

Colloque du 21 juin 2017

## LES RELATIONS PLANTES / POLLINISATEURS : QUELLE HISTOIRE EVOLUTIVE ?



# INTRODUCTION



Etoile de Madagascar, *Angraecum sesquipedale* (Orchidacées) - Sphinx, *Xanthopan morgani* (Lépidoptères)

<https://www.youtube.com/watch?v=fwB5gDBgOYs>

# INTRODUCTION

Relation plante/pollinisateur **→** Histoire évolutive de cette relation  
**(observée)** **(reconstruite)**

- Approche historique → Partie I
- Approches scientifiques contemporaines → Parties II et III

# I – L’histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace

## 1 – Quelques repères historiques

**1862 : Darwin reçoit une Orchidée,  
l’étoile de Madagascar et s’en étonne !  
« Good Heavens what insect can suck it »**



*Angraecum sesquipedale*

**1862 : Darwin prédit l’existence  
d’un papillon pollinisateur  
à très longue trompe.  
1867 : Wallace appuie et explicite  
les propos de Darwin.**



Etoile de Madagascar,  
*Angraecum sesquipedale*,  
et son pollinisateur supposé, un sphinx  
(article de Wallace)

# I – L’histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace

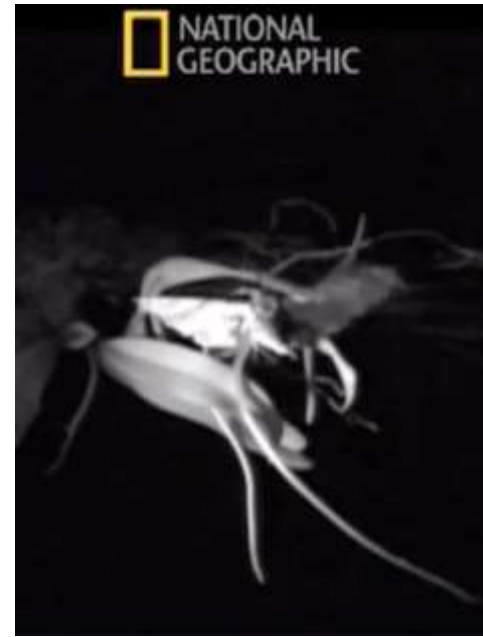
## 1 – Quelques repères historiques

1903 : Découverte d’un papillon,  
candidat à la pollinisation



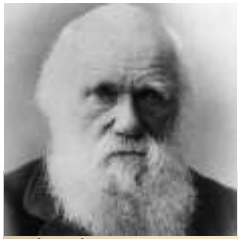
*Xanthopan morgani praedicta*  
découvert en 1903

1993-1997 : Premières photos *in situ*  
de l’interaction *Angraecum/Xanthopan*  
2004 : Premier film



# **1 – L'histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace**

2 – Construction de la théorie de la coévolution  
plante/pollinisateur



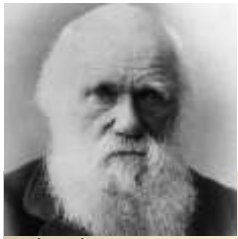
Charles Darwin  
(1809-1882)

ON  
THE VARIOUS CONTRIVANCES  
BY WHICH  
BRITISH AND FOREIGN ORCHIDS  
ARE  
FERTILISED BY INSECTS,  
AND ON THE GOOD EFFECTS OF INTERCROSSING.  
By CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.  
WITH ILLUSTRATIONS.  
LONDON :  
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.  
1862.

WISSELE LIBRARY  
The right of Translation is reserved.

« Quelle peut-être l'utilité, peut-on se demander, d'un nectaire d'une longueur aussi disproportionnée ? Nous devons, je pense, envisager que la fécondation de la plante dépend de cette longueur et de la présence de nectar uniquement dans l'extrémité inférieure et effilée. Il est, cependant, surprenant qu'un quelconque insecte soit capable d'atteindre le nectar. Nos sphinx anglais ont un proboscis aussi long que leur corps ; **mais à Madagascar, il doit y avoir des papillons de nuit capables d'une extension à une longueur comprise entre dix et onze pouces [25,4 et 27,9 cm] ! »**

**Darwin C.,** *On the various contrivances by which orchids are fertilised by insects*, London : John Murray, Albemarle street, 1862 (traduction personnelle).



Charles Darwin  
(1809-1882)

ON  
THE VARIOUS CONTRIVANCES  
BY WHICH  
BRITISH AND FOREIGN ORCHIDS  
ARE  
FERTILISED BY INSECTS,  
AND ON THE GOOD EFFECTS OF INTERCROSSING.

By CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.

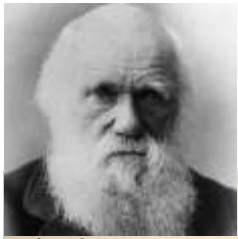
WITH ILLUSTRATIONS.

LONDON :  
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.  
1862.

WINDSOR LIBRARY  
The right of Translation is reserved.

« Alors que certains papillons de nuit de Madagascar devinrent plus gros par sélection naturelle en lien avec leurs conditions générales de vie, au stade larvaire ou au stade adulte, ou bien alors que la trompe seule s'allongea pour obtenir du [nectar] d'*Angraecum* et d'autres fleurs à long tube, **les individus d'*Angraecum* qui avaient les plus longs nectaires (et la longueur des nectaires varie beaucoup chez certaines Orchidées), et qui, par conséquence, forcèrent les papillons à introduire leur trompe jusqu'à l'extrême fond, auraient été les mieux pollinisés. Ces plantes produiraient plus de graines, et les semis hériteraient généralement de longs nectaires ; et il en serait ainsi lors des générations successives de plante et de papillon.** Ainsi, il apparaîtrait qu'il y aurait eu une course à l'allongement entre le nectaire d'*Angraecum* et la trompe de certains papillons de nuit ; mais *Angraecum* a triomphé car elle fleurit et abonde dans les forêts de Madagascar, et continue à perturber chaque papillon dans l'insertion de sa trompe aussi profondément que possible afin de capter la dernière goutte de nectar. »





Charles Darwin  
(1809-1882)

ON  
THE VARIOUS CONTRIVANCES  
BY WHICH  
BRITISH AND FOREIGN ORCHIDS  
ARE  
FERTILISED BY INSECTS,  
AND ON THE GOOD EFFECTS OF INTERCROSSING.

By CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.

WITH ILLUSTRATIONS.

LONDON :  
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.  
1862.

WINDSOR LIBRARY  
The right of Translation is reserved.

« Alors que certains papillons de nuit de Madagascar devinrent plus gros par sélection naturelle en lien avec leurs conditions générales de vie, au stade larvaire ou au stade adulte, **ou bien alors que la trompe seule s'allongea pour obtenir du [nectar] d'Angraecum et d'autres fleurs à long tube**, les individus d'Angraecum qui avaient les plus longs nectaires (et la longueur des nectaires varie beaucoup chez certaines Orchidées), et qui, par conséquence, forcèrent les papillons à introduire leur trompe jusqu'à l'extrême fond, auraient été les mieux pollinisés. Ces plantes produiraient plus de graines, et les semis hériteraient généralement de longs nectaires ; et il en serait ainsi lors des générations successives de plante et de papillon. **Ainsi, il apparaîtrait qu'il y aurait eu une course à l'allongement entre le nectaire d'Angraecum et la trompe de certains papillons de nuit** ; mais Angraecum a triomphé car elle fleurit et abonde dans les forêts de Madagascar, et continue à perturber chaque papillon dans l'insertion de sa trompe aussi profondément que possible afin de capter la dernière goutte de nectar. »

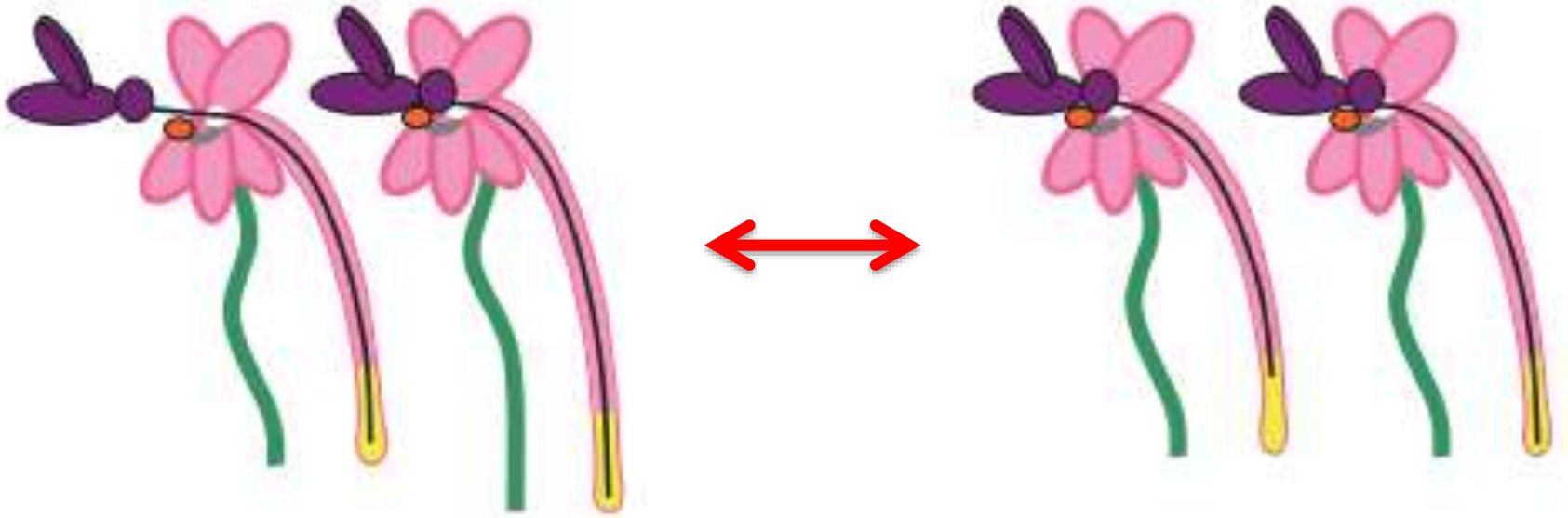


Alfred R. Wallace  
(1823-1913)



« Il y a une orchidée malgache – l'*Angraecum sesquipedale* – avec un nectaire immensément long et profond. Comment un organe aussi extraordinaire a-t-il pu se développer ? L'explication de M. Darwin est la suivante. Le pollen de cette fleur ne peut être déplacé que par le proboscis de quelques très gros papillons de nuit essayant d'obtenir du nectar au fond du contenant. Les papillons de nuit avec le plus long proboscis feraient cela le plus efficacement ; ils seraient récompensés pour leurs grandes pièces buccales en obtenant le plus de nectar ; tandis que de l'autre côté, les fleurs avec les plus profonds nectaires seraient les mieux fécondées, par les plus gros papillons de nuit les préférant. En conséquence, les Orchidées aux plus longs nectaires et les papillons de nuit avec les plus grandes pièces buccales conféreraient l'un à l'autre un grand avantage dans la « bataille pour la vie ». Cela tendrait à leur perpétuation respective et à l'allongement constant des nectaires et des pièces buccales. »

## Une tentative de schéma pour rendre compte de la théorie



Les plantes avec le plus long éperon à nectar  
ont une meilleure valeur sélective

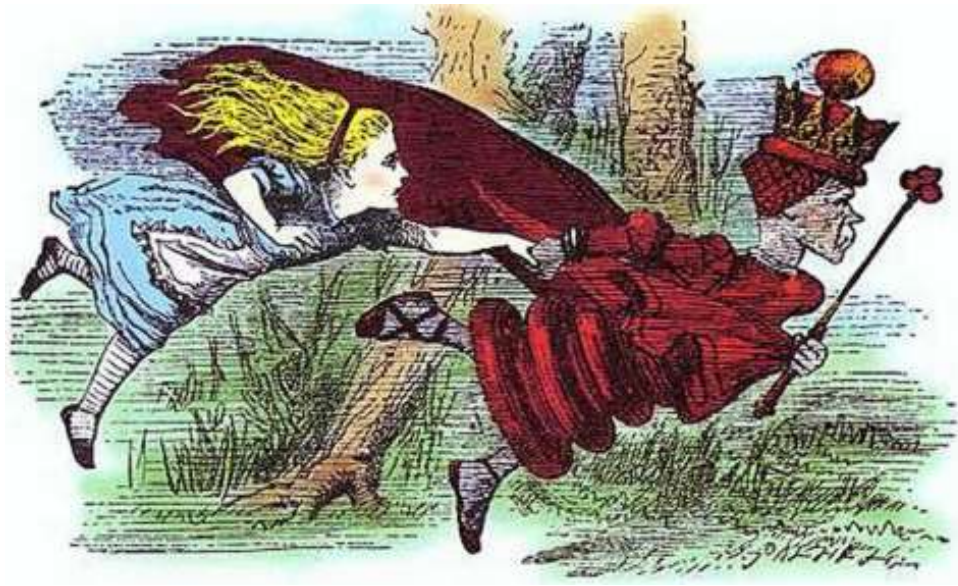
Les papillons avec les plus longues pièces buccales  
ont une meilleure valeur sélective

**Il y a une sélection réciproque entre les populations de plante et de papillon  
provoquant une augmentation moyenne simultanée et graduelle  
des pièces buccales et de l'éperon.**

# I – L'histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace

## 3 – Portée de la théorie

- Ehrlich et Raven, 1964 : invention du terme coévolution
- Van Valen, 1972 : théorie de la reine rouge



# I – L'histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace

## 4 – Remise en question du couple *Angraecum/Xanthopan* comme modèle de coévolution



Wasserthal, 1997

« Les orchidées s'adaptèrent à différentes espèces de sphinx avec des trompes incroyablement longues qui évoluèrent d'abord pour empêcher les attaques de prédateur durant les visites sur des fleurs moins spécialisées. » Wasserthal L. T., 1997, Bot. Acta, 110

# I – L’histoire évolutive des relations plantes/pollinisateurs : les apports de Darwin et Wallace

## 4 – Remise en question du couple *Angraecum/Xanthopan* comme modèle de coévolution

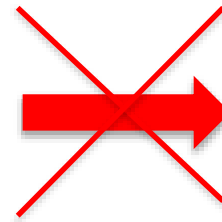


Wasserthal, 1997

« Il n’y a pas de dépendance mutuelle entre les deux partenaires, puisque l’existence de l’orchidée (succès reproducteur) dépend de la coexistence d’un sphinx à très longue trompe, tandis que le papillon pourrait exister en l’absence de fleurs profondes puisqu’il est aussi capable de se nourrir sur différentes fleurs courtes » Jermy T., 1999, Deep flowers for long tongues: a final word, Tree, Vol. 14

## Condition nécessaire à l'application de la théorie de la coévolution

Interaction entre deux populations



coévolution

Dépendance mutuelle entre deux populations



coévolution

## II – La coévolution plante/pollinisateur : comment la tester ?

La relation *Zaluzianskya microsiphon* / *Prosoeca ganglbaueri* :  
résultat d'une coévolution ?



*Prosoeca ganglbaueri*  
(Diptère)

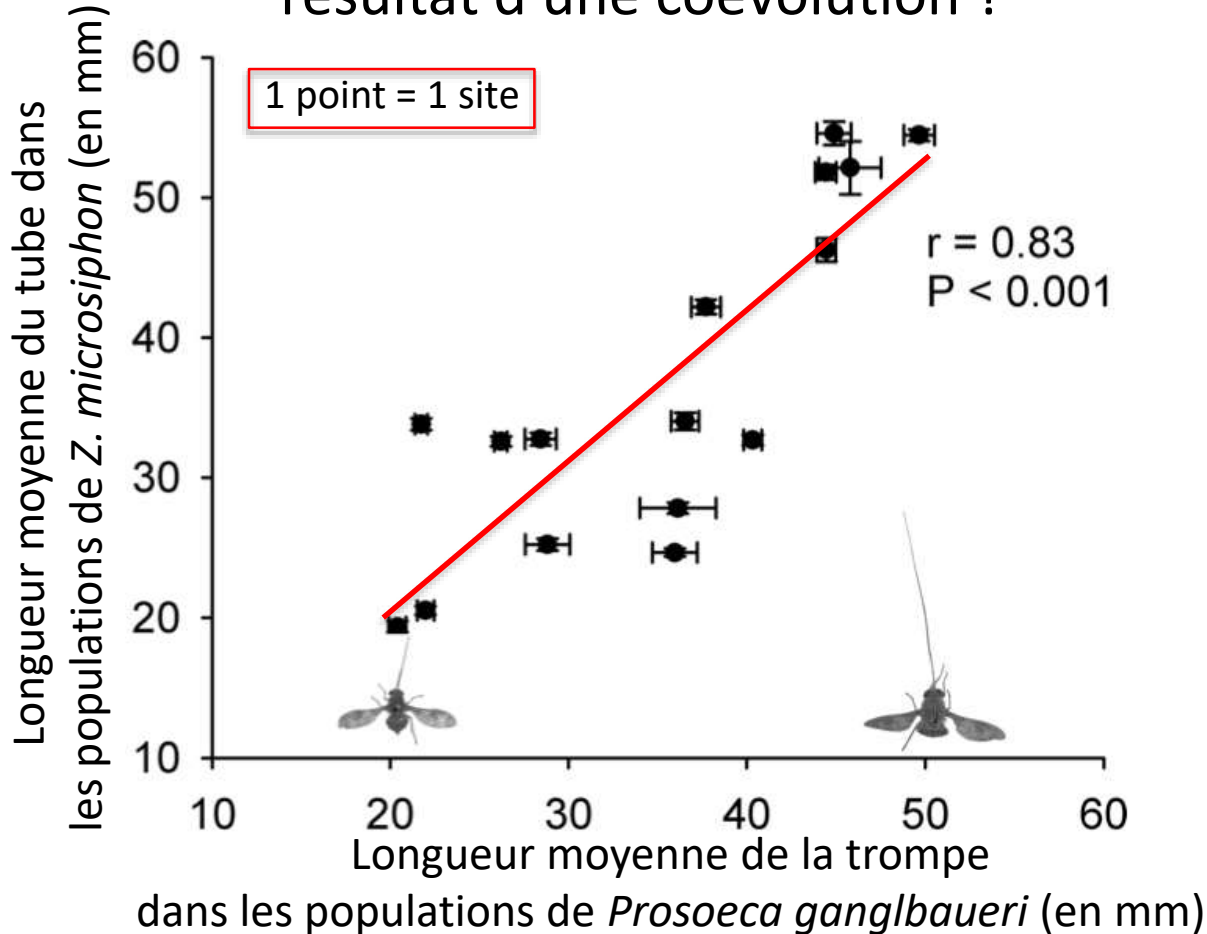
*Zaluzianskya microsiphon*  
(Scrophulariacée)



## II – La coévolution plante/pollinisateur : comment la tester ?



résultat d'une coévolution ?



Corrélation entre les deux caractères + non corrélation de chacun des caractères avec d'autres facteurs

→ Lien causal entre l'évolution des deux caractères

# II – La coévolution plante/pollinisateur : comment la tester ?

résultat d'une **coévolution** ? **OUI**

- Le succès reproducteur de la plante dépend de la mouche :

## Expériences de transfert

	Plantes à <b>long tube</b> sur un site de mouches à <b>longue trompe</b>	Plantes à <b>tube court transférées</b> sur un site de mouches à <b>longue trompe</b>
Nombre moyen de graines par fleur	29,5 +/- 4,2 (n=20)	8,5 +/- 4,2 (n=20)

- Le succès reproducteur de la mouche dépend de la plante :

non démontré expérimentalement mais les fleurs de *Z. microsiphon* sont la source de nourriture quasi-exclusive de *P. ganglbaueri*.

→ **Les pressions de sélection sont réciproques**



# III – Quels modèles alternatifs ?

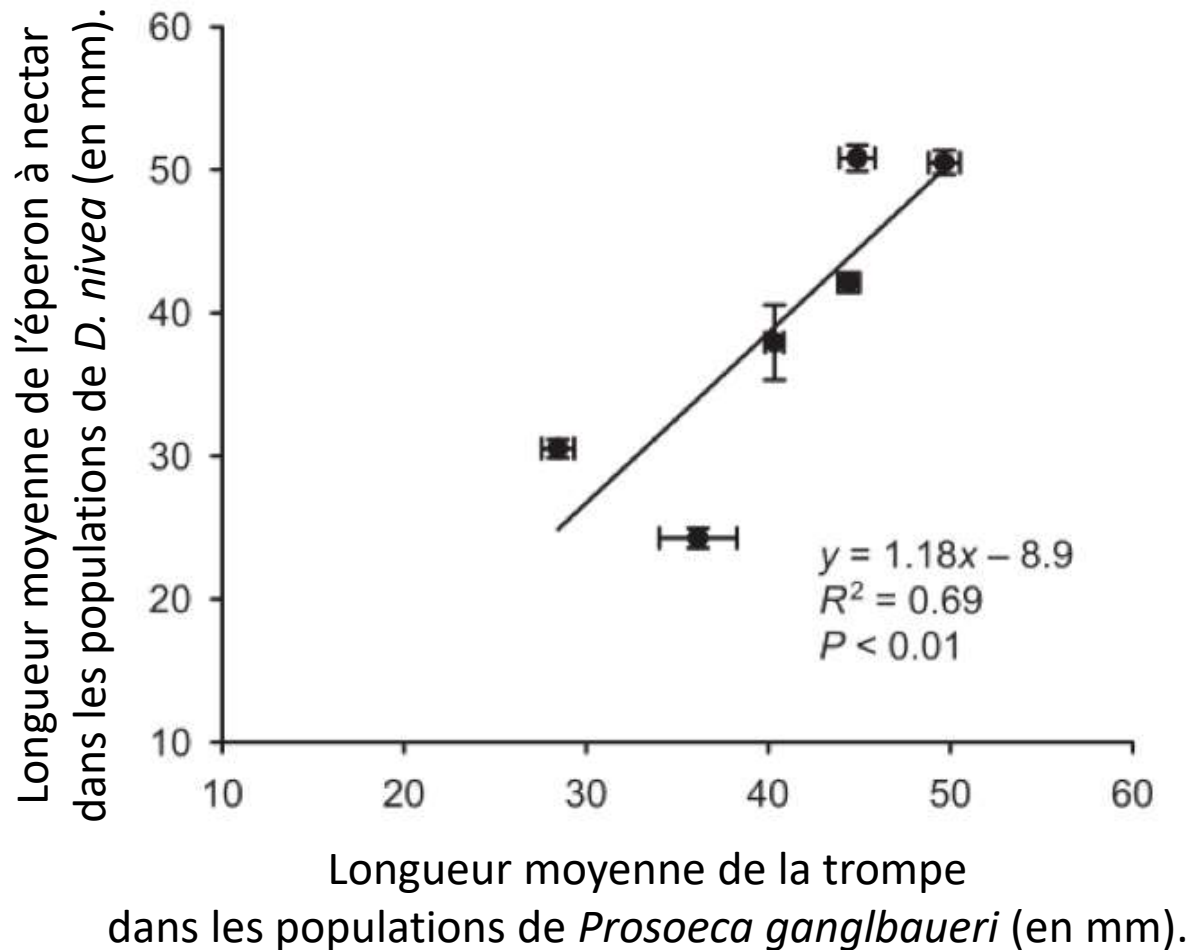
## 1 – Relation *Disa nivea* / *Prosoeca ganglbaueri* : résultat d'une coévolution ?

*Prosoeca ganglbaueri*  
(Diptère)



*Disa nivea*  
(Orchidacée)

# 1 - Relation *Disa nivea* / *Prosoeca ganglbaueri* : résultat d'une coévolution ?



Corrélation entre les deux caractères + non corrélation de chacun des caractères avec d'autres facteurs

→ Lien causal entre l'évolution des deux caractères

# 1 - Relation *Disa nivea* / *Prosoeca ganglbaueri* : résultat d'une ~~coévolution~~ ?

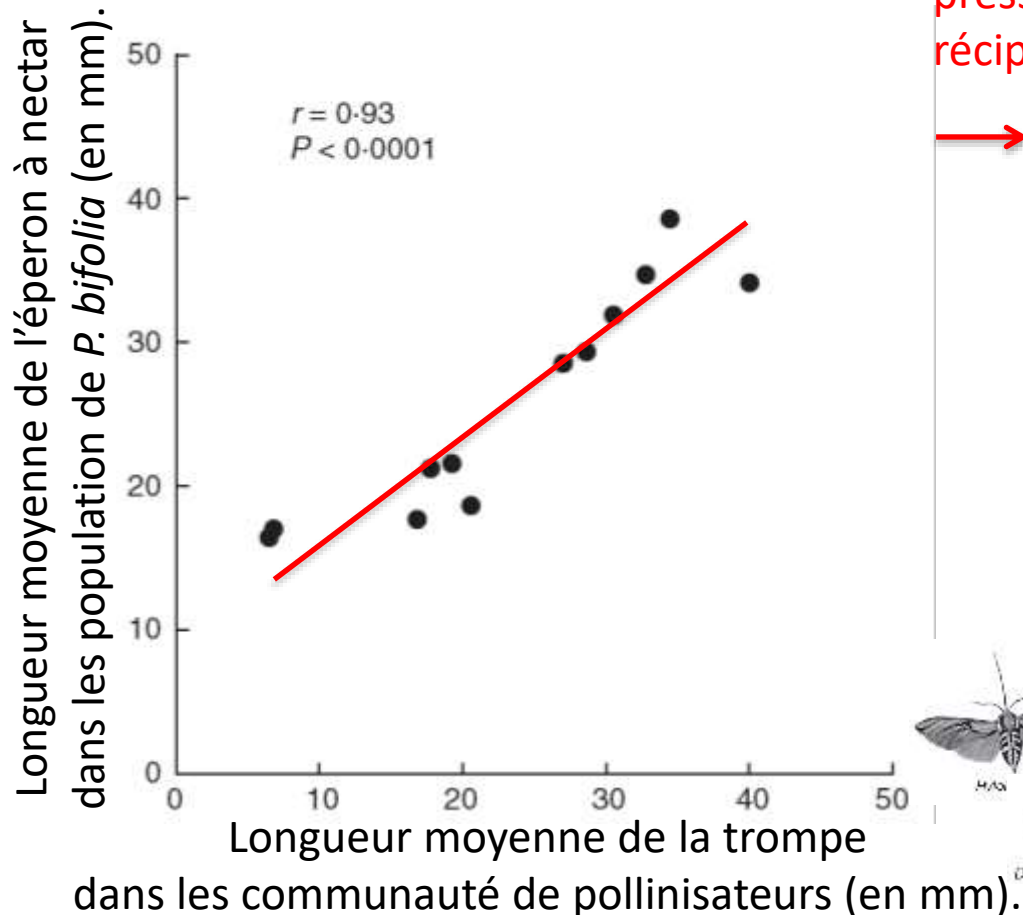
*Prosoeca ganglbaueri*  
(Diptère)



*Disa nivea*  
(Orchidacée)

L'orchidée dépend de la mouche mais la réciproque n'est pas vraie...  
**Pression de sélection unilatérale !**

## 2 - Relation *Platanthera bifolia* / papillons



Toute une communauté peut exercer une pression de sélection (avec ou sans réciprocité)

→ **Concept de coévolution diffuse**



### III – Quels modèles alternatifs ?

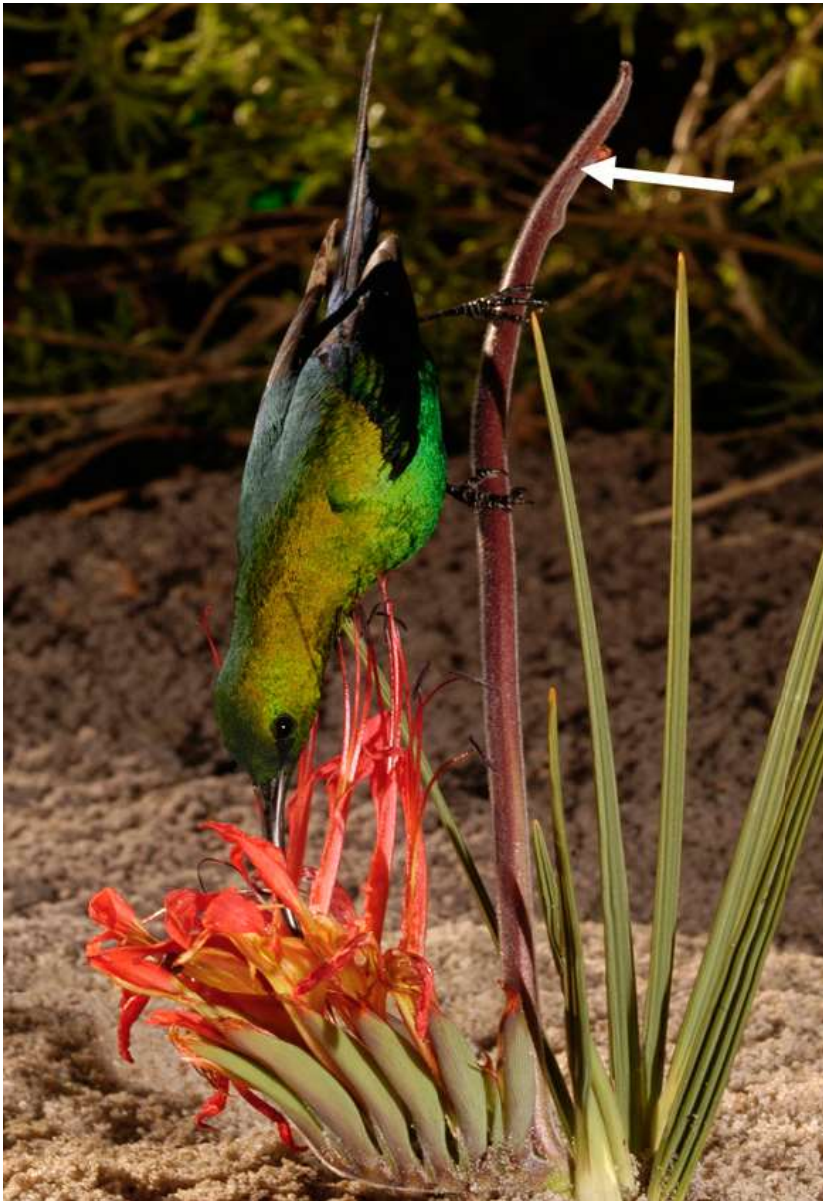
#### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa*

*Nectarinia famosa*  
Souimanga malachite  
(Nectariniidés)



*Babiana ringens*  
(Iridacées)

### 3 – Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :



**L'histoire des relations  
plante/pollinisateur peut être  
conditionnée par des pressions de sélection  
extérieures au couple lui-même...  
(ici pression d'herbivorie)**



# CONCLUSION

- La coévolution se teste ! Elle implique notamment une dépendance mutuelle entre partenaires.
- Tout n'est pas coévolution : il y a d'autres histoires évolutives possibles.
- Un regard critique sur les programmes de TS

Extrait du BO – Thème 1-A-5 – L'exemple de la vie fixée chez les plantes

L'organisation florale, contrôlée par des gènes de développement, et le fonctionnement de la fleur permettent le rapprochement des gamètes entre plantes fixées.

