



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire annuelle Biodiversité et écosystèmes

Les interactions plantes/pollinisateurs : hier, aujourd'hui, demain

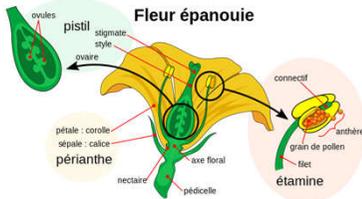
Emmanuelle PORCHER



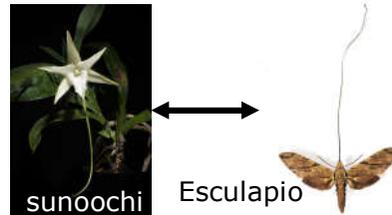
Photos : Didier51 - Spipoll

Programme général du cours

1. Reproduction des plantes

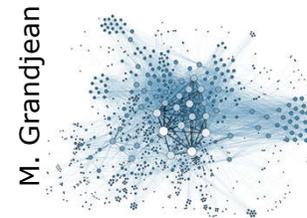


2. Coévolution plantes/pollinisateurs



Mathilde Dufaÿ

3. Réseaux d'interactions



Colin Fontaine

4. Comment mesurer les changements de biodiversité ?



Anne Dozières

8. Conservation



Hughes Mouret

7. Agriculture



Clélia Sirami

6. Changements des pollinisateurs



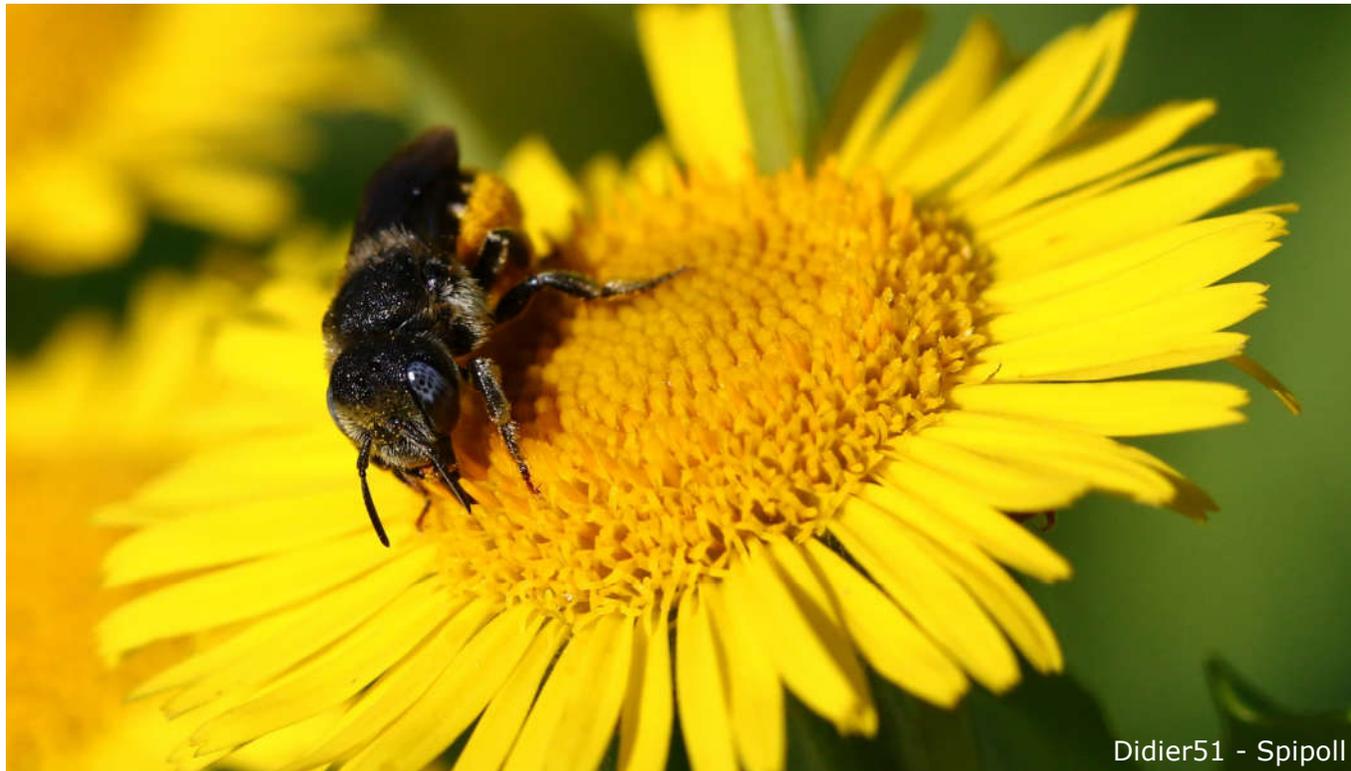
Nicolas Deguines

5. Changements des plantes



Jonathan Lenoir

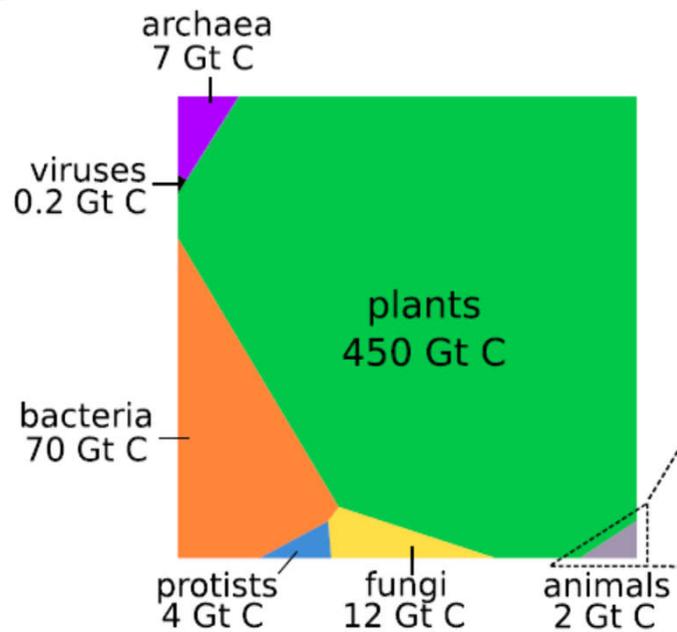
La reproduction des plantes à fleurs



Didier51 - Spipoll

Pourquoi s'intéresser aux plantes à fleurs ?

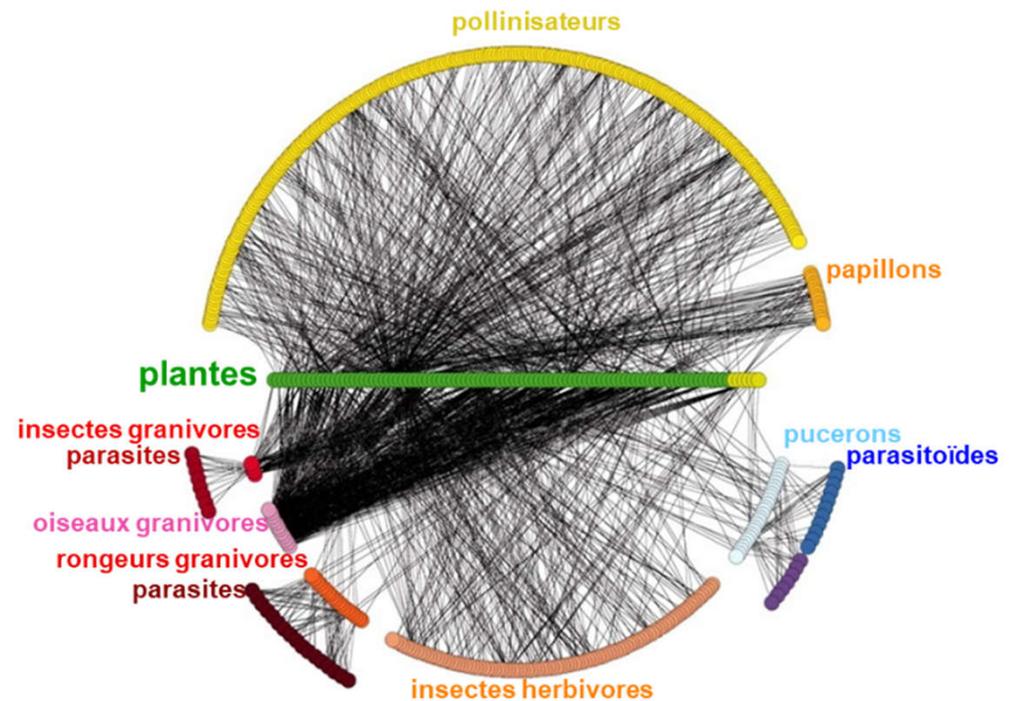
- Place centrale sur la planète



- Rôle dans le stockage du carbone et dans le climat

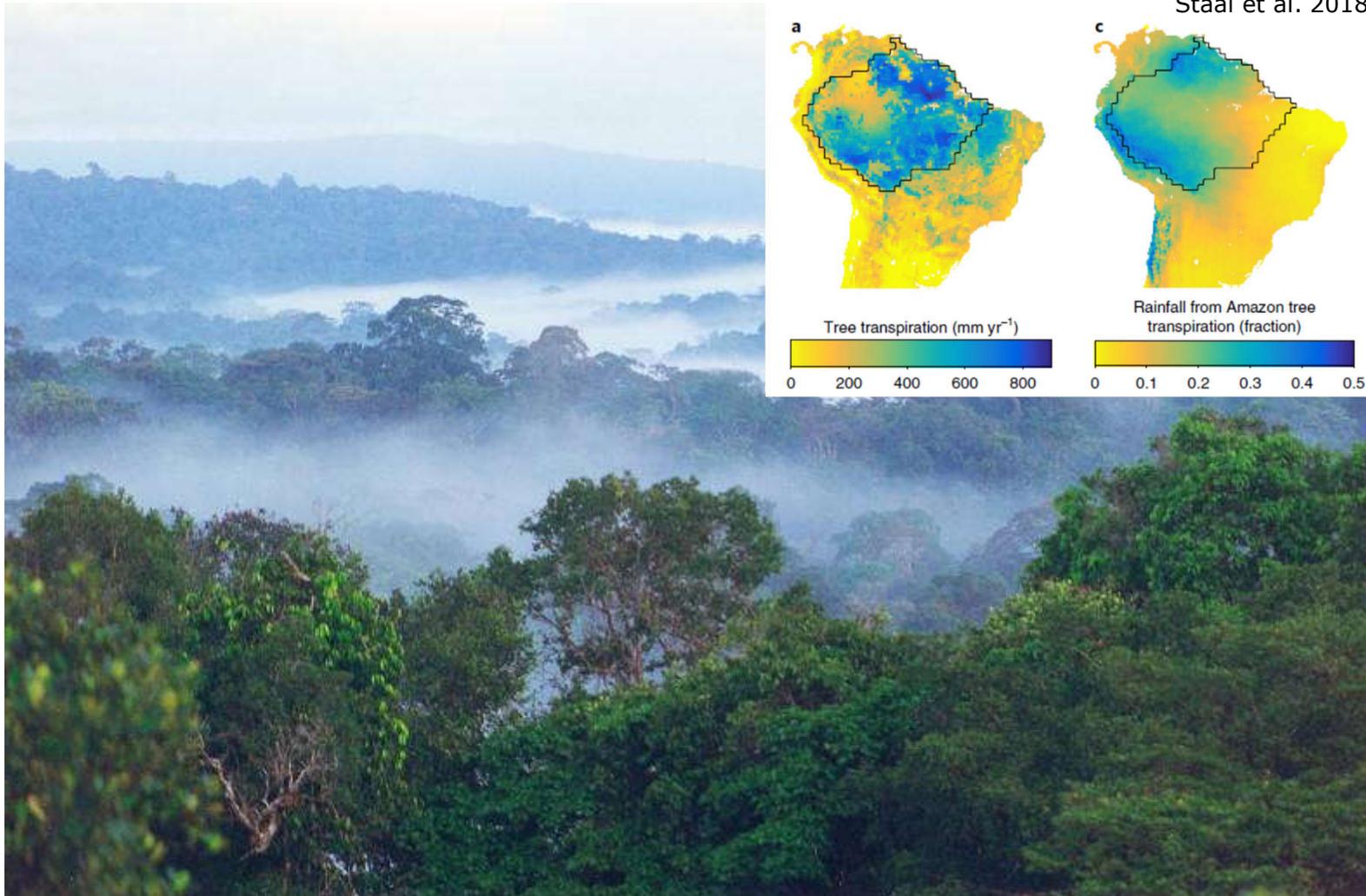
Bar-On et al. 2018

- A la base de la plupart des chaînes alimentaires terrestres



Pocock et al. 2012

Couplage avec le climat : exemple de la forêt amazonienne



5

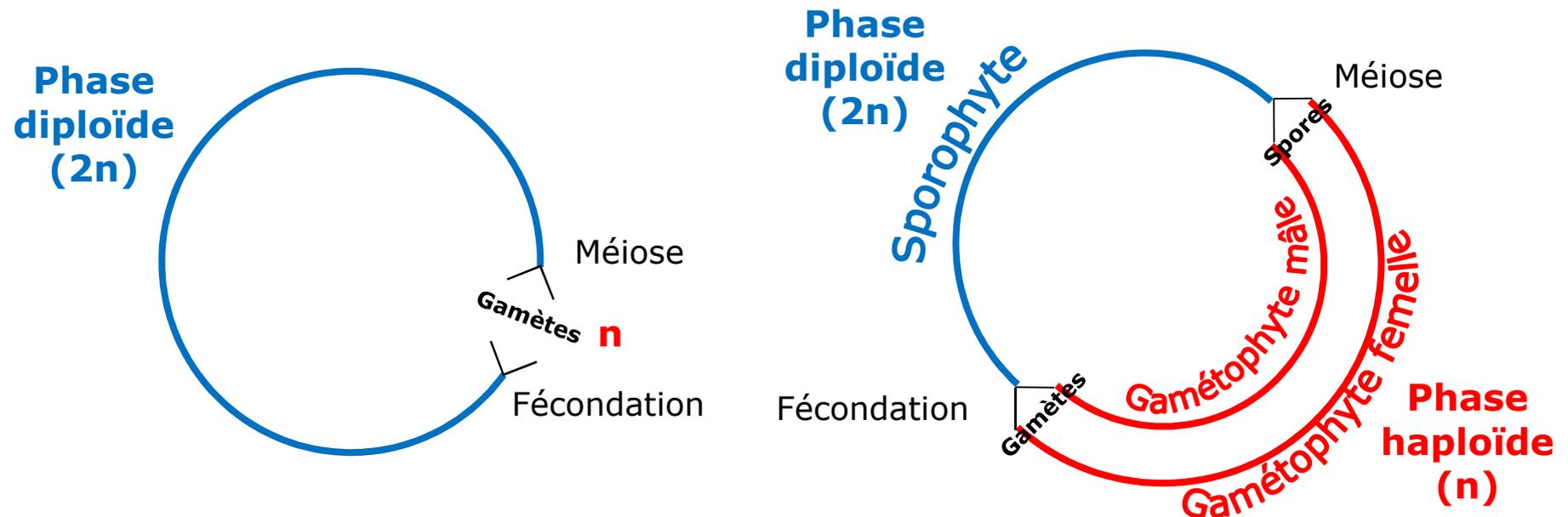
Visualisation : <https://www.youtube.com/watch?v=4794mgJLTbU>

Comment se reproduisent les plantes ?

