



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

Chaire annuelle Biodiversité et écosystèmes

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

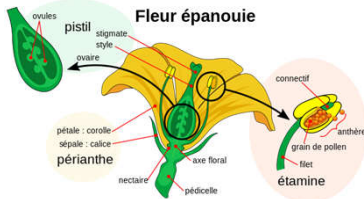
Emmanuelle PORCHER



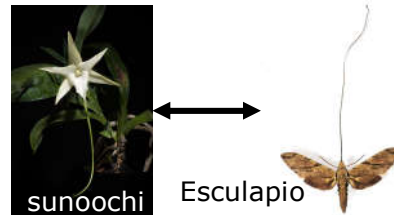
Photos : Didier51 - Spipoll

# 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

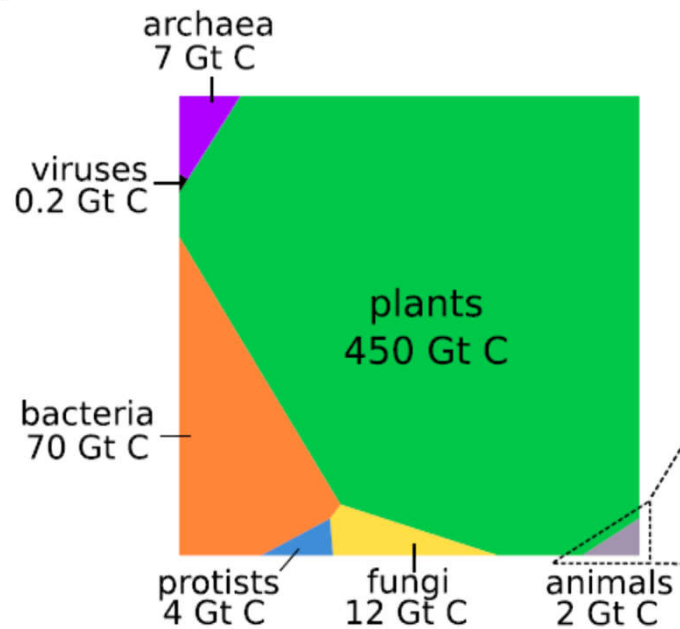
# La reproduction des plantes à fleurs



Didier51 - Spipoll

# Pourquoi s'intéresser aux plantes à fleurs ?

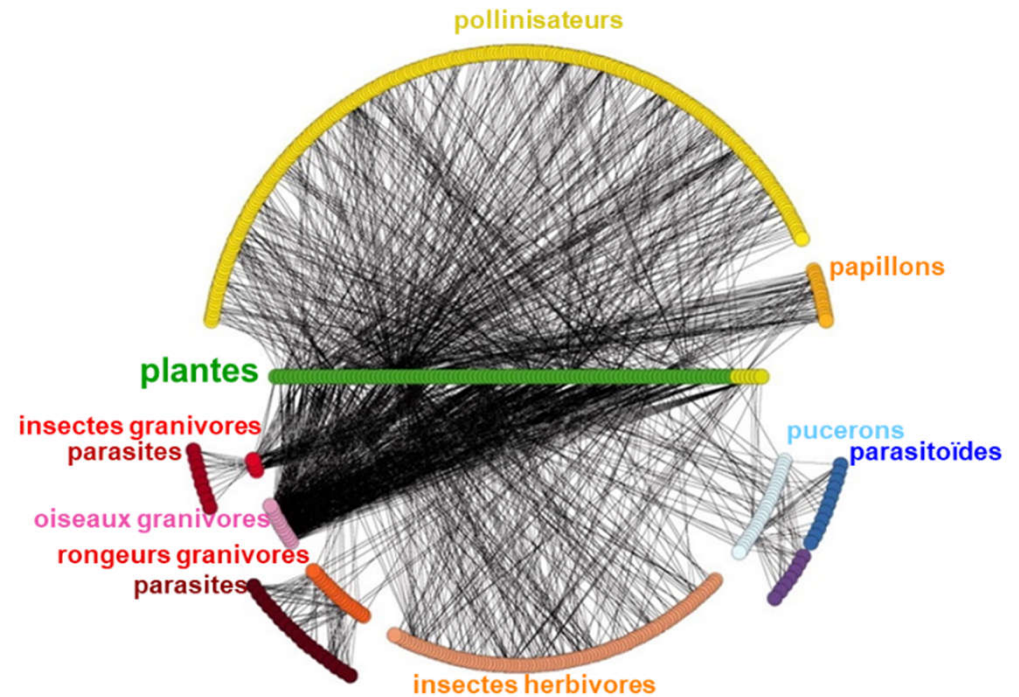
- Place centrale sur la planète



- Rôle dans le stockage du carbone et dans le climat

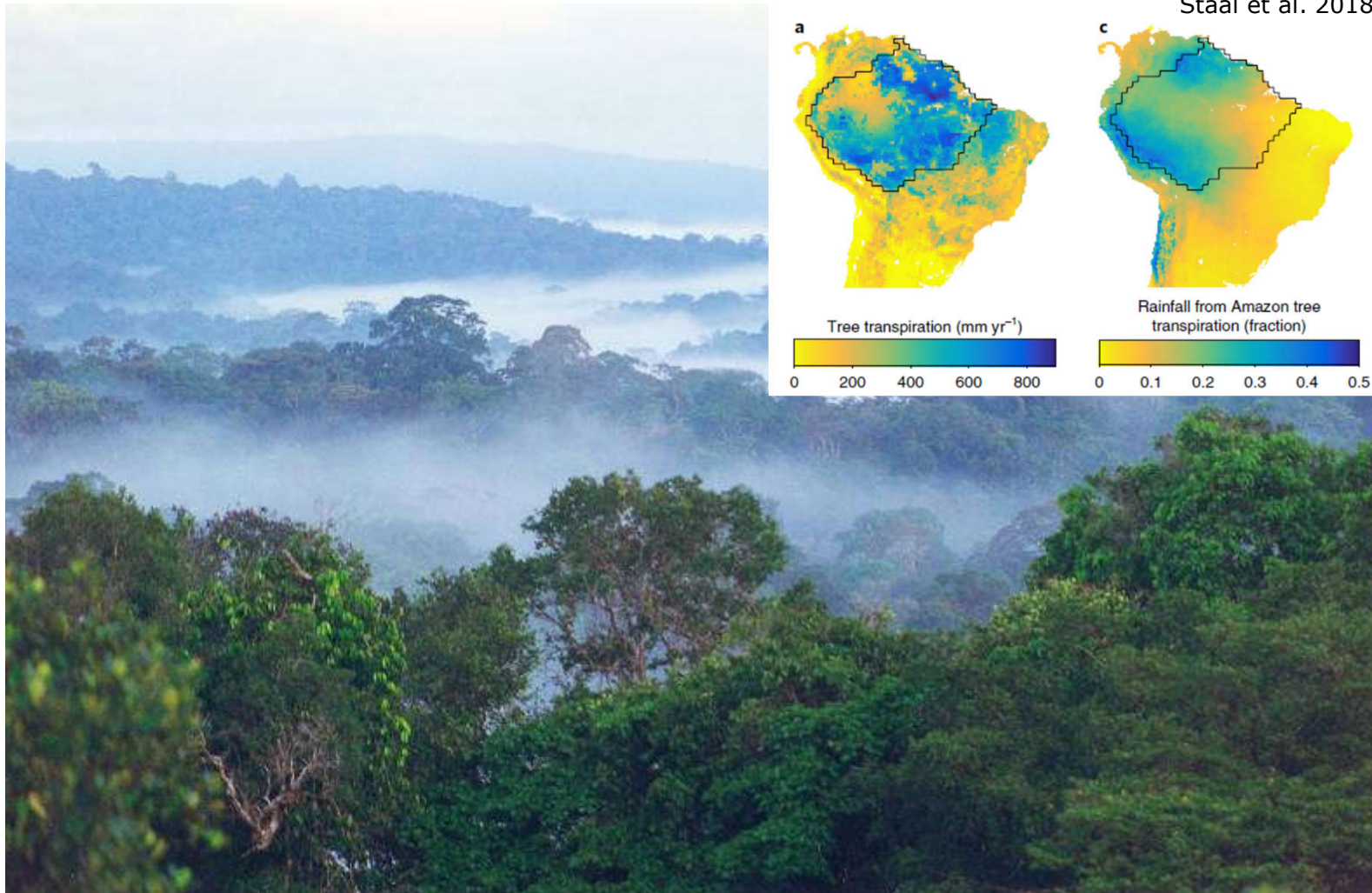
Bar-On et al. 2018

- A la base de la plupart des chaînes alimentaires terrestres



Pocock et al. 2012

# Couplage avec le climat : exemple de la forêt amazonienne



5

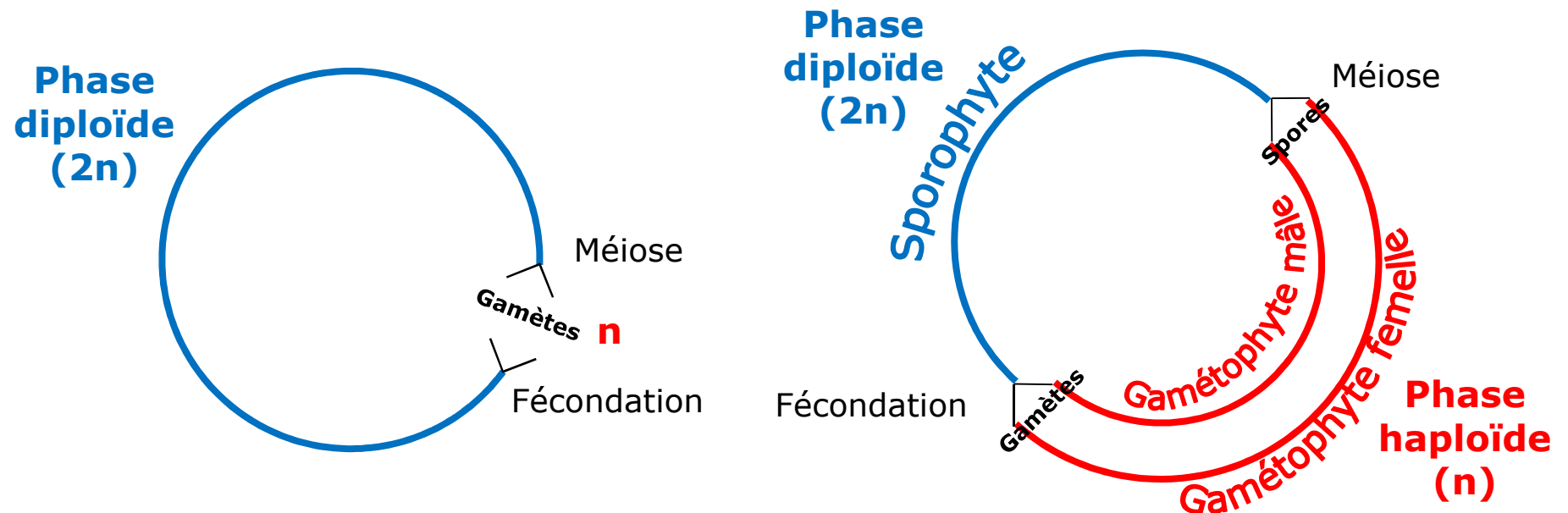
Visualisation : <https://www.youtube.com/watch?v=4794mgJLTbU>

