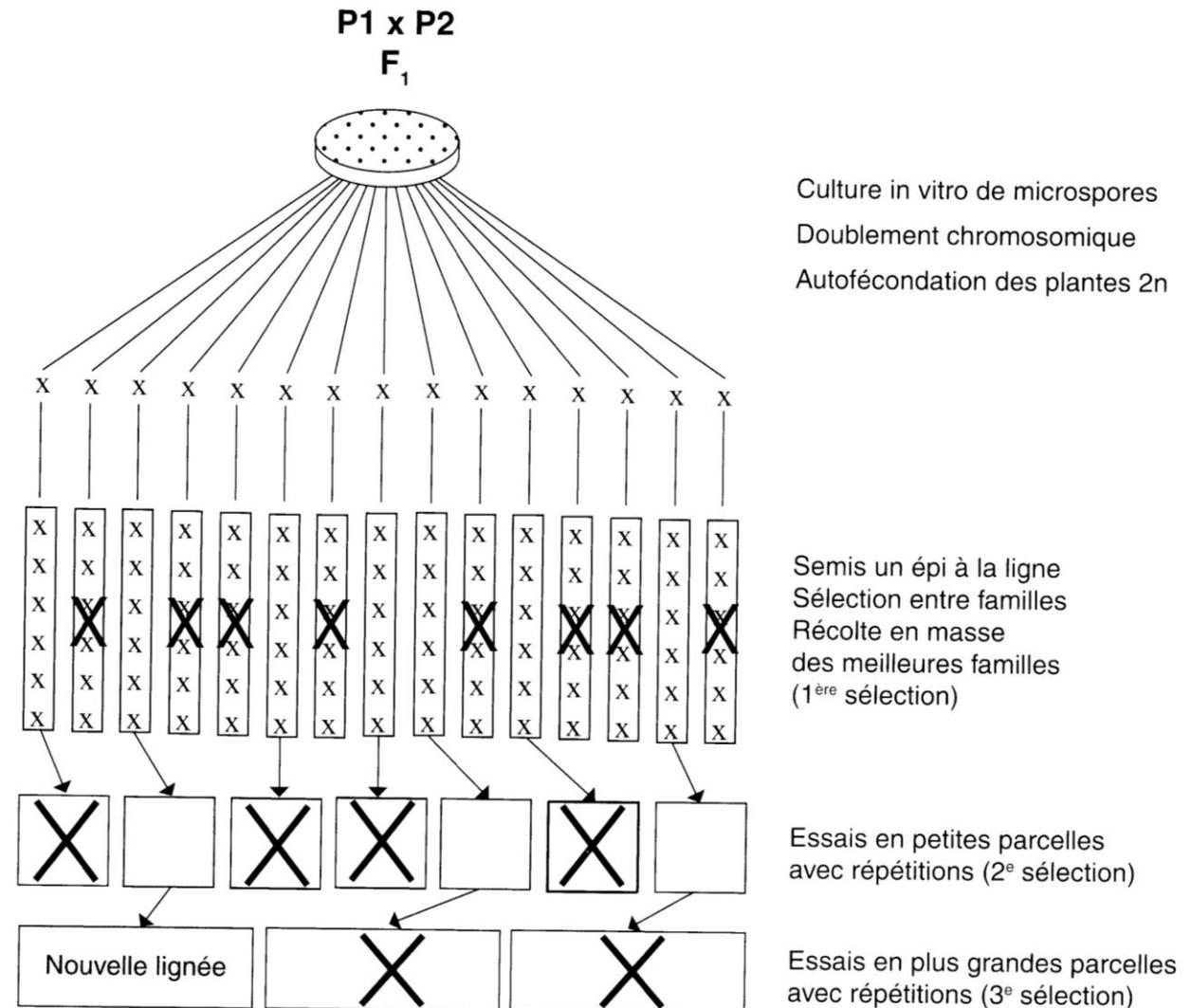
Obtention de plantes haploïdes à partir des organes ou cellules reproductrices mâles ou femelles, et le retour vers la phase diploïde.



- A quelle génération faut-il appliquer l'haplodiploïdisation?