La pollinisation de nombreuses plantes repose sur une collaboration animal pollinisateur/plante produit d'une coévolution. À l'issue de la fécondation, la fleur se transforme en fruits contenant des graines. La dispersion des graines est nécessaire à la survie et à la dispersion de la descendance. Elle repose souvent sur une collaboration animal disséminateur/plante produit d'une coévolution.

*Objectif et mots-clés. Fleur, pistil (ovaire, ovule), étamine, pollen. Fruit, graine. Pollinisation par le vent et les animaux.*

*[Limites. Seule une vision élémentaire de la reproduction sexuée est ici attendue. Sont explicitement hors programme : la structure du grain de pollen, sa formation, les mécanismes de la double fécondation, les*

*mécanismes de formation de la graine ou du fruit. La coévolution est constatée comme un résultat, mais ses mécanismes ne sont pas demandés. La connaissance exhaustive des gènes du développement floral.]*

*Pistes. Études de coévolution. Étude des mécanismes de transformation de la fleur en fruit.*

# BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON B. *et al.* 2005. Specialized bird perch aids cross-pollination. *Nature – Brief communication* 435.

ANDERSON B. & JOHNSON SD., 2007. The geographical mosaic of coevolution in a plant-pollinator mutualism. *Evolution* 62-1: 220-225.

ANDERSON B. & JOHNSON SD., 2009. Geographical covariation and local convergence of flower depth in a guild of fly-pollinated plants. *New phytologist* 182: 533-540.

ARDITTI J. *et al.*, 2012. ‘Good Heavens what insect can suck it’ – Charles Darwin, *Angraecum sesquipedale* and *Xanthopan morganii praedicta*. *Botanical Journal of the Linnean Society* 169: 403-432.

BOBERG E. *ET AL.* 2014. Pollinator shifts and the evolution of spur length in the moth-pollinated orchid *Platanthera bifolia*. *Annals of Botany* 113: 267–275.

DARWIN CR. 1862. *The various contrivances by which British and foreign orchids are fertilised by insects and on the good effects of intercrossing*. London : John Murray.

DE WAAL *ET AL.* 2012. The effects of mammalian herbivory on inflorescence architecture in ornithophilous *Babiana ringens* (*Iridaceae*) : implications on the evolution of bird perch. *American Journal of Botany* 99(6): 1096–1103

JERMY T., 1999. Deep flowers for long tongues: a final word. *Trends in ecology and evolution* 14: 34.

WALLACE AR. 1867. *Creation by law*. *The Quaterly Journal of Science* 4: 471-488.

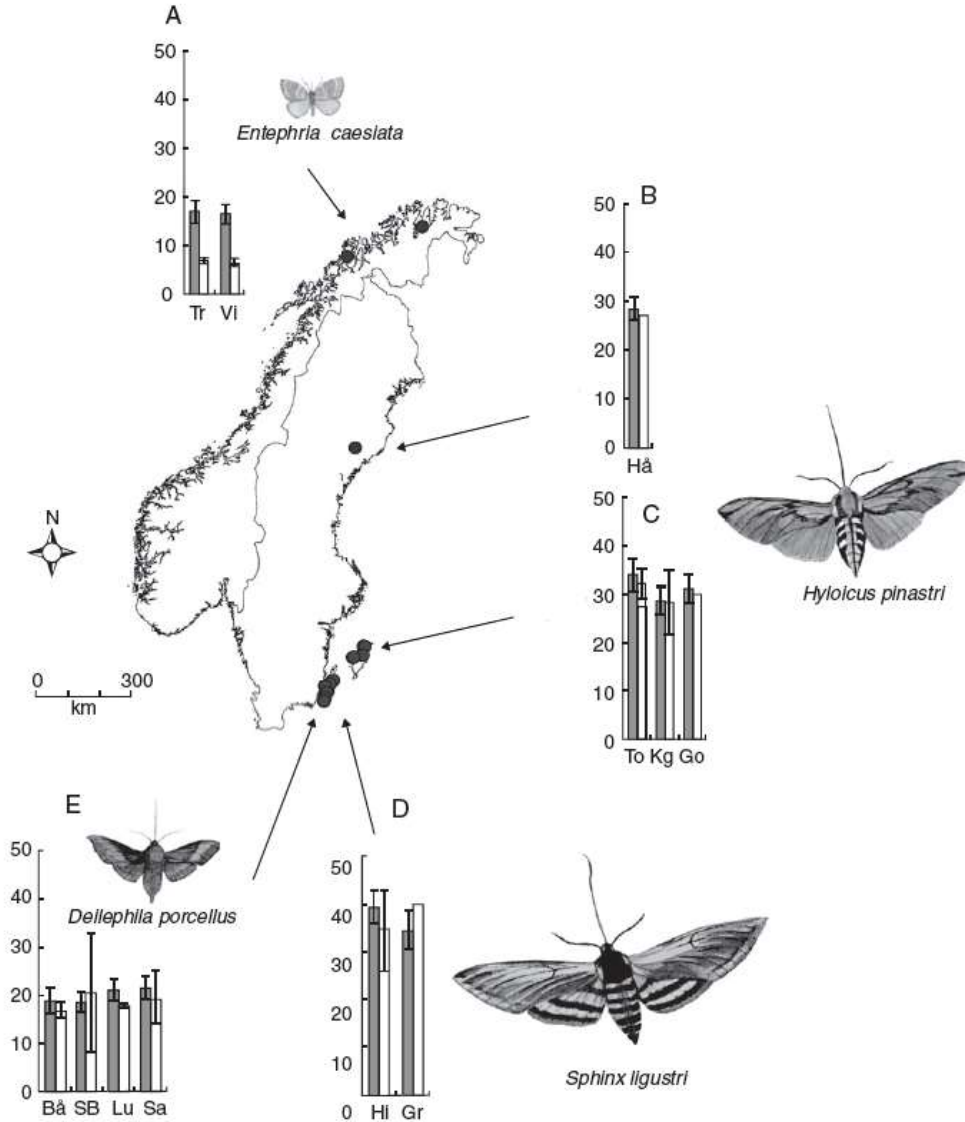
WASSERTHAL LT. 1997. The pollinators of the Malagasy star orchids *Angraecum sesquipedale*, *A. sororium*, and *A. compactum* and the evolution of extremely long spurs by pollinator shift. *Botanica acta* 110: 343-359.

## 2 - Relation *Platanthera bifolia* / papillons

- Résultat d'une coévolution ?



- Longueur moyenne de l'éperon à nectar des **populations de *P. bifolia*** en mm
- Longueur moyenne de la trompe dans les **communautés de pollinisateurs** en mm

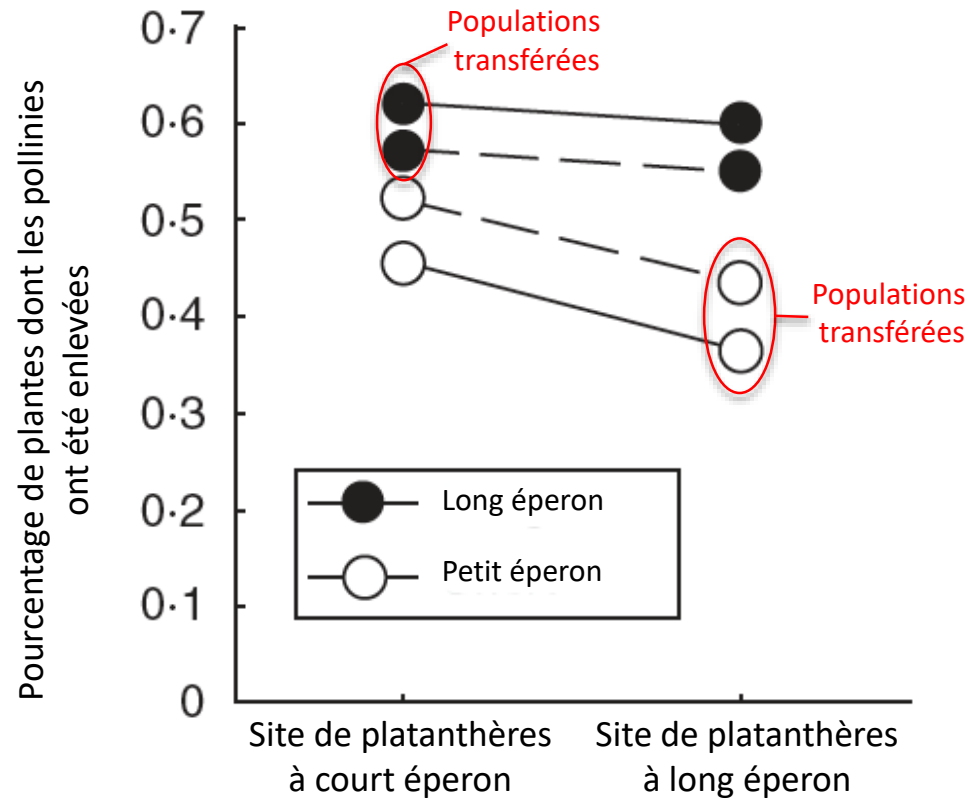


# La relation *Platanthera bifolia* / Sphinx

- Résultat d'une ~~coévolution~~ ?

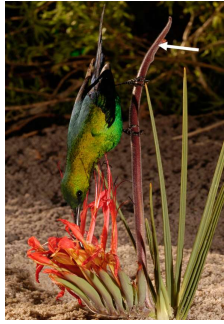


Expériences de transfert des Platanthères

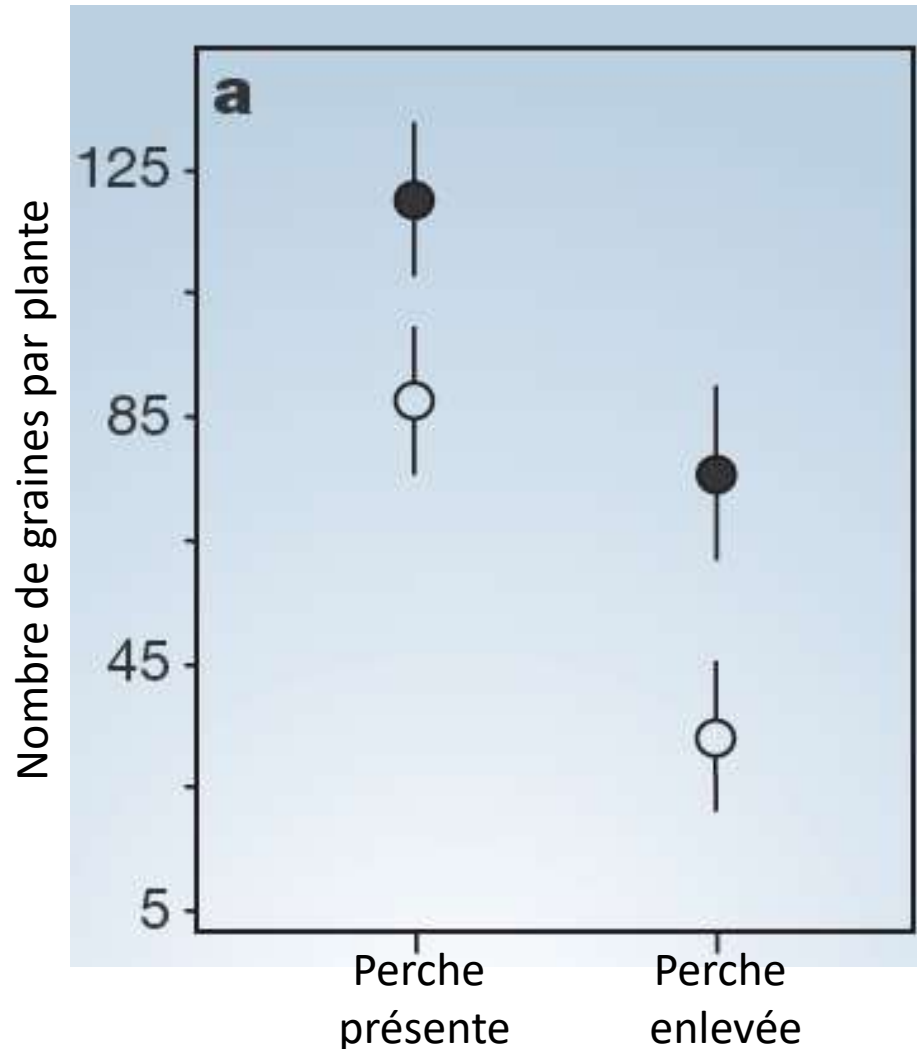


Le succès reproducteur des platanthères est affecté par la communauté de pollinisateurs.  
L'inverse n'est pas vrai.

### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :



- Résultat d'une ~~coévolution~~ ?



● Population A

○ Population B

Le succès reproducteur de *B. ringens* dépend de *N. famosa*

→ L'oiseau exerce une pression de sélection sur la plante

mais la réciproque n'a pas été démontrée...

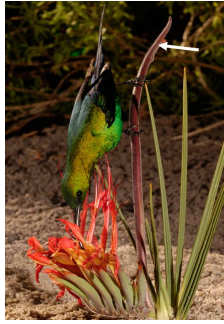
### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :

- La perche de *B. ringens*, résultat d'une pression de sélection exercée par *N. famosa* ?



### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :

- La perche de *B. ringens*, résultat d'une pression de sélection exercée par *N. famosa* ?

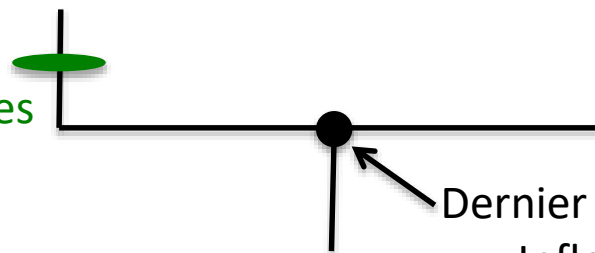


*B. ringens*



*B. hirsuta*

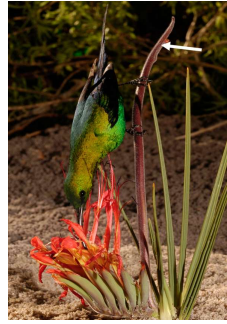
- Perche
- Fleurs basales



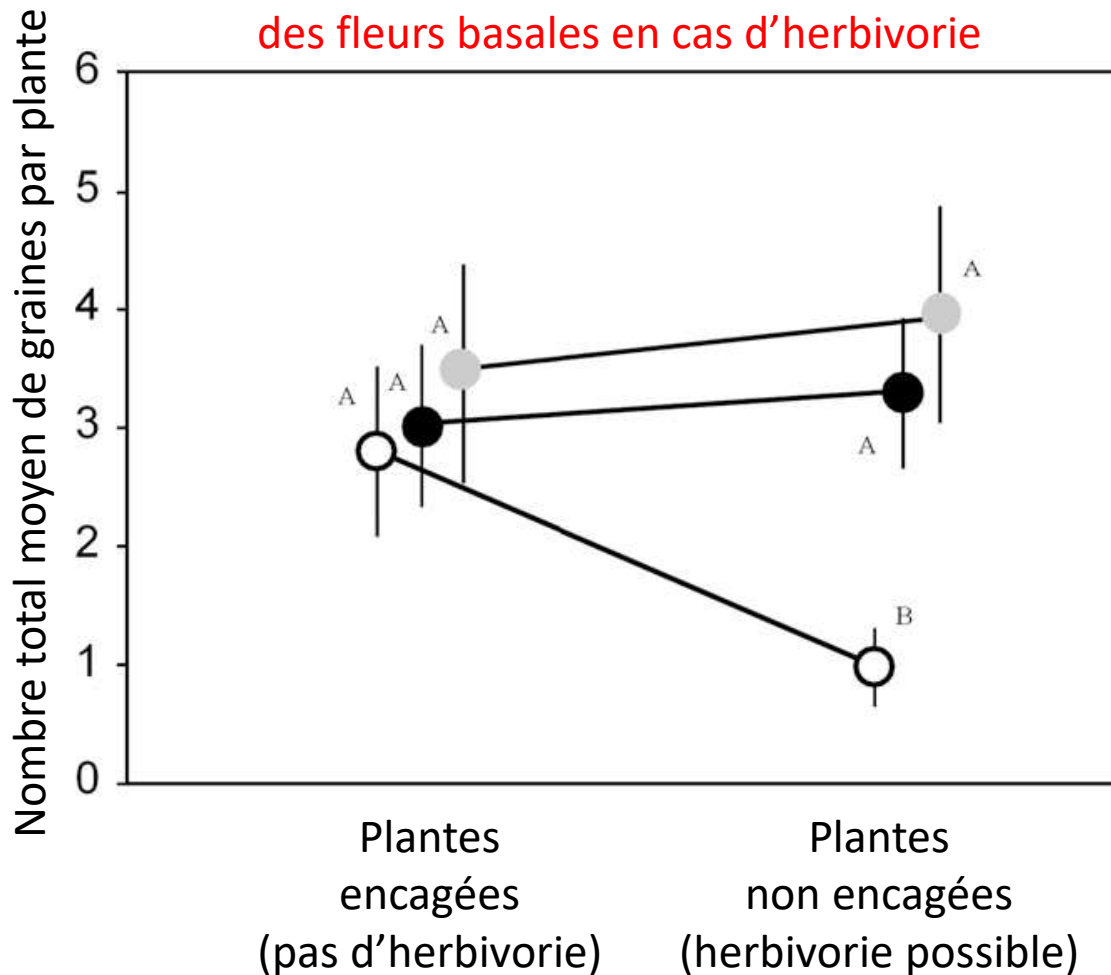
Dernier ancêtre commun avec une Inflorescence « classique »

### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :

- La perche de *B. ringens*, résultat d'une pression de sélection exercée par *N. famosa* ?



Meilleur succès reproducteur  
des fleurs basales en cas d'herbivorie



*B. hirsuta*  
non manipulé



*B. hirsuta*  
manipulé :  
uniquement des  
fleurs basales

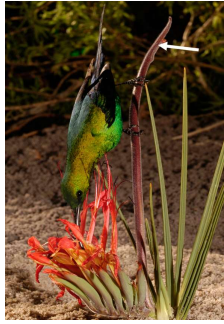


*B. hirsuta*  
manipulé :  
uniquement des  
fleurs apicales



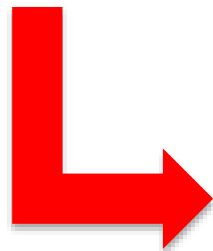
### 3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :

- La perche de *B. ringens*, résultat d'une pression de sélection exercée par *N. famosa* ? Pas que...



- Herbivorie
- Forte limitation par le phosphate
- Autres facteurs non exclus...
- Sélection stabilisante par le pollinisateur.

Quelles pressions de sélection ?



*B. ringens*



*B. hirsuta*

- Perche
- Fleurs basales



Dernier ancêtre commun avec une Inflorescence « classique »

Mercredi 21 juin 2017  
Auditorium de la Grande Galerie de l'Evolution du  
Museum National d'Histoire Naturelle, Paris

Colloque scientifique de l'AFPSVT

LES VEGETAUX REVISITES :  
APPROCHES SCIENTIFIQUES ET  
DIDACTIQUES

CONFÉRENCES :



# PERCEPTION ET SENSIBILITE CHEZ LES PLANTES

**Catherine Lenne**

Enseignant-chercheur



**UCA**  
UNIVERSITÉ  
Clermont  
Auvergne

# La SENSIBILITE en Biologie ?

« La capacité des êtres vivants à **percevoir** des stimuli, aussi bien internes qu'externes, à travers les **sens** »

Qui dit « SENSIBILITE » dit « SENS »

## Voyage au cœur de la SENSORI-MOTRICITÉ végétale

« SENS »

= organes de la perception

chez l'animal, qui le  
renseignent sur le monde

= VIE DE RELATION

*Et les plantes ?*

*Perçoivent-elles le monde ?*

*Ont-elles des SENS ?*

# Qu'est-ce que la SENSORI-MOTRICITÉ végétale ?

*Chez les plantes,  
ça bouge aussi ...*



La sensitive, *Mimosa pudica*

= mouvements **rapides**  
par variations de pression

Gravité  
unidirectionnelle

= mouvements **lents**  
de croissance



*Arabidopsis thaliana*



Le pois, *Pisum sativum*

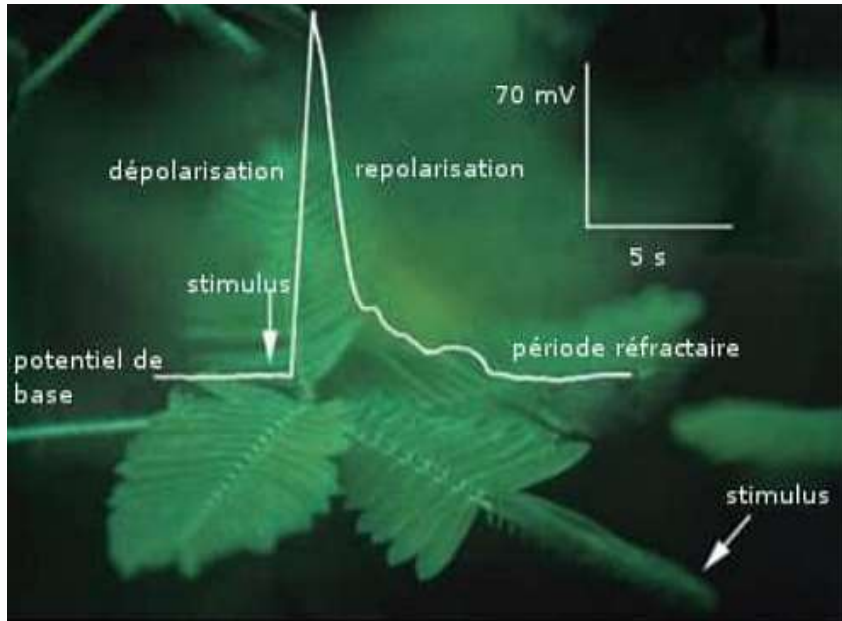


Lumière  
anisotrope

De la **SENSIBILITE**  
(toucher, gravité, lumière...)  
et de la **MOTRICITE**

# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

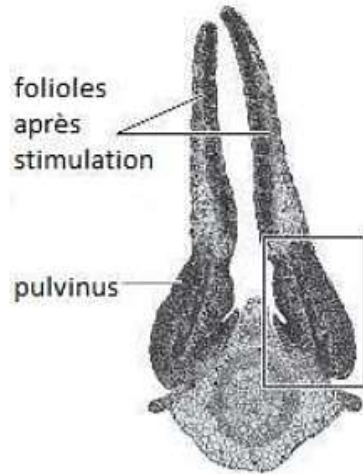
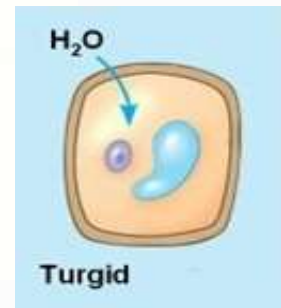
*La sensitive (Mimosa pudica)*



« flexor »



« extensor »

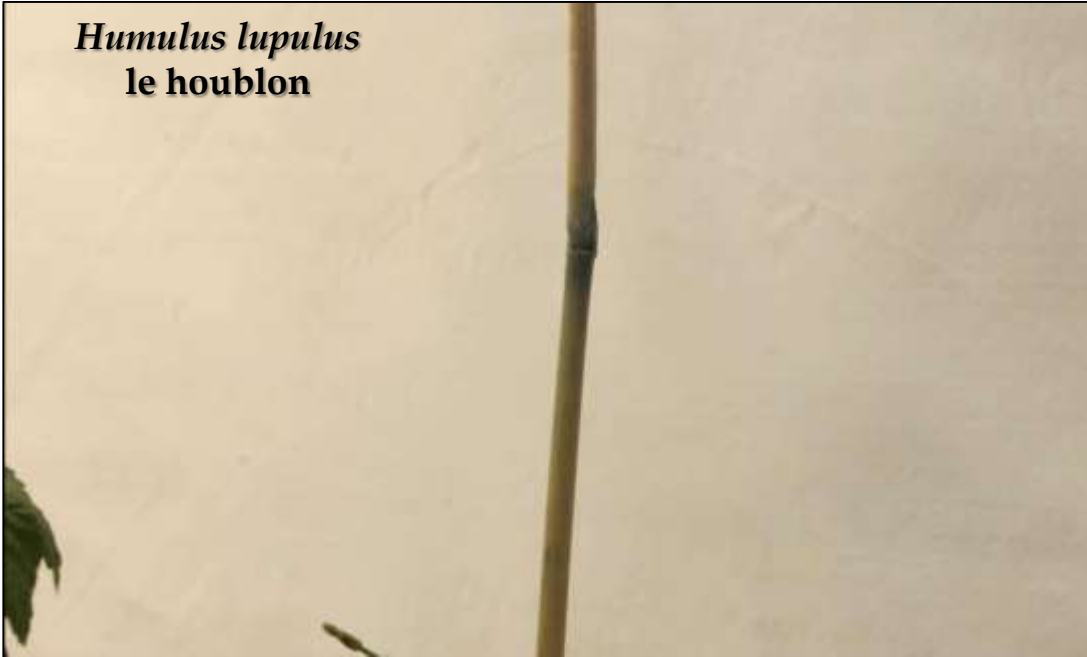


Signal électrique et  
MOUVEMENT RAPIDE par  
variations de pression (turgescence / plasmolyse)