- Reproduction = ensemble des processus par lesquels les individus engendrent de nouveaux individus
 - Reproduction sexuée (= impliquant la rencontre et la fusion de cellules sexuelles) vs. asexuée ou clonale

Chez les animaux, cycle diplophasique

Chez les plantes, cycle haplo-diplophasique



Sporophytes et gamétophytes chez les plantes

□ Chez les mousses

- Pied feuillé = gamétophyte

***Polytrichum commune*, mâle**



***Polytrichum commune*, femelle & sporophyte**



□ Chez les fougères

- Pied feuillé = sporophyte

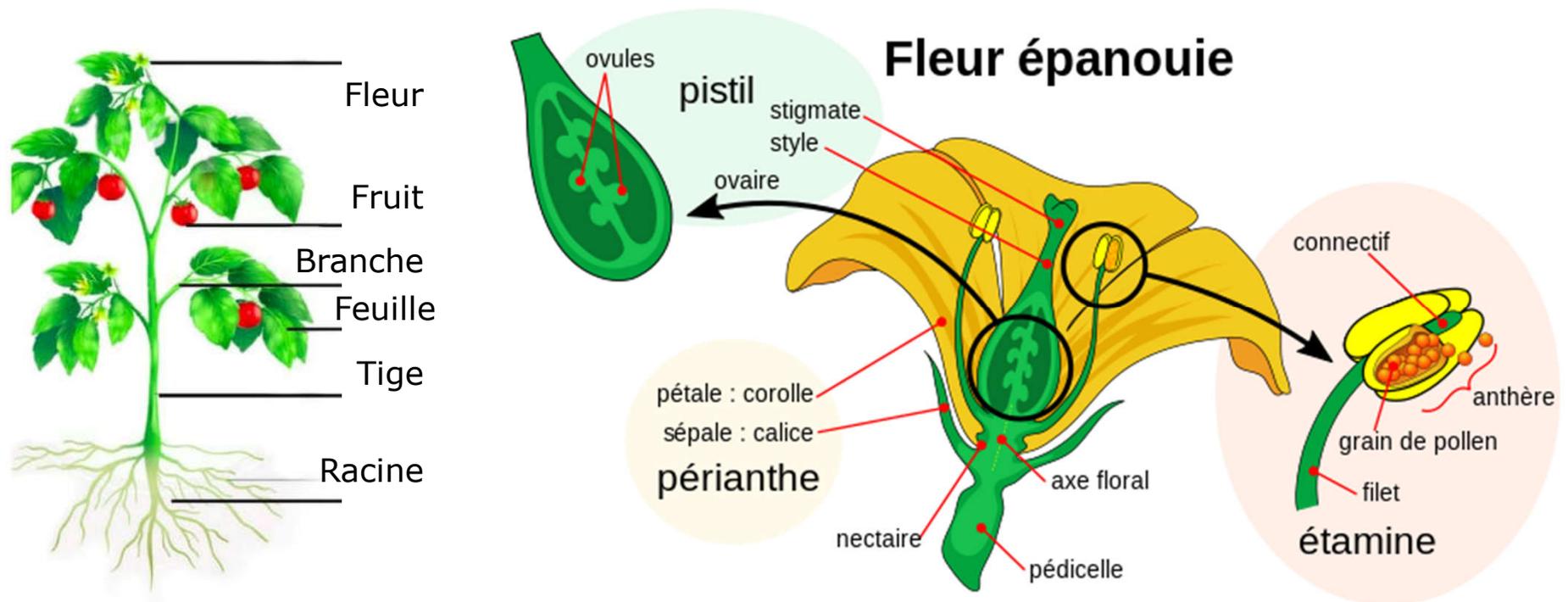


- Gamétophyte = prothalle



Sporophytes et gamétophytes chez les plantes

- Chez les angiospermes (plantes à fleurs)
 - Pied feuillé = sporophyte



Qu'est-ce qu'une plante à fleurs ?

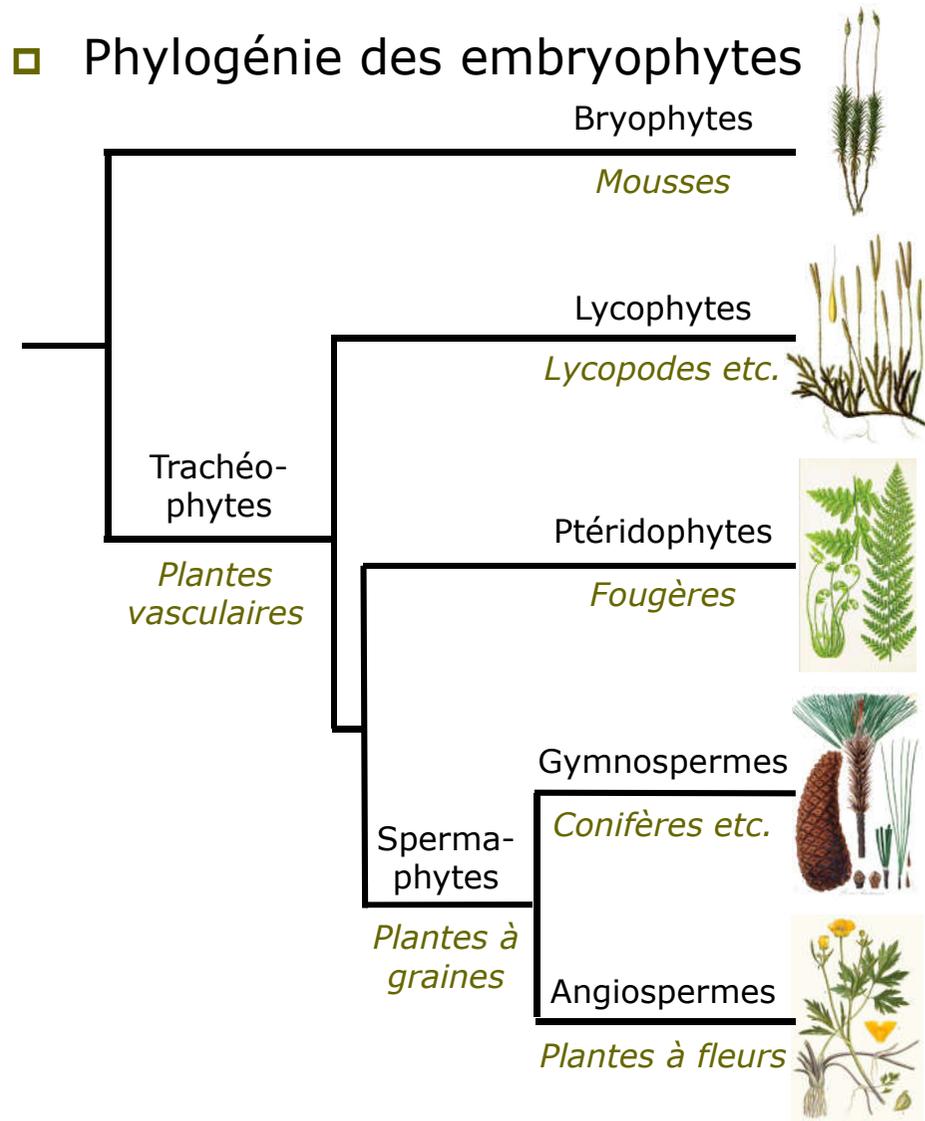
□ Plantes vertes

- Algues vertes + embryophytes (plantes « terrestres »)

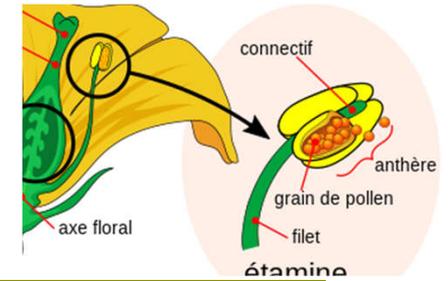
□ Plantes à fleurs :

- Vasculaires
- Avec l'embryon protégé dans un ovule (⇒ graine)
- Avec la graine protégée dans un fruit

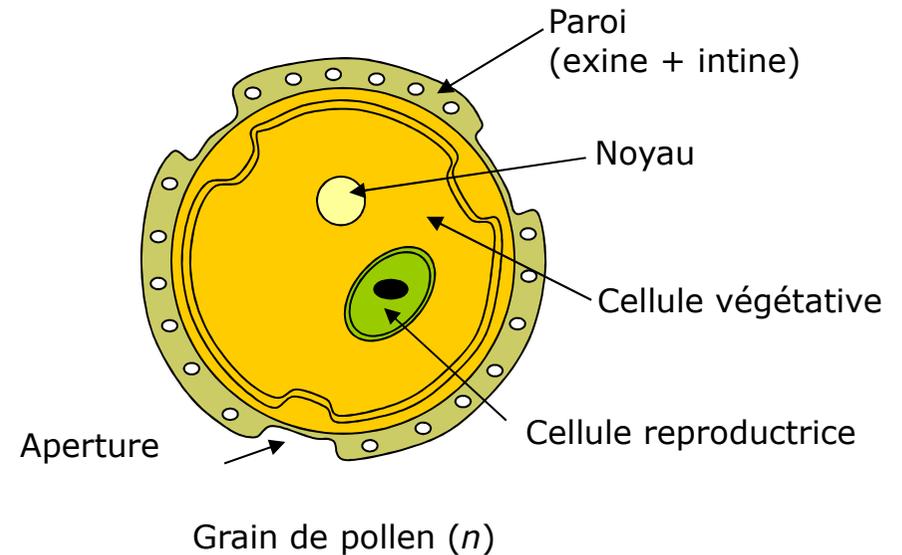
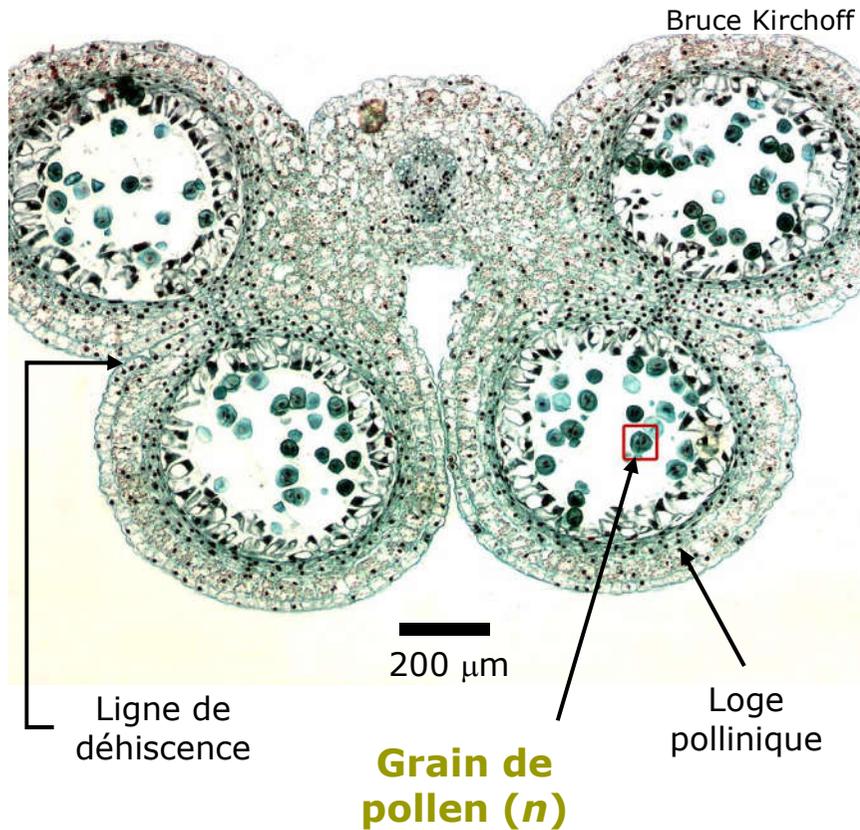
□ Phylogénie des embryophytes



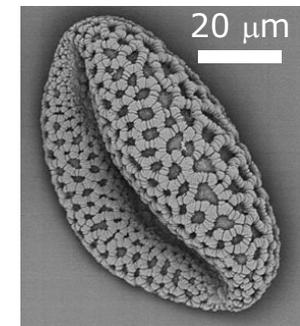
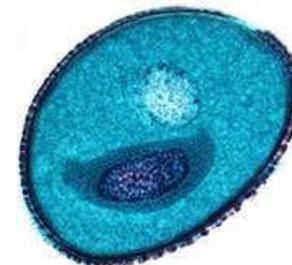
Où sont les gamétophytes ?