# 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

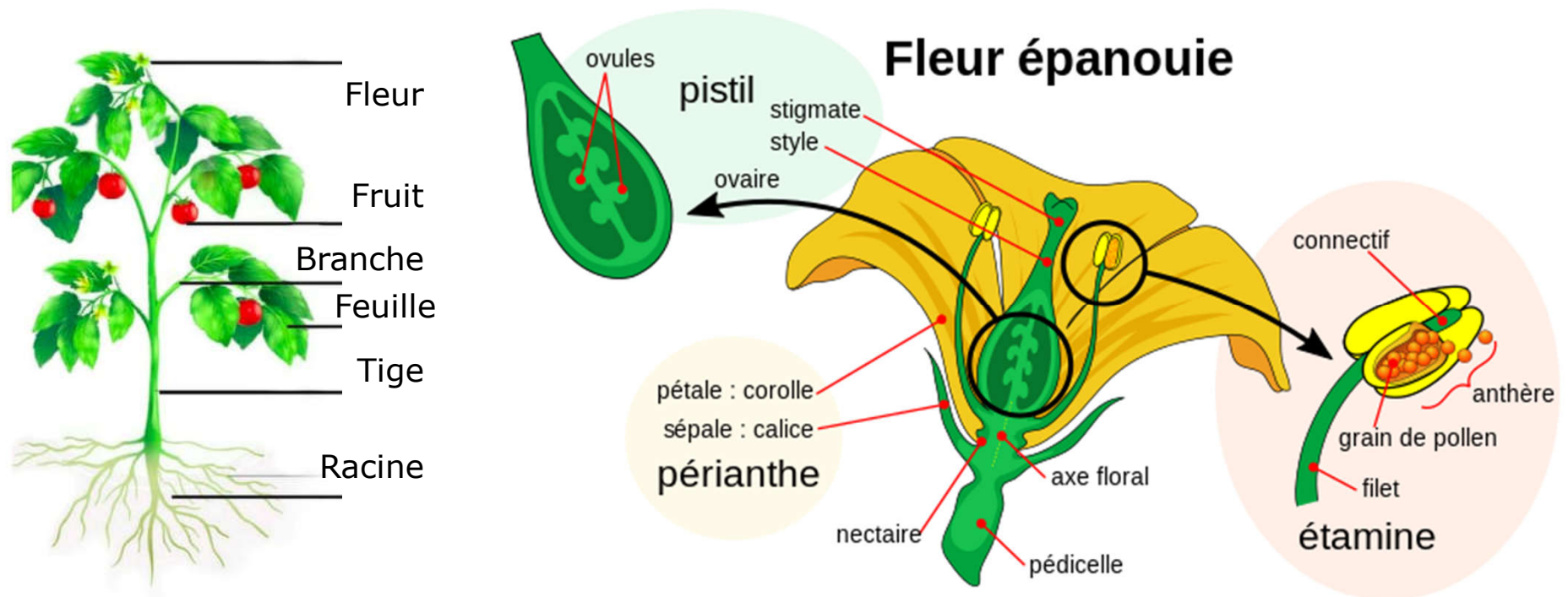


- Gamétophyte = prothalle



# Sporophytes et gamétophytes chez les plantes

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





# Qu'est-ce qu'une plante à fleurs ?

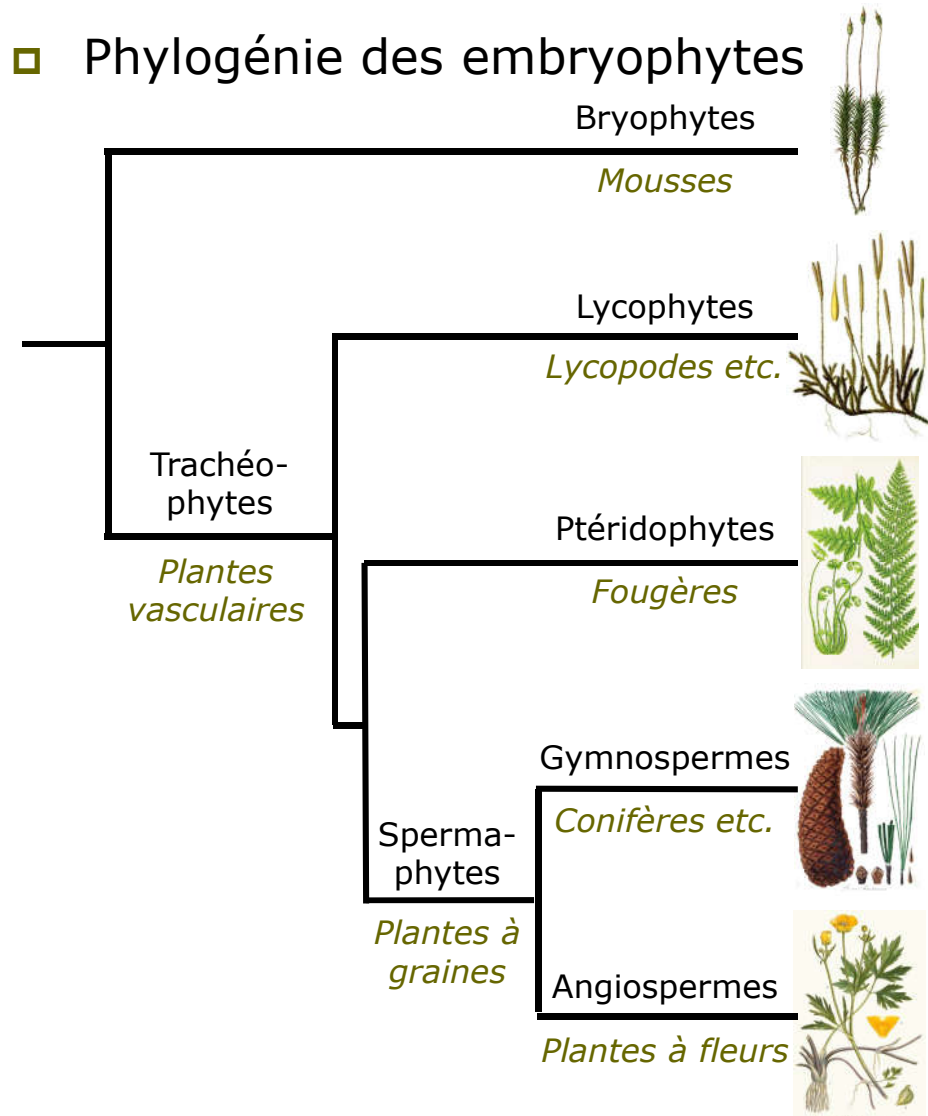
## □ Plantes vertes

- Algues vertes + embryophytes (plantes « terrestres »)

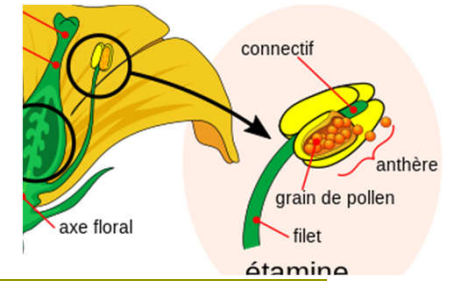
## □ Plantes à fleurs :

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

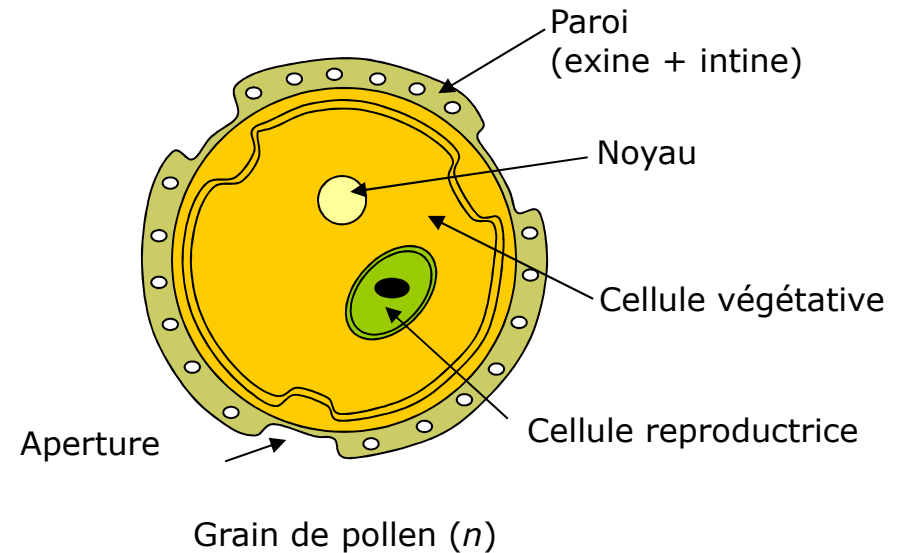
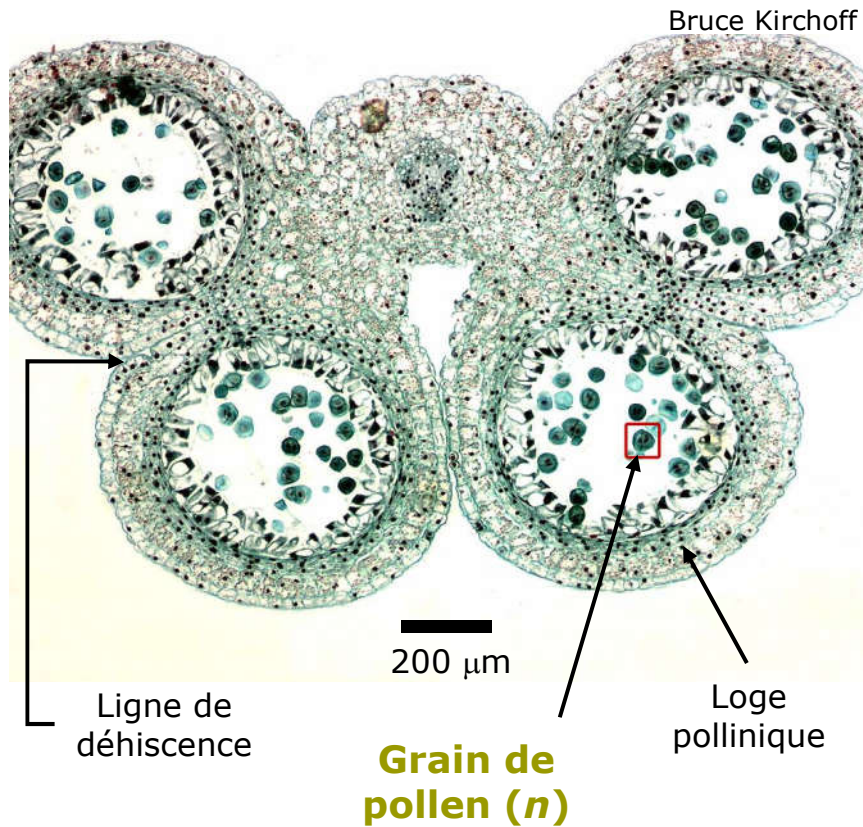
## □ Phylogénie des embryophytes



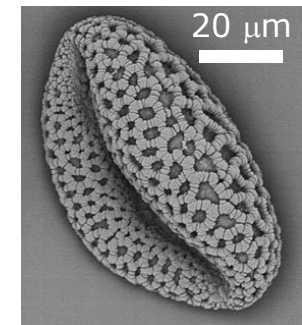
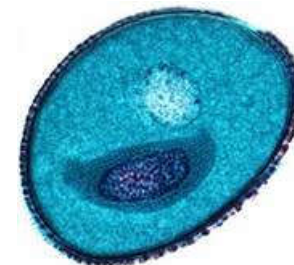
# Où sont les gamétophytes ?