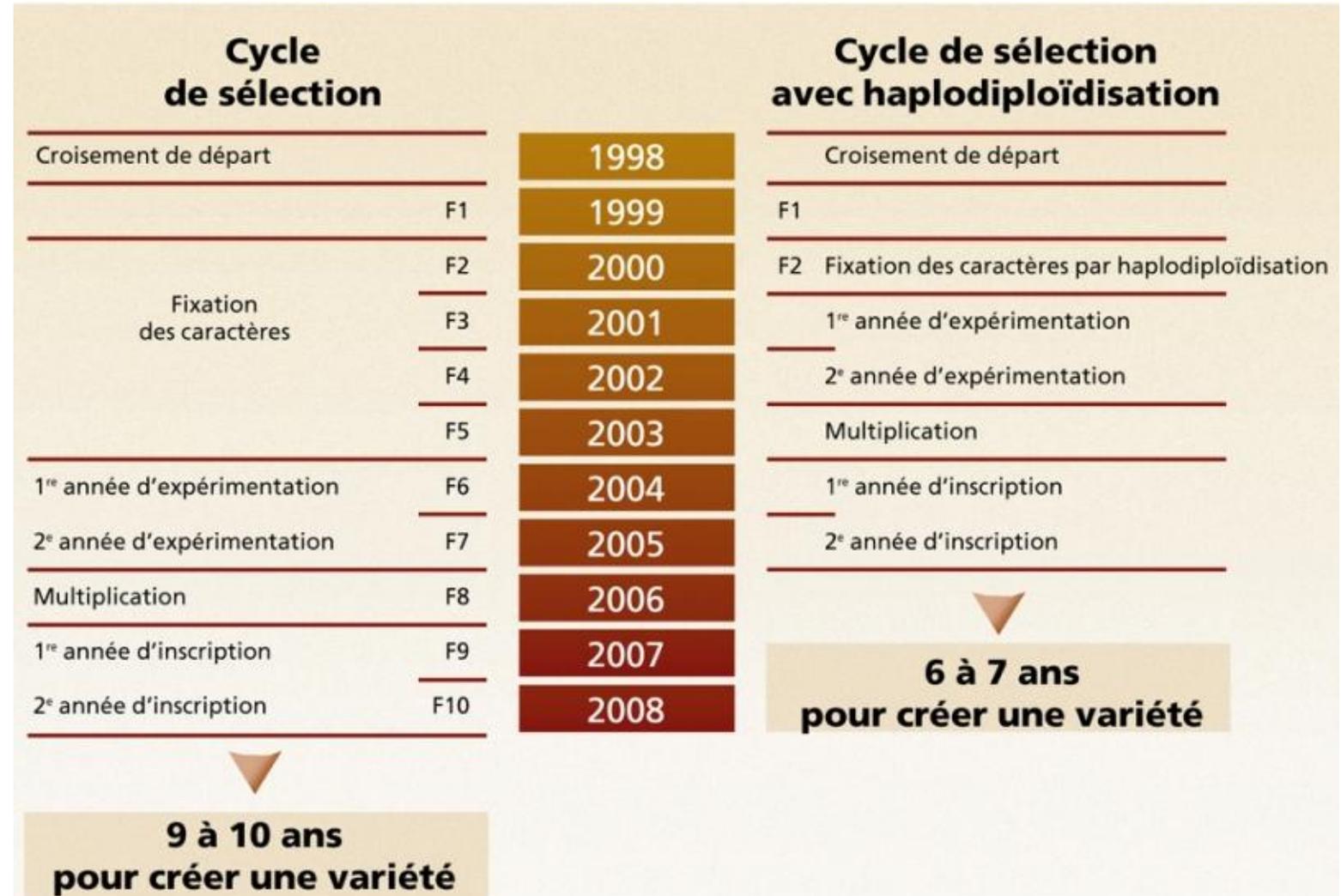
# Méthode avec haplodiploïdisation

- **Haplodiploïdisation précoce:** perte de recombinaisons (rupture des liaisons gènes favorables/gènes défavorables)
- **Haplodiploïdisation tardive:** gains de recombinaisons, mais moins efficaces à cause de l'homozygotie
- La sélection des lignées double-haploïdes (DHLs) est équivalent à celui des RILs



# Méthode avec haplodiploïdisation

- **Intérêt:** Fixation plus rapide du matériel génétique
- Gain de temps réduit par le manque de vigueur des DHLs (une année de multiplication)



# Méthode avec haplodiploïdisation

- **Avantages**

- Rapidité d'obtention de lignée
- Absence de résidu d'hétérozygocie, cependant possibilité de mutations
- Forte variabilité génétique entre les lignées DHLs

- **Inconvénients**

- Manque de maîtrise chez certains espèces (récalcitrantes)
- Absence de sélection durant les premières génération: beaucoup de lignées présentent des défaut majeurs

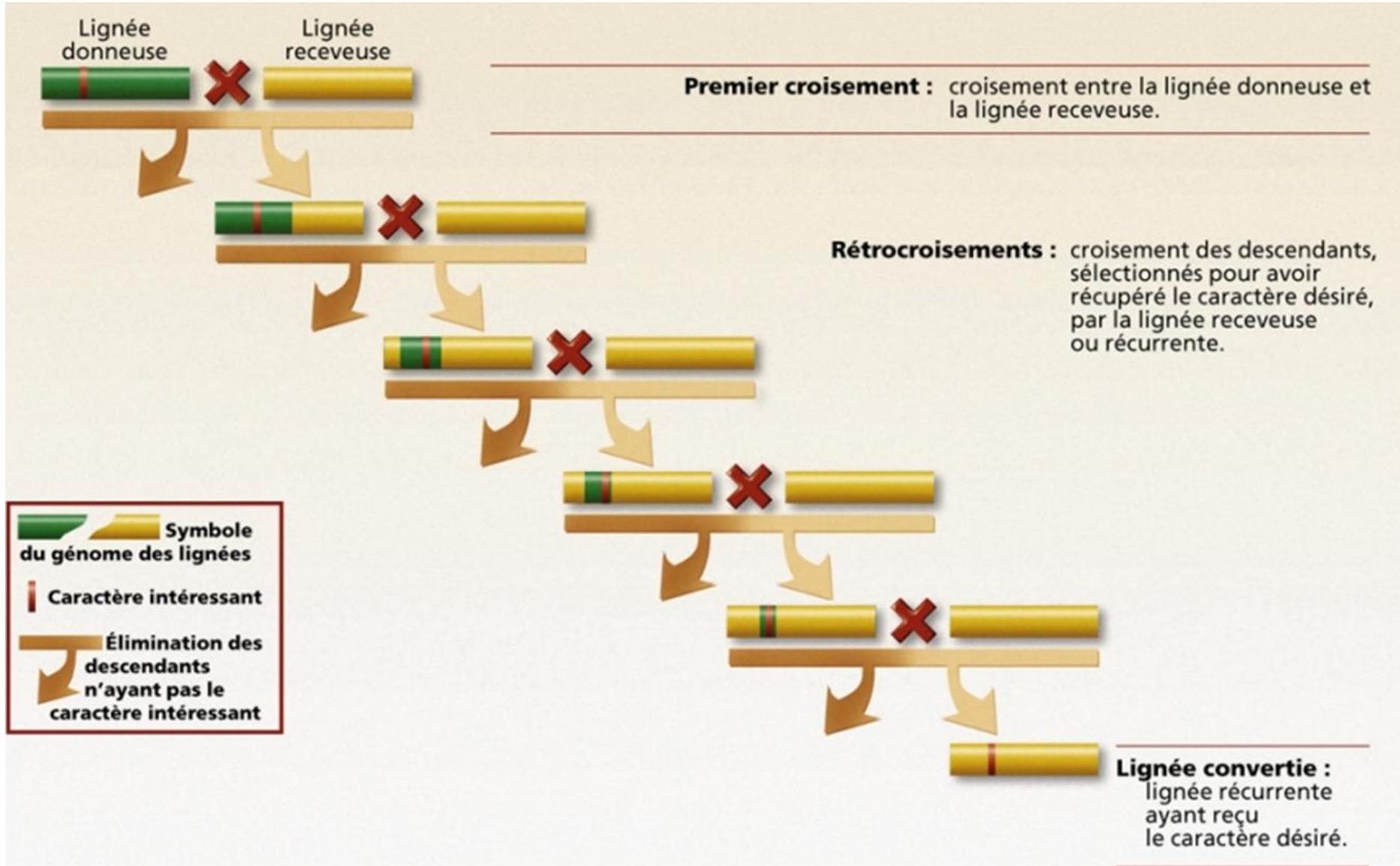
# Quelles est la meilleur méthode?

- Les méthodes sont difficiles à comparer expérimentalement
- Les résultats concernant la valeur des lignées ne sont pas concordantes:
  - Boerma et Cooper, 1975: Généalogique = Bulkes = SSD
  - Grignac et al., 1978:
    - Caractères héritables: Généalogique > Bulkes > SSD
    - Rendement: Généalogique = Bulkes = SSD
  - Piccard et al., 1988: Rendement: Généalogique > Bulkes > SSD
- La méthode avec haplodiploïdisation (DH) = Généalogique
- Si on considère le gain de temps, SSD ou DH sont les meilleures
- Si la DH maîtrisée, c'est le bon choix
- La méthode des bulks peut être préconisée quand la sélection naturelle présente un effet positif