▣ Le gamétophyte mâle = le grain de pollen



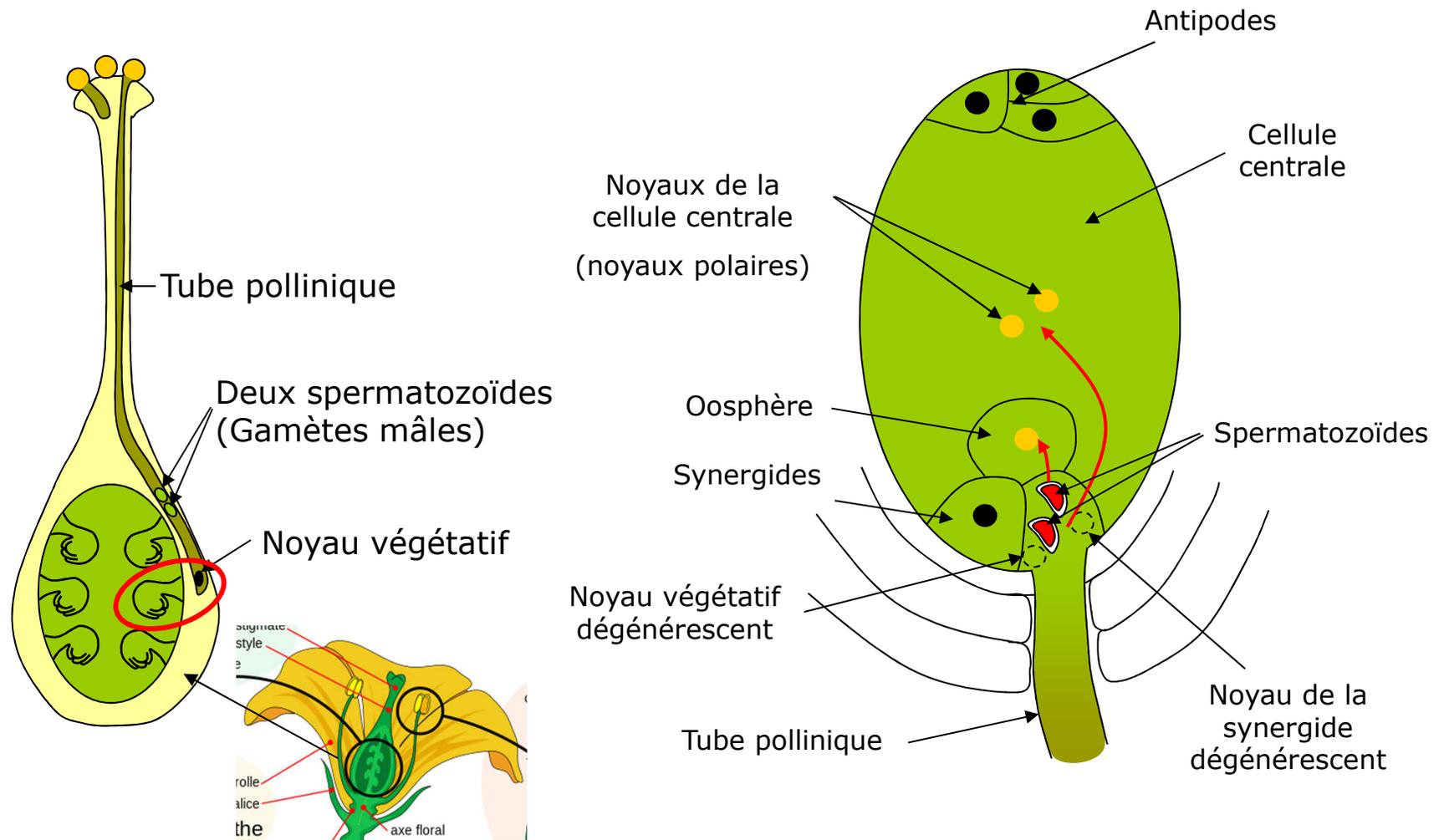
Grain de pollen de Lis



Section d'une jeune anthère de Lis

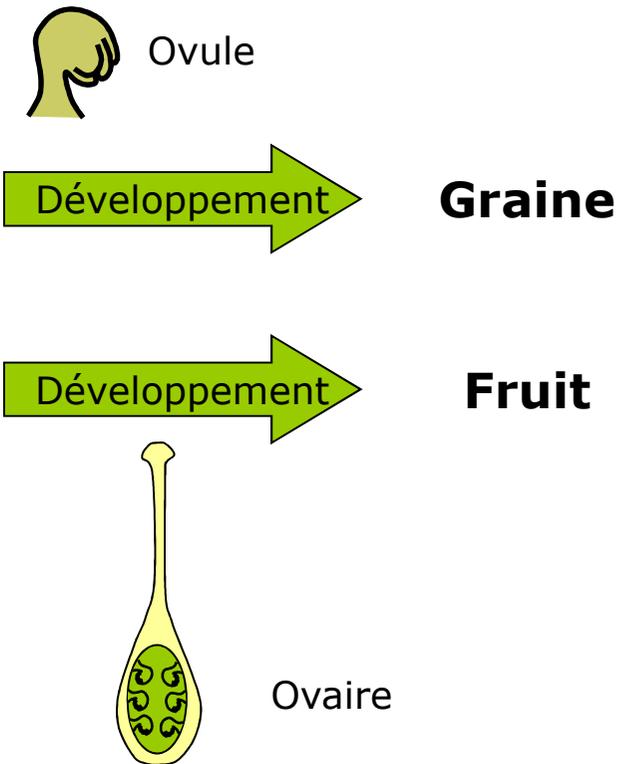
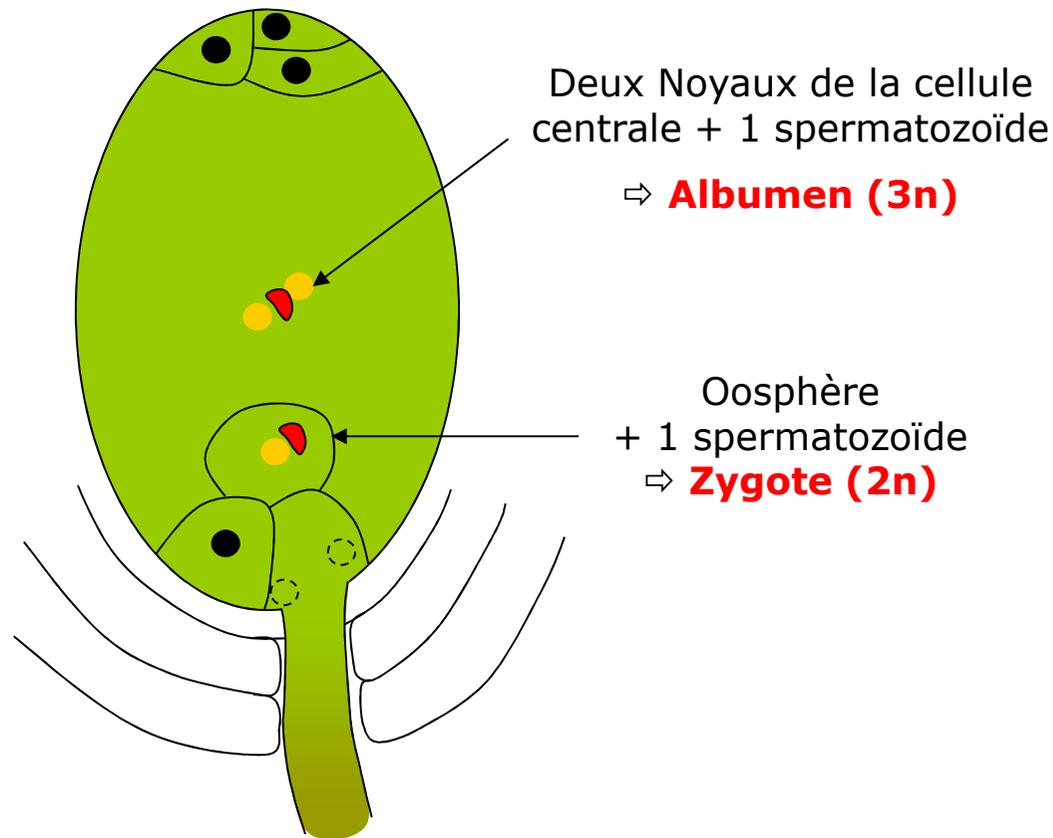
La double fécondation des Angiospermes

□ Double fécondation dans l'ovule

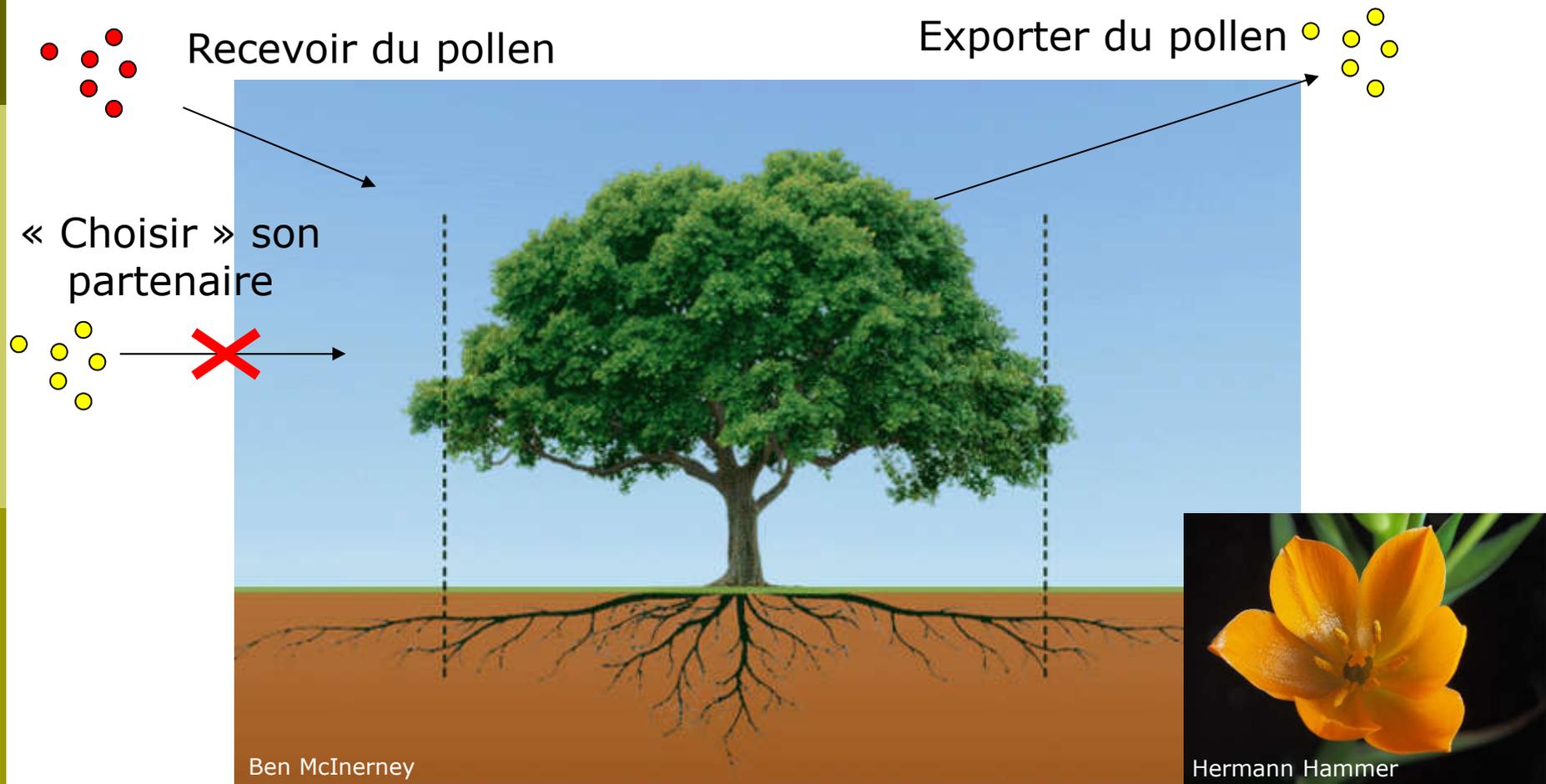


La double fécondation des Angiospermes

□ Devenir de l'ovule fécondé



Les végétaux sont immobiles



Importance des vecteurs de pollinisation pour la reproduction

Ornithogalum dubium

Vecteurs physiques : pollinisation abiotique

- ~ 12% des espèces de plantes : gymnospermes, graminées, cypéracées, joncacées...
- Par le vent (anémogamie) ou l'eau (hydrogamie)
- Fleurs discrètes, sans parfum ni nectar



Plantago lanceolata



Poa sp.



Zea mays



Posidonia sp.