□ Le gamétophyte mâle = le grain de pollen



Grain de pollen de Lis

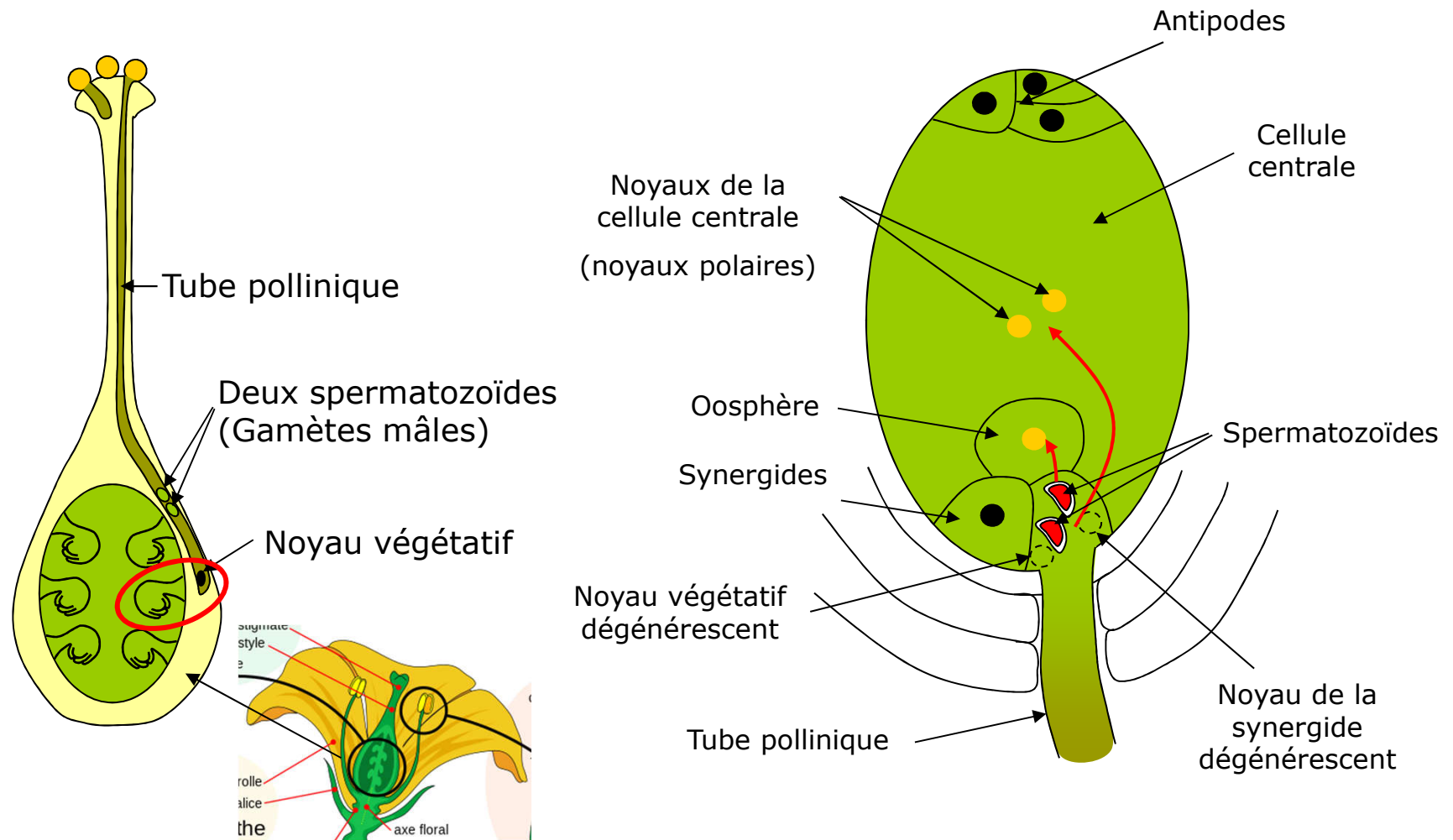


Section d'une jeune anthère de Lis



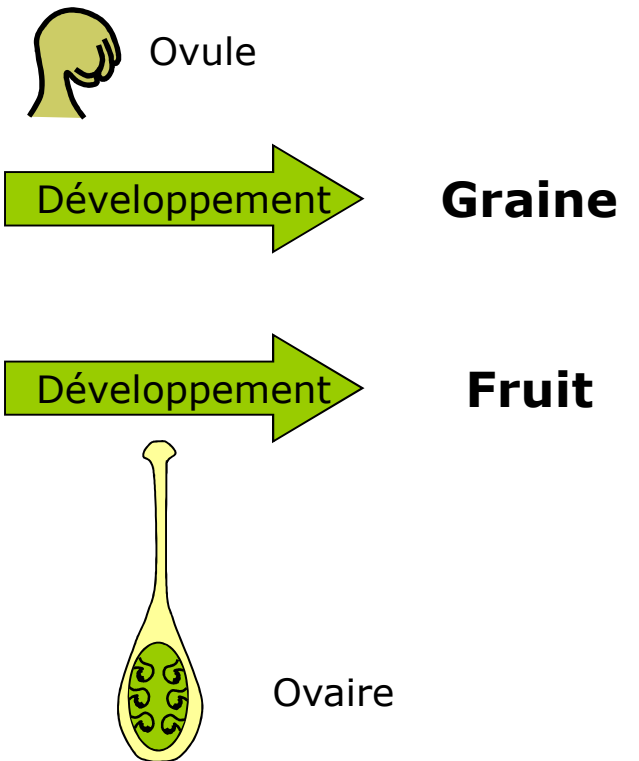
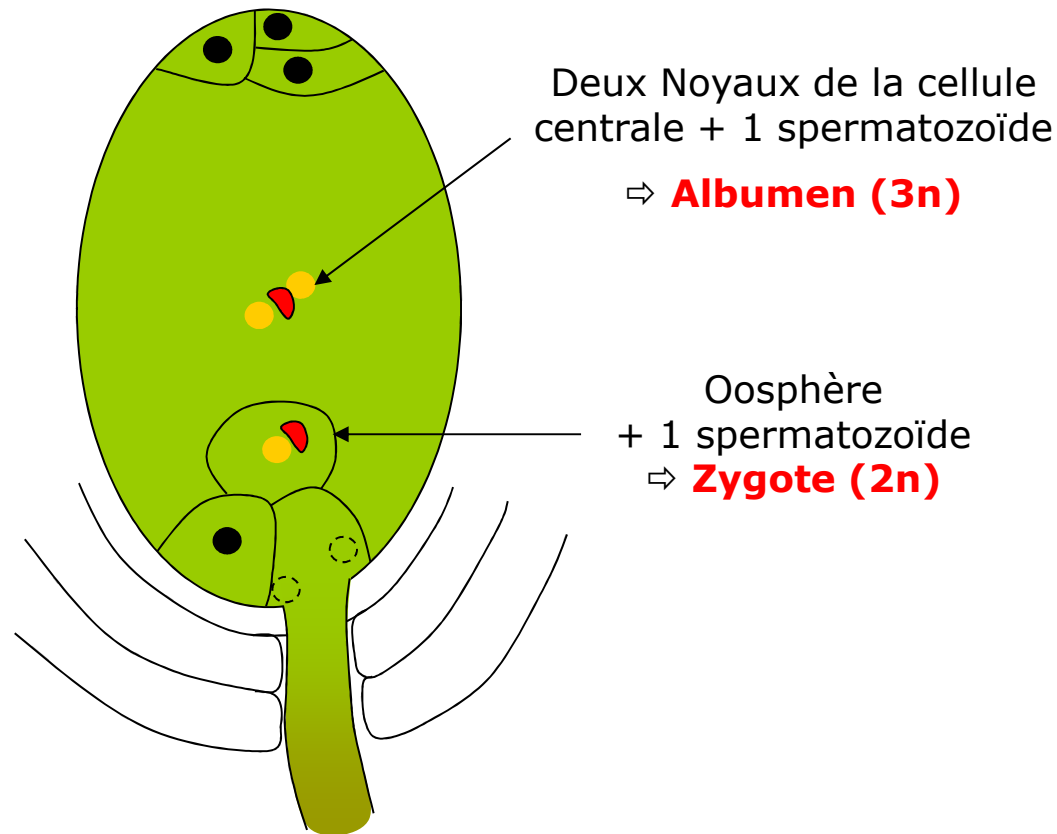
# La double fécondation des Angiospermes

## □ Double fécondation dans l'ovule

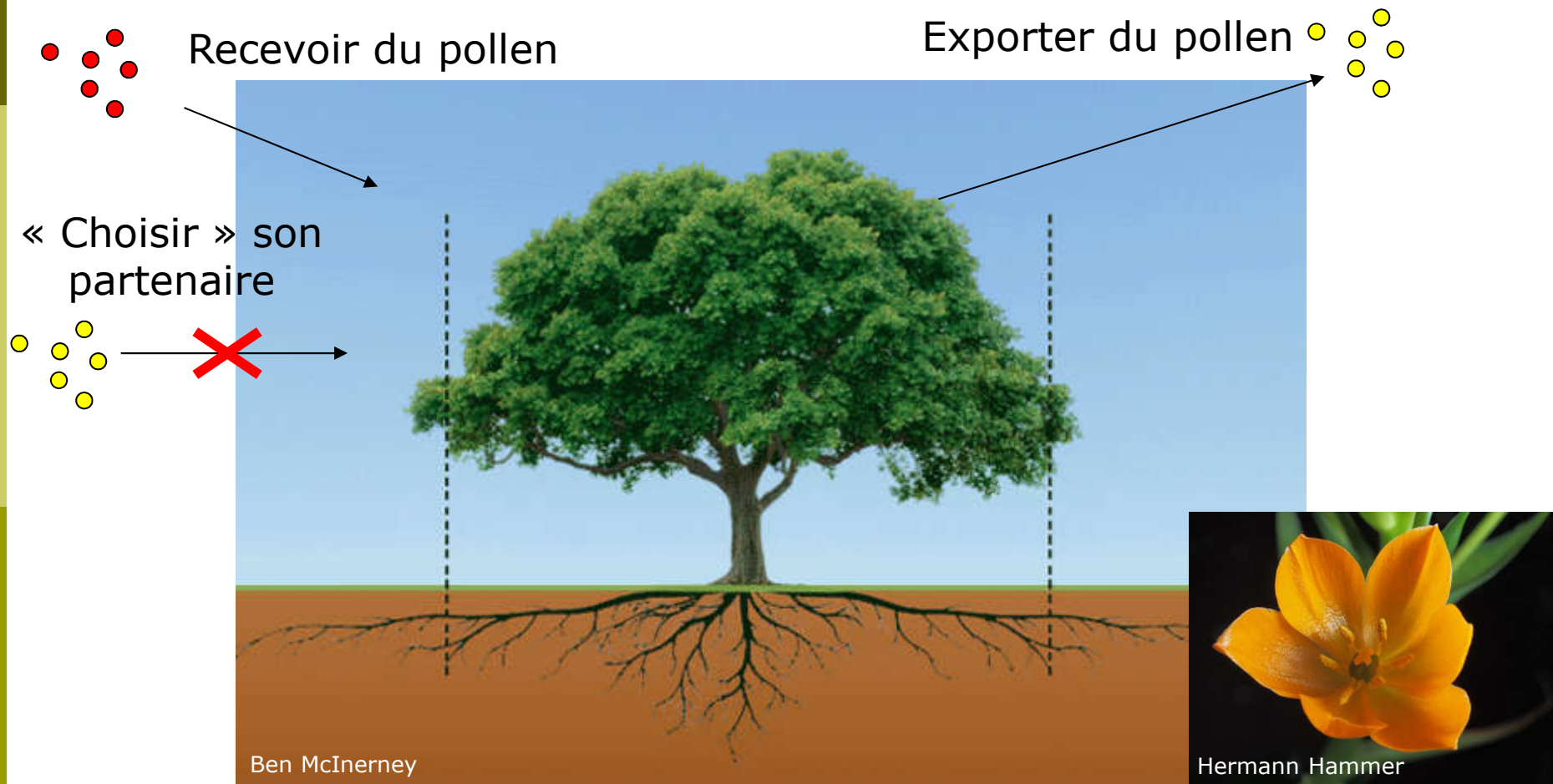


# La double fécondation des Angiospermes

## □ 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



Krzysztof Ziarnek

*Plantago lanceolata*



Meyer et al. (2004)