# Rétrocroisement (*Backcross*)

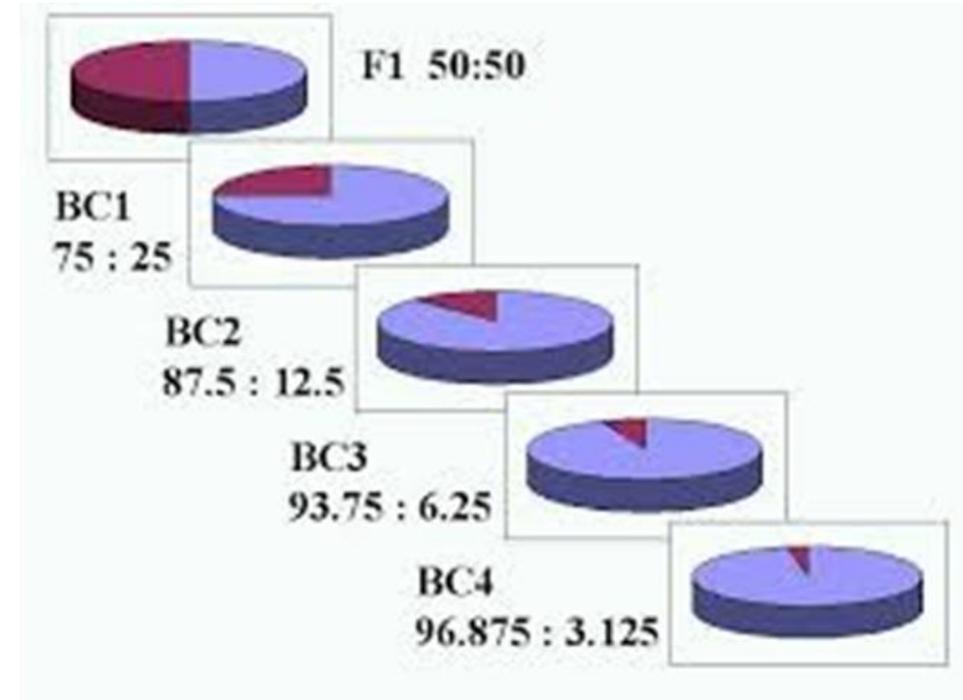
- Cette méthode peut être utilisée pour tous les types de variétés
- Objectif: remplacer à un locus donné un allèle défavorable par un allèle favorable
- Génotype receveur (récurrent): généralement, un bon génotype avec un ou peu de défauts
- Génotype donneur: généralement, un ou certains caractères intéressants et le reste défavorables: « Le fardeau génétique »
- Le transfert se fait par une série de rétrocroisement des plantes portant le gène favorable avec le parent receveur

# Procédure du Rétrocroisement



# Rétrocroisement (*Backcross*)

- Après chaque rétrocroisement sélectionner les plantes portant le gène favorable et ayant la proportion minimale du « fardeau génétique »
- Après 5 à 6 cycles de rétrocroisements: **lignée isogénique** (génome du receveur sauf le gène transféré)
- Vers la fin, une ou deux générations d'autofécondation sont nécessaires pour fixer les lignées



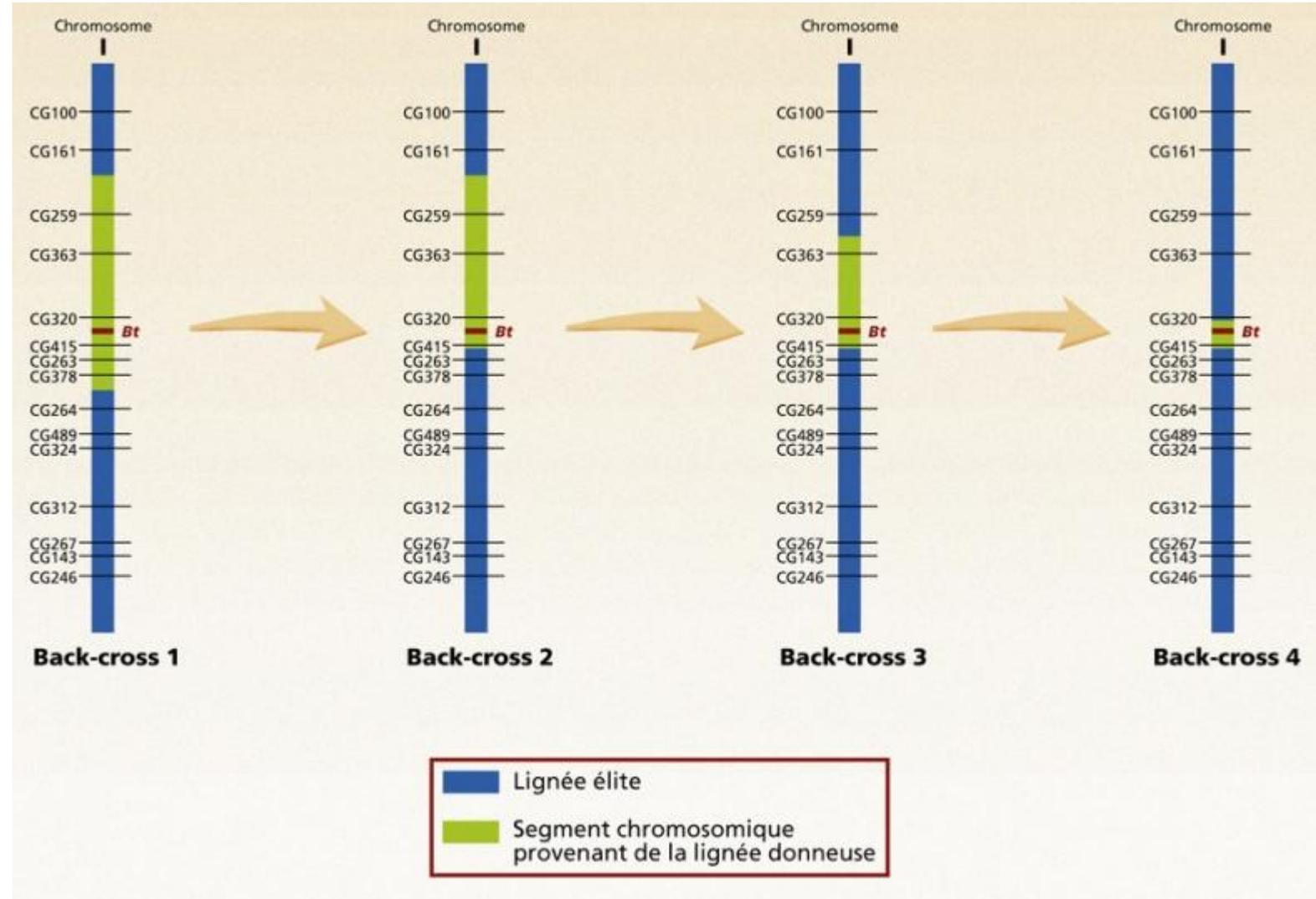
# Rétrocroisement (*Backcross*)

- La procédure du rétrocroisement diffère selon le déterminisme du caractère à transférer:
  - Introgression d'un allèle dominant: plusieurs cycles de rétrocroisements + une autofécondation vers la fin
  - Introgression d'un allèle récessif: chaque cycle de rétrocroisement doit être suivie par une autofécondation

# Rétrocroisement (*Backcross*)

- Rétrocroisement assisté par marqueurs moléculaires (*Marker assisted backcrossing*):

- Marqueurs liés au gène à transférer
- Marqueurs liés au génome du receveur
- Plus rapide que la sélection phénotypique



# Rétrocroisement (*Backcross*)

- Les gènes transférés par rétrocroisement sont souvent des gènes majeurs.
- Exemples:
  - Résistance aux maladies
  - Type de croissance (déterminée/indéterminée)
  - Résistance aux nématodes
  - Coloration du fruit
- La plupart de ces gènes sont issues des espèces apparenté sauvages