- Étamines exposées au vent, stigmates plumeux

Pollinisation abiotique

- ❑ Grande quantité de pollen, petits grains, lisses
- ❑ Pollen souvent allergène



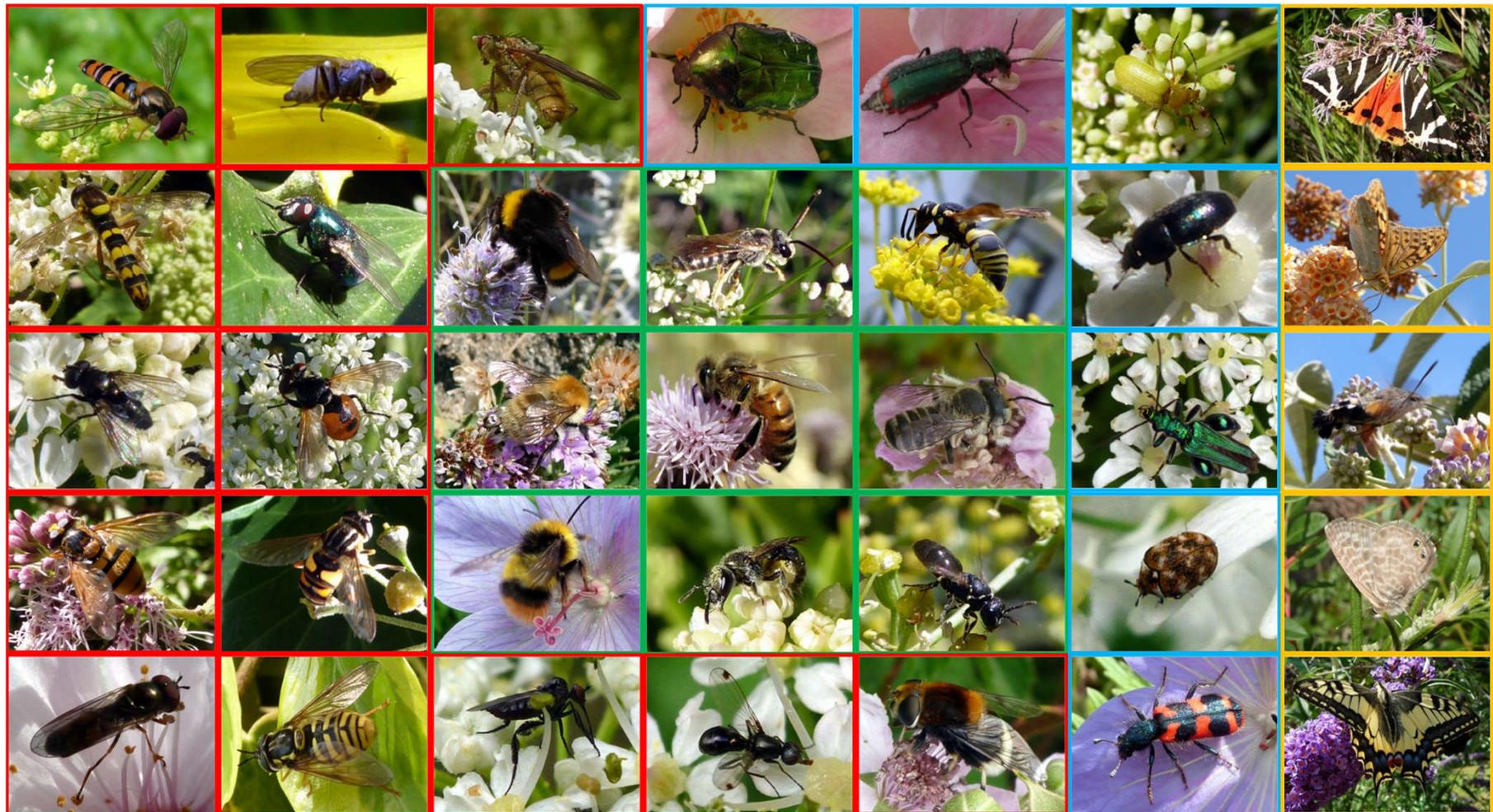
Bernard de Go Mars



Famartin

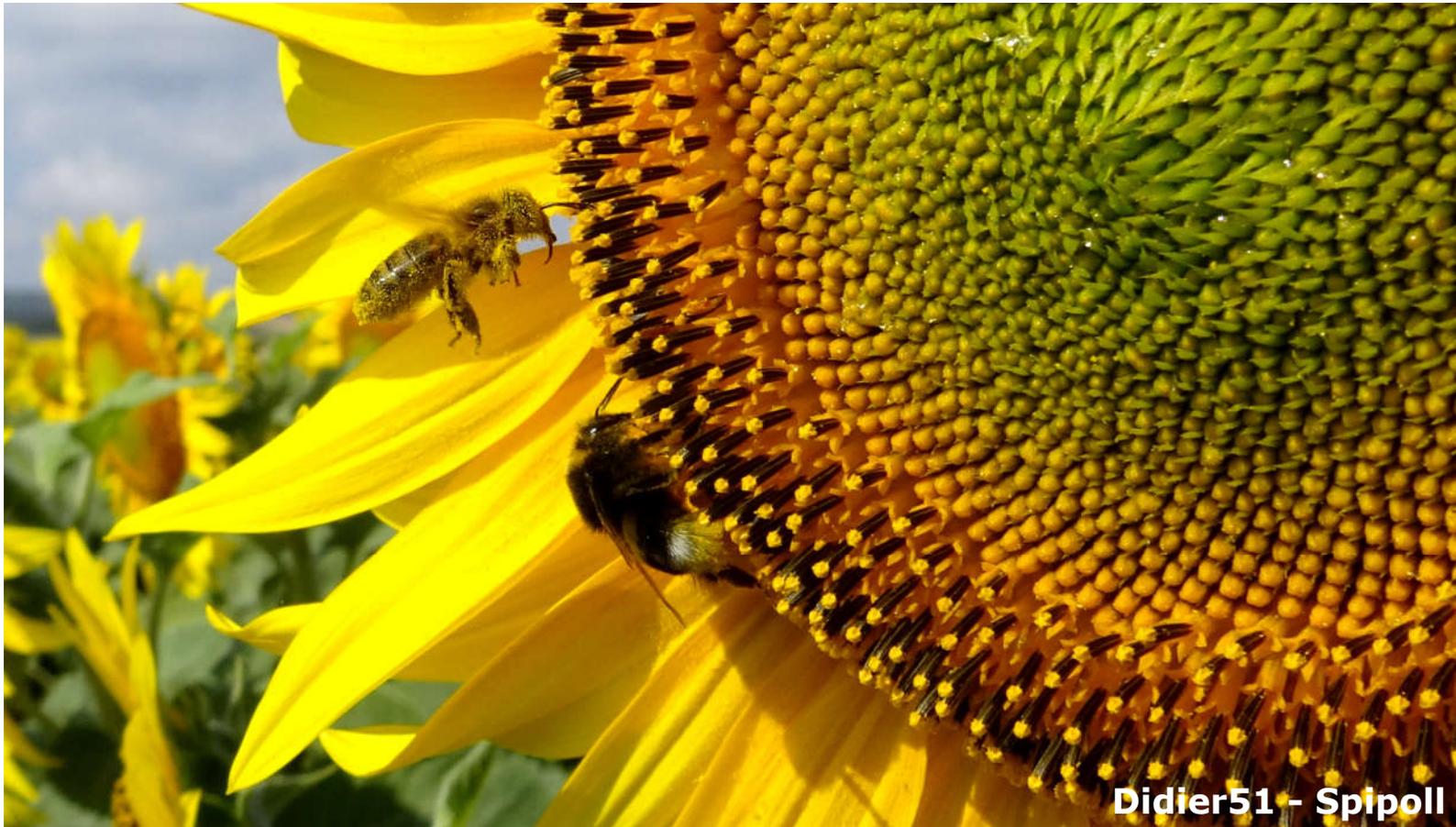
Pollinisation par les animaux

- La majorité des plantes à fleurs (80-90%). Voir cours n°2



Conclusion intermédiaire (1)

- Pour leur transport de pollen, les plantes dépendent de vecteurs qu'elles contrôlent peu ou pas : peuvent-elles tout de même choisir leur partenaire pour la reproduction ?



Les systèmes de reproduction

- Caractéristiques influençant le choix du partenaire lors de la reproduction sexuée

- **Animaux**



Monogamie



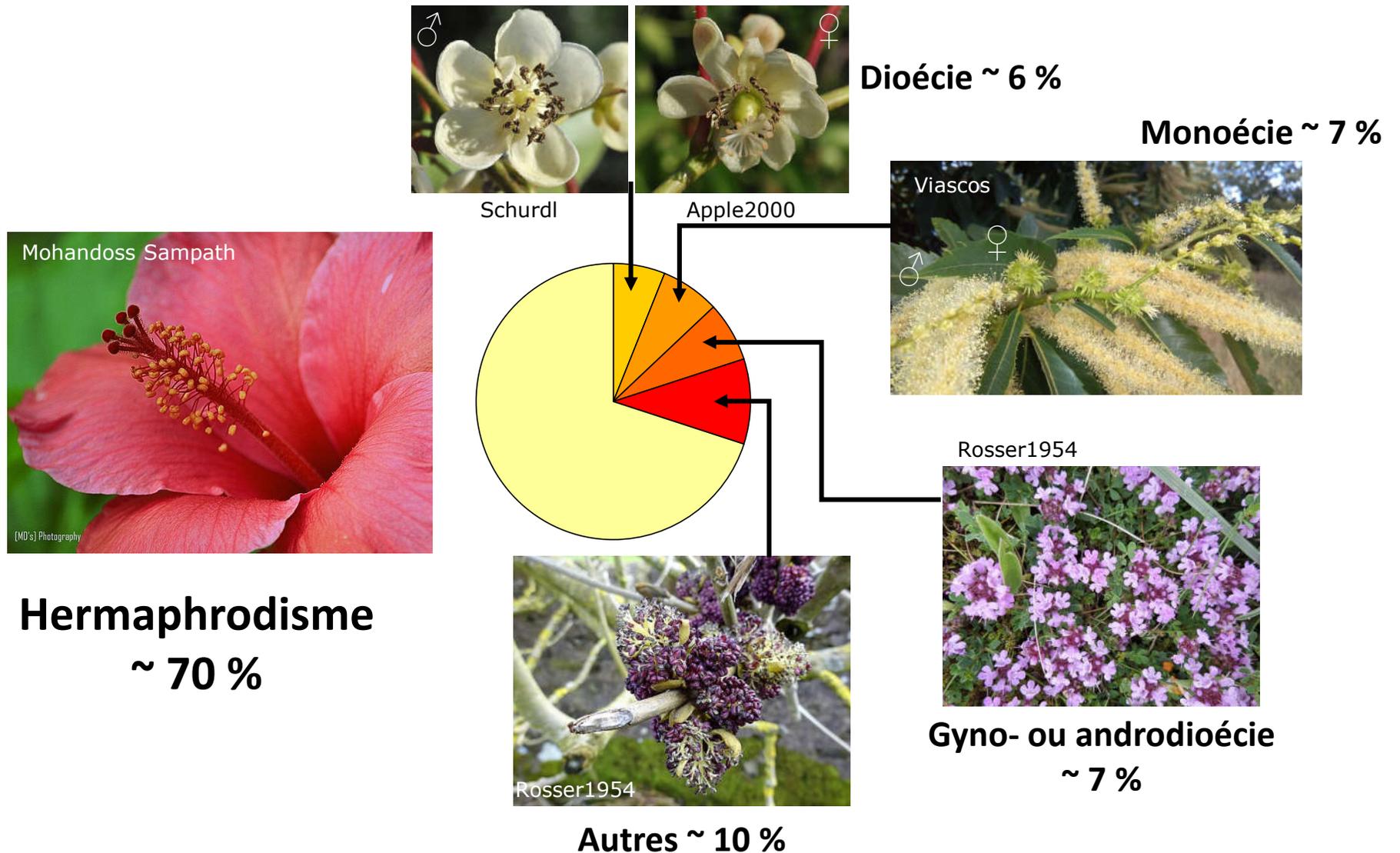
Polygamie

- **Plantes**

- Plusieurs appareils reproducteurs par individu
 - Fonctions ♀/♂
 - ⇒ Distribution des genres (♀/♂)
 - Entre fleurs et entre individus
 - Possibilité d'autofécondation
 - Et mécanismes pour l'éviter
- Importance des vecteurs de pollinisation



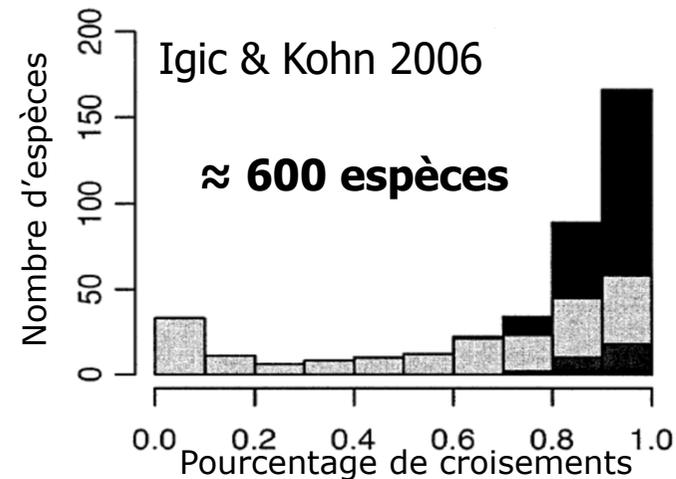
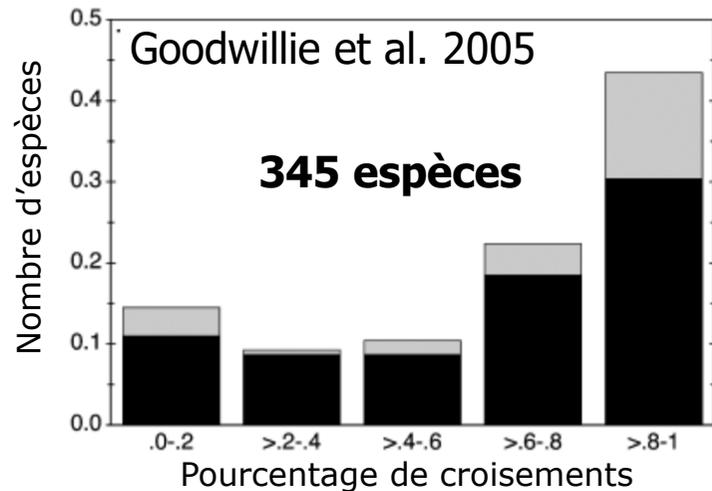
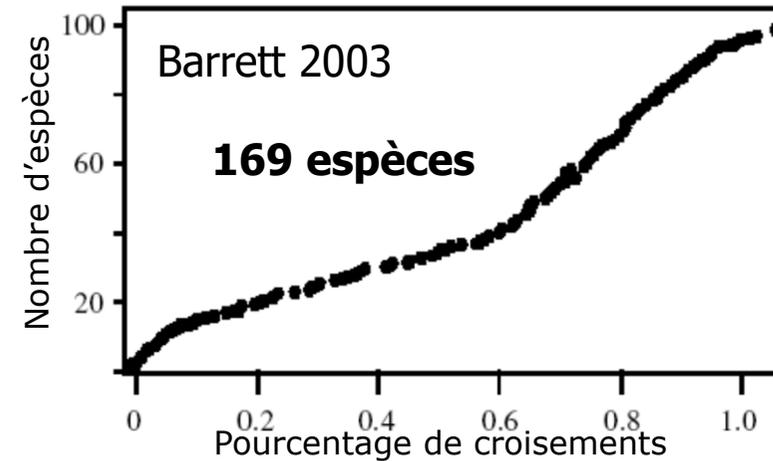
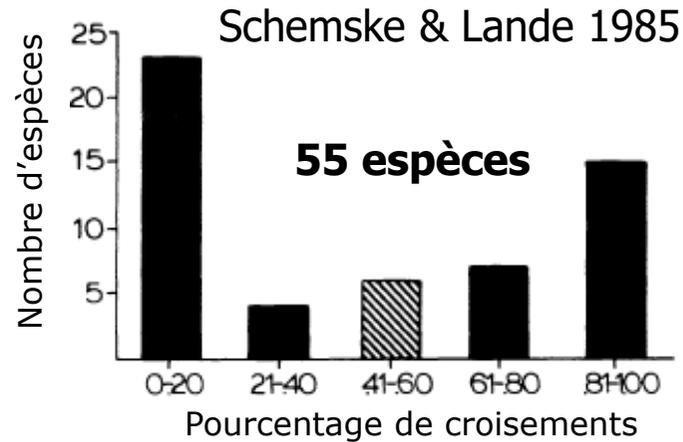
Diversité des systèmes de reproduction chez les Angiospermes



