

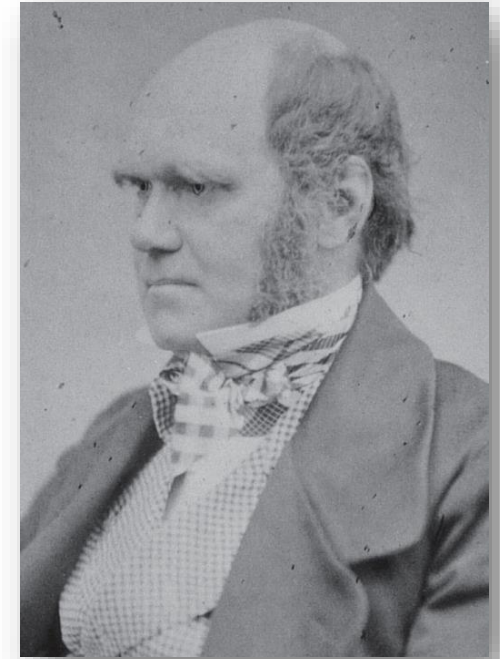
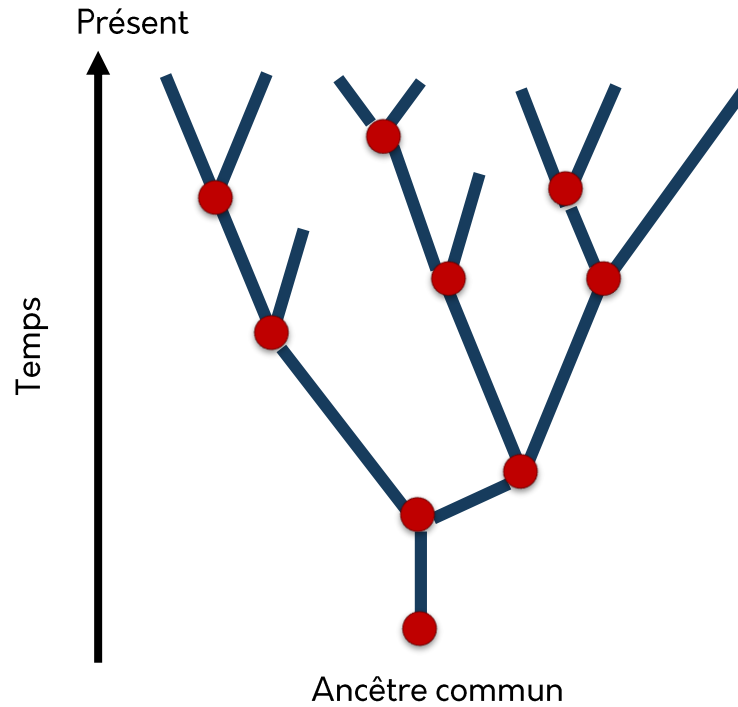
Etudier la domestication pour comprendre l'évolution : pommiers et champignons du fromage



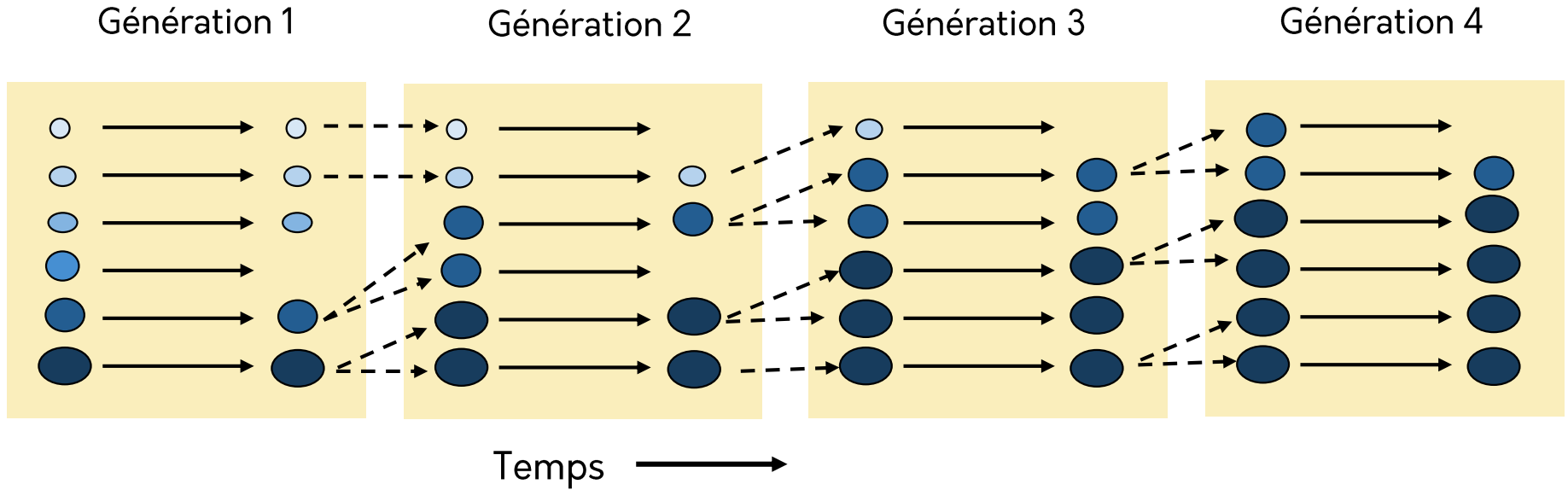
Adaptation des êtres vivants



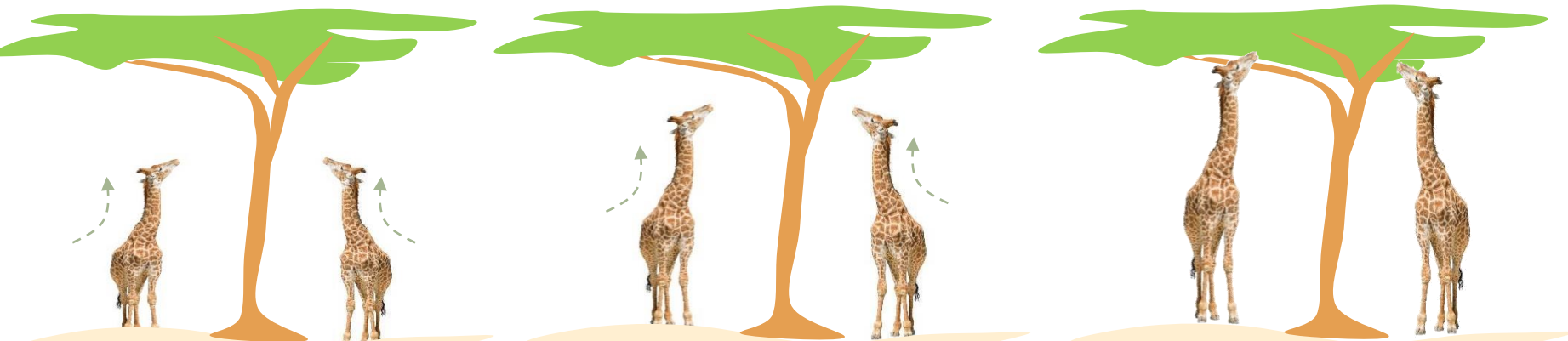
La théorie de Darwin :
évolution par descendance
avec modification



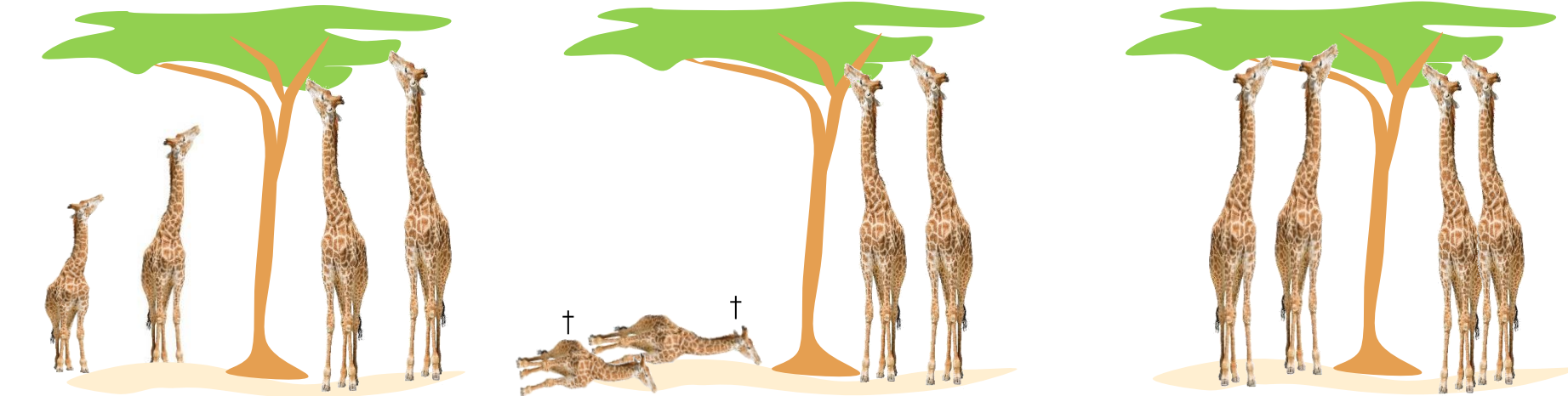
... par sélection naturelle



Théorie de Lamarck : transformisme

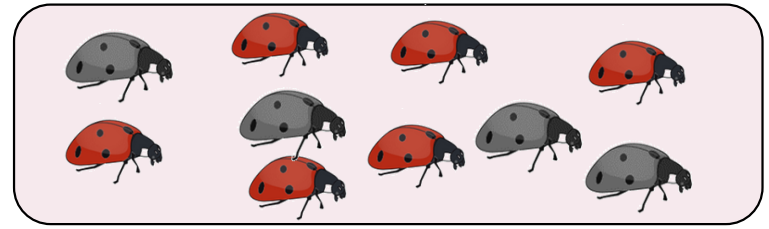


Théorie de Darwin: sélection naturelle

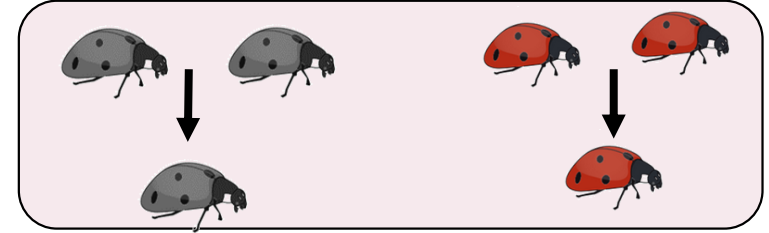


Evolution par sélection naturelle

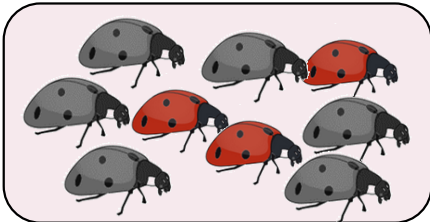
Variation



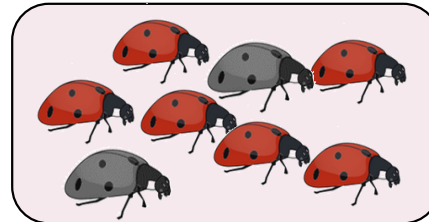
Héritabilité



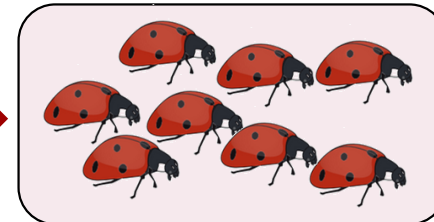
Différences de survie
ou de succès reproducteur



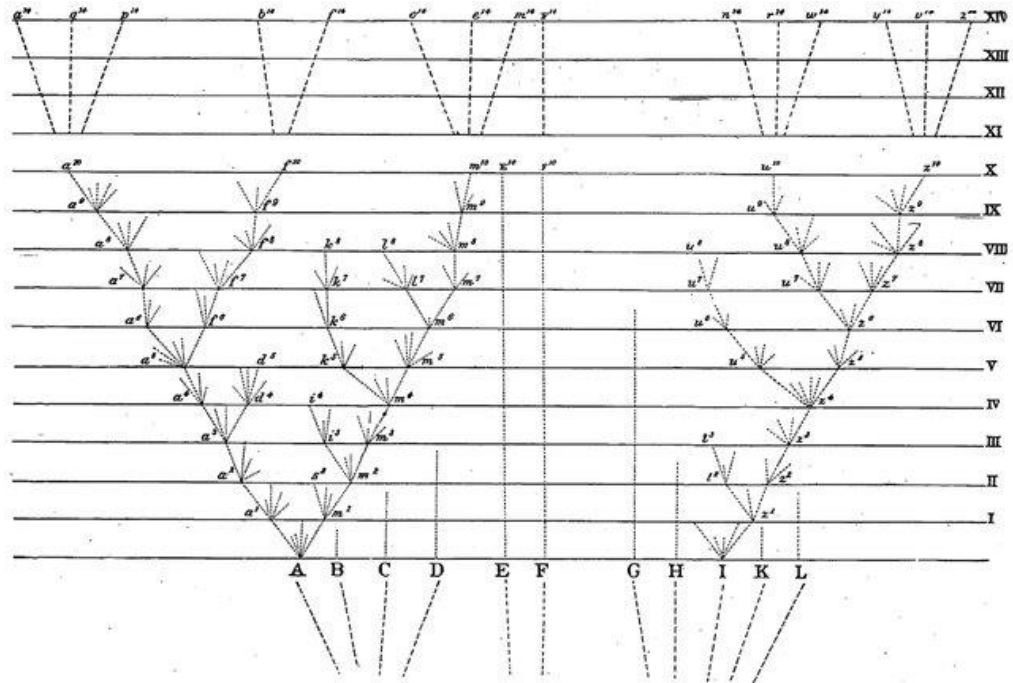
Génération



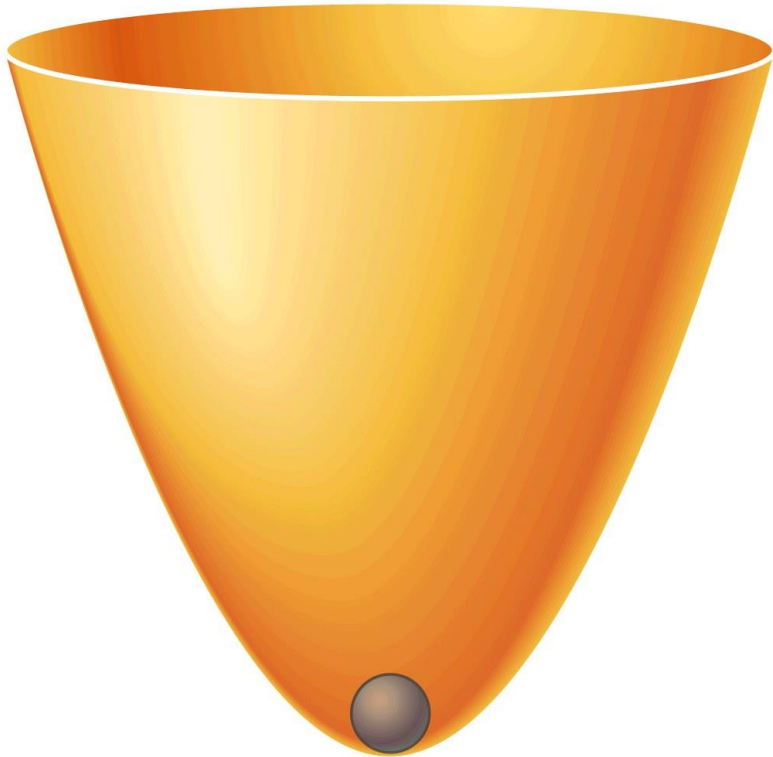
Génération



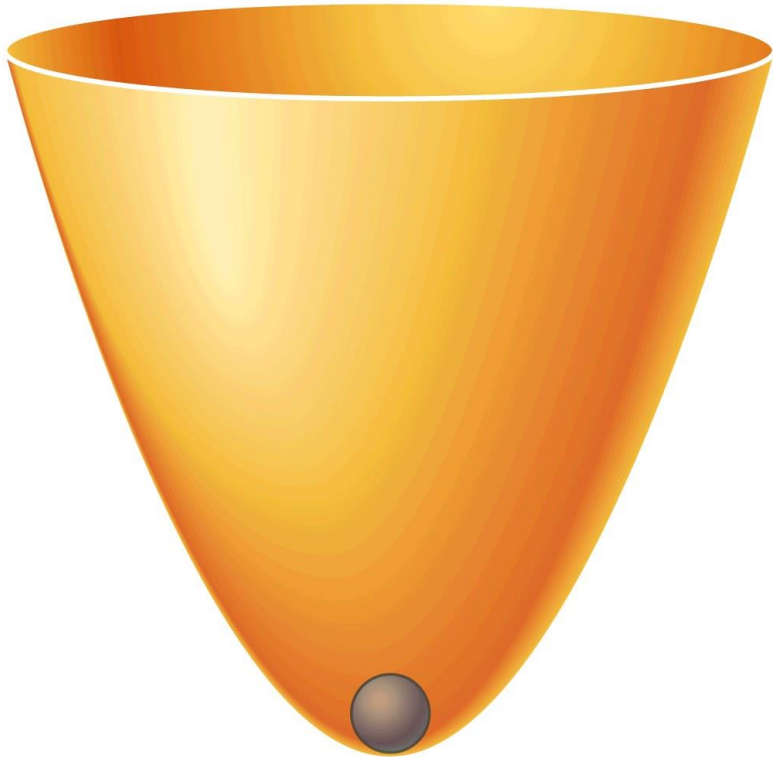
La théorie de Darwin : évolution par descendance avec modification



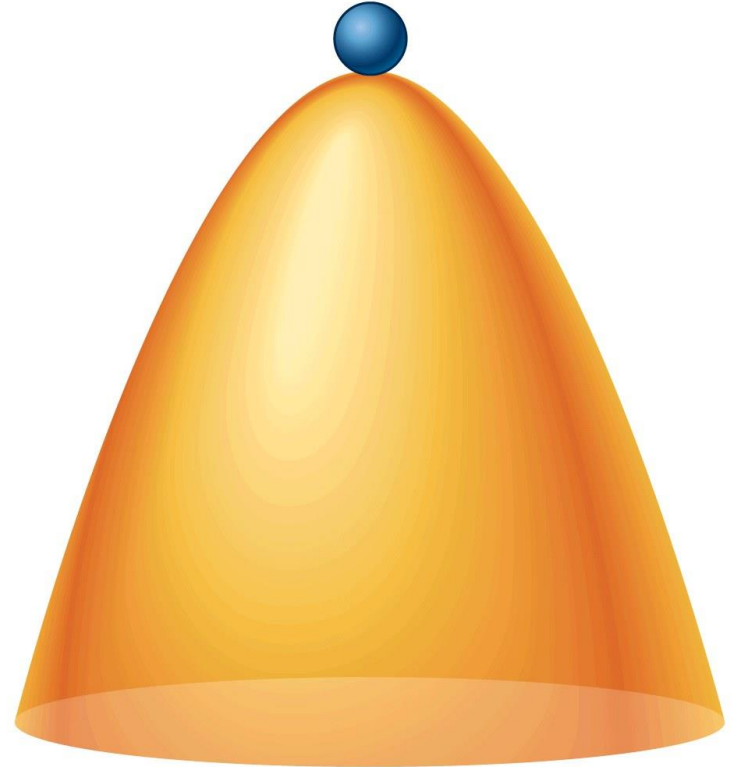
La biodiversité n'est pas un
équilibre stable



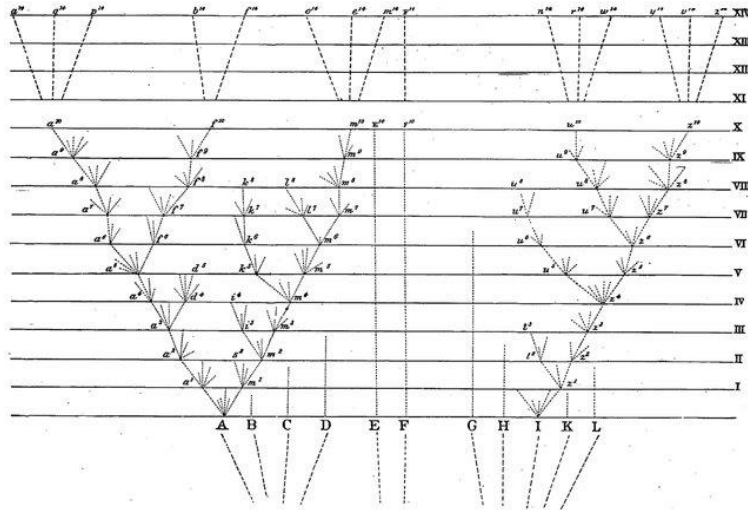
La biodiversité n'est pas un
équilibre stable...



