

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

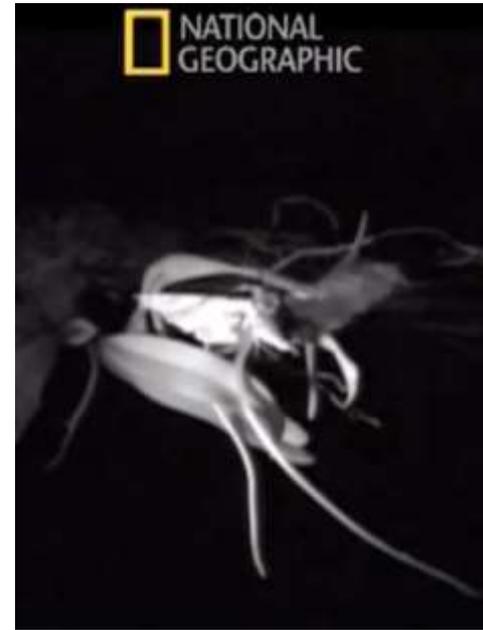
1 – Quelques repères historiques

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



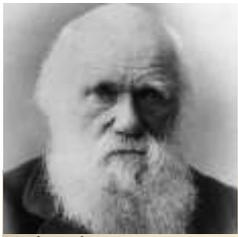
Xanthopan morgani praedicta
découvert en 1903

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



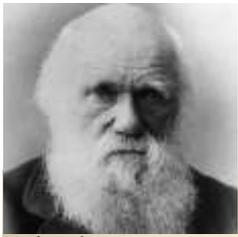
Charles Darwin
(1809-1882)

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.

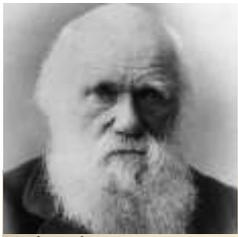
By CHARLES DARWIN, M.A., F.R.S., &c.

WITH ILLUSTRATIONS.

LONDON :
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1862.

WISSELE 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. »

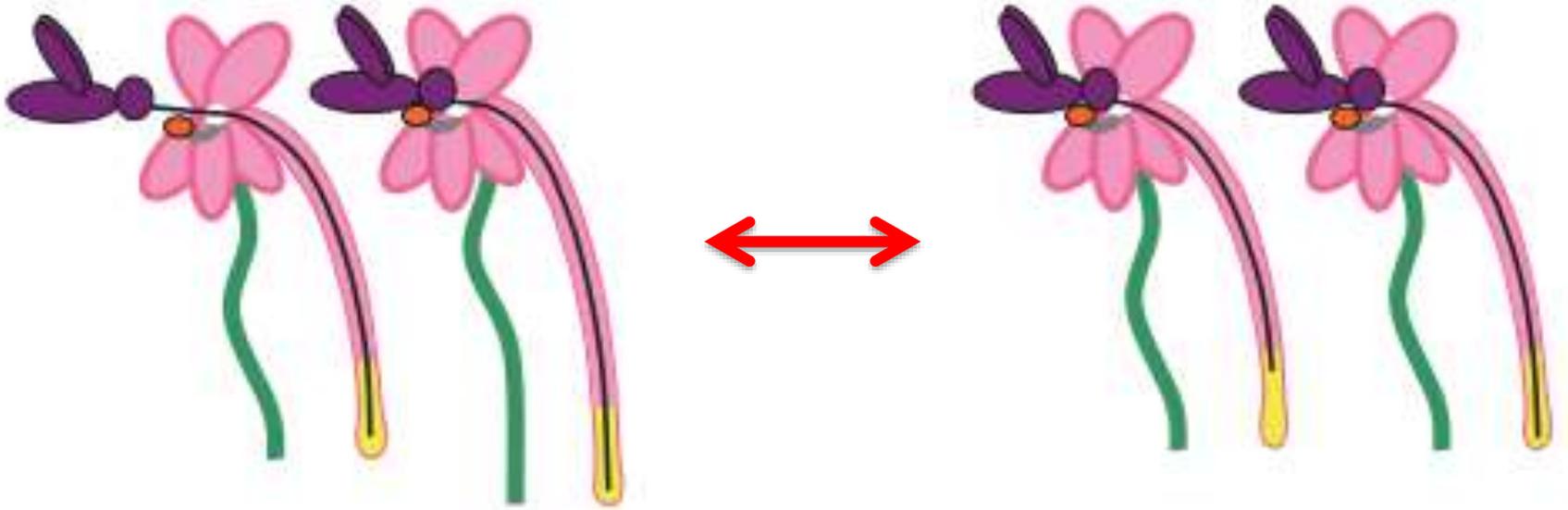


Alfred R. Wallace
(1823-1913)



« 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

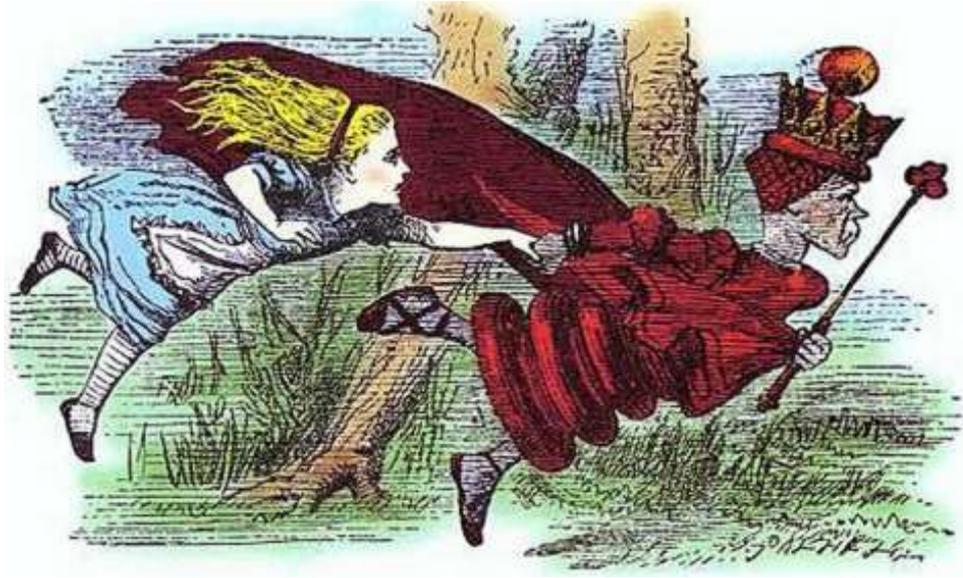
Les papillons avec les plus longues pièces buccales
ont une meilleure valeur sélective

**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

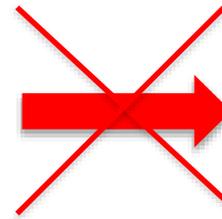


Wasserthal, 1997

« 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 ?



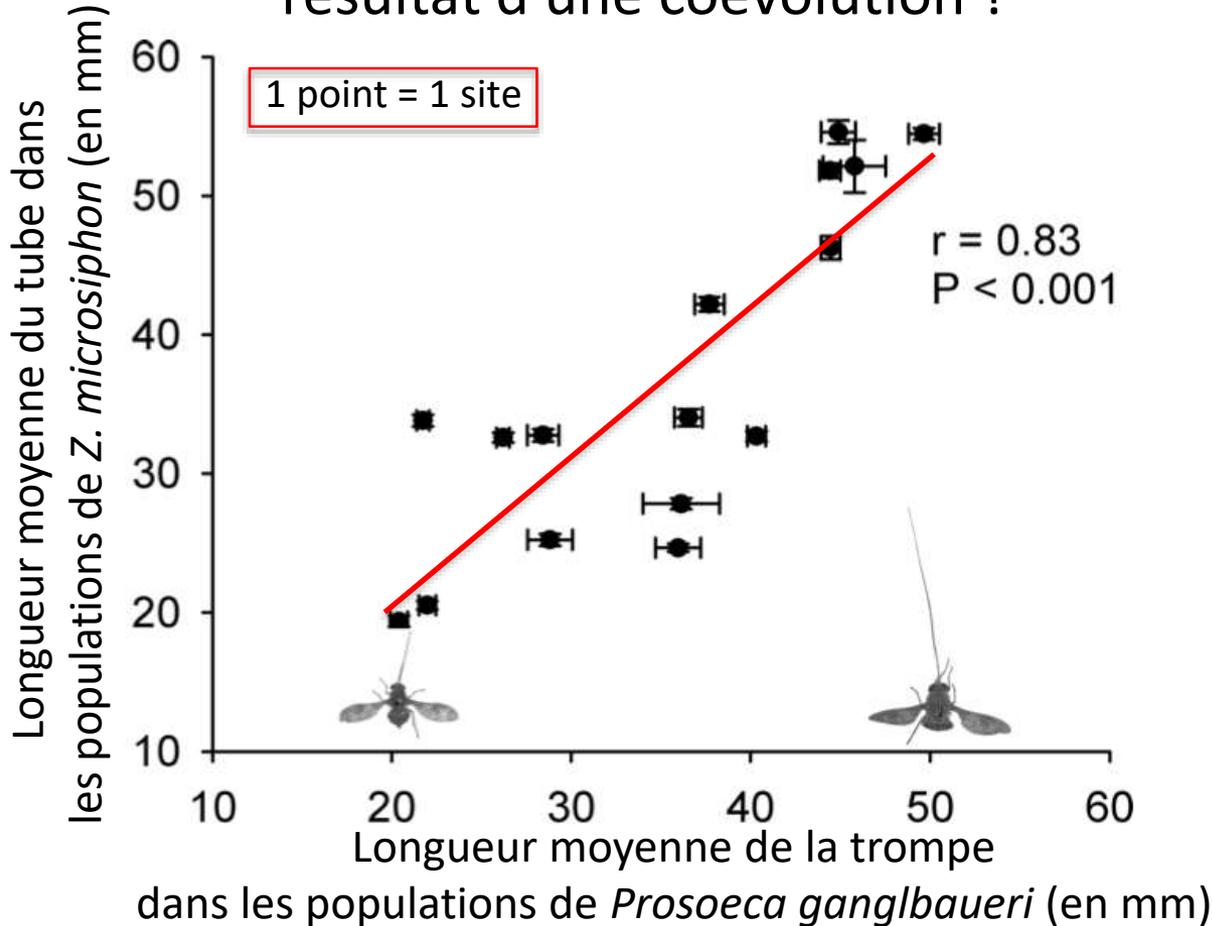
Prosoeca ganglbaueri
(Diptère)

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 long tube sur un site de mouches à longue trompe	Plantes à tube court transférées sur un site de mouches à longue trompe
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 ?

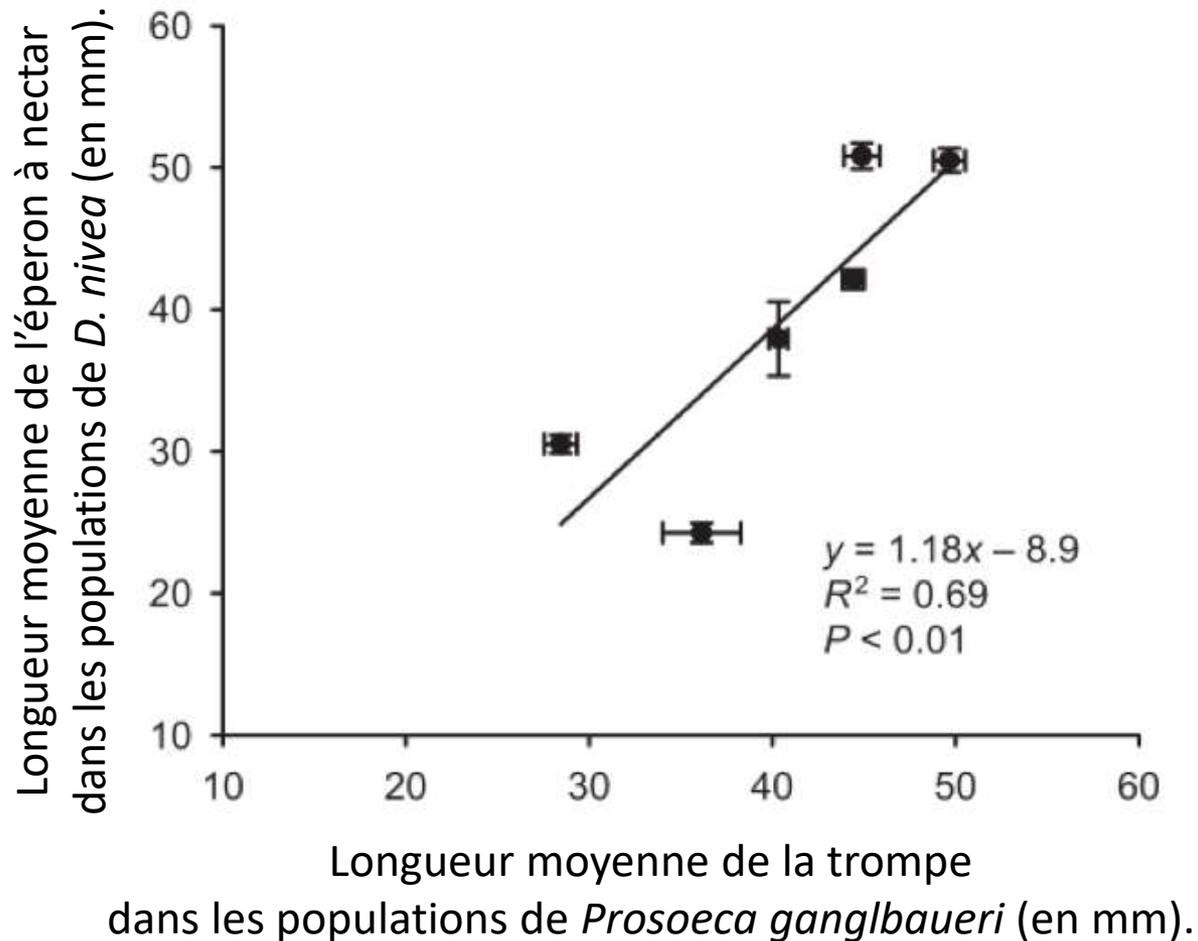
1 – Relation *Disa nivea* / *Prosoeca ganglbaueri* : résultat d'une coévolution ?

Prosoeca ganglbaueri
(Diptère)



Disa nivea
(Orchidacée)

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

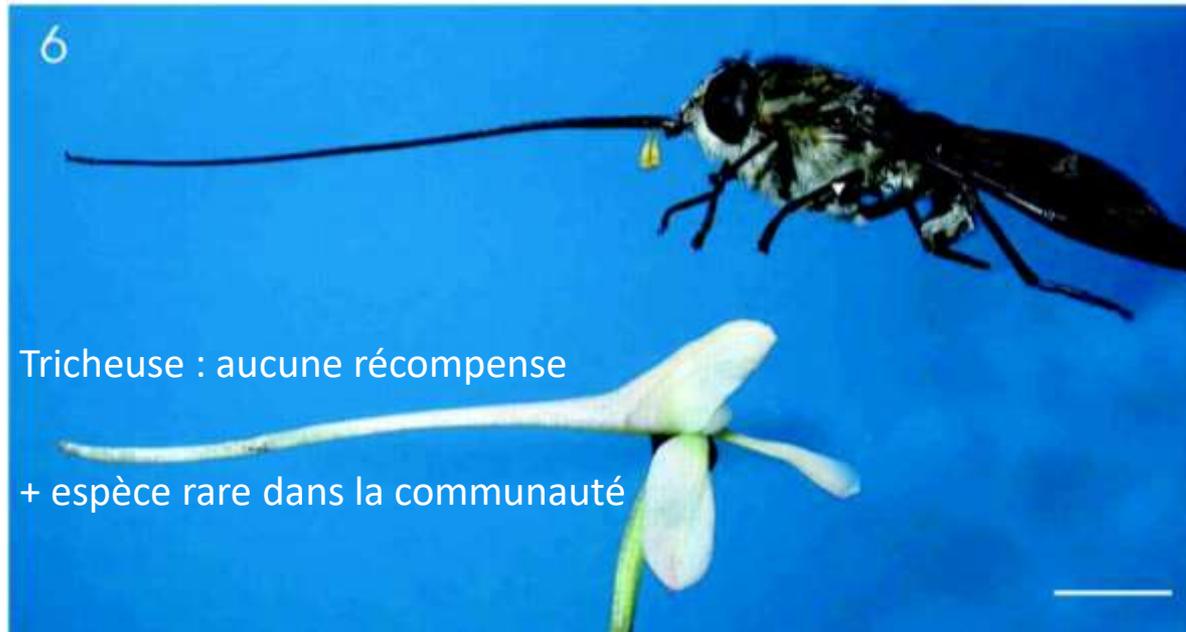


Corrélation entre les deux caractères + non corrélation de chacun des caractères avec d'autres facteurs

→ Lien causal entre l'évolution des deux caractères

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

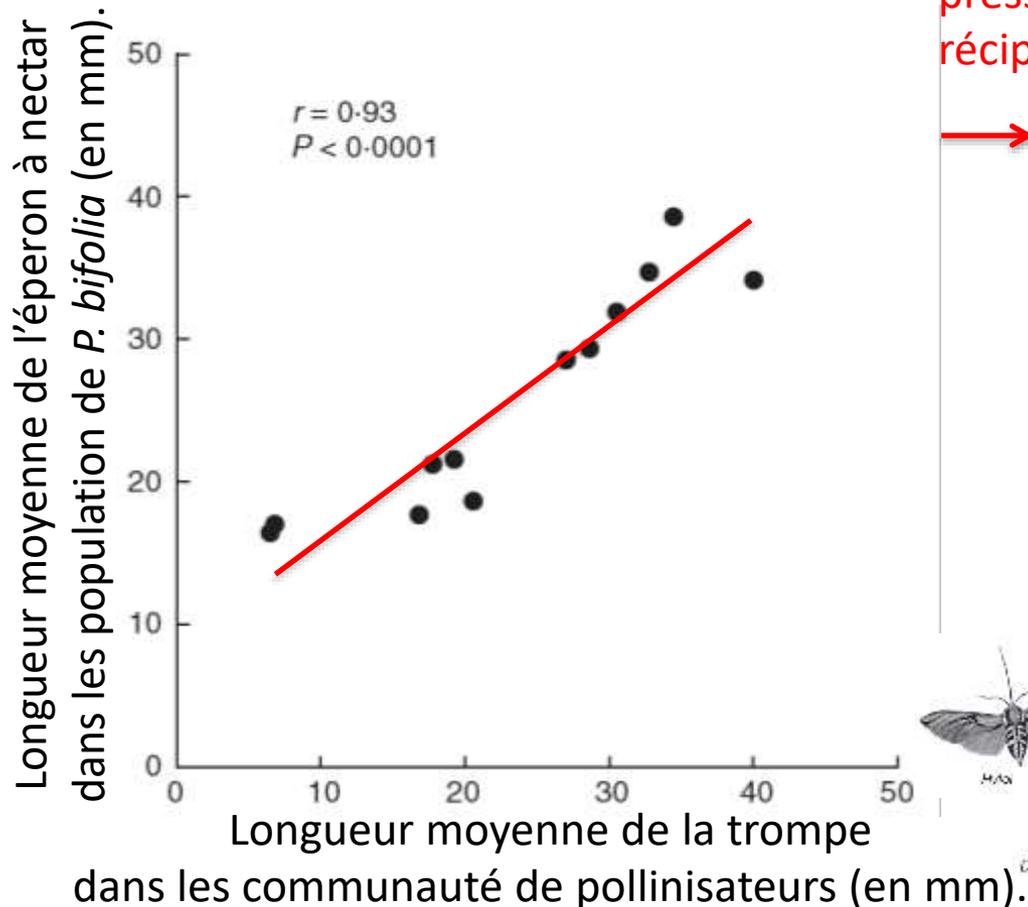
Prosoeca ganglbaueri
(Diptère)



Disa nivea
(Orchidacée)

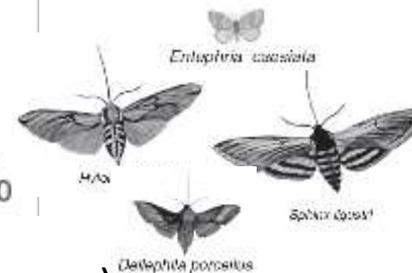
L'orchidée dépend de la mouche mais la réciproque n'est pas vraie...
Pression de sélection unilatérale !

2 - Relation *Platanthera bifolia* / papillons



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

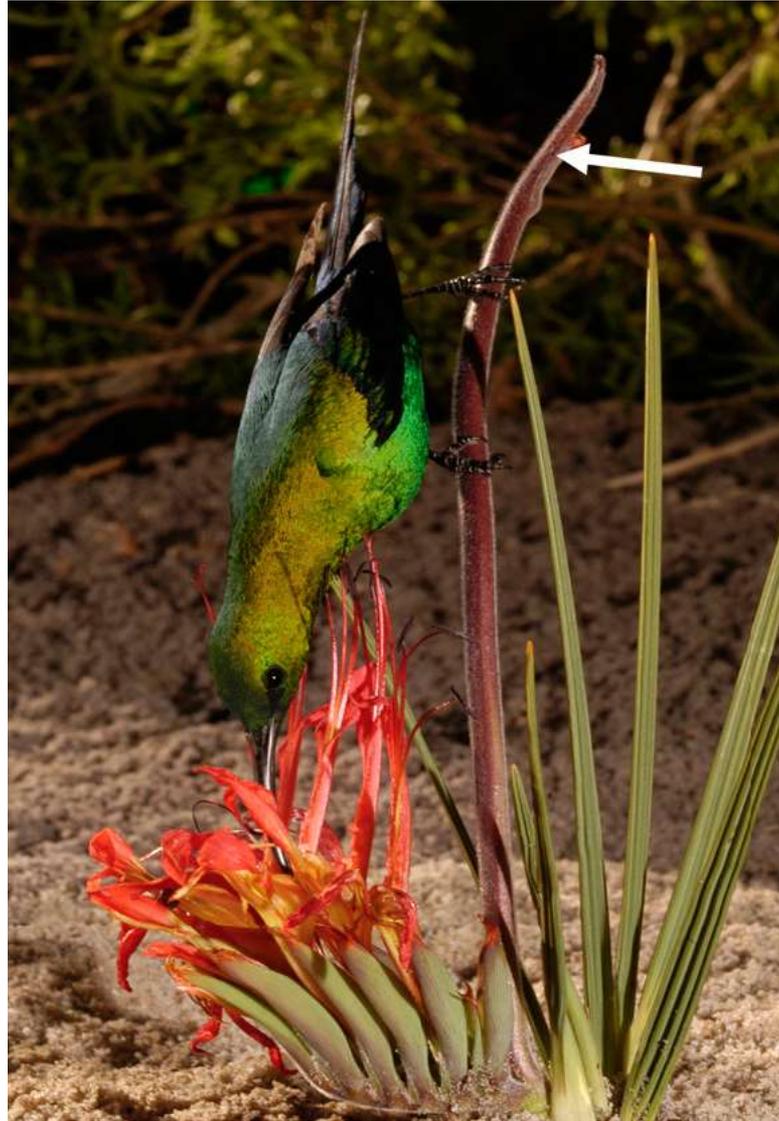
→ **Concept de coévolution diffuse**



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.