*Poa sp.*



*Zea mays*



Gerardgiraud

Frédéric Ducarme

*Posidonia sp.*

- Étamines exposées au vent, stigmates plumeux

# Pollinisation abiotique

---

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



Bernard de Go Mars

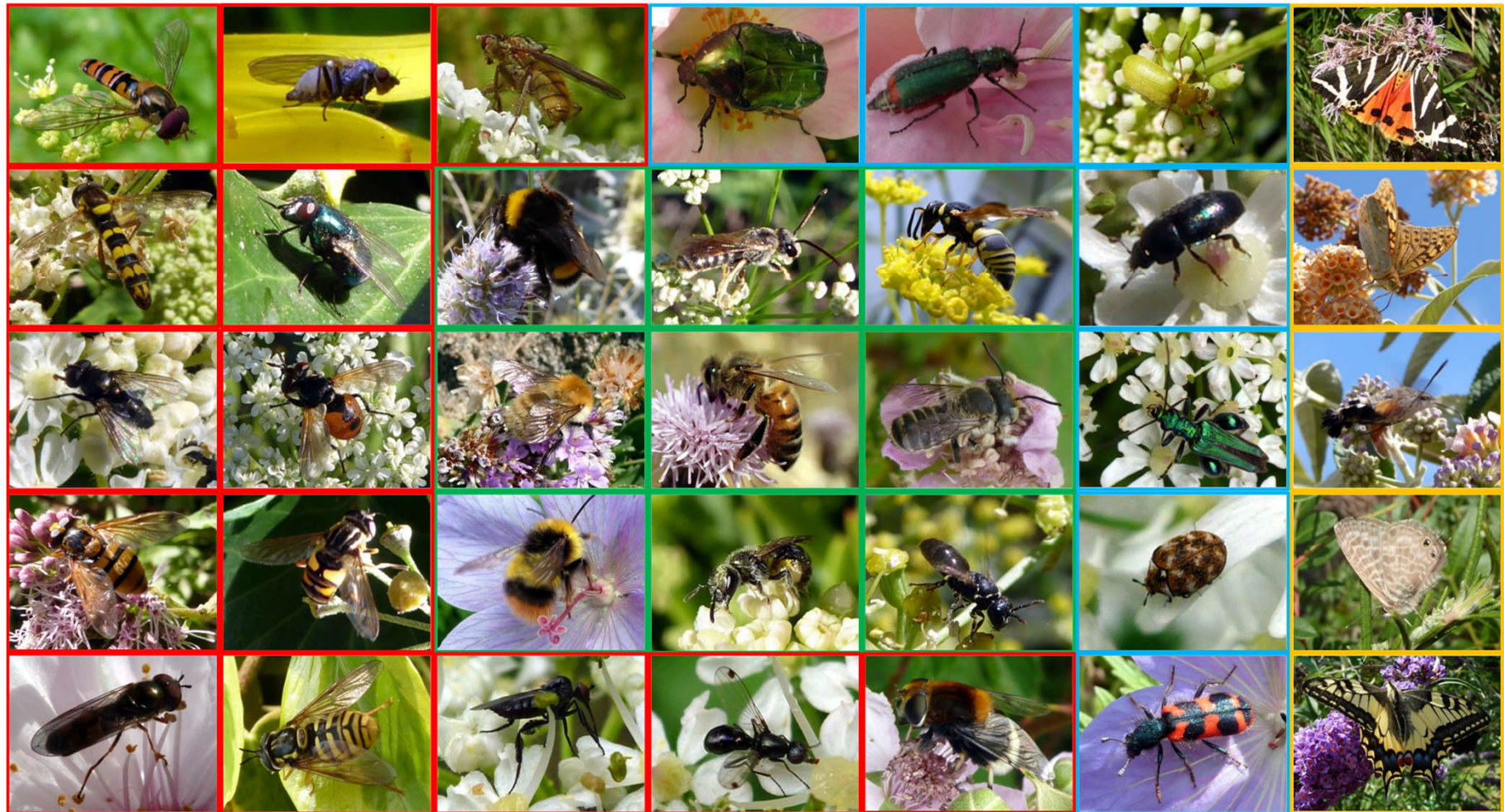


Famartin



# 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 ?



Didier51 - Spipoll

# Les systèmes de reproduction

---

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

- **Animaux**



*Monogamie*



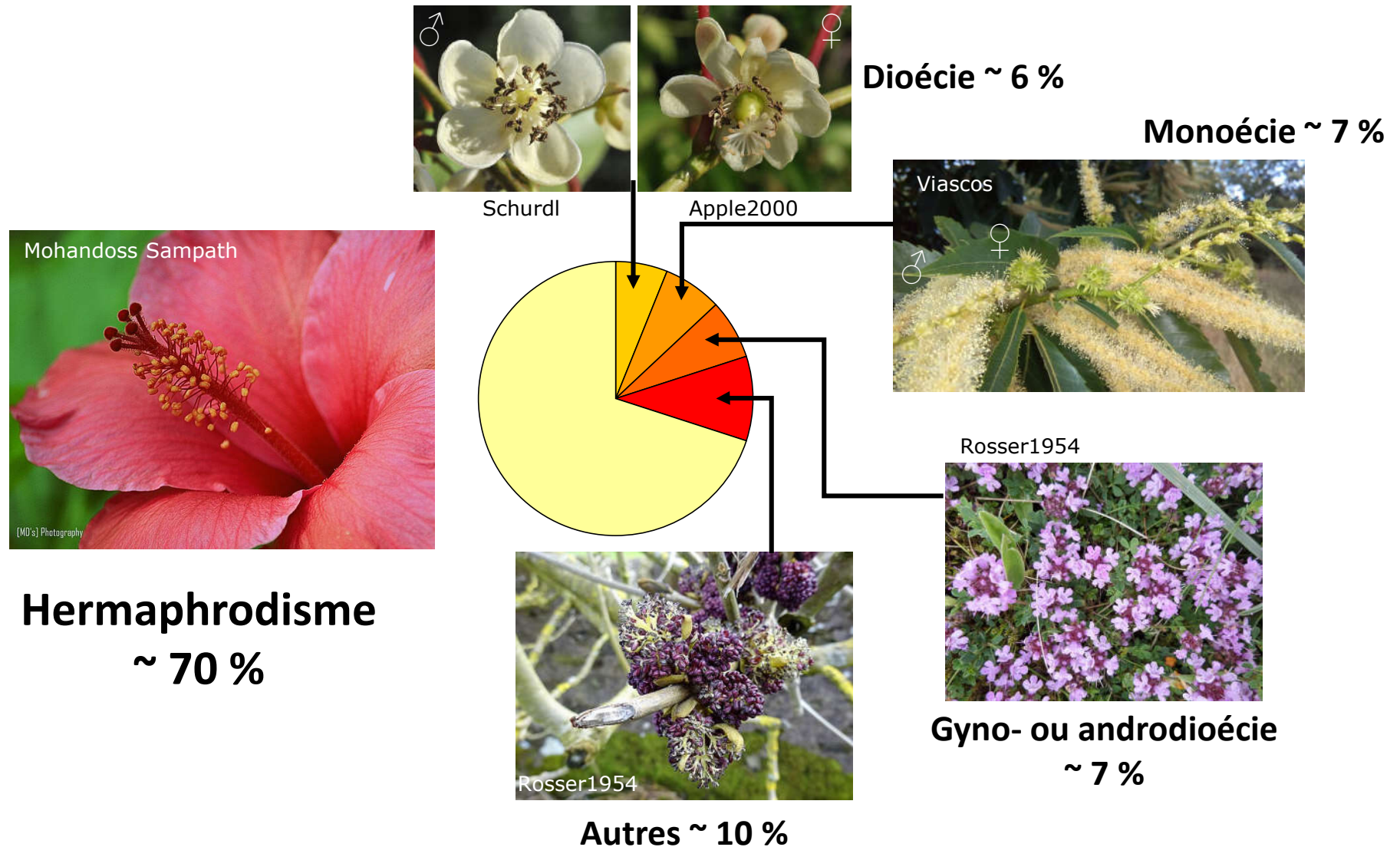
*Polygamie*

- **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

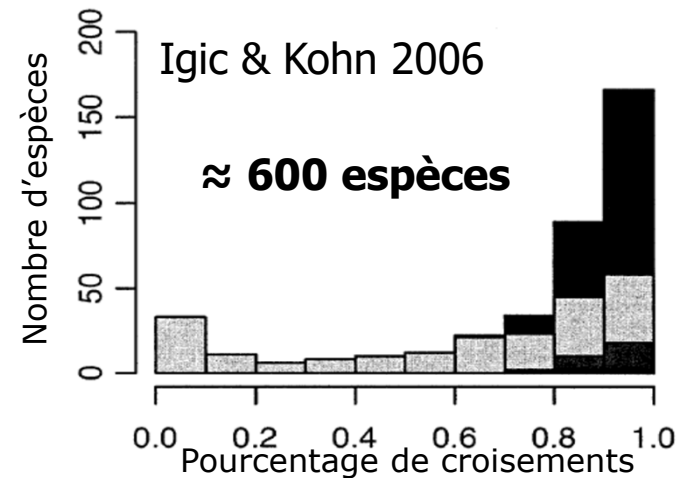
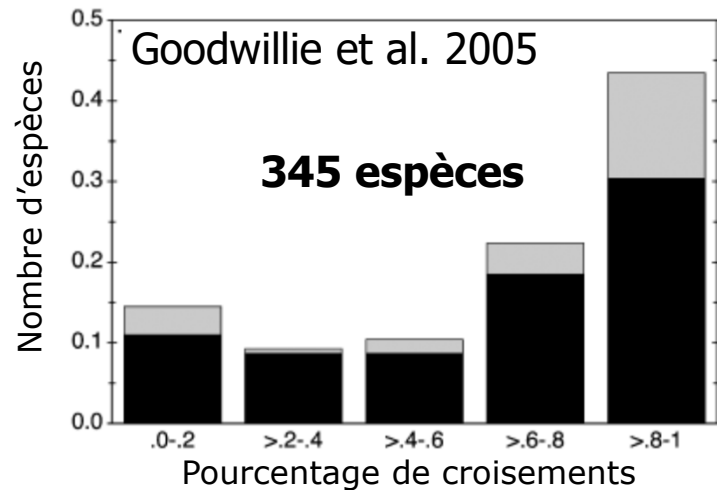
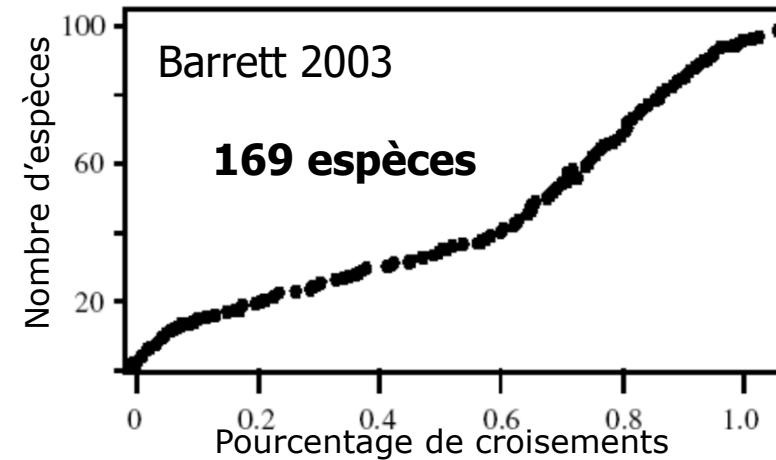
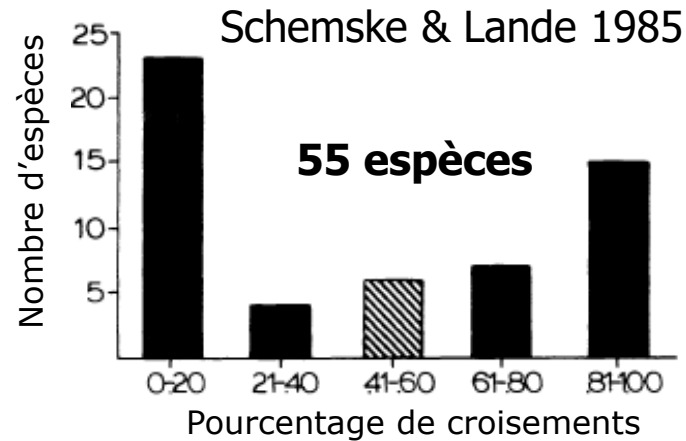


La présence des fonctions mâle et femelle sur une même plante permet l'autofécondation

---



# 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

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

# Mécanismes : quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

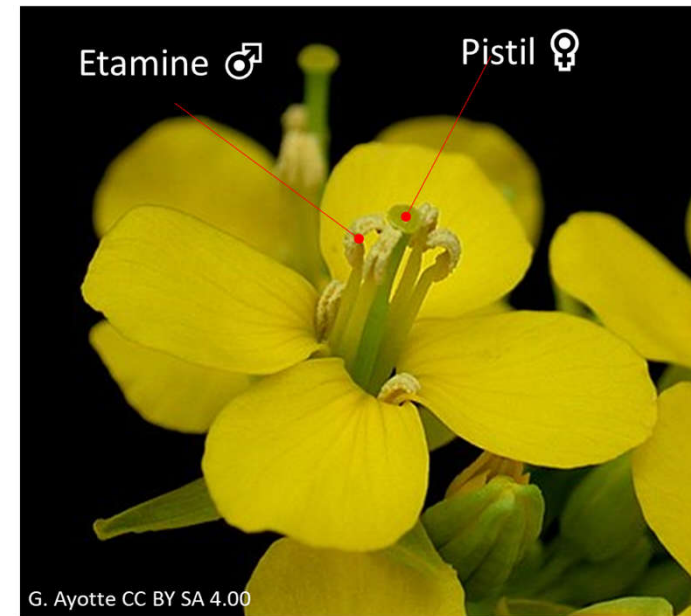
---

## □ Favoriser l'autofécondation



*Lamium amplexicaule*

Fleurs fermées : Cléistogamie



*Brassica rapa*

Séparation spatiale  
Herkogamie réduite



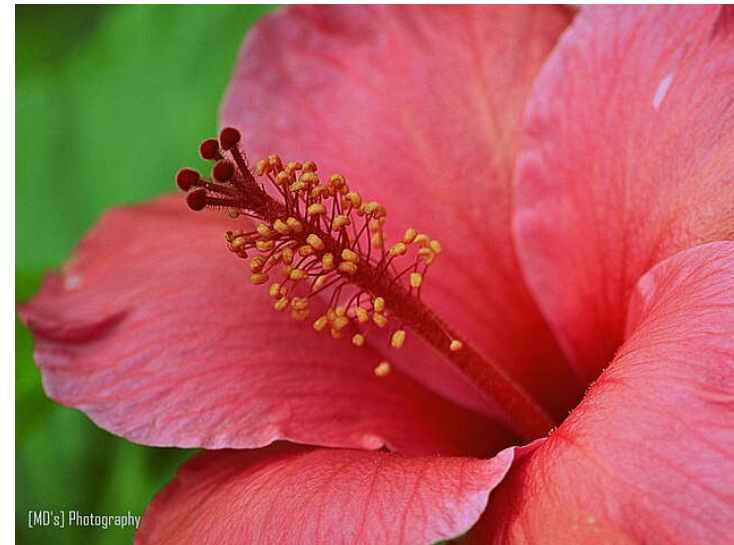
# Mécanismes : quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

---

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



Nadiatalent  
Dans le temps : dichogamie  
*Aeonium undulatum*

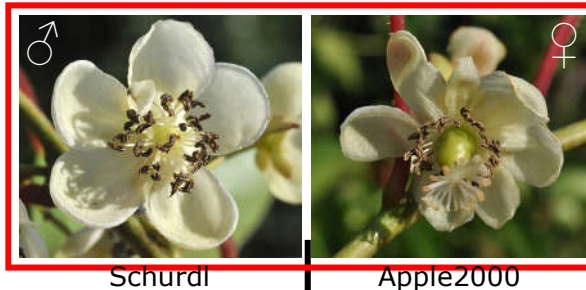


[MD's] Photography  
Dans l'espace : herkogamie  
*Hibiscus* sp.