...mais pas non plus
un équilibre instable

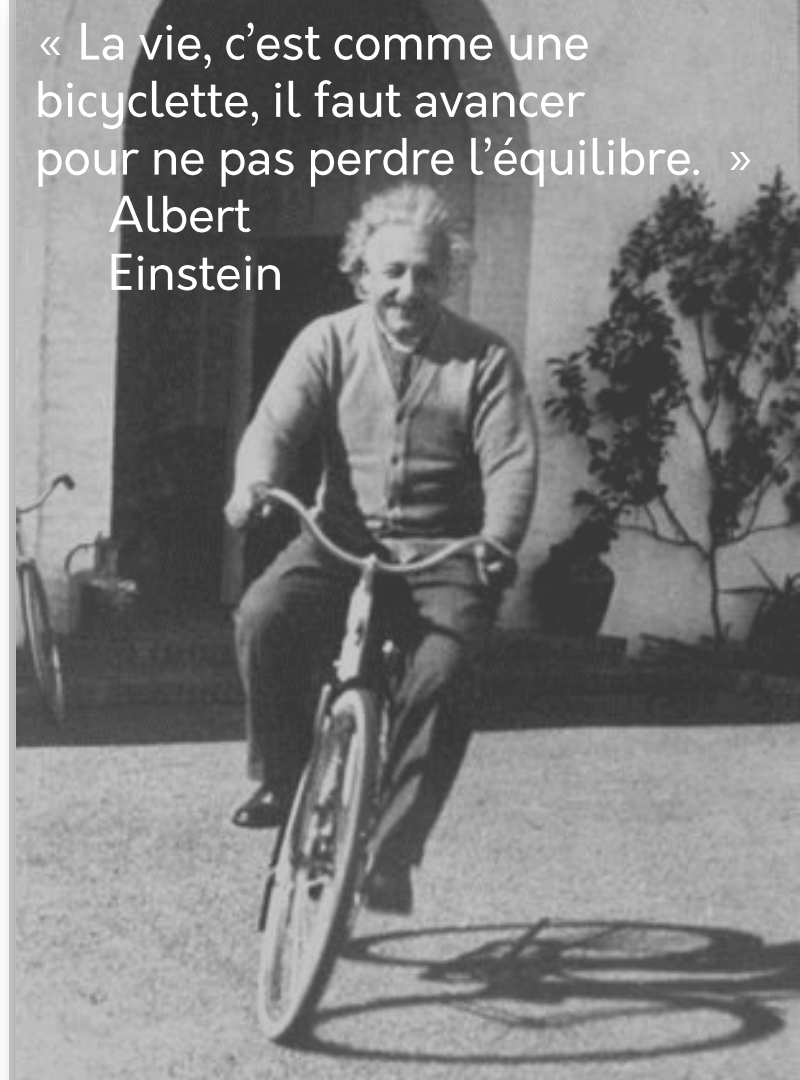


La biodiversité est un équilibre dynamique

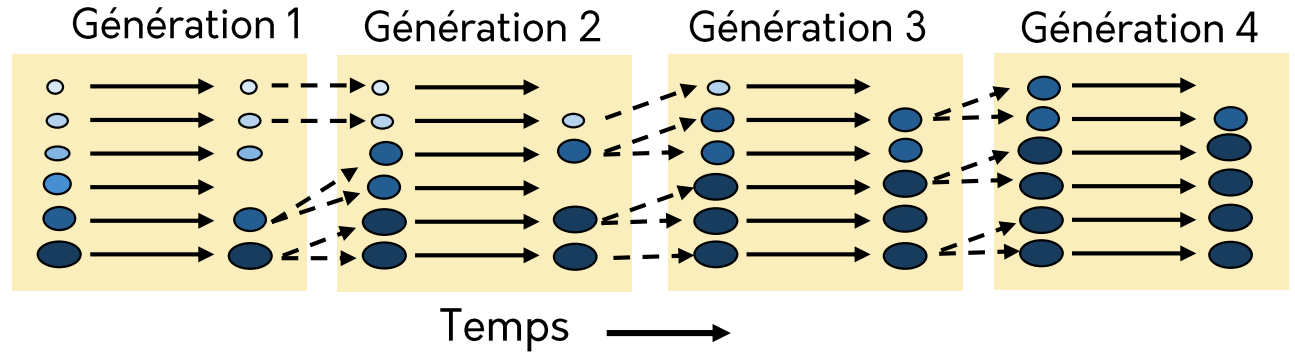
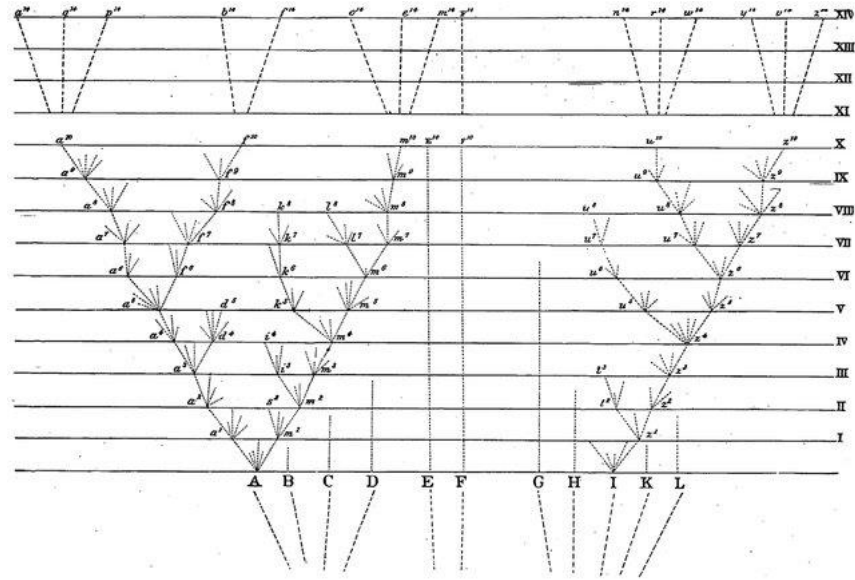
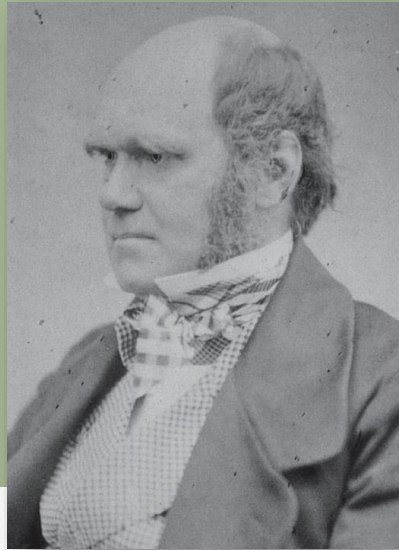


« La vie, c'est comme une bicyclette, il faut avancer pour ne pas perdre l'équilibre. »

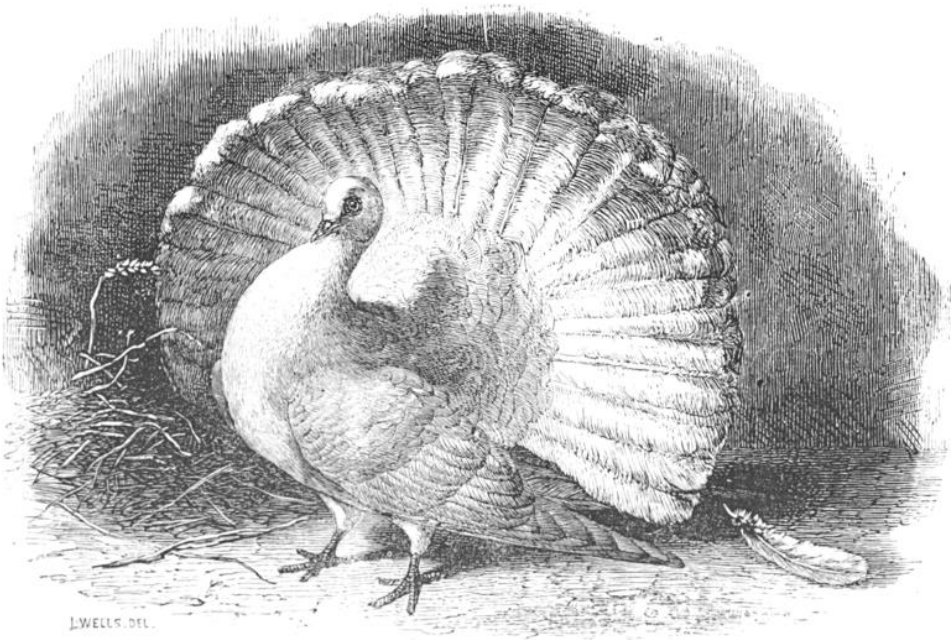
Albert
Einstein



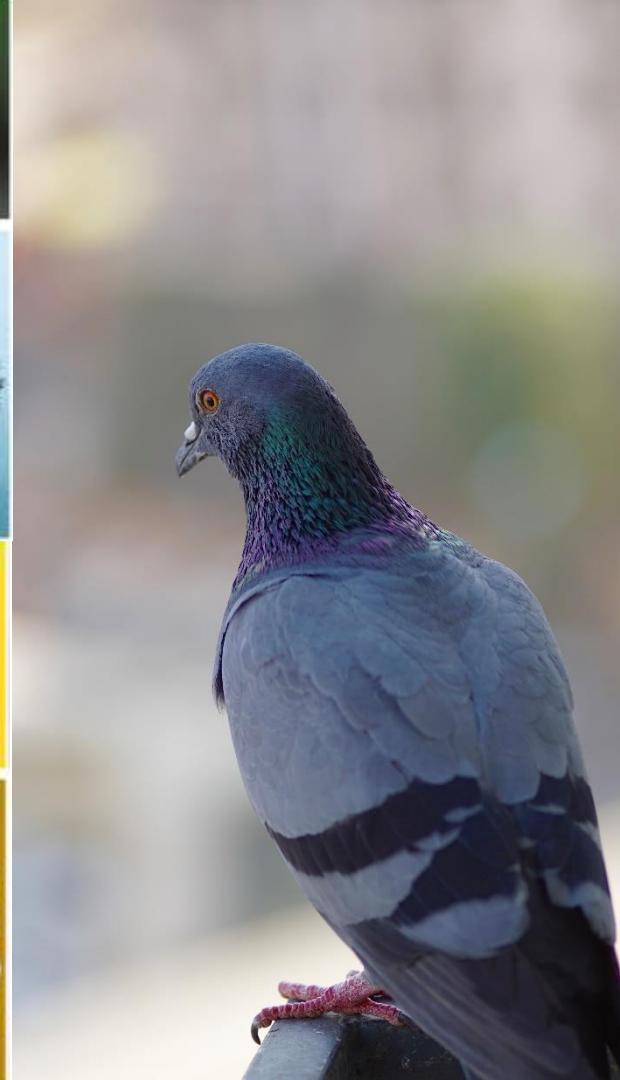
Comprendre la diversification et l'adaptation



La domestication comme modèle d'adaptation et de diversification



Shapiro, 2013, Cur. Biol.



La domestication comme modèle d'adaptation et de diversification

≈20 000 ans



Canis lupus



La domestication
comme modèle
pour comprendre
l'adaptation et la
diversification

Sélection forte et
récente sur des
caractères connus



La domestication
comme modèle
pour comprendre
l'adaptation et la
diversification

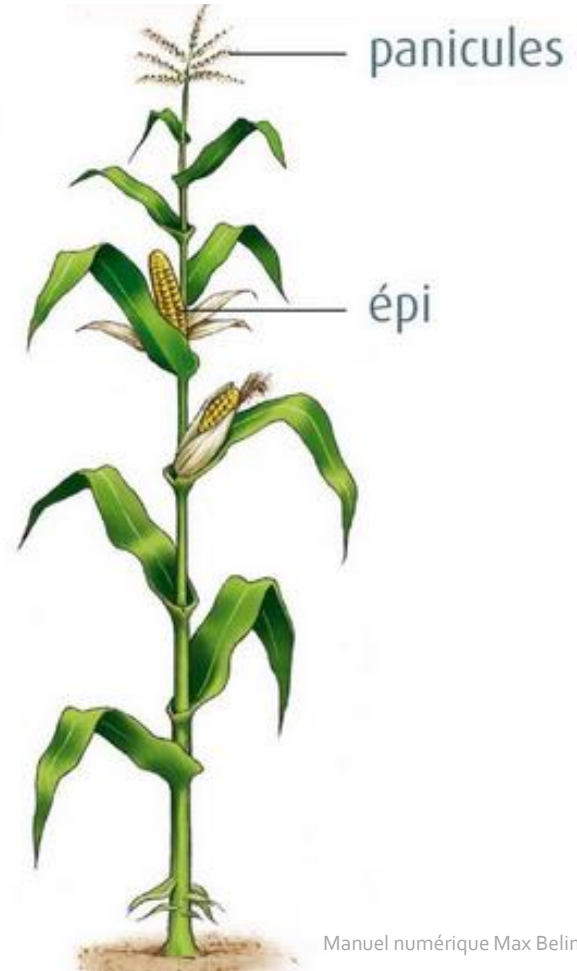
Sélection forte et
récente sur des
caractères connus



Lamiot



Domestication du maïs



Domestication du maïs



La domestication
comme modèle
pour comprendre
l'adaptation et la
diversification

Sélection forte et
récente sur des
caractères connus

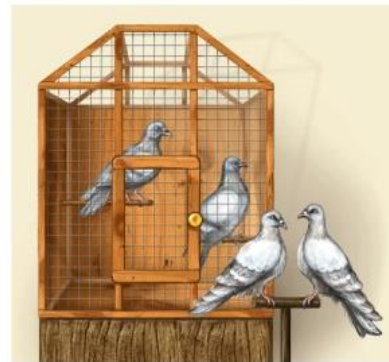
Génération 1



Génération 2



Génération 3



Génération N



Caractères sous sélection

Production

Augmentation de taille

Rétention des propagules

Culture

Réduction de la dormance et synchronisation

Une seule tige

Usage

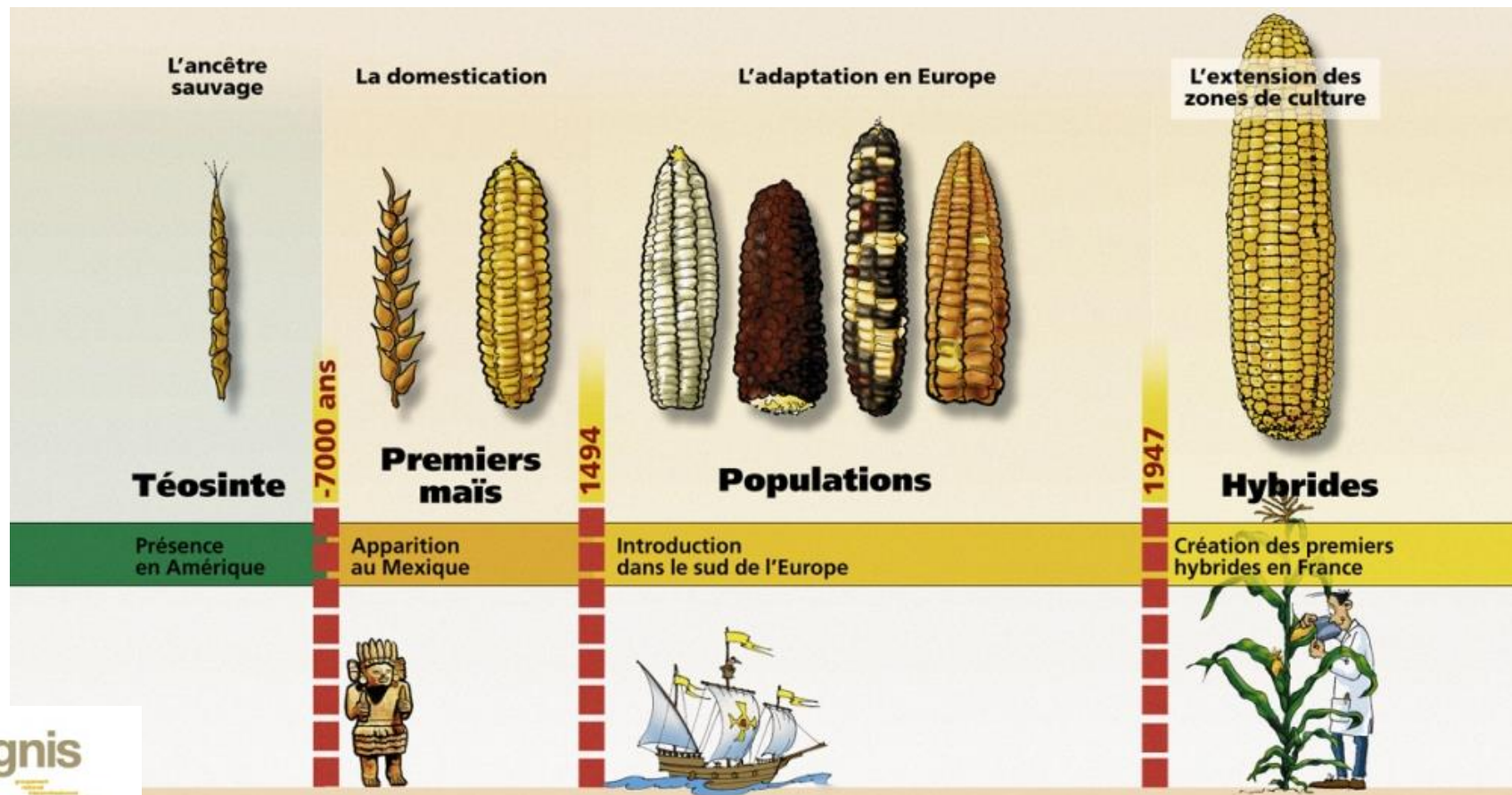
Réduction des défenses

Couleur

Désavantageux à l'état sauvage



Domestication: un processus en plusieurs étapes



Variétés de maïs



Domestication: un processus en plusieurs étapes

Domestication



Dispersion - Diversification
Adaptation locale



Amélioration variétale moderne



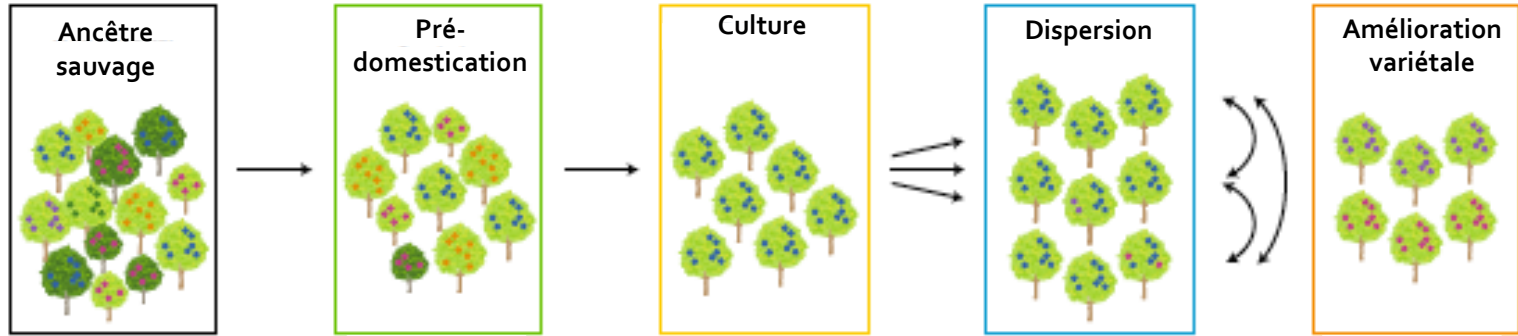
Parent 1

Parent 2

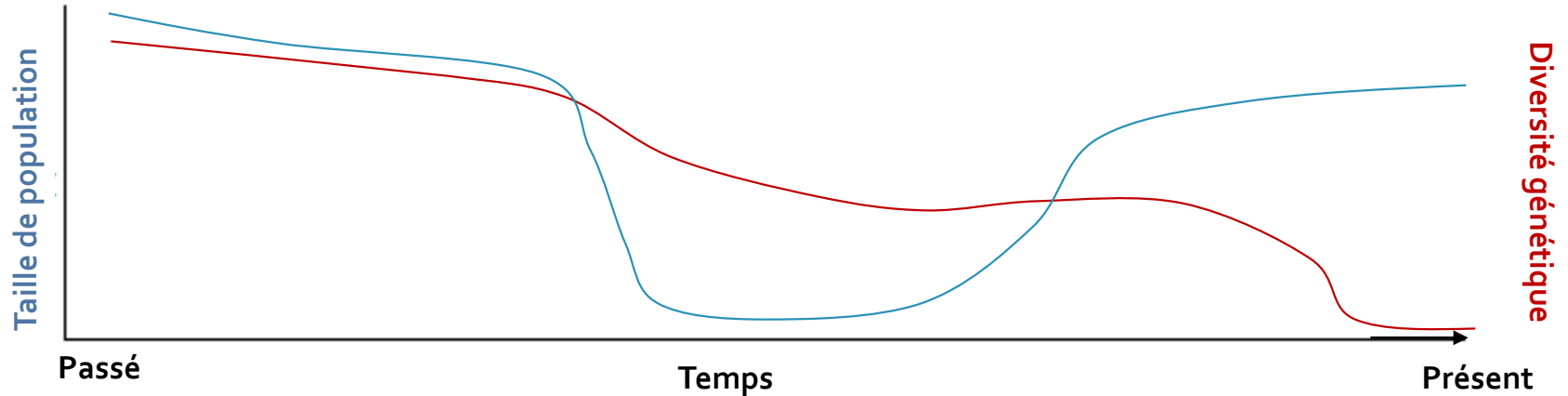


Hybride

Domestication: un processus en plusieurs étapes



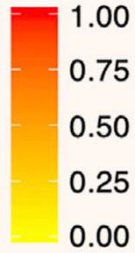
Gaut et al. Nature Plants 2018



Histoire de la domestication du chien



Fréquence allèle taille



<53 000 ans *Canis lupus*

40 000-15 000 ans
Domestication

≈ 8 000 ans



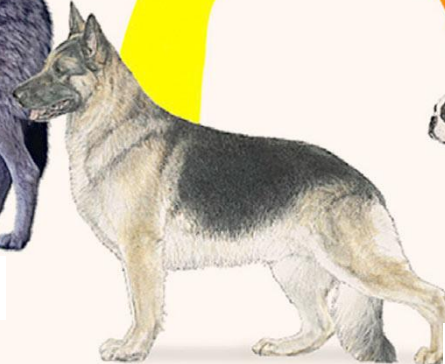
Autres canidés
(renards, chacals, ..)