La présence des fonctions mâle et femelle sur une même plante permet l'autofécondation



Distribution des taux d'allofécondation dans les populations naturelles



Comment comprendre cette distribution des taux d'allo/autofécondation?

Les différents types de questions en biologie

		Deux cibles d'explications	
		Développement /histoire	Un moment arrêté dans le temps
Deux types d'explications	Causes proches	<p><u>Ontogénie</u></p> <p>Comment une caractéristique se met en place lors du développement d'un individu ?</p>	<p><u>Mécanismes</u></p> <p>Quelle est la structure de la caractéristique, comment fonctionne-t-elle ?</p>
	Causes évolutives (« ultimes »)	<p><u>Phylogénie</u></p> <p>Quelle est l'histoire évolutive de la caractéristique ?</p>	<p><u>Interprétation adaptative</u></p> <p>Comment la caractéristique interagit avec l'environnement pour influencer la survie et la reproduction ?</p>

Mécanismes : quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

□ Favoriser l'autofécondation



Lamium amplexicaule

Fleurs fermées : Cléistogamie



Brassica rapa

Séparation spatiale

Herkogamie réduite

Mécanismes : quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

- Éviter l'autofécondation \Rightarrow Séparer les fonctions mâle et femelle
 - Au sein d'une même fleur



Nadiatalent
Dans le temps : dichogamie
Aeonium undulatum

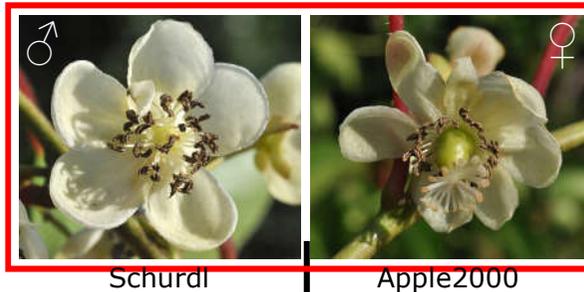


[MD's] Photography
Dans l'espace : herkogamie
Hibiscus sp.

- Entre fleurs ou individus \Rightarrow Diversité des systèmes de reproduction

Répartition des genres empêchant l'autofécondation

Pas d'autofécondation

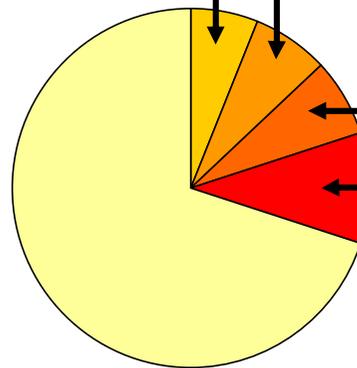


Dioécie

Monoécie



Hermaphrodisme



Pas d'autofécondation au sein d'une fleur



Gyno- ou androdioécie

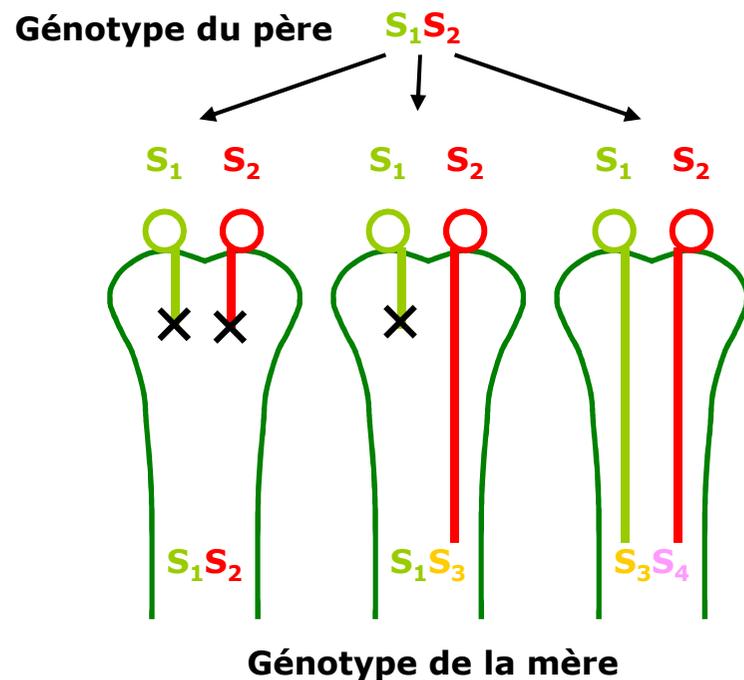


Autres

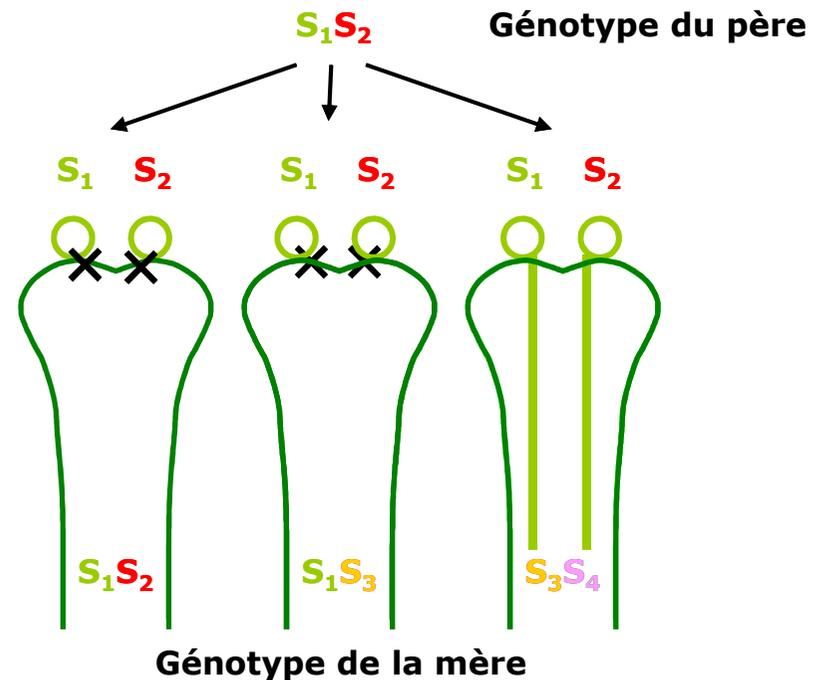
Quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

- Éviter l'autofécondation \Rightarrow Auto-incompatibilité
 - Capacité d'une plante à reconnaître et rejeter son propre pollen

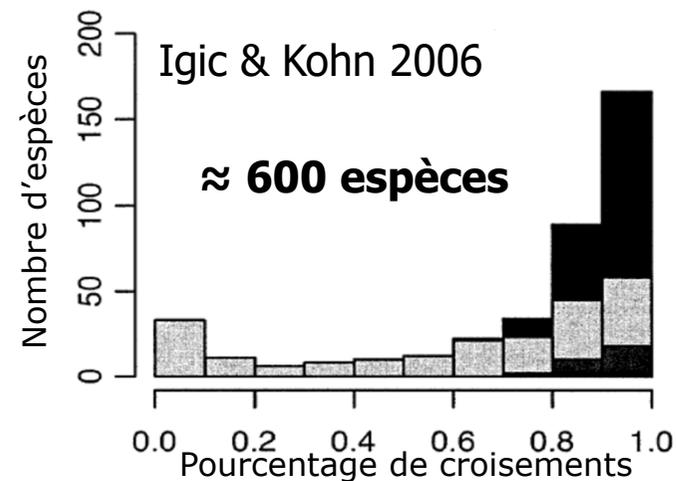
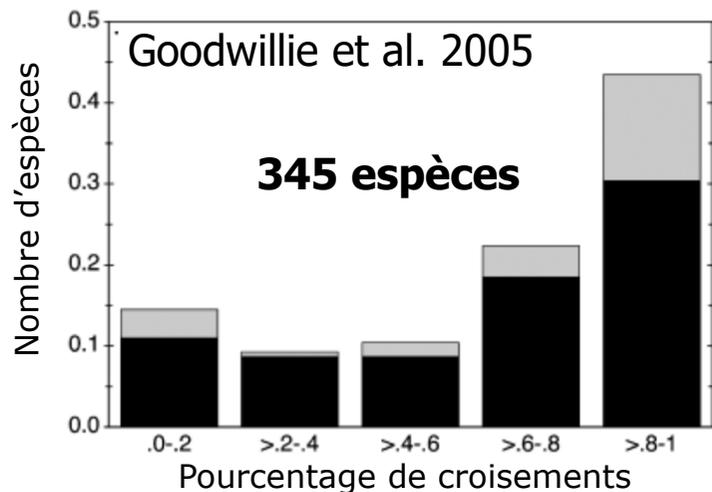
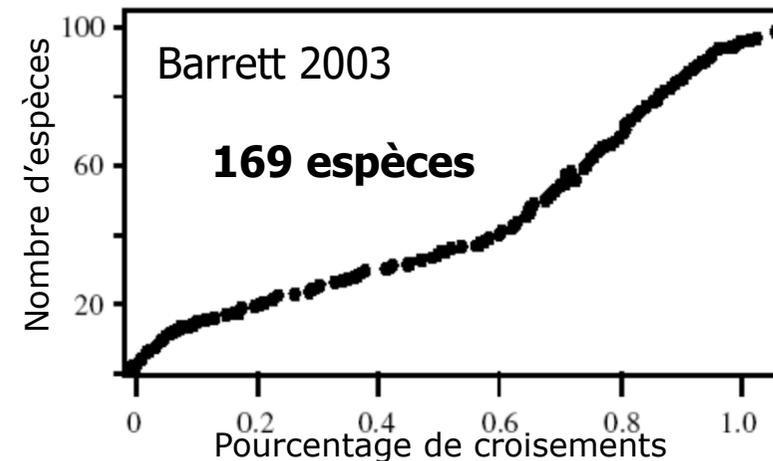
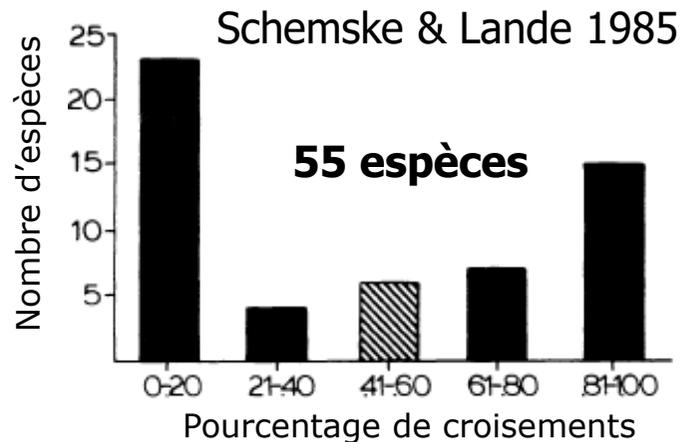
Auto-incompatibilité gamétophytique



Auto-incompatibilité sporophytique



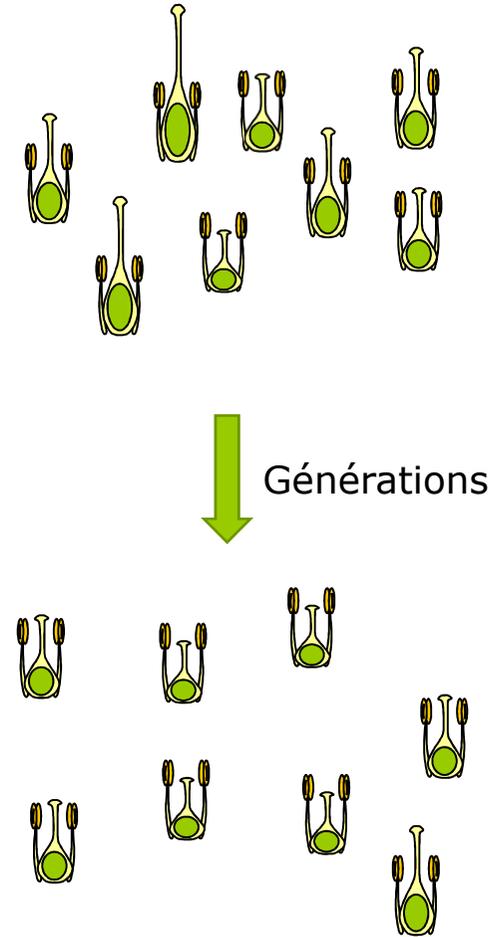
Retour à la distribution des taux d'allofécondation dans les populations



Quelle signification adaptative ? Quelles les forces favorisent l'évolution des caractéristiques permettant ou empêchant l'autofécondation ?