THIGMONASTIE

# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

*Humulus lupulus*  
le houblon



**MOUVEMENT LENT** par  
croissance différentielle

**THIGMOMORPHOGENESE**

*Lonicera periclymenum*  
le chèvrefeuille



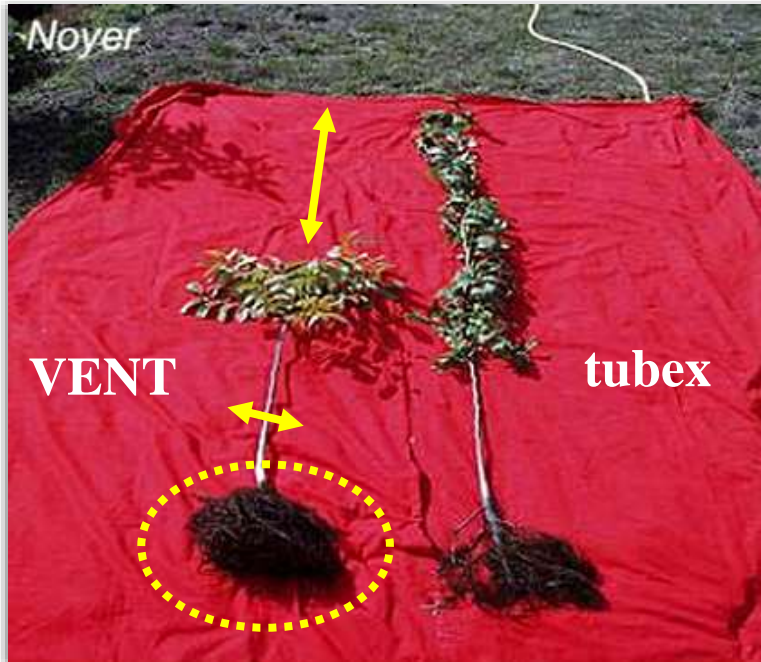
Clermont  
Auvergne

# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

Un sens *commun* ... la réponse des plantes au vent



Catherine  
Coutand



Croissance en longueur

Ancrage racinaire

Croissance en épaisseur



**THIGMOMORPHOGENESE**



Stéphane Ploquin



Bruno Moulia

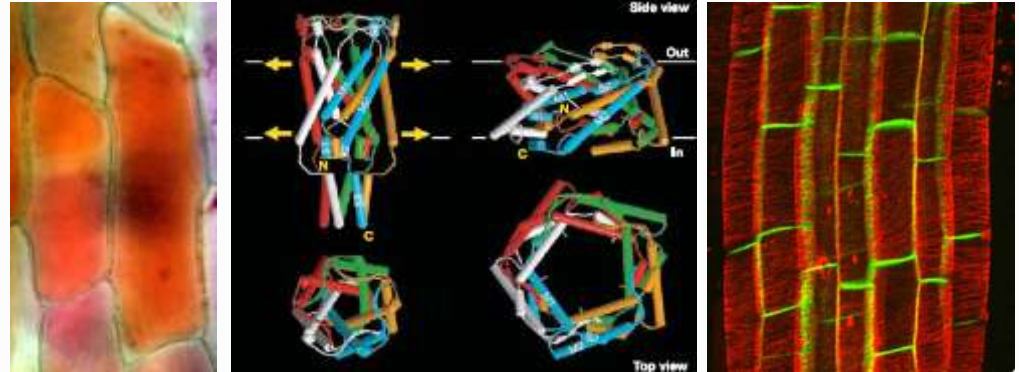


# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

Un sens « *diffus* » ...

- Un mécanisme analogue au nôtre, hérité ... des bactéries

➔ perception de la déformation

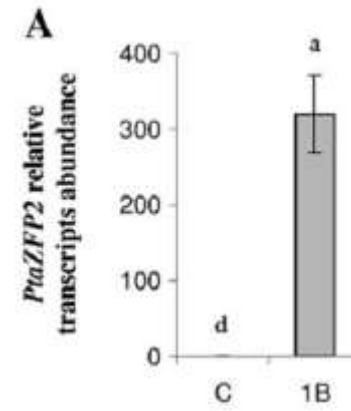


- Une extrême sensibilité

➔ **0,25 g perçus !**  
(contre 2g au moins chez l'homme...)

➔ **2000 gènes régulés** en réponse à une flexion (tige), dès 5 minutes

*Ex du gène Pta-ZFP2*



Nathalie Leblanc-Fournier

J. Exp. Bot 2010  
61, 9 : 2403-2412



La plante a le « **SENS MECANIQUE** »

Un corps **tactile** :

- qui **perçoit**
- qui **transfère des informations**



# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

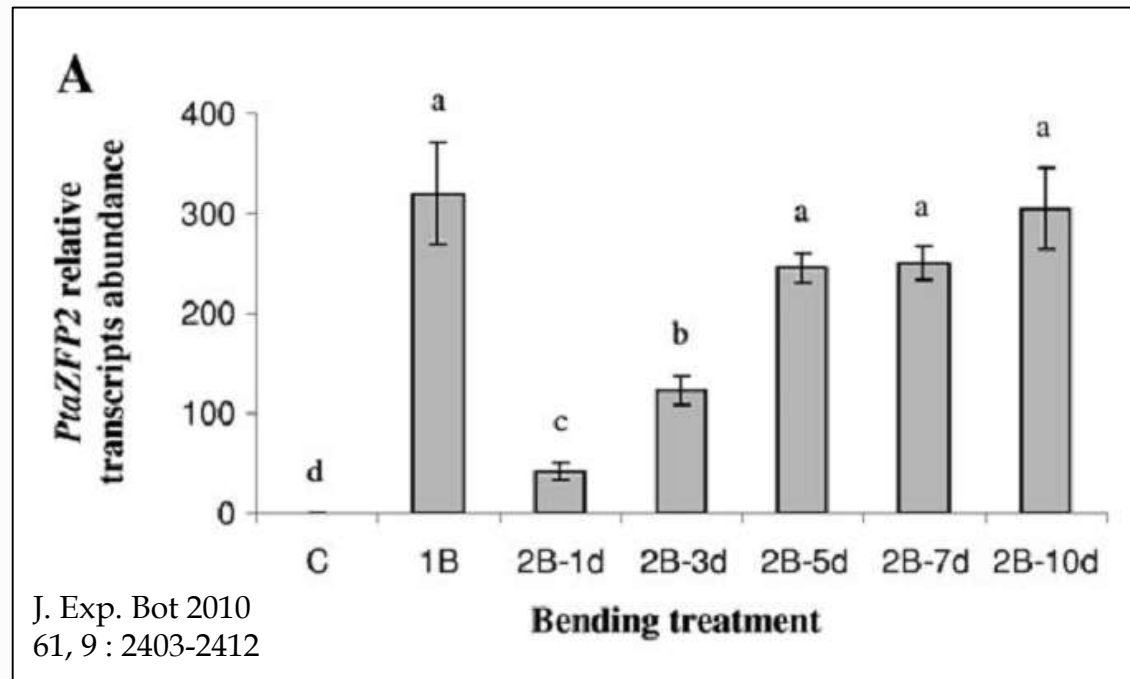
➔ 2000 gènes régulés en réponse à une flexion (tige), certains dès 5 min



Mélanie Decourteix



Nathalie Leblanc-Fournier



= ACCOMMODATION

# BILAN 1 : La THIGMOMORPHOGENESE

## = perception-réponse aux signaux mécaniques

La plante PERÇOIT le vent par la DÉFORMATION mécanique de ses cellules

La plante S'ACCLIMATE au vent :

- en **adaptant** sa croissance **en hauteur et en épaisseur** (allocation de biomasse)



- et se **désensibilise** lorsque les sollicitations se répètent

Intérêt écologique ? :

*ne pas « sur-répondre » aux coups de vent successifs*

*Différents régimes de vent étudiés : ce sont **les coups de vent inhabituels et ponctuels** plutôt que les régimes de vent continus (forts ou faibles) qui induisent une réponse de la plante.*

## II. Le SENS MECANIQUE au sens large



Mouvement par  
croissance  
différentielle



*De la sensibilité à la **GRAVITE***



Mouvement par  
retrait de maturation

Mouvement de redressement des tiges à la verticale :

**GRAVITROPISME NEGATIF**

# CONTRÔLE POSTURAL

## COURBURE + RECTIFICATION

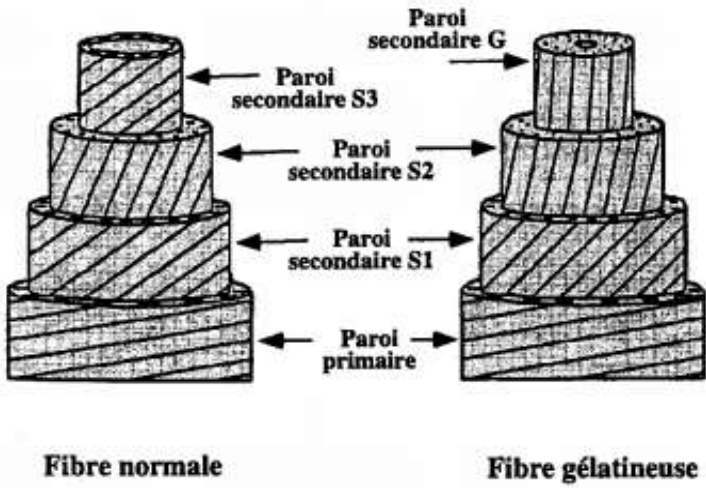
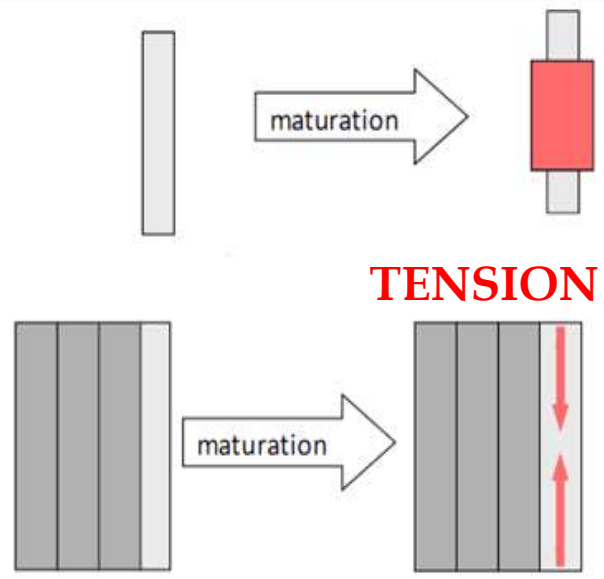
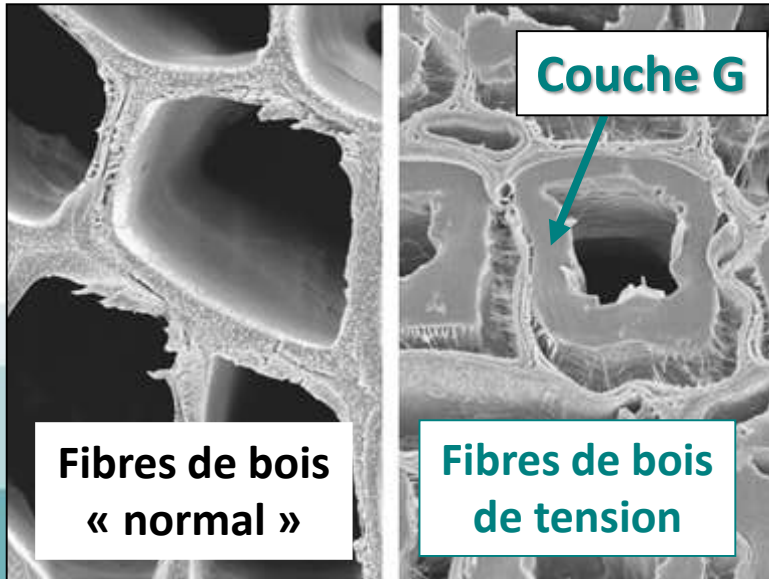
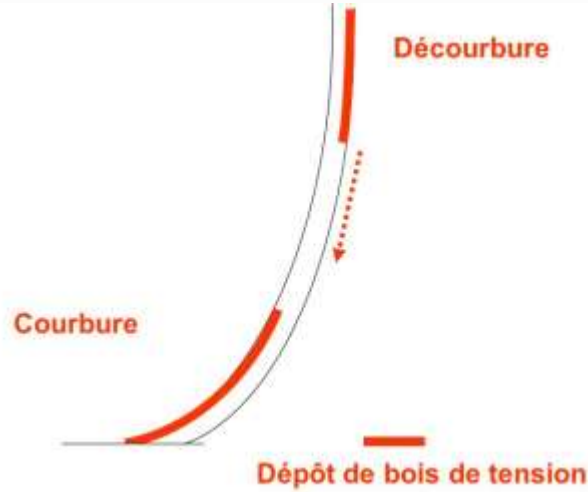
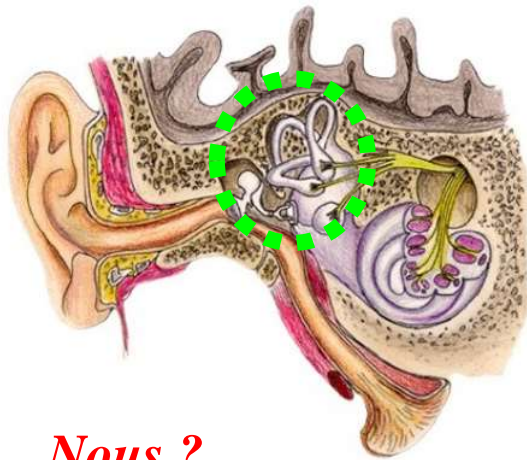


Figure 1. Structure de la paroi cellulaire d'une fibre normale et d'une fibre de bois de tension d'*Eucalyptus regnans* (F. v. M.), d'après Wardrop et Dadswell (1948) — *Cellular wall structure of normal and tension wood fibre of Eucalyptus regnans* (F. v. M.).

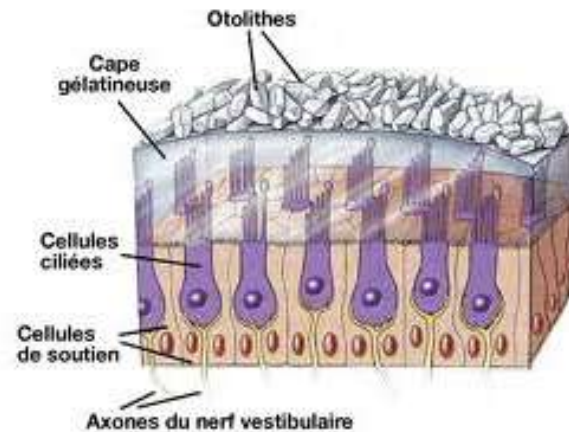


## II. Le SENS MECANIQUE au sens large

*Que perçoit la tige inclinée ?*



*Nous ?*



Vestibule : des « petits cailloux » (**otolithes** de  $\text{CaCO}_3$ ) dans une gelée (endolymphe)

Reposant sur des cellules ciliées sensibles

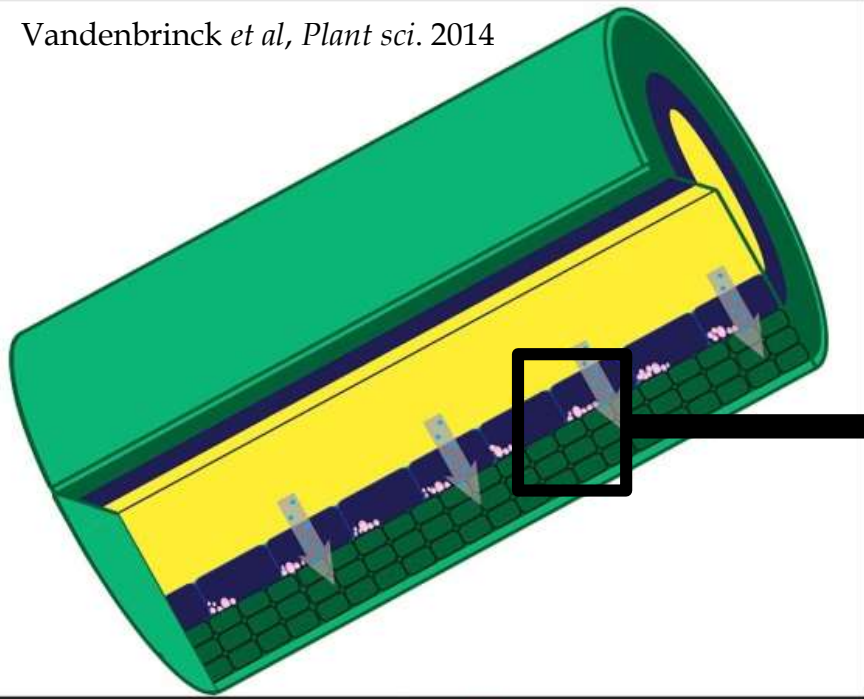
Des influx nerveux vers le cerveau

**GRAVIPERCEPTION**

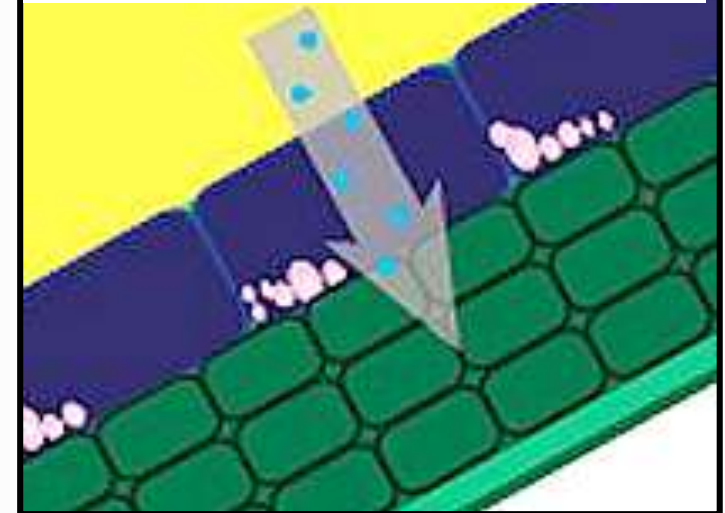
## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

Chez les *plantes* ?

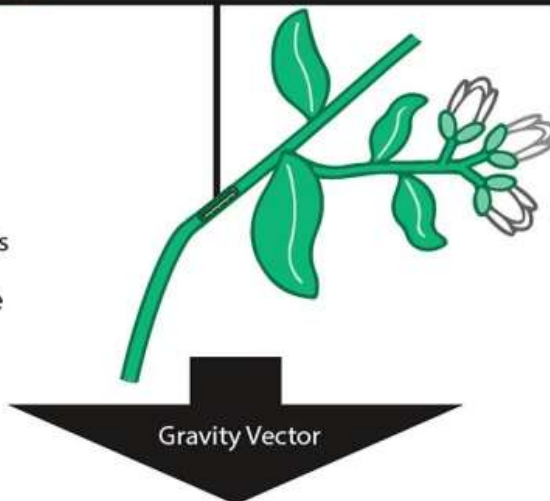
Vandenbrinck *et al*, *Plant sci*. 2014



Statolithes (grains d'amidon)



- Epidermis
- Cortex
- Endodermis
- Vasculature
- Auxin
- Statolith

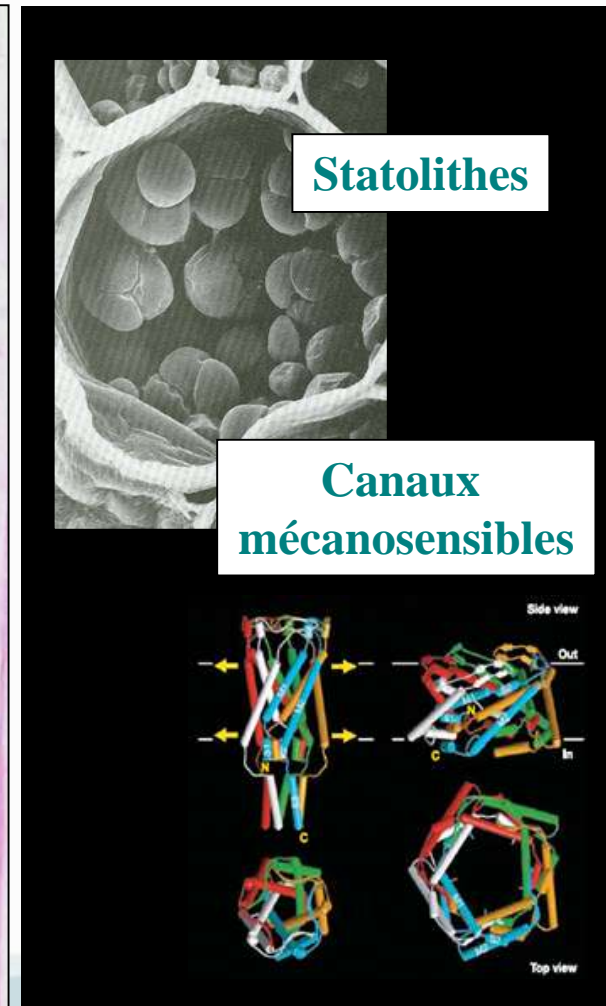
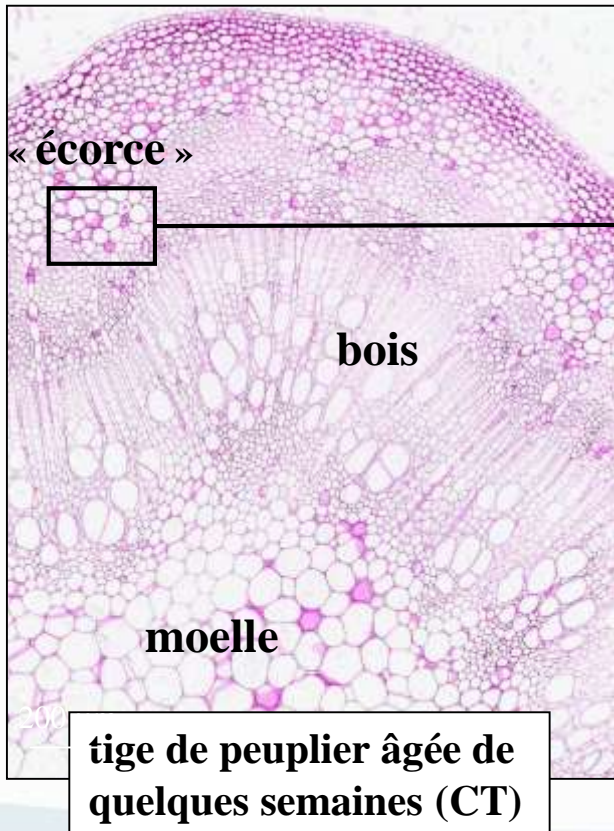


La tige perçoit son **inclinaison**  
par rapport à la **verticale**  
(= angle d'inclinaison)

**GRAVIPERCEPTION**

## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

### Chez les arbres ?



Le tronc perçoit son inclinaison par rapport à la verticale  
(= angle d'inclinaison) : **GRAVIPERCEPTION**

## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

La **GRAVIPERCEPTION** est-elle suffisante ?