Coyote



Loup gris

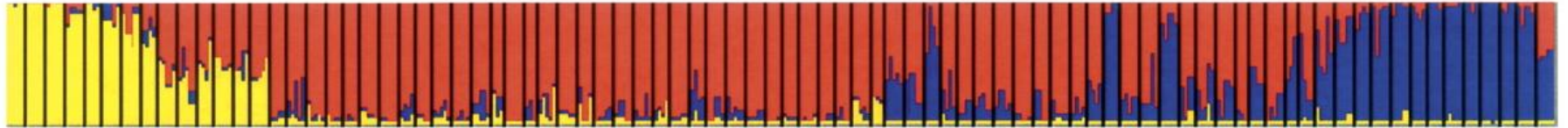


Grandes races de chiens



Petites races
de chiens

Structure des populations

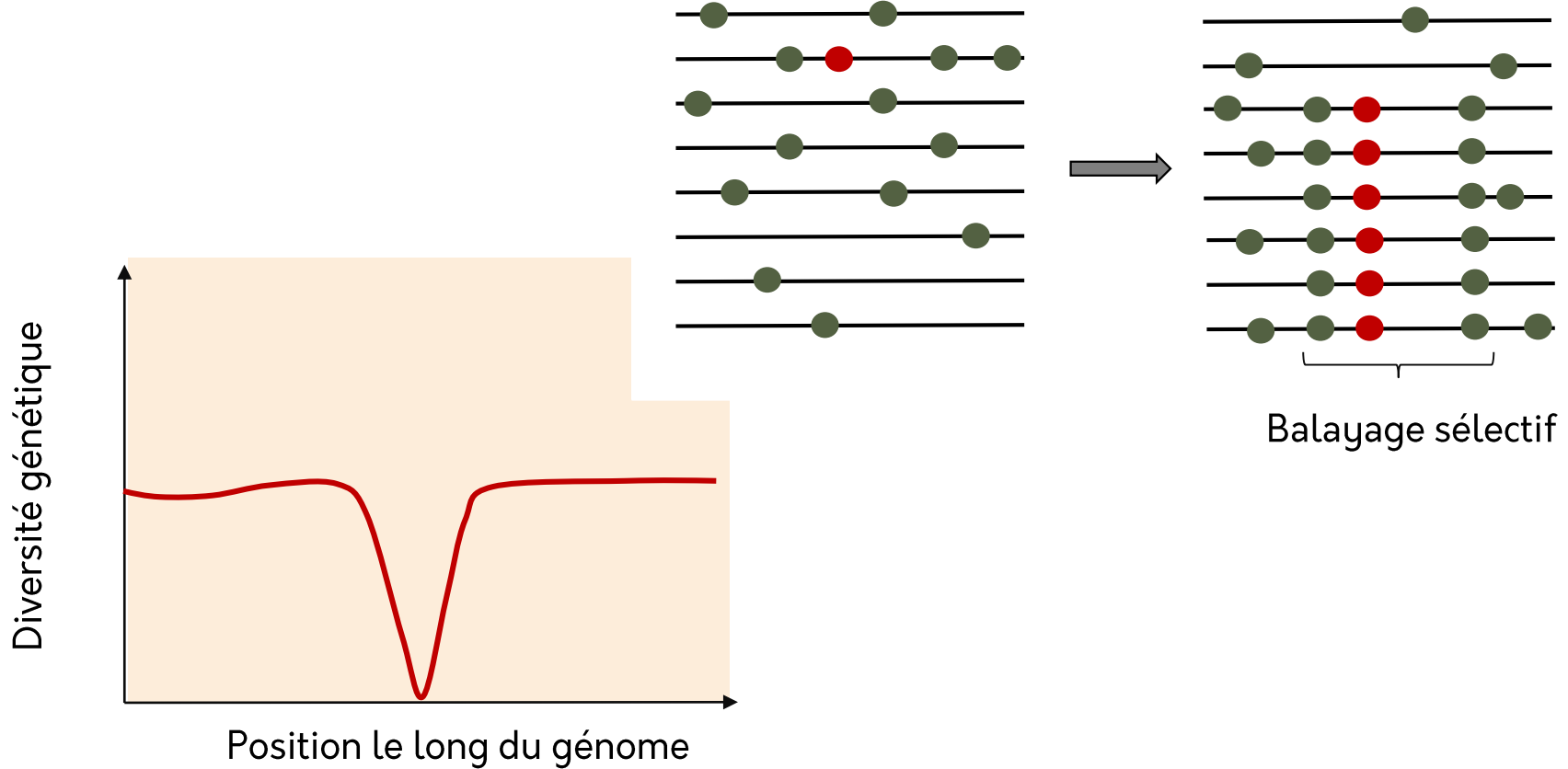


Asiatiques
Anciens

Chasse

Mastiff

Détection de la sélection dans les génomes: balayages sélectifs



Sélection sur la taille, le
comportement, digestion de
l'amidon et du gras,
fonctionnement du cerveau





Sélection sur des muscles
spécifiques des yeux

Domestication des chevaux



4-6 KYA

Races domestiquées
(60 M, 600 races)

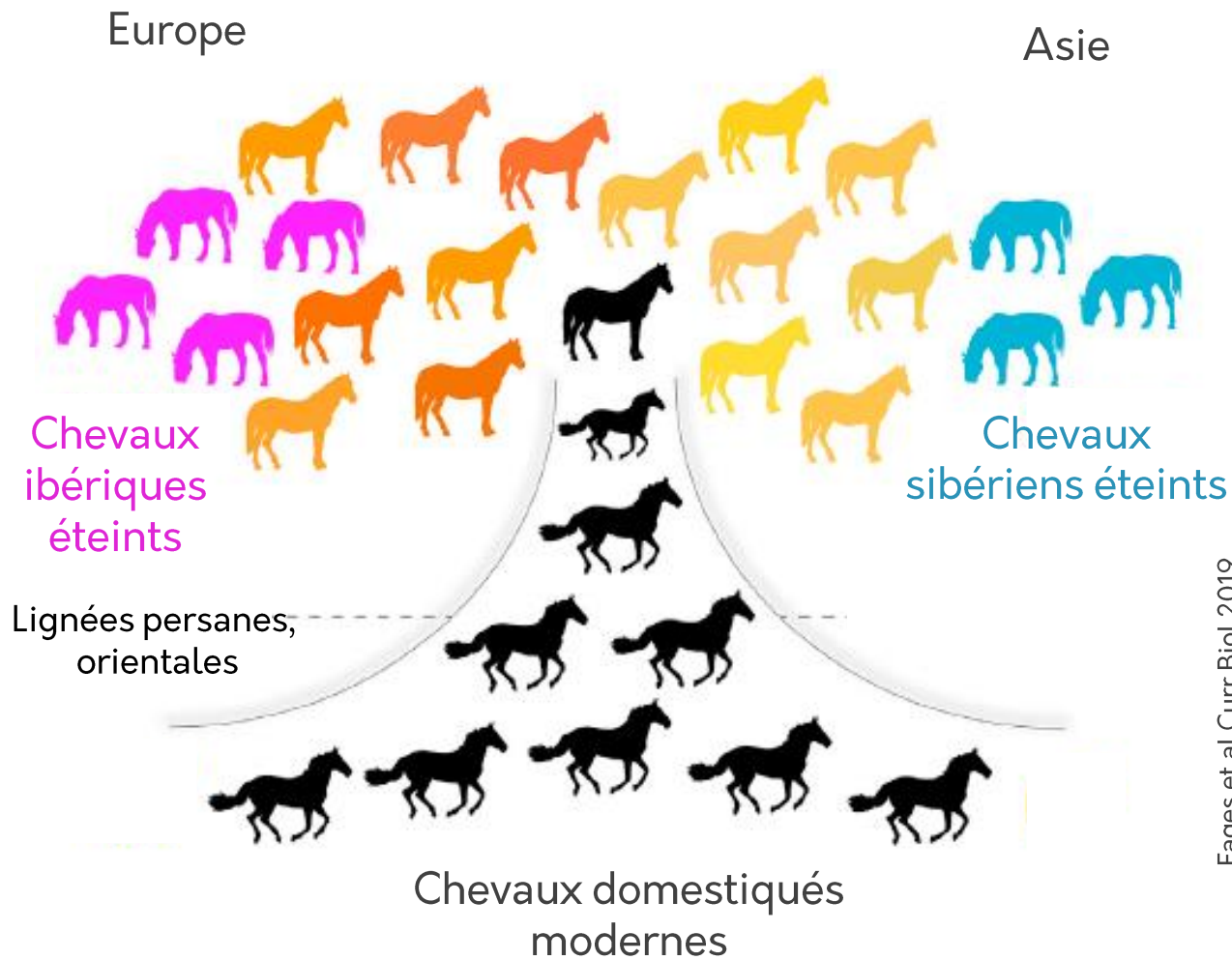
35-50
Millions
années

Botai
PRZEWALSKI (2K)



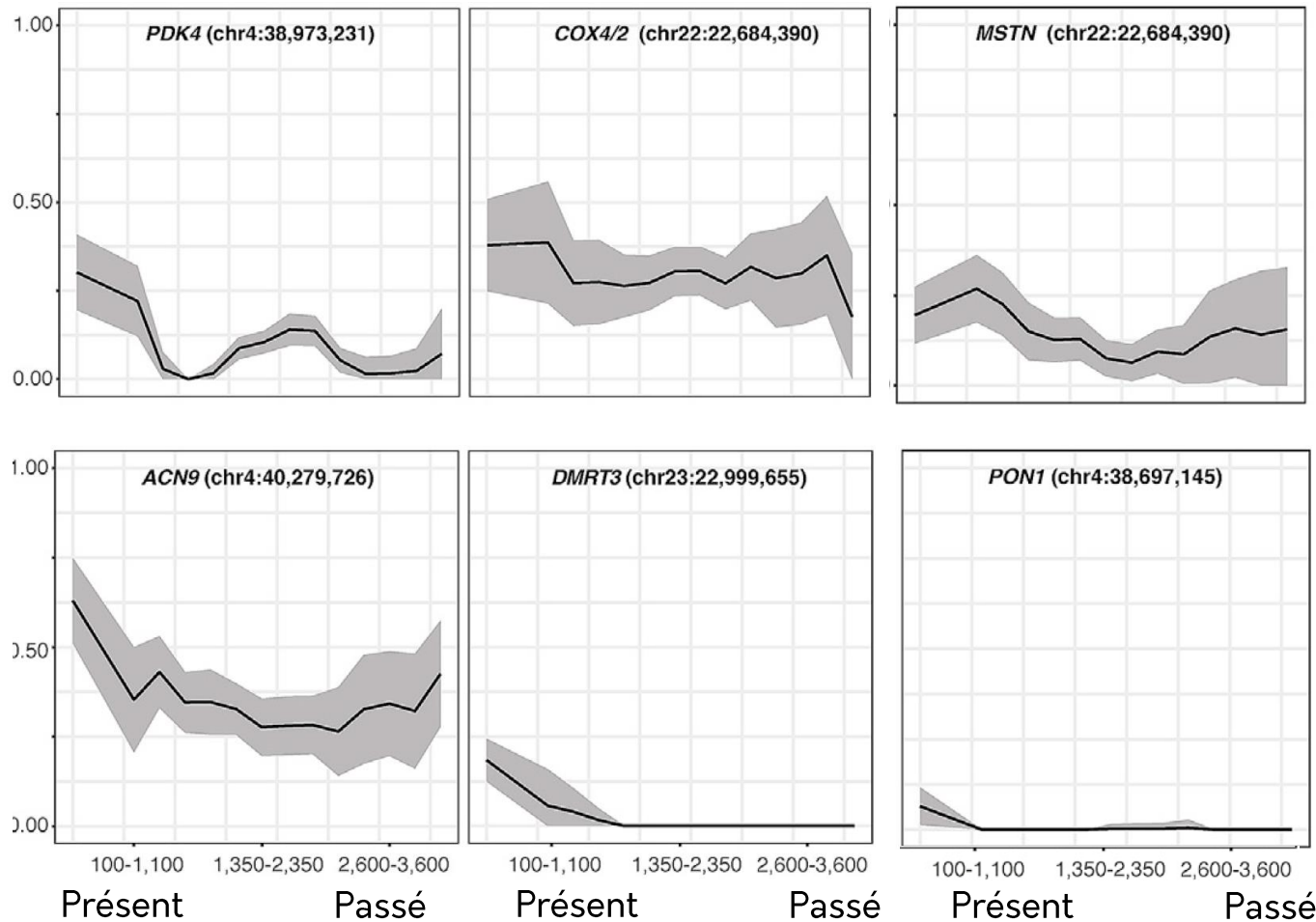


Domestication des chevaux

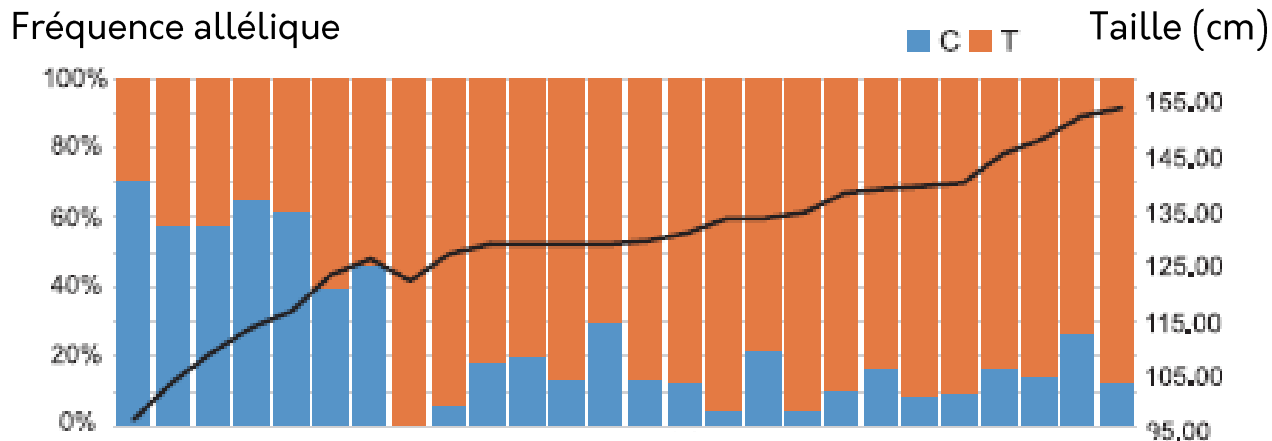
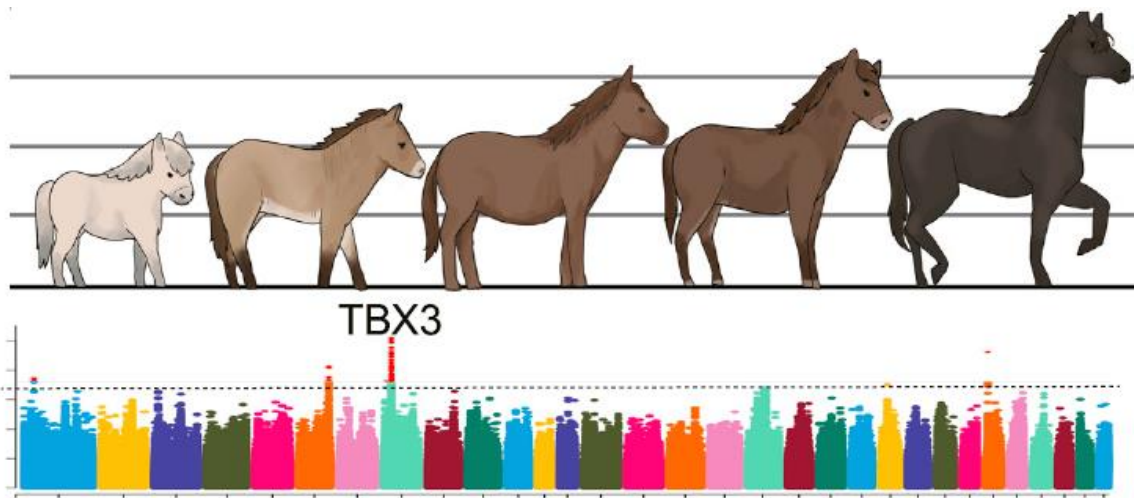


Sélection sur des gènes impliqués dans des maladies du dos, la couleur, la rapidité, le squelette

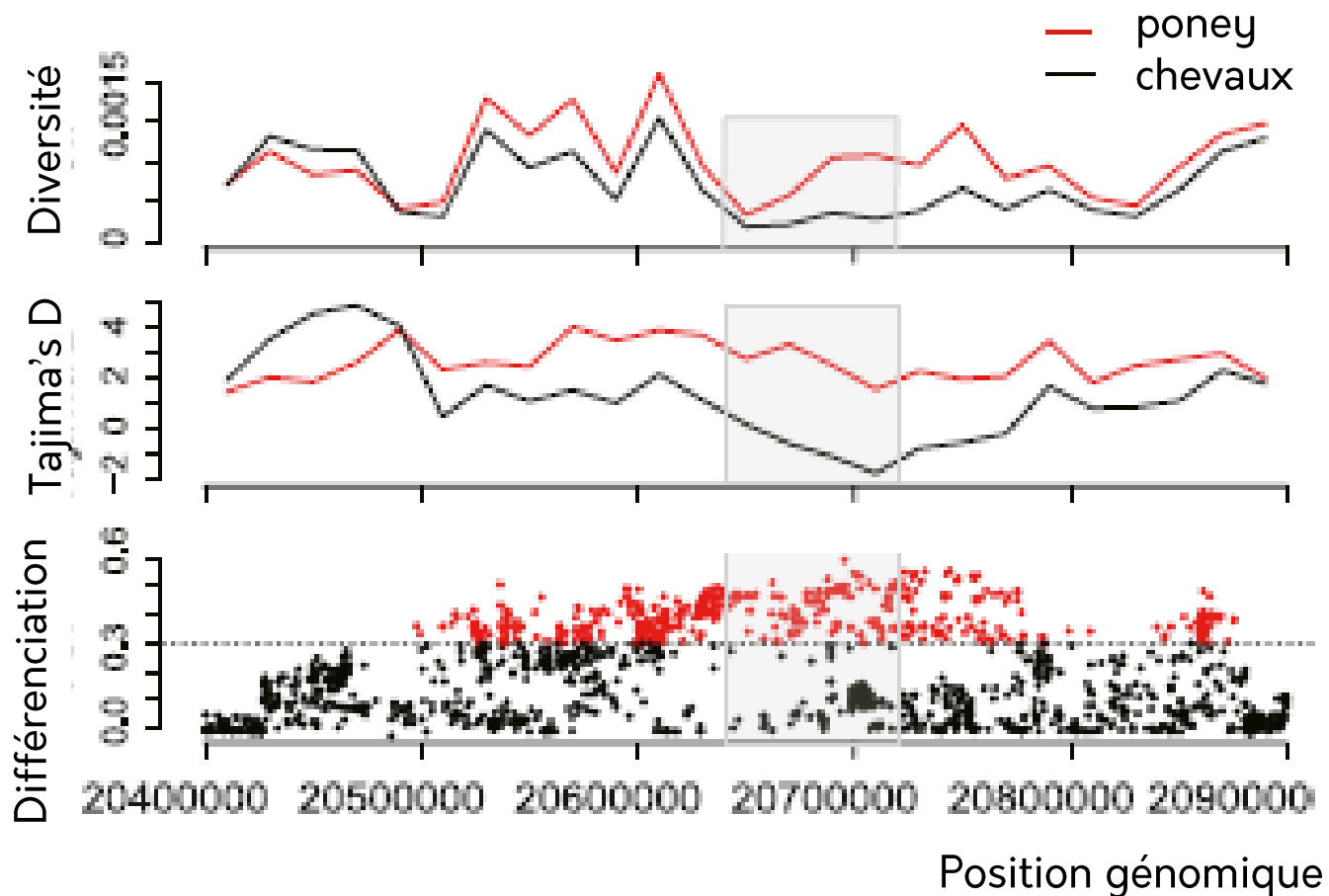
Fréquence allélique



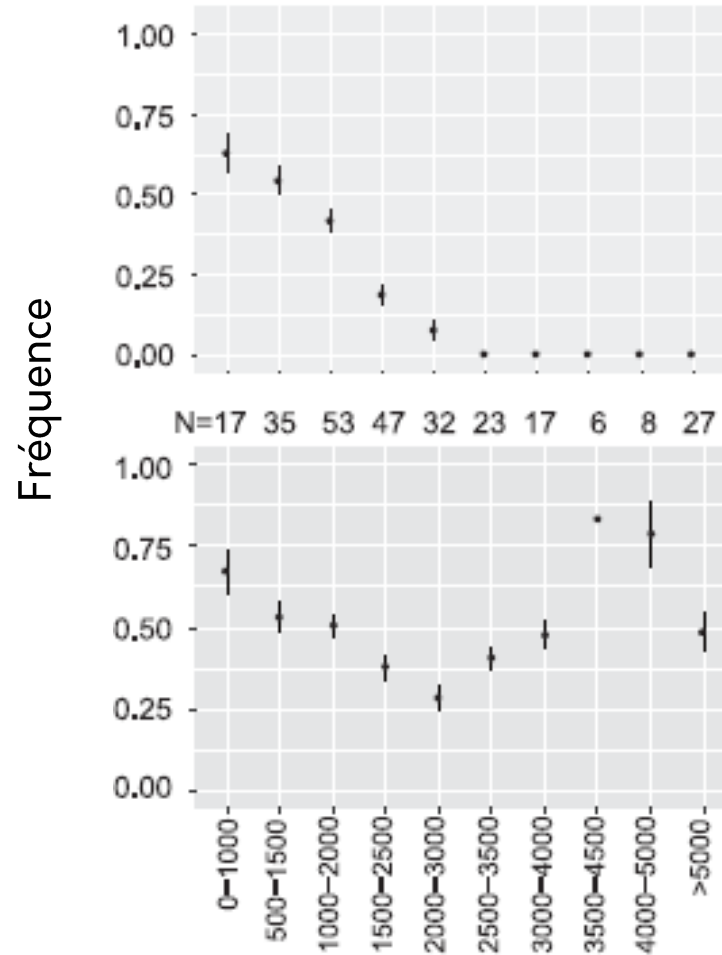
Sélection sur la régulation d'un gène impliqué dans la taille