# Espèce sauvages de tomate



*S. lycopersicum*



*S. galapagense*



*S. cheesmaniae*



*S. pimpinellifolium*



*S. neorickii*



*S. chmielewskii*



*S. chilense*



*S. arcanum*



*S. corneliomulleri*



*S. huaylasense*



*S. peruvianum*



*S. habrochaites*



*S. pennellii*



*S. lycopersicoides*



*S. sitiens*



*S. ochranthum*



*S. juglandifolium*

# Autres méthodes de sélection des autogames

- **Sélection massale:**

- La plus ancienne méthode de sélection
- Pratiquée dans l'agriculture traditionnelle
- Pas de création de variabilité
- Valable aussi pour les allogames
- Pratiquée dans le cadre des autres méthodes
- Utilisée pour le maintien de la pureté des variétés
- La sélection est visuelle
- La sélection peut être positive ou négative

- **Sélection de lignées pures**

- Pas de création de variabilité
- Pour sélectionner une lignée pure à partir d'une population mixte (ex: landraces)
- Pratiquée dans le cadre des autres méthodes

# Sélection de variétés hybrides

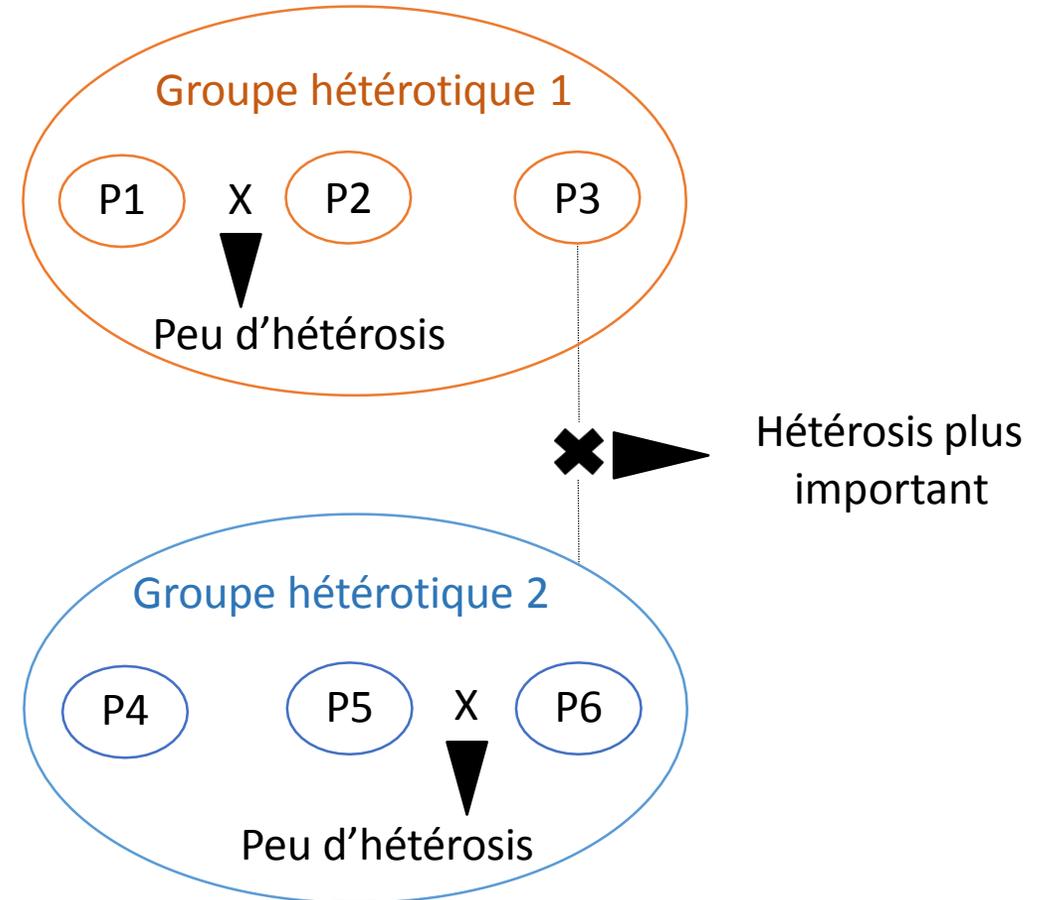
# Méthodes de création de variétés hybrides

- Pour créer un hybride il faut sélectionner préalablement ses parents qui se combinent bien entre eux
- Le critère de sélection pour les parents de l'hybride n'est pas leur valeur propre mais leur valeur en croisement
- Les concepts de sélection pour la création de variétés hybride ont été développés à partir des travaux de sélection chez le maïs