Passer par un modèle mathématique

$$\frac{\partial C(s, t)}{\partial t} = -\beta A(s, t)$$



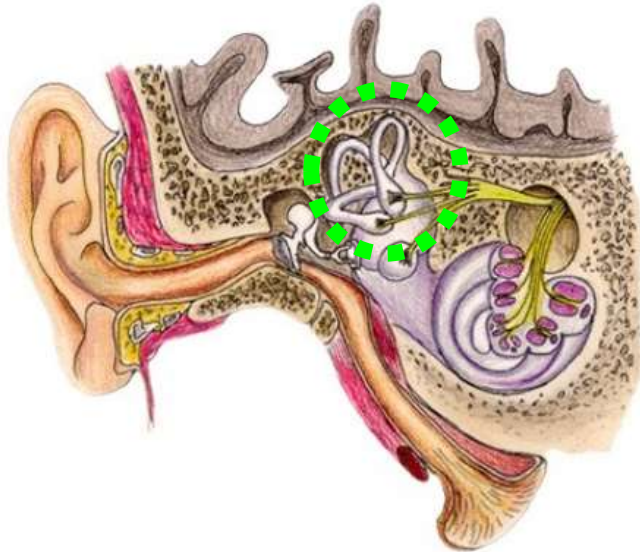
Bastien et al  
PNAS 2013  
110(2) : 755-760





## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

*Nous ?*



## GRAVIPERCEPTION

Vestibule : des « petits cailloux »  
(otolithes) dans une gelée (endolymphe)

Des cellules ciliées sensibles

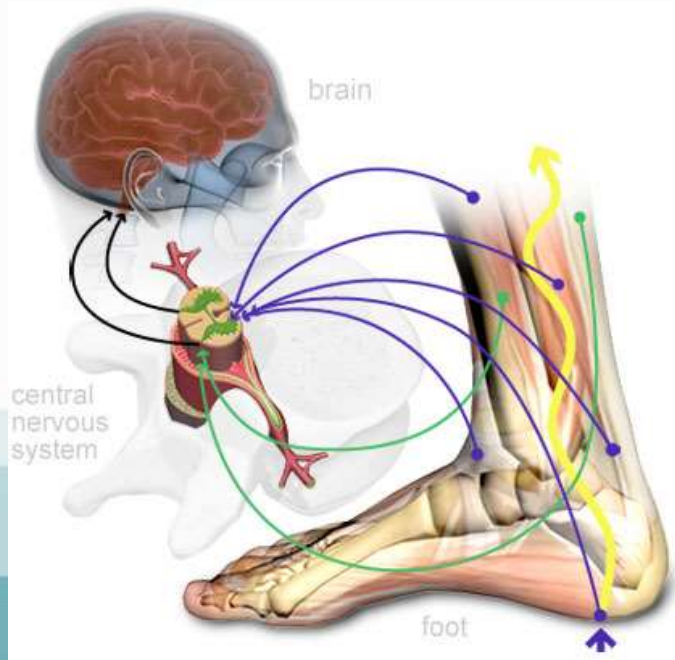
Des influx nerveux vers le cerveau

+

## PROPRIOCEPTION

Des récepteurs,  
Des voies et centres nerveux  
impliqués dans la **somesthésie**

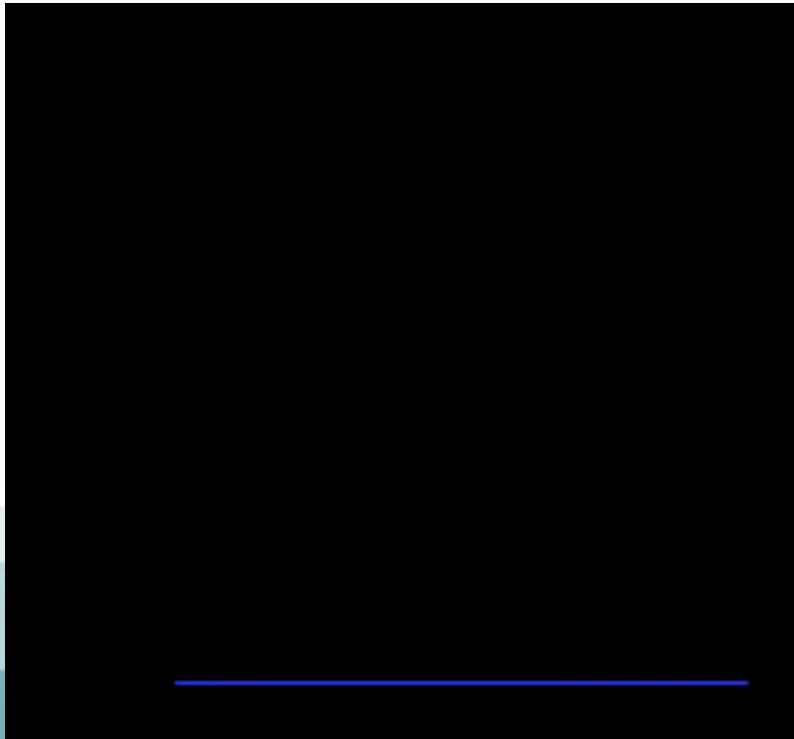
= **perception de soi-même**  
**dans l'espace**



# GRAVIPERCEPTION

+

# PROPRIOCEPTION



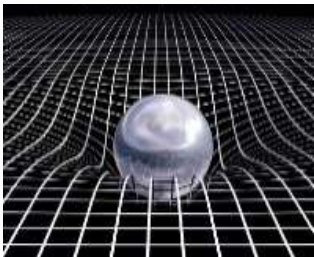
Bastien et al  
PNAS 2013  
110(2) : 755-760



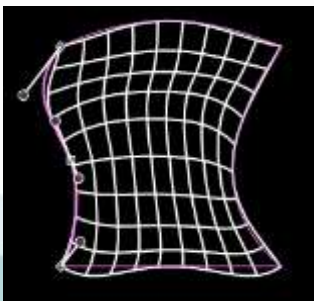
Une **INTEGRATION** de différents signaux  
pour une **COORDINATION** des mouvements



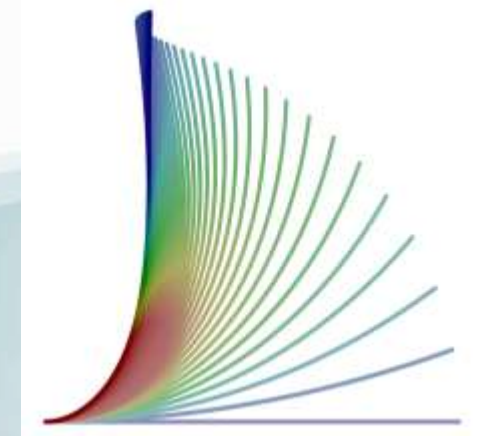
**LUMIERE**



**GRAVITE** - - - ->



**DEFORMATION**





# LA PLANTE ÊTRE SENSIBLE

- qui **perçoit** son environnement
- qui **intègre** et **coordonne** les informations
- qui **répond** par des réponses adaptées
- qui adapte sa **sensibilité**
- qui bouge de vrais **mouvements**

*Merci !*

# UN PEU DE LECTURE ...

**L'arbre droit comme un « i »**  
*Le Courrier de la Nature n°289*  
mai-juin 2015



**Dans la peau d'une plante**  
*Editions Belin, 2014*



[www.desfleursanotreporte.com](http://www.desfleursanotreporte.com)



**Dans la peau d'un arbre**  
*L'Eléphant n°14, avril 2016*



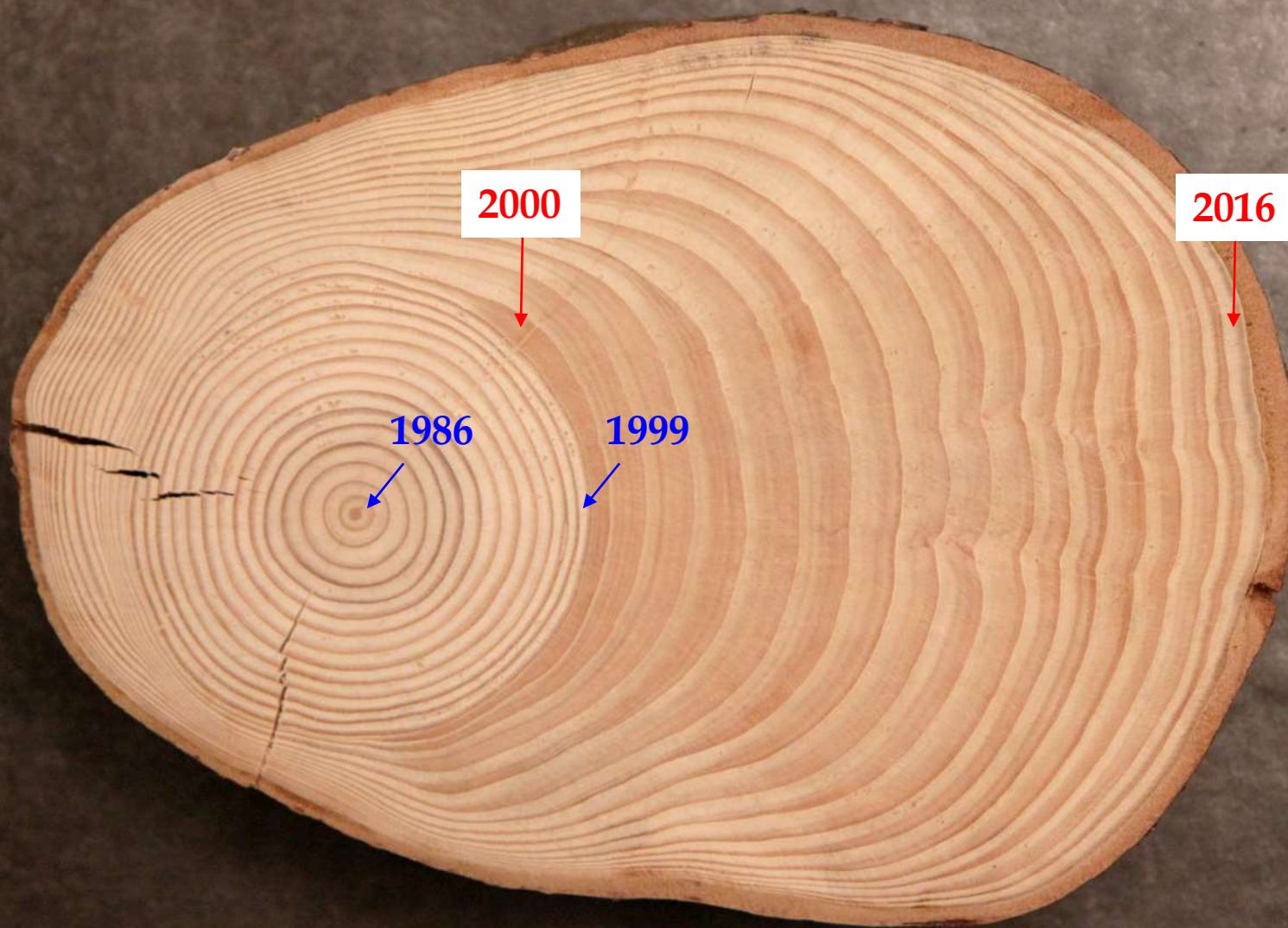
**Percevoir et bouger : les plantes aussi !**  
*Pour la science n°484, avril 2014*



UNIVERSITÉ  
ermont  
vergne

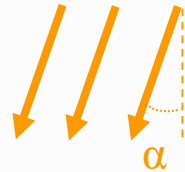
*RAB ...*

# *UN TRONC DE SAPIN abattu en septembre 2016 ...*



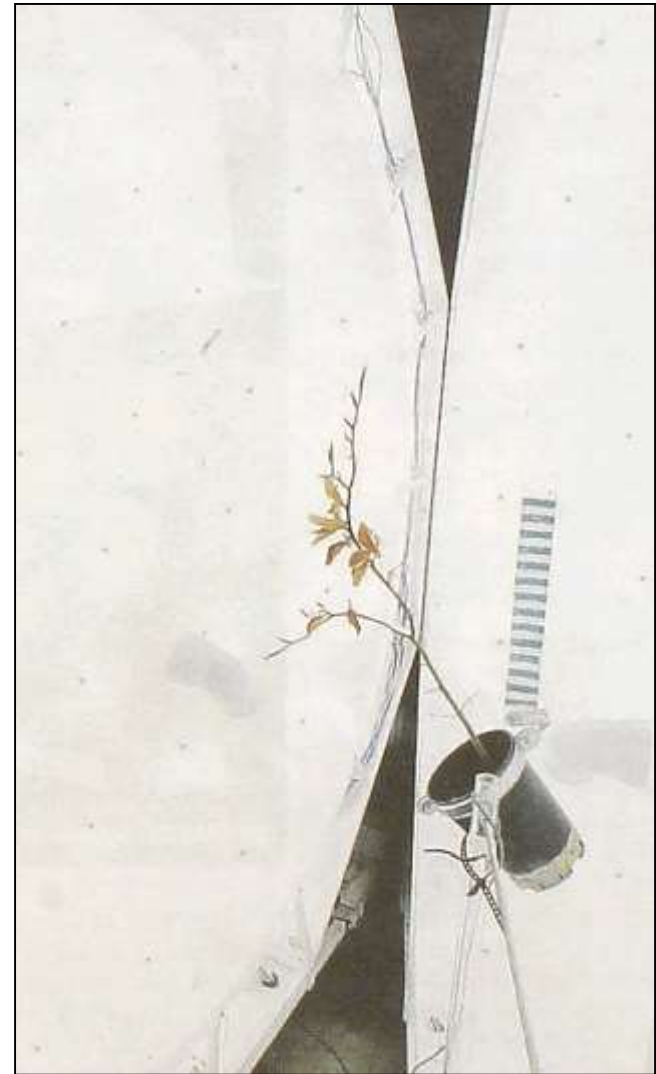
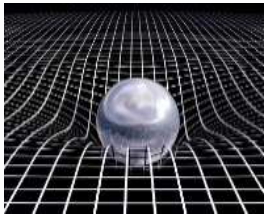
## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

LUMIÈRE



*Lumière ou  
gravité ?*

GRAVITÉ



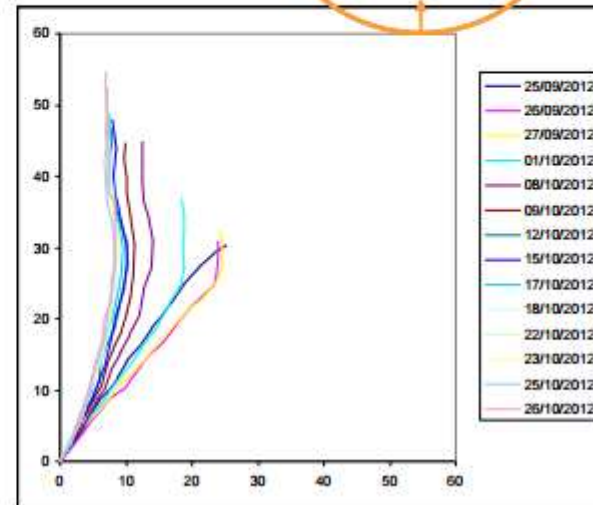
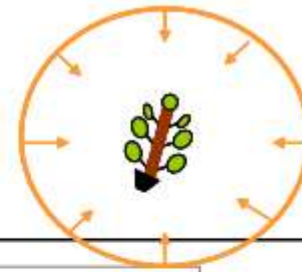
La plante inclinée se redresse à la verticale  
= **réponse gravitropique** suffit



## II. Le SENS MECANIQUE s.l.

## Lumière ou gravité ?

Inclinaison de  
35°/verticale  
  
+ éclairage  
isotrope



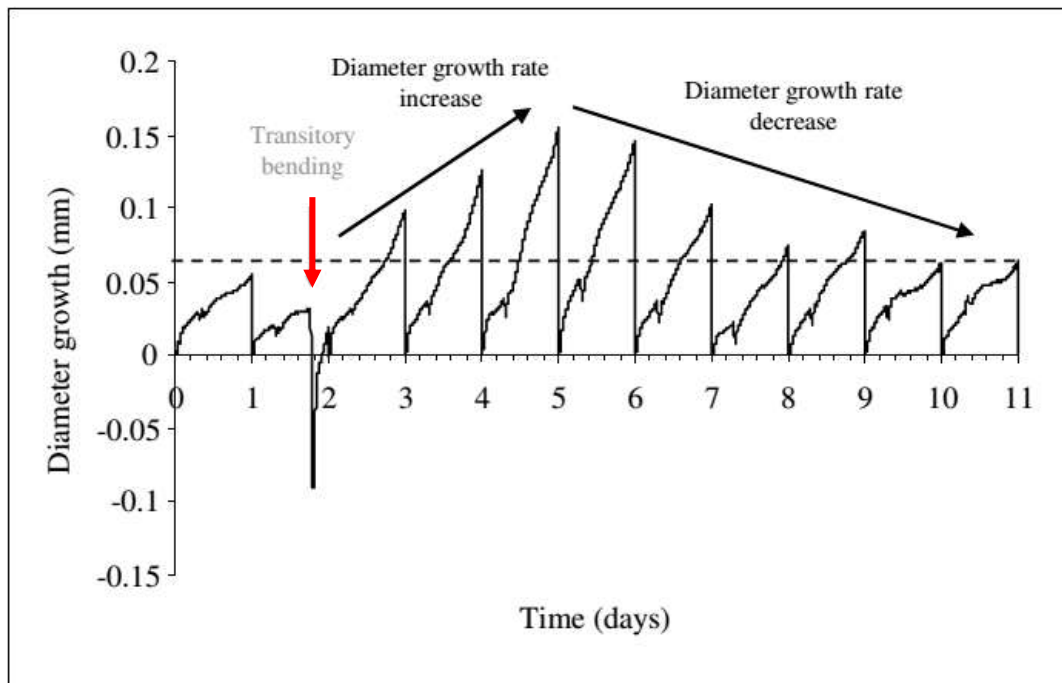
La plante inclinée et éclairée  
latéralement se redresse et se  
fige dans une position  
intermédiaire  
**= équilibre  
photogravitropique**

La plante inclinée se redresse  
à la verticale  
**= réponse  
gravitropique  
seule**

# I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

Croissance en épaisseur ↗

*Dispositif expérimental sur peuplier*



Martin *et al.*, J. Exp. Bot 2010, 61, 9 : 2403-2412



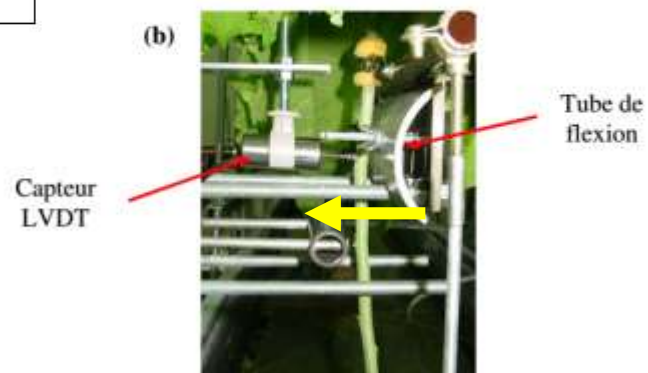
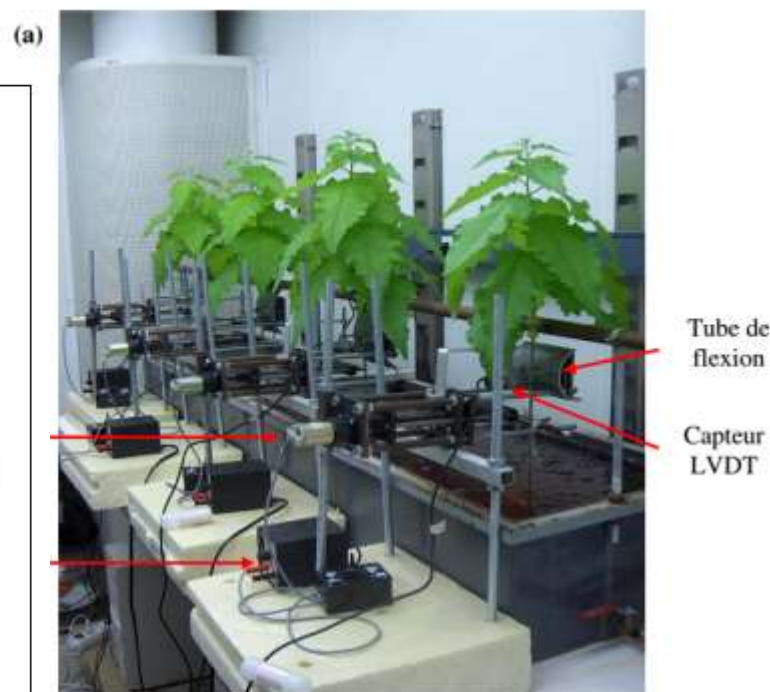
Ludovic  
Martin

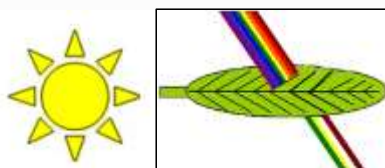
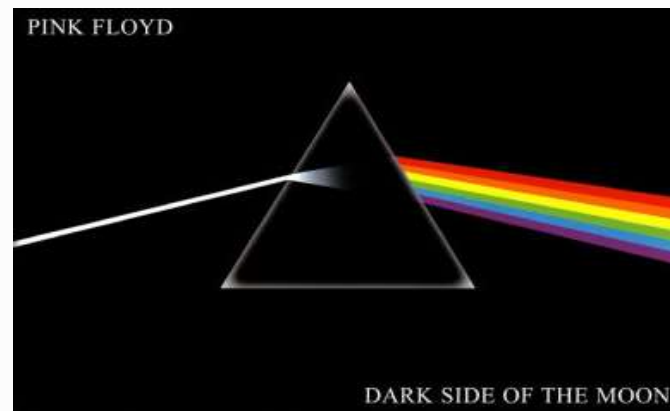


Nathalie Leblanc-  
Fournier

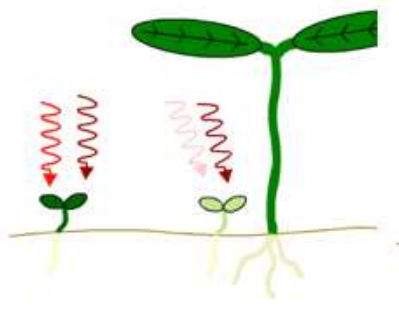


Catherine  
Coutand

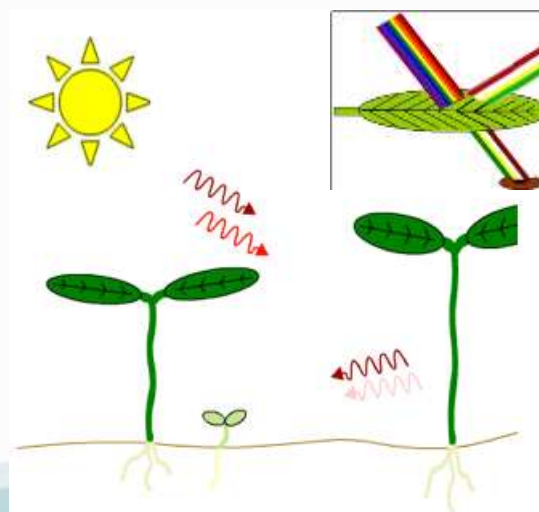




**Transmission** du vert et  
du **ROUGE FONCÉ**



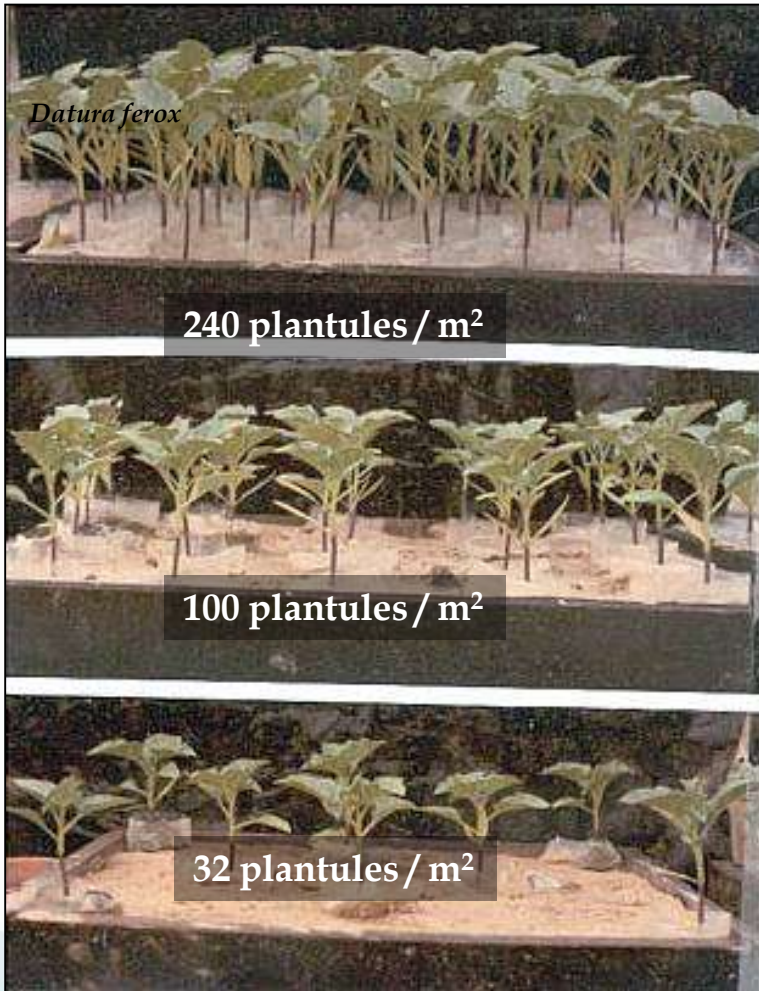
**Réflexion** du vert et  
du **ROUGE FONCÉ**



*Les plantes modifient leur environnement lumineux :*  
**ENRICHISSEMENT EN ROUGE FONCÉ**

# Les plantes se « voient » entre elles

3 semaines de croissance



Ballaré and Casal 2000

Elongation de la tige

- Plus les plantes poussent **serrées**, plus elles poussent **haut**.

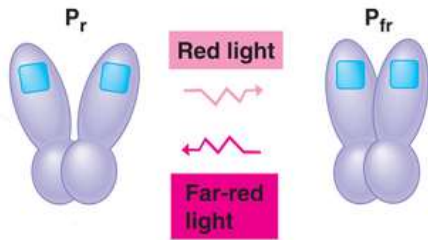
- La stimulation de croissance commence **alors même qu'elles ne se touchent pas encore**.

*La densité croissante stimule l'élongation de la tige*

**Une plante peut donc « voir » ses voisines et anticiper leur présence ?**

# Des « YEUX » pour se voir

**PHYTOCHROMES** : sensibles aux radiations **rouge clair (R)** et **rouge foncé (FR)**

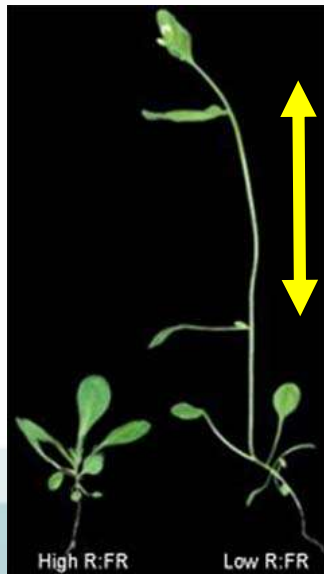


Le Phytochrome mesure le rapport **R/FR**

➔ **REPONSE DE CROISSANCE** et **MOUVEMENT**

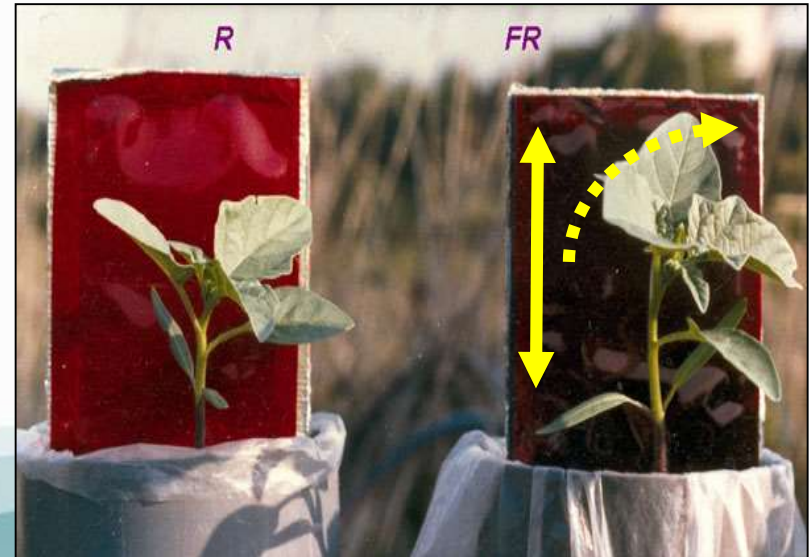
**Ombre** : la vision du **transmis**

**R/FR**  
**réduit**



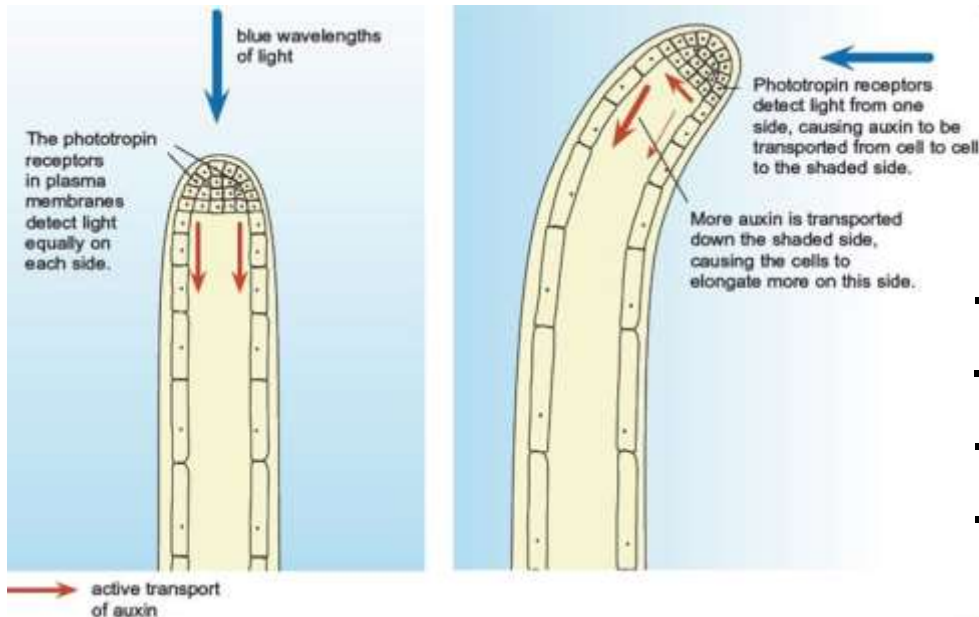
**Voisinage** : la vision du **réfléchi**