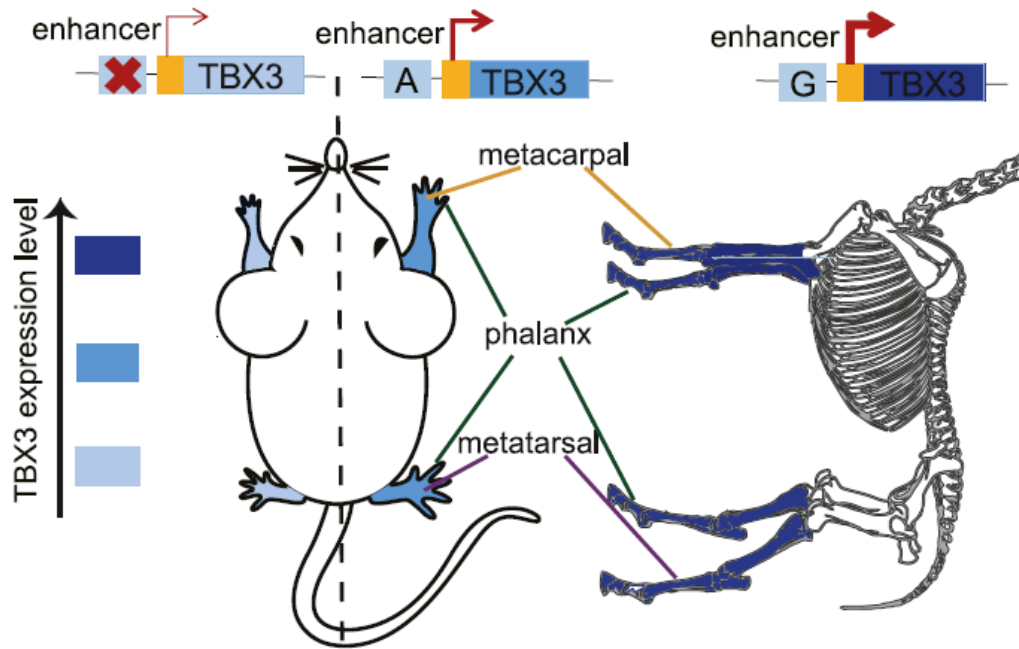
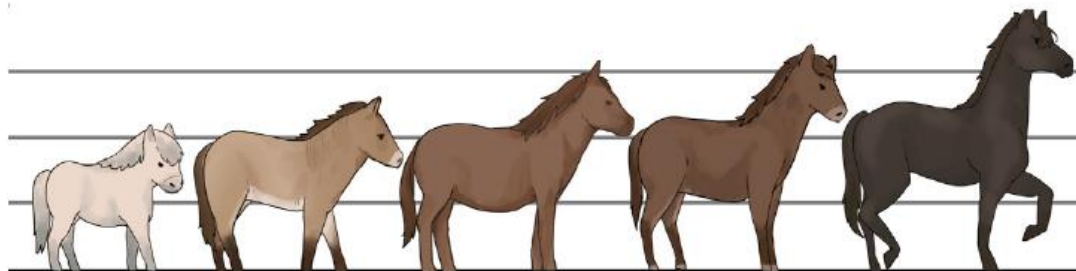
Sélection sur la régulation d'un gène impliqué dans la taille



Sélection sur la régulation d'un gène impliqué dans la taille



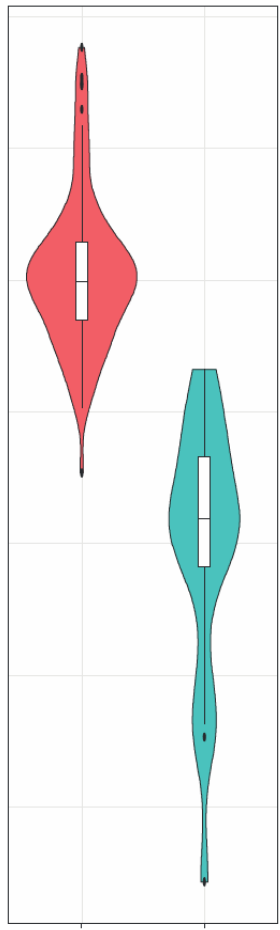
Sélection sur la régulation d'un gène impliqué dans la taille



Dégénérescence due à la domestication

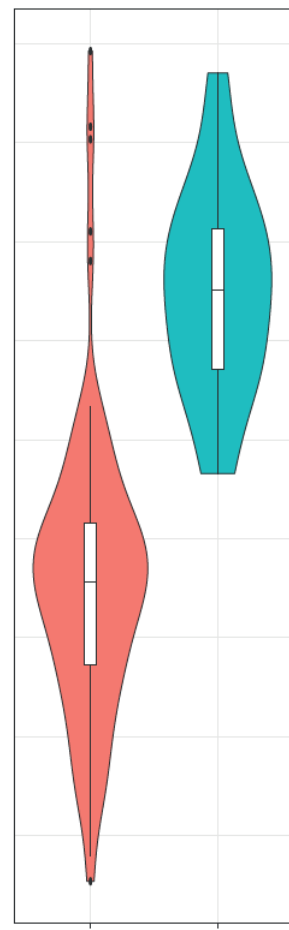
(surtout Y
et récemment)

Diversité génétique



Ancient Actuel

Fardeau génétique

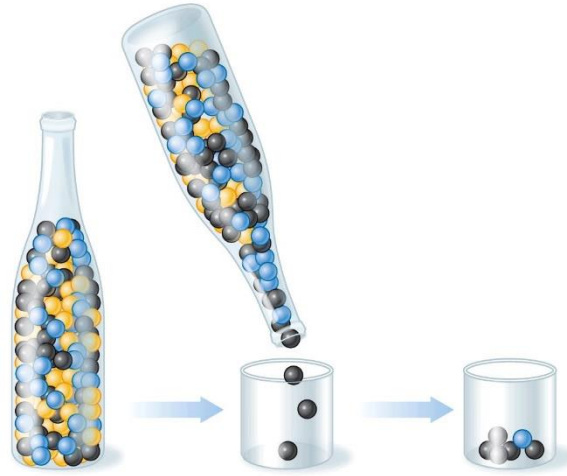


Ancient Actuel



Dégénérescence
due à la
domestication:

Goulets
d'étranglement et
pression de
sélection relâchée



"Evolution" Bergstrom and Dugatkin, WW Norton & Company, Inc.



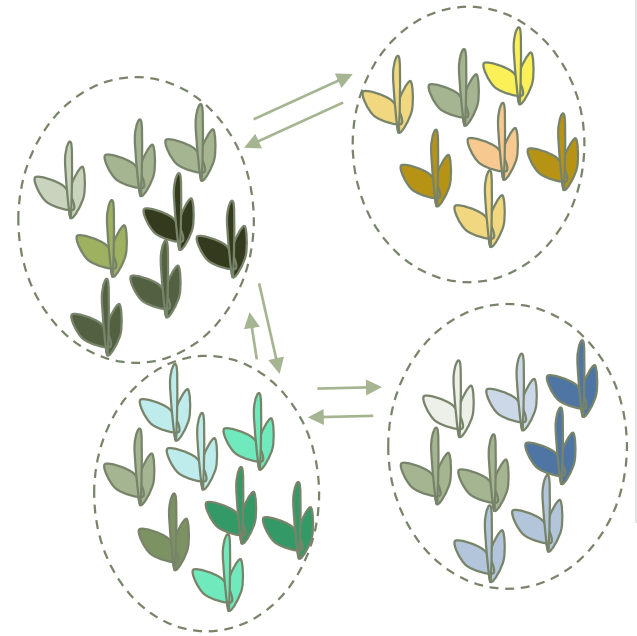
A. D'Hont, CIRAD



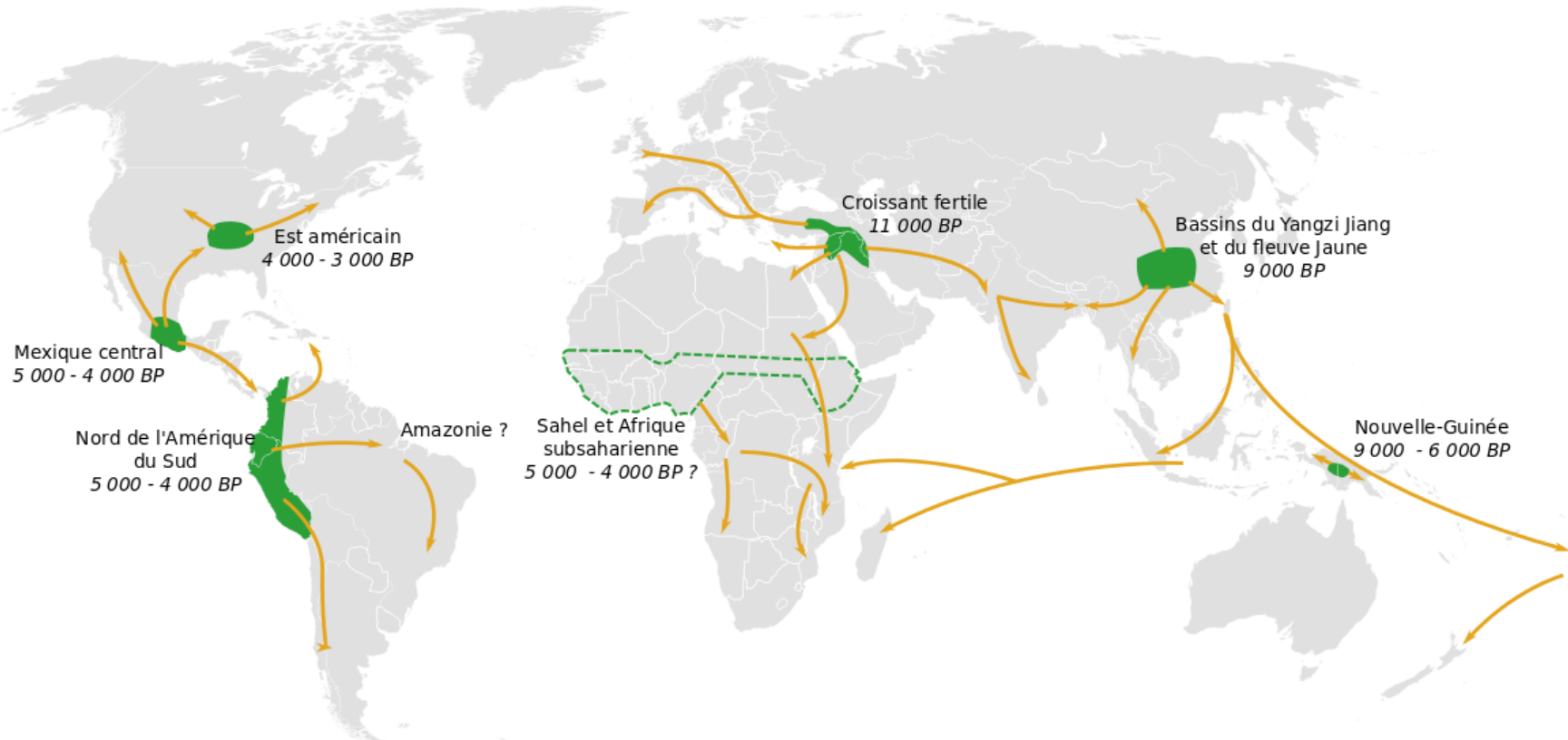
Bruno Le Cam

Nikolai Vavilov 1887-1943

Domestication:
centres d'origine,
importance de la
diversité génétique,
de l'isolement et
des échanges
génétiques



Centres de domestication des plantes: centres de diversité



Chamois rouge

D'après J. Diamond et al. (2003) "Farmers and Their Languages: The First Expansions", Science

La domestication comme modèle d'évolution

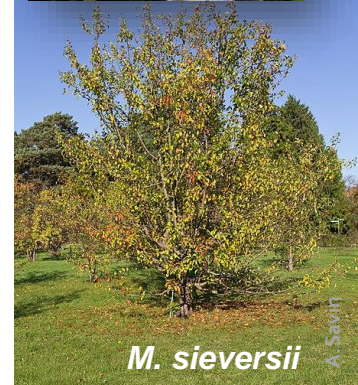
- L'adaptation et la domestication
- Les pommiers
- Les champignons du fromage



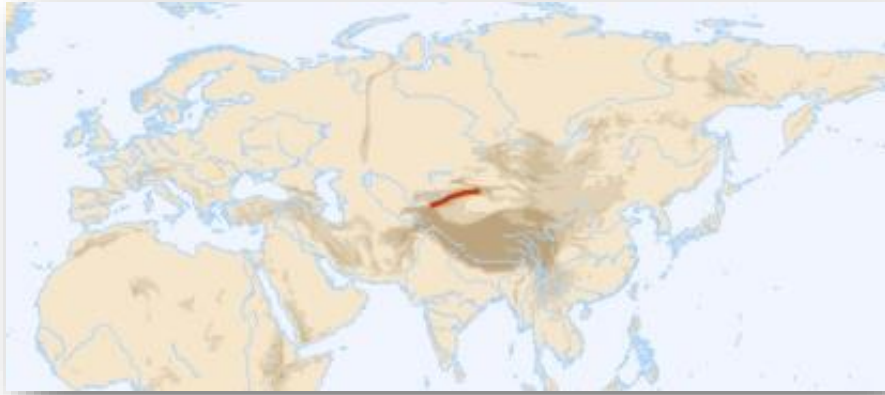
Domestication des pommiers



Le genre *Malus*: Cinq espèces?



Malus sieversii dans le Tien Shan : ancêtre du pommier cultivé?



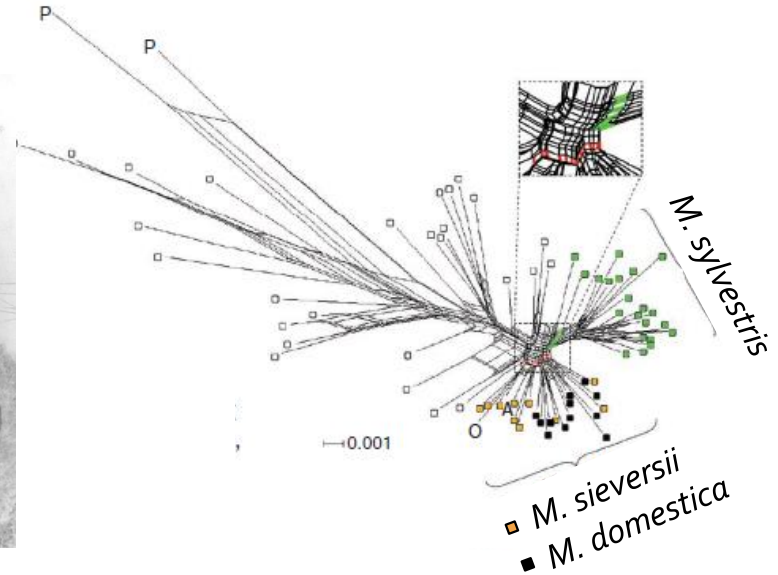
M. sieversii



M. domestica



Christophe Lemaire



Malus sieversii dans le Tien Shan : ancêtre du pommier cultivé?



Christophe Lemaire



Carol Vinzant



T. Oly / Wikimedia



M. sylvestris

Sten Forse



M. orientalis

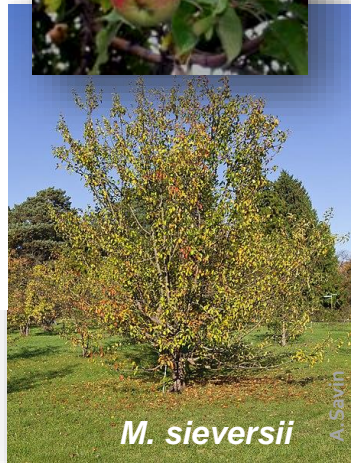
Maia Akhalkatsi



A. Cornille et H. Fourey



M. domestica

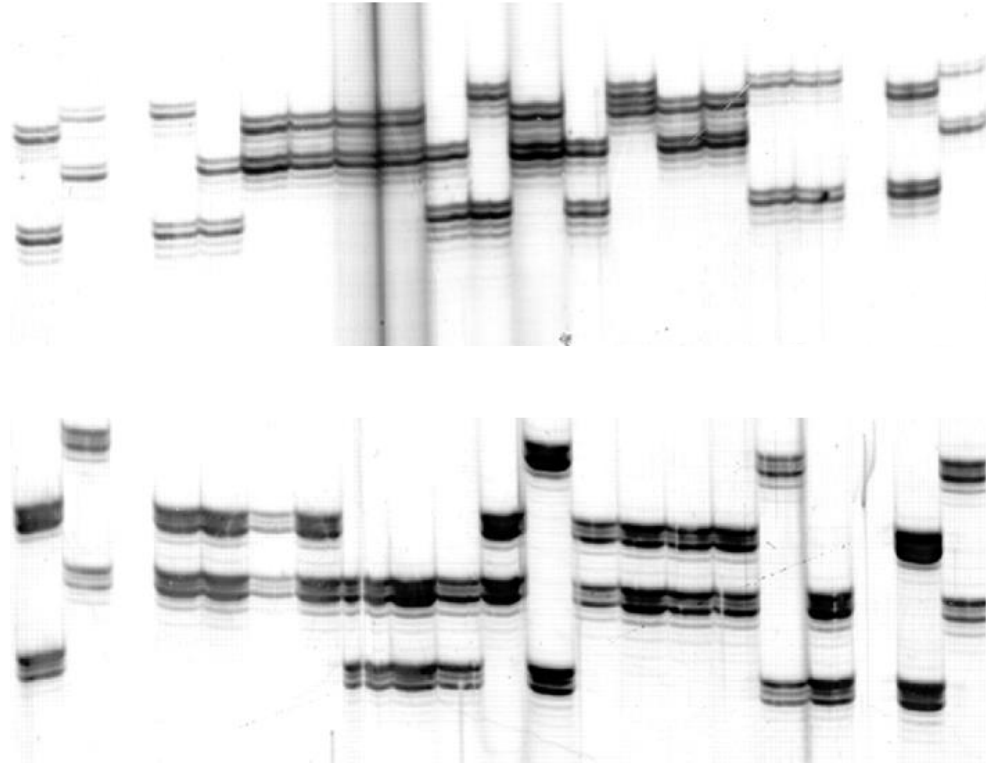


M. sieversii

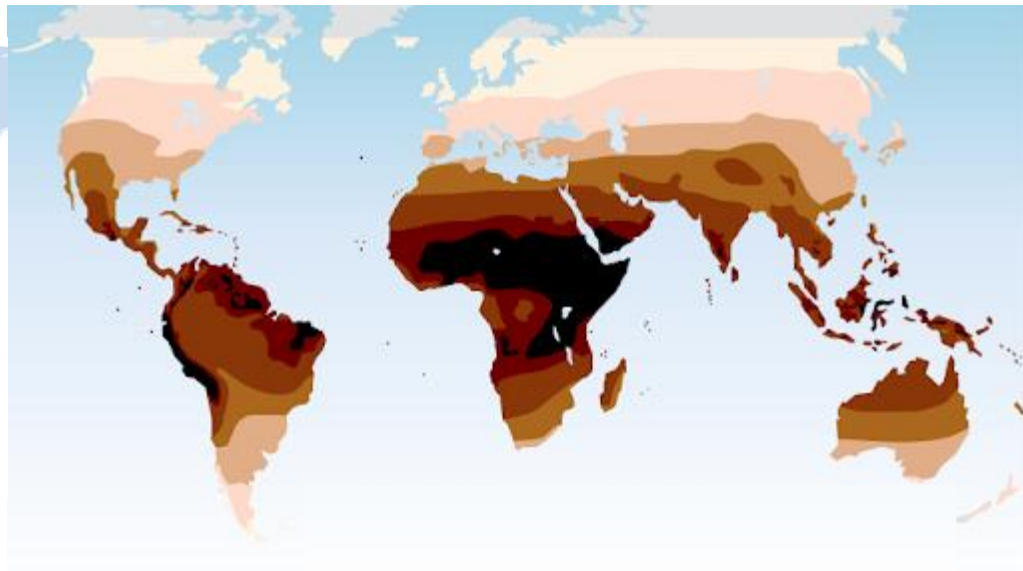
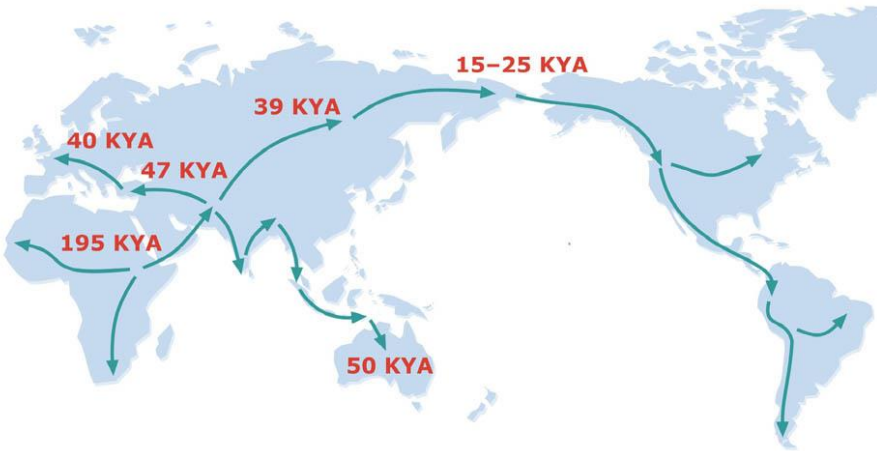
A. Savin

Etude de
génétique des
populations
26 marqueurs
microsatellites

TGTGTGTGTGTGTGTGTG



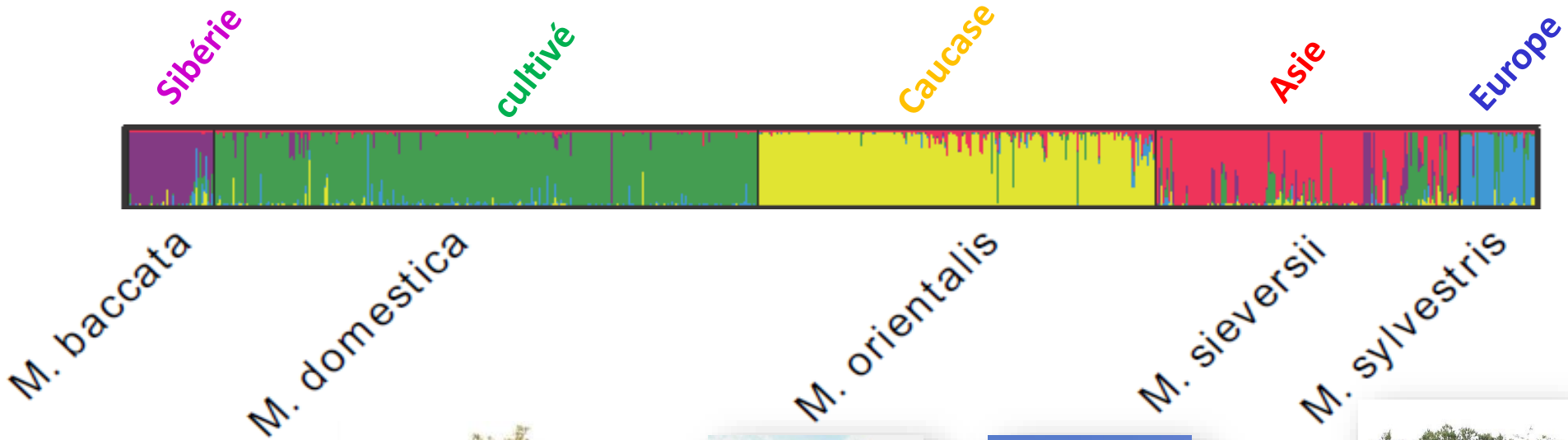
Marqueurs neutres: permettent de reconstruire l'histoire des populations (pas de la sélection)