- Entre fleurs ou individus ⇒ Diversité des systèmes de reproduction

# Répartition des genres empêchant l'autofécondation

Pas d'autofécondation

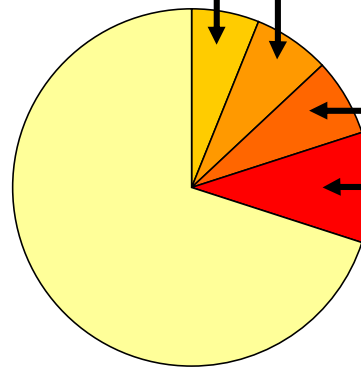


Dioécie

Monoécie



Hermaphrodisme



Pas d'autofécondation au sein d'une fleur



Gyno- ou androdioécie

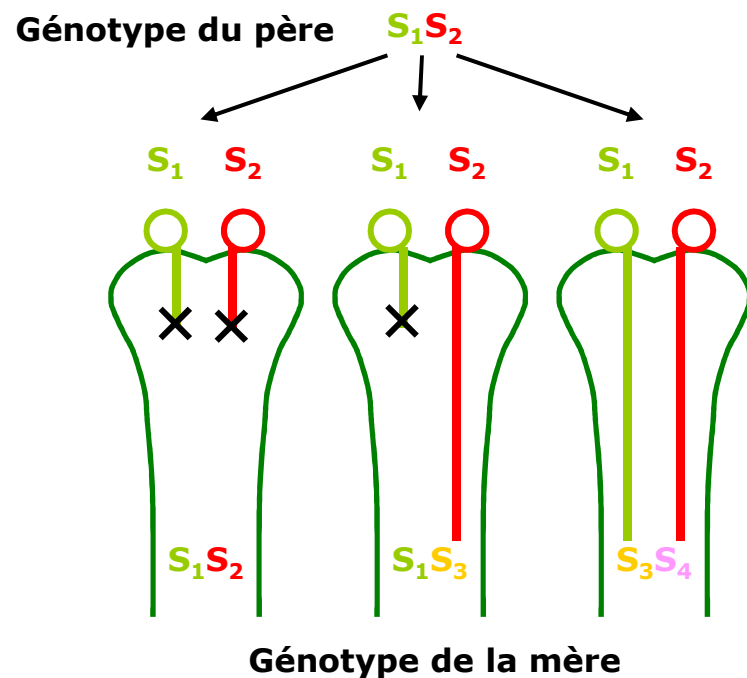


Autres

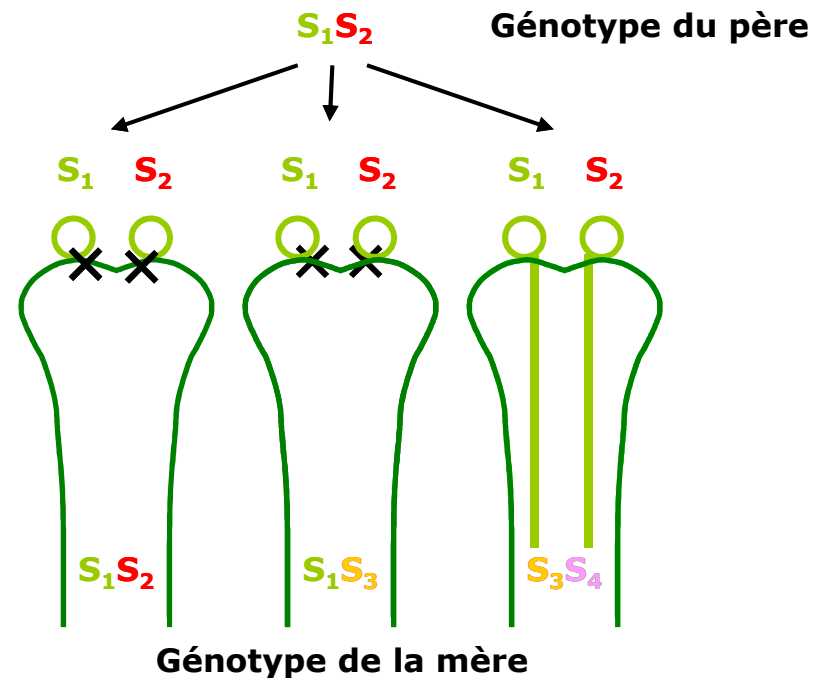
# Quelles caractéristiques évitent / favorisent l'autofécondation ?

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

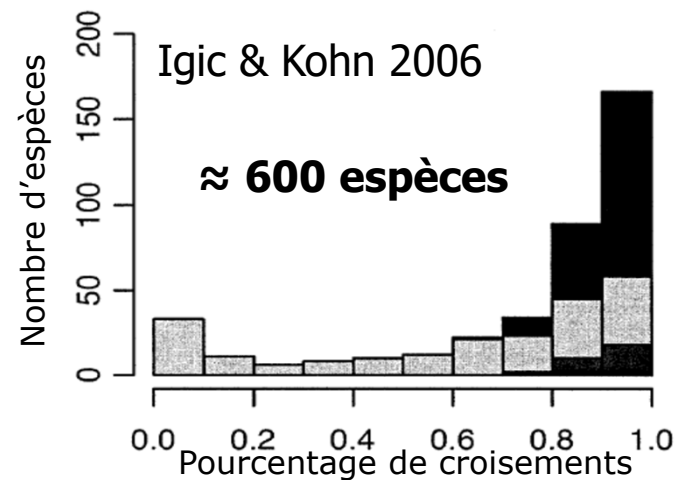
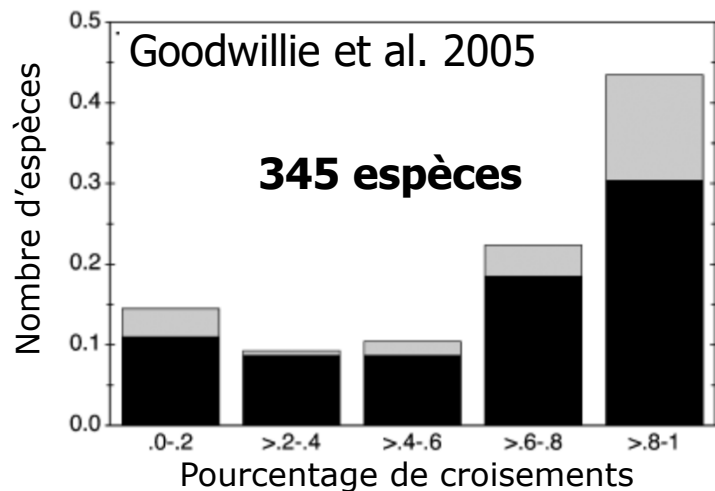
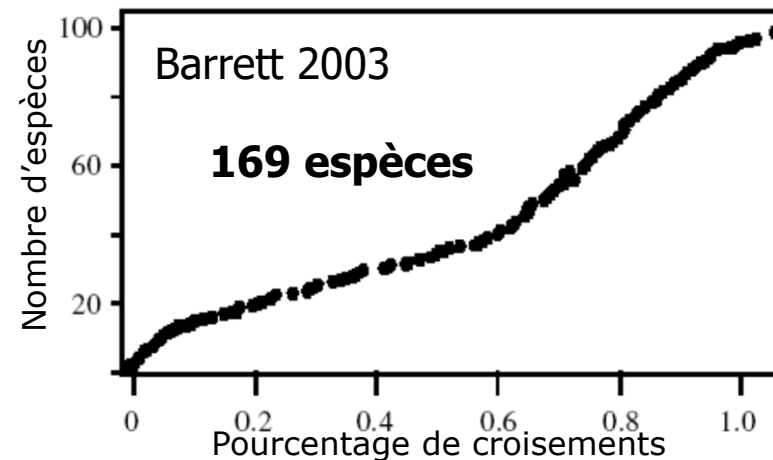
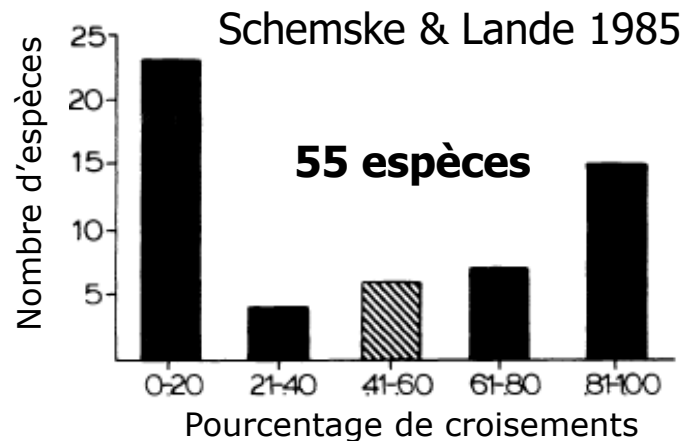
## Auto-incompatibilité gamétophytique



## Auto-incompatibilité sporophytique



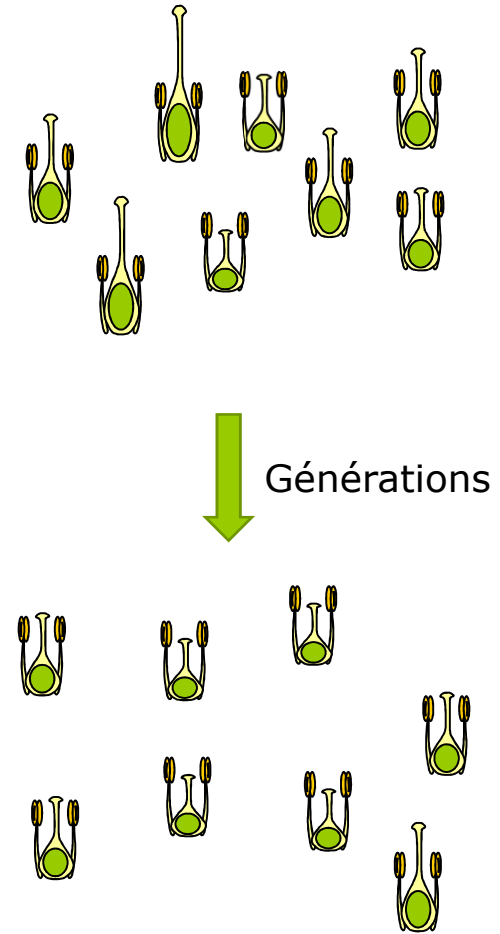
# Retour à la distribution des taux d'allofécondation dans les populations