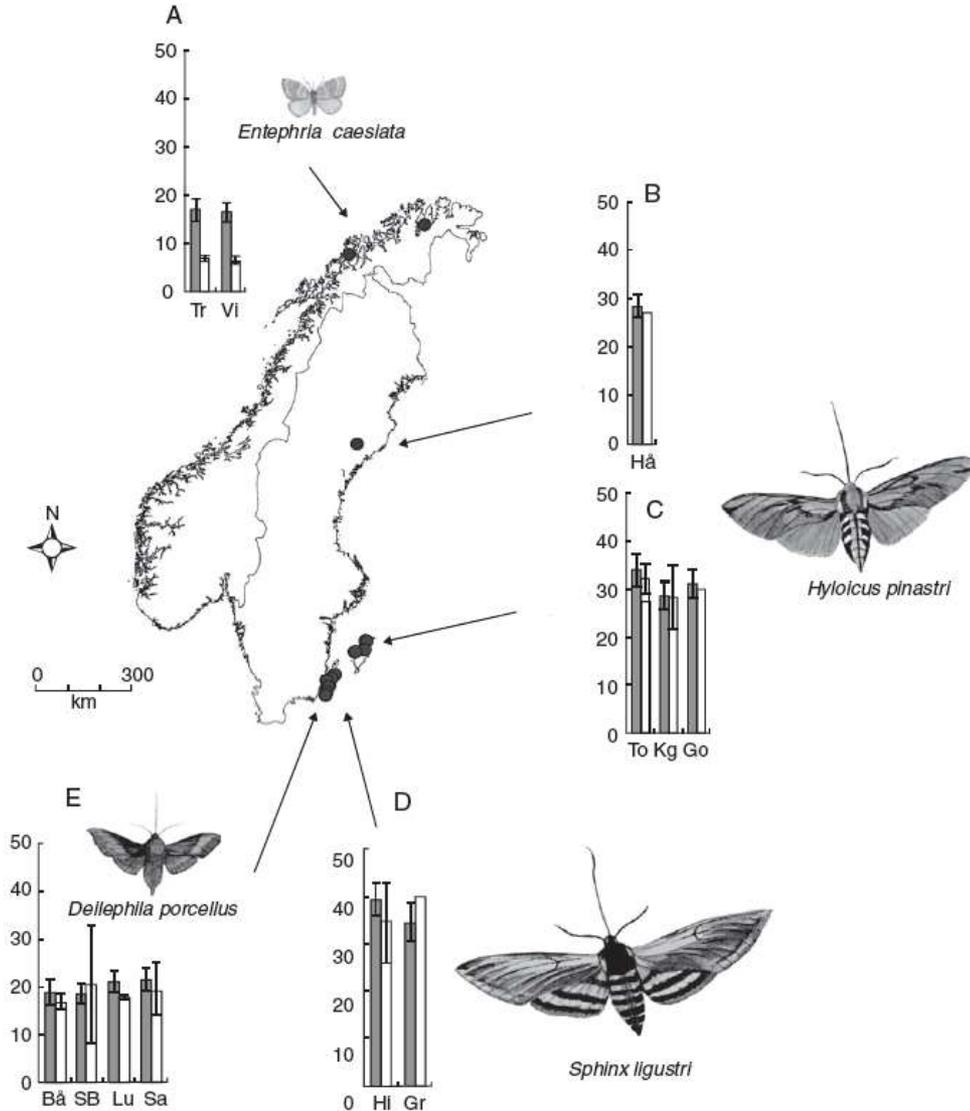
WASSERTHAL LT. 1997. The pollinators of the Malagasy star orchids *Angraecum sesquipedale*, *A. sororium*, and *A. compactum* and the evolution of extremely long spurs by pollinator shift. *Botanica acta* 110: 343-359.

2 - Relation *Platanthera bifolia* / papillons

- Résultat d'une coévolution ?



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

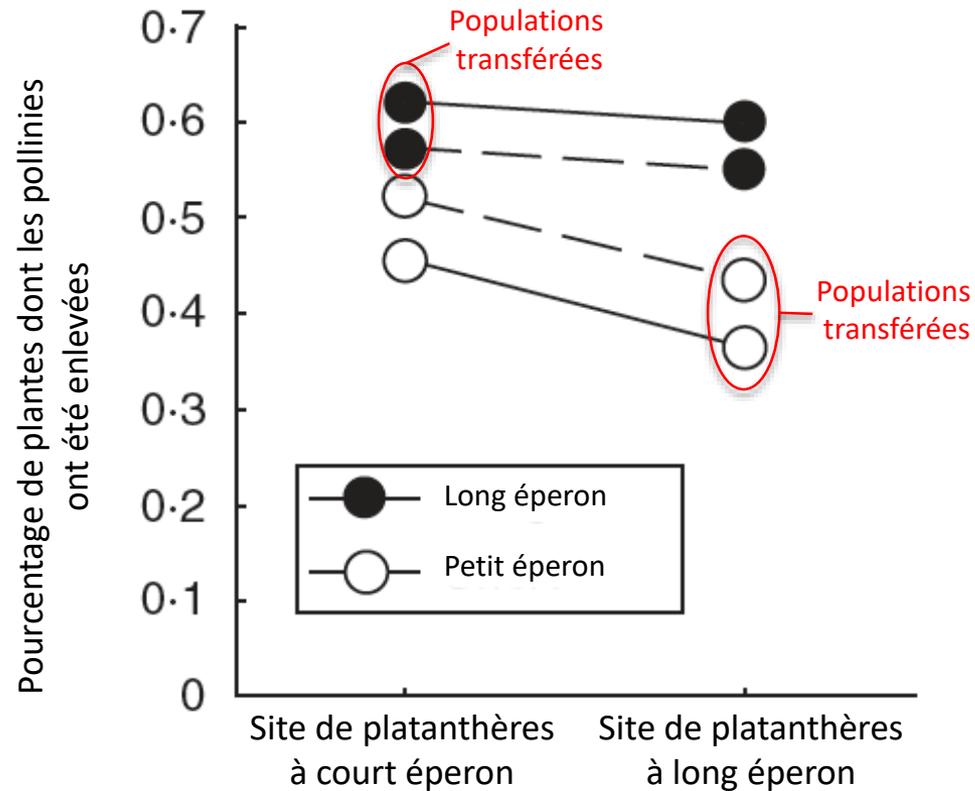


La relation *Platanthera bifolia* / Sphinx

- Résultat d'une ~~coévolution~~ ?



Expériences de transfert des Platanthères

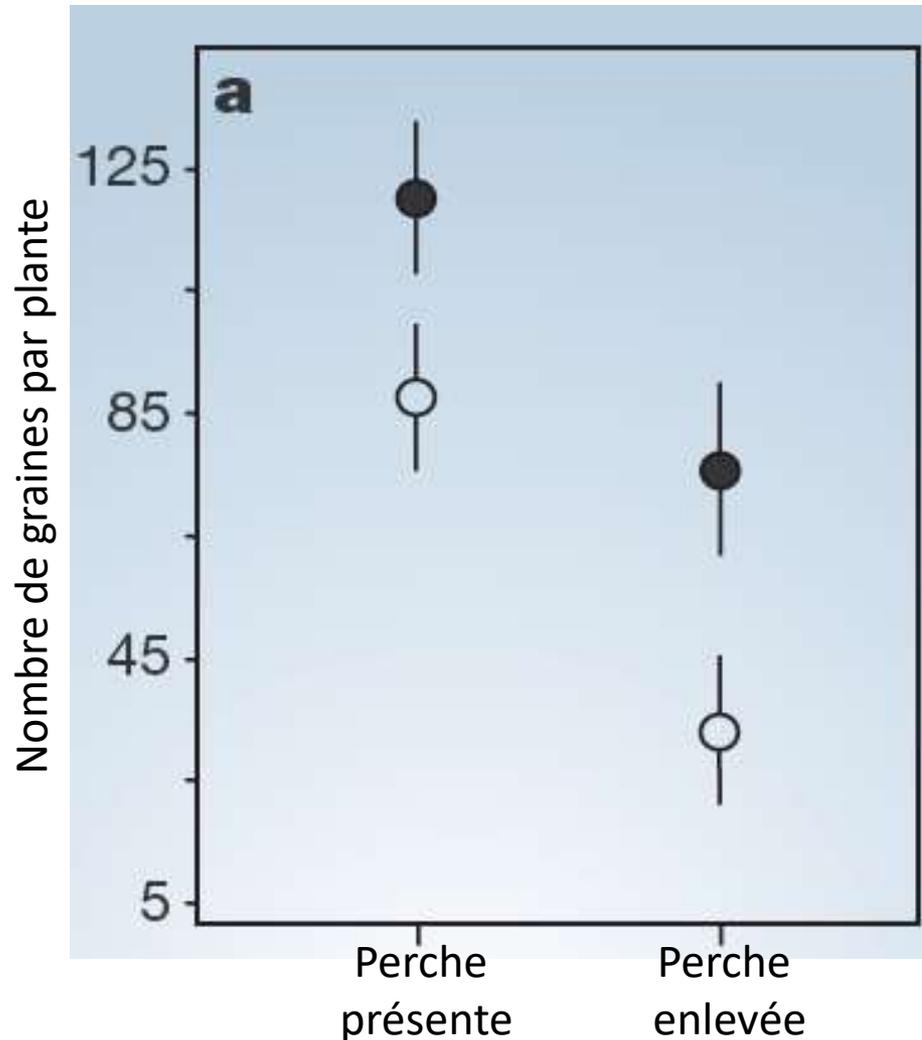


Le succès reproducteur des platanthères est affecté par la communauté de pollinisateurs.
L'inverse n'est pas vrai.

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* ?

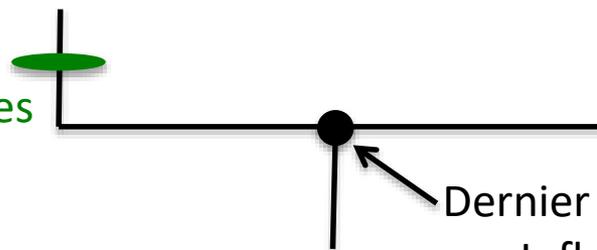


B. ringens



B. hirsuta

- Perche
- Fleurs basales



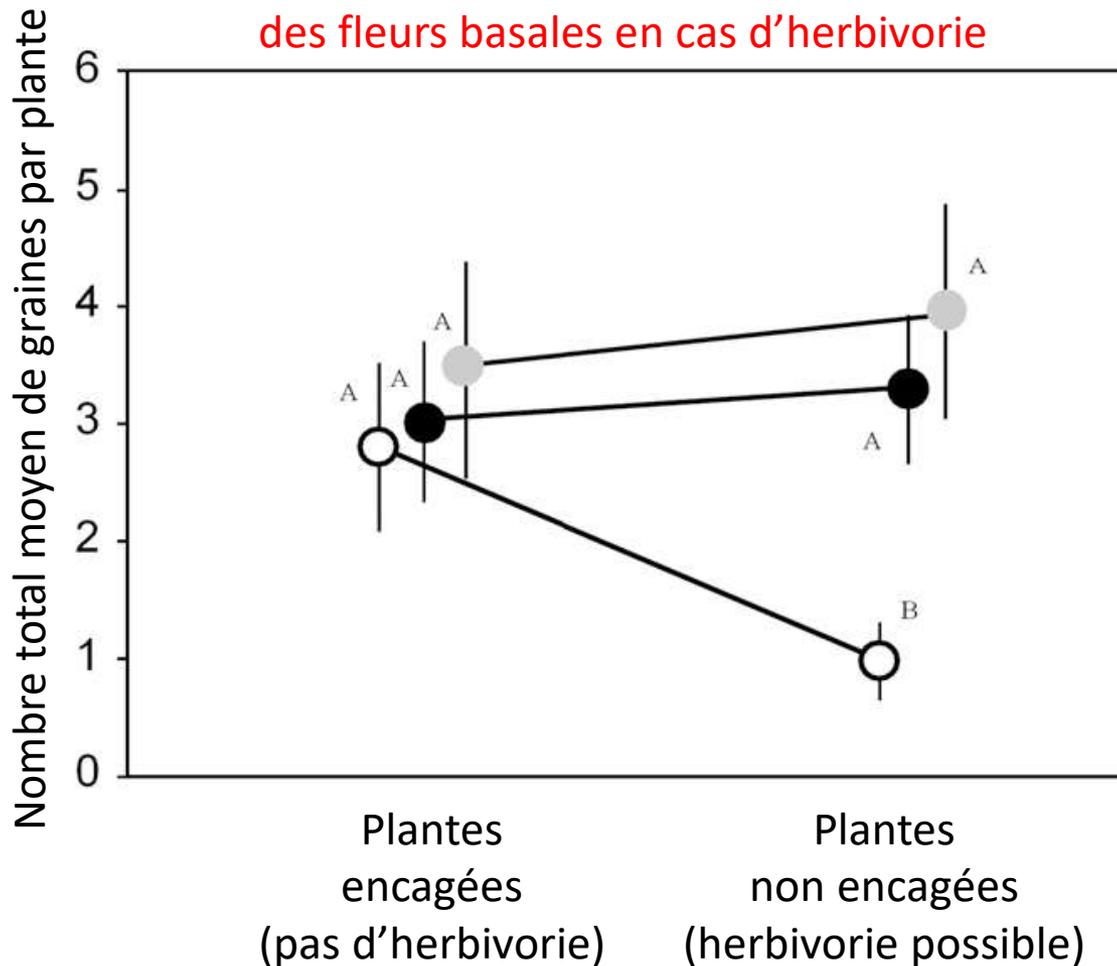
Dernier ancêtre commun avec une Inflorescence « classique »

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

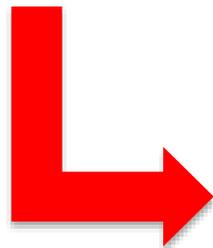
3 - Relation *Babiana ringens* / *Nectarinia famosa* :

- 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 ...*

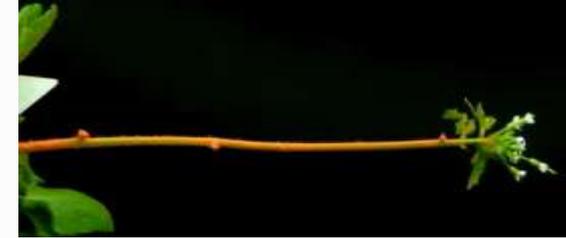


La sensitive, *Mimosa pudica*

= mouvements **rapides**
par variations de pression

Gravité
unidirectionnelle

= mouvements **lents**
de croissance



Arabidopsis thaliana



Le pois, *Pisum sativum*

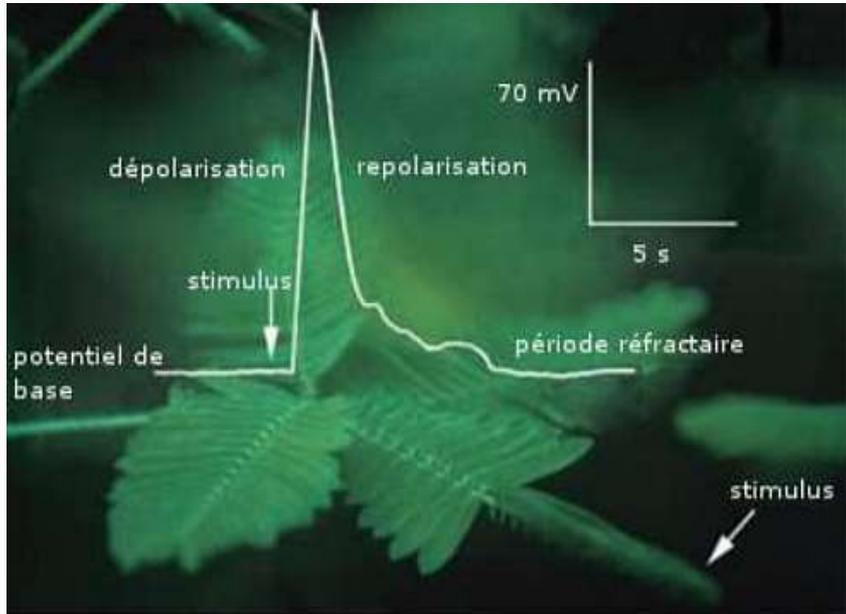


Lumière
anisotrope

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

I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

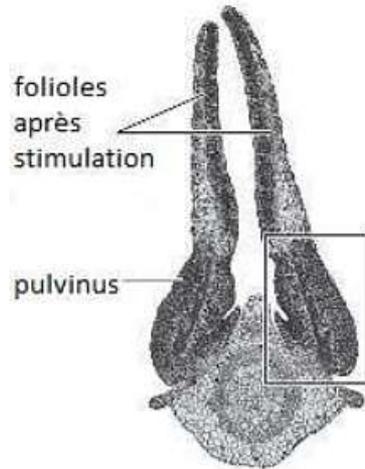
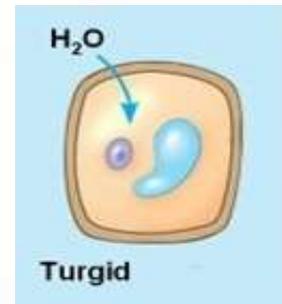
La sensitive (Mimosa pudica)



« flexor »



« extensor »

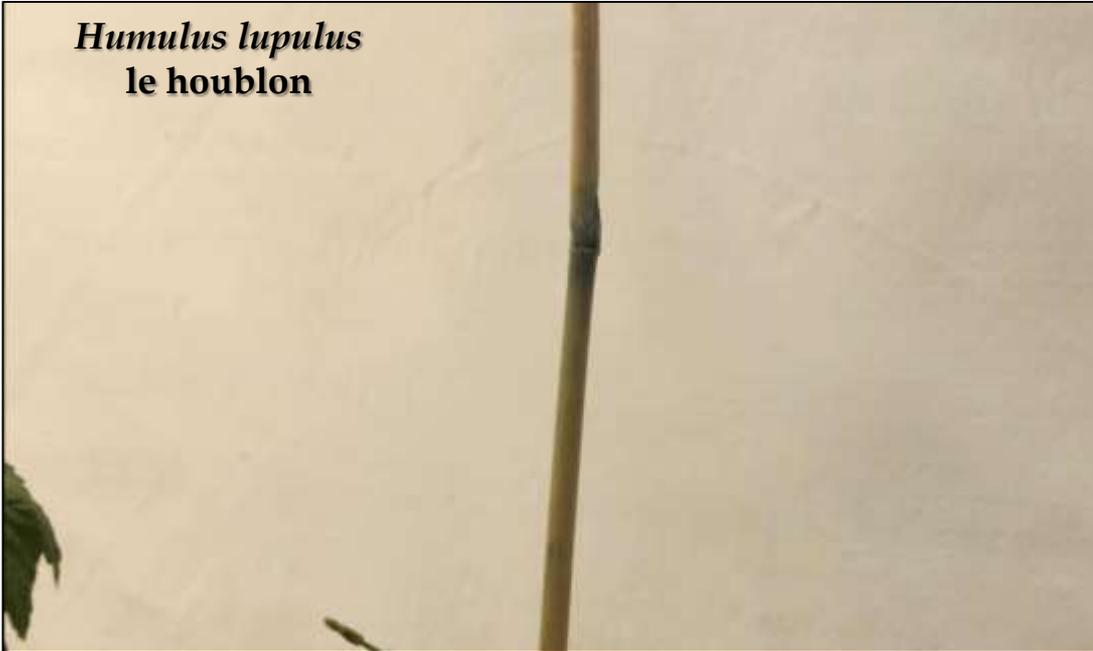


Signal électrique et
MOUVEMENT RAPIDE par
variations de pression (turgescence / plasmolyse)

THIGMONASTIE

I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

Humulus lupulus
le houblon



MOUVEMENT LENT par
croissance différentielle

THIGMOMORPHOGENESE

Lonicera periclymenum
le chèvrefeuille



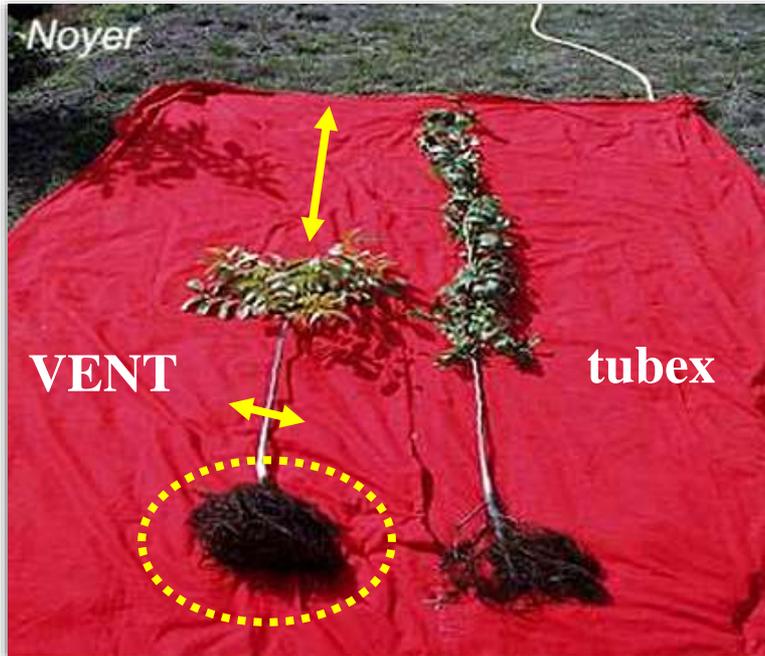
Clermont
Auvergne

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

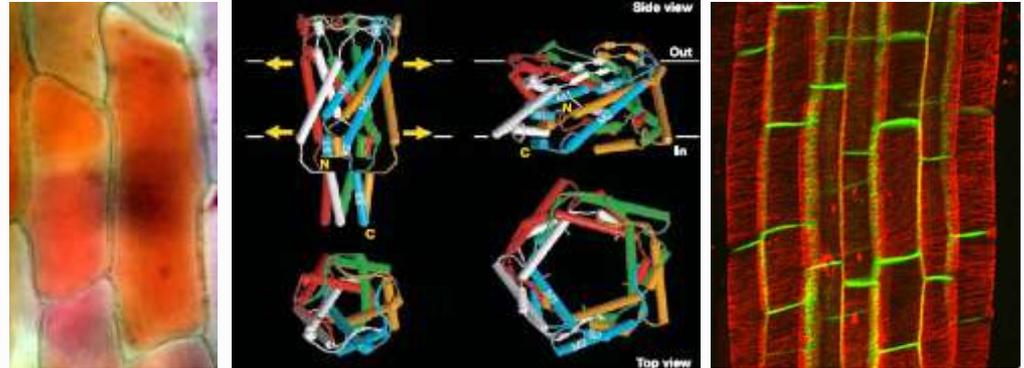


I. Les plantes ont le sens du TOUCHER

Un sens « *diffus* » ...