Différenciation génétique entre les cinq espèces de *Malus*

Pas de fort goulet d'étranglement

Cornille et al. *PLoS Genetics* (2012)



M. baccata

M. domestica

M. orientalis

M. sieversii

M. sylvestris



Contribution secondaire du pommier sauvage européen *M. sylvestris* au pommier cultivé *M. domestica*

cultivé



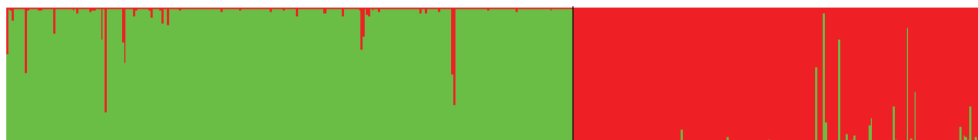
M. domestica



Espèces de *Malus* sauvages

Caucase

M. domestica
/M. orientalis



Asie

M. domestica
/M. sieversii



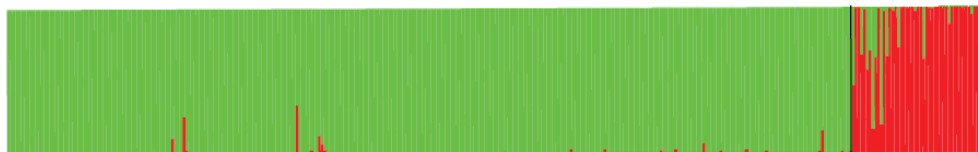
Europe

M. domestica
/M. sylvestris



Siberie

M. domestica
/M. baccata



Contribution
secondaire du
pommier sauvage
européen
M. sylvestris au
pommier cultivé
M. domestica



100 000 ans

15 000 ans

10 000 ans

1500 ans

Présent

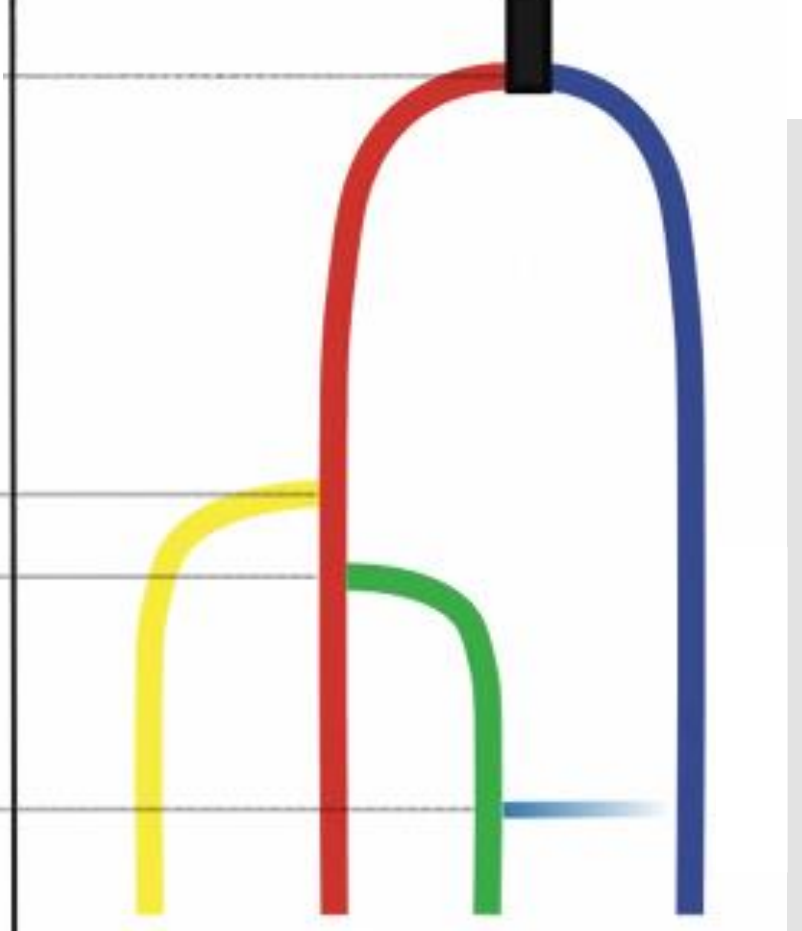
M. orientalis
Caucase

M. sieversii
Asie

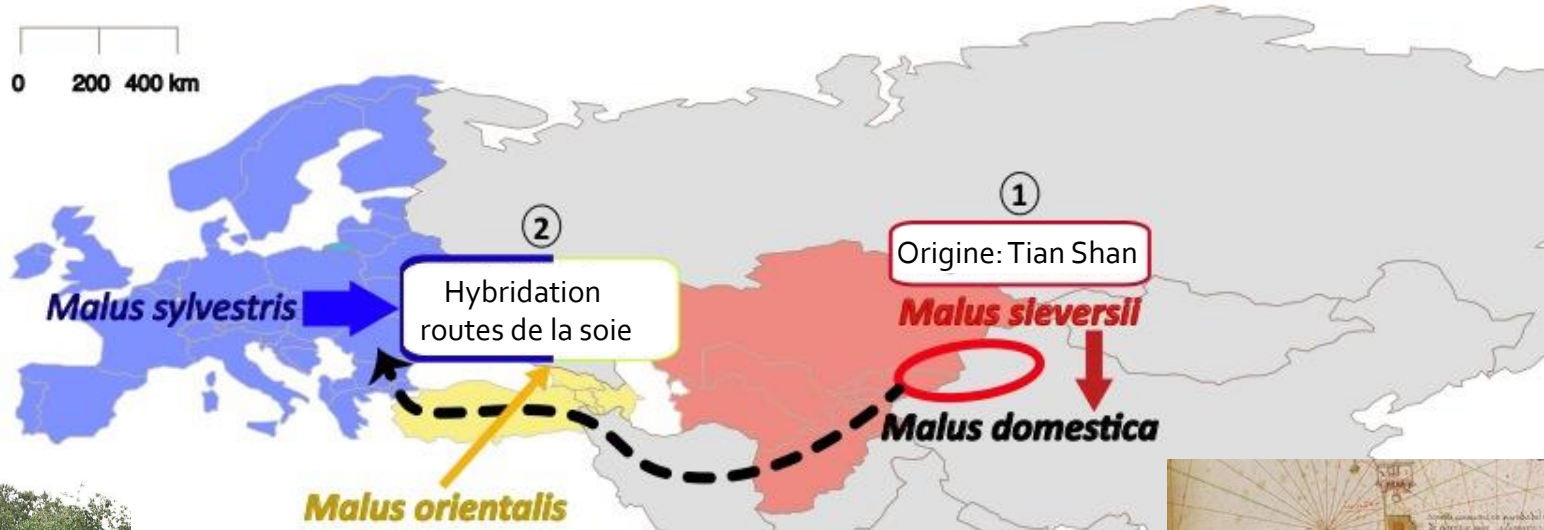
M. domestica
cultivé

M. sylvestris
Europe

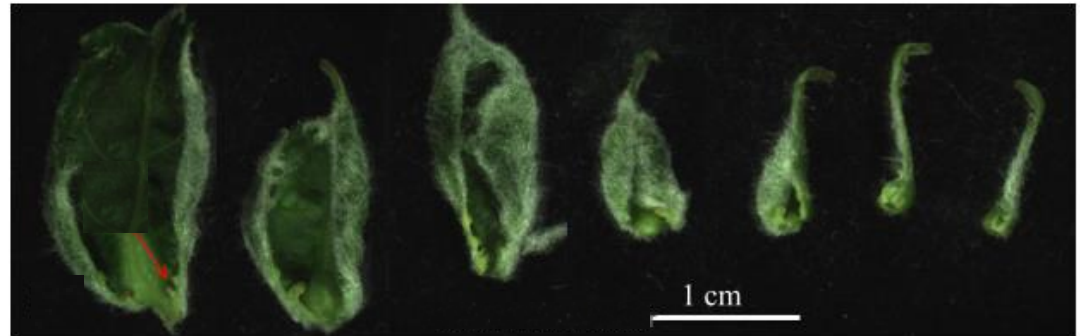
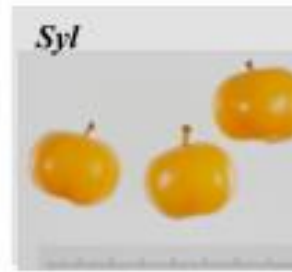
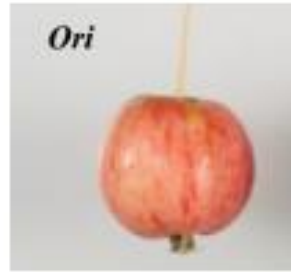
Cornille et al *PLoS Genetics* (2012)



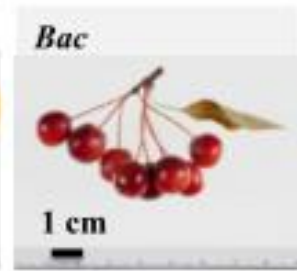
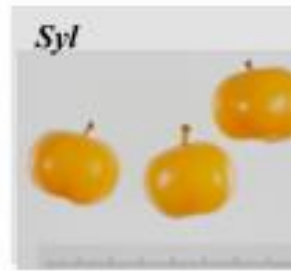
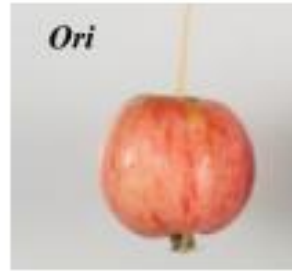
Contribution secondaire du pommier sauvage européen *M. sylvestris* au pommier cultivé *M. domestica*



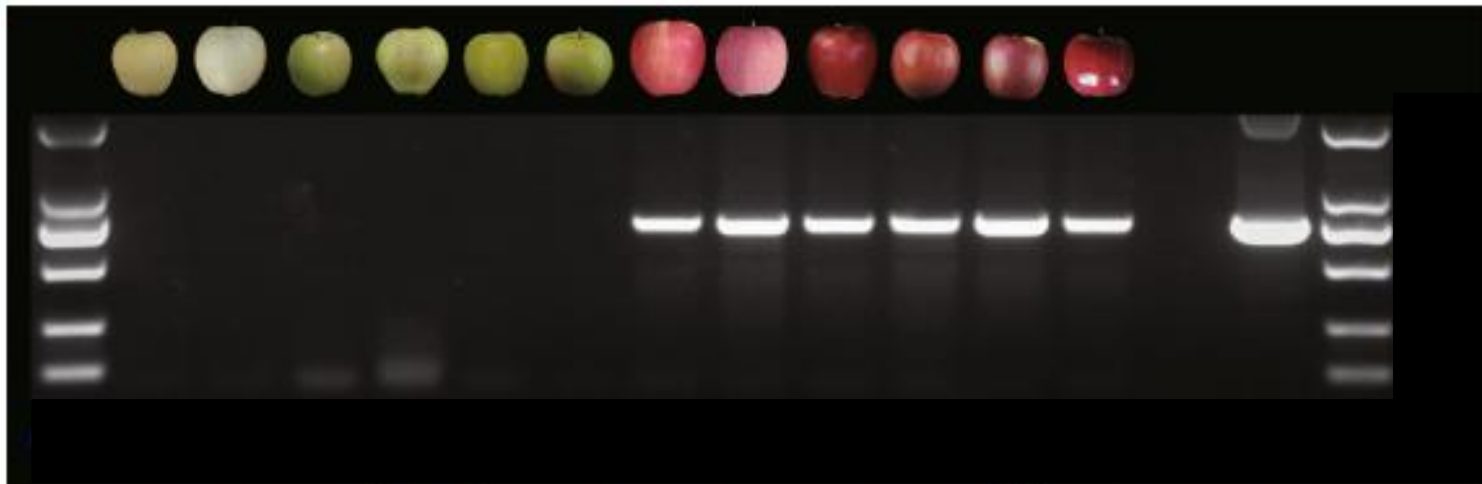
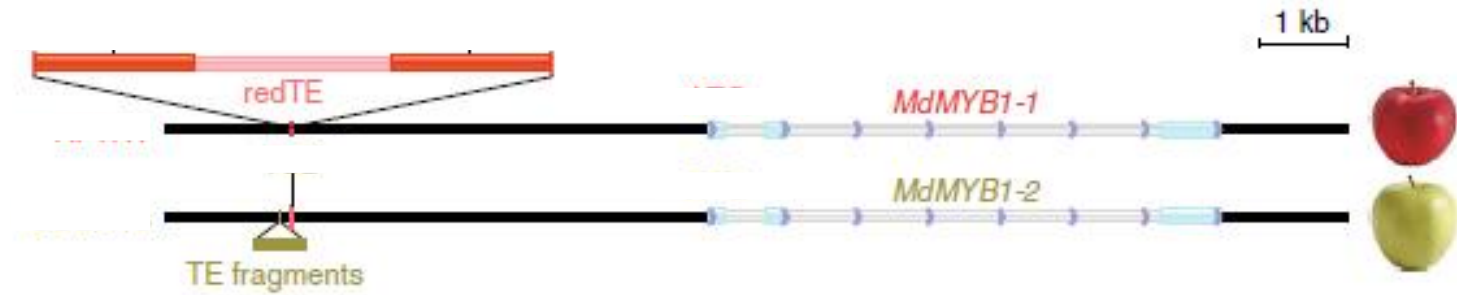
Evolution d'une taille de pommes plus grande: Rôle d'un "gene sauteur" dans une region régulatrice



Evolution d'une taille de pommes plus grande: Déjà présent dans le pommier asiatique



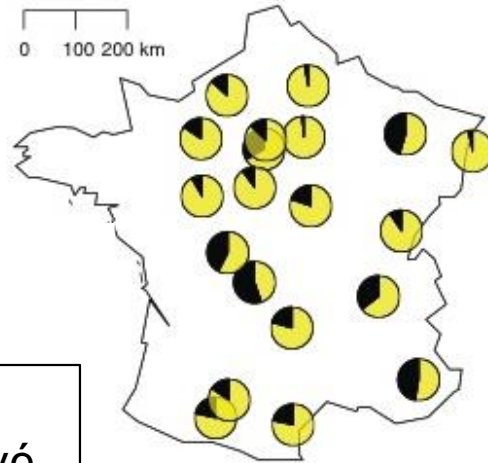
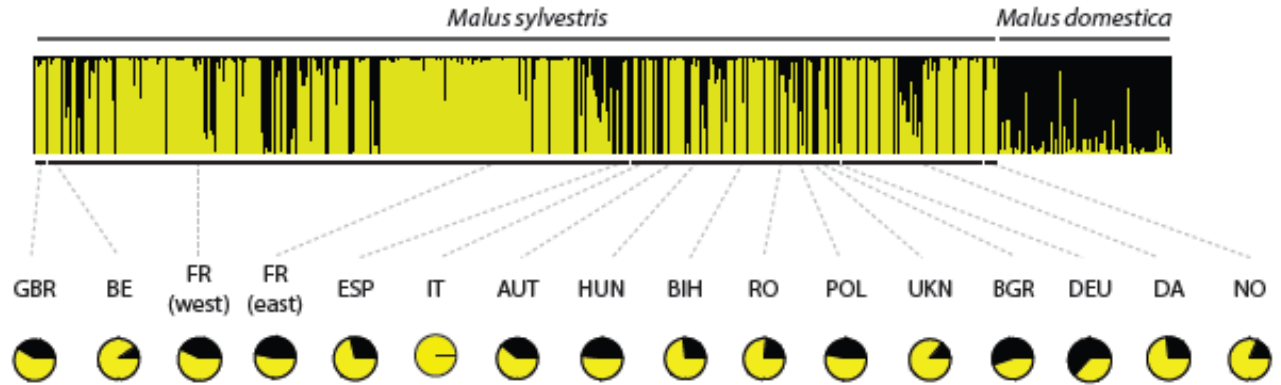
Couleur rouge aussi due à l'insertion d'un "gène sauteur"



Flux de gènes des
pommiers cultivés
vers les pommiers
sauvages européens



Flux de gènes des pommiers cultivés vers les pommiers sauvages européens

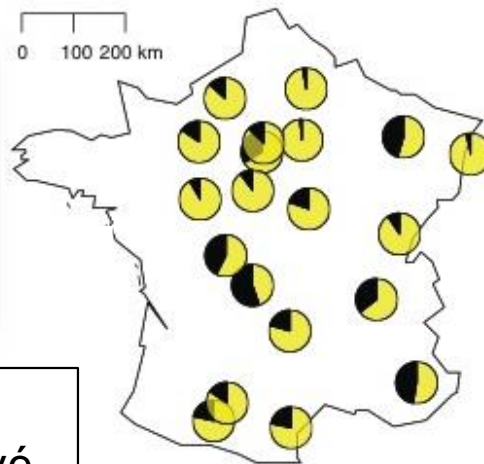
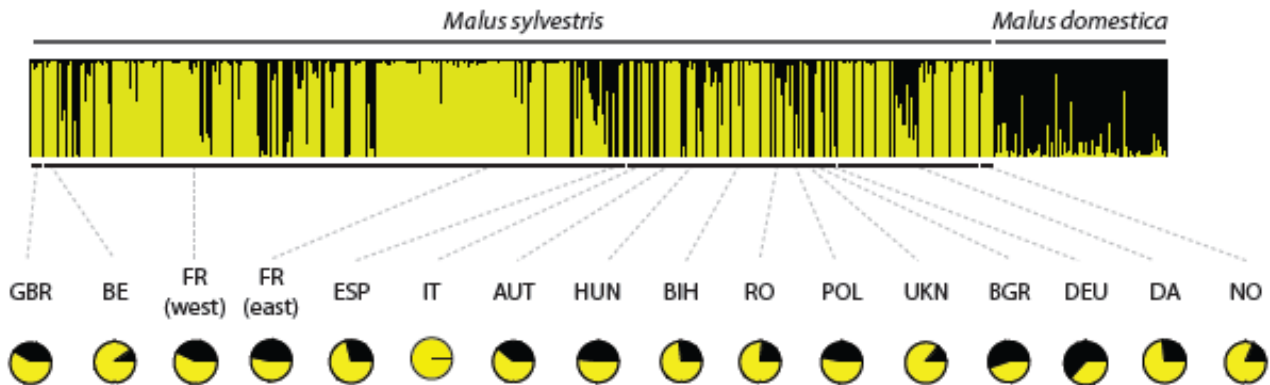


sauvage cultivé



Flux de gènes des pommiers cultivés vers les pommiers sauvages européens

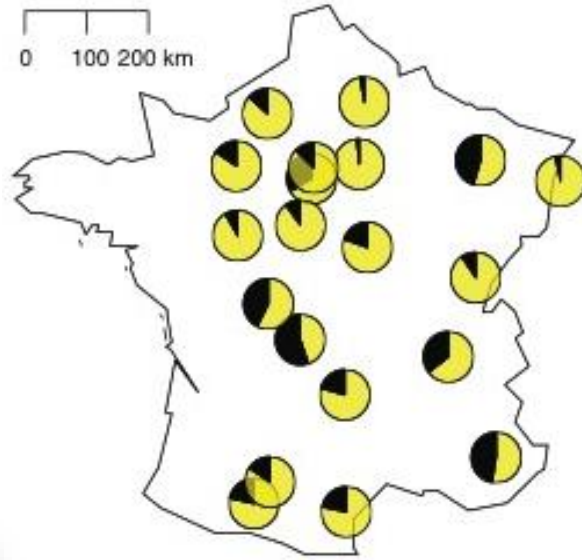
Graines vendues hybrides



sauvage  cultivé



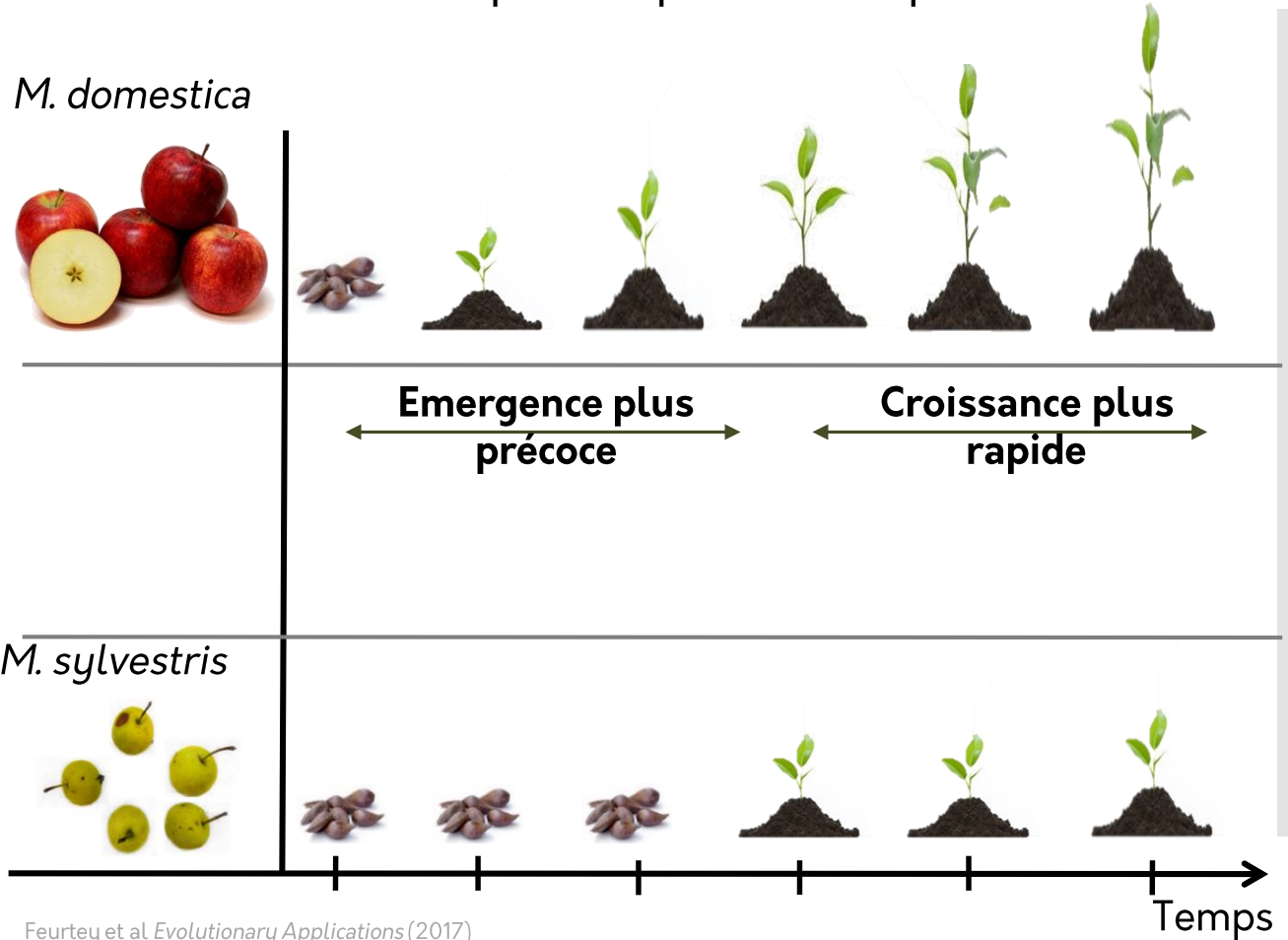
Les facteurs anthropogéniques influencent les introgressions du pommier cultivé vers le pommier sauvage en France



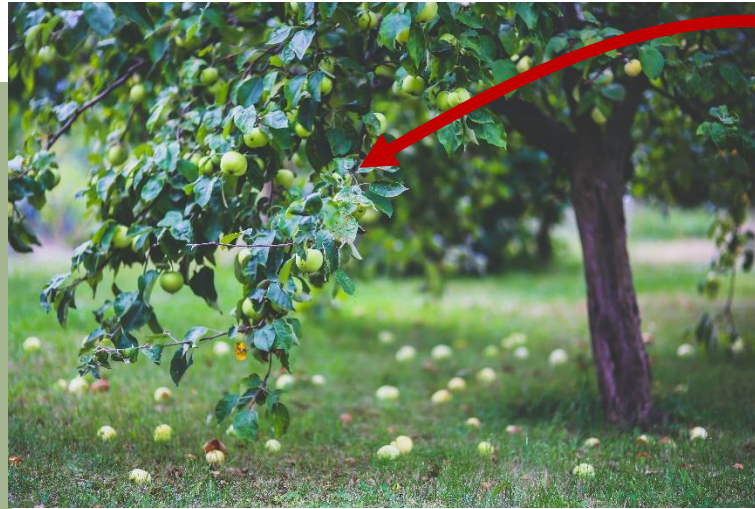
M. domestica et hybrides plus compétitifs: aggrave les flux de gènes



M. domestica pousse plus vite et plus tôt



Introgression de gènes de résistance depuis d'autres espèces sauvages...