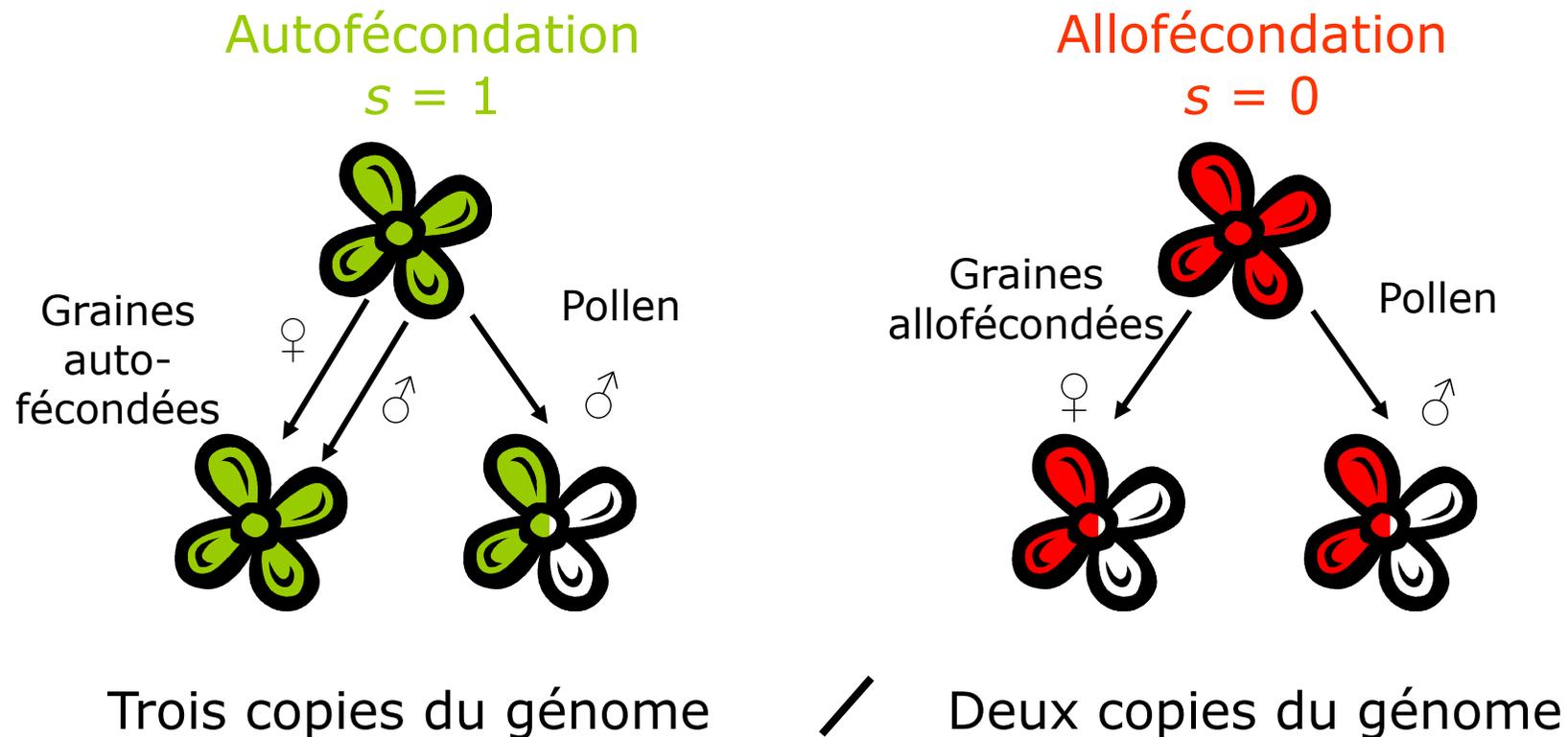
Le principe de la sélection naturelle

- Dans les populations naturelles, tous les individus ne sont pas identiques
 - Exemple : distance stigmate-anthères
- Ces différentes valeurs de caractères peuvent influencer la capacité des individus à croître, survivre, se reproduire (~valeur sélective)
- Si cette variabilité est transmise d'une génération à l'autre, alors la composition de la population change au cours du temps, au bénéfice des caractéristiques les plus sélectionnées



Avantage automatique de l'autofécondation

- Toutes choses égales par ailleurs :



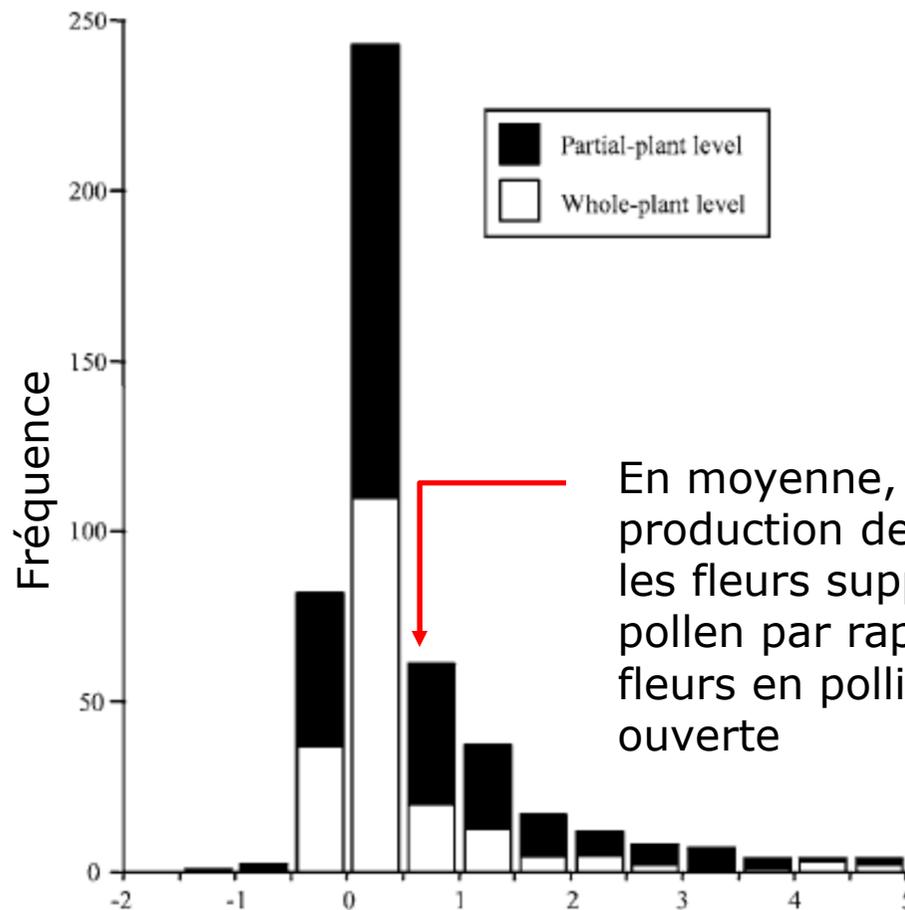
- Avantage de **50 %** pour les individus autoféconds

Limitation de la reproduction par le pollen disponible

- Pour beaucoup d'espèces



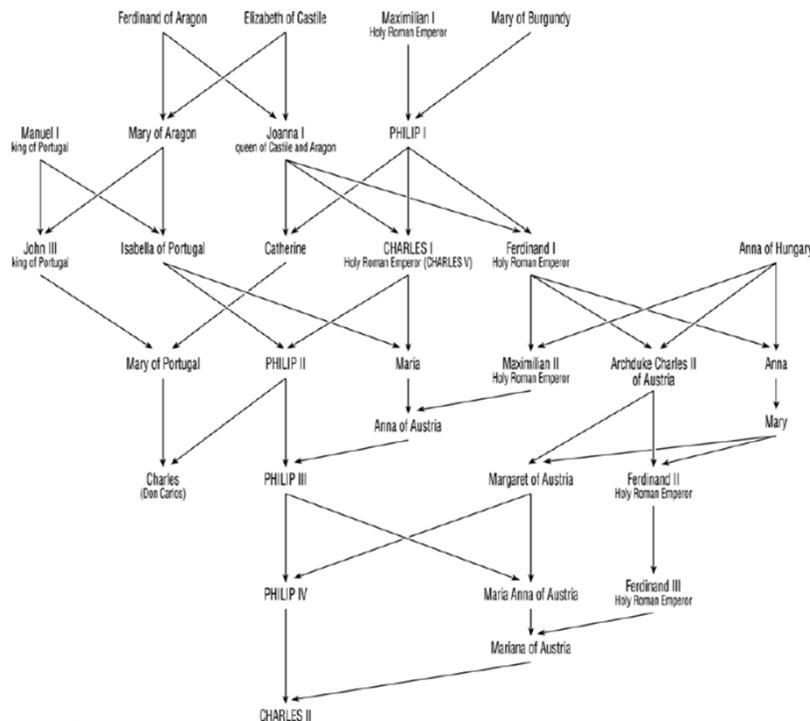
⇒ L'autofécondation permet une assurance de reproduction



En moyenne, **+ 75%** de production de graines dans les fleurs supplémentées en pollen par rapport aux fleurs en pollinisation ouverte

Mais désavantage de l'autofécondation

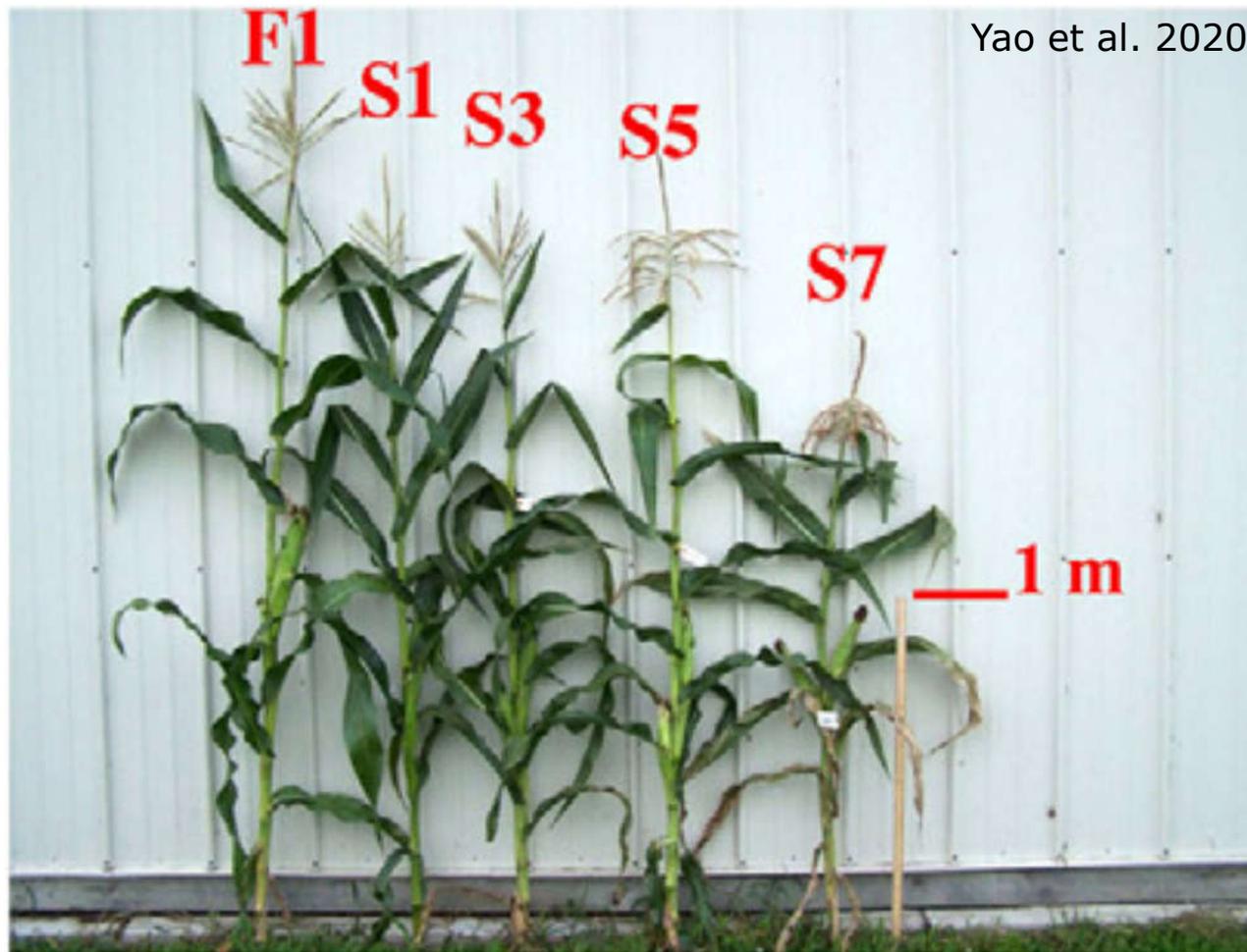
- ❑ **Dépression de consanguinité** : diminution de valeur sélective des individus issus de croisements entre apparentés
- ❑ Existe dans toutes les populations