# Principes de création de variétés hybrides

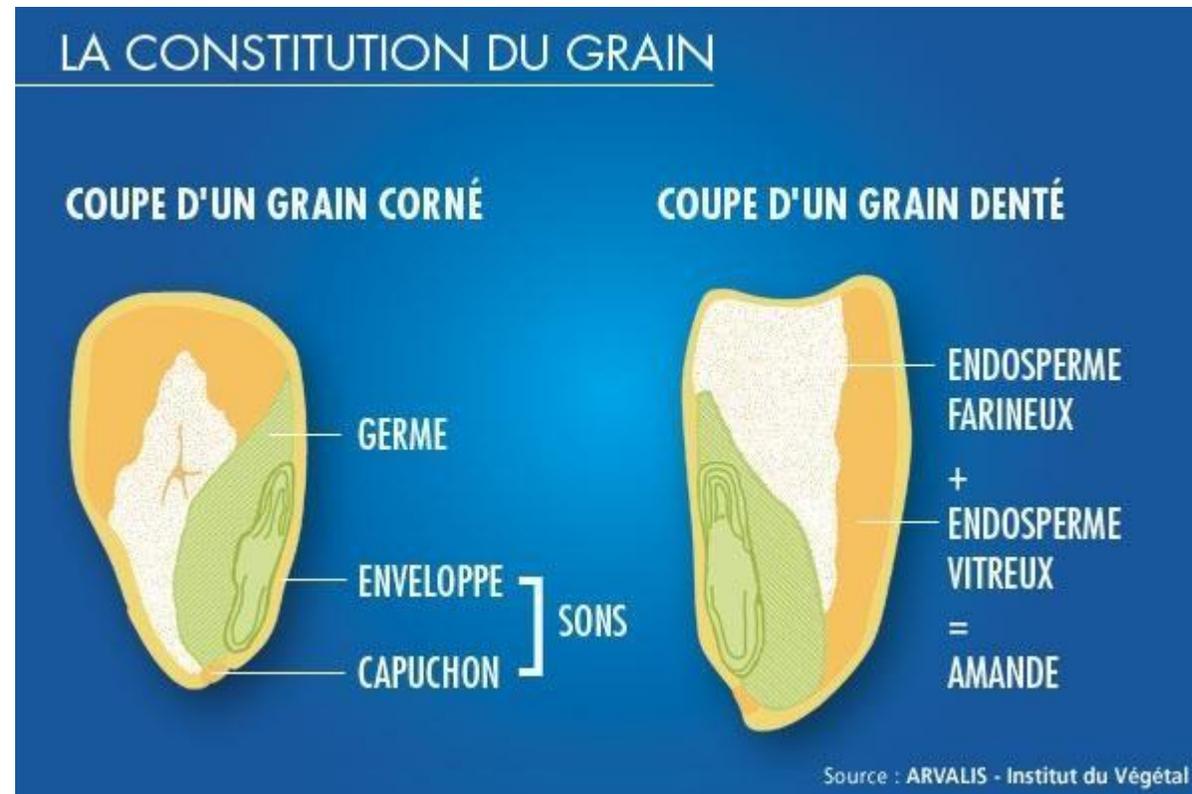
- **Notion de groupes hétérotique**

- Structuration de la variabilité génétique en groupes de population



# Principes de création de variétés hybrides

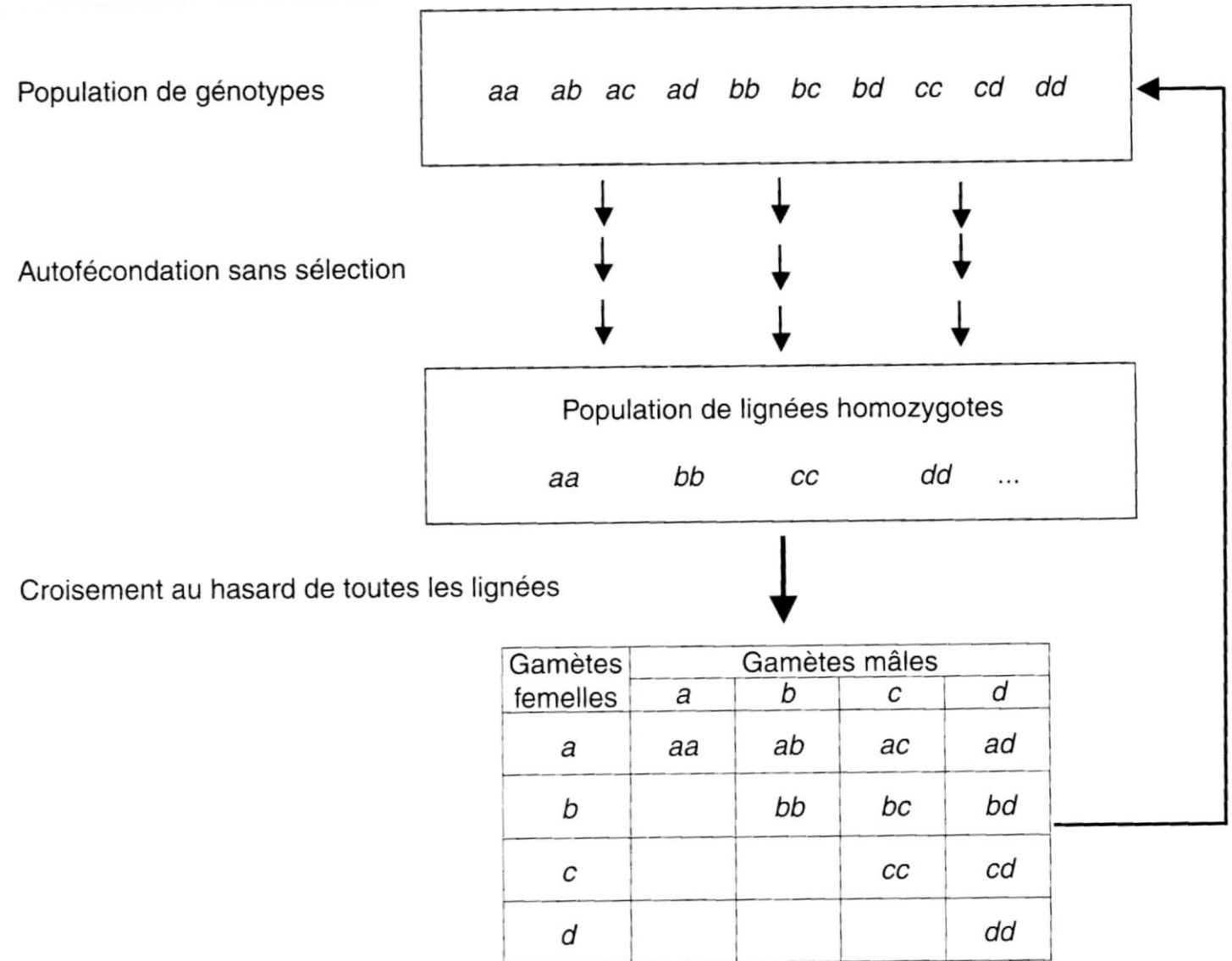
- **Exemple:** maïs corné européen vs maïs denté nord américain



# Principes de création de variétés hybrides

- **La base théorique de création de variétés hybrides (Shull, 1908)**

- Population = plantes différentes
- Plante = ♂ + ♀
- Pour reproduire la meilleure plantes: sources gamétiques constantes
- Démarche à deux étapes:
  1. Création de lignées
  2. Recherche des meilleures combinaisons



# Principes de création de variétés hybrides

- **La base théorique de création de variétés hybrides (Shull, 1908)**
  - Remarques:
    - Les lignées proviennent d'une seule population
    - Notion d'hétérosis non considérée
  - Deux limitation majeurs:
    - Dépression de consanguinité suite à l'autofécondation (diminution de la fertilité)
    - Très grand nombre de lignées à croiser deux à deux
  - Conséquences:
    - Très peu de lignées développées
    - Hybrides peu performants

# Principes de création de variétés hybrides

- **La base théorique de création de variétés hybrides (Shull, 1908)**
  - Amélioration de l'idée initiale
    - Production d'hybrides trois-voies ou hybrides doubles pour surmonter le problème de la quantité/qualité de semence
  - L'idée résout un problème mais en pose d'autres
    - Diminution de la valeur de l'hybride à cause de l'élargissement de la base génétique
    - Hétérogénéité de l'hybride
  - La suite: retour aux hybrides simples + sélection des lignées sur leur valeur en croisement

# Principes de création de variétés hybrides

- **La notion d'aptitude à la combinaison**

- Aptitude générale à la combinaison (AGC): la valeur moyenne des descendant d'un génotype en fécondation libre
- Aptitude spécifique à la combinaison (ASC): Elle concerne deux génotypes particuliers
- Procédure: estimer les AGC en *top-cross* puis concentrer les efforts sur les meilleurs lignées de chaque population

- Avantages de la sélection sur la base des AGC<sub>s</sub>:

- Diminution du nombre de croisements à étudier ( $m + n$  au lieu de  $m \times n$ )
- Amélioration de la vigueur des lignées