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

➔ perception de la déformation

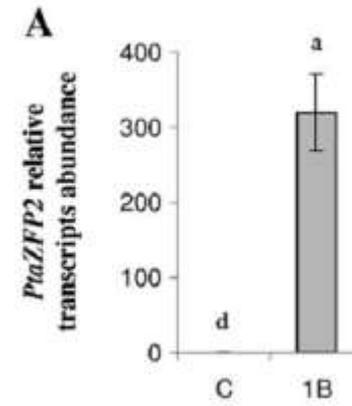


- Une extrême sensibilité

➔ **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

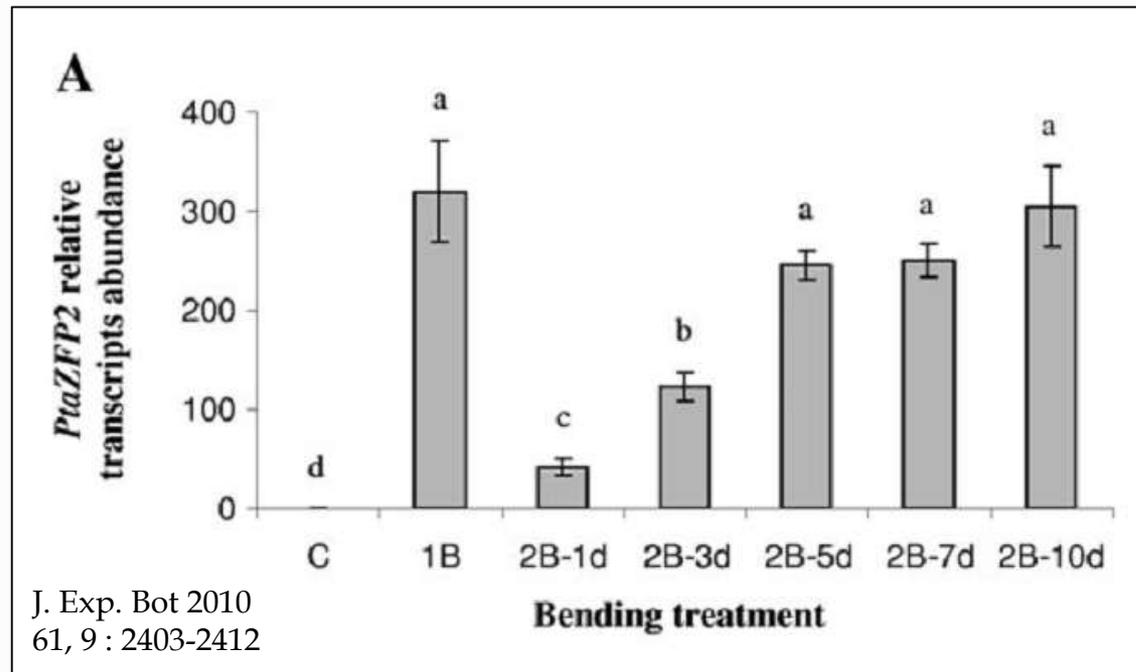
➔ 2000 gènes régulés en réponse à une flexion (tige), certains dès 5 min



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.*

CONTRÔLE POSTURAL

COURBURE + RECTIFICATION

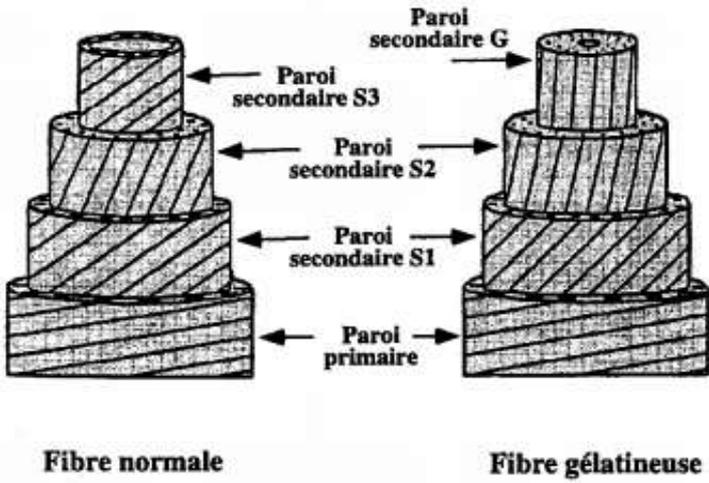
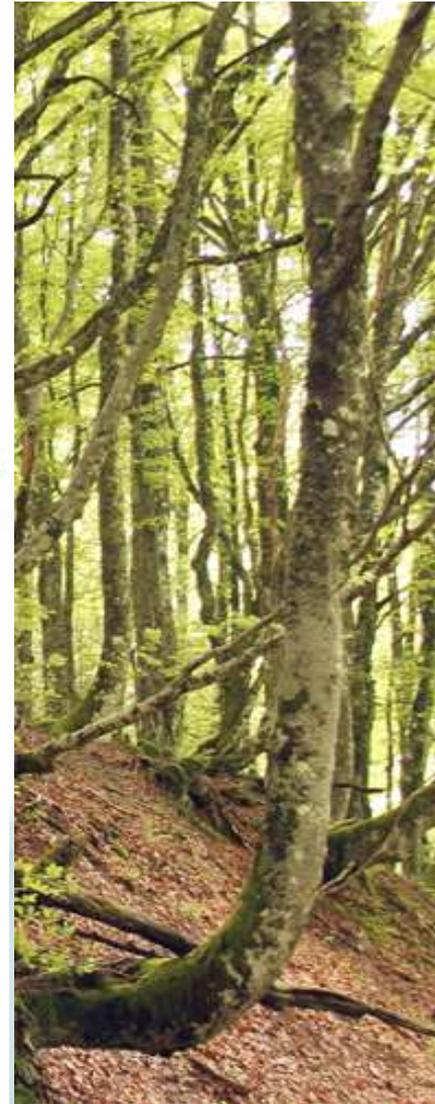
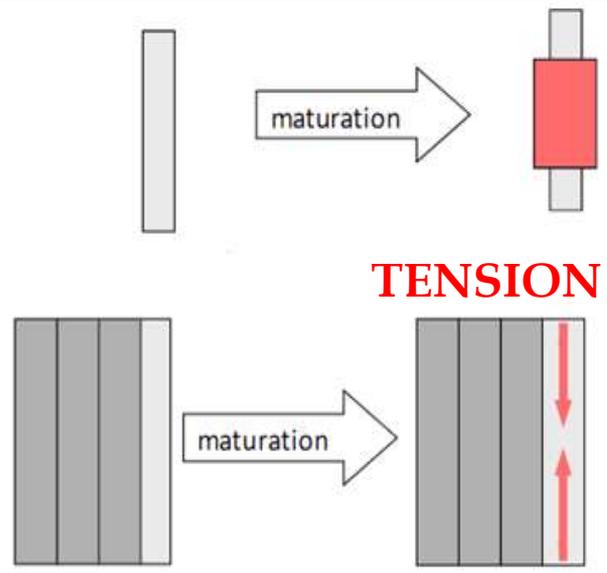
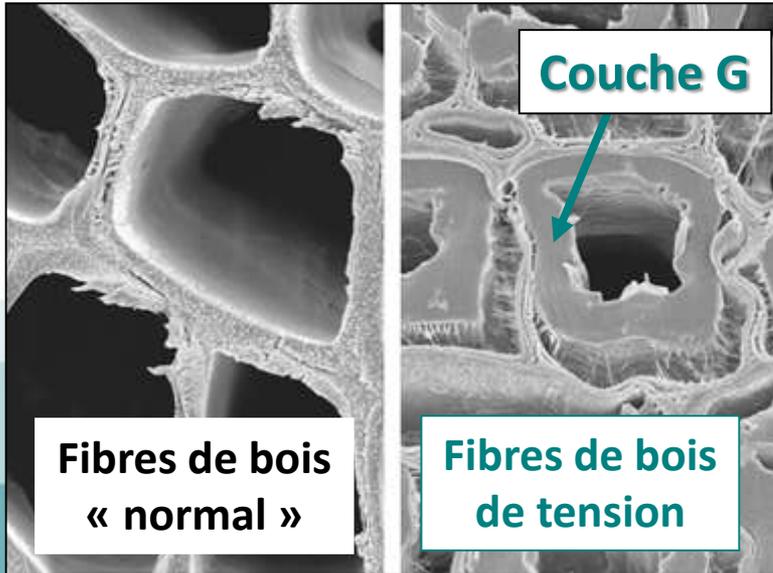
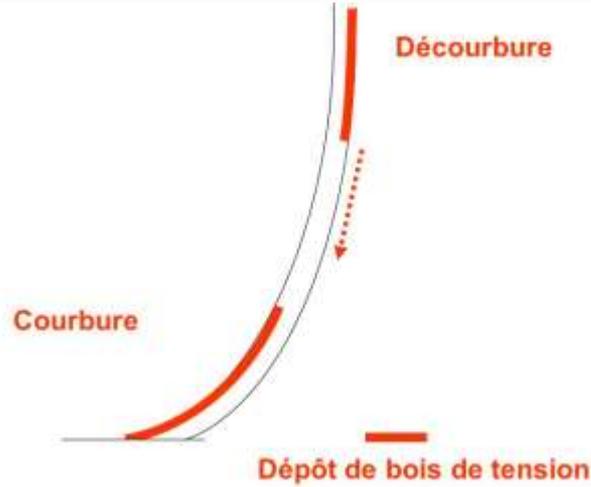
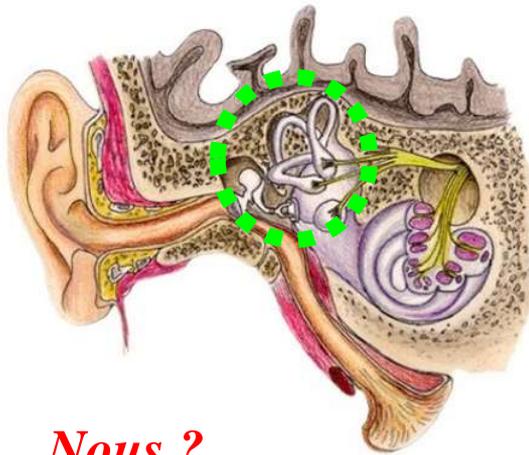


Figure 1. Structure de la paroi cellulaire d'une fibre normale et d'une fibre de bois de tension d'*Eucalyptus regnans* (F. v. M.), d'après Wardrop et Dadswell (1948) — *Cellular wall structure of normal and tension wood fibre of Eucalyptus regnans* (F. v. M.).

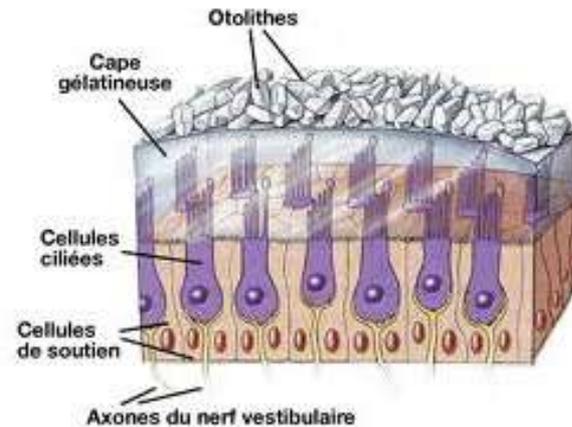


II. Le SENS MECANIQUE au sens large

Que perçoit la tige inclinée ?



Nous ?



Vestibule : des « petits cailloux » (**otolithes** de CaCO_3) dans une gelée (endolymphe)

Reposant sur des cellules ciliées sensibles

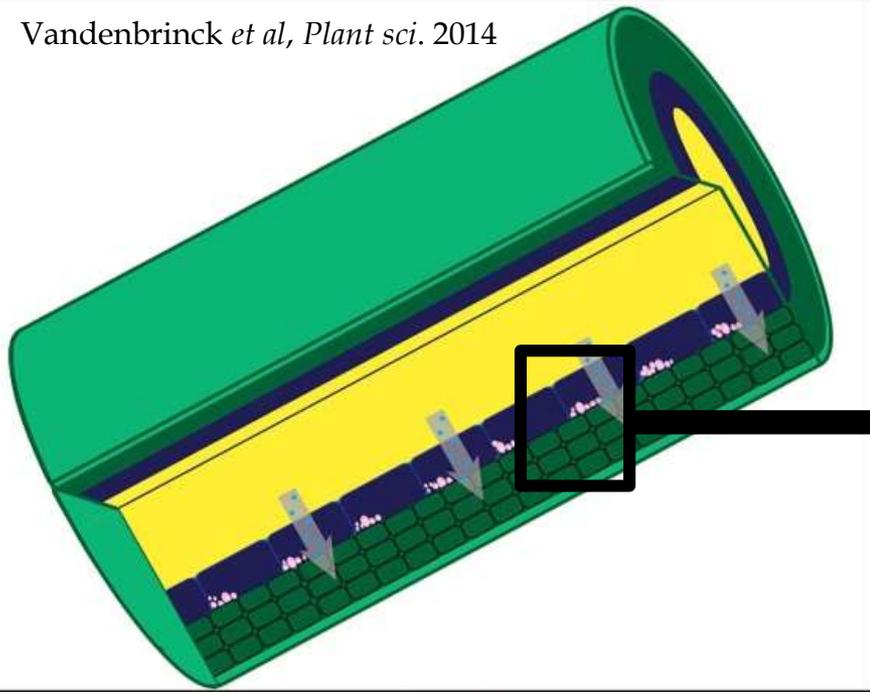
Des influx nerveux vers le cerveau

GRAVIPERCEPTION

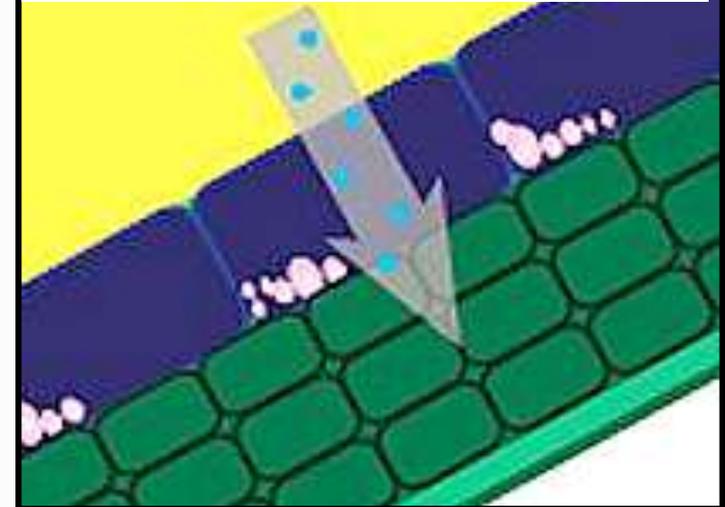
II. Le SENS MECANIQUE s.l.

Chez les *plantes* ?

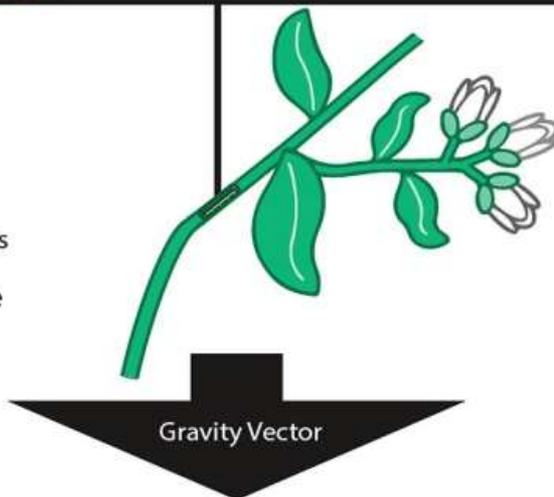
Vandenbrinck *et al*, *Plant sci*. 2014



Statolithes (grains d'amidon)



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

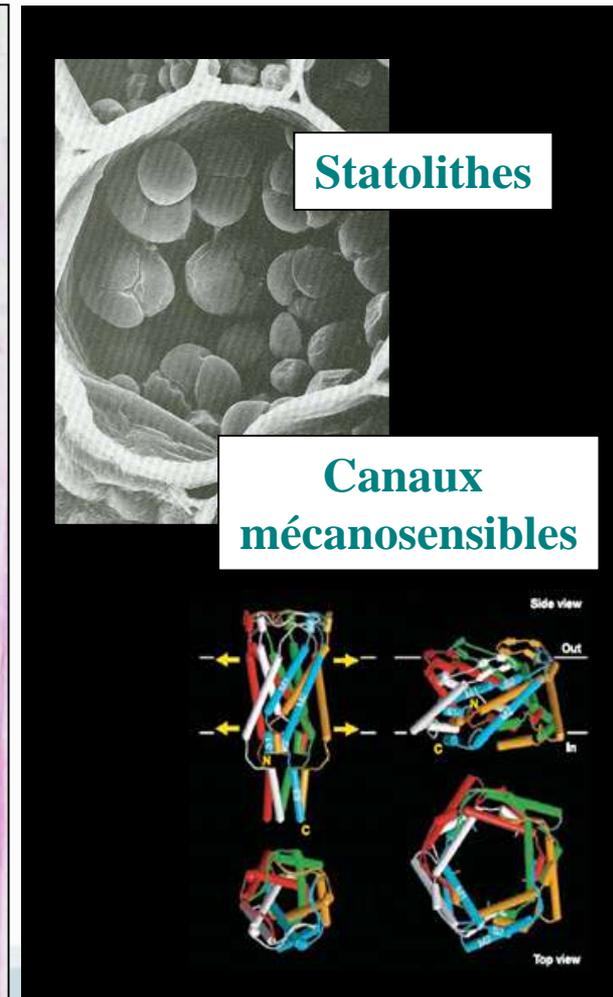
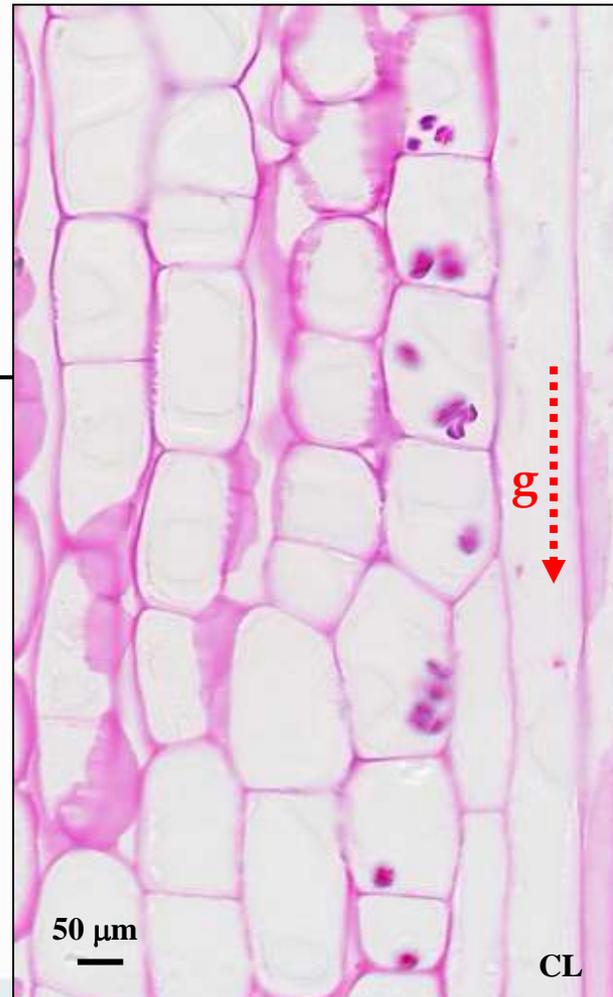
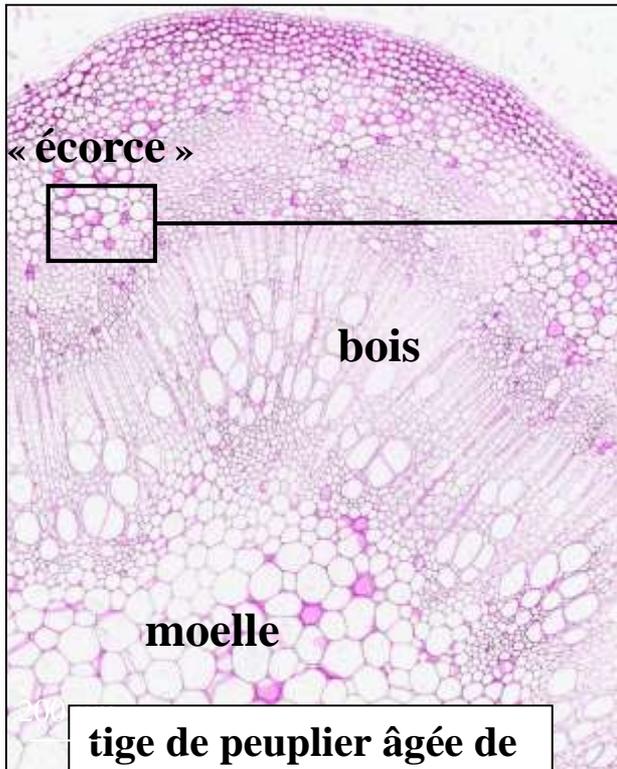


La tige perçoit son **inclinaison**
par rapport à la **verticale**
(= angle d'inclinaison)

GRAVIPERCEPTION

II. Le SENS MECANIQUE s.l.

Chez les *arbres* ?



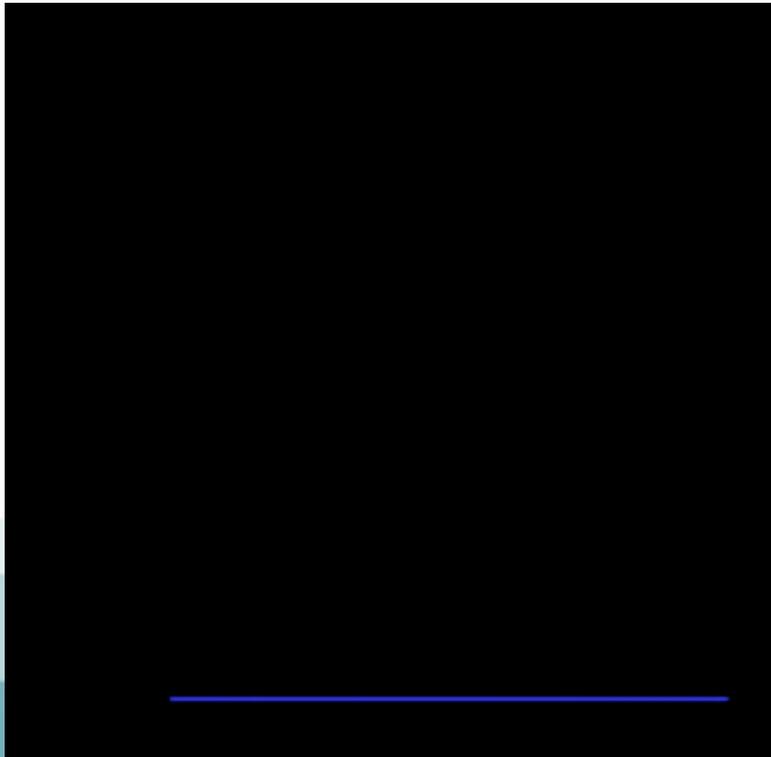
Le tronc perçoit son inclinaison par rapport à la verticale
(= angle d'inclinaison) : **GRAVIPERCEPTION**

II. Le SENS MECANIQUE s.l.

La **GRAVIPERCEPTION** est-elle suffisante ?

Passer par un modèle mathématique

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

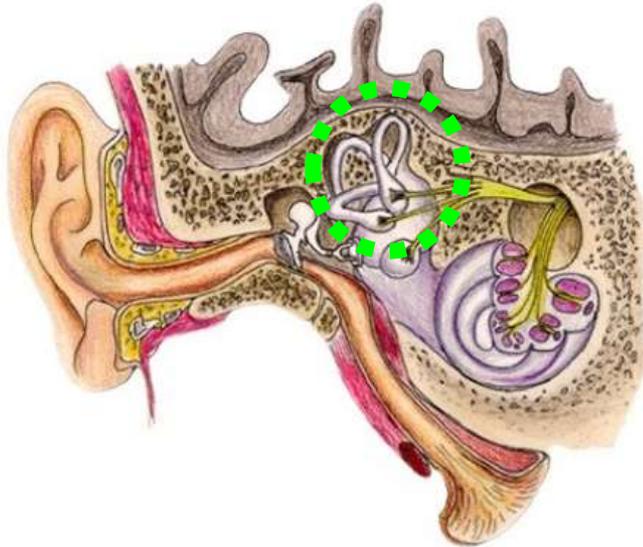


Bastien et al
PNAS 2013
110(2) : 755-760



II. Le SENS MECANIQUE s.l.

Nous ?



GRAVIPERCEPTION

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

Des cellules ciliées sensibles

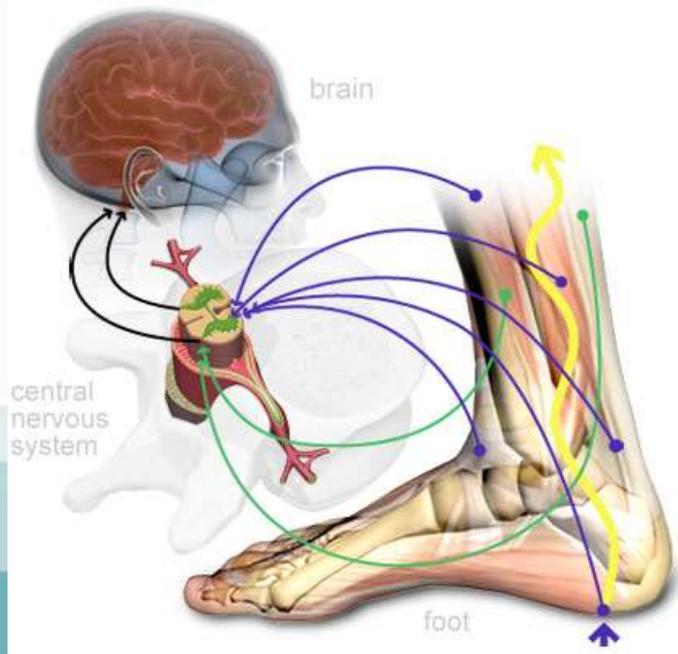
Des influx nerveux vers le cerveau

+

PROPRIOCEPTION

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

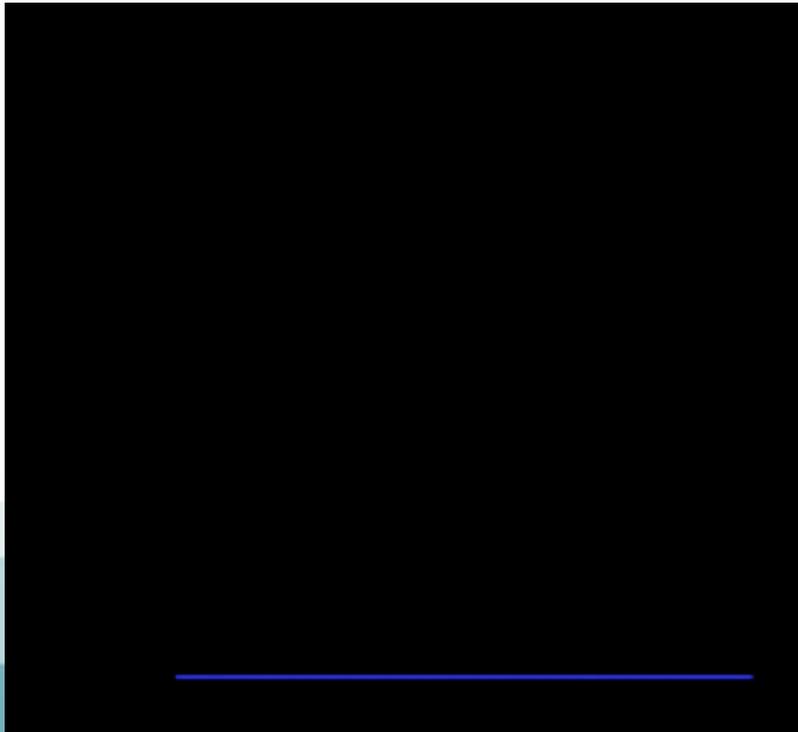
= **perception de soi-même**
dans l'espace



GRAVIPERCEPTION

+

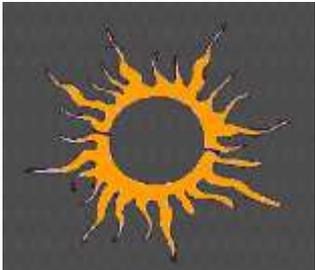
PROPRIOCEPTION



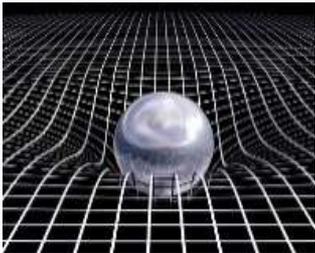
Bastien et al
PNAS 2013
110(2) : 755-760



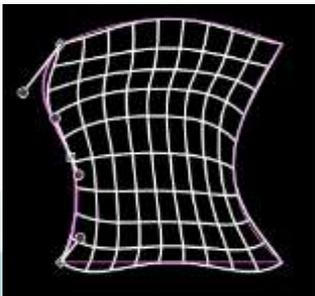
Une **INTEGRATION** de différents signaux pour une **COORDINATION** des mouvements



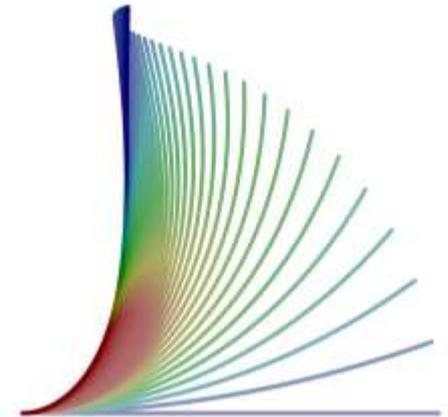
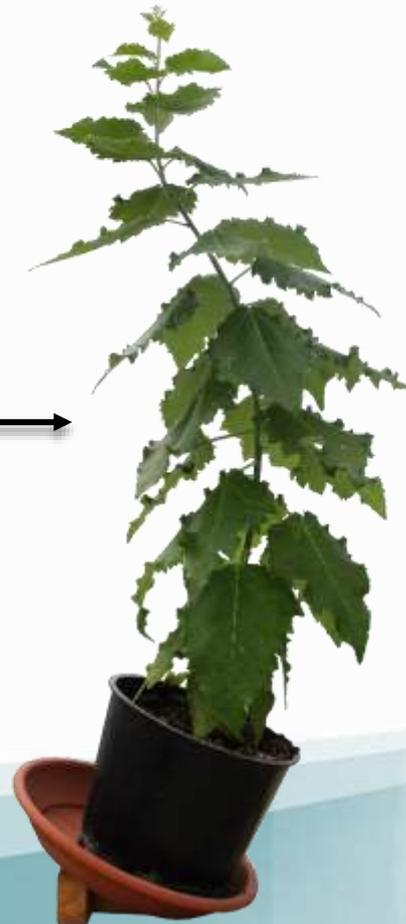
LUMIERE



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 ...