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

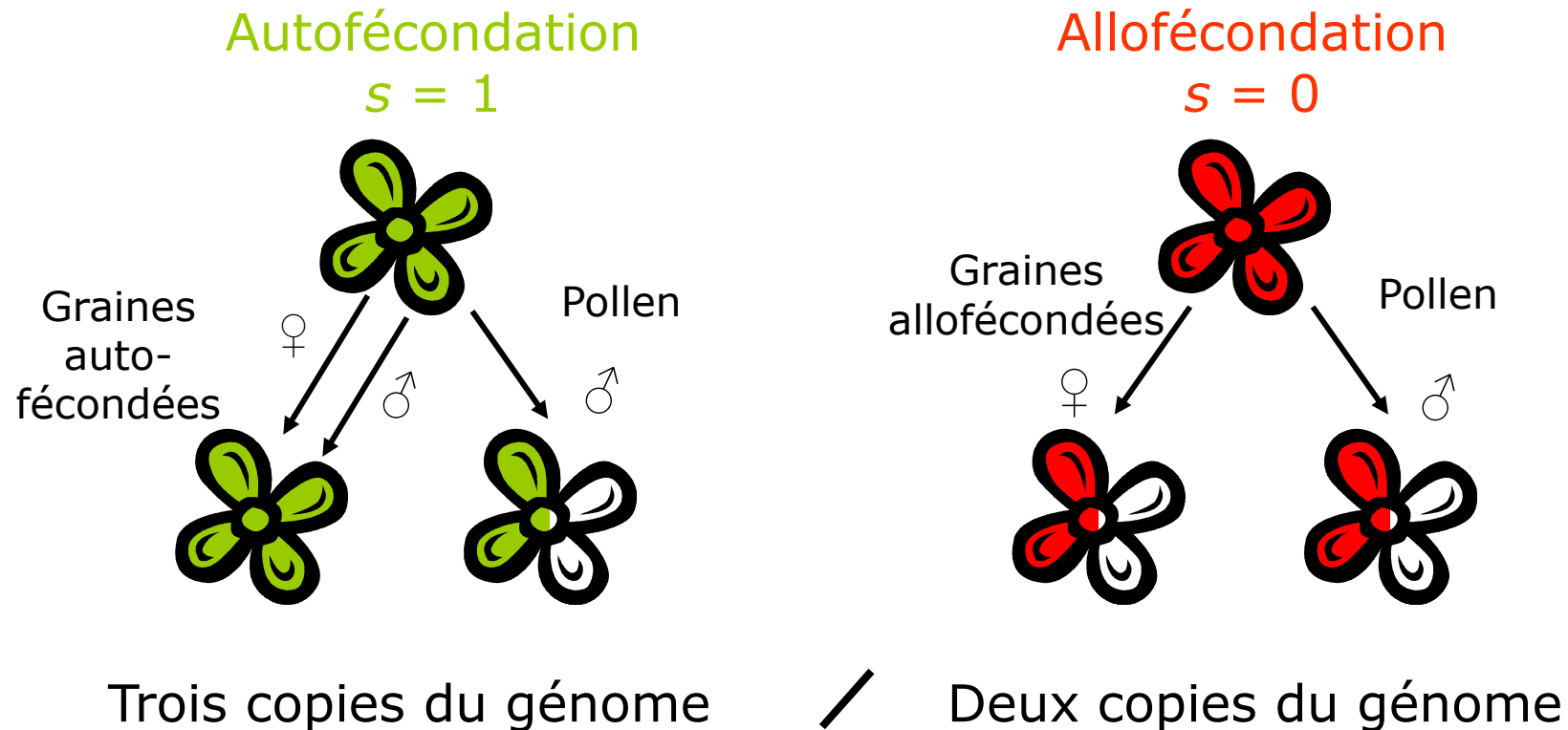
# Le principe de la sélection naturelle

- 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 :



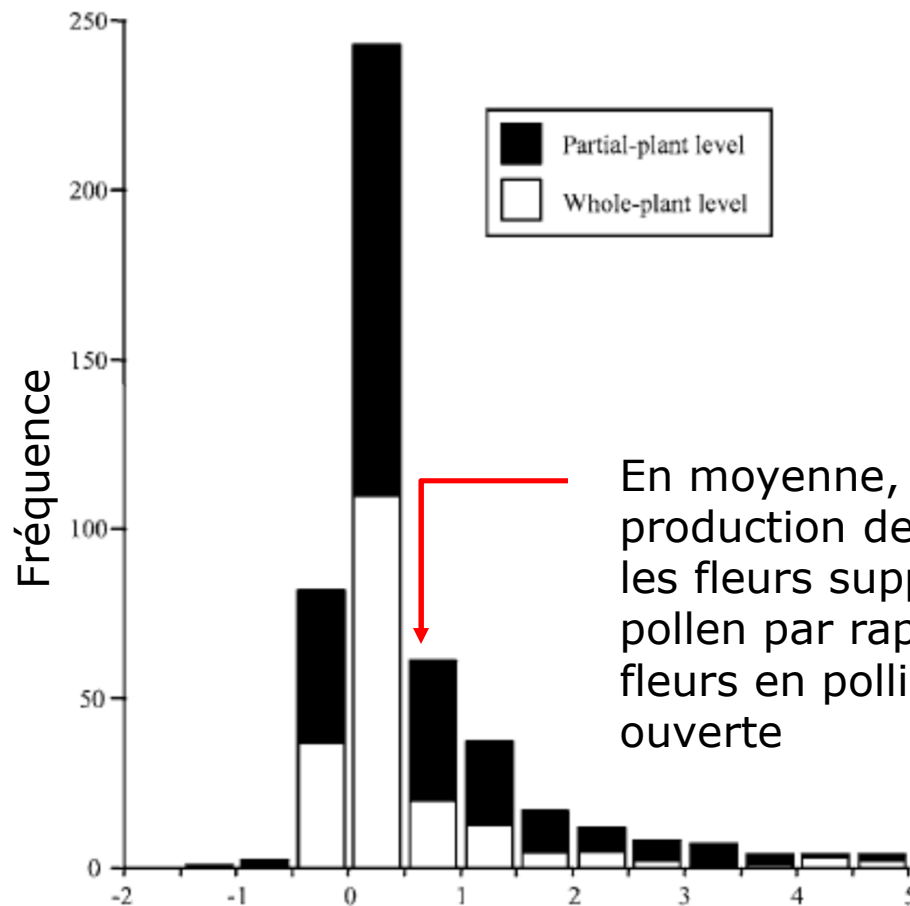
- Avantage de **50 %** pour les individus autoféconds

# 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

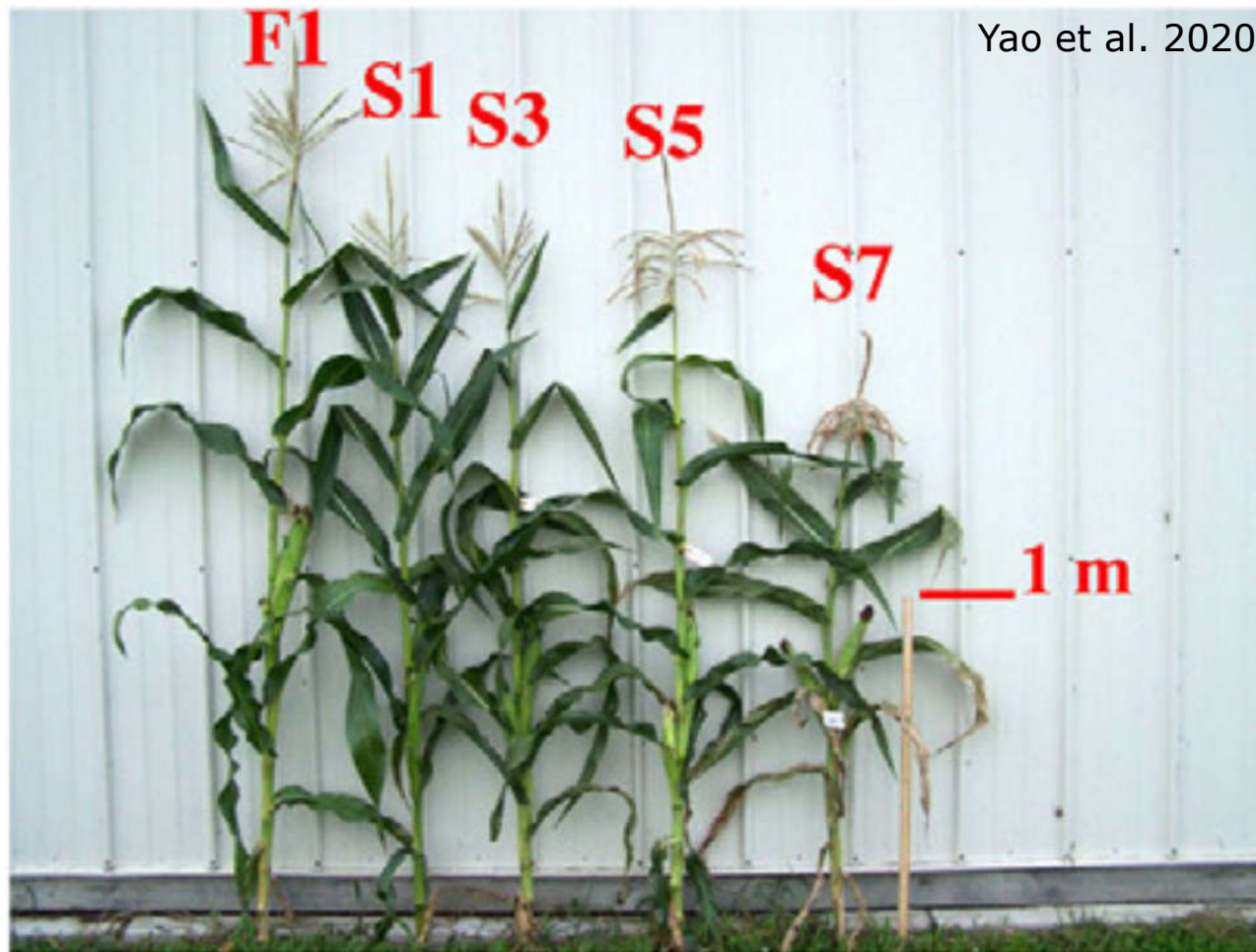


Charles II, roi d'Espagne  
par Juan Carreño de Miranda



# Dépression de consanguinité chez les plantes

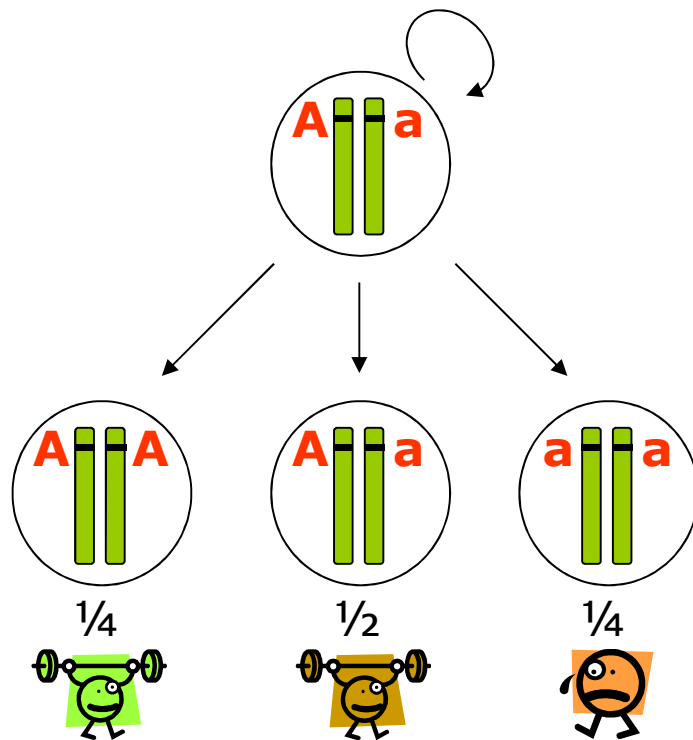
- Autofécondation = consanguinité extrême



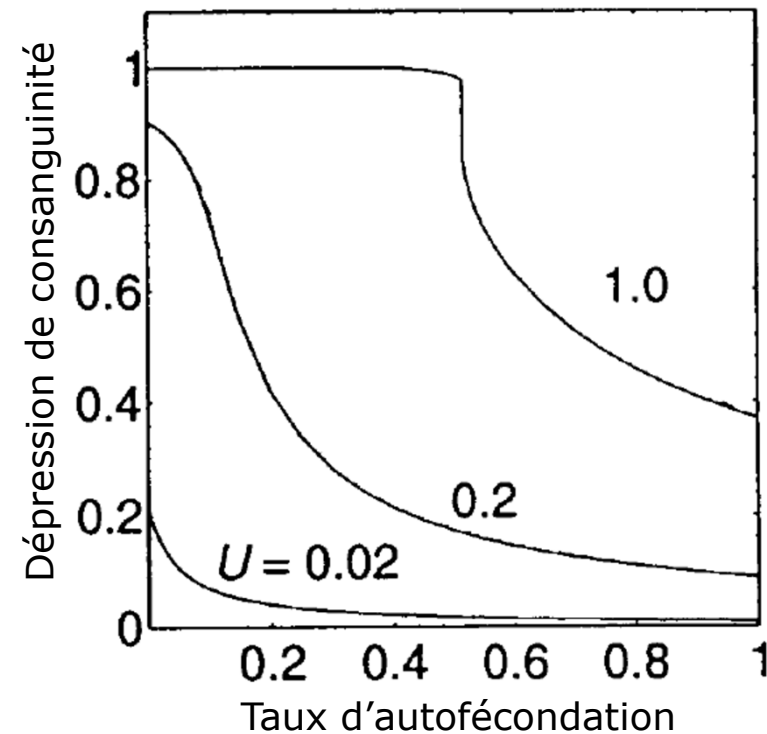
# Mécanismes de la dépression de consanguinité