**FR**  
**réfléchi**



**Phytochromes** = des « **YEUX** » **DIFFUS** pour détecter l'ombre et la voisine

# Les plantes se « dirigent » vers la lumière



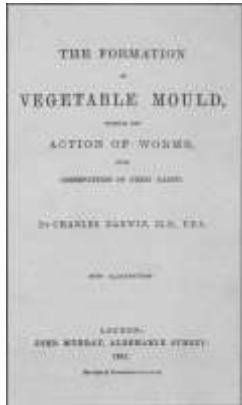
- **Phototropines / lumière bleue**
- **Transporteurs d'auxine relocalisés**
- **Redistribution latérale de l'auxine**
- **Croissance différentielle de la tige**

# Les autres « SENS » ?

## L'OUÏE ?

Darwin, 1881

Effet du basson de son  
fils sur les plantes et les  
vers de terre



*International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 5, No. 5, October 2014*

## Effect of Different Types of Music on *Rosa Chinensis* Plants

Vidya Chivukula and Shivaraman Ramaswamy

## Acoustic communication in plants: do the woods really sing?

Carel ten Cate

Behavioural Biology, Institute of Biology, Leiden University, PO Box  
9505, 2300 RA Leiden, The Netherlands

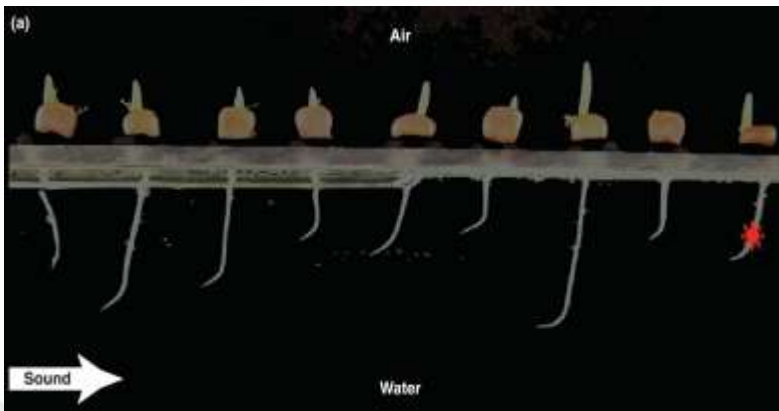
## Towards understanding plant bioacoustics

Monica Gagliano<sup>1,2</sup>, Stefano Mancuso<sup>3</sup> and Daniel Robert<sup>4</sup>

*Plant Cell Physiol.* 43(6): 647-651 (2002)  
ISPP © 2002

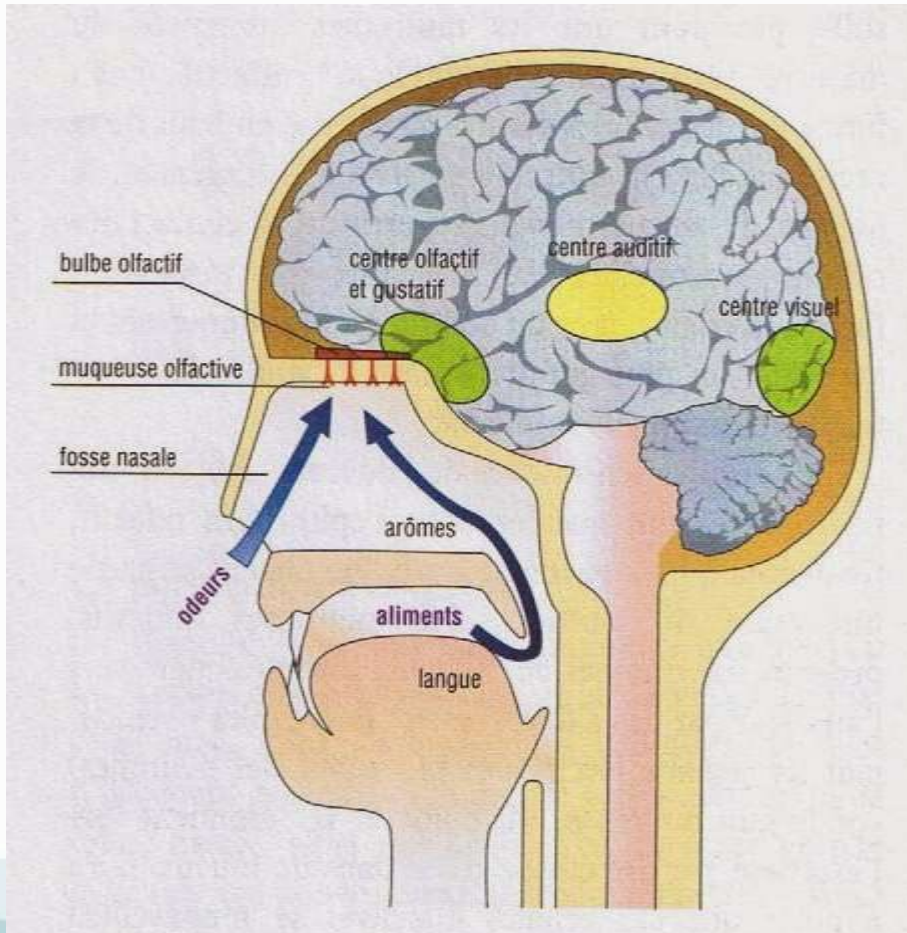
Effects of Mechanical Vibration on Seed Germination of *Arabidopsis thaliana*  
(L.) Heynh.

Ayuho Uchida<sup>1,3</sup> and Kotaro T. Yamamoto<sup>1,2,4</sup>



manifestations vibratoires du son  
amplifiées par les hauts-parleurs

# LE GOÛT ? L'ODORAT ?

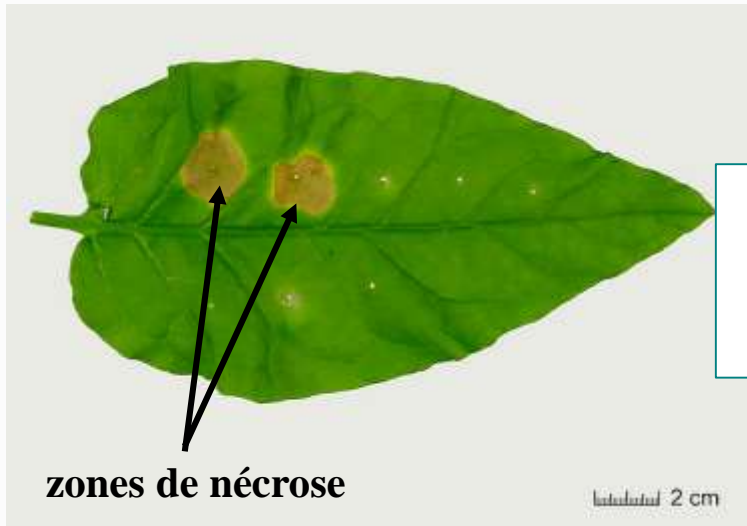


## CHEMORECEPTION

- Perception de **molécules chimiques**
- Volatiles (**odorat**) ou non (**goût**)
- Voies nerveuses et centres nerveux



# La défense contre les pathogènes = le « GOÛT »



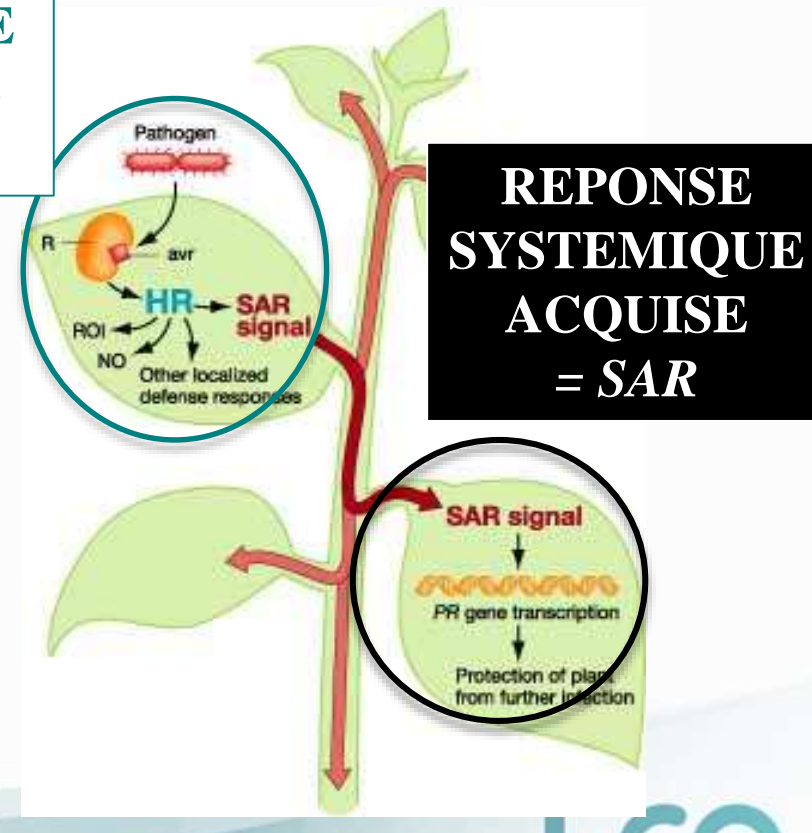
**REPONSE  
LOCALE  
= HR**

## Réaction hypersensible

- Perception et reconnaissance des molécules fongiques (R/avr)
- Fabrication de **molécules toxiques** par les cellules attaquées : *phytoalexines*, *ROS*, *NO* ...
- **Destruction** des cellules végétales et des cellules du champignon  
= *politique de la « terre brûlée »*

## 2<sup>ème</sup> effet de la réaction hypersensible ...

Une « auto-vaccination »



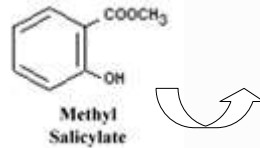
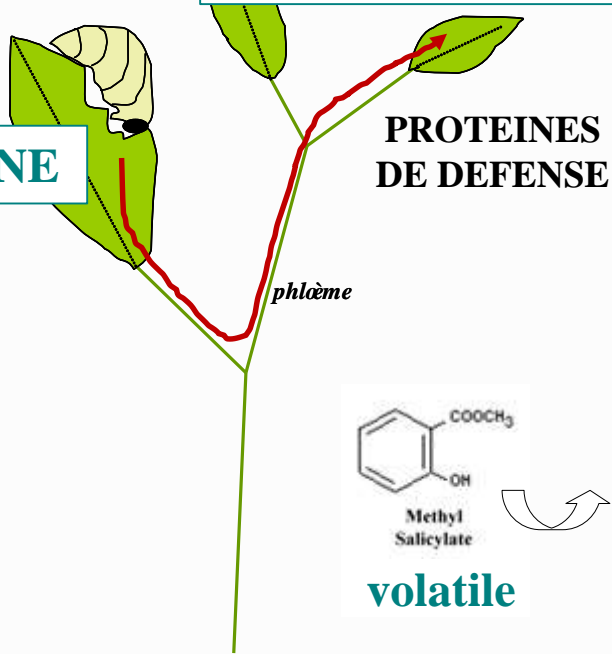
- La réponse locale (HR)
- La réponse systémique acquise (SAR) : un niveau de défense élevé

# La défense contre les herbivores : le « GOÛT » et l'« ODORAT »

Une chenille ...

Résistance  
**SYSTEMIQUE**  
ACQUISE

**SYSTEMINE**



volatile

VOCs

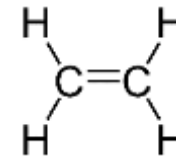
... ou une antilope trop gourmande



TANNINS



éthylène



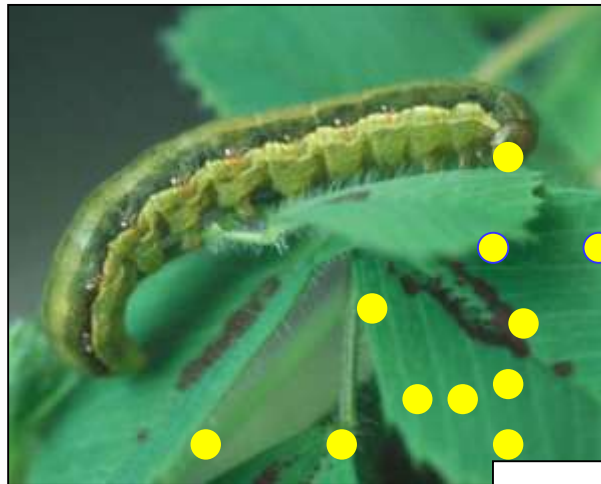
Alerte des  
voisines

Alerte des  
voisines

# La défense contre les herbivores : le « GOÛT » et l'« ODORAT »

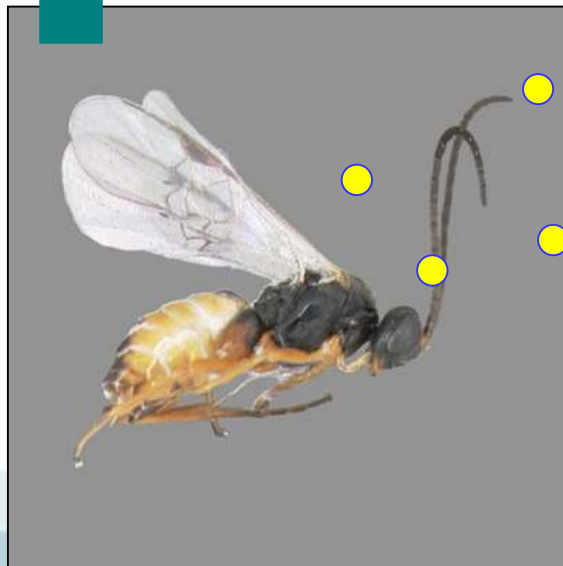
pondent dans les œufs de *S. exigua*  
mort à l'éclosion

~~Attaque de la chenille  
de *Spodoptera exigua*~~



Perception par la feuille :  
**blessure** et **volicitine**  
de la salive

production par la **feuille**  
de substances **volatiles**  
**terpénoïdes**  
= **VOCs** ●



guêpes femelles parasites  
*Cotesia marginiventris*

# Intégrer plusieurs informations : un véritable COMPORTEMENT VEGETAL

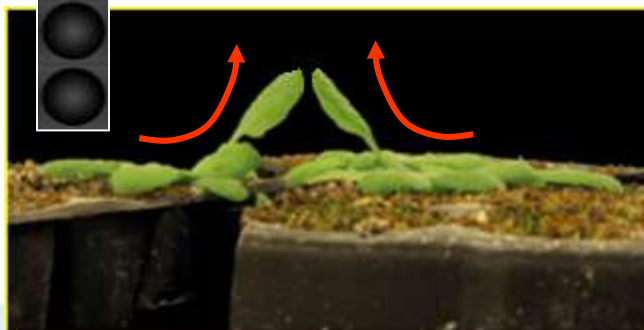
Du toucher au « geste »

Expérience de compétition

Wit et al, 2012



Geste : « carton rouge ! »



R / FR  
réduit



20 jours



29 jours



plantes  
isolées



plantes  
en canopée



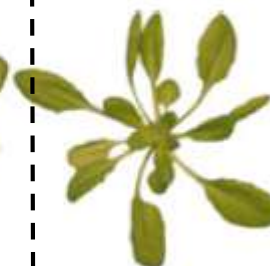
20 jours



24 jours



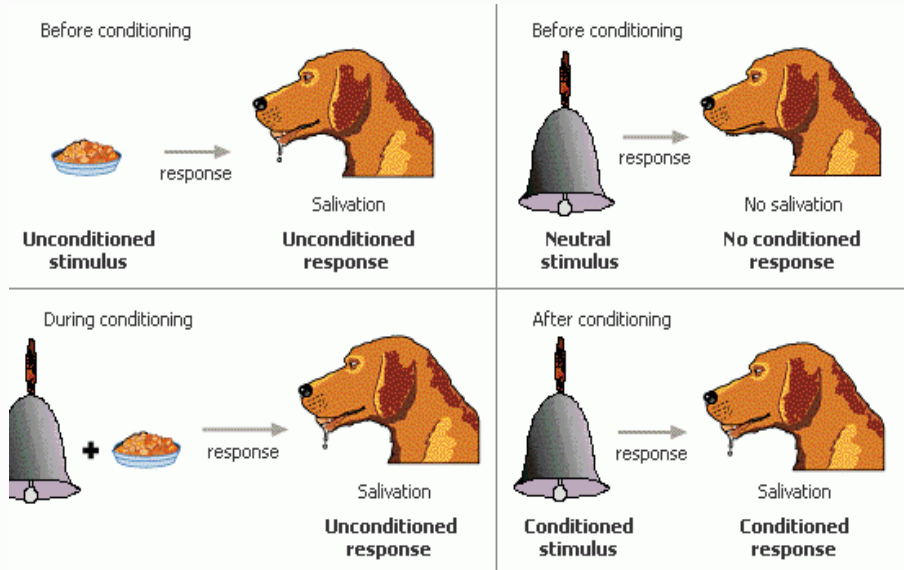
26 jours



29 jours

# Intégrer plusieurs informations : l'apprentissage par ASSOCIATION

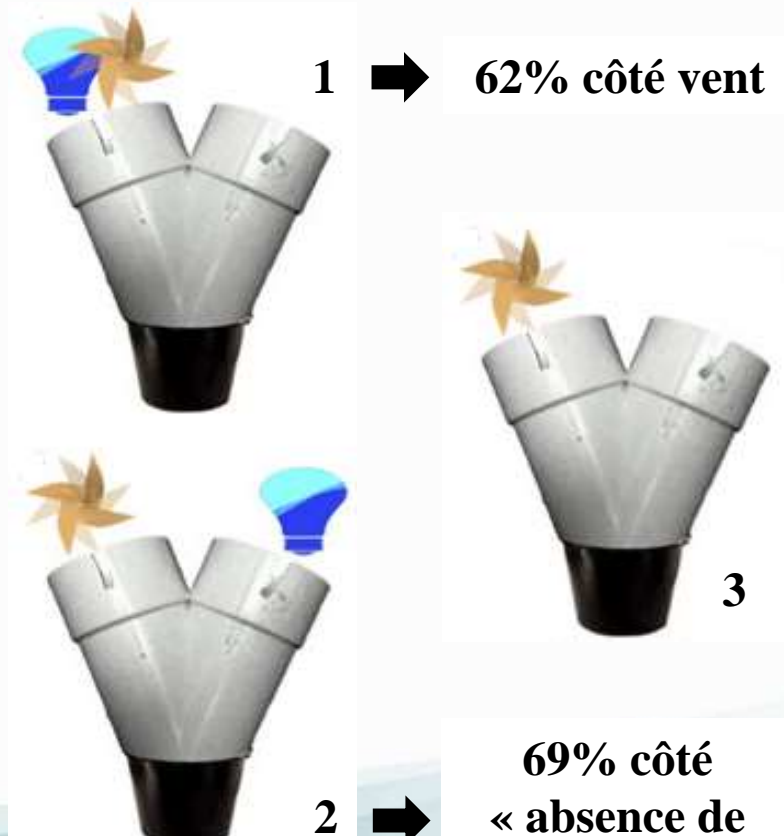
## L'expérience de Pavlov (1890)



= *expérience de conditionnement*

- nourriture = stimulus inconditionnel
- cloche = stimulus neutre

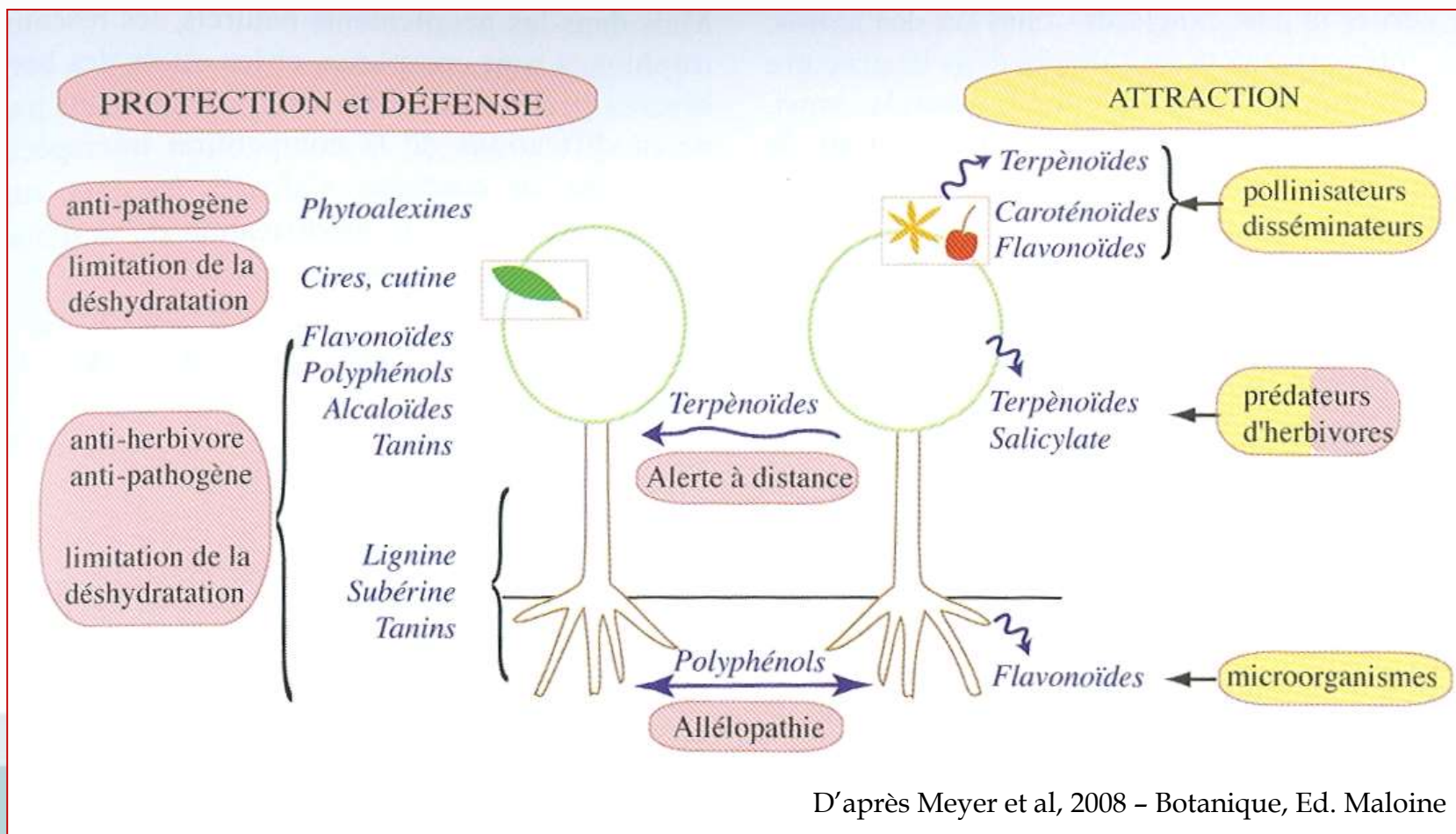
## L'expérience de Gagliano (2016)



Réflexe conditionné et  
apprentissage par association  
= capacité de **FAIRE DES CHOIX**

Apprentissage par association  
et  
capacité de **FAIRE DES CHOIX**

# Un langage chimique pour communiquer : le **METABOLISME SECONDAIRE**



D'après Meyer et al, 2008 – Botanique, Ed. Maloine

# La polyploidie et son importance chez les végétaux



**Malika L. AINOUCHE**  
**Evolution, Génomes, Adaptation**  
**UMR CNRS 6553 Ecobio**  
**Université de Rennes 1**

LIA ECOGEN: Ecological Genomics of Polyploidy  
CNRS - UR1 – Iowa State University (USA)



# La polyploïdie et son importance chez les végétaux

**Diploïdes et Polyploïdes:** concepts de base

**Conséquences de la polyploïdie:**

- Spéciation
- Adaptation
- Dynamique du génome



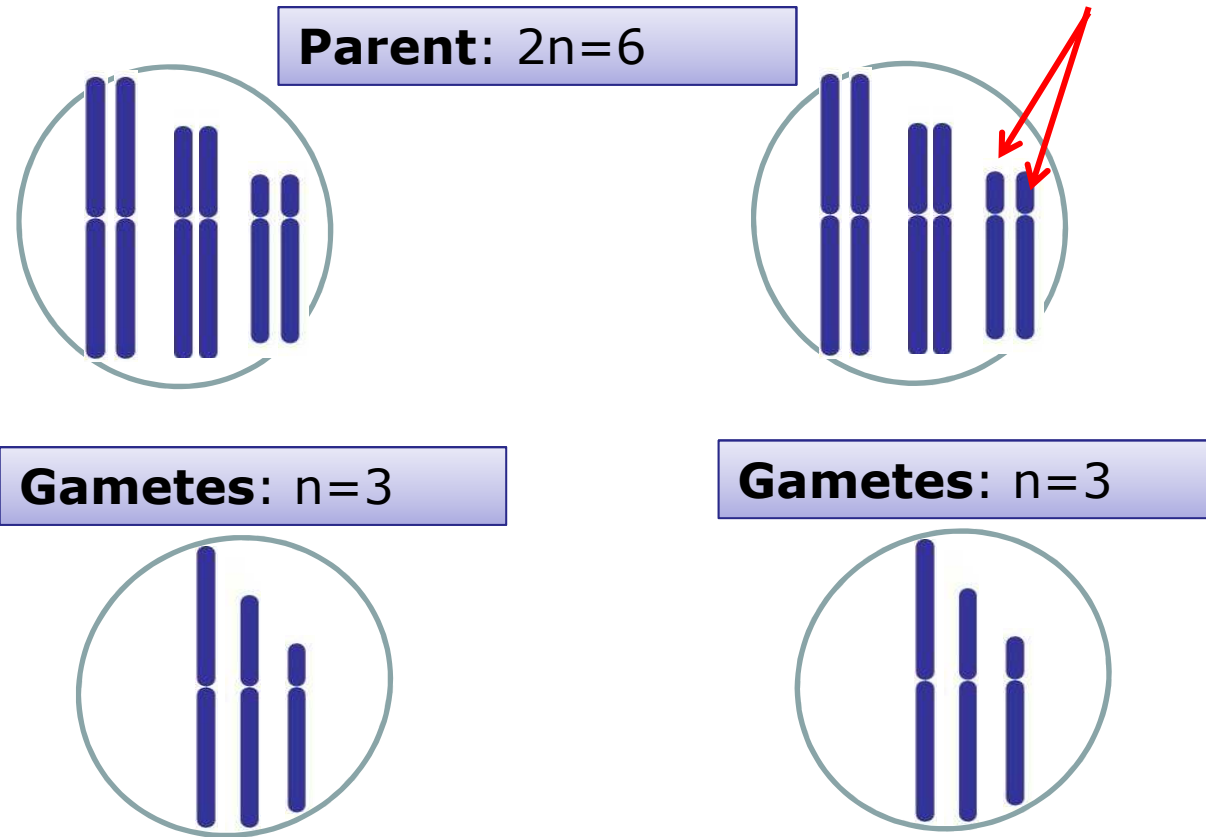
*Gossypium*



*Spartina*



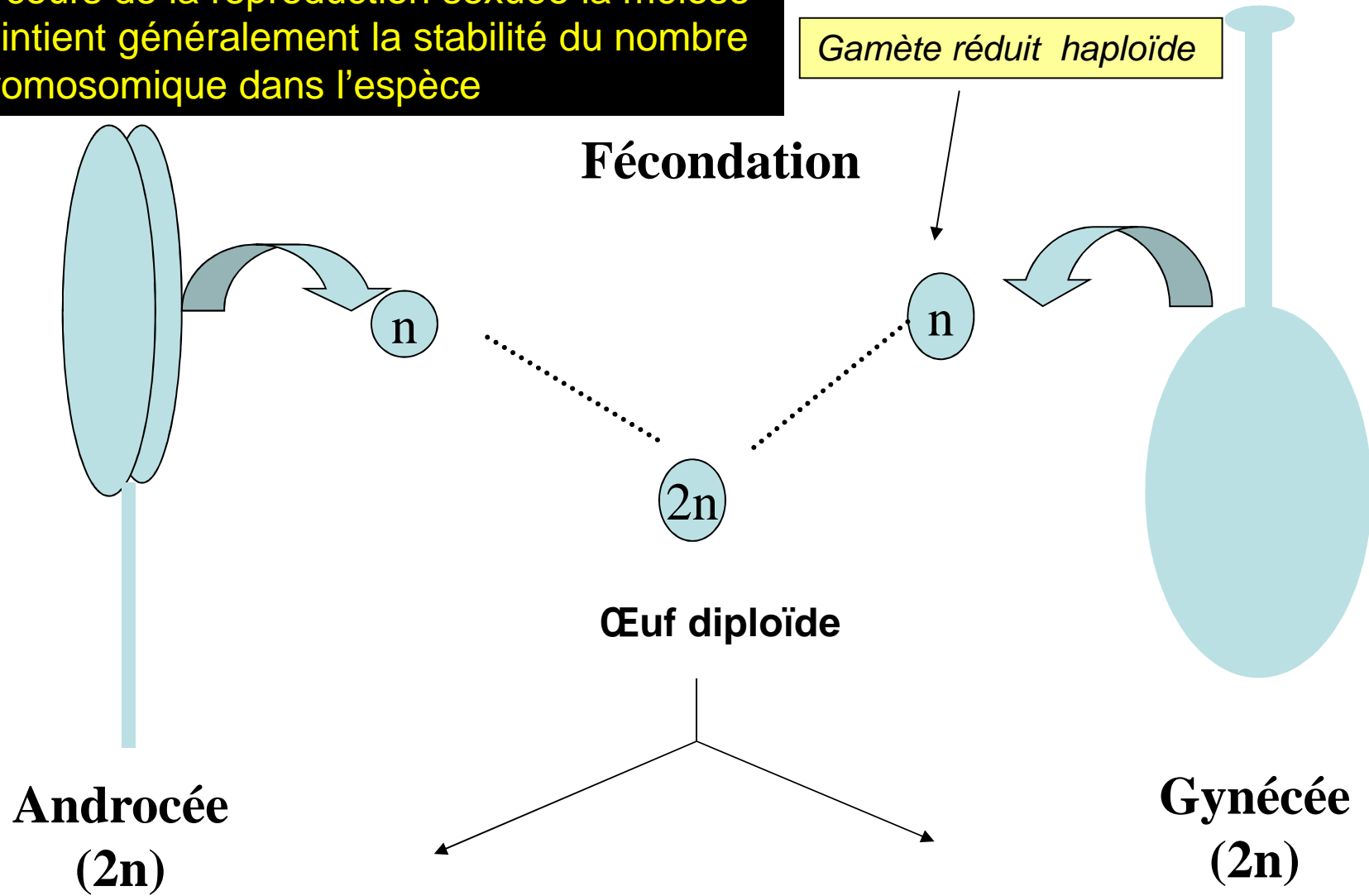
Une espèce diploïde possède deux lots de chromosomes homologues