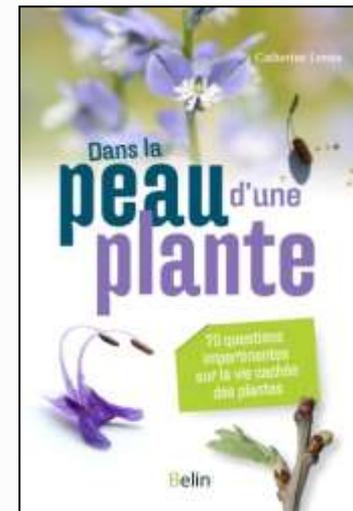
L'arbre droit comme un « i »
Le Courrier de la Nature n°289
mai-juin 2015



Dans la peau d'une plante
Editions Belin, 2014



www.desfleursanotreporte.com



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



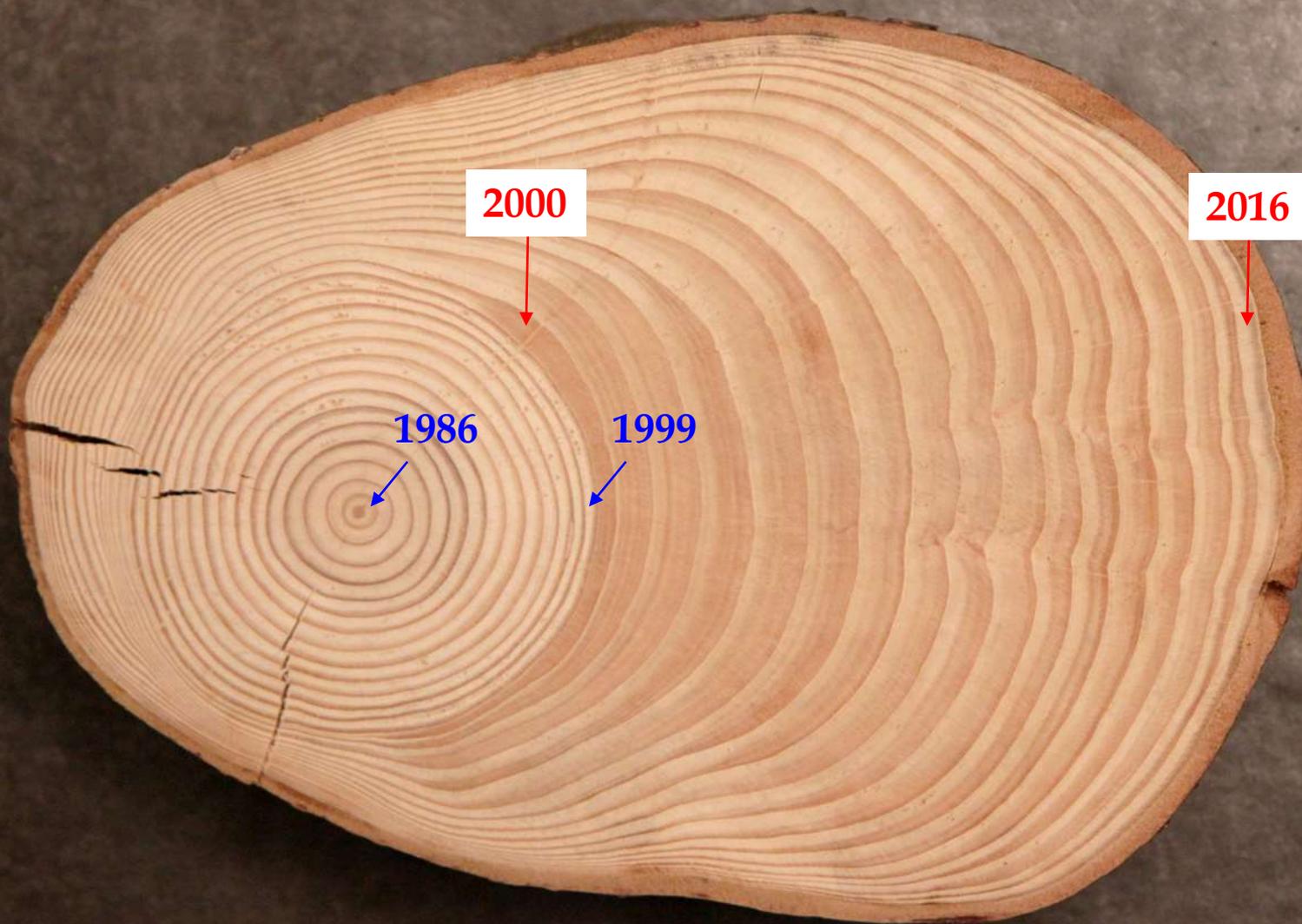
Percevoir et bouger : les plantes aussi !
Pour la science n°484, avril 2014



UNIVERSITÉ
ermont
vergne

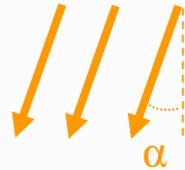
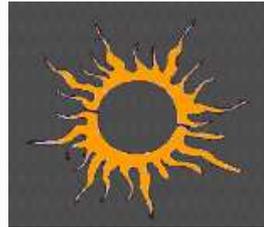
RAB ...

UN TRONC DE SAPIN abattu en septembre 2016 ...



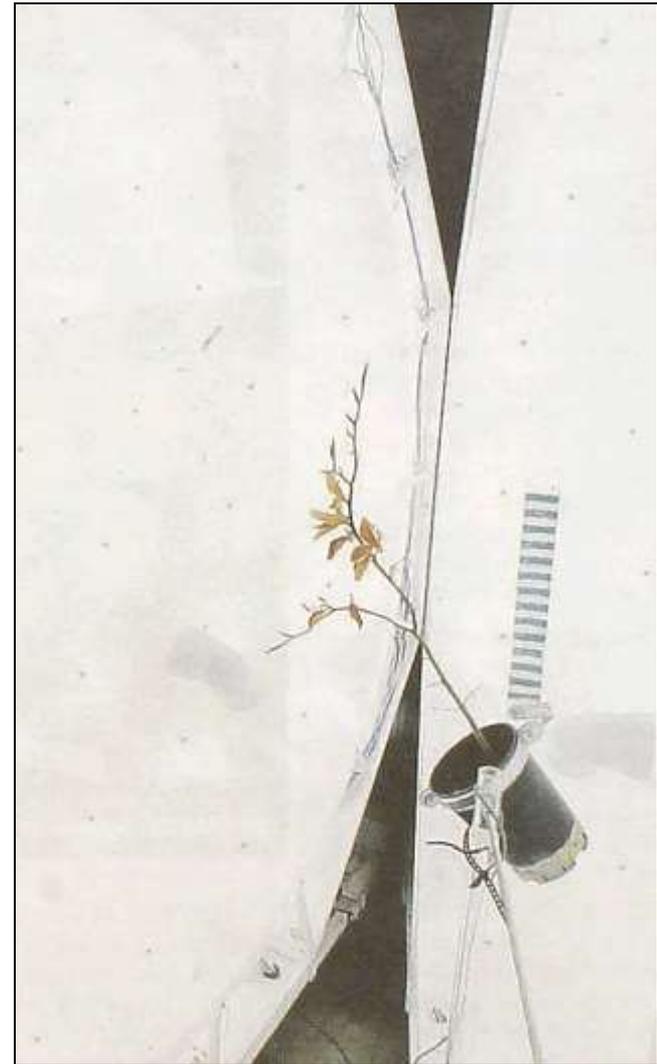
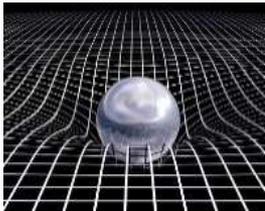
II. Le SENS MECANIQUE s.l.

LUMIÈRE



*Lumière ou
gravité ?*

GRAVITÉ



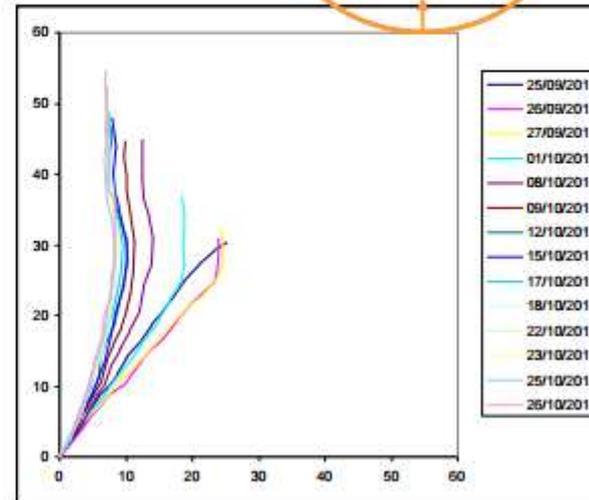
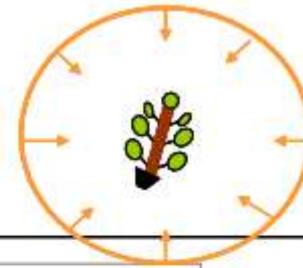
La plante inclinée se redresse à la verticale
= **réponse gravitropique** suffit

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

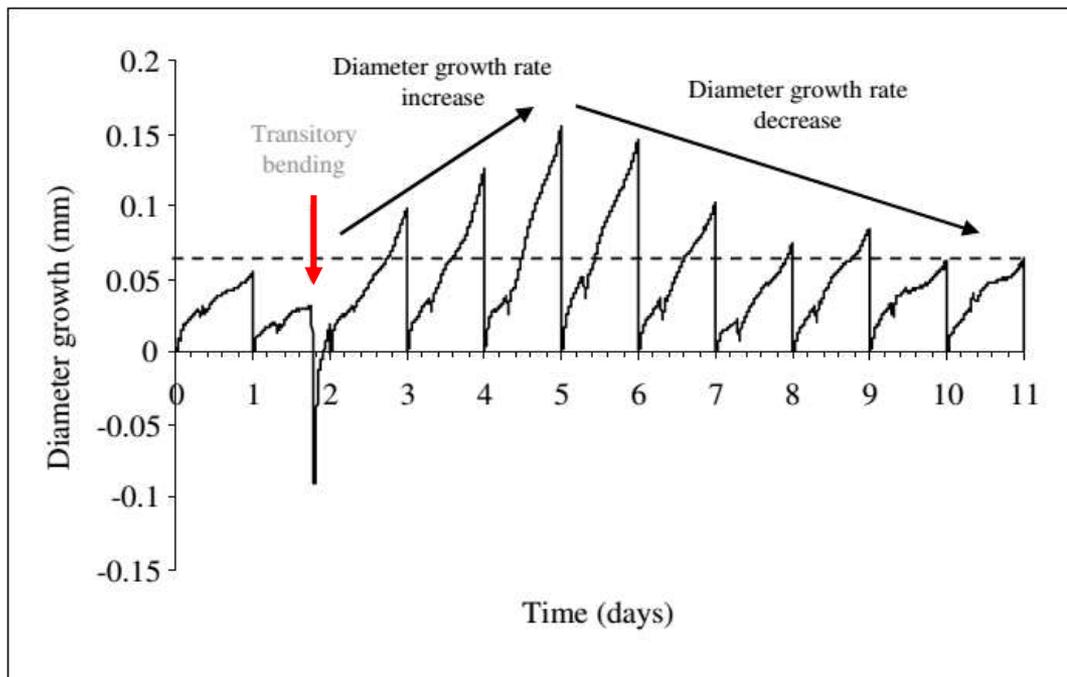
La plante inclinée se redresse
à la verticale

= **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



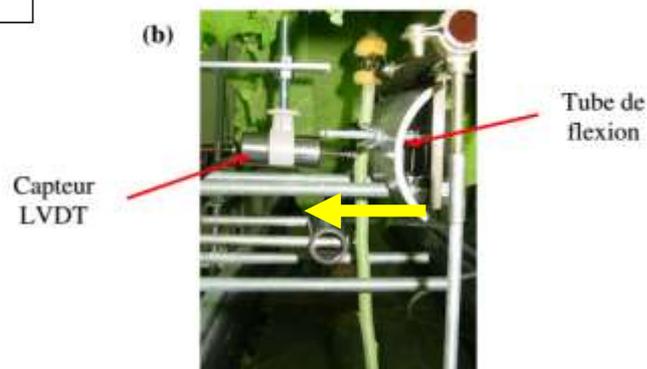
Ludovic Martin

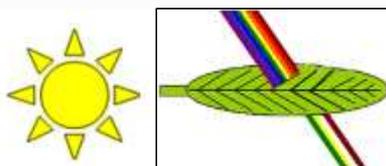
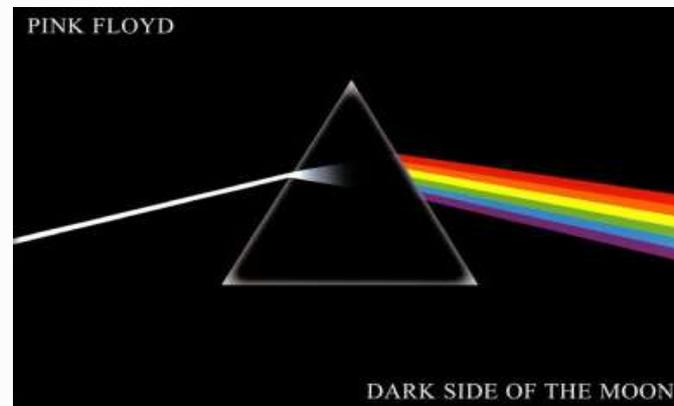


Nathalie Leblanc-Fournier

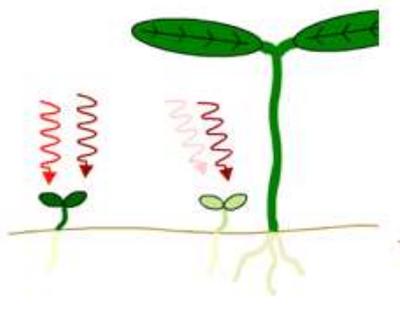


Catherine Coutand

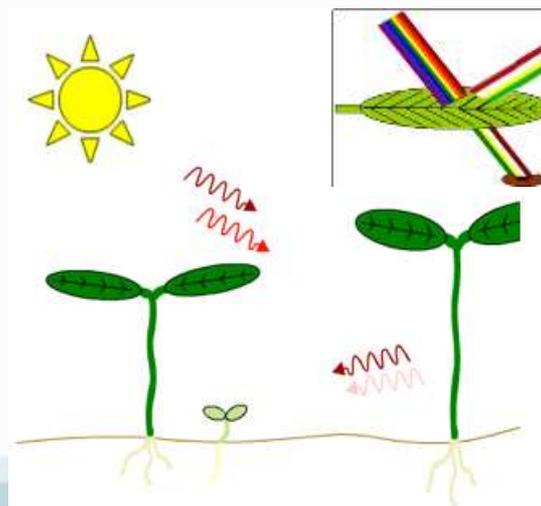




Transmission du vert et
du **ROUGE FONCÉ**



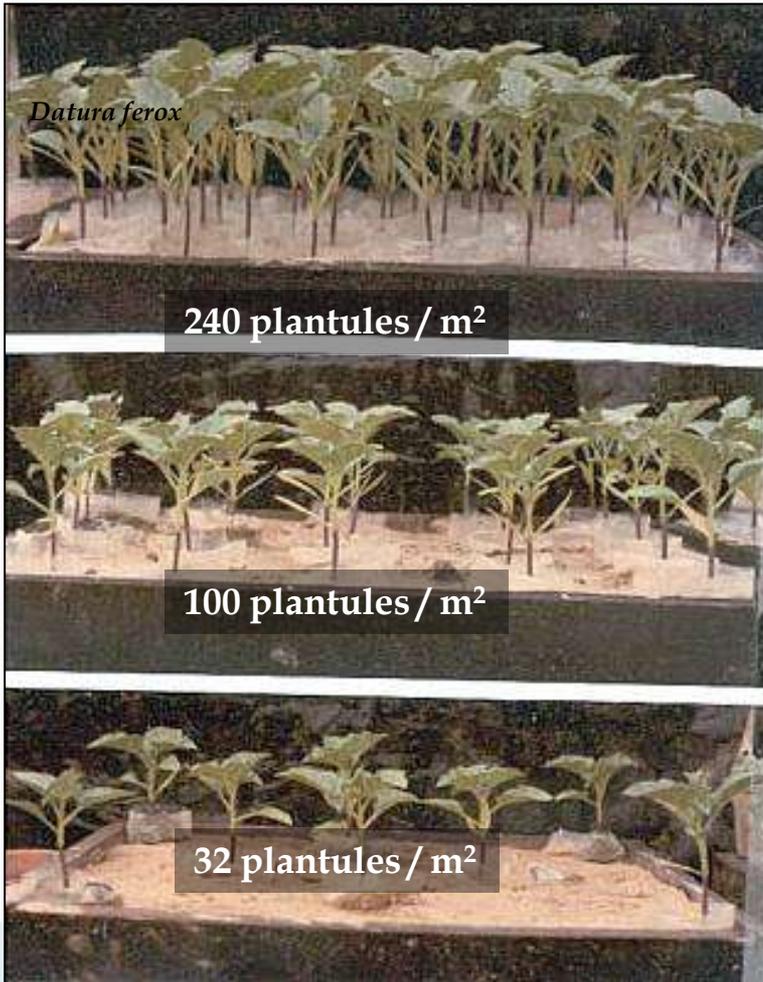
Réflexion du vert et
du **ROUGE FONCÉ**



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**.

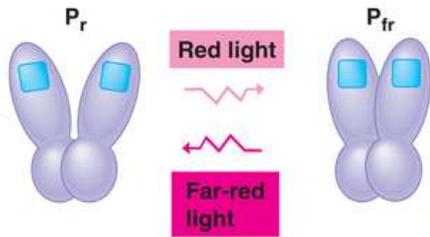
- La stimulation de croissance commence **alors même qu'elles ne se touchent pas encore**.

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)**

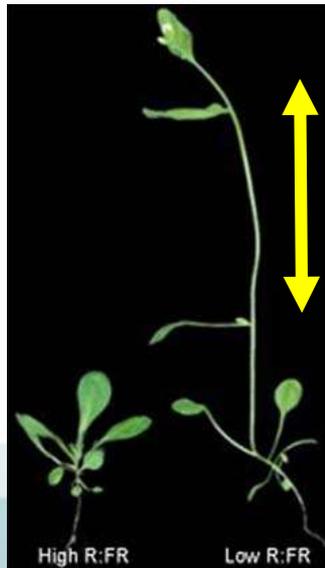


Le Phytochrome mesure le rapport **R/FR**

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

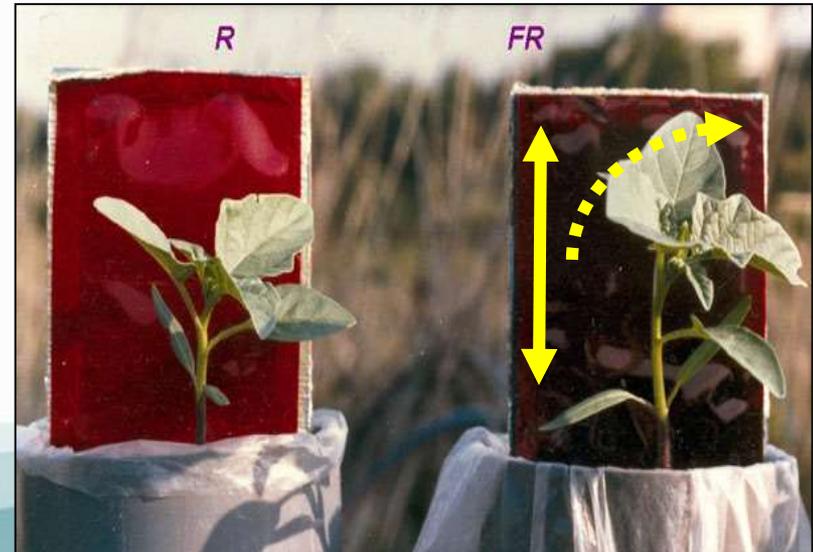
Ombre : la vision du **transmis**

R/FR
réduit



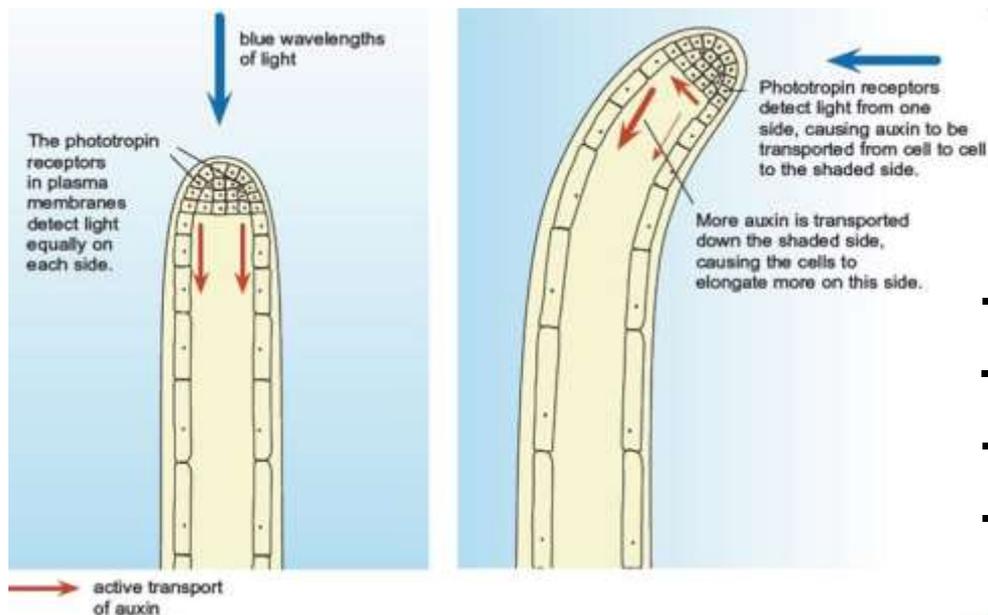
Voisinage : la vision du **réfléchi**

FR
réfléchi



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

Les plantes se « dirigent » vers la lumière



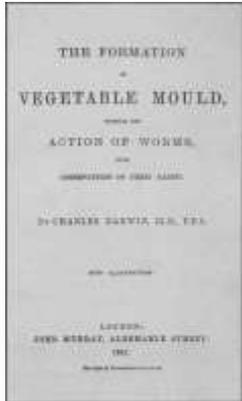
- **Phototropines / lumière bleue**
- **Transporteurs d'auxine relocalisés**
- **Redistribution latérale de l'auxine**
- **Croissance différentielle de la tige**