Charles II, roi d'Espagne
par Juan Carreño de Miranda

Dépression de consanguinité chez les plantes

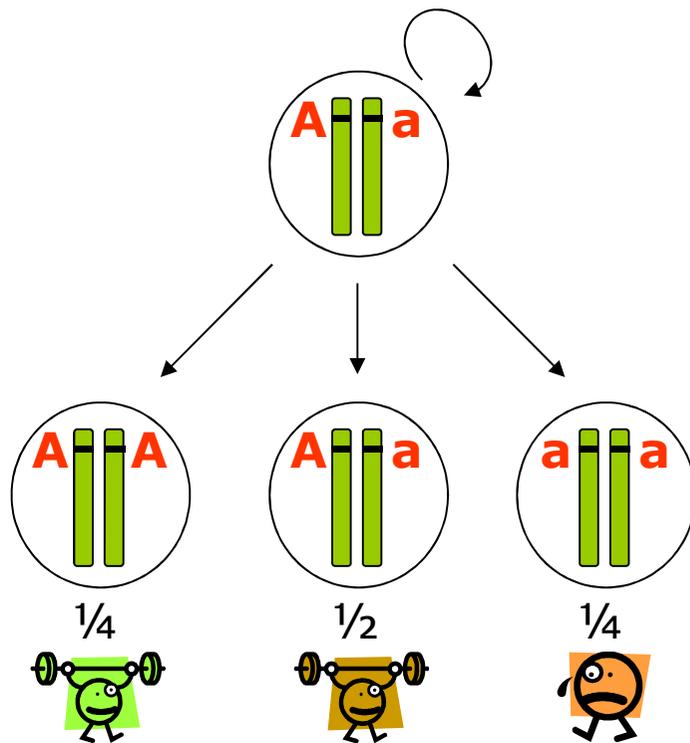
- Autofécondation = consanguinité extrême



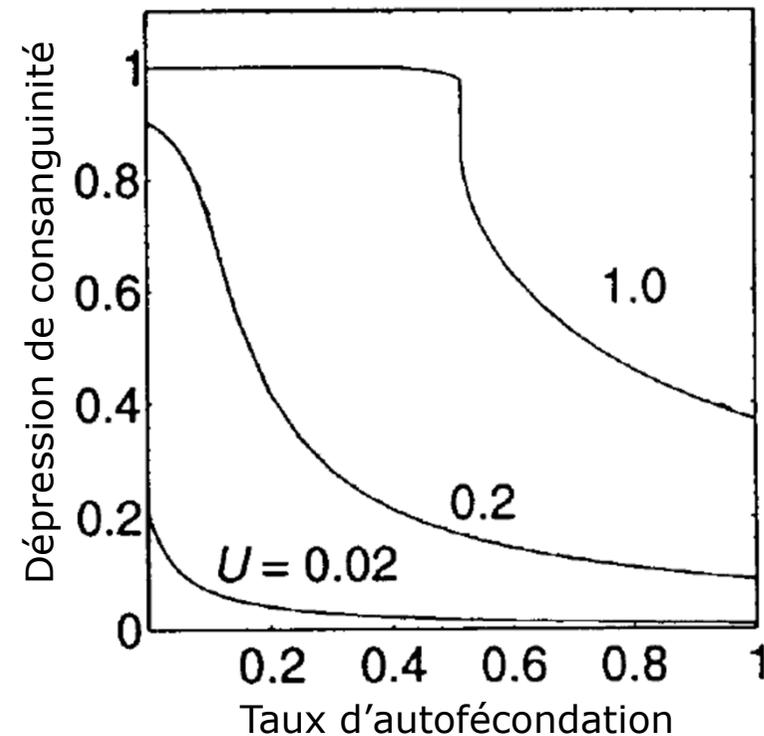
Mécanismes de la dépression de consanguinité

- Mutations fortement délétères, quasi-récessives

$$AA \approx Aa \gg aa$$



- « Purge » possible de la dépression de consanguinité

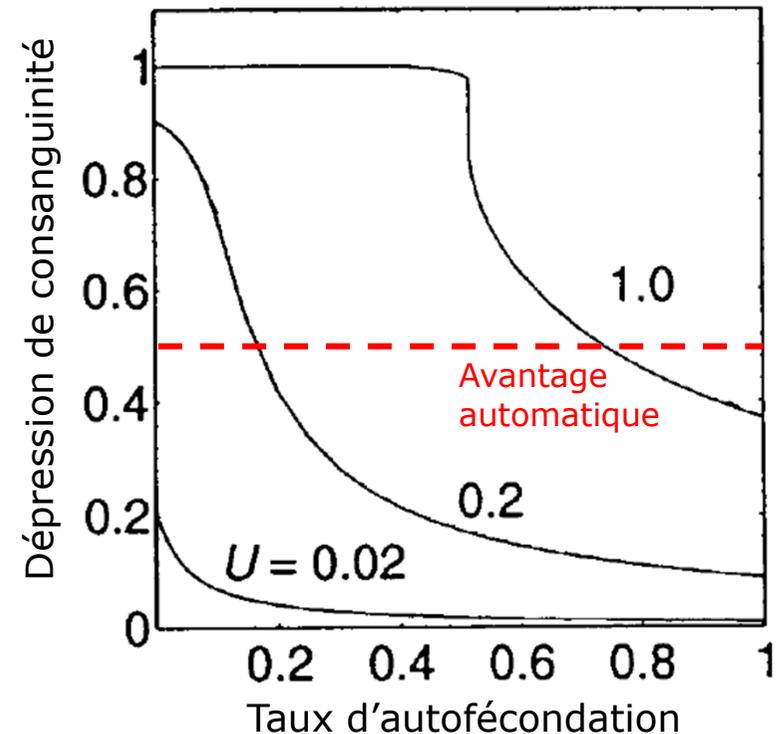


Interprétation adaptative : récapitulatif

- Avantages de l'autofécondation :
 - Avantage automatique
 - Assurance de reproduction
- Inconvénients
 - Dépression de consanguinité

- Taux évolutivement stables
 - allofécondation **ou** autofécondation
 - « Paradoxe » ou « énigme » des systèmes de reproduction mixtes

- Prédictions évolutives



Quels autres facteurs influencent les taux d'autofécondation ?

- Ecologie!
 - Ecologie de la pollinisation



- Limitation en pollen et assurance de reproduction
- Perte de pollen
- Contraintes imposées par les pollinisateurs

Perte de pollen et maintien de systèmes de reproduction mixtes

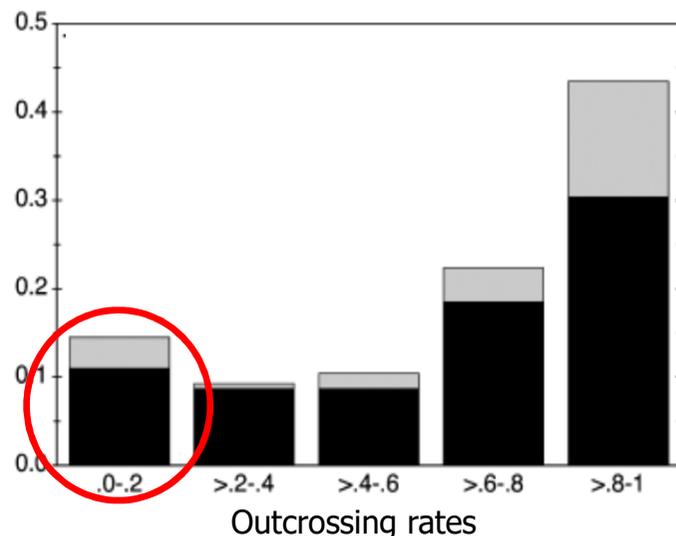
- Modèle d'action de masse pour la fécondation



- L'utilisation de pollen pour l'autofécondation diminue le succès reproducteur mâle dans les croisements
- Modèle d'évolution du taux d'autofécondation incluant:
 - Evolution (purge) de la dépression de consanguinité
 - Perte de pollen
 - Limitation en pollen \Rightarrow Assurance reproductive
- Caractère soumis à sélection = taux d'autofécondation

(Très) bref résumé des résultats

- La perte de pollen permet de maintenir des taux d'autofécondation intermédiaires stables
 - Compromis avantage automatique / diminution du succès reproducteur mâle
- Mais ces taux d'autofécondations évolutivement stables sont toujours proches de 1.



Johnston 1998

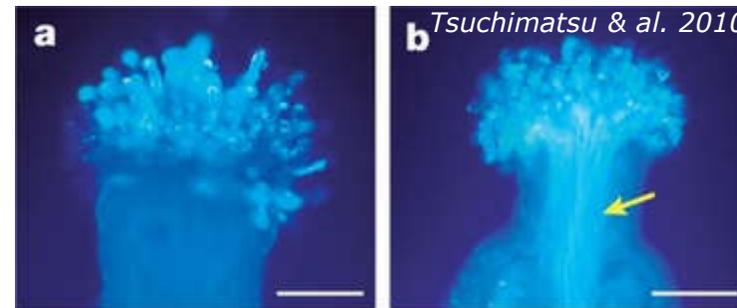
Porcher & Lande 2005

Les pollinisateurs contraignent les systèmes de reproduction

- Dans beaucoup de modèles, caractère sous sélection = taux d'autofécondation ; peut varier librement entre 0 et 1



Cléistogamie (e.g. *Lamium amplexicaule*)



Autoincompatibilité (e.g. Brassicacées)

- Mais les pollinisateurs peuvent contraindre ce taux

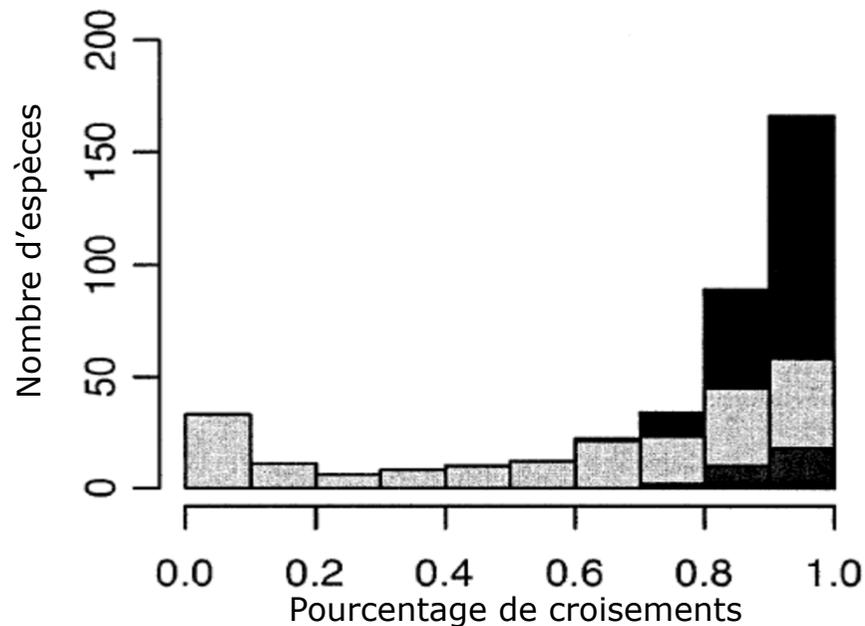
$$s = \frac{\text{Auto pollen}}{\text{Auto pollen} + \text{allo pollen}}$$



- Modèles d'évolution de caractères des plantes influençant le comportement des pollinisateurs et le transport du pollen
 - ⇒ Taux d'autofécondation intermédiaires faibles

Conclusion intermédiaire (2) : un paradoxe, quel paradoxe ?

- Combinaison de modèles génétiques et écologiques
 - ⇨ Taux d'autofécondation intermédiaires stables



Igic & Kohn 2006

- MAIS: En général, dans les modèles l'autofécondation est favorisée
 - Perte facile de l'auto-incompatibilité

Evolution, 59(1), 2005, pp. 46-60

LOSS OF GAMETOPHYTIC SELF-INCOMPATIBILITY WITH EVOLUTION OF INBREEDING DEPRESSION

EMMANUELLE PORCHER^{1,2} AND RUSSELL LANDE^{1,3}

- Les plantes peuvent-elles se passer complètement des pollinisateurs ?

Les plantes à fleurs peuvent aussi se reproduire de façon asexuée (= clonale)

□ Reproduction végétative

- Un nouvel individu croît à partir d'un fragment de la plante mère
- Exemples :



Trio3D

Bouturage

Schlumbergera truncata



Gilles Ayotte

Stolons

Fragaria virginiana



Nadiatalent

Bulbilles

Lilium lancifolium



A. Mascler

Tiges tubérisées

Solanum tuberosum

Reproduction asexuée utilisant les structures de la reproduction sexuée

- Apomixie = développement asexué d'une graine ou d'un embryon sans fécondation



Rubus sp.