Malus domestica



Malus floribunda



Venturia inaequalis

Le Van et al *New Phytol* (2012)

Leroy et al *New Phytol* (2016)

Feurtey et al *Molecular Ecology* (2020)

Lemaire et al *New Phytol* (2016)

Introgression de gènes de résistance depuis d'autres espèces sauvages...

...contournées par une introgression de gènes de virulence depuis le pathogène sauvage



Malus domestica



Malus floribunda



Venturia inaequalis

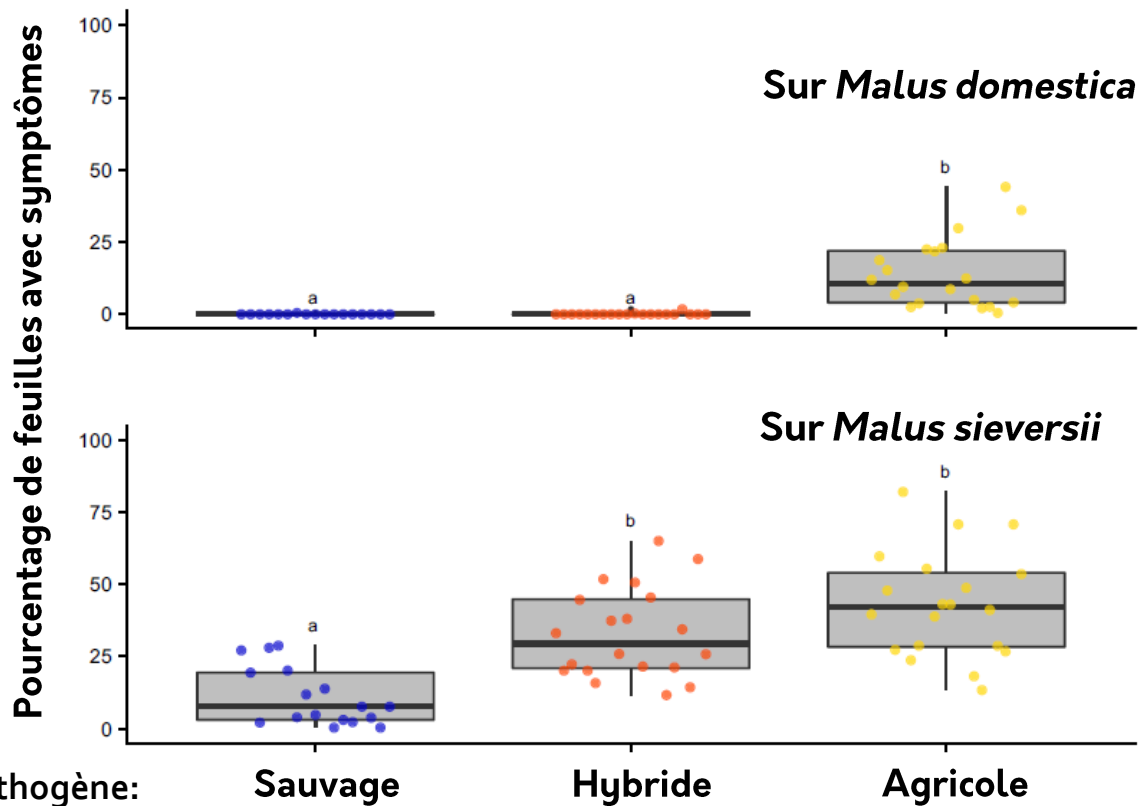
Le Van et al *New Phytol* (2012)

Feurtey et al *Molecular Ecology* (2020)

Leroy et al *New Phytol* (2016)

Lemaire et al *New Phytol* (2016)

Pathogènes « pestifiés »



Feurtey et al *Molecular Ecology* (2020)



Shuhrataxmedov

Menaces sur les
pommiers sauvages
asiatiques:

Déforestation

Flux de gènes du
pommier cultivé

Pathogènes pestifiés



Christophe Lemaire

Le Van et al *New Phytol* (2012)

Leroy et al *New Phytol* (2016)

Lemaire et al *New Phytol* (2016)

Feurtey et al *Molecular Ecology* (2020)



**Histoire complexe de la domestication du pommier,
avec une contribution de plusieurs espèces sauvages**

**Pathogènes « pestifiés »
menaçant les populations sauvages**

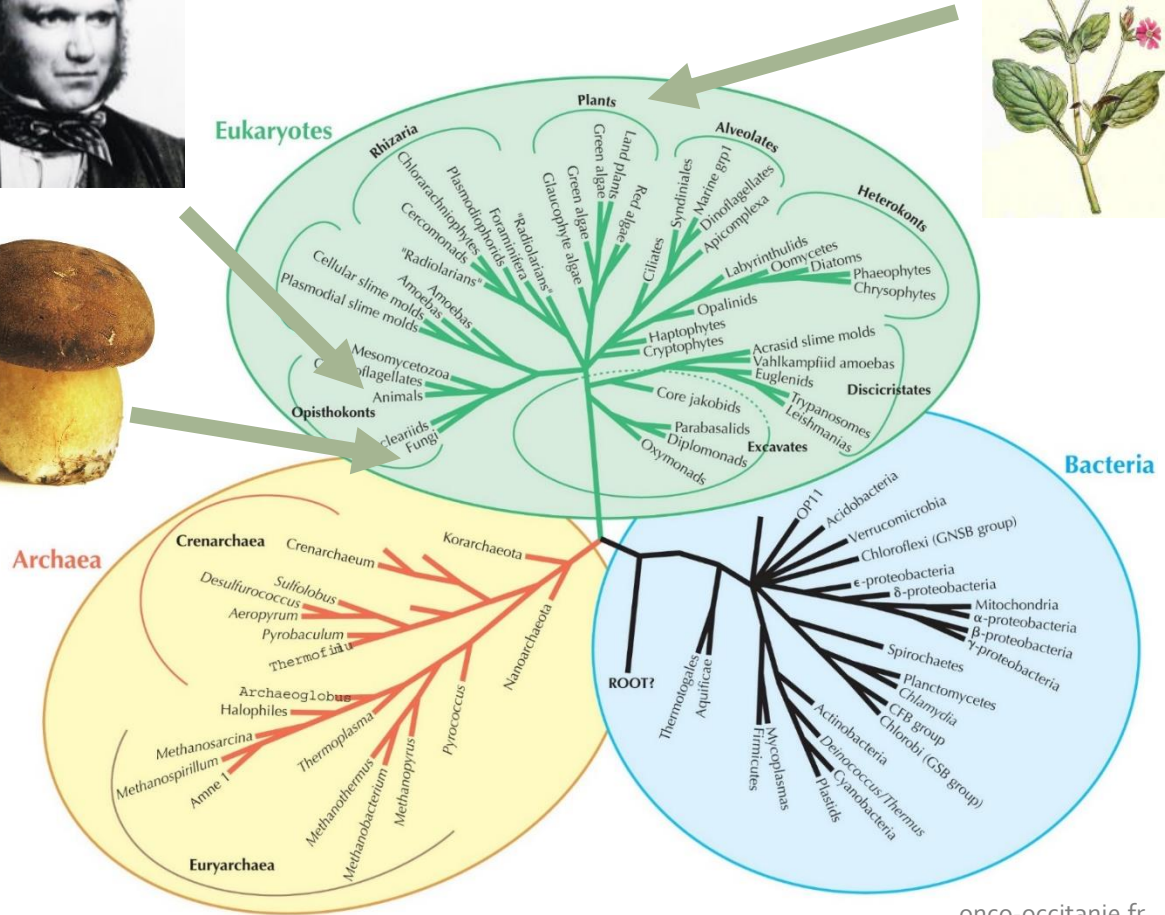
La domestication comme modèle d'évolution

- L'adaptation et la domestication
- Les pommiers
- Les champignons du fromage





Nous sommes tous des opisthokontes



Les champignons domestiqués,
de bons modèles :

- petits génomes

- expériences
faciles

- lignée très proche
des animaux



Saccharomyces cerevisiae

*Penicillium
nalgiovense*

*Penicillium
roqueforti*



Agaricus bisporus

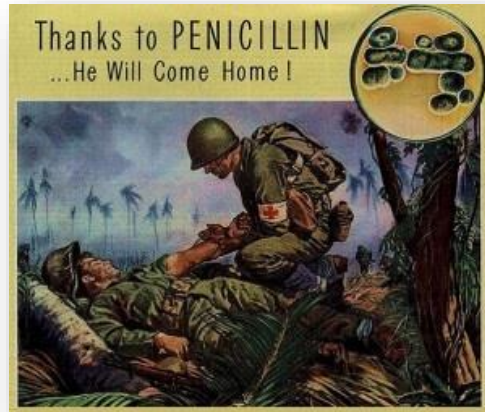
Aspergillus oryzae
koji

Rhizopus oligosporus
Tempeh

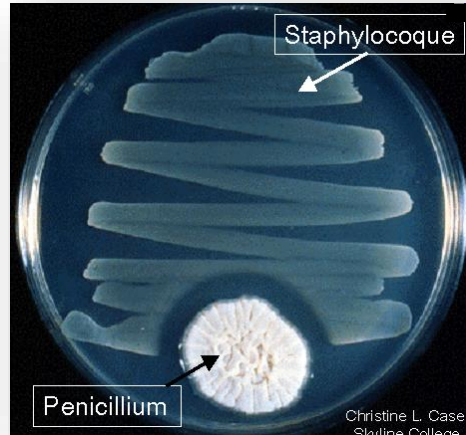
Les champignons domestiqués, de bons modèles :

- petits génomes
- manipulations faciles
- lignée très proche des animaux

Antibiotiques

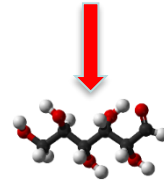
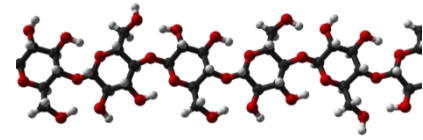


Penicillium rubens



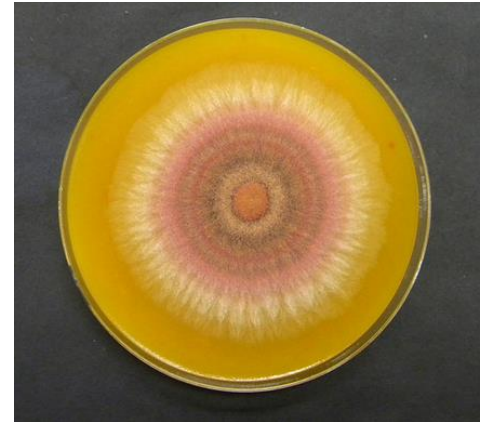
Christine L. Case
Skyline College

Cellulose en glucose

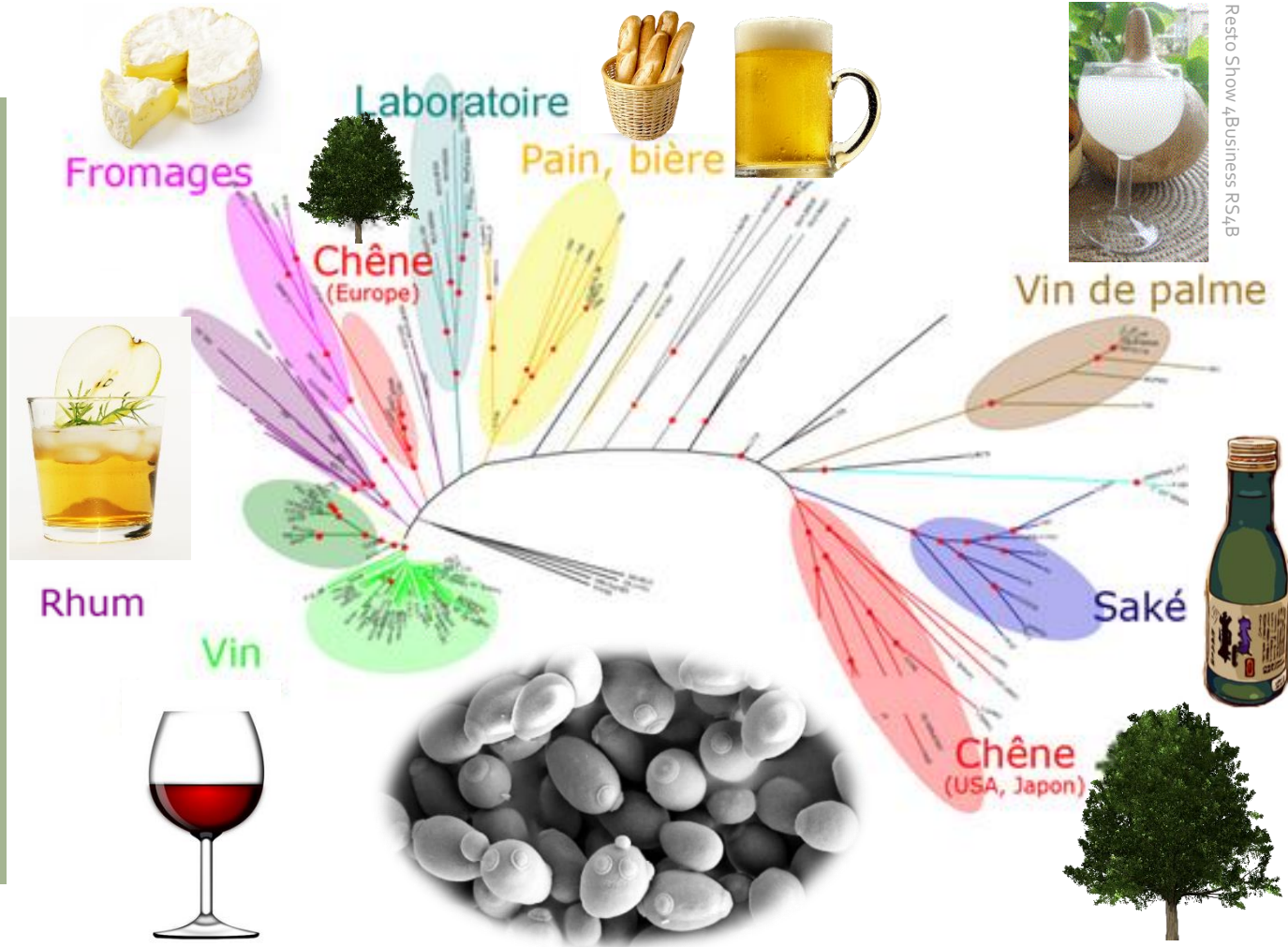


Trichoderma reesei

Pigments

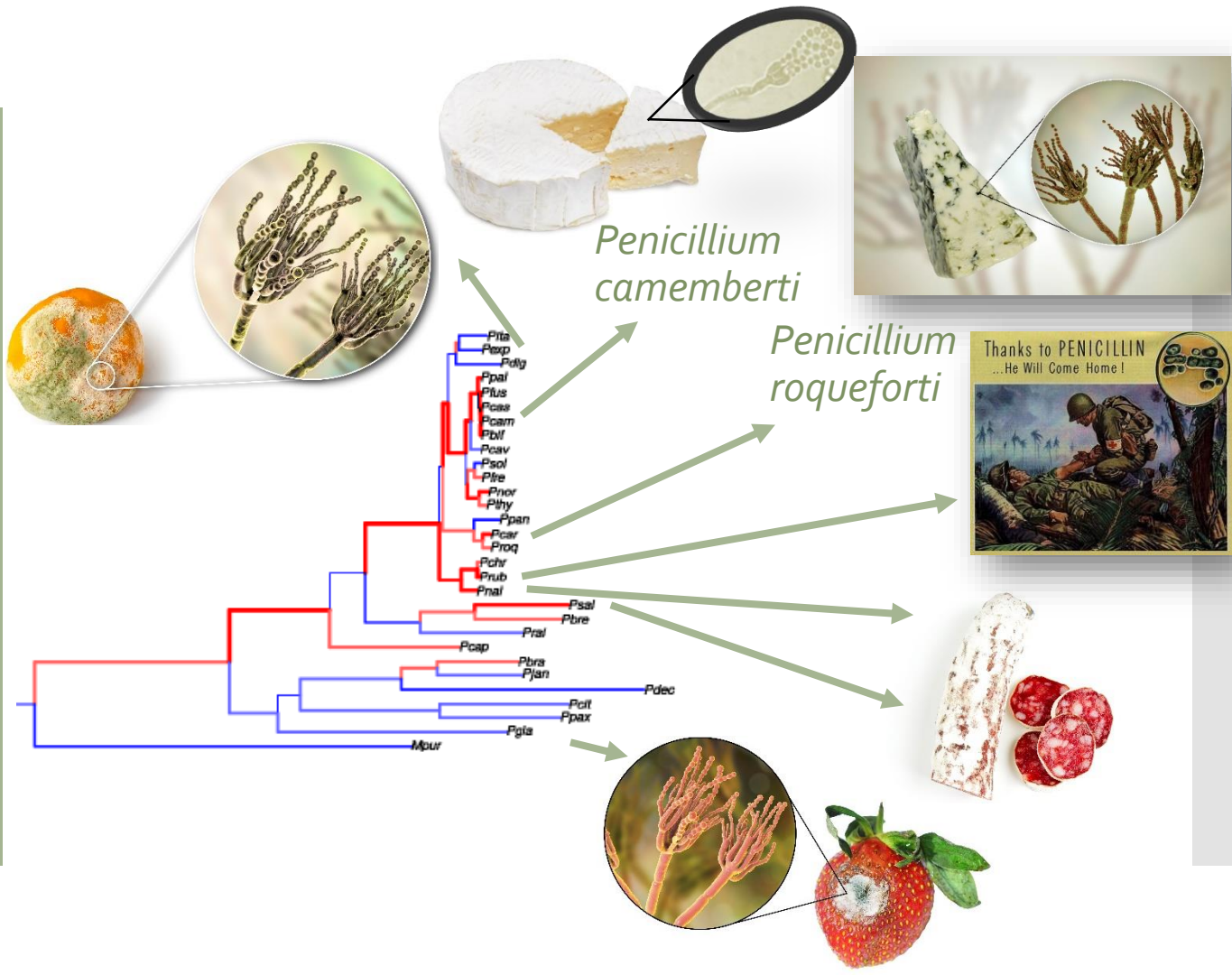


Domestication de la levure *Saccharomyces cerevisiae*

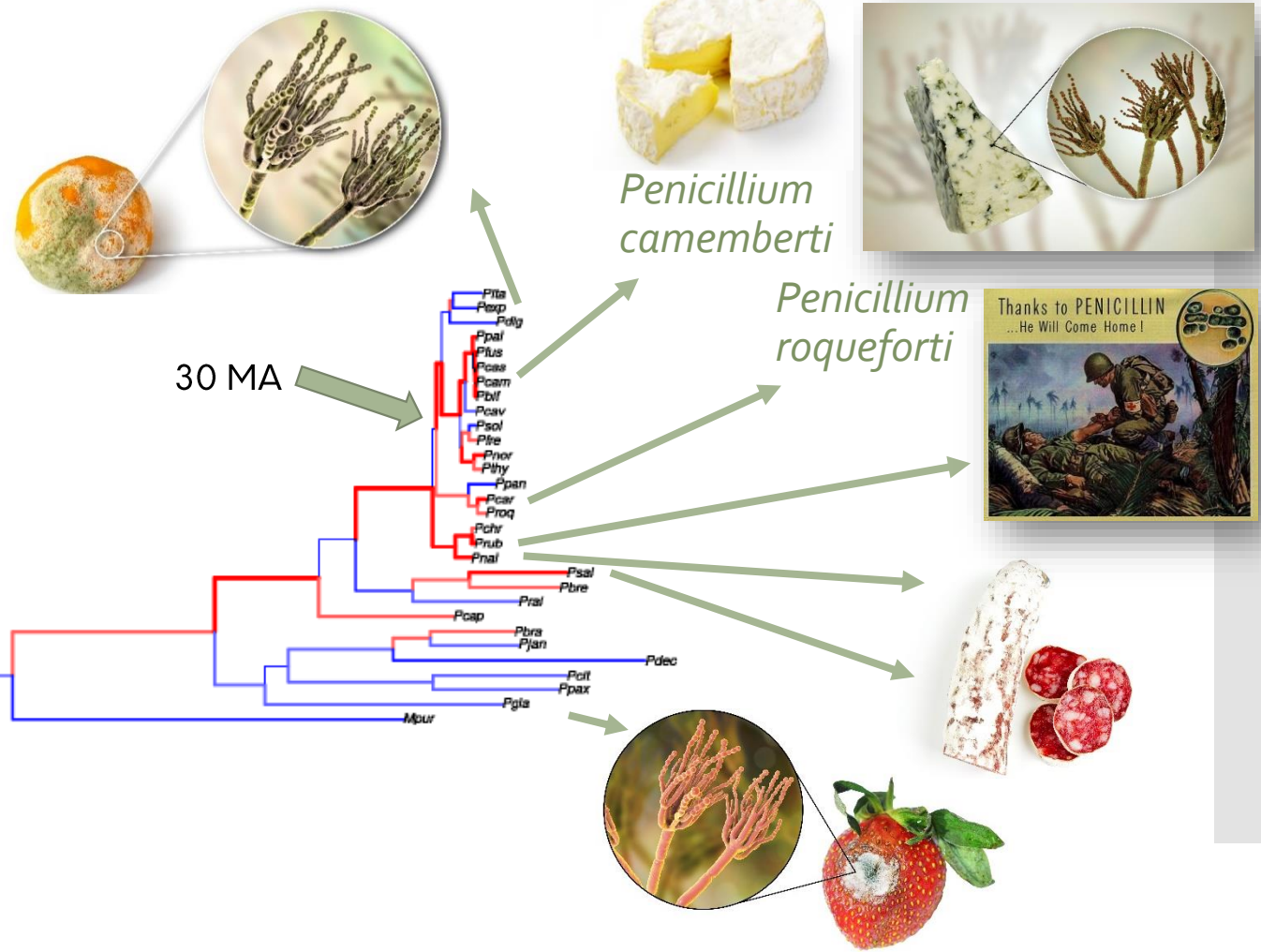


Les champignons
du fromage :

adaptation
parallèle au
même milieu



Les champignons du fromage :
 divergence
 30 millions années,
 comme hom-
 singe araignée



Caractères sous
sélection?