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

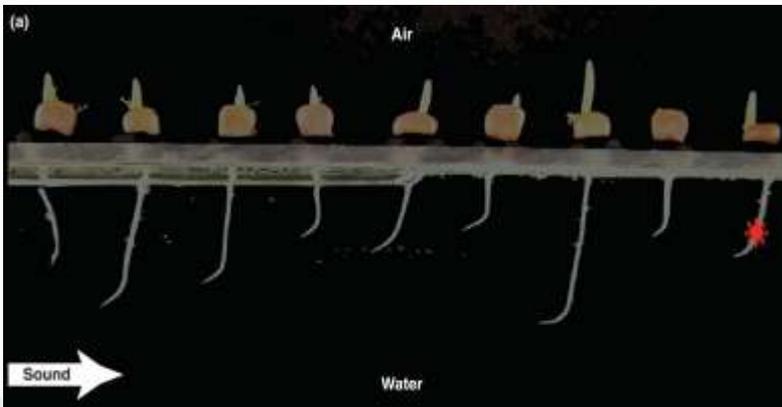
Towards understanding plant bioacoustics

Monica Gagliano^{1,2}, Stefano Mancuso³ and Daniel Robert⁴

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

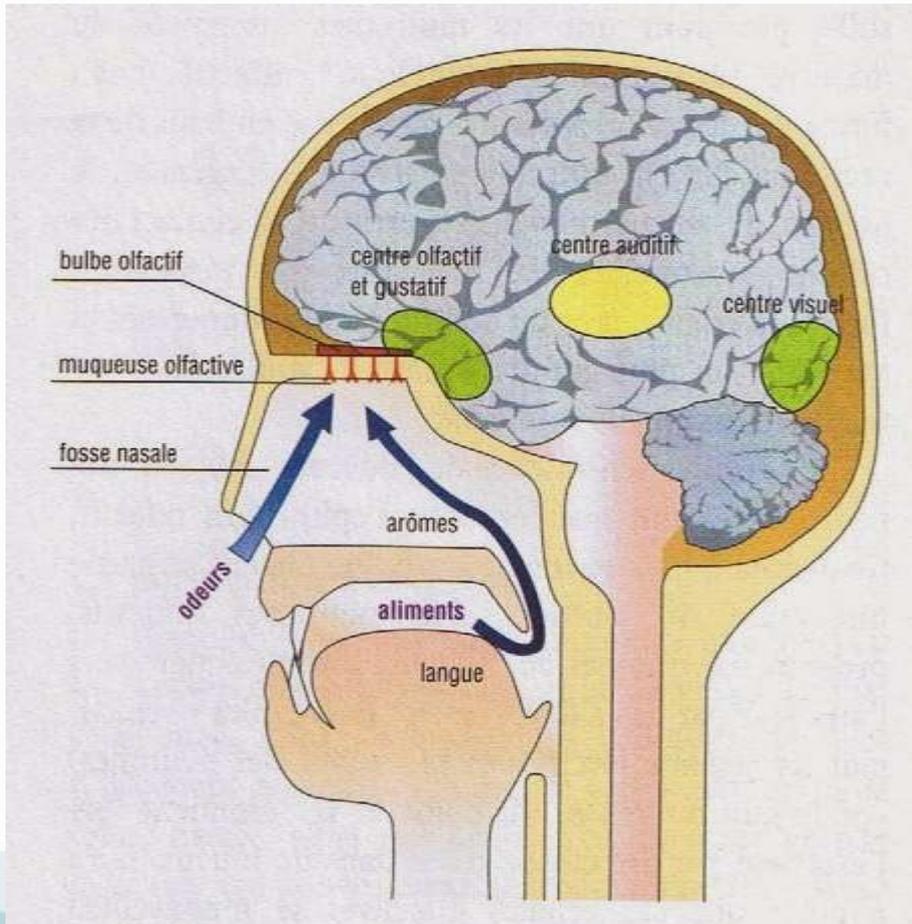
Effects of Mechanical Vibration on Seed Germination of *Arabidopsis thaliana*
(L.) Heynh.

Ayuh Uchida^{1,3} and Kotaro T. Yamamoto^{1,2,4}



manifestations vibratoires du son
amplifiées par les hauts-parleurs

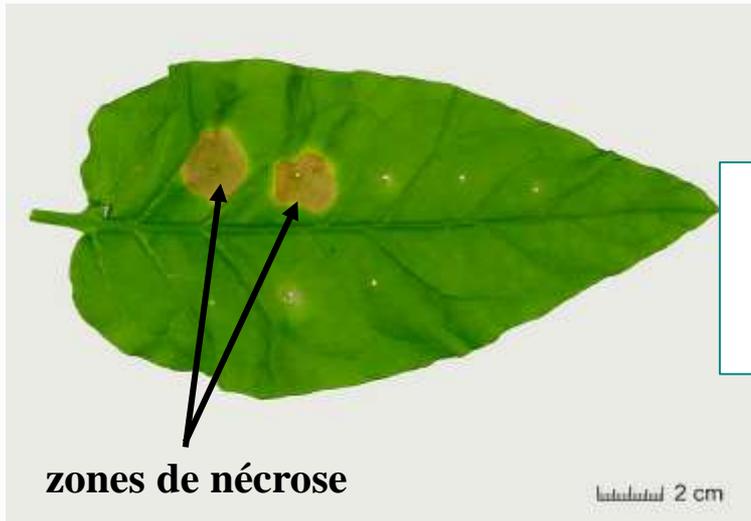
LE GOÛT ? L'ODORAT ?



CHEMORECEPTION

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

La défense contre les pathogènes = le « GOÛT »



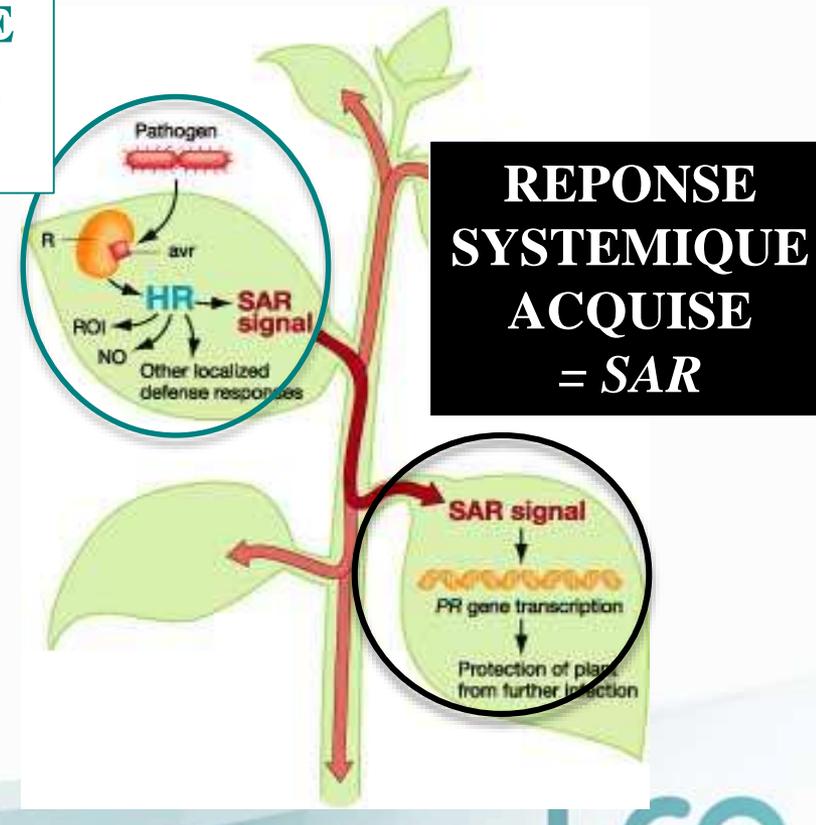
REPONSE
LOCALE
= HR

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^{ème} effet de la réaction hypersensible ...

Une « auto-vaccination »



REPONSE
SYSTEMIQUE
ACQUISE
= SAR

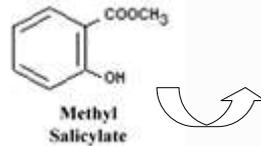
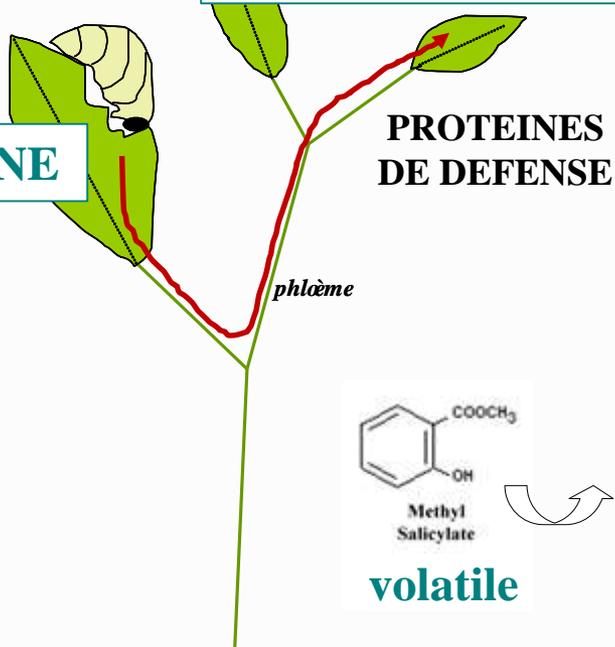
- La réponse locale (HR)
- La réponse systémique acquise (SAR) : un niveau de défense élevé

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

Une chenille ...

Résistance
SYSTEMIQUE
ACQUISE

SYSTEMINE



volatile

VOCs

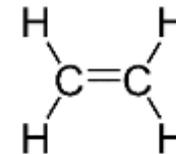
... ou une antilope trop gourmande



TANNINS



éthylène



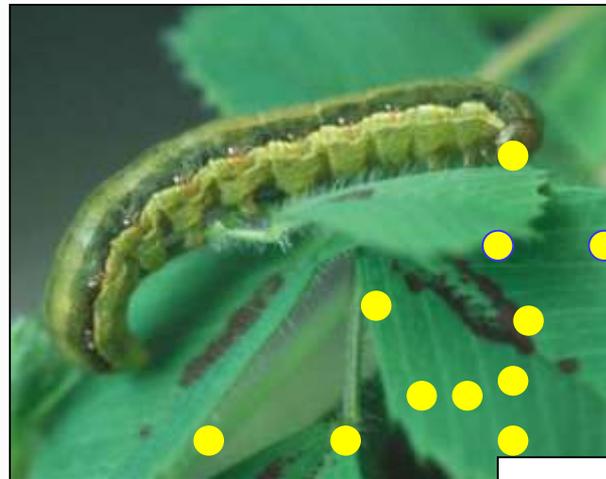
Alerte des
voisines

Alerte des
voisines

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

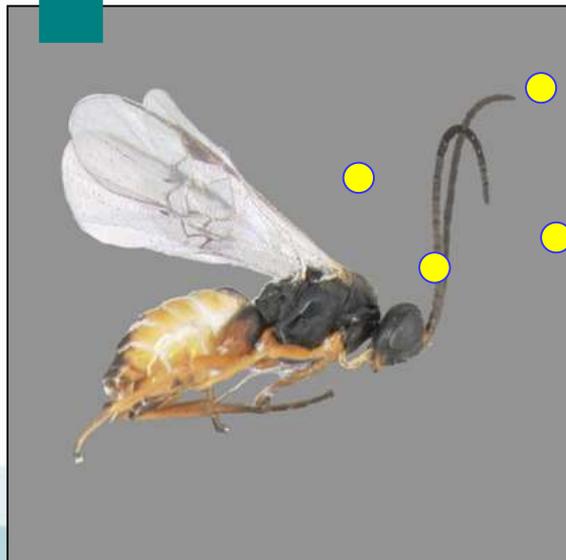
pondent dans les œufs de *S. exigua*
mort à l'éclosion

~~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

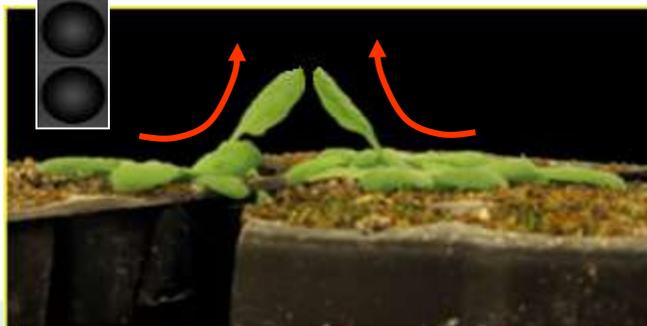
Du toucher au « geste »

Expérience de compétition

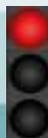
Wit et al, 2012



Geste : « carton rouge ! »



R / FR
réduit



20 jours



29 jours



plantes
isolées



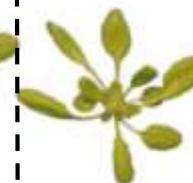
plantes
en canopée



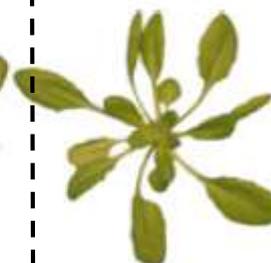
20 jours



24 jours



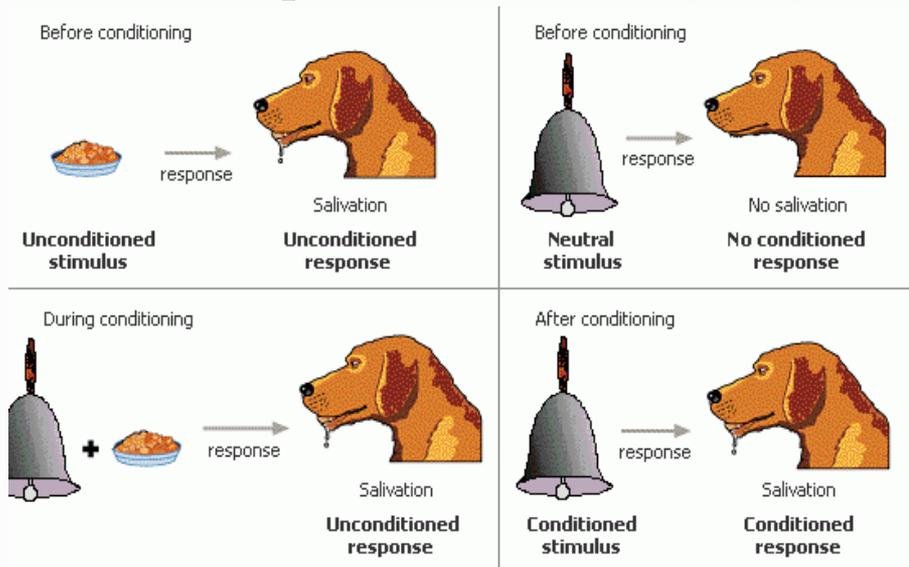
26 jours



29 jours

Intégrer plusieurs informations : l'apprentissage par ASSOCIATION

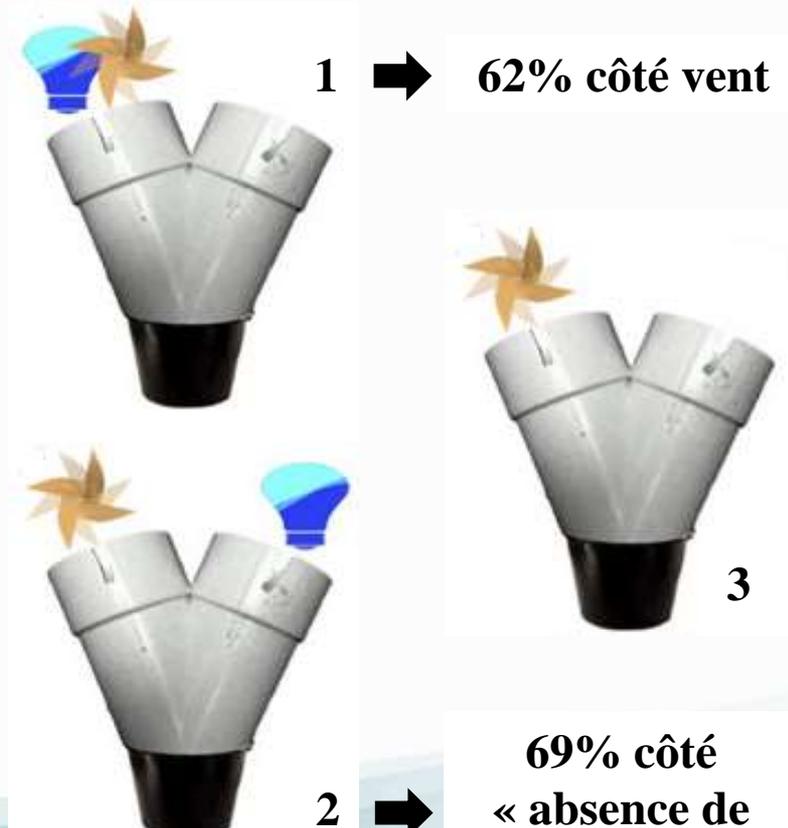
L'expérience de Pavlov (1890)



= *expérience de conditionnement*

- nourriture = stimulus inconditionnel
- cloche = stimulus neutre

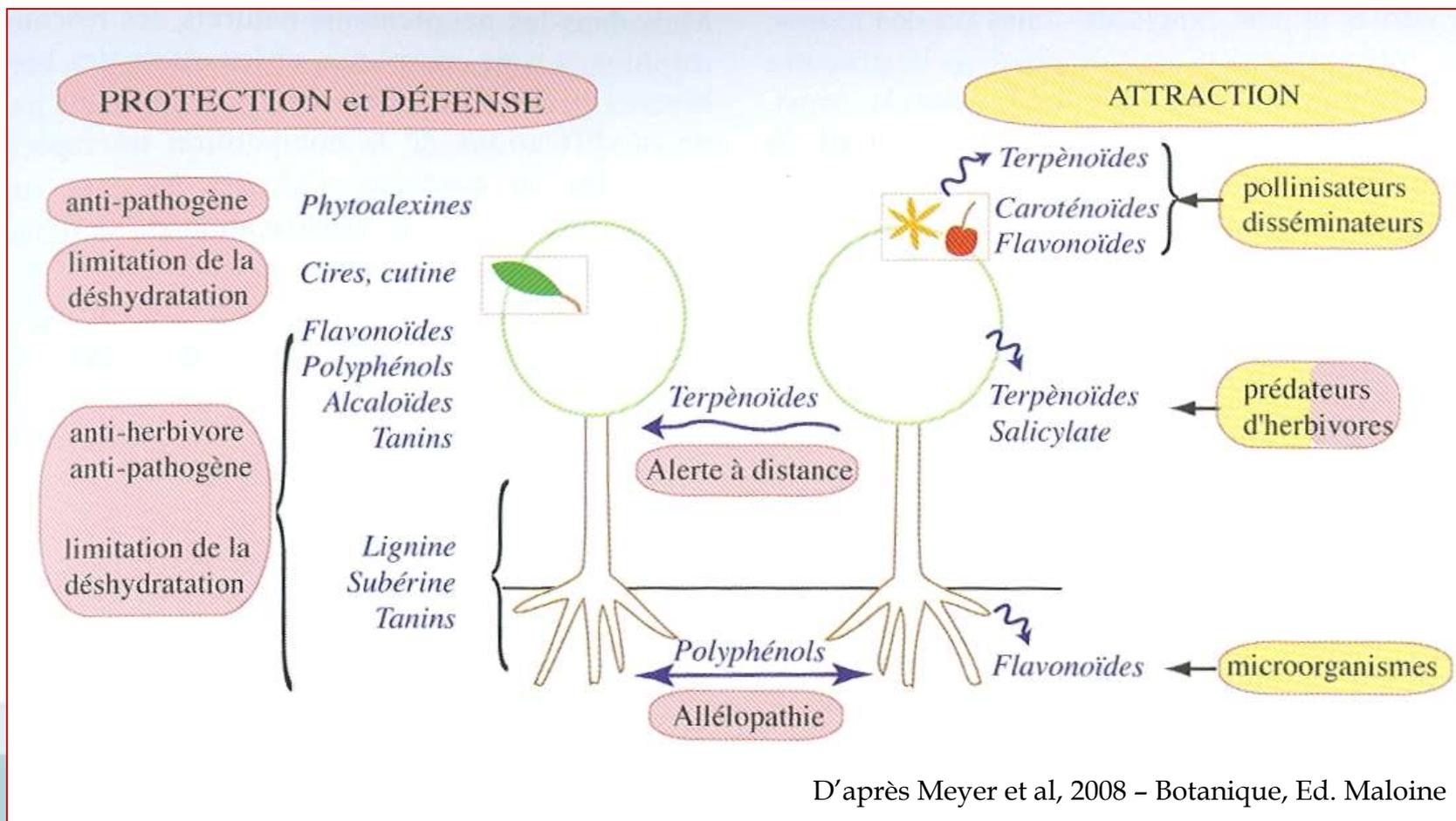
L'expérience de Gagliano (2016)