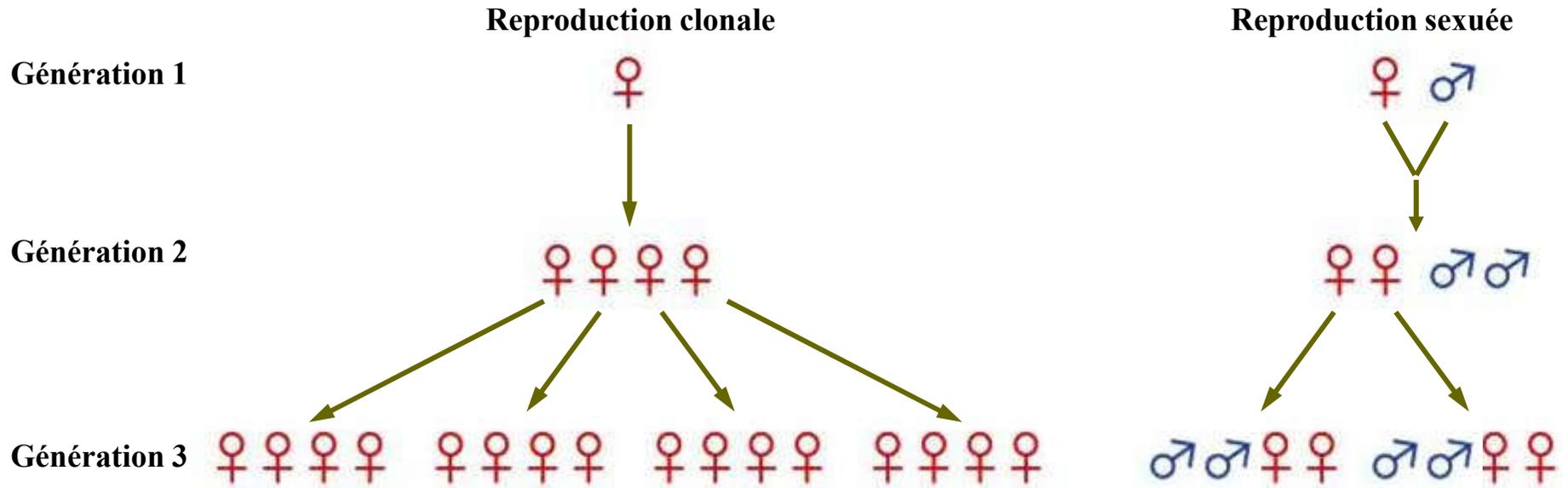


Taraxacum officinale

⇒ Difficultés taxonomiques associées

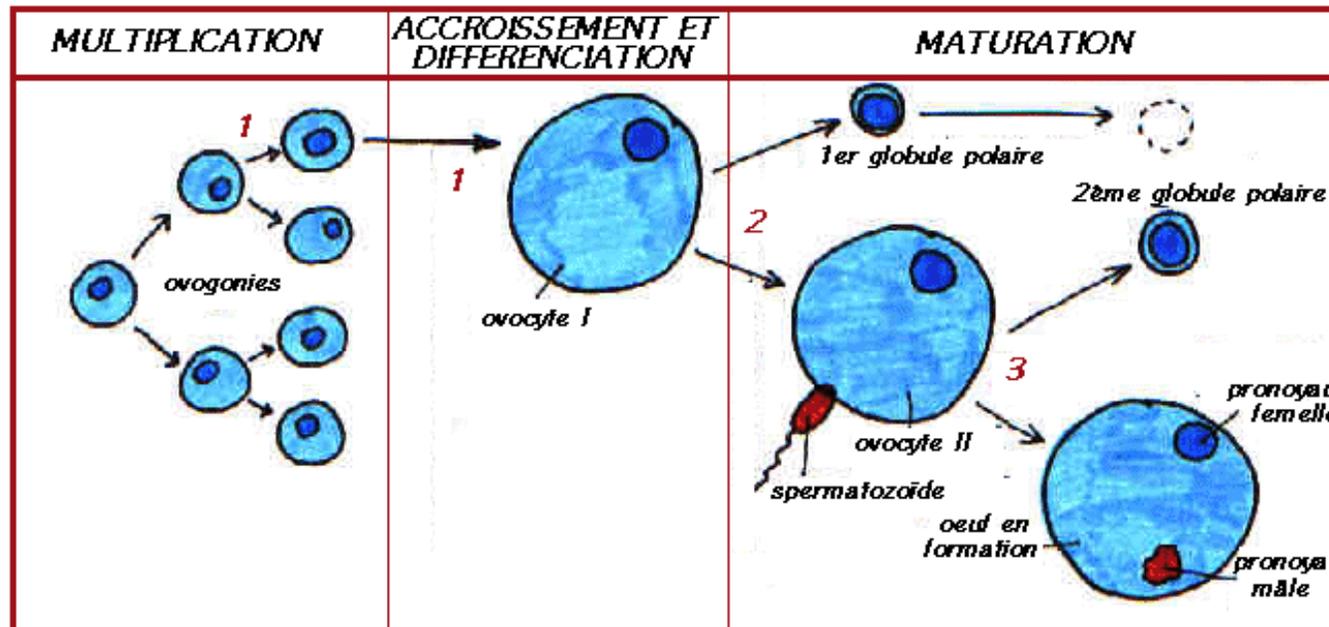
Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

- ❑ Les désavantages du sexe : 1. le coût des mâles



Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

- ❑ Les désavantages du sexe : 2. le coût de la méiose



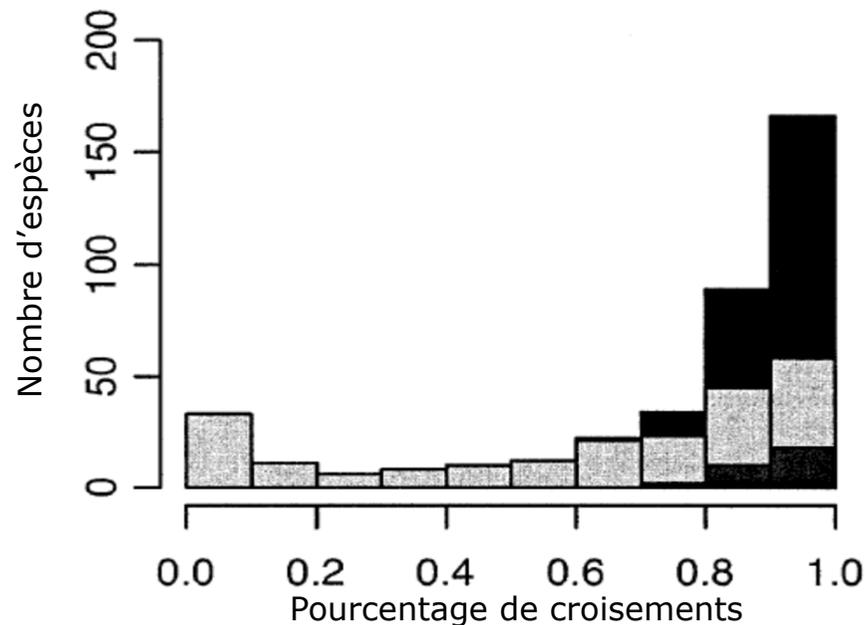
3. Recherche d'un partenaire

4. Risque de transmission de maladies

⇒ Très fort avantage à la reproduction clonale

Conclusion intermédiaire (3)

- Beaucoup de plantes peuvent se passer de vecteurs de pollinisation pour leur reproduction
 - Autofécondation
 - Reproduction clonale



- Mais peu s'en passent effectivement
 - Quasi-totalité des plantes avec de la reproduction sexuée (en plus de la reproduction clonale)
 - Majorité de plantes avec des taux de croisements élevés

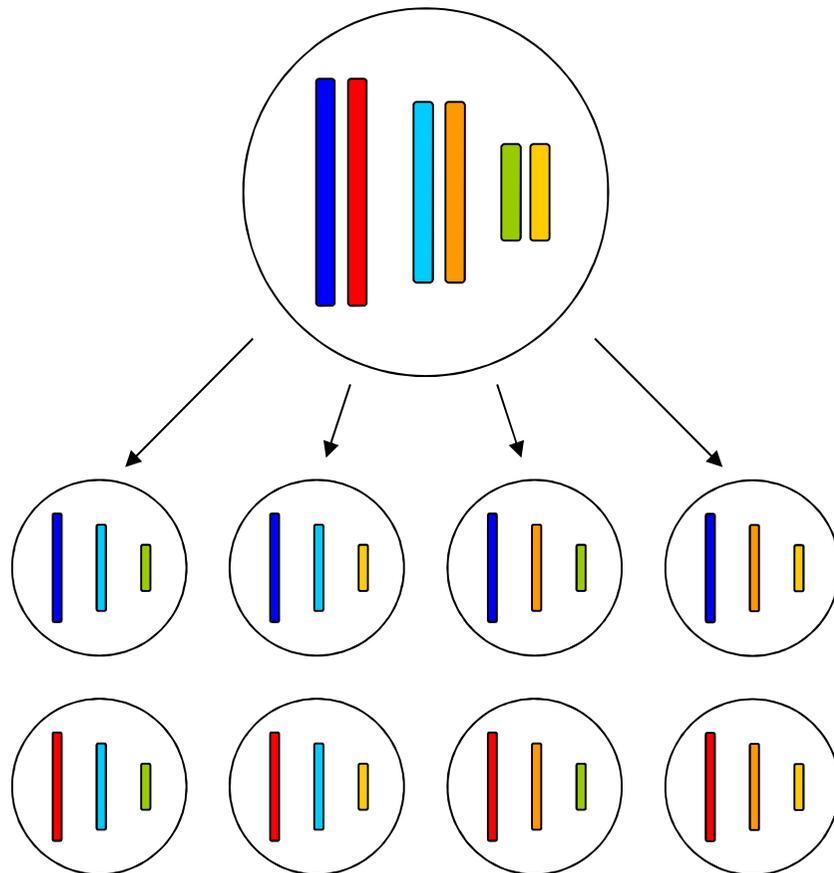


- Pourquoi ?

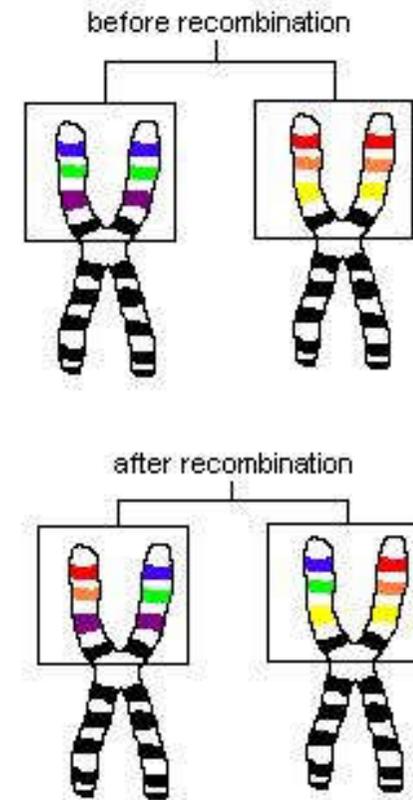
Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

- Ce que fait le sexe : la méiose

Mélange de chromosomes

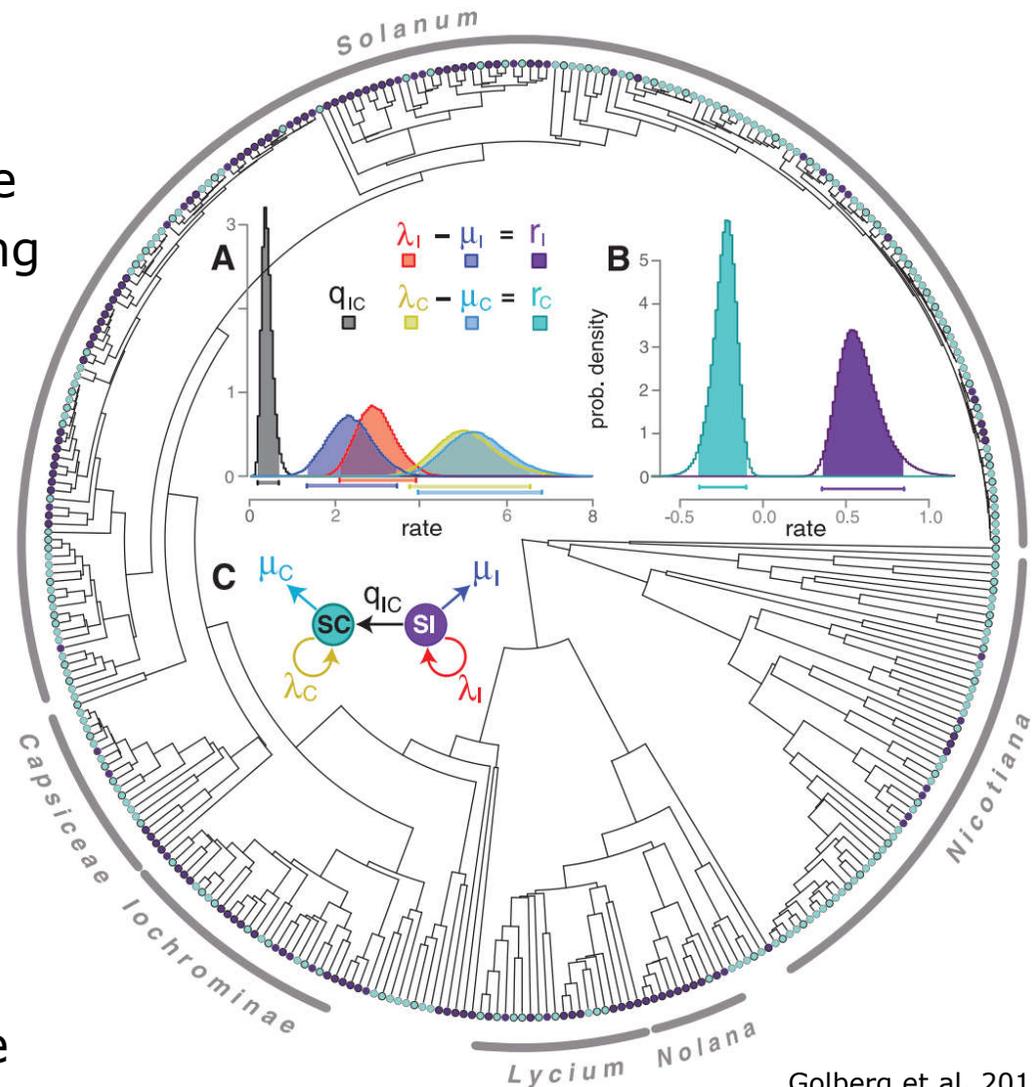


Recombinaison



Les effets à long terme de l'autofécondation sur l'évolution des espèces

- Autofécondation / reproduction clonale
 - Avantages à court terme
 - Mais désavantages à long terme
- Comparaison espèces autocompatibles / autoincompatibles
 - Solanacées
 - Taux de spéciation C > I
 - Mais taux d'extinction C >> I
 - Les espèces C ont une espérance de vie limitée



Conclusions

- ❑ La sélection naturelle favorise facilement une reproduction autonome (autofécondation, reproduction clonale)
- ❑ Mais les espèces qui perdent la reproduction sexuée avec croisements s'éteignent rapidement
- ❑ Sur le long terme, les espèces qui persistent sont celles qui continuent à faire des croisements : rôle central des pollinisateurs