# Principes de création de variétés hybrides

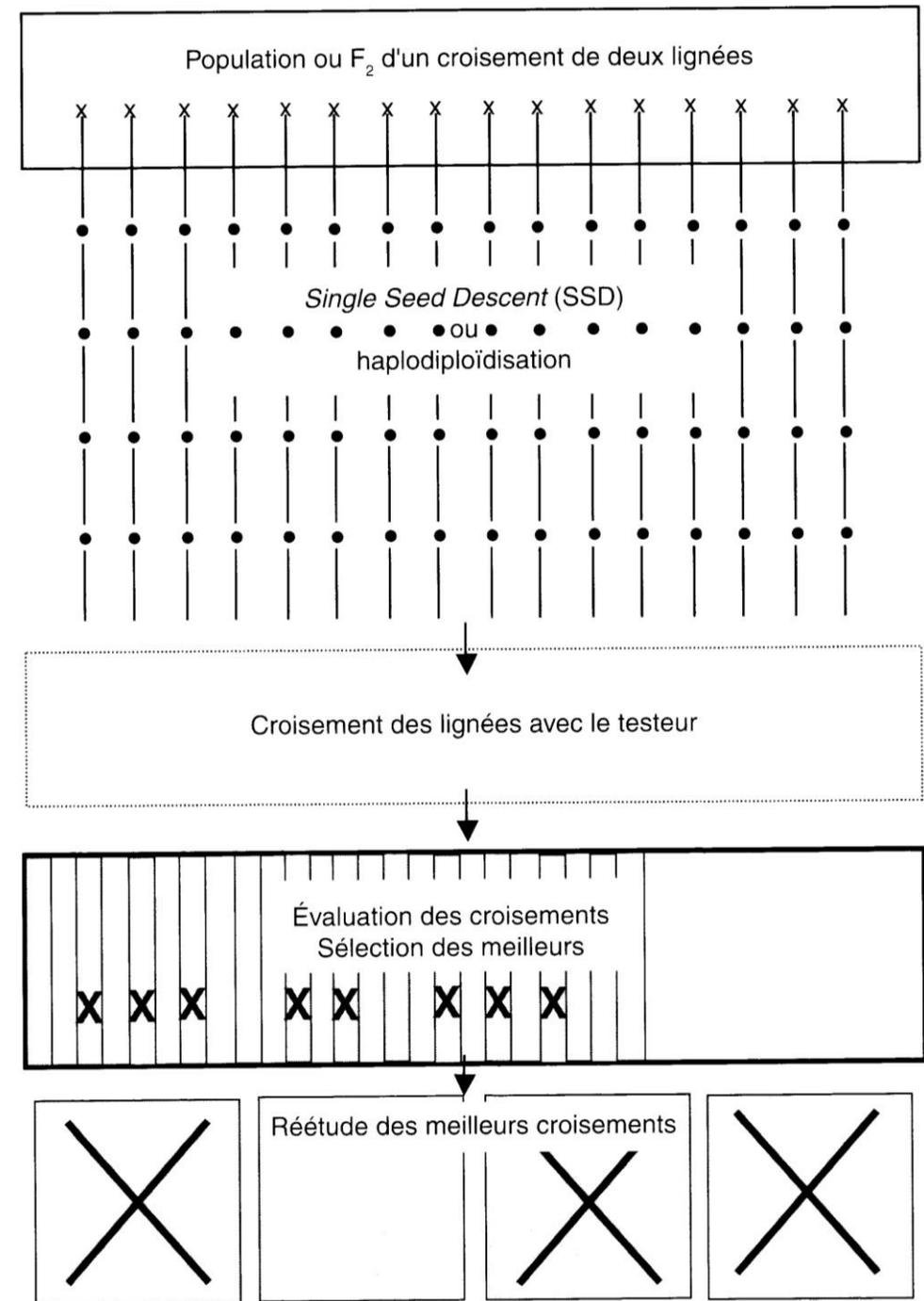
- **La notion de testeur**
- L'évaluation de l'AGC se fait par croisement avec un testeur
- Un testeur peut être:
  - Un échantillon d'une population complémentaire (ex: mélange de pollen)
    - Inconvénient: descendance très hétérogène: perte de précision dans l'évaluation à cause de la compétition
  - Une ligné sélectionnée dans l'autre groupe hétérotique
    - Avantage: descendance homogène: évaluation plus précise
    - Inconvénient: renseignement sur AGC+ASC
    - Si ASC faible, pas de problème / Si ASC forte: sélection de lignées avec une bonne combinaison avec le testeur uniquement
    - Pour un matériel structuré en groupes hétérotiques ce problème ne se pose pas



# Schémas de création de variétés hybrides

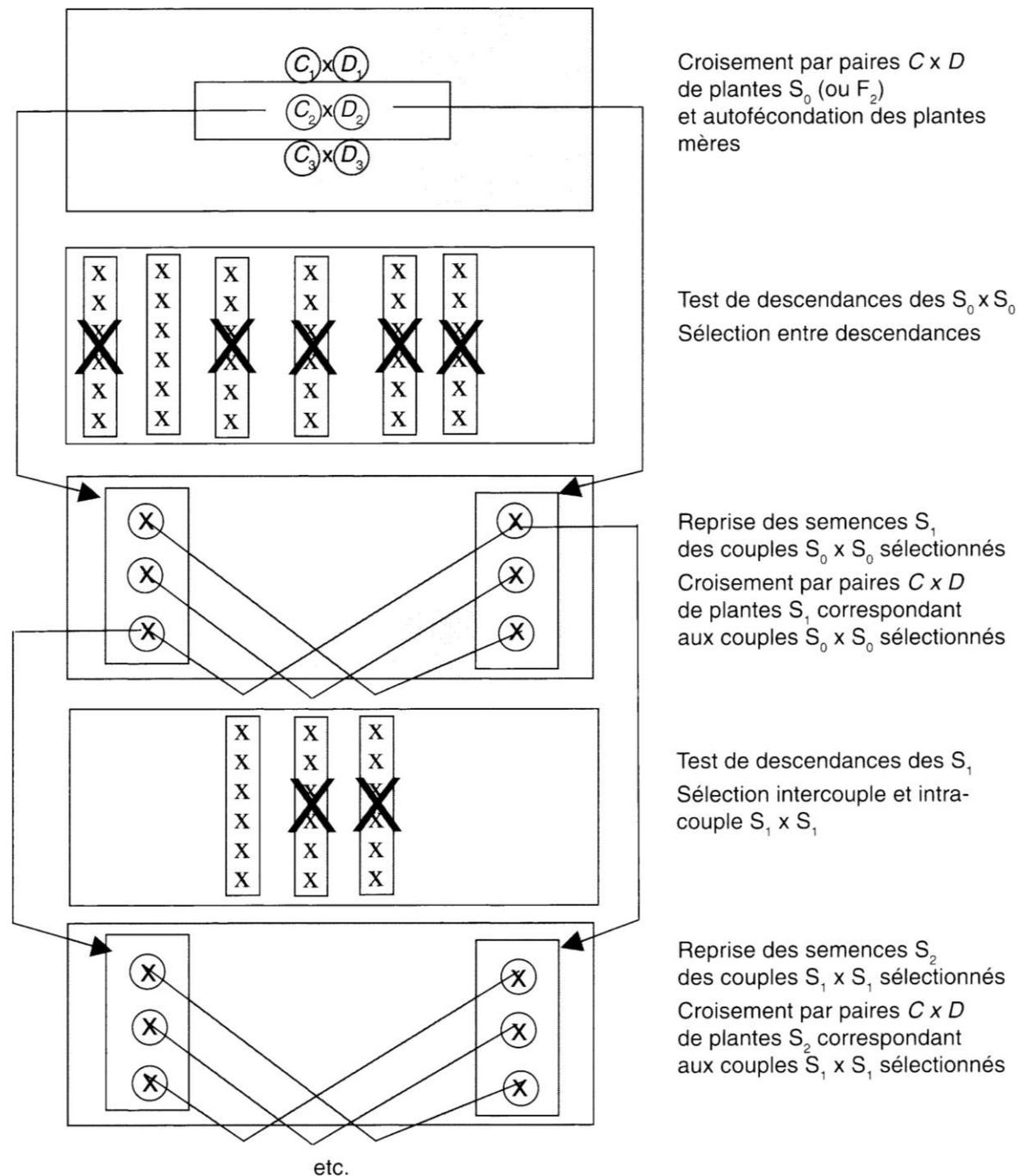
Sélection généalogique tardive pour l'AGC