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**



Bilan des relations d'une plante avec son environnement

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

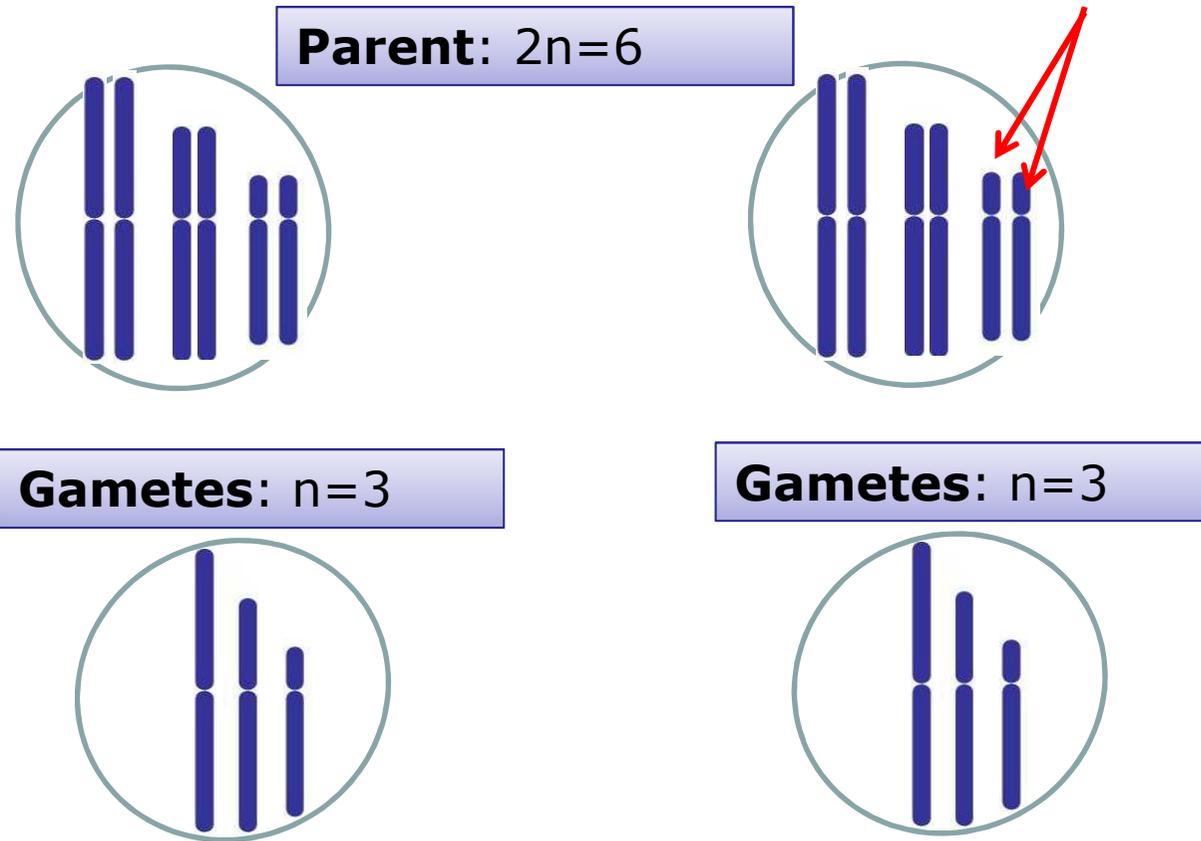


Gossypium



Spartina

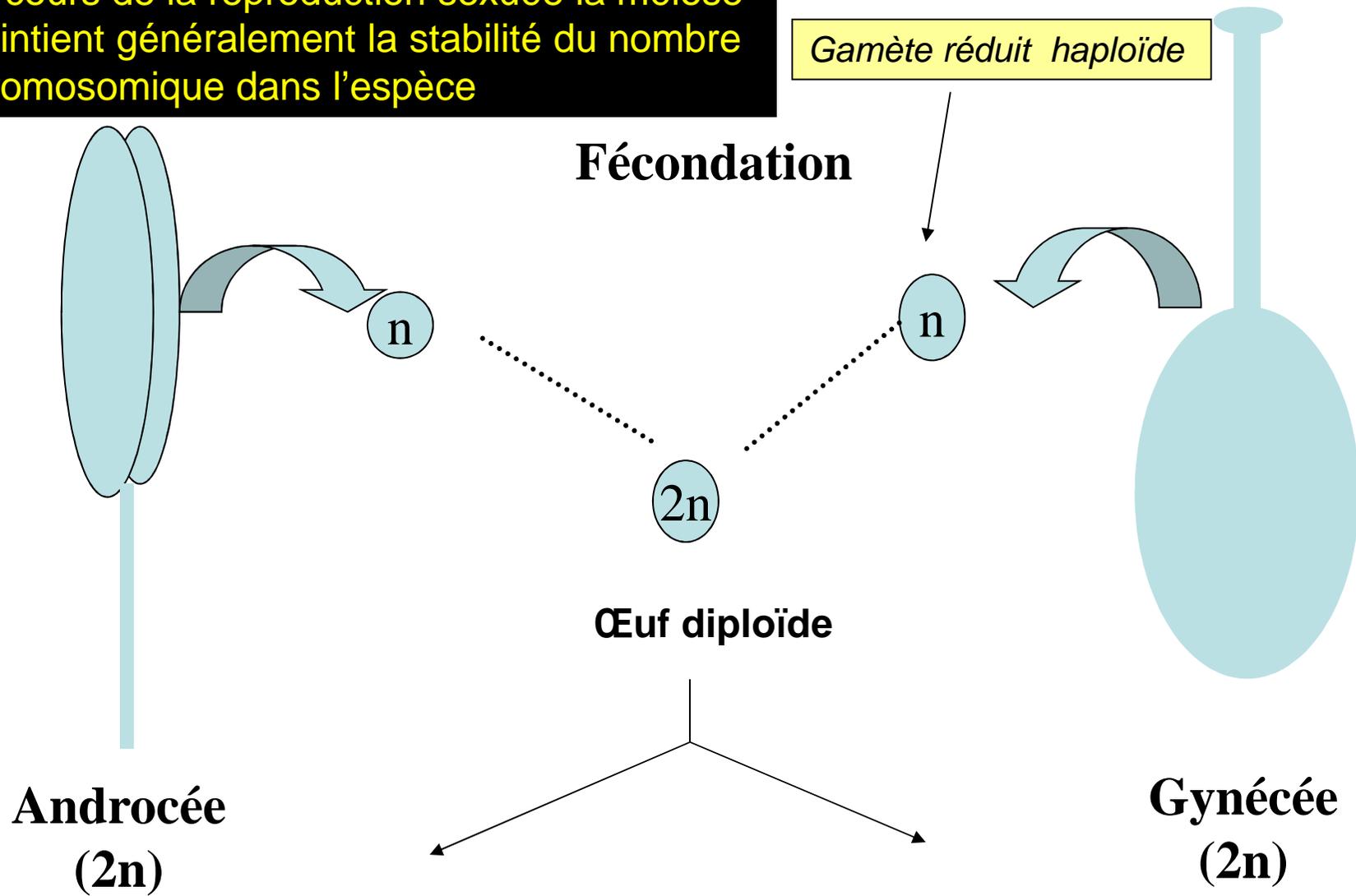
Une espèce diploïde possède deux lots de chromosomes homologues



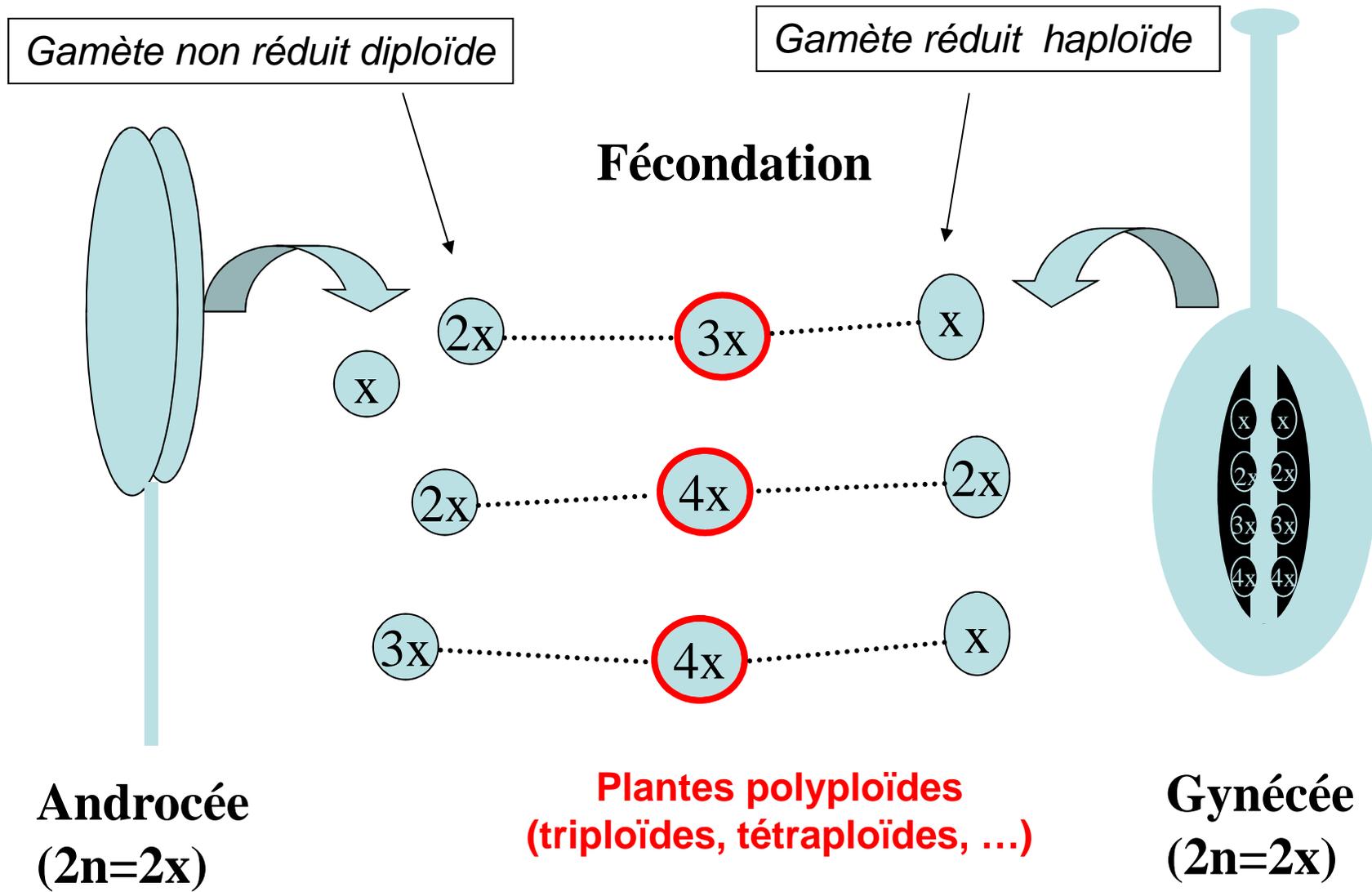
Les gamètes sont haploïdes
Un seul exemplaire de chaque chromosome
Ici, le nombre gamétique (n) est haploïde

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,

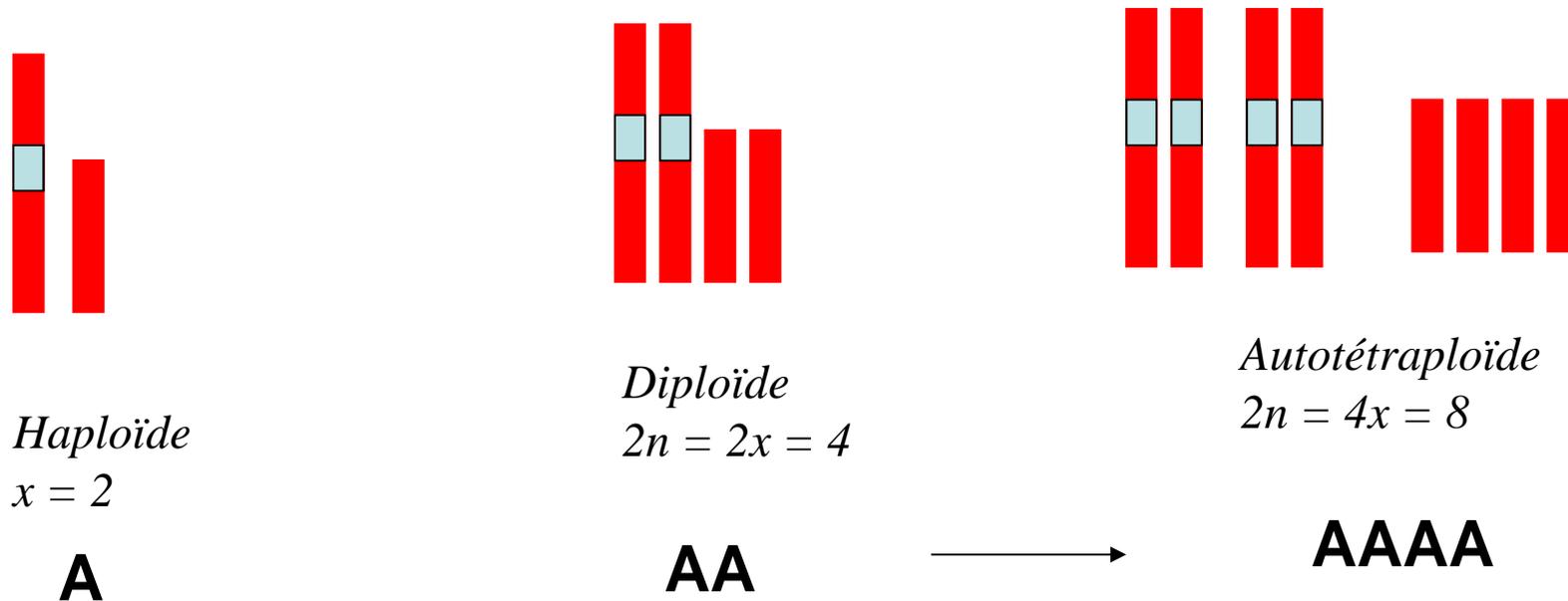
Convention: Une lettre (majuscule) désigne l'ensemble du lot haploïdes de chromomes; espèce diploïde: génome AA

DEUX GRANDES CATEGORIES DE POLYPLOIDES

Autopolyploidie = duplication du génome de la même espèce

Autopolyploïdes récents:

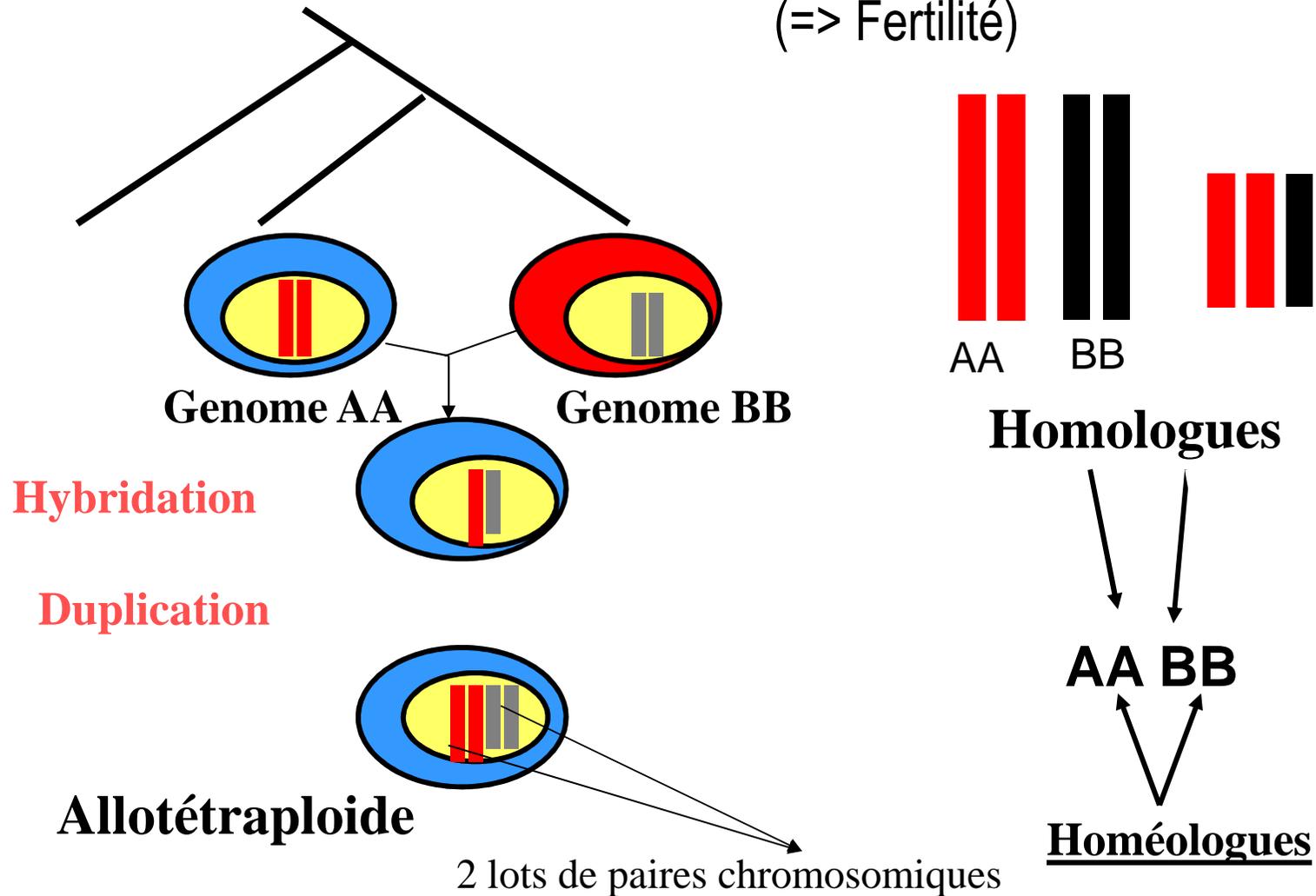
Plusieurs copies orthologues / locus



Appariement aléatoires: Héritéité tétrasomique

DEUX GRANDES CATEGORIES DE POLYPLOIDES

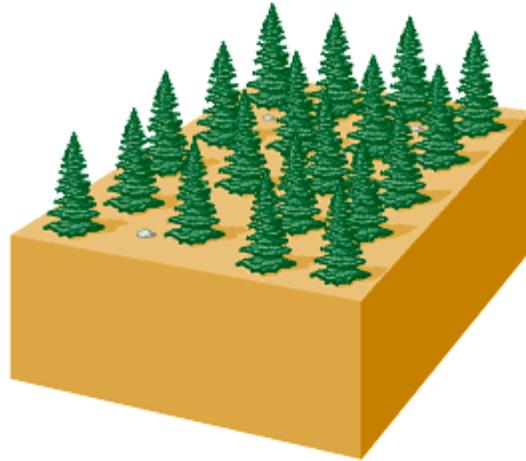
Allopolyploidie = duplication d'un génome hybride
(=> Fertilité)



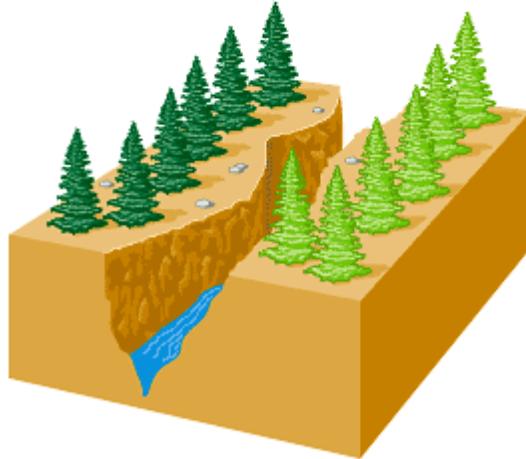
Appariement préférentiels (homologues): Hérité disomique

POLYPLOIDIE ET SPECIATION

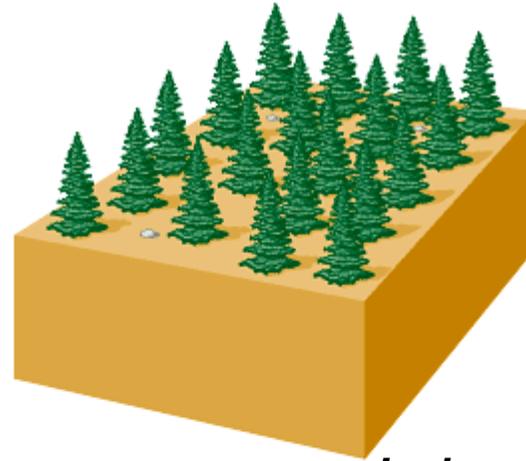
Deux principaux modes de spéciation:



Séparation (spatiale)
Isolement, divergence



(a) Allopatric speciation

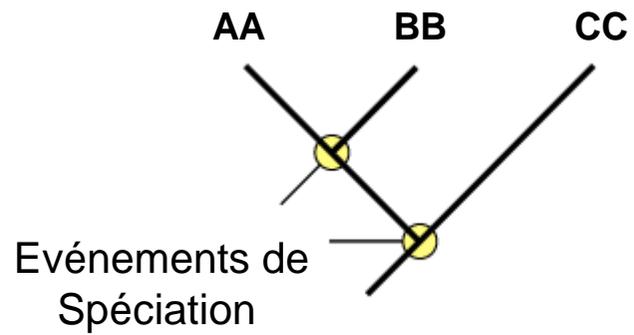


Isolement reproductif
dans la même population
(même territoire)



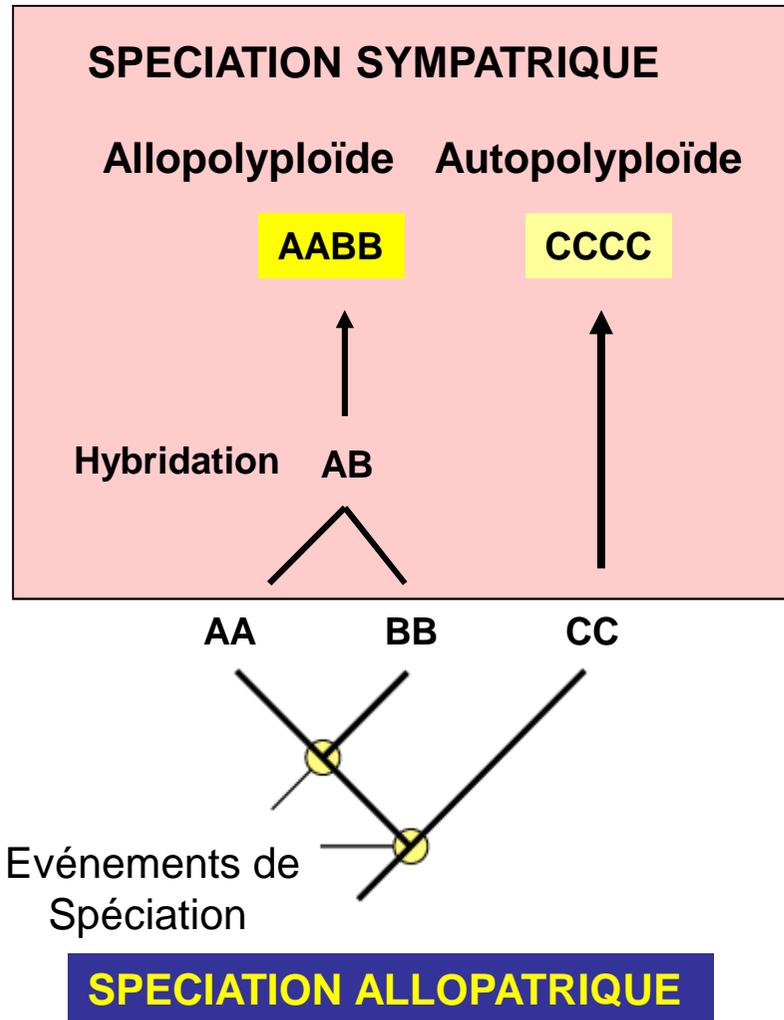
(b) Sympatric speciation

POLYPLOIDIE ET SPECIATION

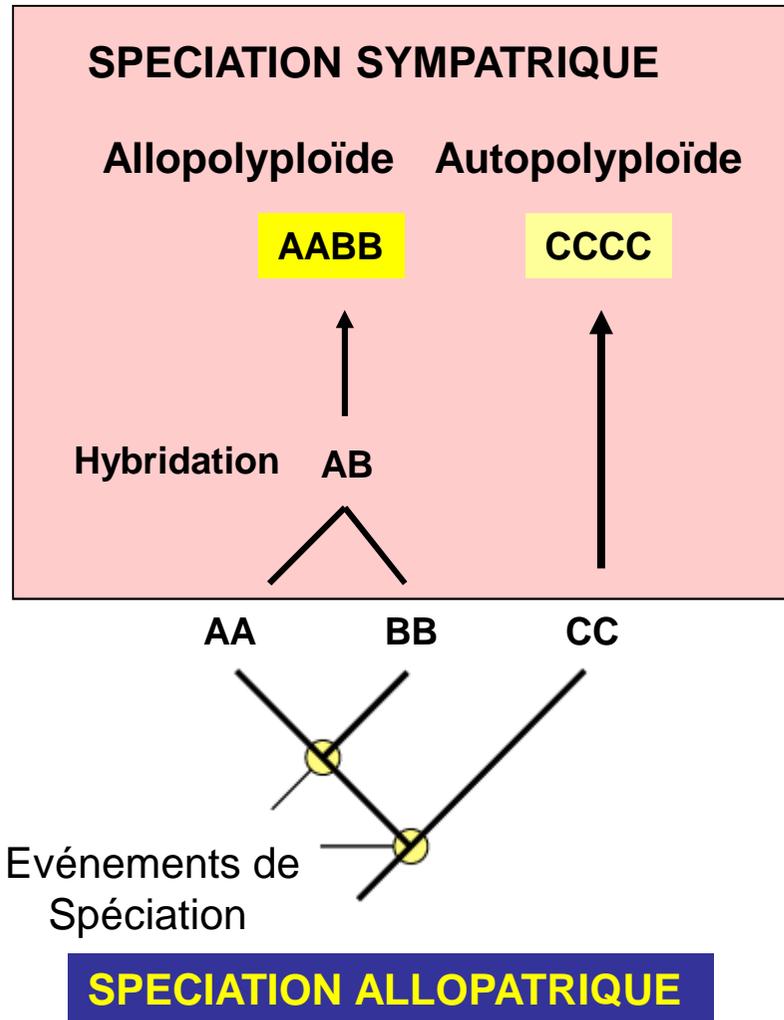


SPECIATION ALLOPATRIQUE

POLYPLOIDIE ET SPECIATION



POLYPLOIDIE ET SPECIATION

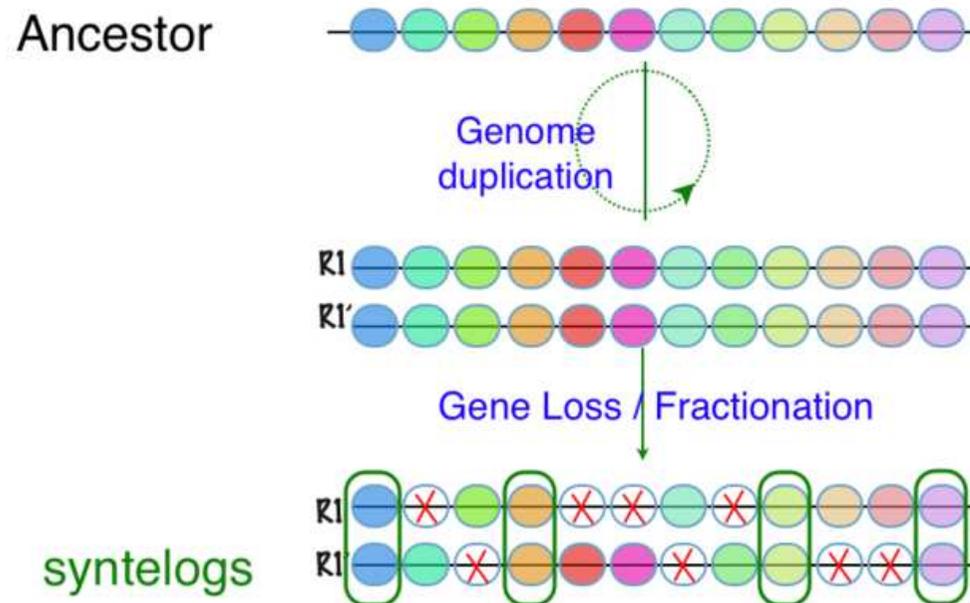


Barrière (post-zygotique) entre le polyploïde et ses parents diploïdes => « spéciation instantanée »

EVOLUTION A LONG TERME

Fractionation and diploidization:

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



Perte aléatoire ou biaisée?