- Mutations fortement délétères, quasi-récessives

$$AA \approx Aa \gg aa$$



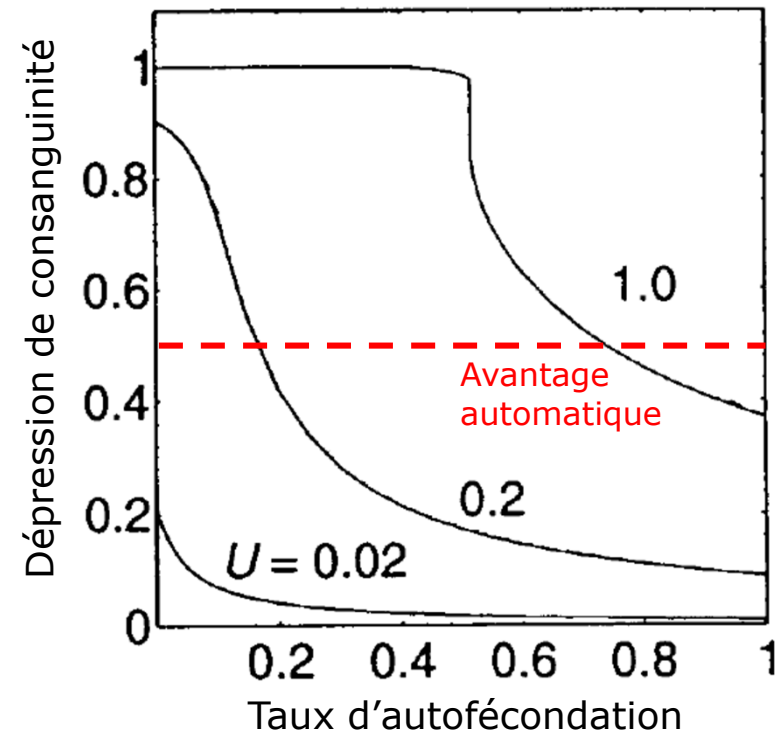
- « Purge » possible de la dépression de consanguinité



# 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

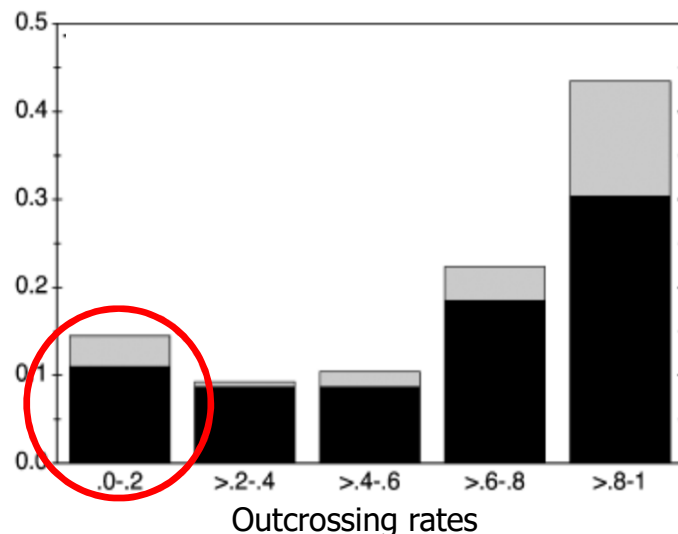


- L'utilisation de pollen pour l'autofécondation diminue le succès reproducteur mâle dans les croisements
- Modèle d'évolution du taux d'autofécondation incluant:
  - Evolution (purge) de la dépression de consanguinité
  - Perte de pollen
  - Limitation en pollen  $\Rightarrow$  Assurance reproductive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

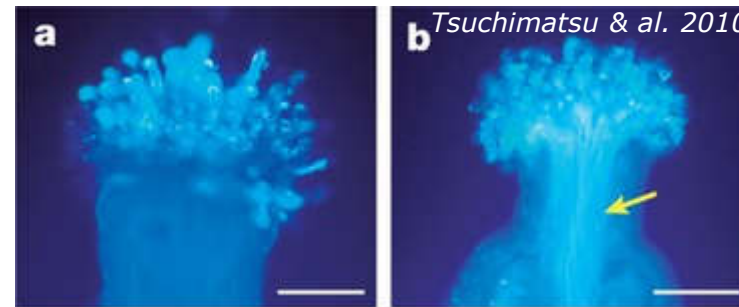
Porcher & Lande 2005

# 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

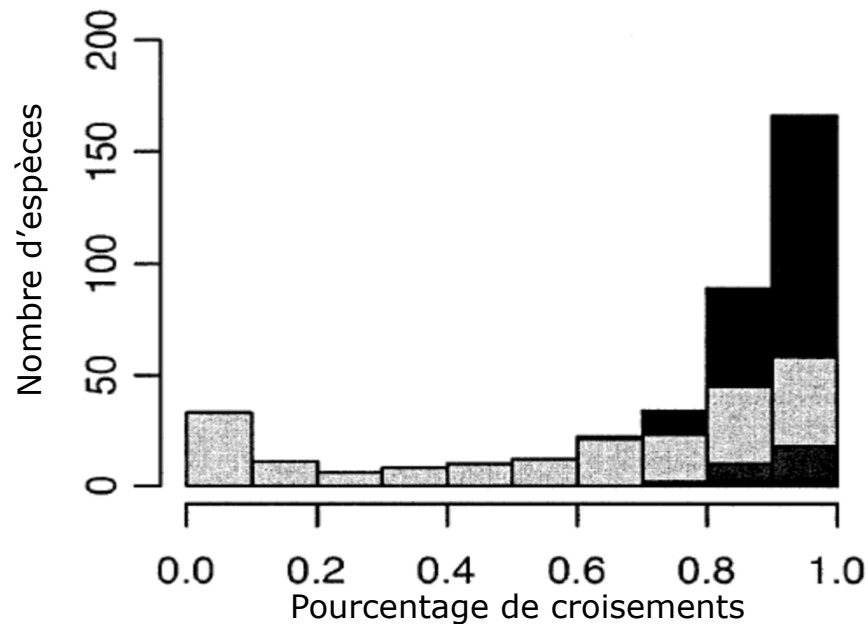
$$s = \frac{\text{Auto pollen}}{\text{Auto pollen} + \text{allo pollen}}$$



- 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<sup>1,2</sup> AND RUSSELL LANDE<sup>1,3</sup>