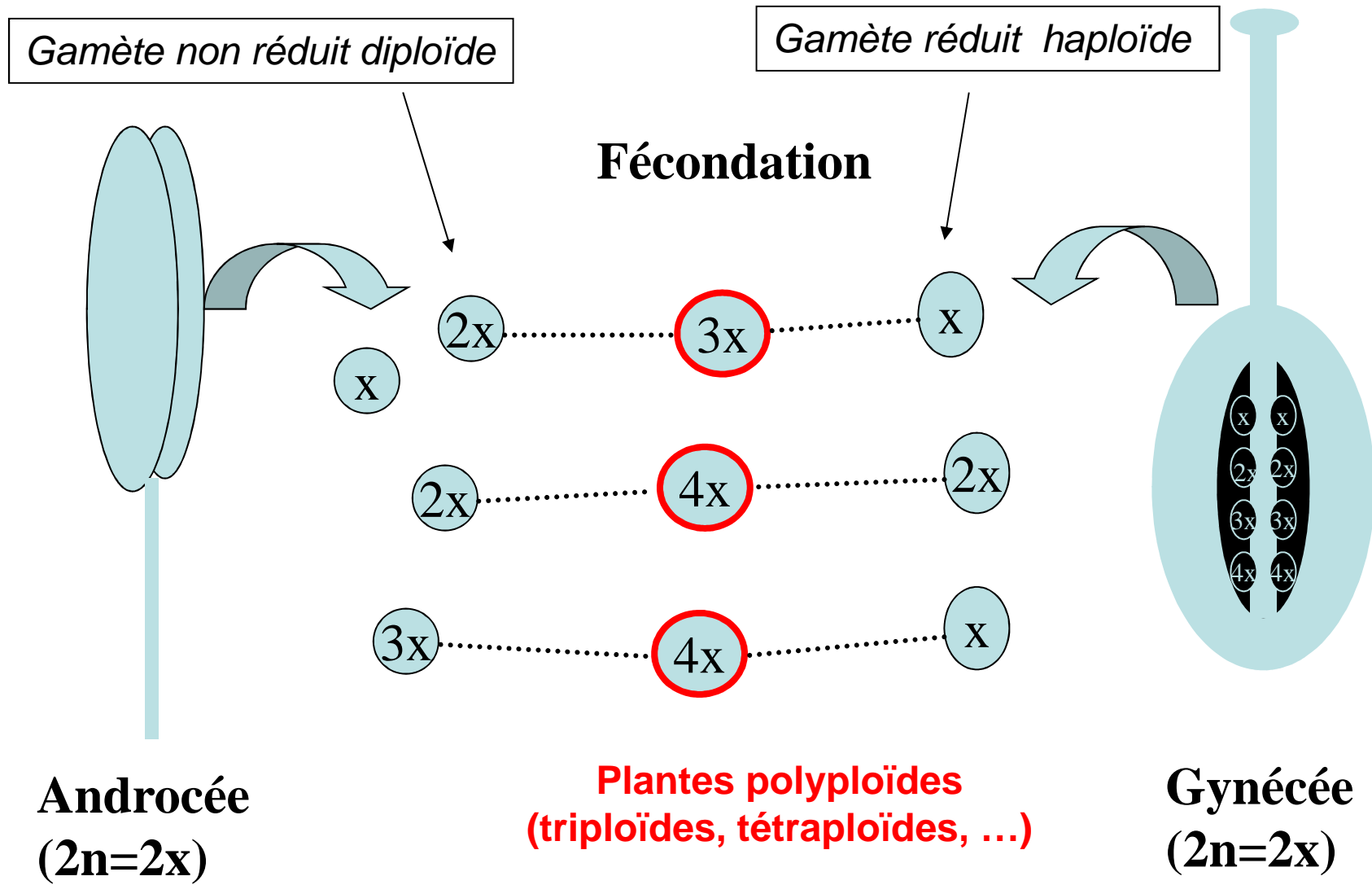
**Les gamètes sont haploïdes**  
**Un seul exemplaire de chaque chromosome**  
**Ici, le nombre gamétique ( $n$ ) est haploïde**

# Hérédité des diploïdes: gamètes réduits

Au cours de la reproduction sexuée la méiose  
Maintient généralement la stabilité du nombre  
chromosomique dans l'espèce



# Formation des polyploïdes : gamètes non réduits



(Modifié d'après Bretagnolle 1998)

# Nombre chromosomique de base

## Distinguer:

- $n$  = nombre de chromosomes gamétique
- $x$  = nombre de chromosome de base (*haploïde*)

*Triticum urartu*  $2n = 14$  ( $n = 7$ ) Diploïde  $2x$

*Triticum turgidum*  $2n = 28$  ( $n = 14$ ) Tétraploïde  $4x$

*Triticum aestivum*  $2n = 42$  ( $n = 21$ ) Hexaploïde  $6x$

Chez les blés le nombre de base (haploïde) est  $x = 7$   
Ces différentes espèces forment une série polyploïde



**Chez les diploïdes, les gamètes ont un seul lot  $x$  de chromosomes**  
**Les "gamètes des tétraploïdes ont  $2x$  chromosomes,**

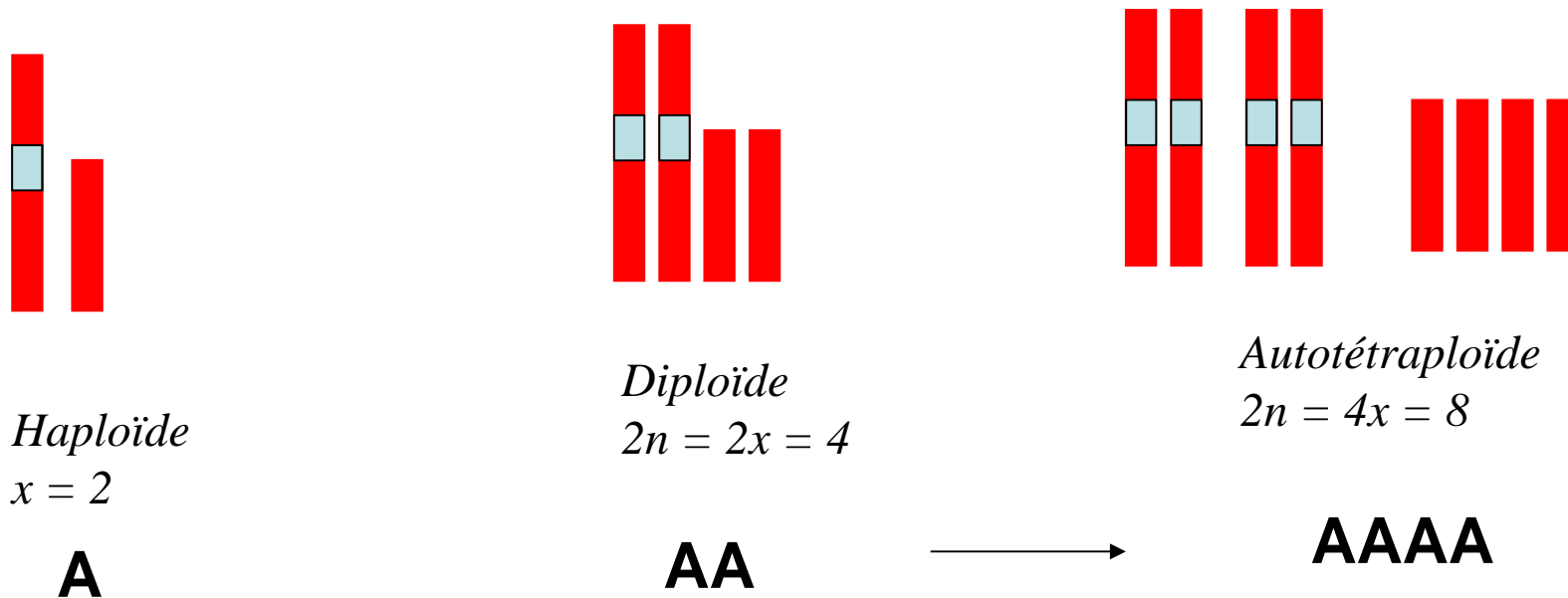
Convention: Une lettre (majuscule) désigne l'ensemble du lot haploïdes de chromomes; espèce diploïde: génome AA

# DEUX GRANDES CATEGORIES DE POLYPLOIDES

**Autopolyploidie** = duplication du génome de la même espèce

## Autopolyploïdes récents:

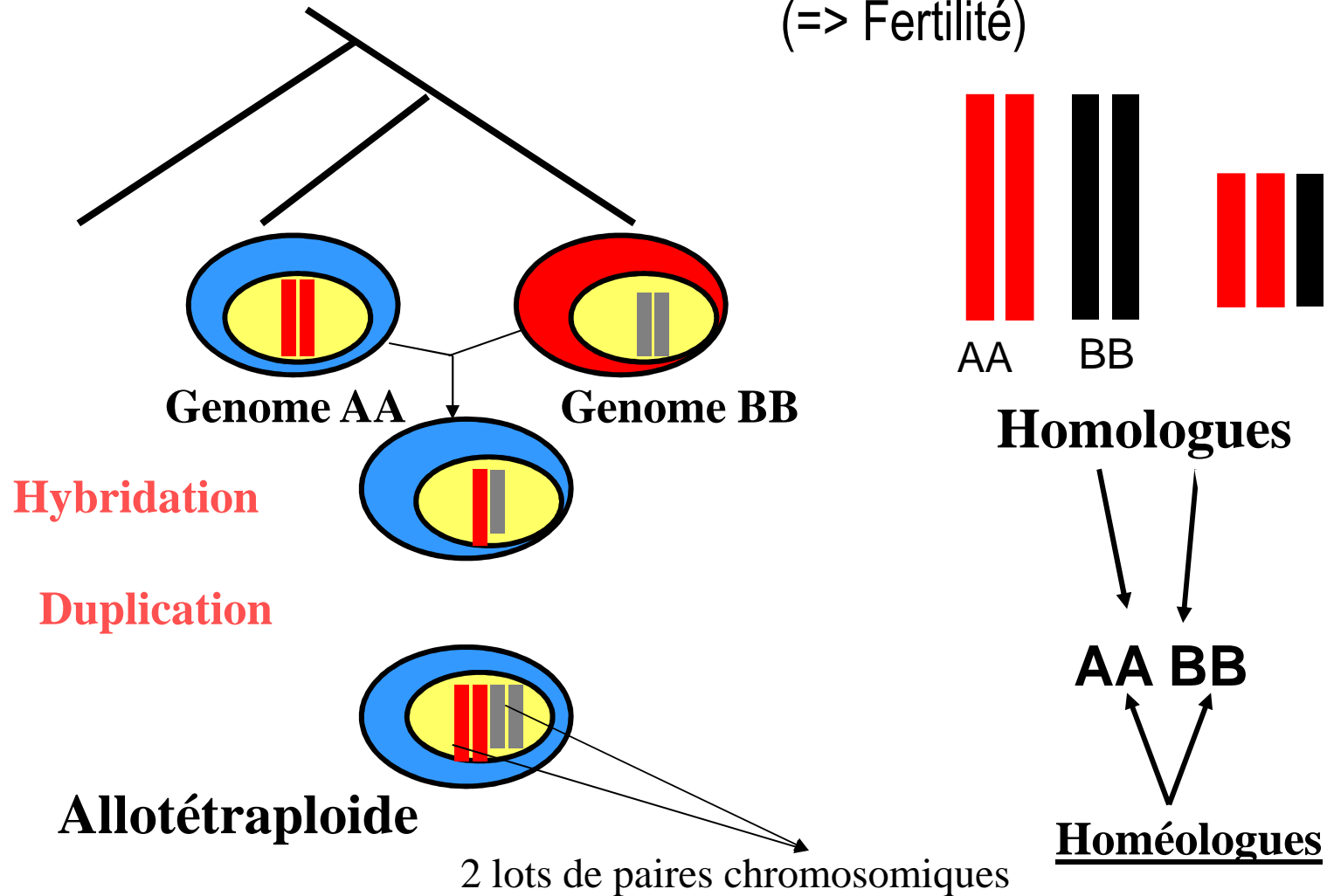
Plusieurs copies orthologues / locus



Appariement aléatoires: Héritéité tétrasomique

# DEUX GRANDES CATEGORIES DE POLYPLOIDES

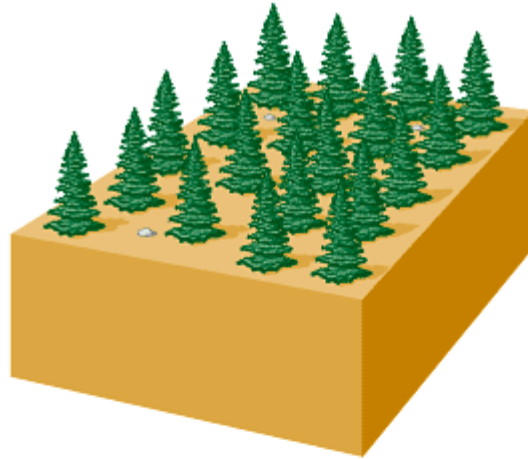
**Allopolyploidie** = duplication d'un génome hybride  
(=> Fertilité)



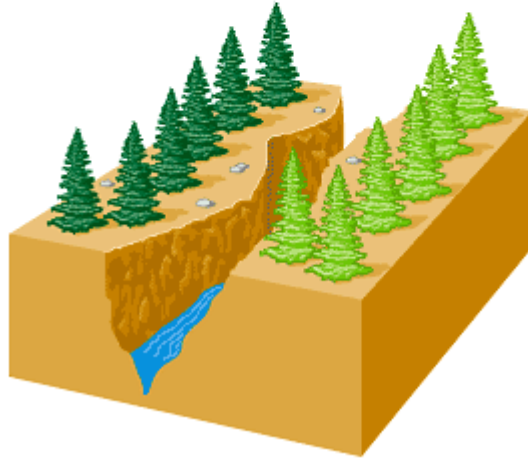
*Appariement préférentiels (homologues): Hérité disomique*

# POLYPLOIDIE ET SPECIATION

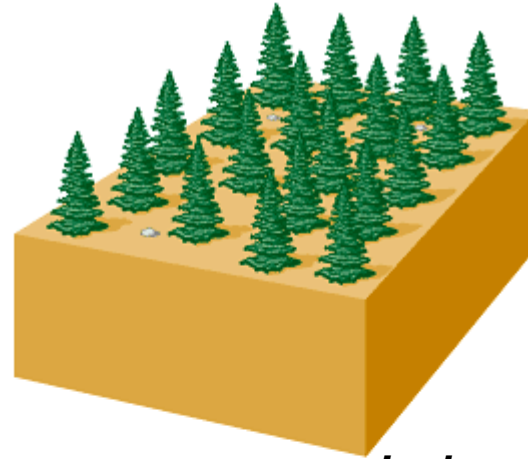
Deux principaux modes de spéciation:



*Séparation (spatiale)*  
*Isolement, divergence*



**(a) Allopatric speciation**

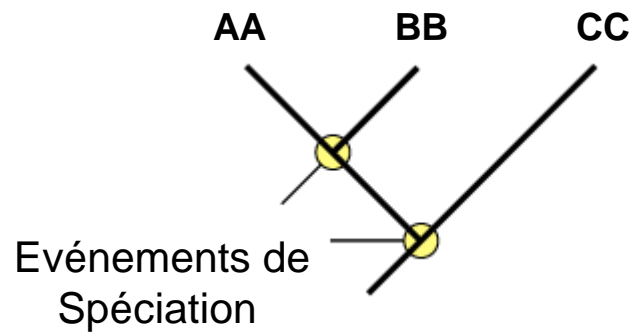


*Isolement reproductif*  
*dans la même population*  
*(même territoire)*



**(b) Sympatric speciation**

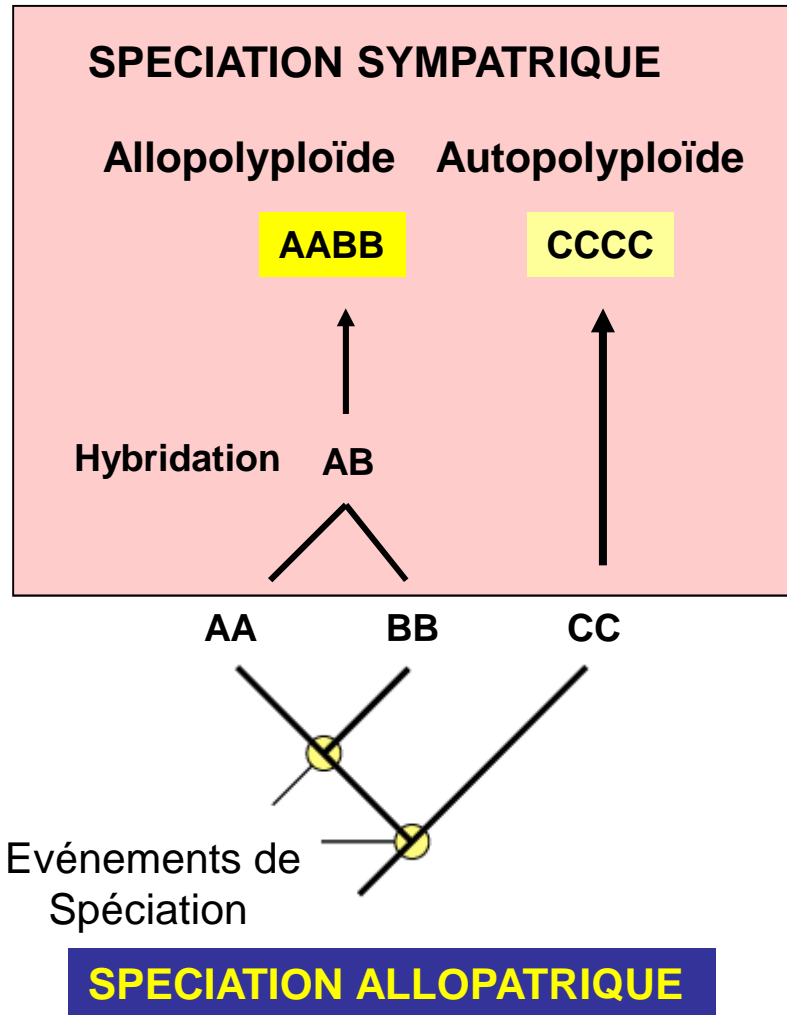
# POLYPLOIDIE ET SPECIATION



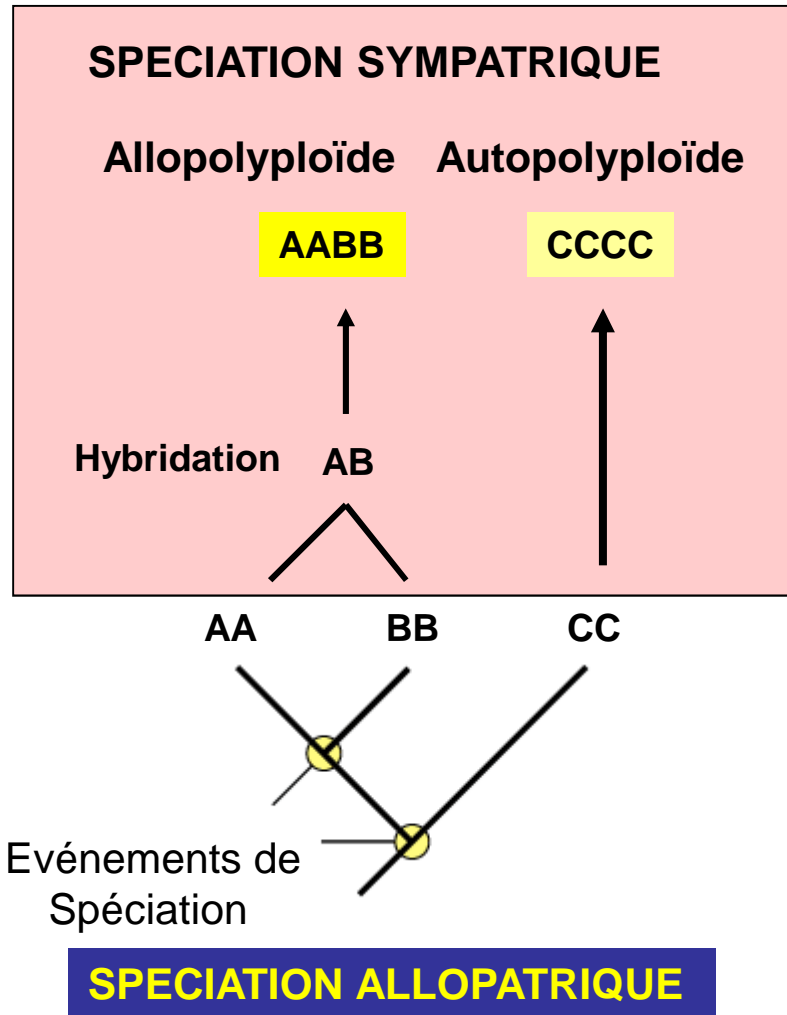
**SPECIATION ALLOPATRIQUE**



# POLYPLOIDIE ET SPECIATION



# POLYPLOIDIE ET SPECIATION

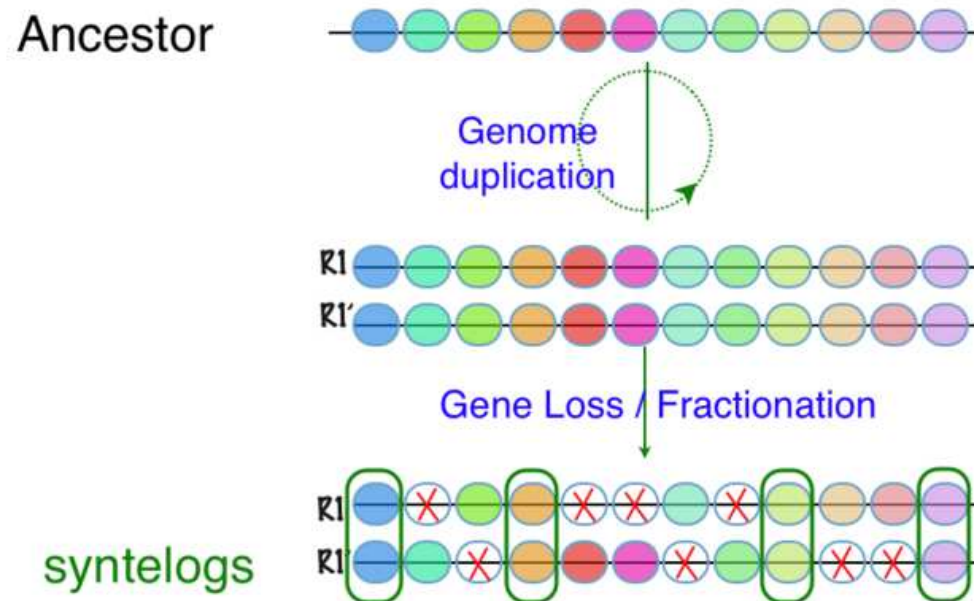


Barrière (post-zygotique) entre le polyploïde et ses parents diploïdes => « spéciation instantanée »

# EVOLUTION A LONG TERME

## Fractionation and diploidization:

(M. Freeling, Ann. Rev. Plant Biol. 2009)



*Perte aléatoire ou biaisée?*

## Mise en évidence de la polyploïdie

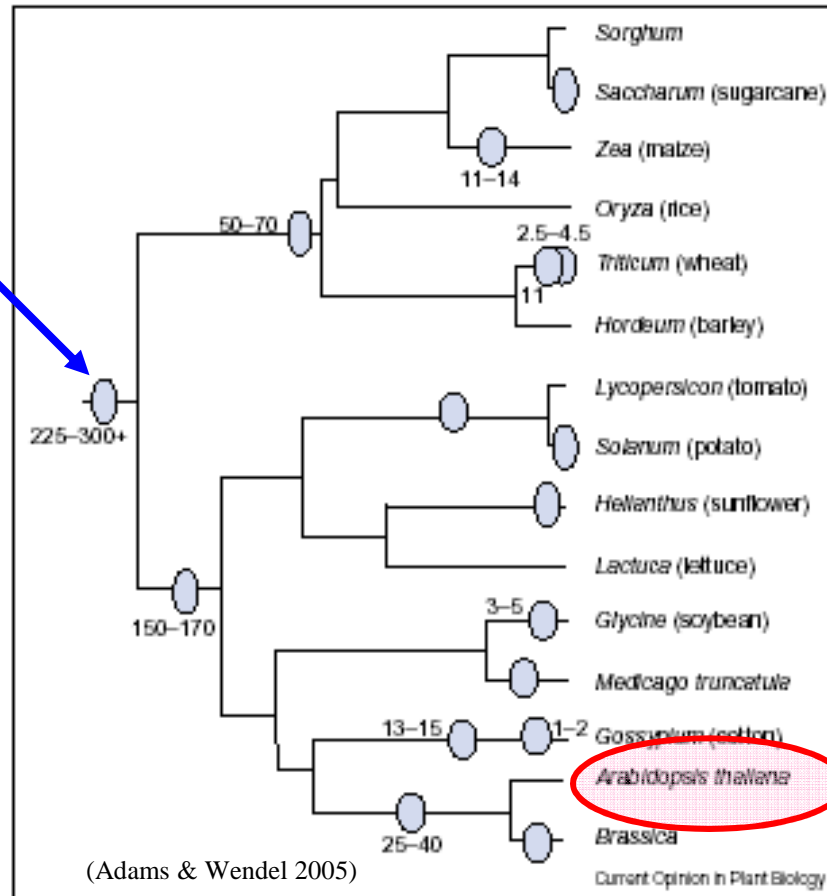
- **Nombres chromosomiques: série polypoïde:**  
**Espèces proches:  $2n = 14$ ,  $2n = 28$ ,  $2n = 42$ , ...**
- **Cartes génétiques et séquençage des génomes:**  
**Présence de série de gènes dupliqués**



**Mise en évidence de traces anciennes de polyploïdie  
dans les génomes « diploïdes ».**

# LA POLYPLOIDIE EST RECURRENTE CHEZ LES PLANTES => Néopolyploïdes & Paléopolyploïdes

Duplication  
du génome



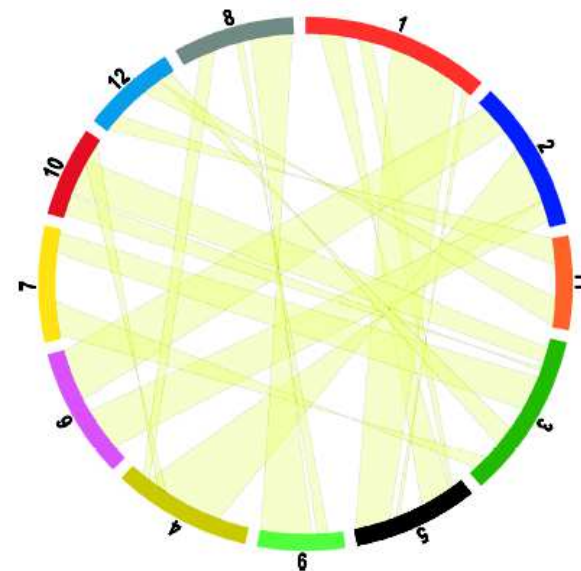
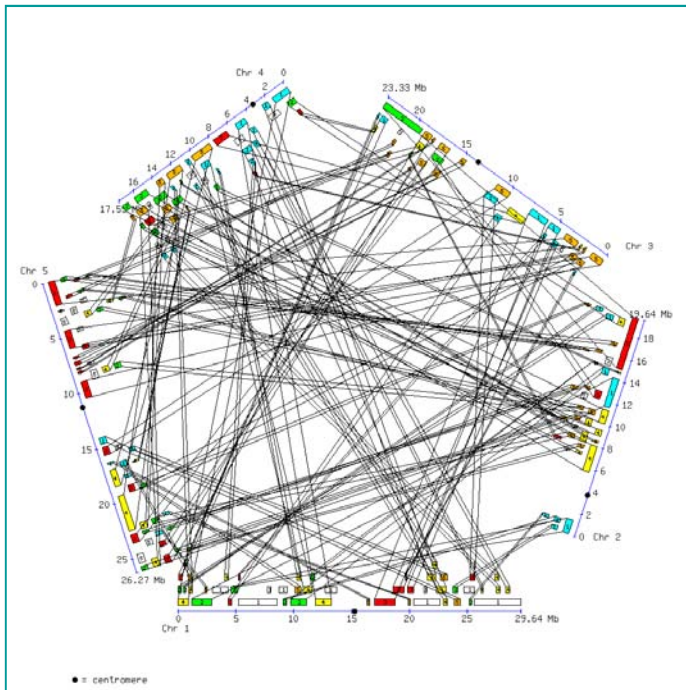
During the evolution of angiosperms. The figure shows species that were analyzed by Blanc et al. (2006). Blue shaded ovals indicate suspected large-scale duplication events. Branch lengths are in millions of years (My) since the duplication event. Figure modified from [18\*\*].