Mise en évidence de la polyploïdie

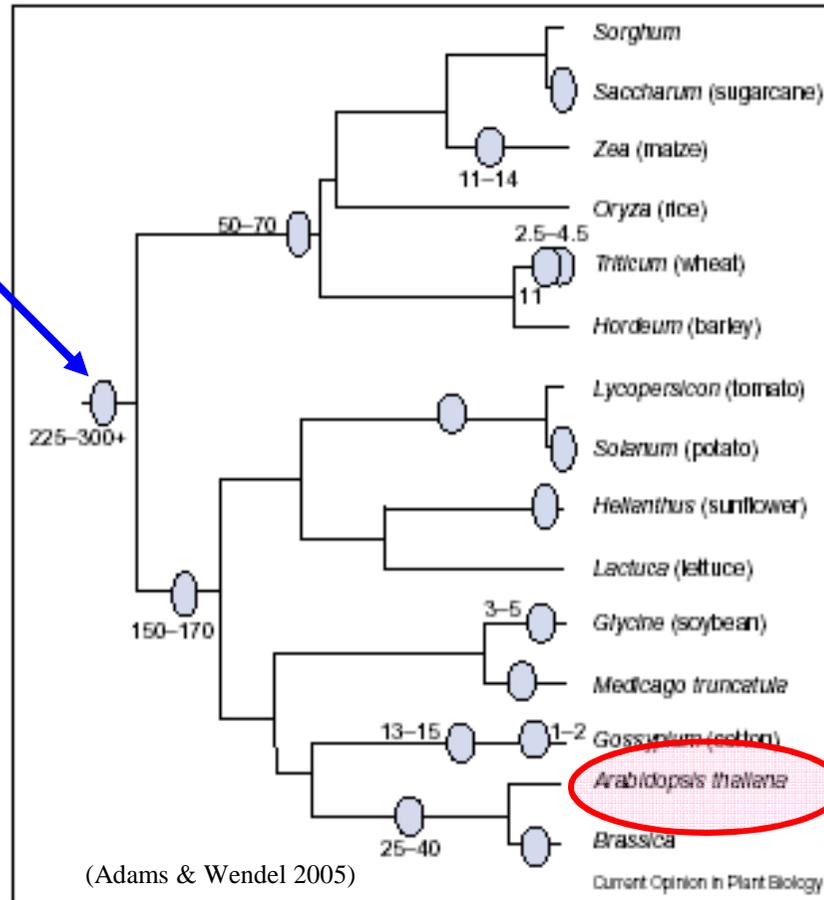
- **Nombres chromosomiques: série polypoïde:**
Espèces proches: $2n = 14$, $2n = 28$, $2n = 42$, ...
- **Cartes génétiques et séquençage des génomes:**
Présence de série de gènes dupliqués



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

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

Duplication
du génome



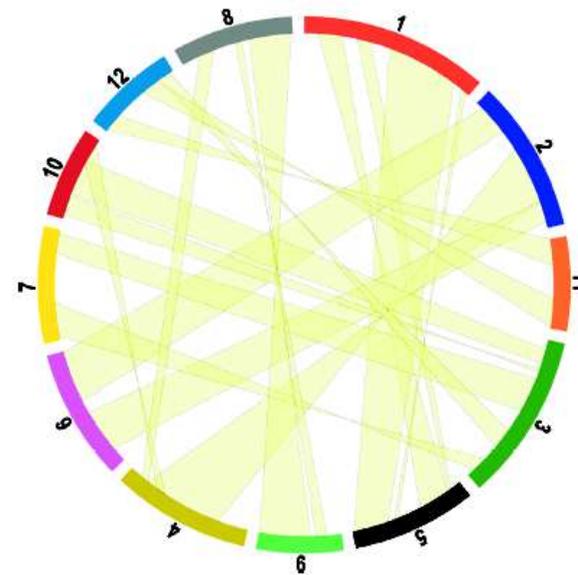
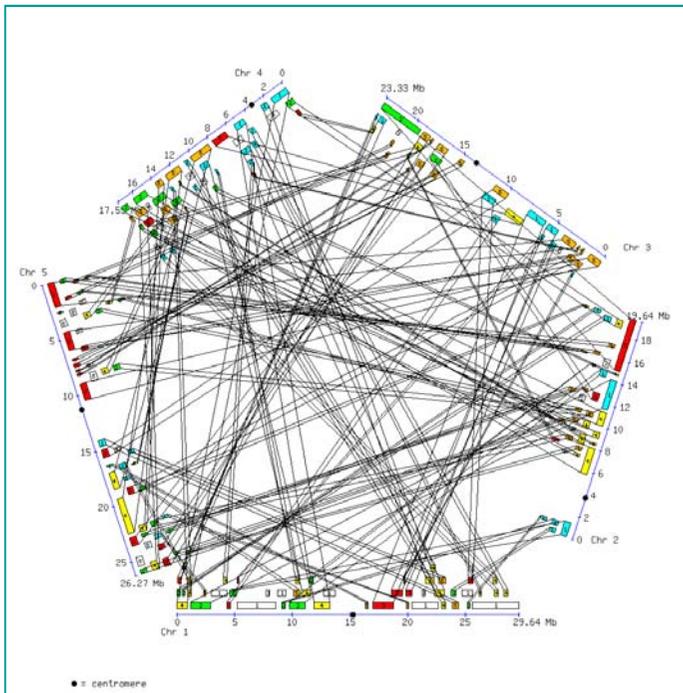
During the evolution of angiosperms. The figure shows species that were analyzed by Blanc et al. (2002). Blue shaded ovals indicate suspected large-scale duplication events. Branch lengths are in millions of years (My) since the duplication event. Figure modified from [18**].



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

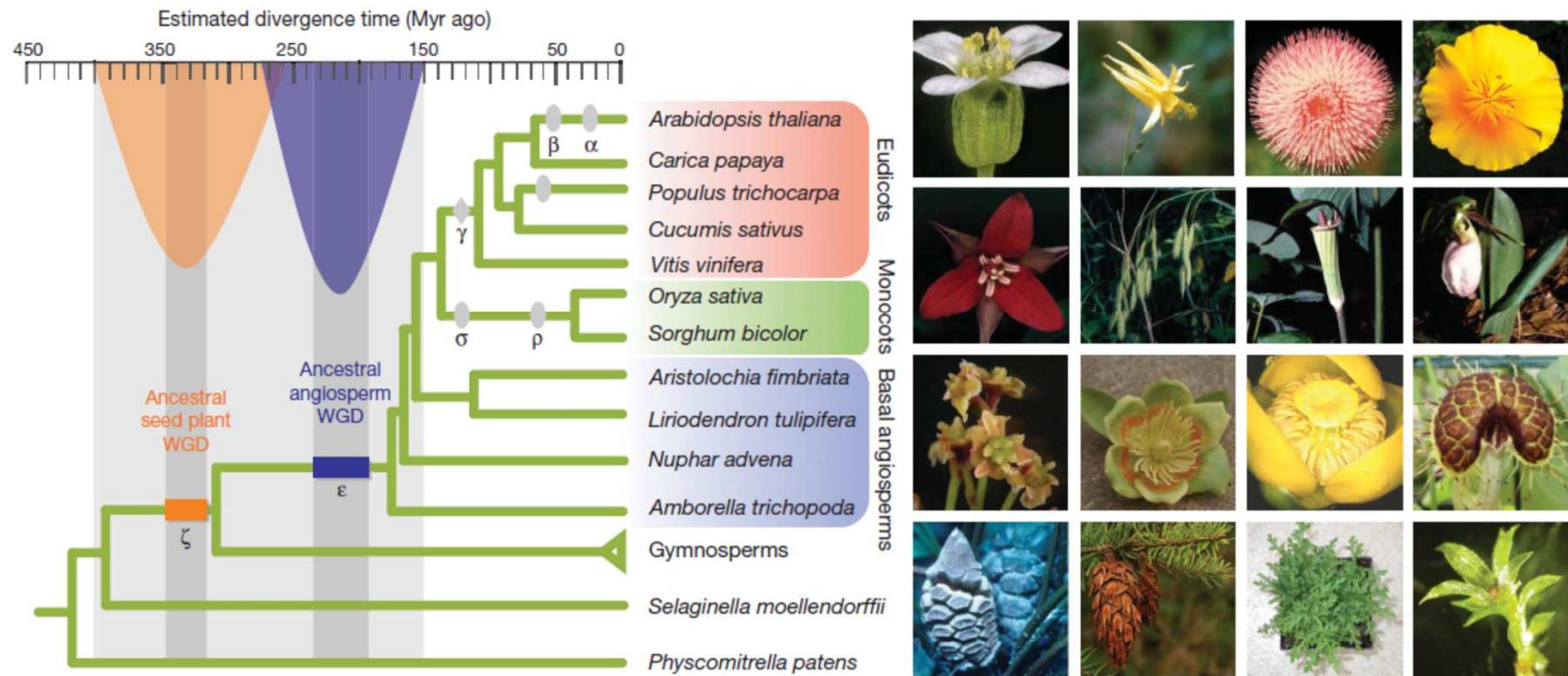
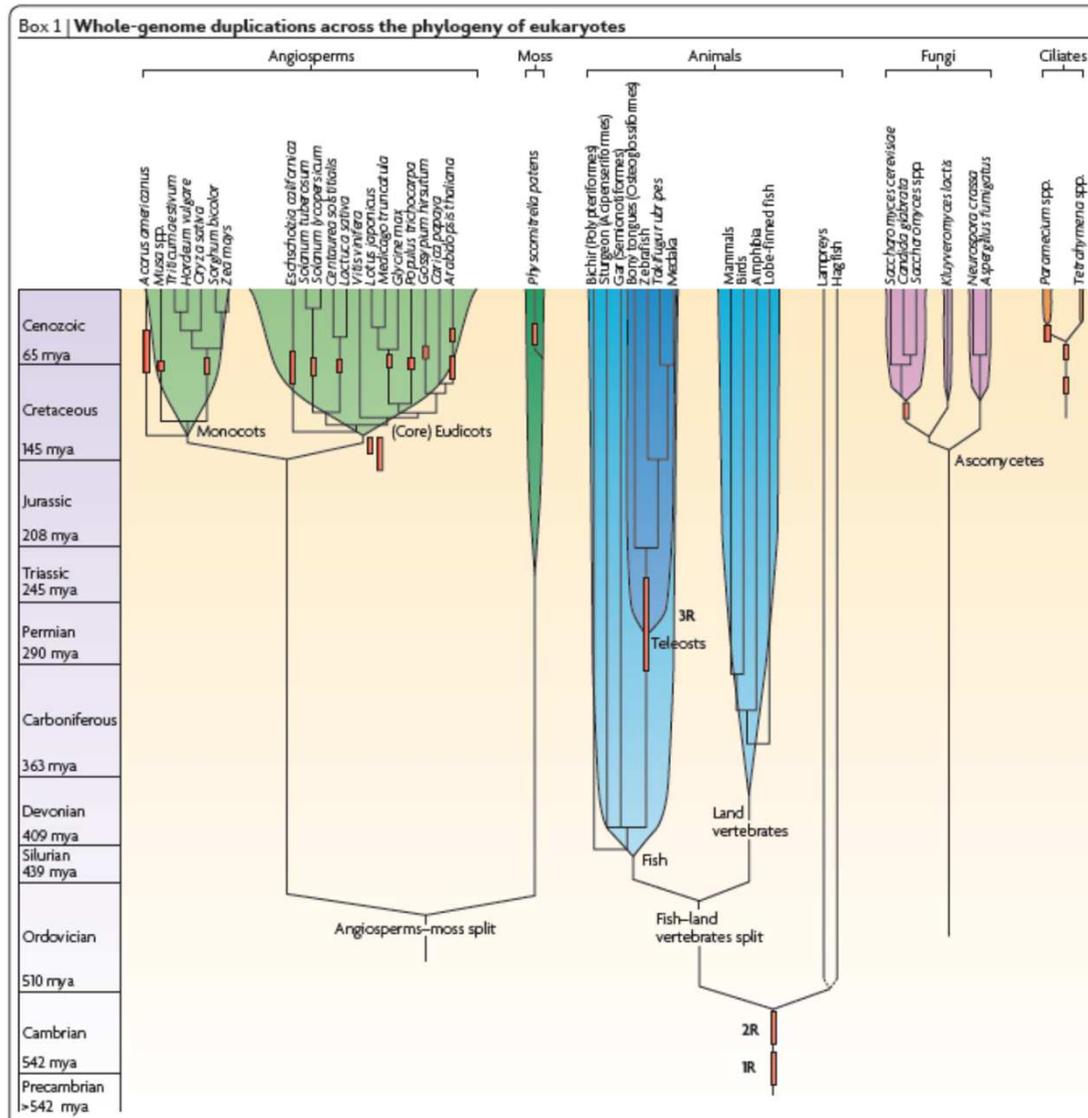


Figure 3 | Ancestral polyploidy events in seed plants and angiosperms. Two ancestral duplications identified by integration of phylogenomic evidence and molecular time clock for land plant evolution. Ovals indicate the generally accepted genome duplications identified in sequenced genomes (see text). 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.

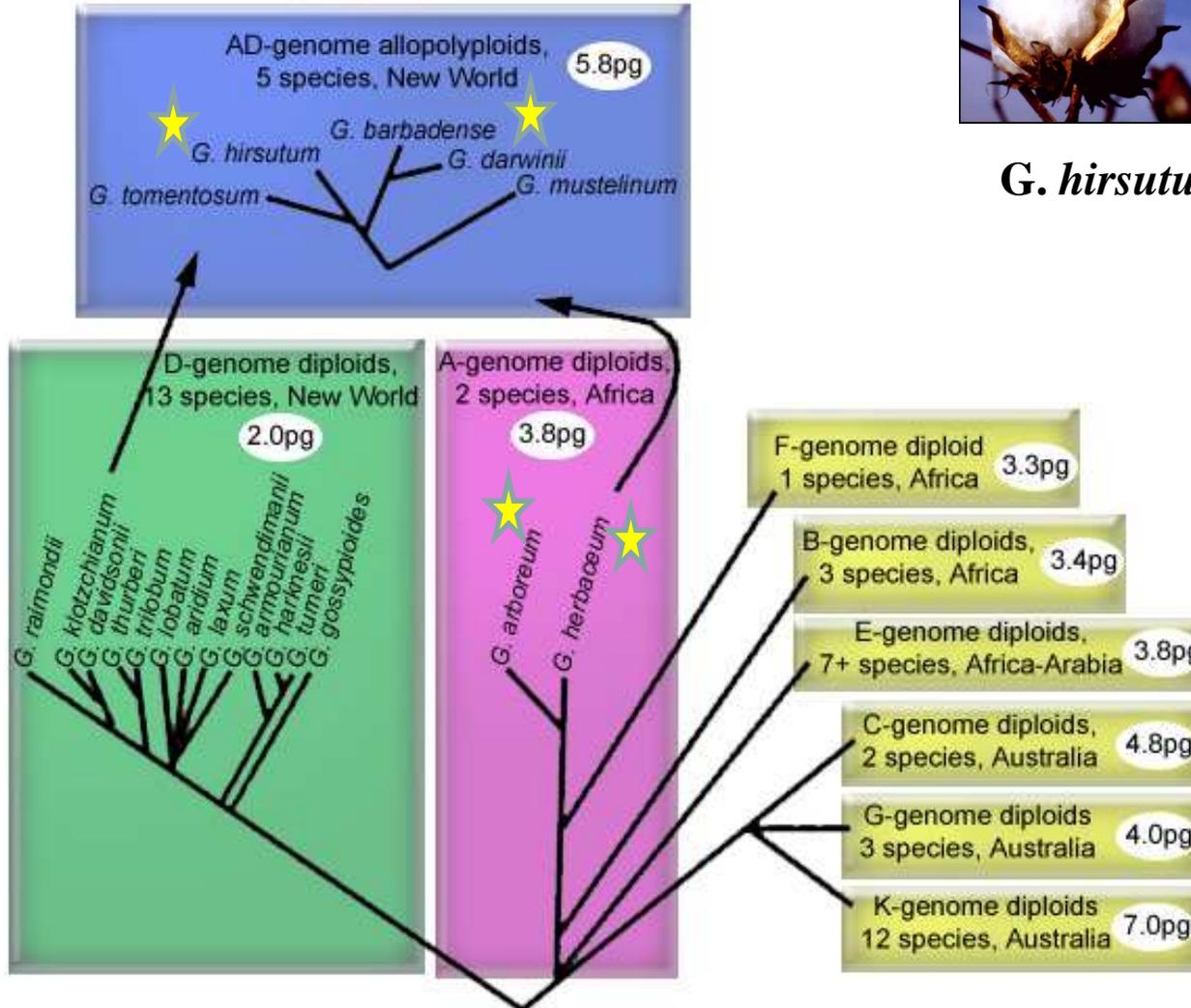
Pylogénie du genre *Gossypium* (Cotonnier)

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

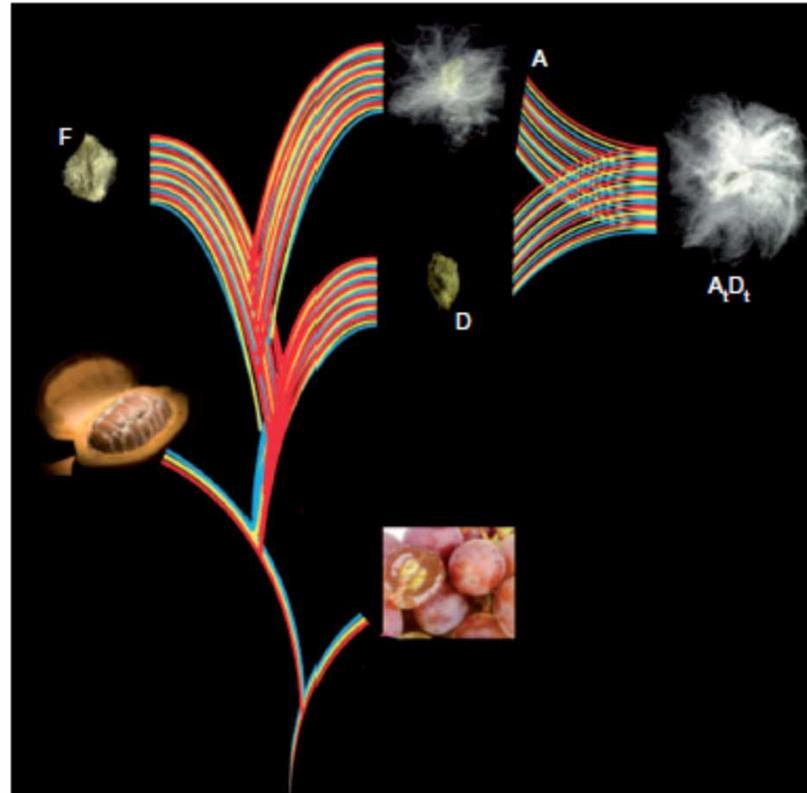


Figure 1 | Evolution of spinnable cotton fibres. Paleohexaploidy in a eudicot ancestor (red, yellow and blue lines) formed a genome resembling that of grape (bottom right). Shortly after divergence from cacao (bottom left), the *Gossypium* lineage experienced a five- to sixfold ploidy increase. Spinnable 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* (A₁D₁) and *G. tomentosum* (A₁D₁).

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**



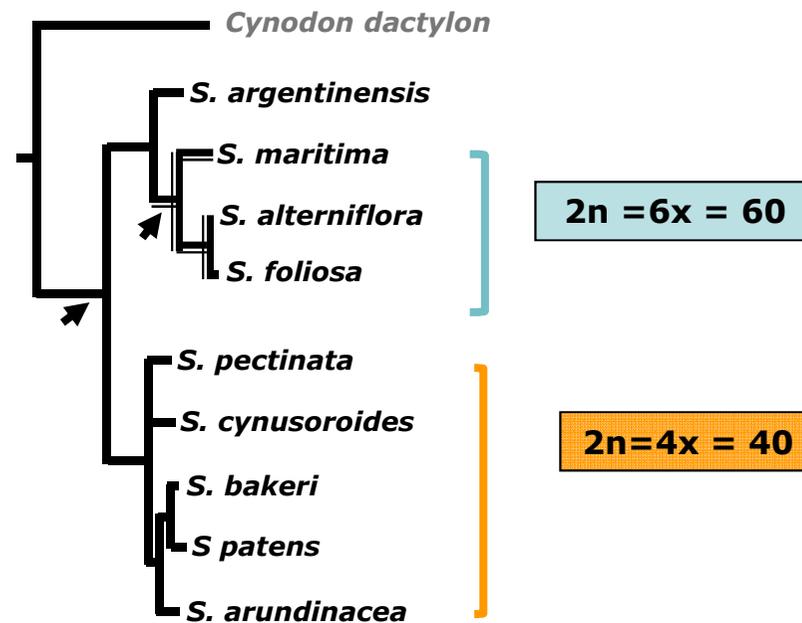
**Facteurs clés de
leur succès
écologique**



ROSCOFF 2005

Spartina: Un système modèle d'hybridation et polyploïdie

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



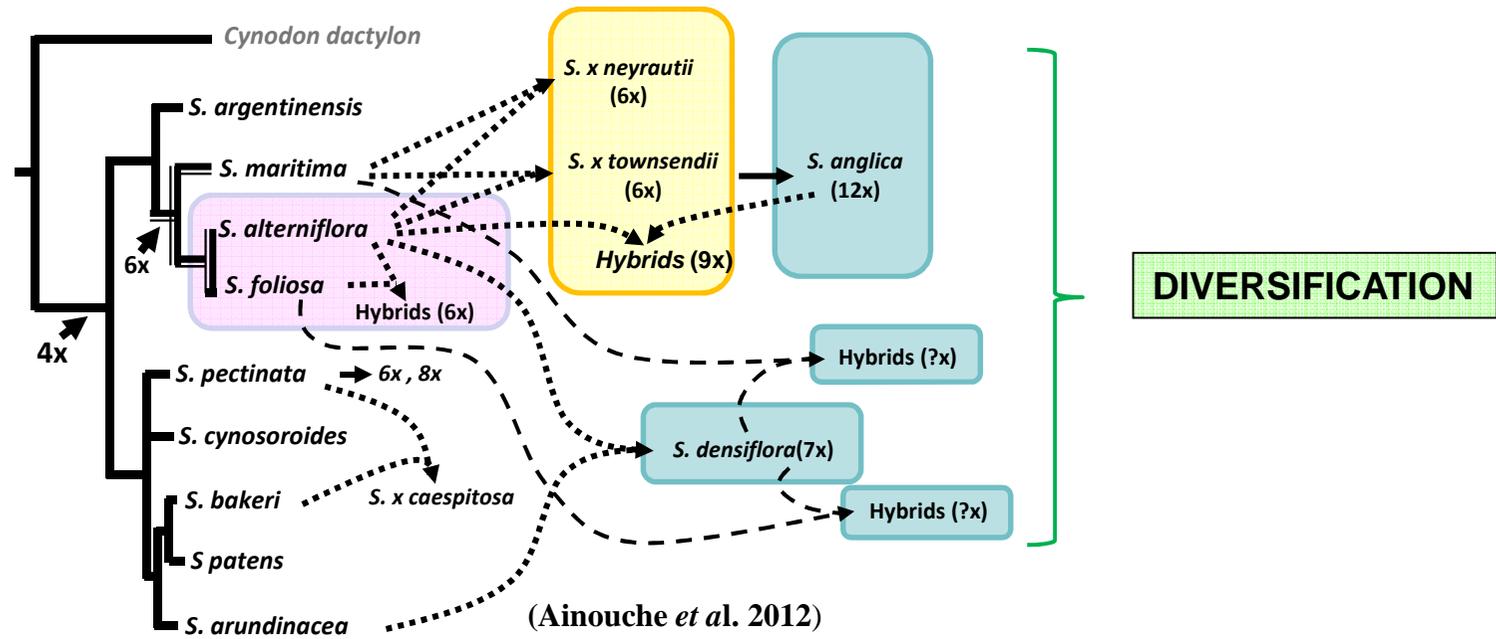
(Ainouche *et al.* Springer, 2012)