Mécanismes
d'adaptation
rapide?


Dégénérescence?



T. Fortuna



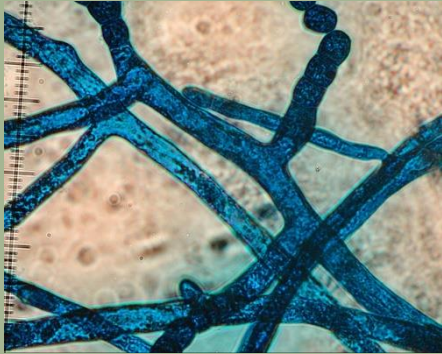
LIP

- Couleur?
- Aromes et goût?
- Métabolisme des sucres et lipides?
- Toxines? 
- Exclusion des contaminants?
- Tolérance au sel?

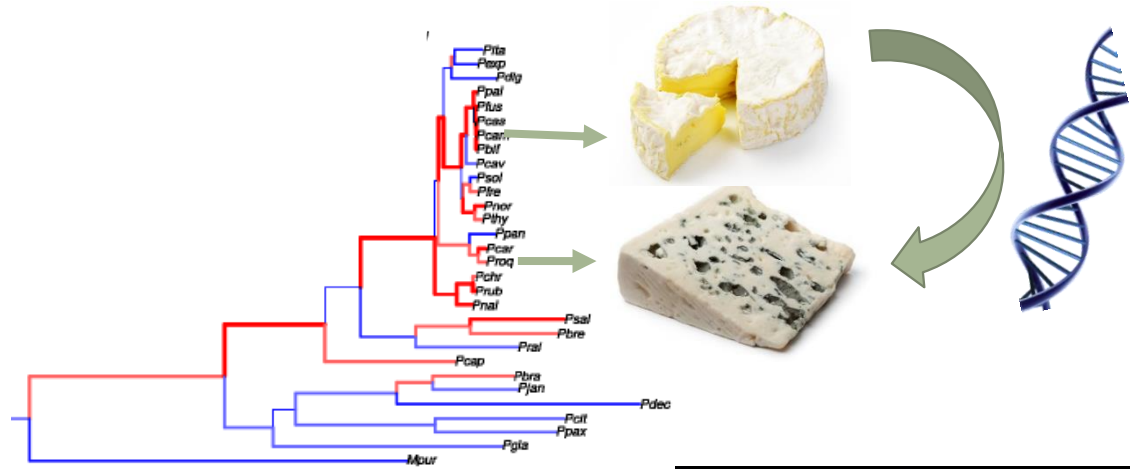


Bodinakua et al 2019 mBio

Adaptation rapide par des transferts horizontaux de gènes

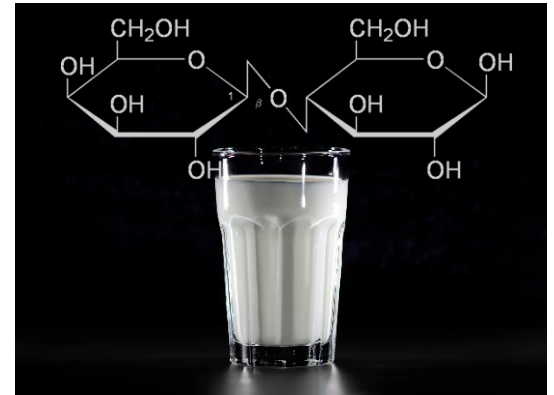


Juan Carlos Fonseca Mata



Bodinakua et al 2019 mBio

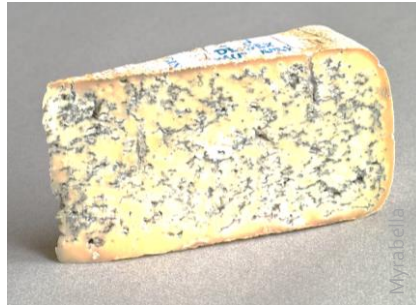
Gènes compétition



Gènes du métabolisme du
lactose et du galactose

Ropars et al (2015) Curr. Biol.
Cheeseman et al (2014) Nature Comm.

Tous les fromages bleus sont affinés avec *Penicillium roqueforti*

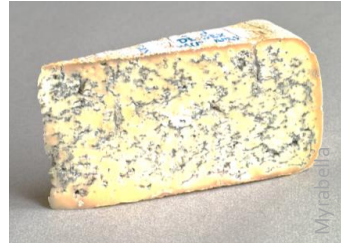


Roquefort, Bleu de Gex, Stilton, Gorgonzola, Danablu, Fourme d'Ambert, Bleu des Causses, ...

Penicillium roqueforti
se trouve aussi
dans d'autres
environnements

Populations
férales?

Populations
sauvages?



Fromages



Contaminant alimentaire

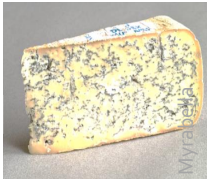
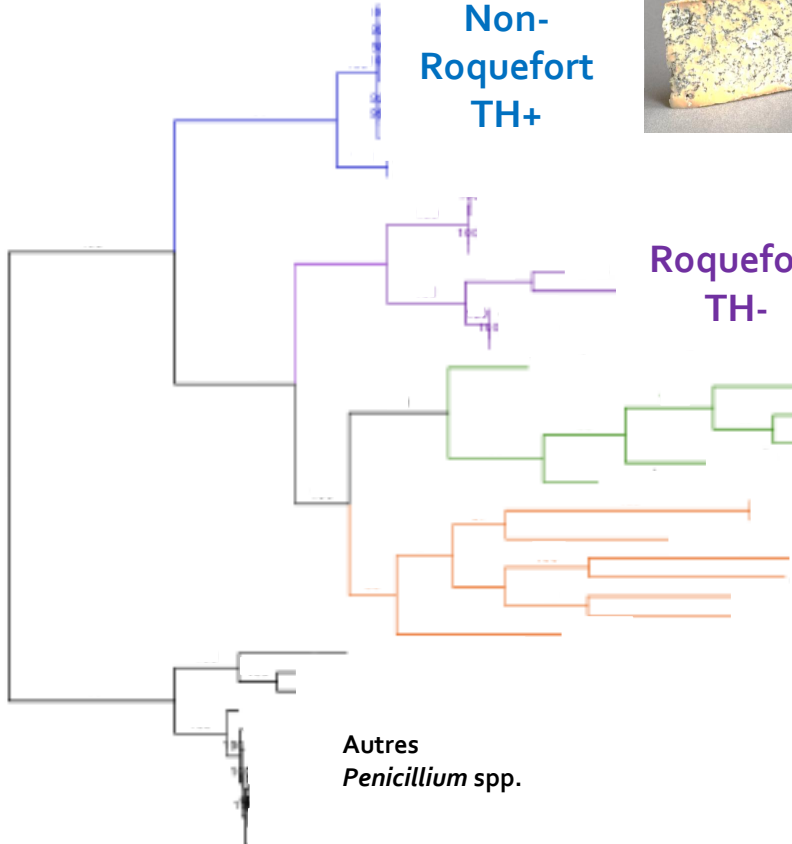


Ensilage,
bois

T. Fortuna



Deux populations fromages
Pas de population férale ni sauvage



T. Fortuna

Domestication de *Penicillium roqueforti*



Deux événements de domestication

Goulet d'étranglement

Transfert de gènes horizontal

Goulet d'étranglement

Aucune diversité dans la lignée non-Roquefort



Roquefort Ensilage (AOP)



T. Fortuna

Contaminant alimentaire



Non-Roquefort



Coyau



Dumas et al. (2020) Mol Ecol

Ropars et al. (2020) CRAS

Domestication de *Penicillium roqueforti*



Evolution des caractères pour faire du meilleur fromage?



Roquefort (AOP)



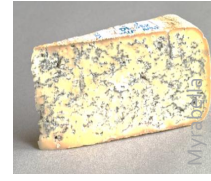
Ensilage



Contaminant alimentaire



Non-Roquefort



Coyau

Dumas et al. (2020) Mol Ecol

Ropars et al. (2020) CRAS

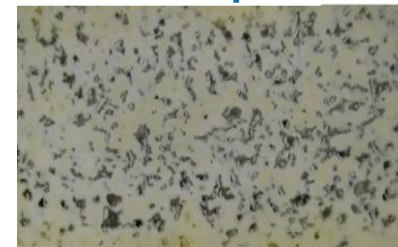
Fromages plus bleus avec les populations du fromage



Roquefort



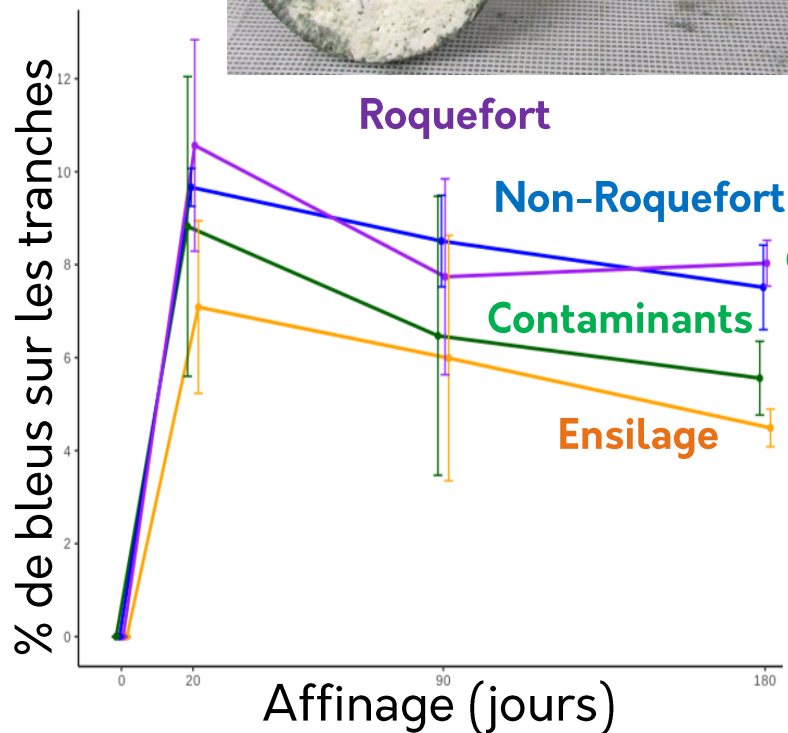
Non-Roquefort



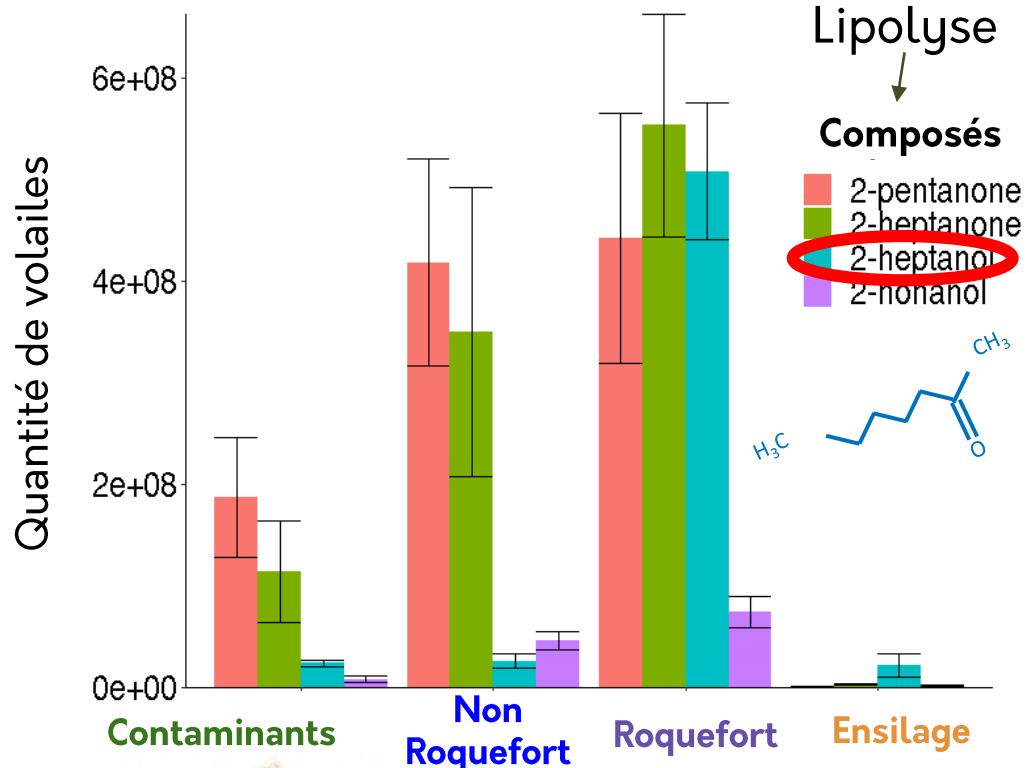
Contaminants alimentaires



Ensilage



Arômes typiques des fromages bleus avec les populations du fromage (lipolyse)

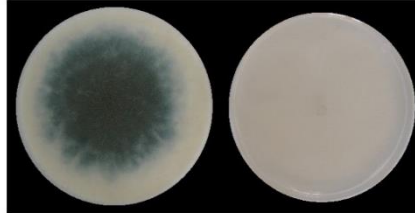


Population
non-Roquefort:

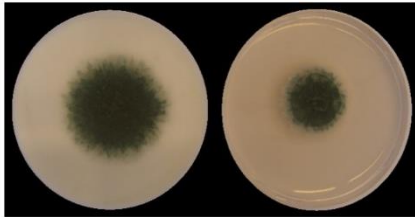
Croissance plus
rapide sur fromage

Croissance faible
sur milieu pauvre

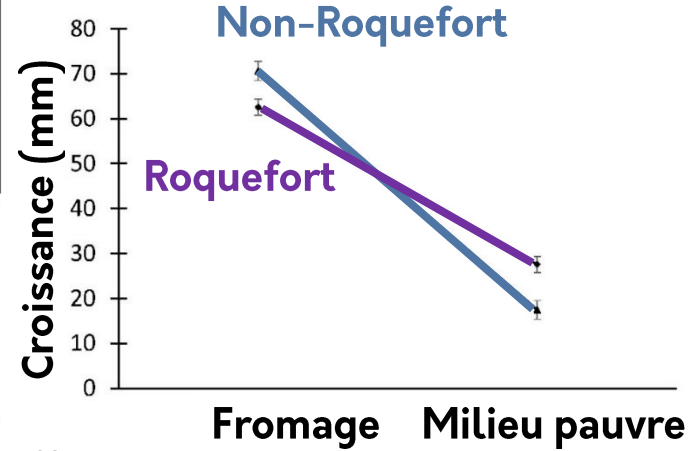
Non-
Roquefort



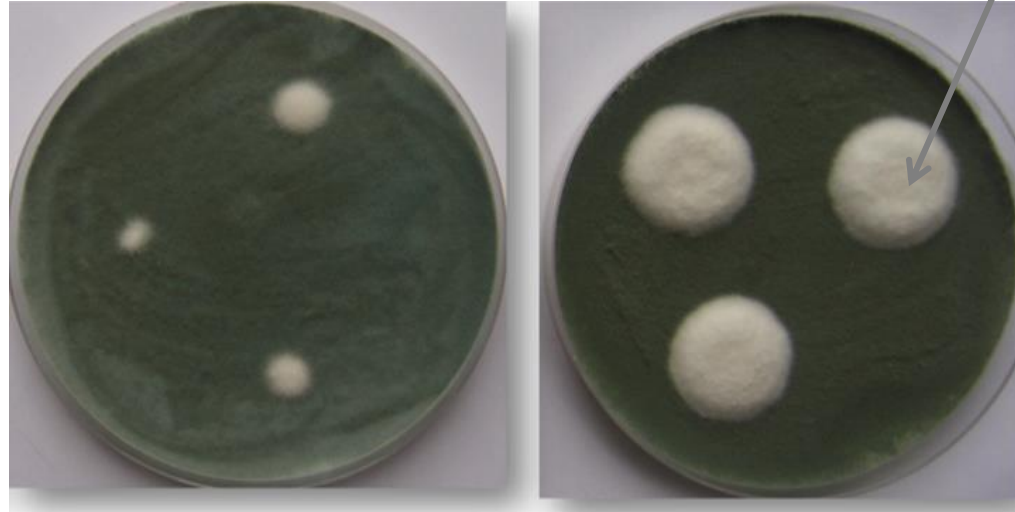
Roquefort



Fromage Milieu pauvre



Population
non-Roquefort:
Exclut mieux les
contaminants

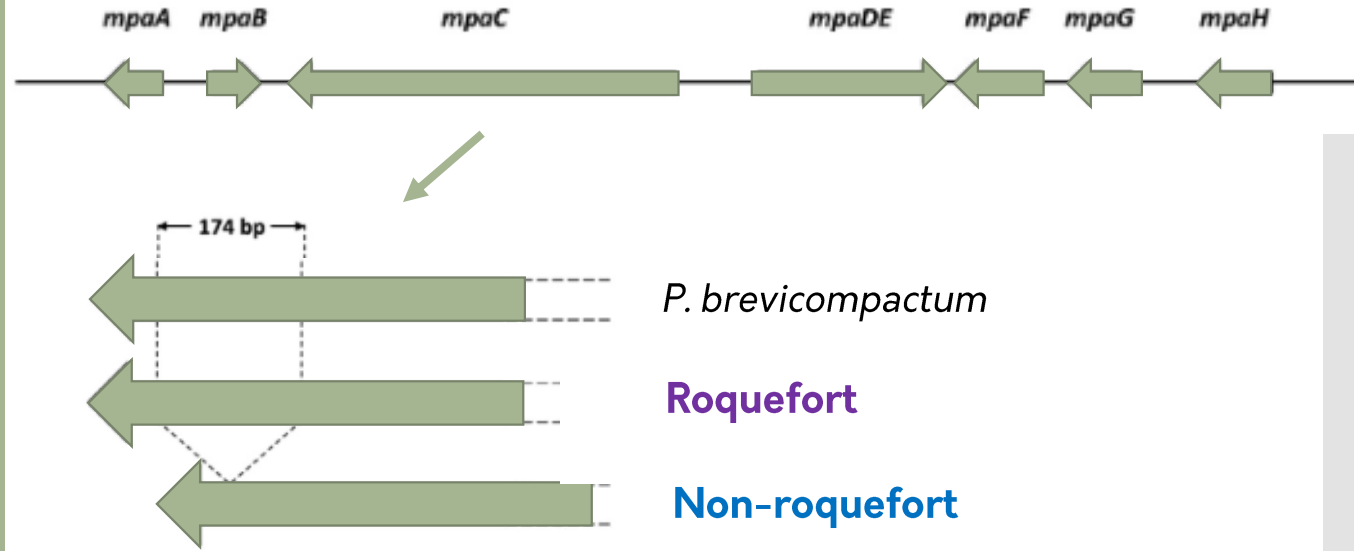


Non-Roquefort

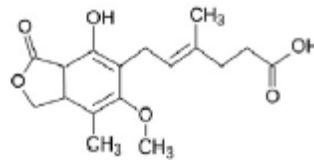
Roquefort

Tapis de *P. roqueforti* sur milieu fromage

Cluster de gènes de la biosynthèse de l'acide mycophénolique



Perte de
capacité de
production de
toxine

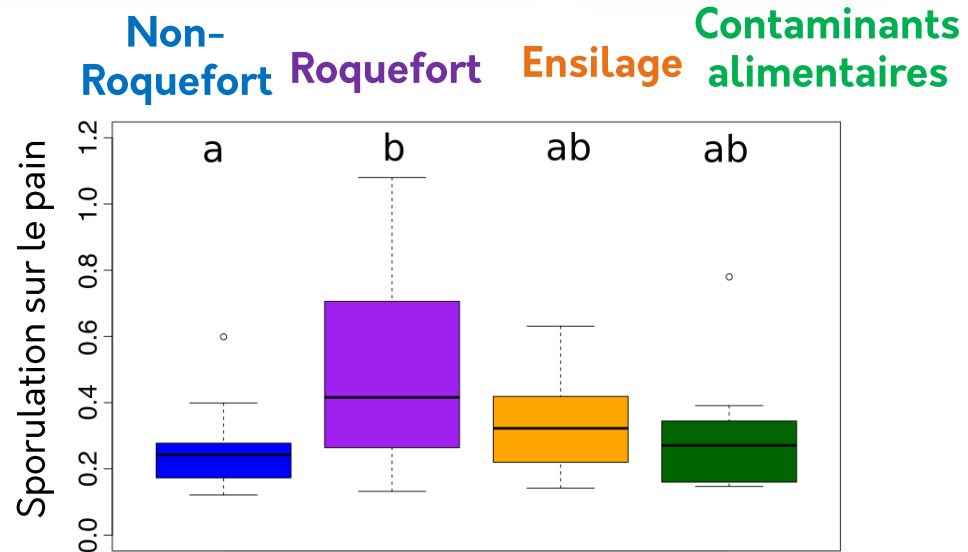


Acide mycophénolique



Les souches
Roquefort
produisent plus
de spores sur le
pain

T. Fortuna



Domestication de *Penicillium roqueforti*



Toxine MPA



Arômes plus agréables et divers

Fromages plus bleus
Plus de spores sur le pain



Transfert de gènes horizontal

Fromages plus bleus
Tolérance au sel
Perte de toxine MPA
Plus compétitif
Croissance rapide sur fromage