- 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

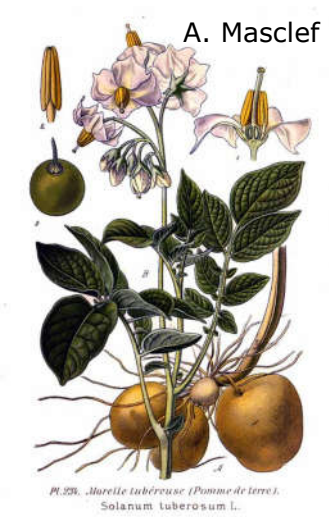
*Fragaria virginiana*



Nadiatalent

Bulbilles

*Lilium lancifolium*



A. Masclaf

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.*



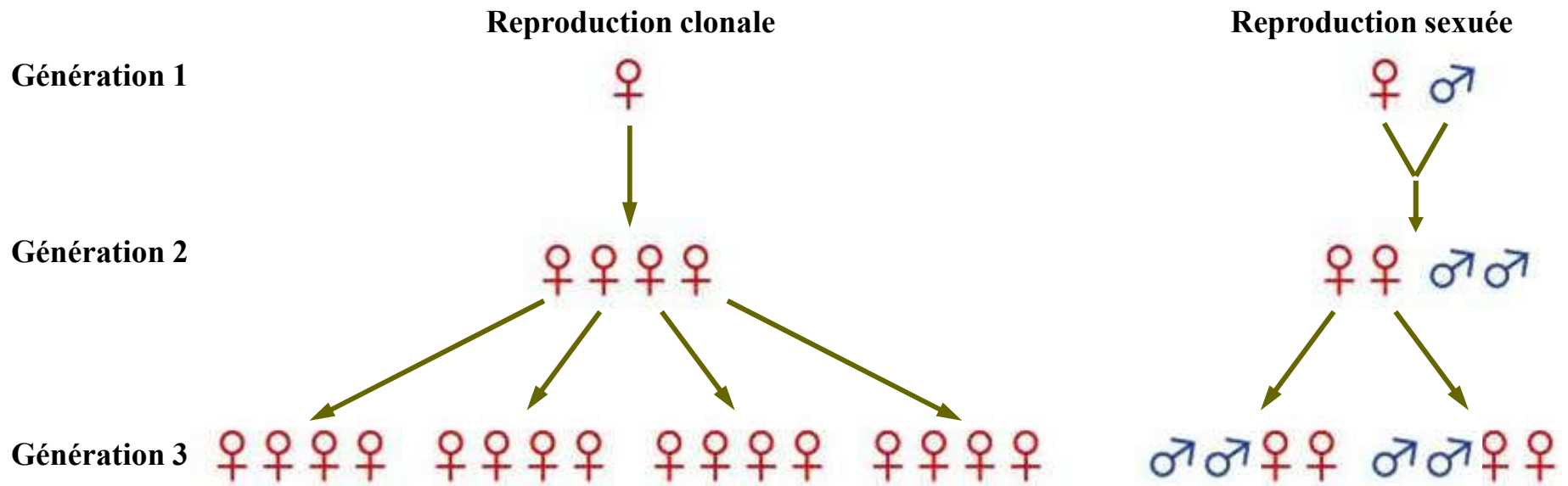
*Taraxacum officinale*

⇒ Difficultés taxonomiques associées

# Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

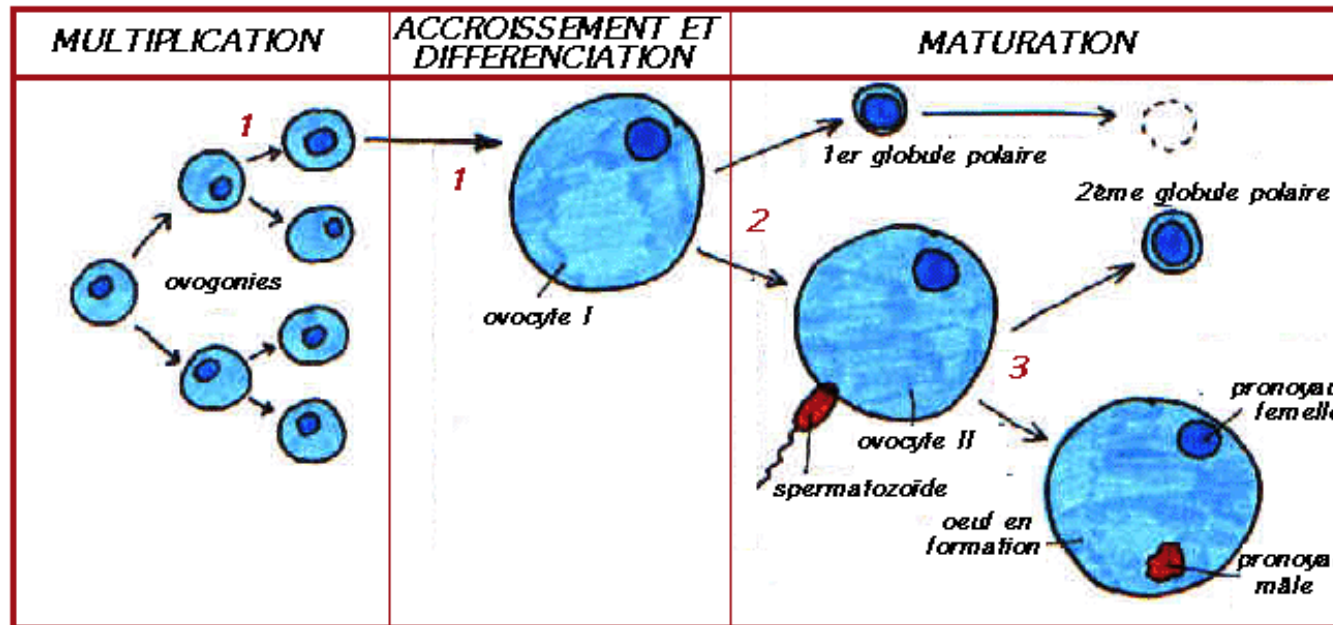
---

- 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



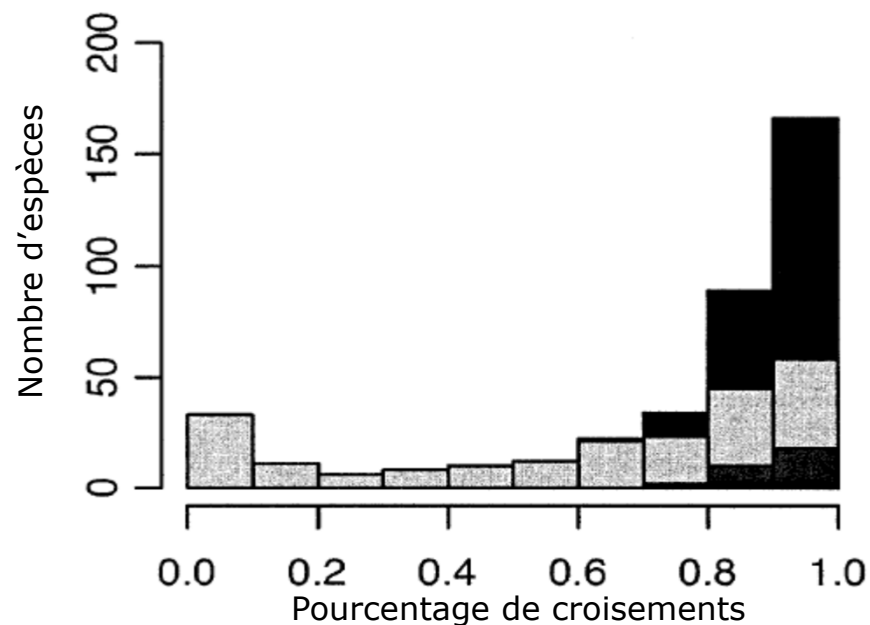
3. Recherche d'un partenaire

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

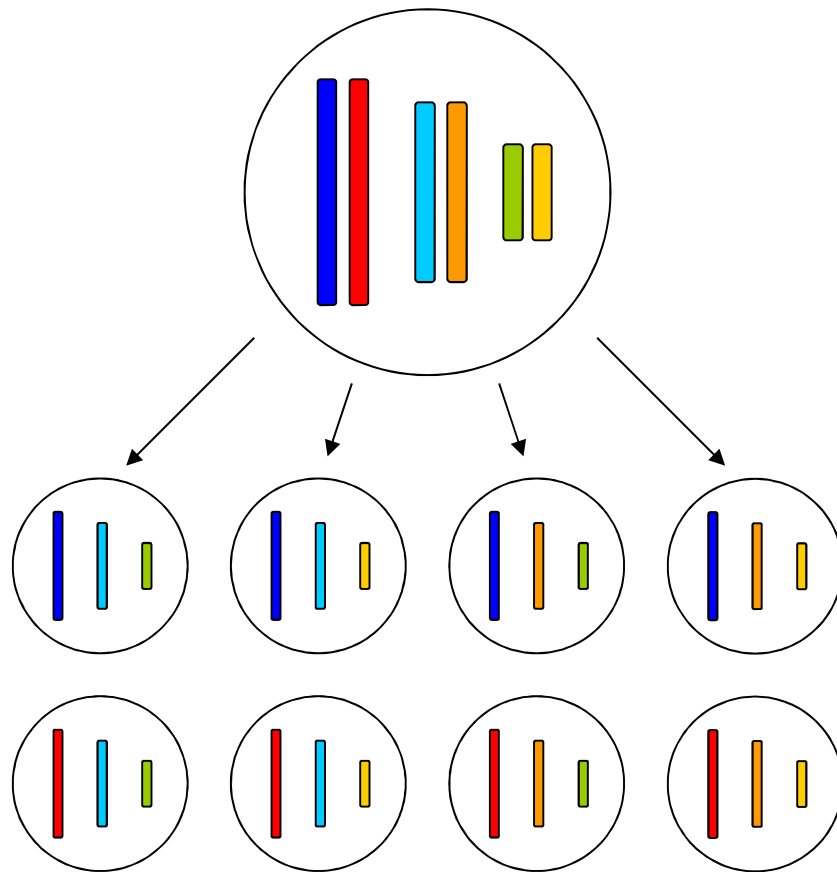


- Pourquoi ?

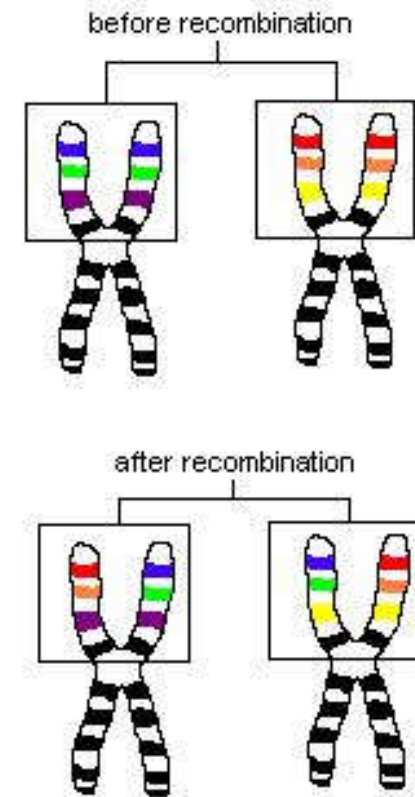
# Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

- Ce que fait le sexe : la méiose

## Mélange de chromosomes



## Recombinaison



# Pourquoi faire de la reproduction sexuée / asexuée ?

## □ Les avantages du sexe: Coévoluer avec les autres espèces

*Just at this moment, somehow or other, they began to run.*

*Alice never could quite make out what the Queen went so fast for, but she thought she had better run, too. So she began to run, too. But she was so slow, she thought she had better run, too.*

*The most curious part of the race was that, no matter how fast they went, they never seemed to pass anything. Alice was so slow, she thought she had better run, too.*

*Not that Alice had any idea of what she was running for, but she thought she had better run, too.*

*'Nearly there!' thought Alice, and almost as she said this, she saw the Queen running towards her.*

*'Now! Now!' cried the Queen, and they ran on, till suddenly they were both out of breath.*

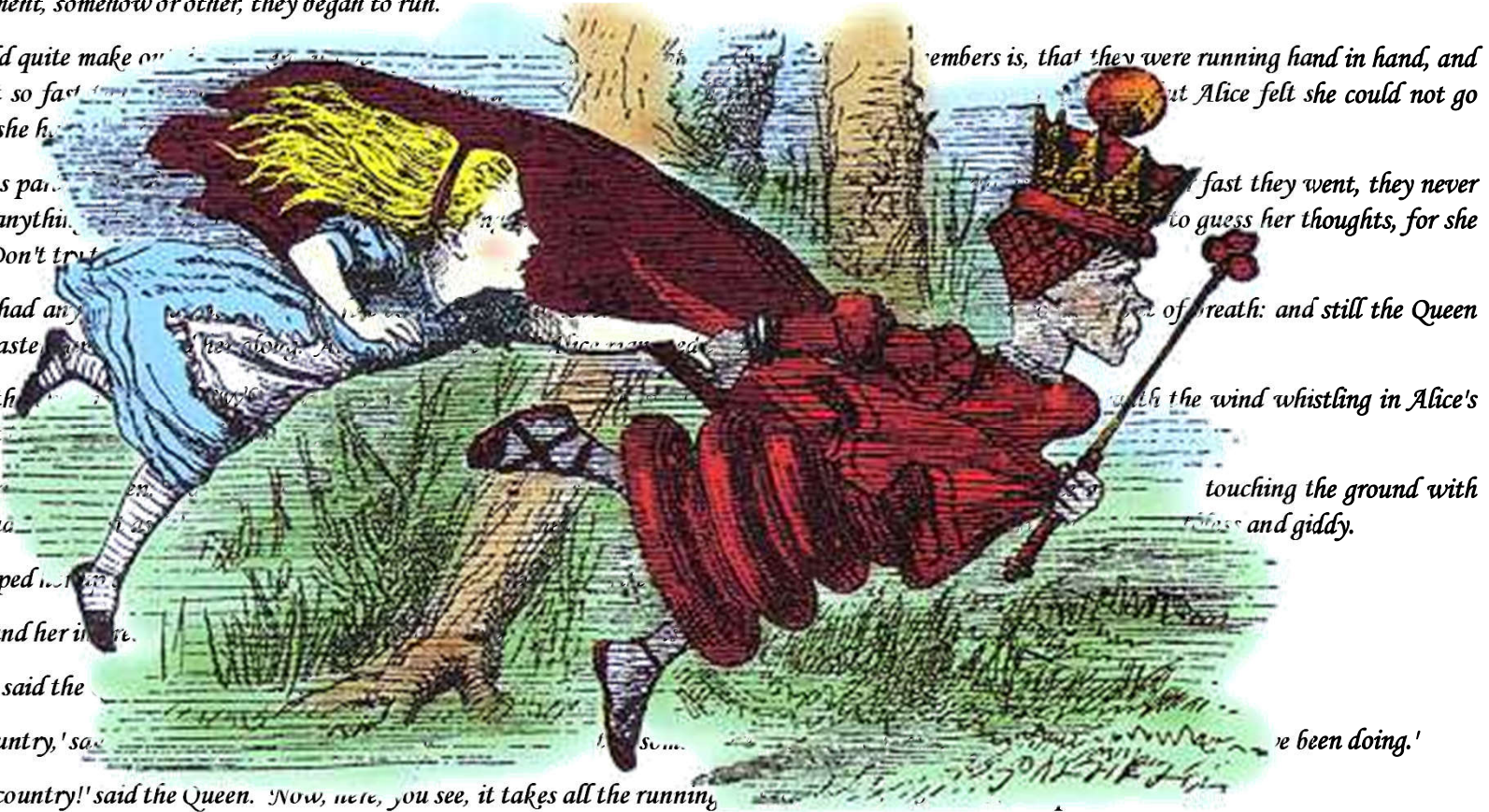
*The Queen propped up her head with her hand, and Alice looked round her in surprise.*

*'Of course it is,' said the Queen.*

*'Well, in our country,' said the Queen.*

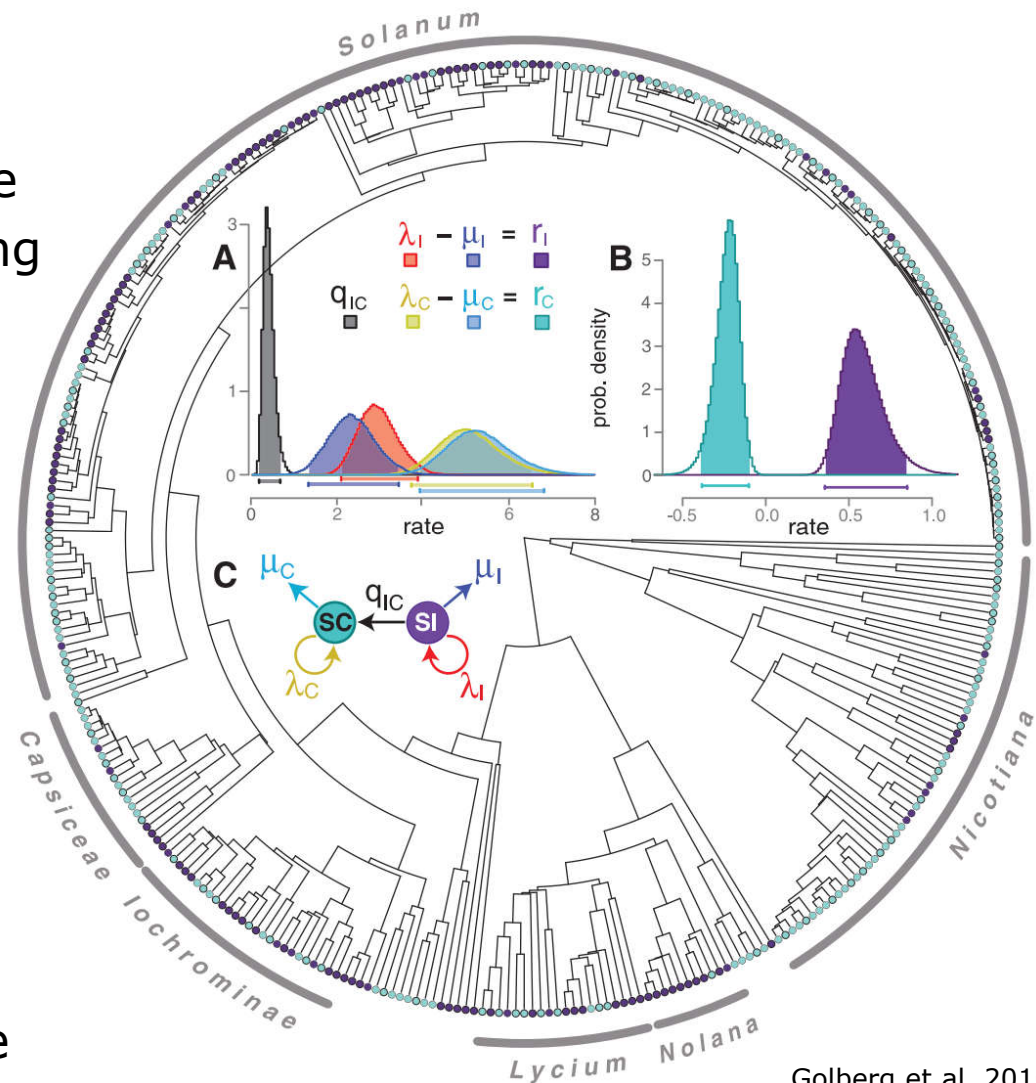
*'A slow sort of country!' said the Queen. 'Now, here, you see, it takes all the running you can do to keep in the same place. And, when it's all over, you've still got to walk home!'*

*If you want to get somewhere else, you must run at least twice as fast as that!'*



# 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