# PALEOPOLYPLOIDES

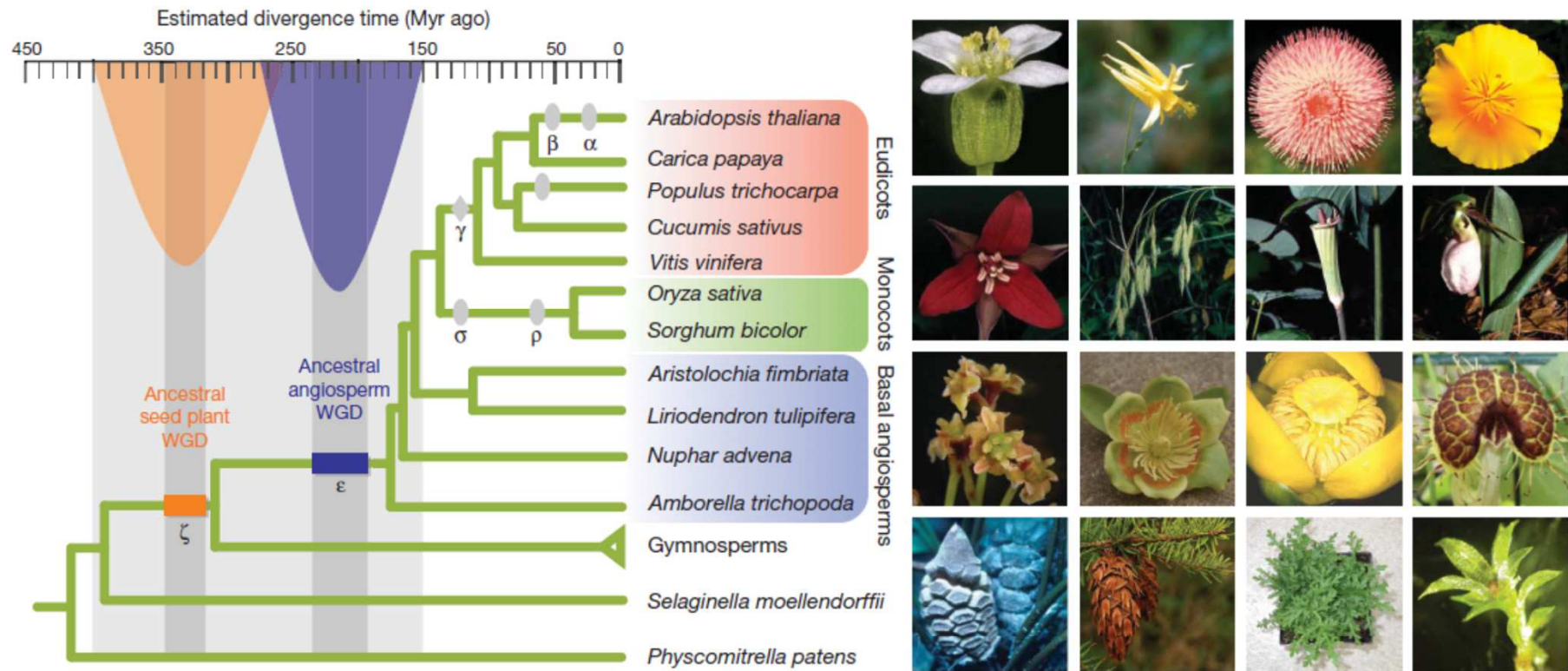
## A Recent Polyploidy Superimposed on Older Large-Scale Duplications in the *Arabidopsis* Genome.

Blanc et al. *Genome Research*. 2003.



The genomes of *Oryza sativa*: A history of duplications  
(Yu et al. *Plos Biology* 2005)

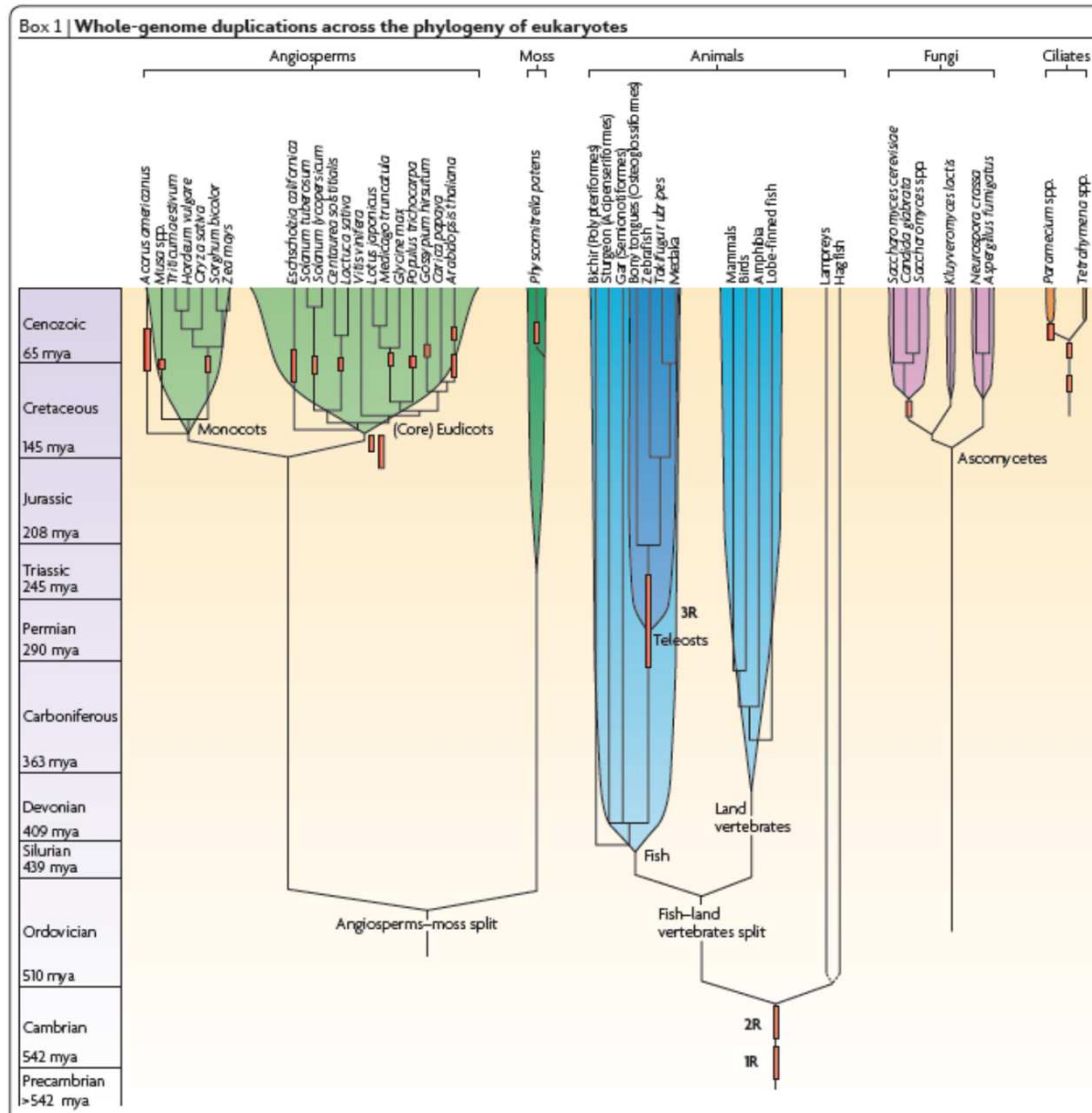
# Ancestral polyploidy in seed plants and angiosperms



**Figure 3 | Ancestral polyploidy events in seed plants and angiosperms.** Two ancestral duplications identified by integration of phylogenomic evidence and molecular time clock for land plant evolution. Ovals indicate the generally accepted genome duplications identified in sequenced genomes (see text). The diamond refers to the triplication event probably shared by all core eudicots. Horizontal bars denote confidence regions for ancestral seed plant WGD and ancestral angiosperm WGD, and are drawn to reflect upper and lower bounds of mean estimates from Fig. 2 (more orthogroups) and Supplementary Fig. 5 (more taxa). The photographs provide examples of the reproductive diversity of

eudicots (top row, left to right: *Arabidopsis thaliana*, *Aquilegia chrysantha*, *Cirsium pumilum*, *Eschscholzia californica*), monocots (second row, left to right: *Trillium erectum*, *Bromus kalmii*, *Arisaema triphyllum*, *Cypripedium acaule*), basal angiosperms (third row, left to right: *Amborella trichopoda*, *Liriodendron tulipifera*, *Nuphar advena*, *Aristolochia fimbriata*), gymnosperms (fourth row, first and second from left: *Zamia vazquezii*, *Pseudotsuga menziesii*) and the outgroups *Selaginella moellendorffii* (vegetative; fourth row, third from left) and *Physcomitrella patens* (fourth row, right). See Supplementary Table 4 for photo credits.

Jiao *et al.* Nature (2011)



Van de Peer et al. (Nature Review Genetics 2009)

**Les duplications de génome ont augmenté les innovations et la complexité morphologique du vivant**



**\* L'analyse des néopolyploïdes permet de mettre en évidence les mécanismes de la formation des polyploïdes et les processus qui affectent les génomes dupliqués à court terme.**

**\* L'analyse des paléopolyploïdes permet de mettre en évidence les processus évolutifs à long terme.**



## Les cotonniers (*Gossypium*)

Distribution géographique des lignées diploïdes (D'après J.F. Wendel)

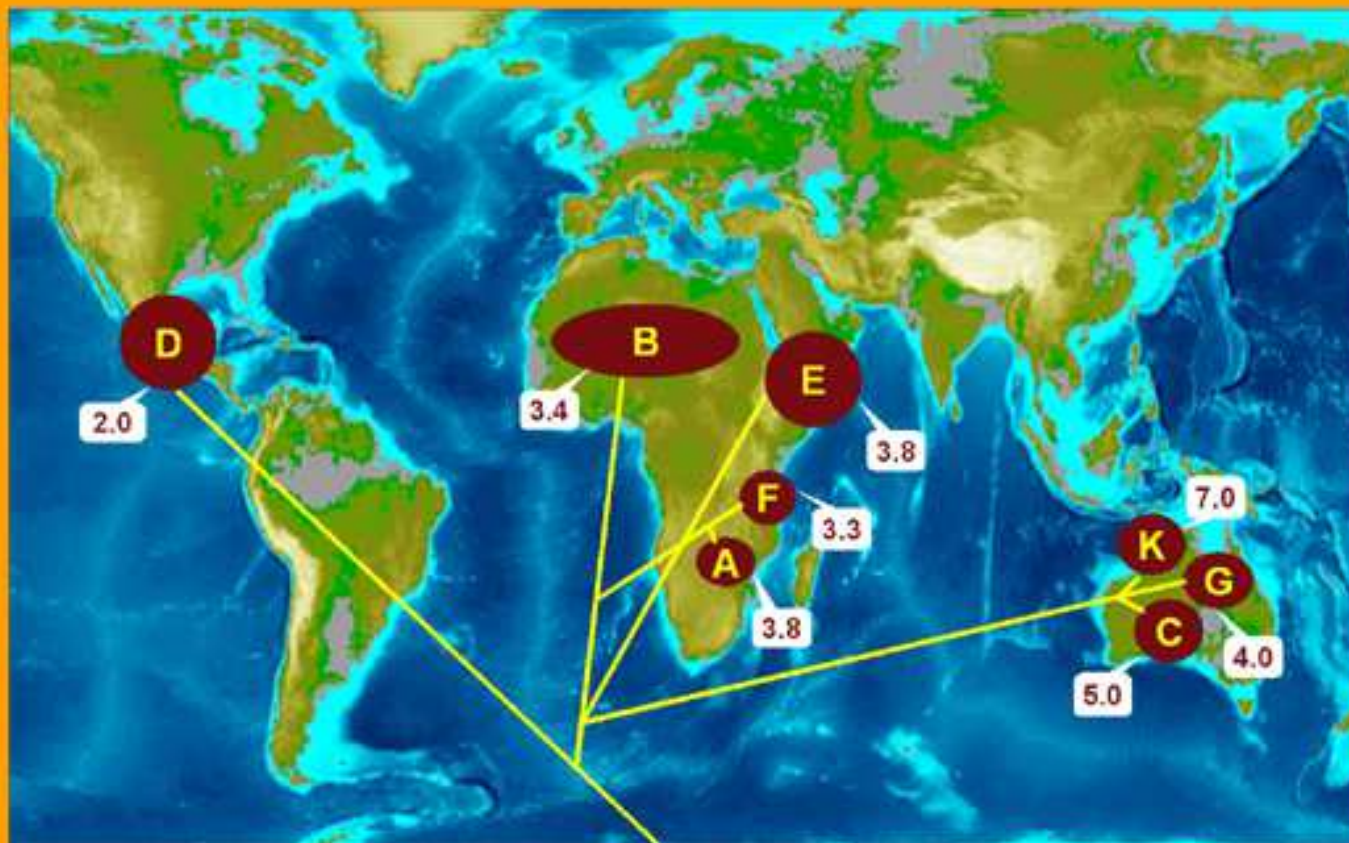


Figure 1.

Seven diploid genome groups exist within *Gossypium*. All diploid members of the genus have  $n = 13$ . Despite conservation of chromosome number and number of protein coding genes, 2C genome size varies 3.5 fold, from 2.0 pg in the New World D-genome species to 7.0 pg in the Australian K-genome species. Our best estimate phylogeny among these groups is shown.

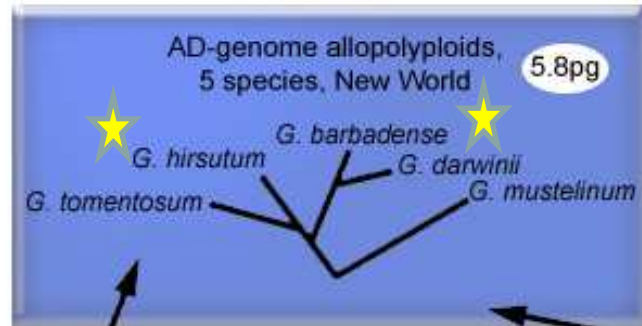
# Pylogénie du genre *Gossypium* (Cotonnier)

D'après J.F. Wendel

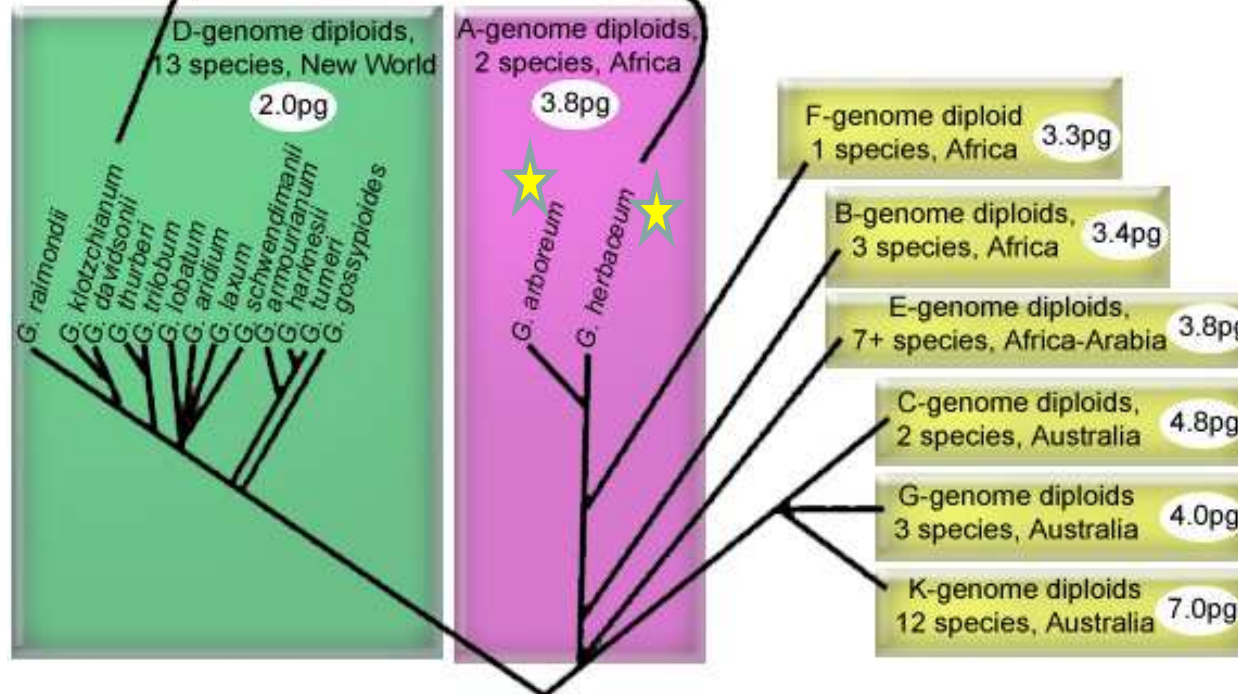


*G. hirsutum*

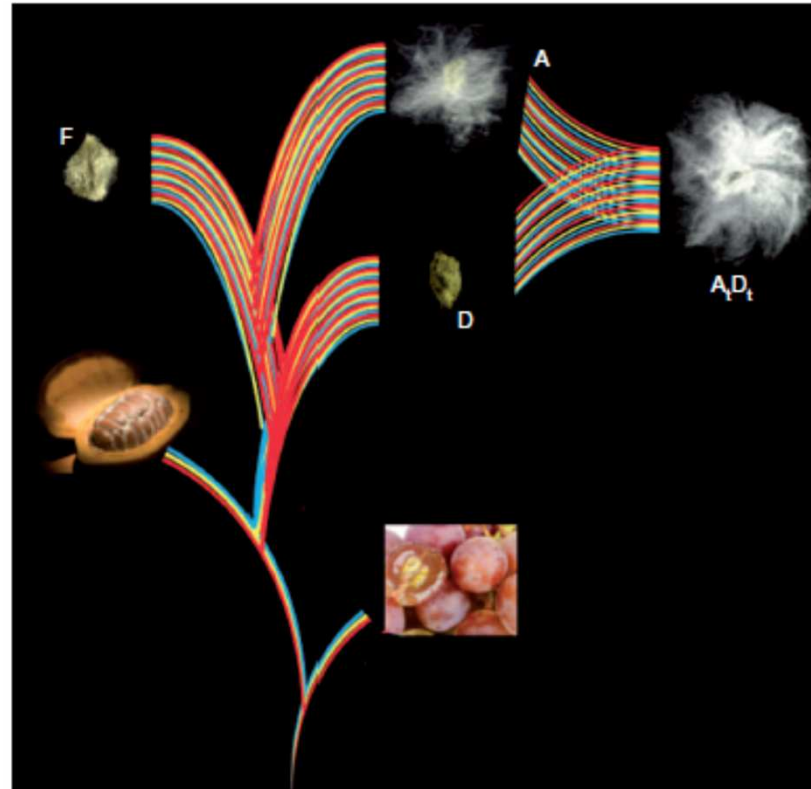
1-2 Mya



5-10 Mya



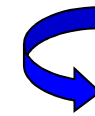
## Le cotonnier cultivé actuel *Gossypium hirsutum*, allotétraploïde: Un génome 30-36 fois paleodupliqué



**Figure 1 | Evolution of spinnable cotton fibres.** Paleohexaploidy in a eudicot ancestor (red, yellow and blue lines) formed a genome resembling that of grape (bottom right). Shortly after divergence from cacao (bottom left), the *Gossypium* lineage experienced a five- to sixfold ploidy increase. Spinnable fibre evolved in the A genome after its divergence from the F genome, and was further elaborated after the merger of A and D genomes ~1–2 Myr ago, forming the common ancestor of *G. hirsutum* (A<sub>1</sub>D<sub>1</sub>) and *G. barbadense* (A<sub>2</sub>D<sub>2</sub>) (see text for details).