Spartina: Un système modèle d'hybridation et polyploidie

INTROGRESSION:
Hybrides fertiles, backcrosses
Diversité intraspecifique

F1 +/- Sterile

**SPECIATION
ALLOPOLYPLOIDE**



S. alterniflora x *S. foliosa* hybrids
(San Francisco, CA, USA)



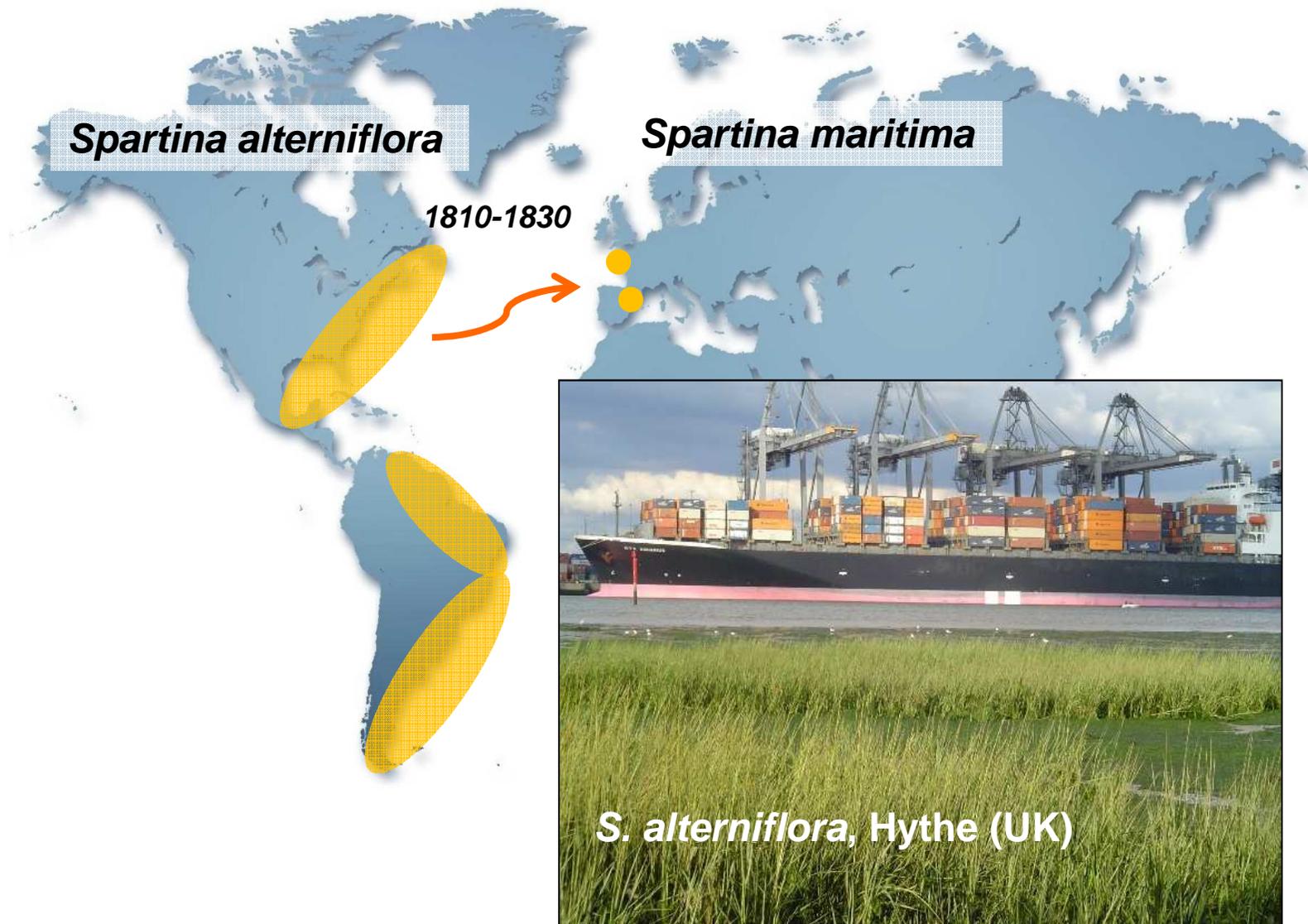
S. x neyrautii, France)



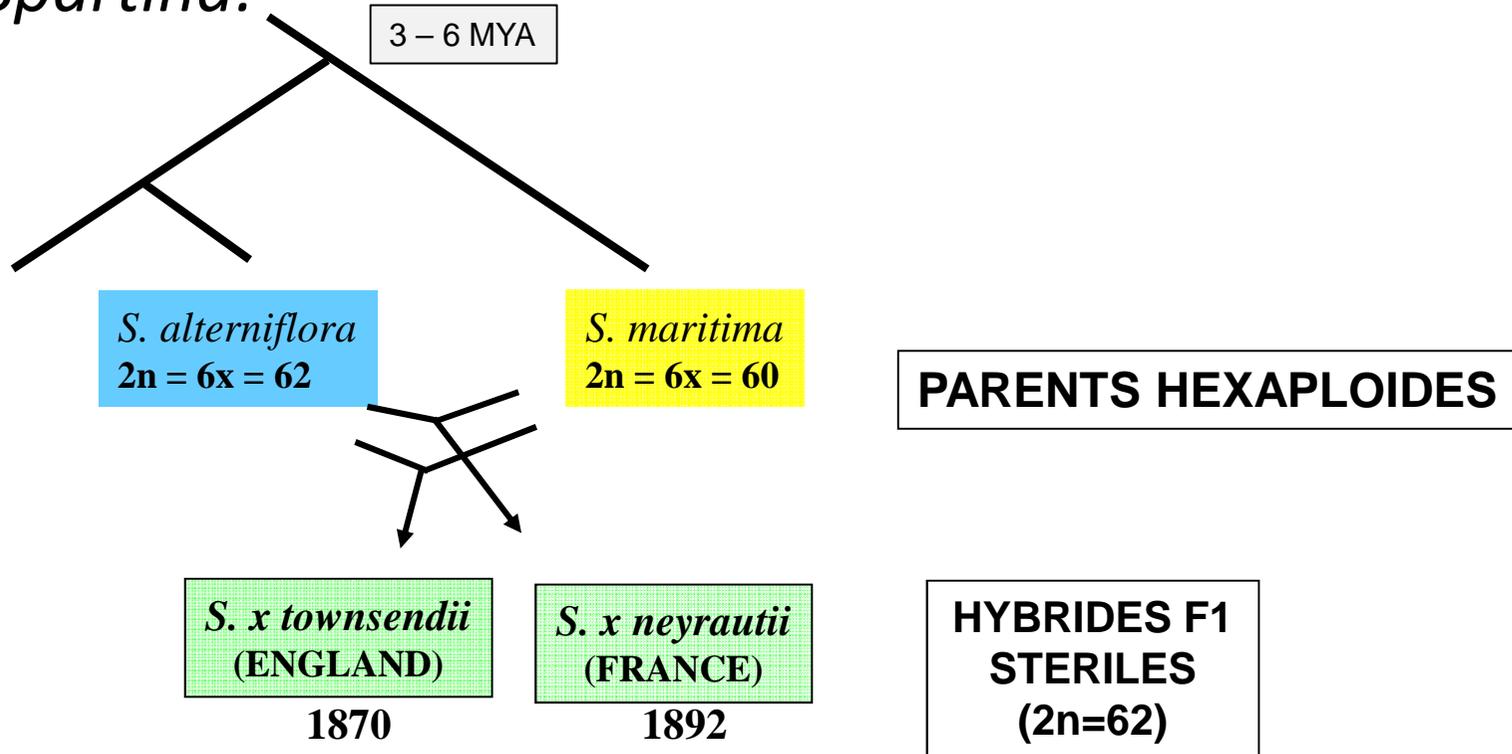
S. anglica (UK)

Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:

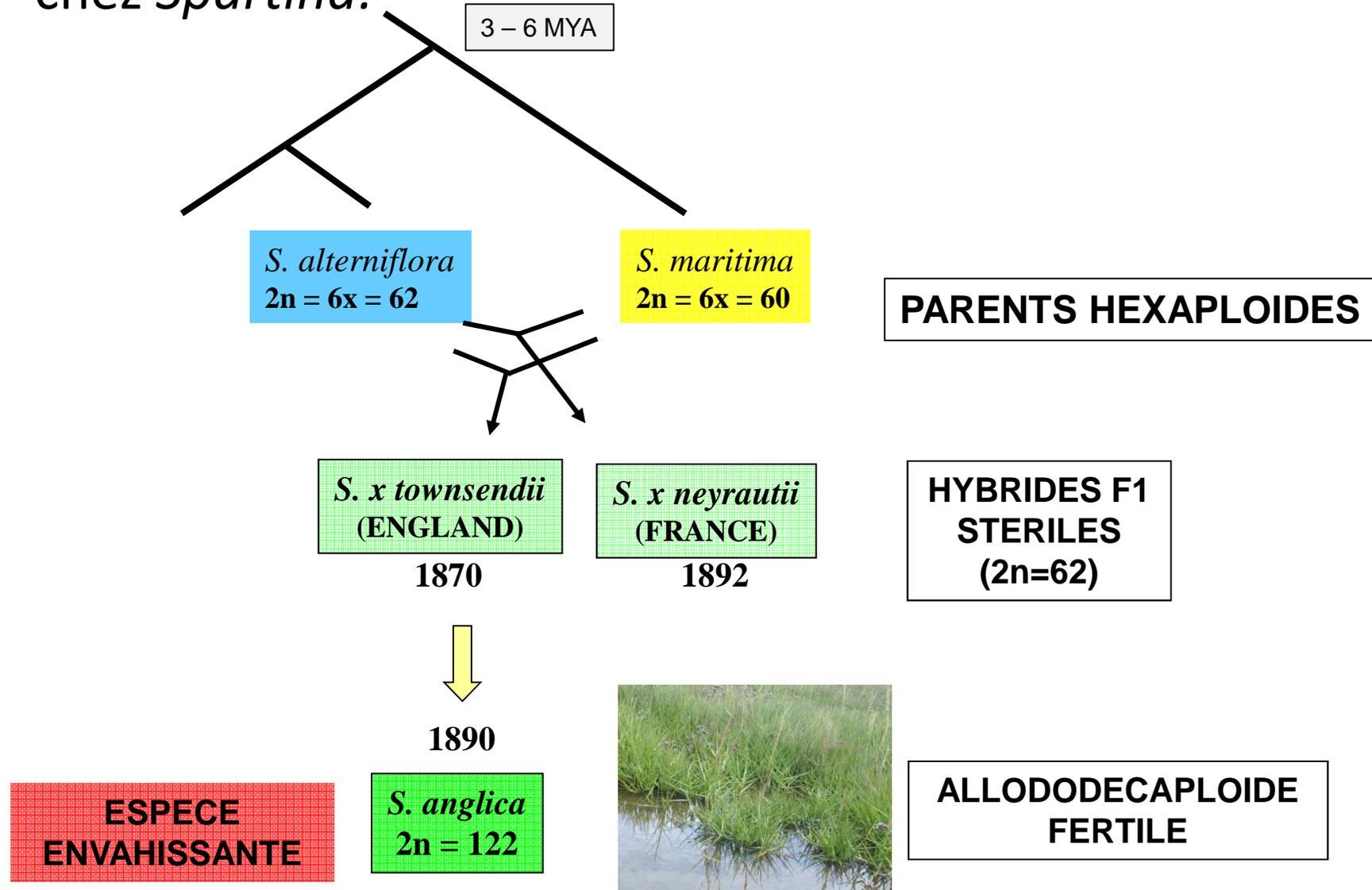
S. alterniflora x *maritima*



Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



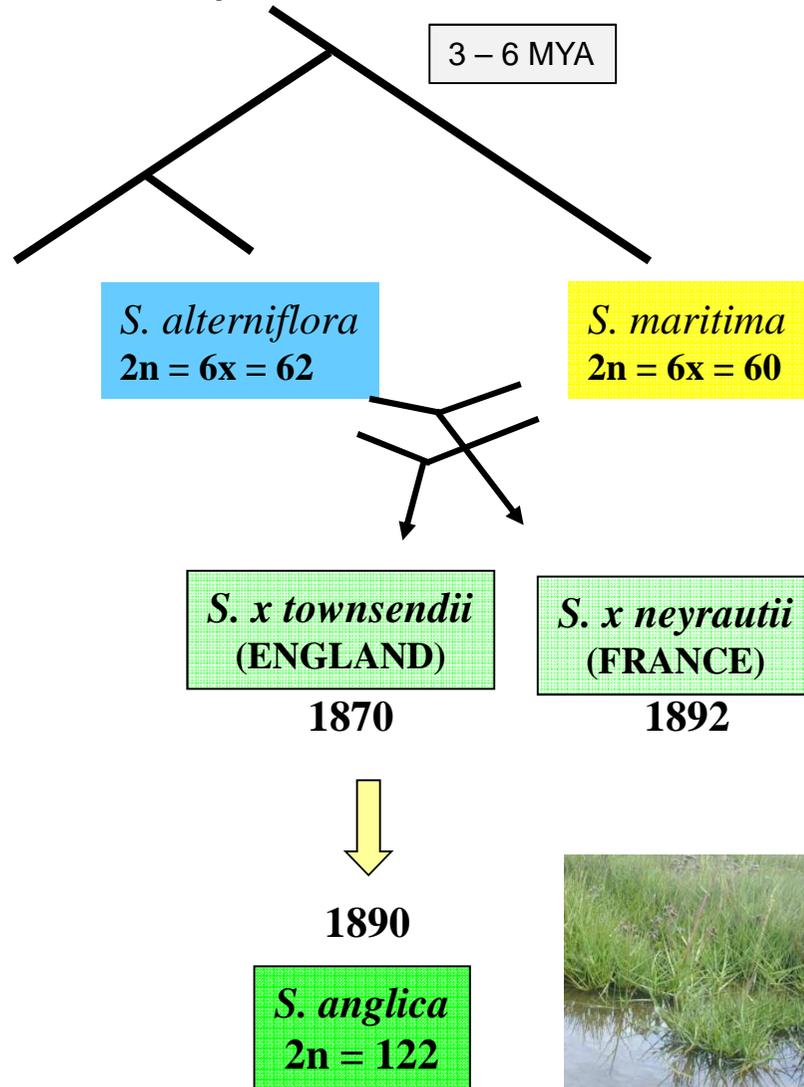
Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



S. anglica: Une distribution mondiale



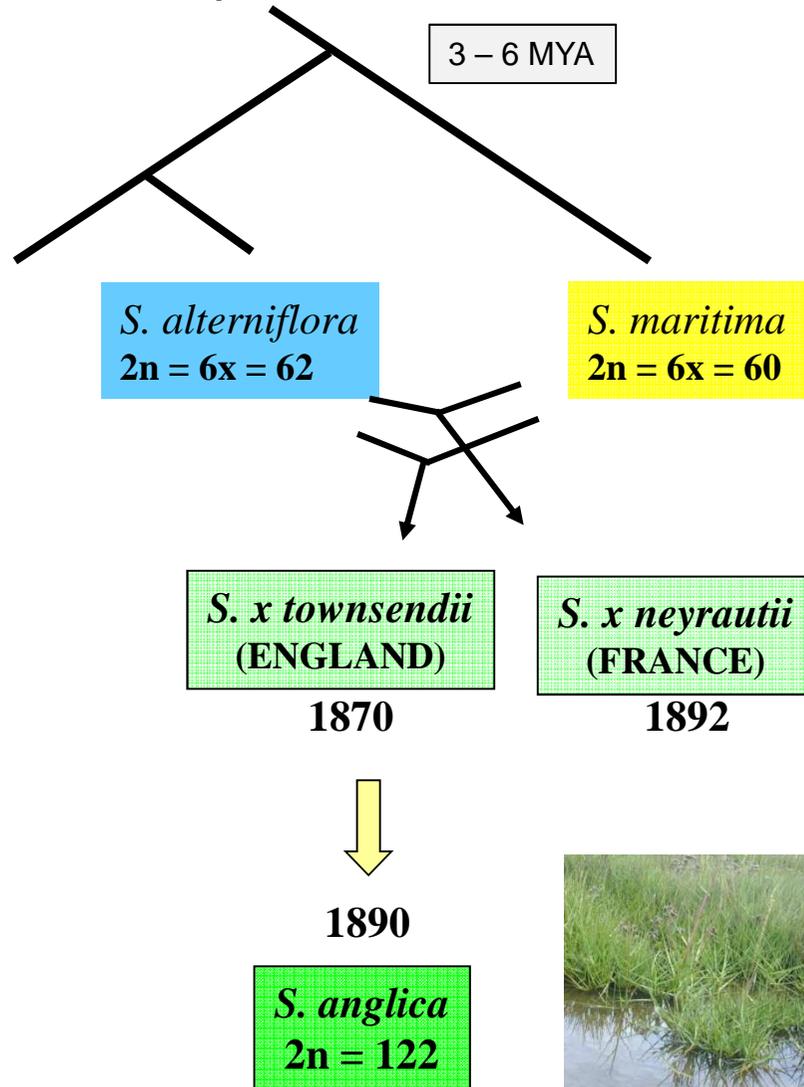
Hybridization récente et spéciation allopolyploïde chez *Spartina*:



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*:

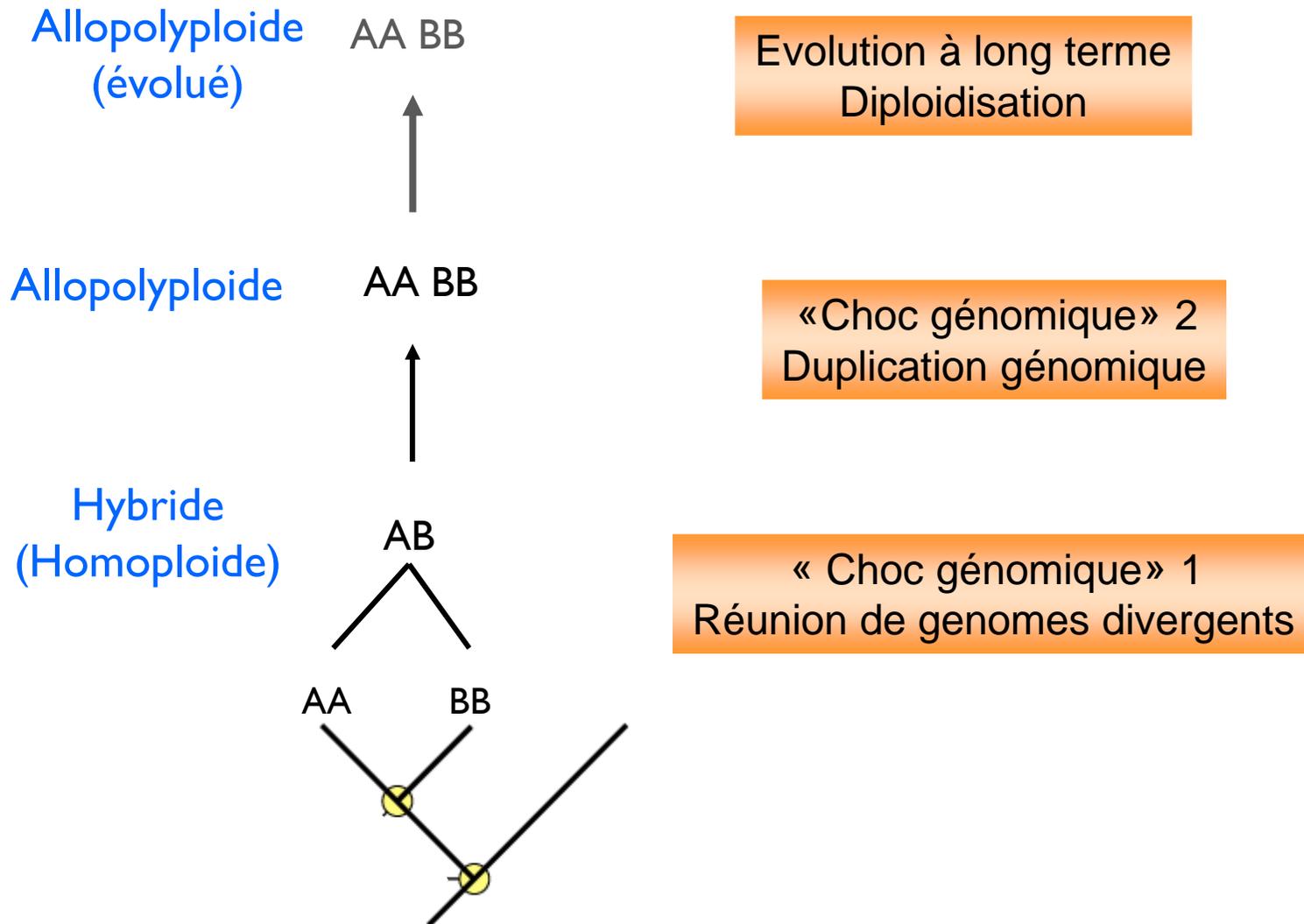


Deux évènements indépendants d'hybridation impliquant les mêmes espèces parentales

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)!

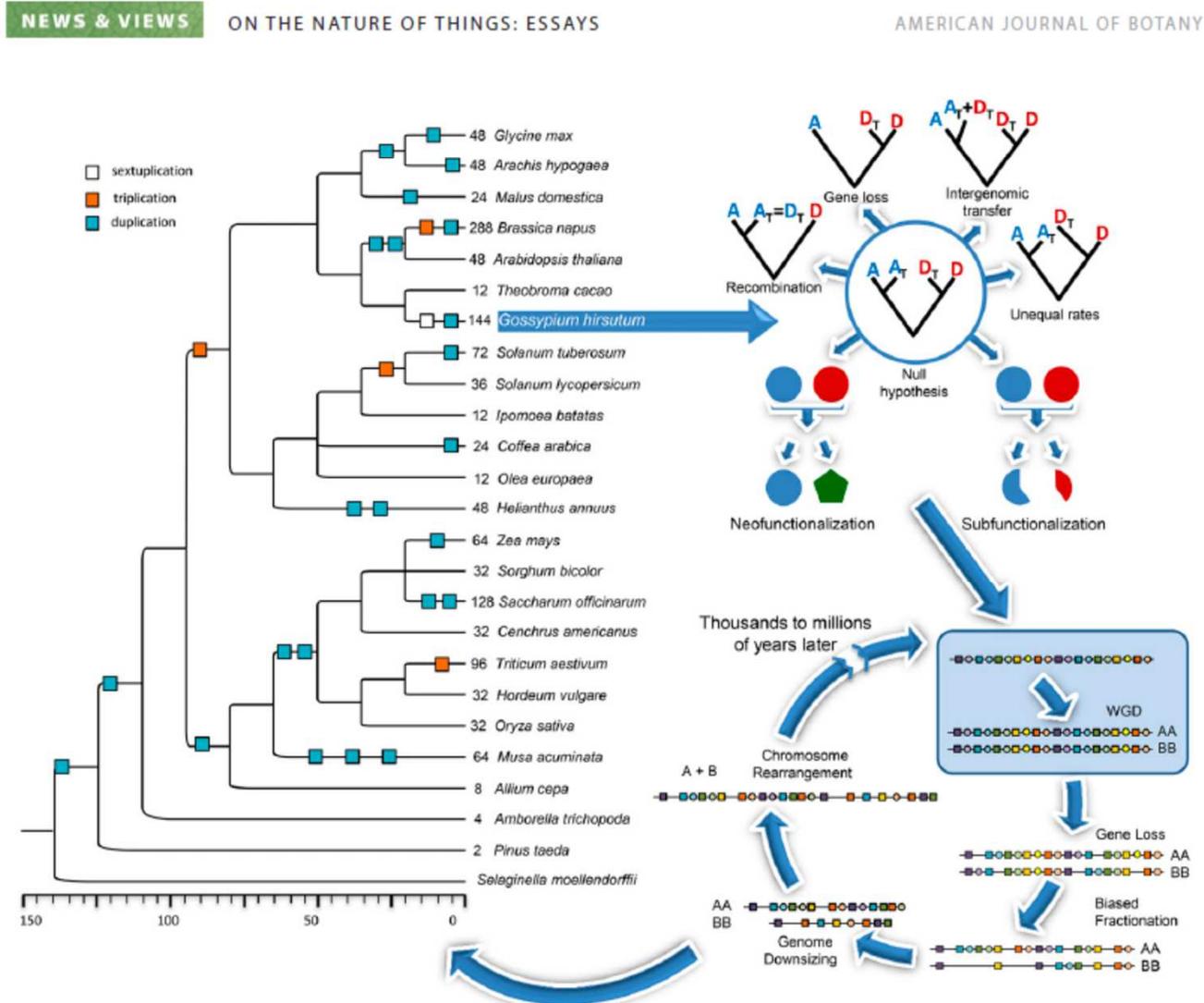


The wondrous cycles of polyploidy in plants¹

Jonathan F. Wendel²

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