Avec ou sans sélection phénotypique



# Schémas de création de variétés hybrides

## Sélection généalogique réciproque pour l'AGC



# La sélection clonale

# La sélection clonale

- **Multiplication clonale et implications sur la sélection:**
  - Variété clone: copies identiques d'un seul génotype
  - Obtenues par multiplication végétative (ou apomixie)
  - Les espèces clonales sont souvent des allogames:
    - Hautement hétérozygotes
    - Sensibles à la dépression de consanguinité
  - Peuvent être reproduites par l'utilisateur
  - Mais: problèmes sanitaires! Un des objectifs majeurs de sélection

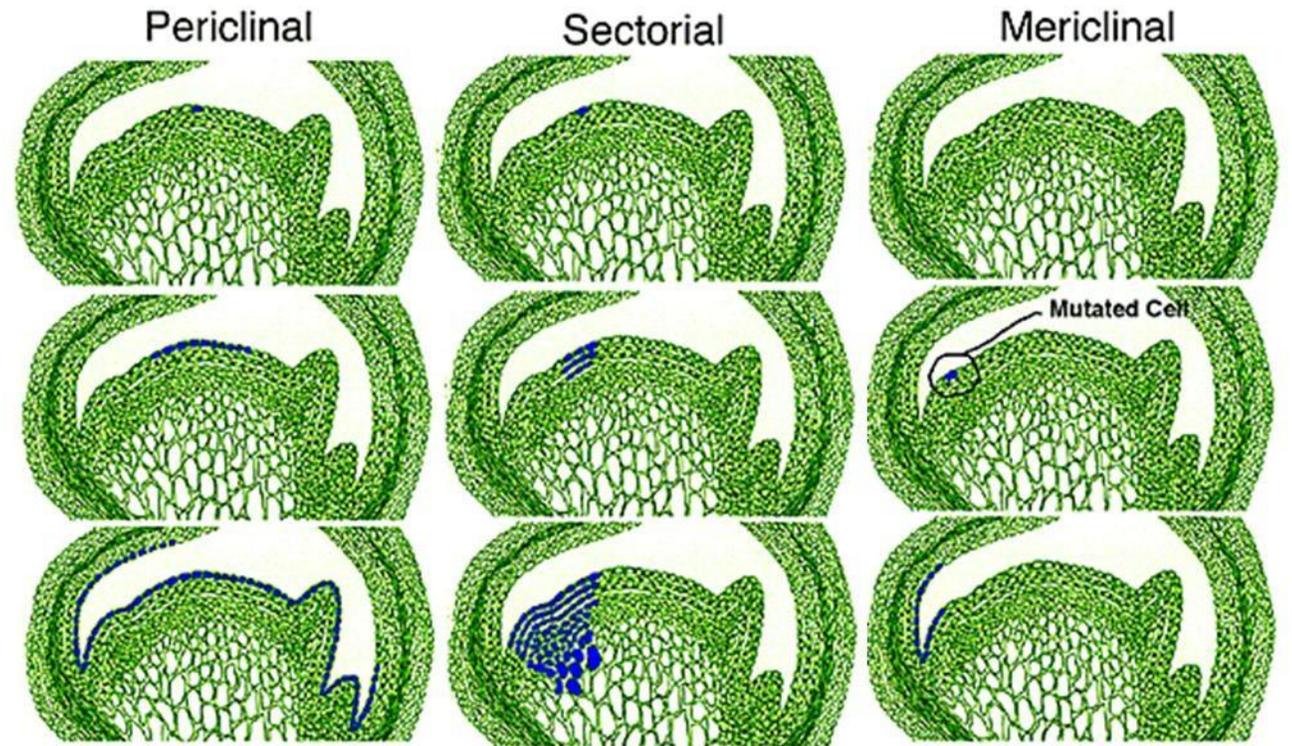
# La sélection clonale

- Les espèces clonales qui produisent des semences peuvent être améliorées en utilisant des croisements
- Les autres nécessitent d'autres techniques (mutagenèse...etc)
- Les génotypes intéressants peuvent être fixés immédiatement après leur détection
- Source de variation pour une variété clone: mutations dans le méristème:  
**chimérisme**