### Repeated polyploidization of *Gossypium* genomes and the evolution of spinnable cotton fibres

**LE GENRE *SPARTINA* (4x, 6x, 7x, 12x):  
Une longue histoire d'hybridations et de  
duplications génomiques**



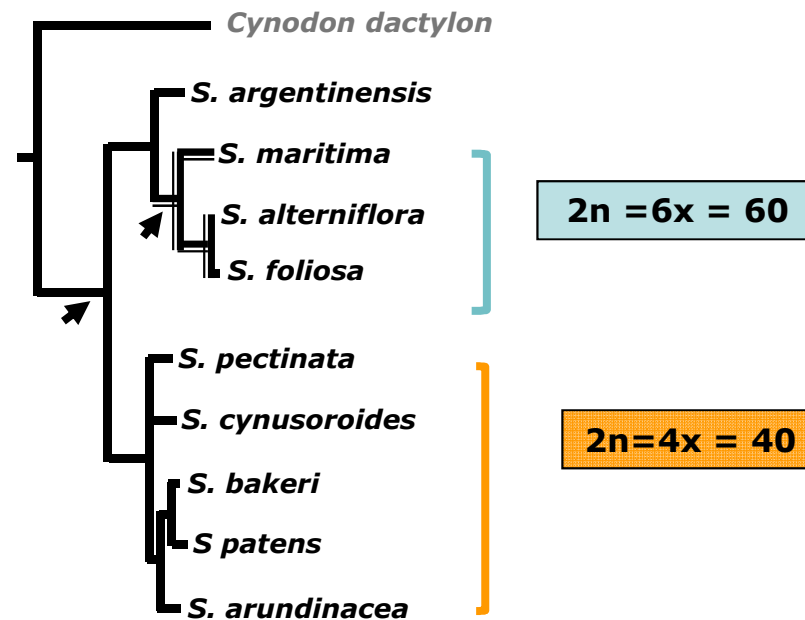
**Facteurs clés de  
leur succès  
écologique**



**ROSCOFF 2005**

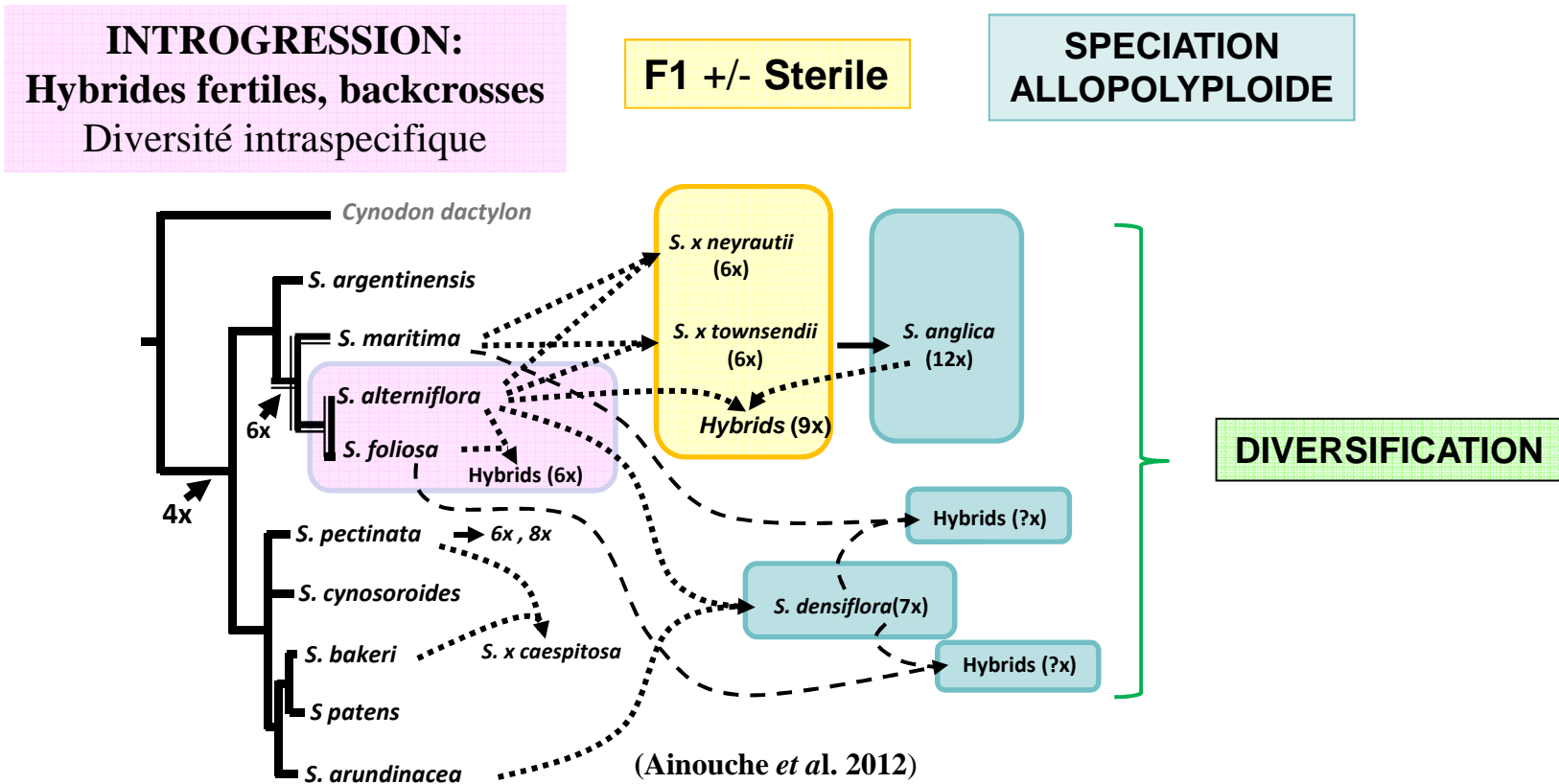
# *Spartina*: Un système modèle d'hybridation et polyploïdie

Toutes les espèces de spartines sont  
polyploïdes  
 $x = 10$ ,  $2n=4x=40$  -  $2n=12x=120$



(Ainouche *et al.* Springer, 2012)

# *Spartina*: Un système modèle d'hybridation et polyploidie



*S. alterniflora* x *S. foliosa* hybrids  
(San Francisco, CA, USA)  
(Ayres & Strong, 2013)



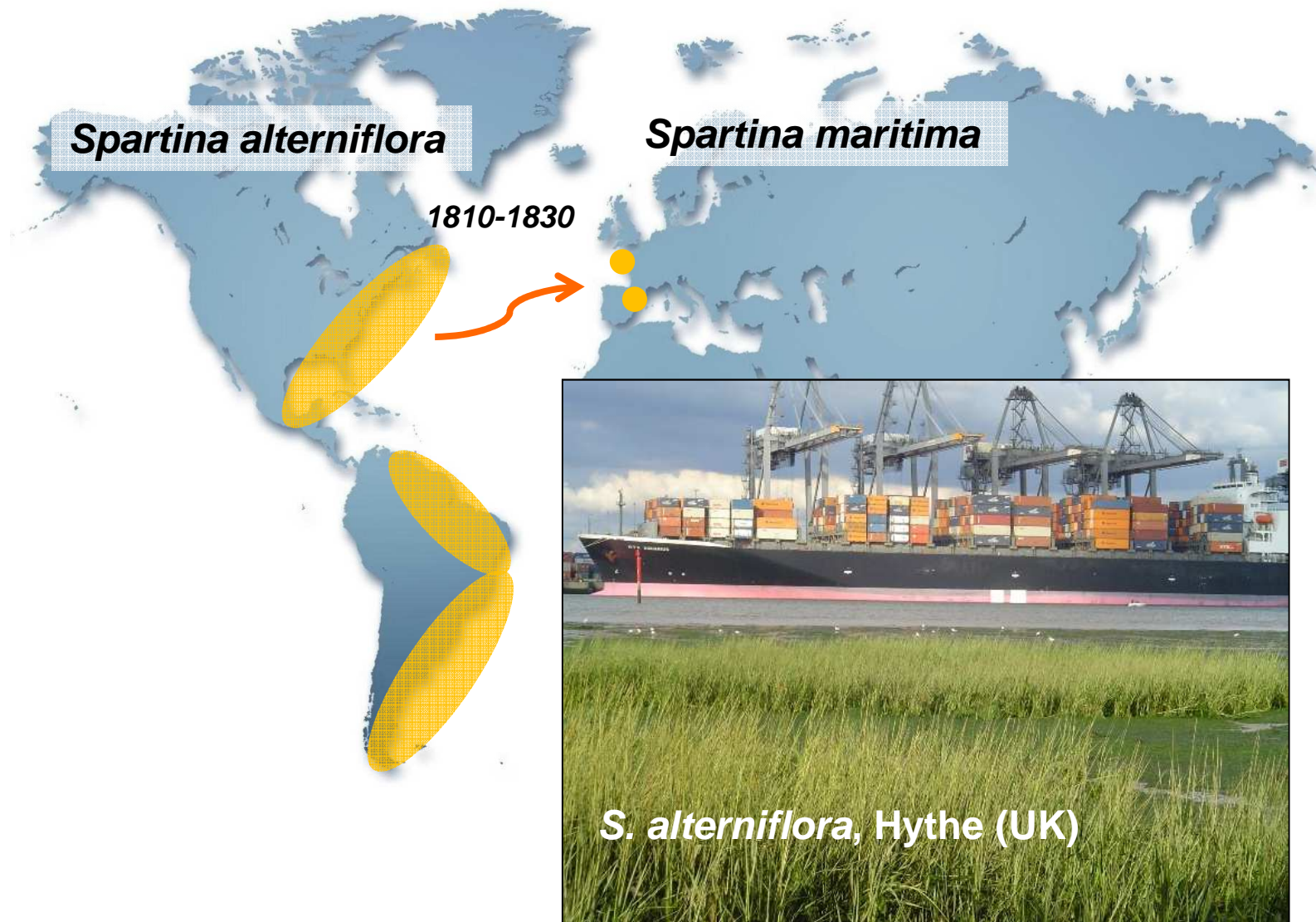
*S. x neyrautii*, France)



*S. anglica* (UK)

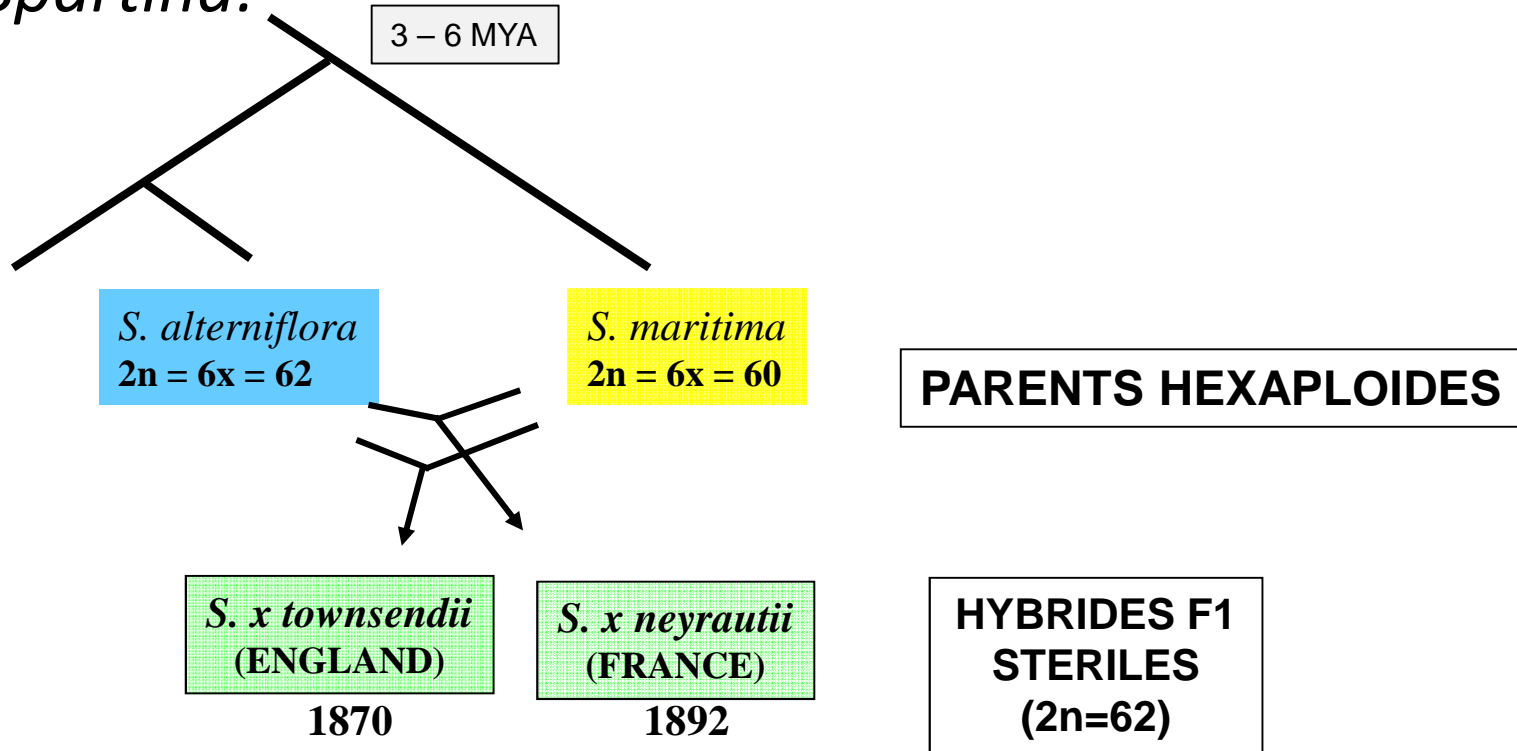
# Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:

*S. alterniflora* x *maritima*

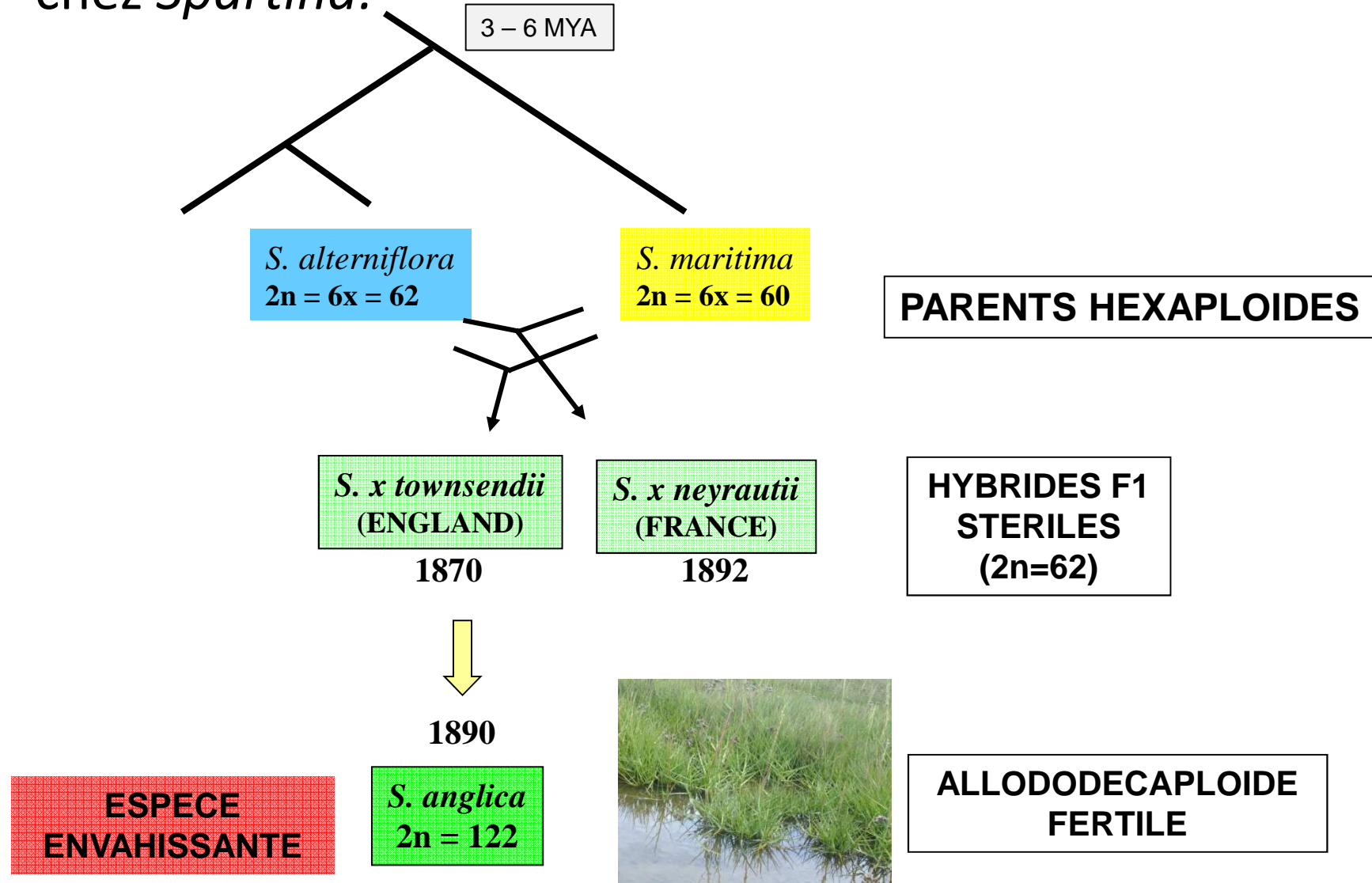




# Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



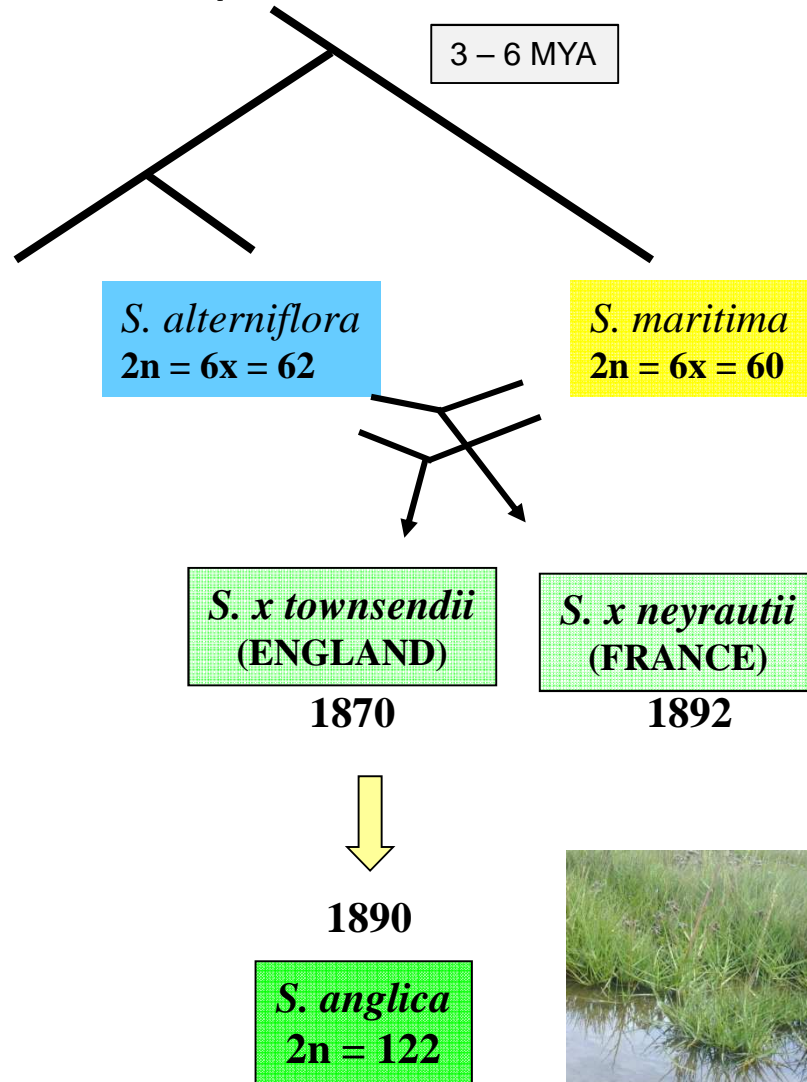
# Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



# *S. anglica*: Une distribution mondiale



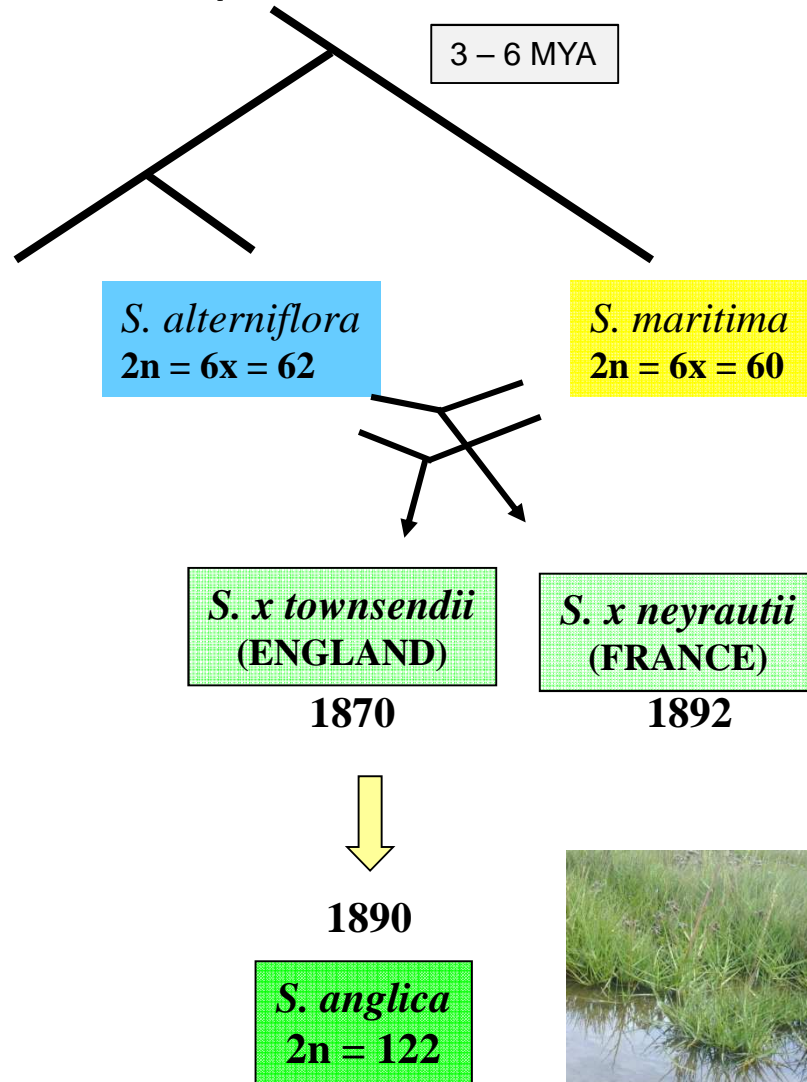
# Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



Deux évènements indépendants d'hybridation impliquant les mêmes espèces parentales

*Spartina anglica* C. E. Hubbard: a natural model system for analysing early evolutionary changes that affect allopolyploid genomes

# Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:

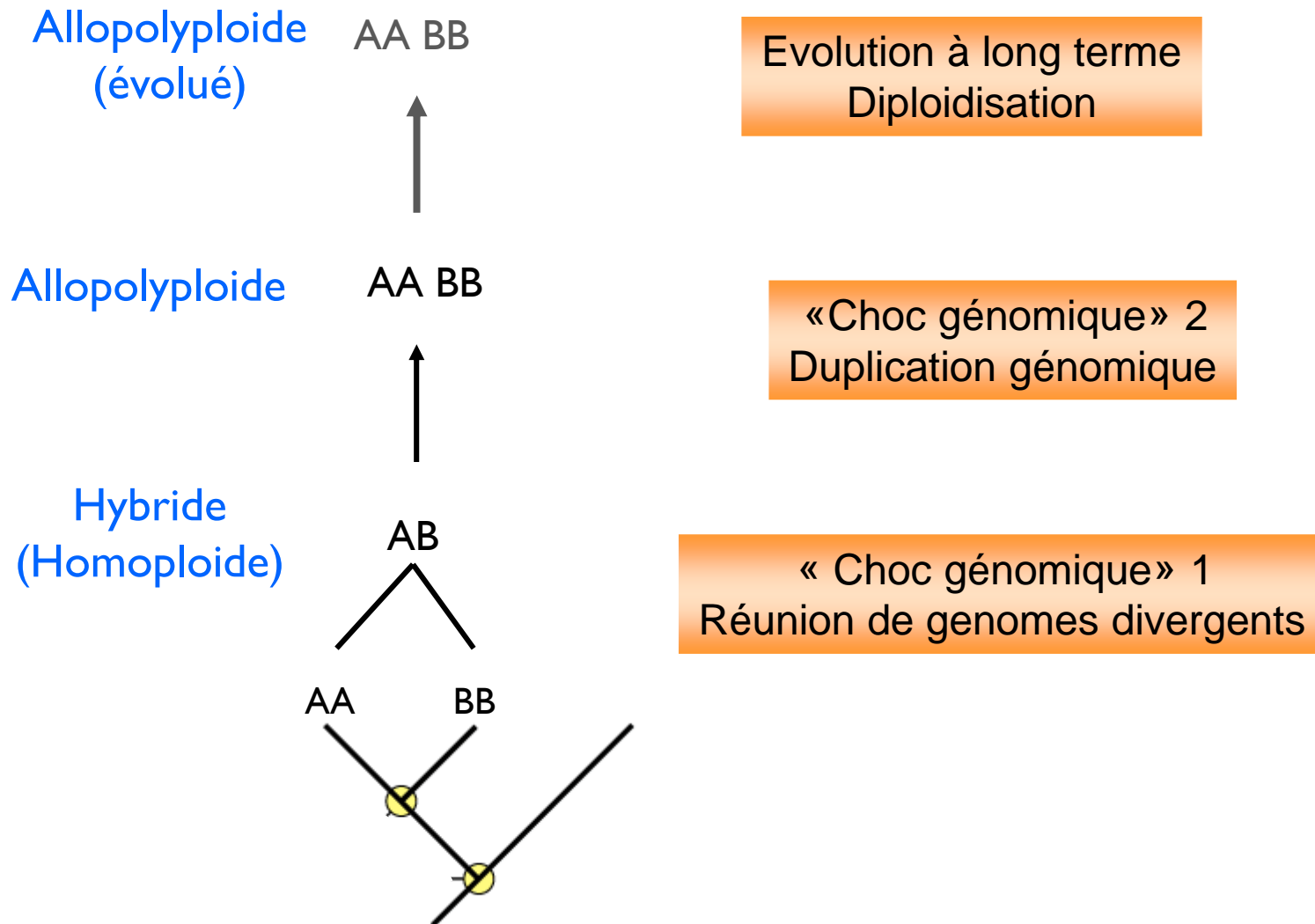


Deux évènements indépendants d'hybridation impliquant les mêmes espèces parentales

Effets de l'hybridation vs de la duplication génomique

*Spartina anglica* C. E. Hubbard: a natural model system for analysing early evolutionary changes that affect allopolyploid genomes

Allopolyploidie => conséquences génomiques importantes (i.e. non une « simple » addition génomique)!

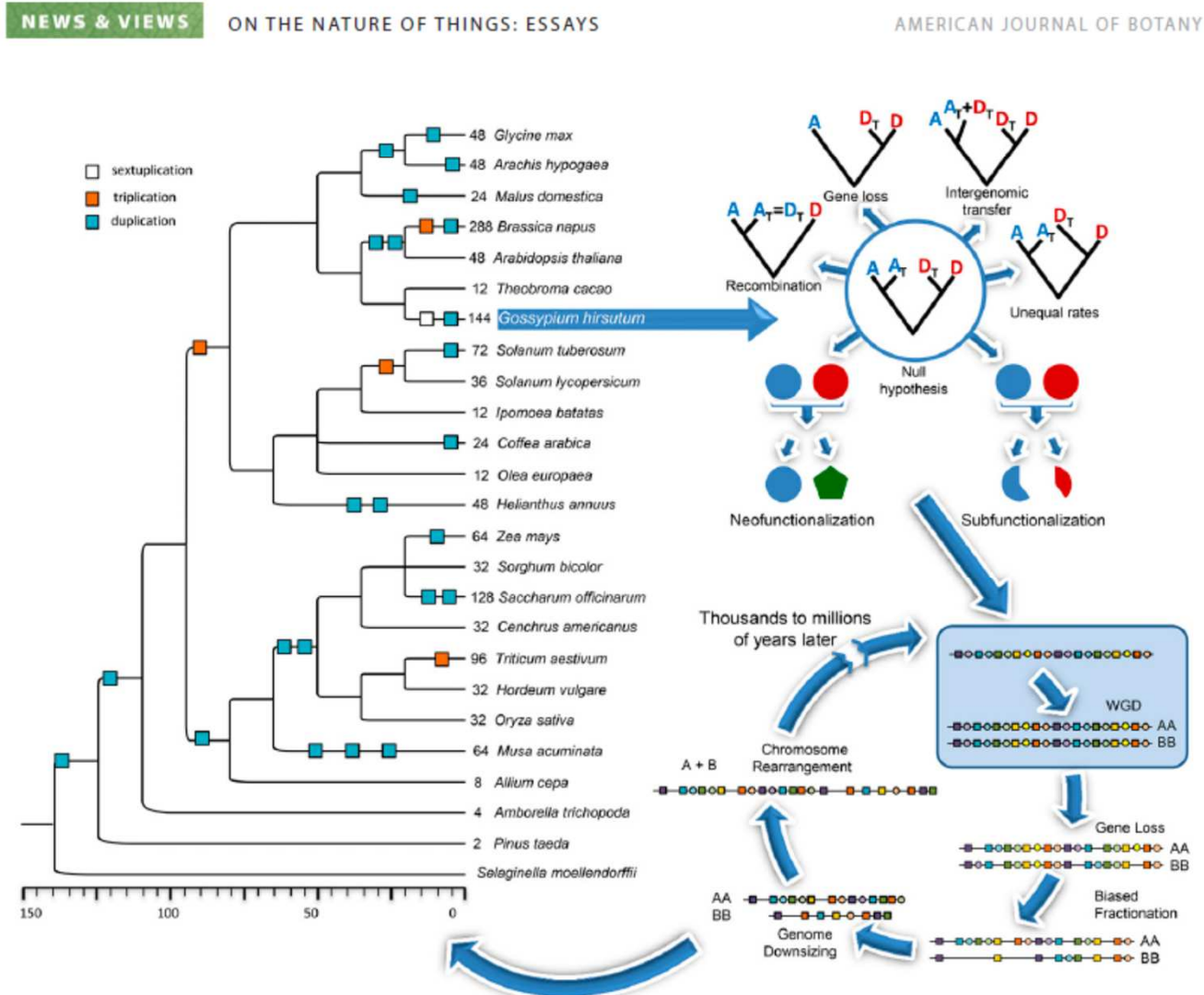


# The wondrous cycles of polyploidy in plants<sup>1</sup>

Jonathan F. Wendel<sup>2</sup>

AMERICAN JOURNAL OF BOTANY 102(11): 1-4, 2015

« Wash, rinse, and repeat ... »



# Conclusions

La polyploïdie a marqué la diversification des plantes

Les génomes polyploïdes sont particulièrement dynamiques

Conséquences fonctionnelles importantes

Approches de génomiques à haut débit: Nouvelles perspectives pour la compréhension de fonctions biologiques d'intérêt, dans les systèmes «non-modèles»







*Merci pour votre attention*