# La sélection clonale

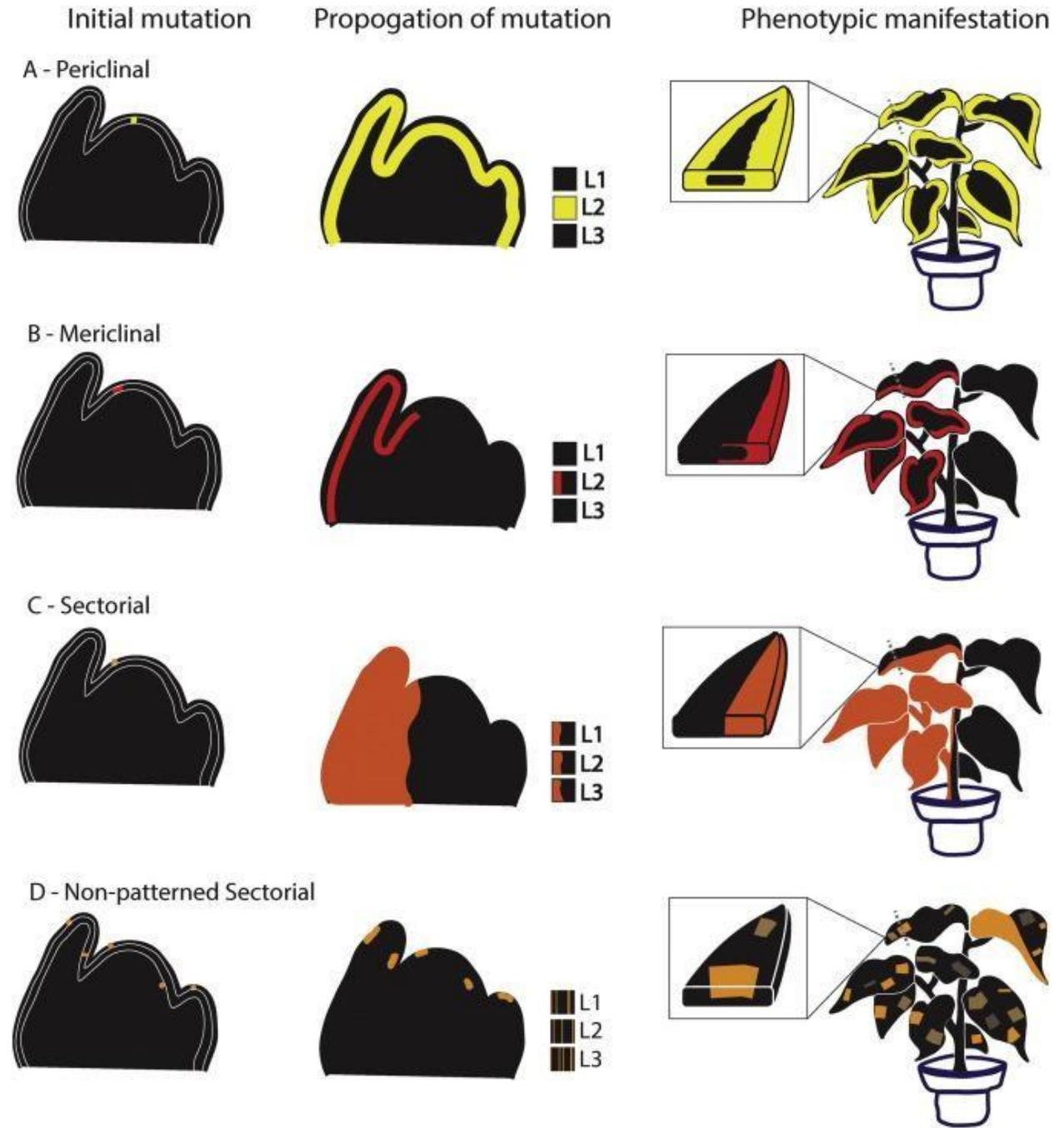
- **Le chimérisme**

- Chimère péricline: présente dans toute les cellules d'un tissu (épiderme, sous-épiderme...)
- Chimère sectorielle: se limite à un secteur du méristème et au organes dérivés
- Méricline: se limite à un secteur d'un tissu unique

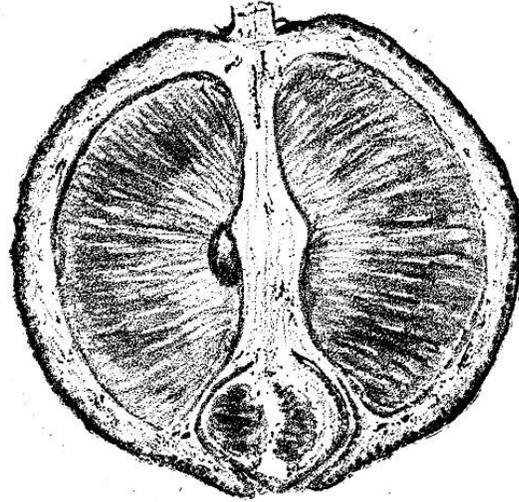


# La sélection clonale

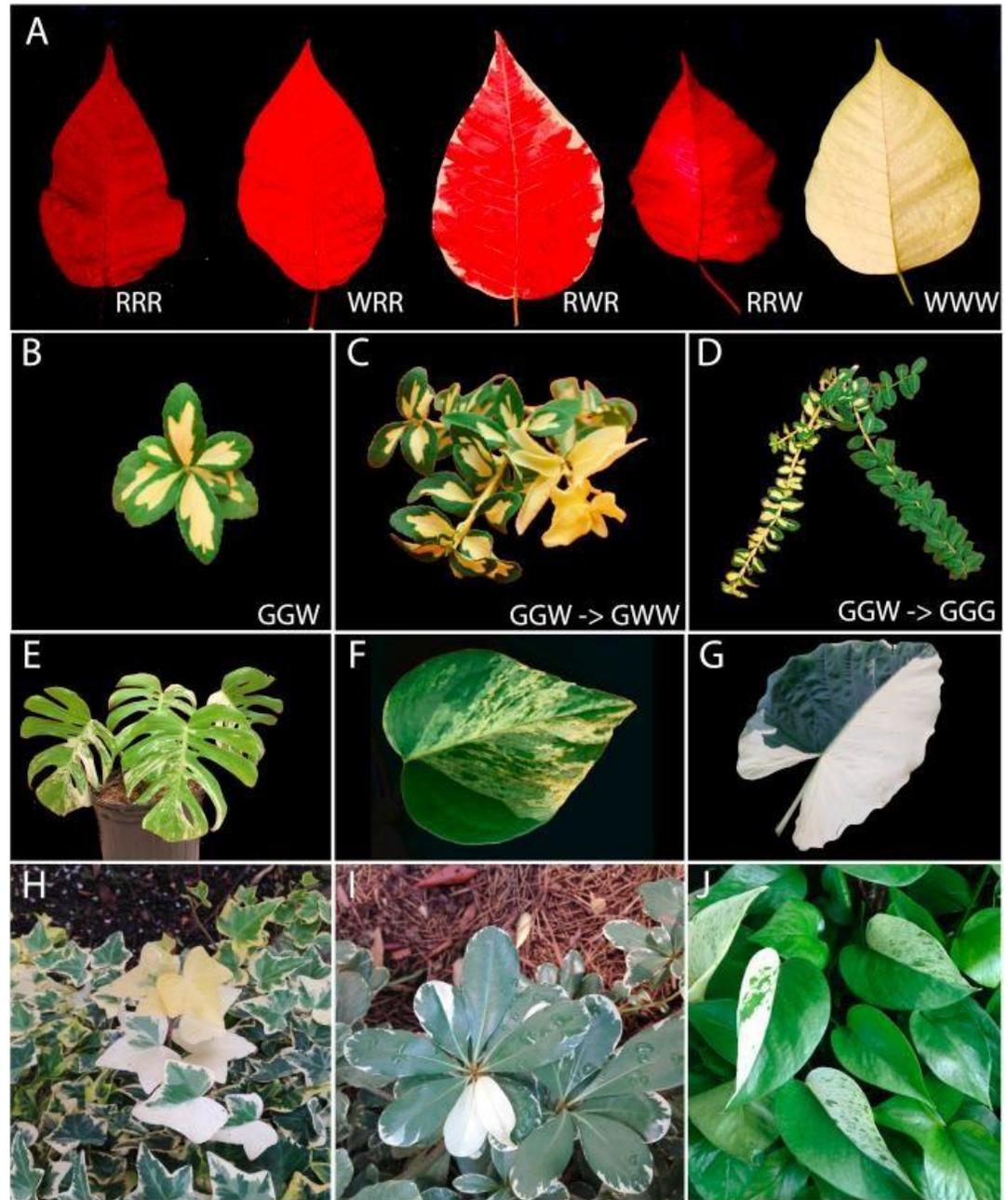
## Chimérisme



# Chimérisme



Thomson Navel, Washington Navel



Chimères ornementales

# La sélection clonale

- Méthodes de sélection clonal:

1. Sélection clonal pour l'assainissement d'une variété existante

- Criblage/sélection
- Assainissement par culture in vitro associée ou non au traitement thermique ou chimique

2. Sélection clonal pour la création d'une nouvelle variété

- Sélection sur une variabilité existante
- Création d'une nouvelle variabilité
  - Croisement
  - Mutagenèse
  - Sélection in vitro: variation somaclonale