Roquefort Ensilage (AOP)



Contaminant alimentaire

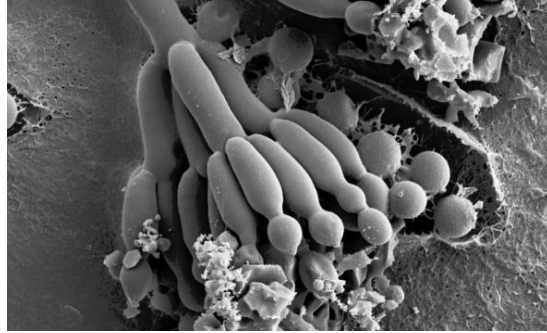


Non-Roquefort



Les souches du fromage sont moins fertiles

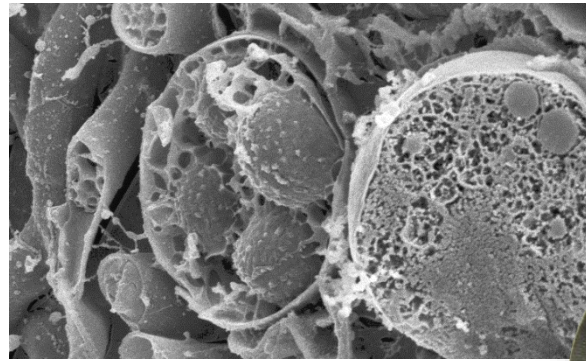
Dégénérescence pendant la domestication et multiplication clonale



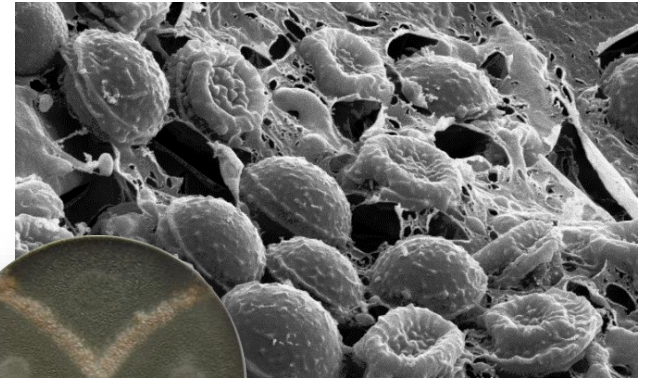
Spores asexuées



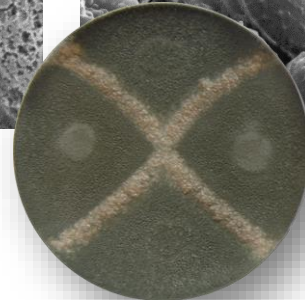
Culture clonale



Asques avec spores sexuées



Spores sexuées

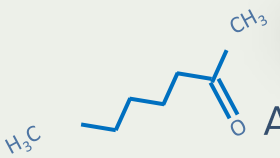


Croisement sur une boîte de Pétri

Domestication de *Penicillium roqueforti*



Toxine MPA



Arômes plus agréables et divers

Fromages plus bleus
Plus de spores sur le pain

Baisse de fertilité



Transfert de gènes horizontal

Fromages plus bleus
Tolérance au sel
Perte de toxine MPA
Plus compétitif
Croissance rapide sur fromage
Croissance faible milieu pauvre
Baisse de fertilité



Roquefort (AOP) Ensilage



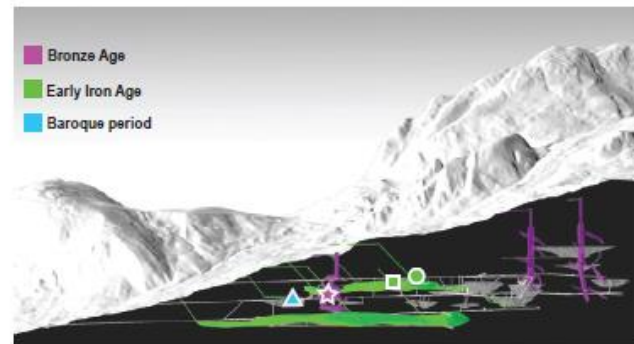
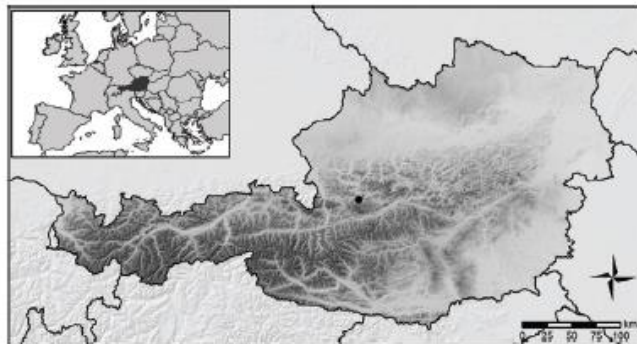
Contaminant alimentaire



Non-Roquefort



Penicillium roqueforti
et *Saccharomyces cerevisiae*
dans des paléofécès
de l'âge de fer



★ 2610
Tuschwerk
1301-1121 cal BC



■ 2604
Kernverwässerungswerk
650-545 cal BC



● 2611
Josefstollen-Querschlag
652-544 cal BC



▲ 2612
Edlersbergwerk-oben
1720-1783 cal AD

*Penicillium
camemberti*

Une lignée
clonale albinos

Brie et
Camembert
(AOP)



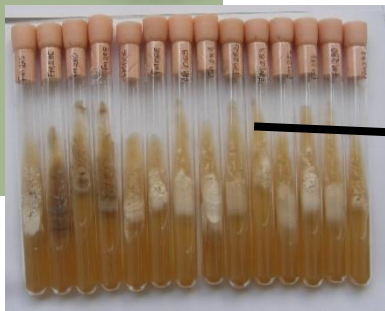
Symphonie des fromages en brie majeur
Nature morte au fromage
Marie-Jules Justin, 1888



Fromages de France 1953

Trois étapes de domestication

Pas de diversité chez *P. camemberti* (AOP)



P. fuscoglaucum

TH-



TH+
TH-

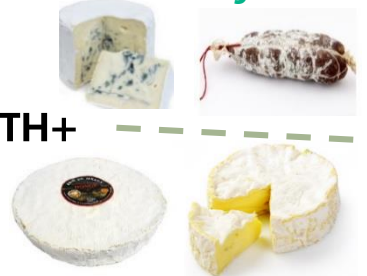
P. bifforme



var. *caseifulvum*

P. camemberti

TH+

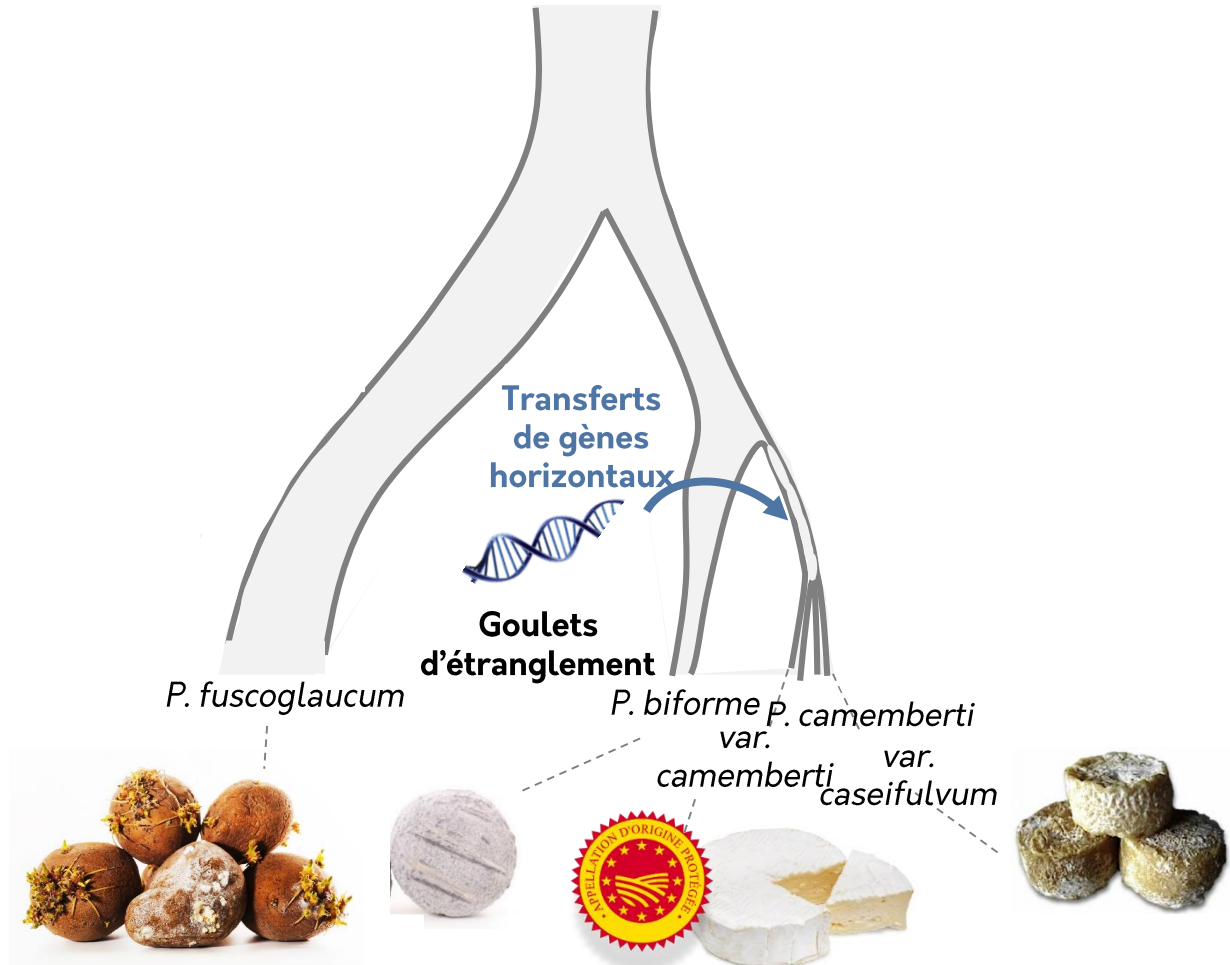


P. c. camemberti

Domestication de *Penicillium camemberti*

Trois étapes de domestication

Deux variétés clonales chez *P. camemberti*



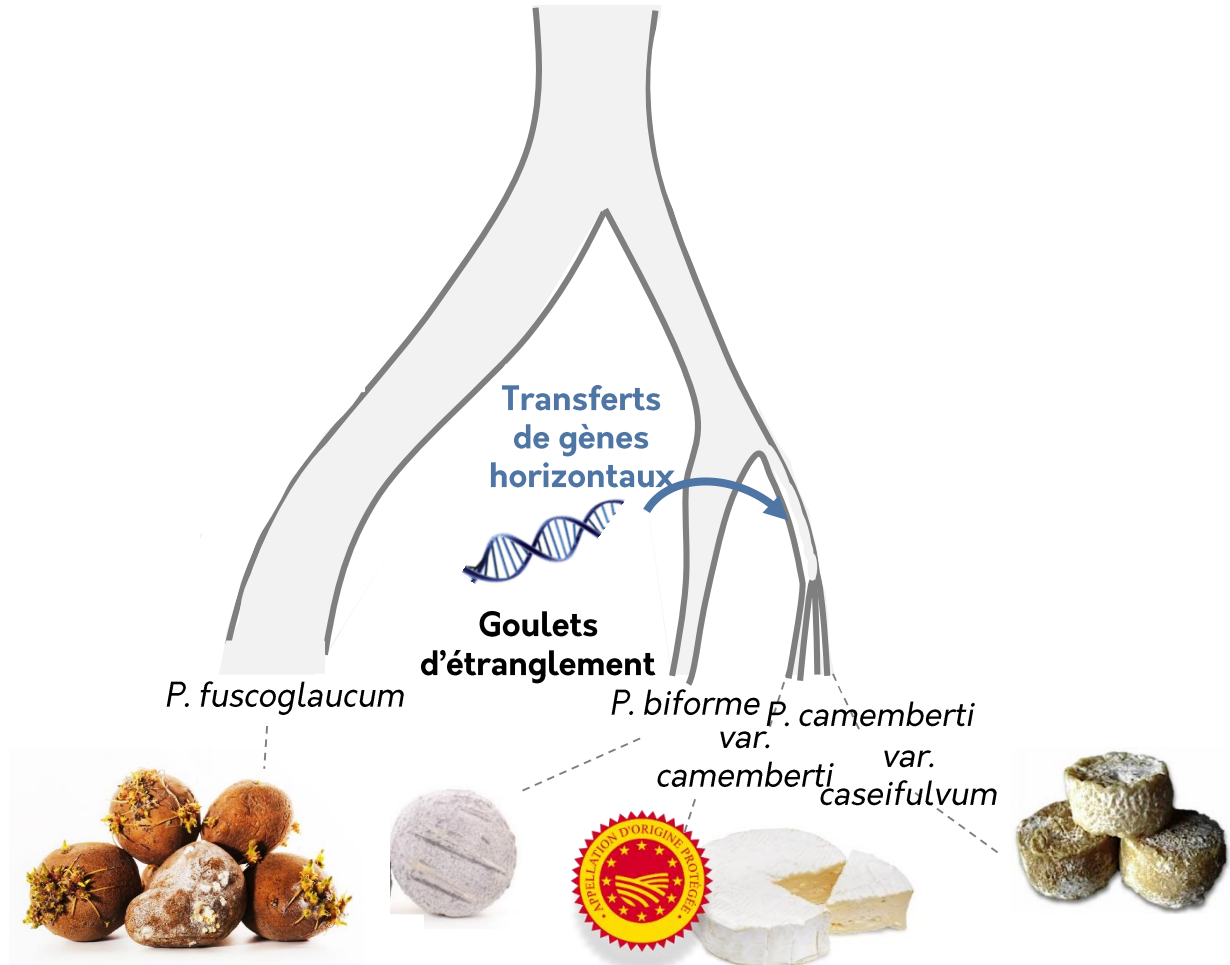
Ropars et al (2020) Current Biology

Ropars et al (2020) CRAS

Domestication de *Penicillium camemberti*

Trois étapes de domestication

Evolution des caractères?

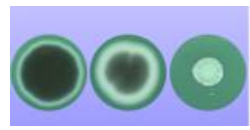
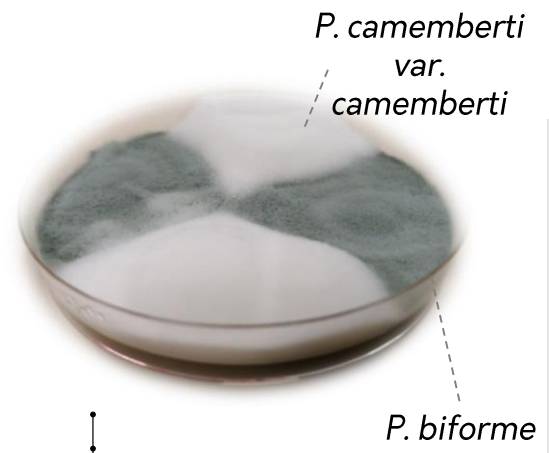
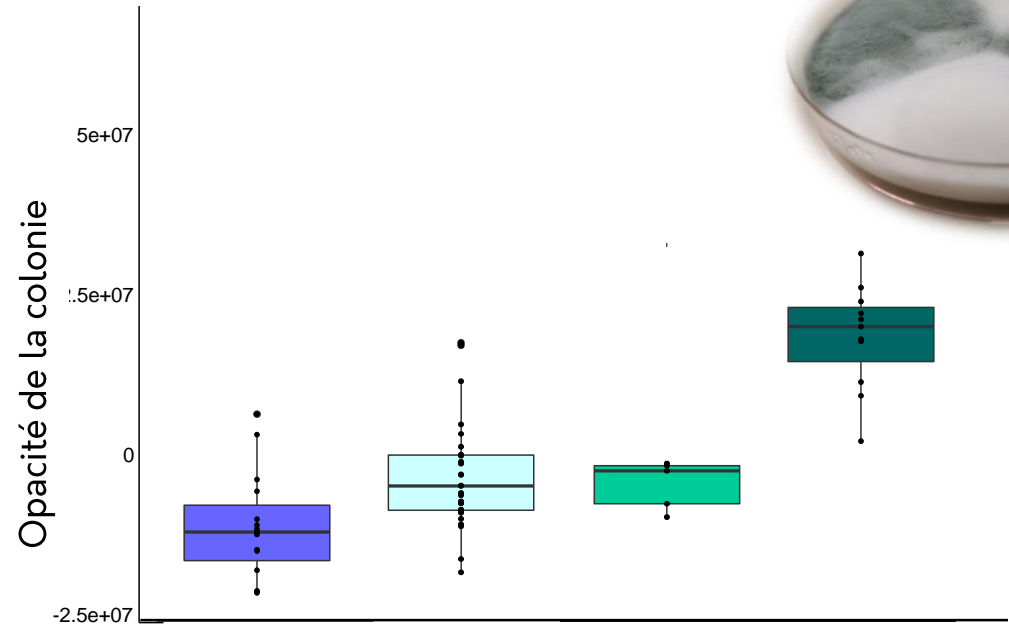


Ropars et al (2020) Current Biology

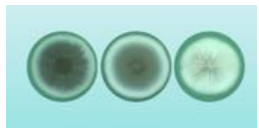
Ropars et al (2020) CRAS

P. camemberti plus blanc et cotonneux, surtout var. *camemberti*

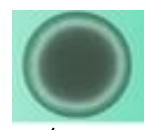
P. fuscoglaucum plus variable et plus sombre



P. fuscoglaucum



P. bifforme



P. camemberti

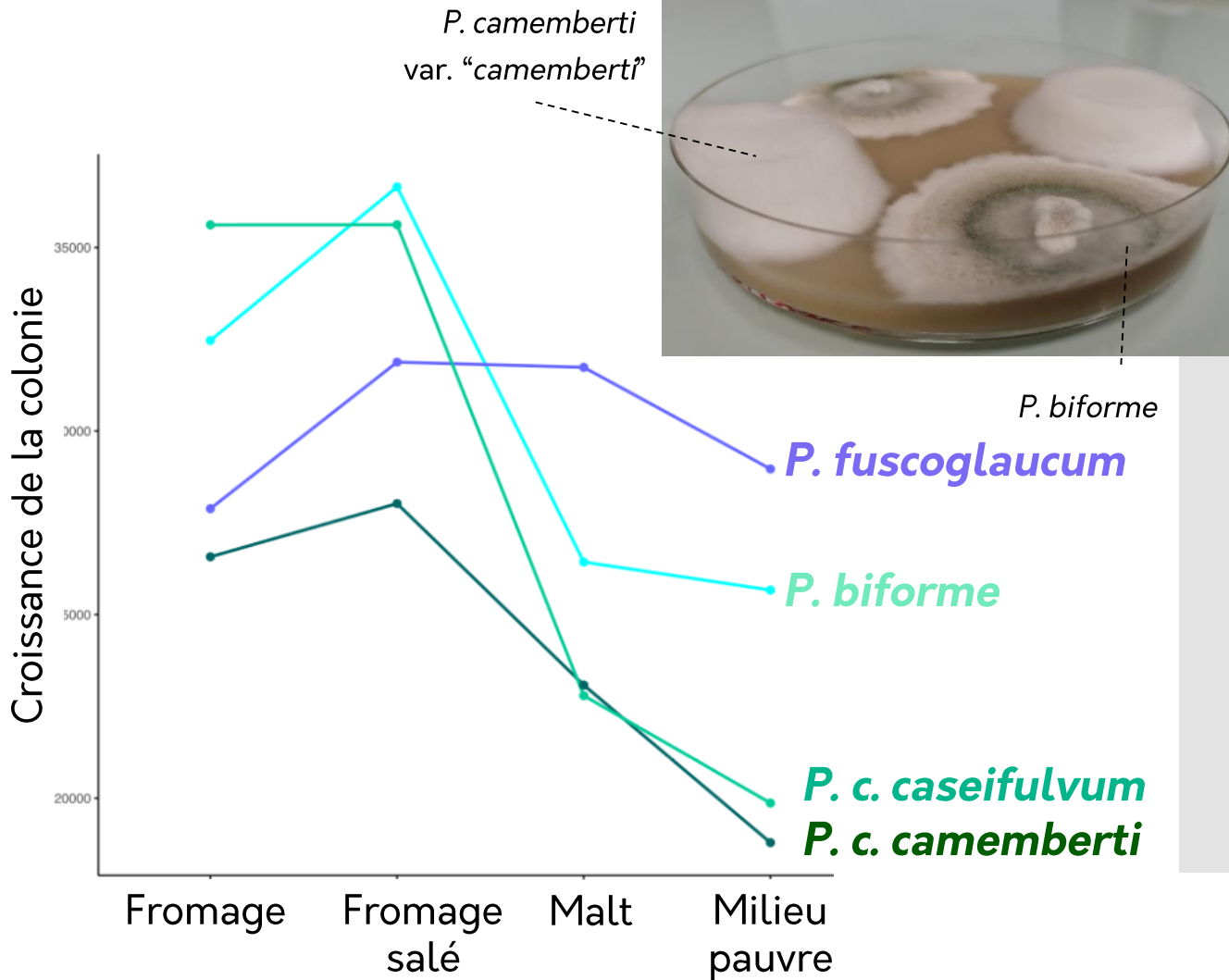


P. c. caseifulvum

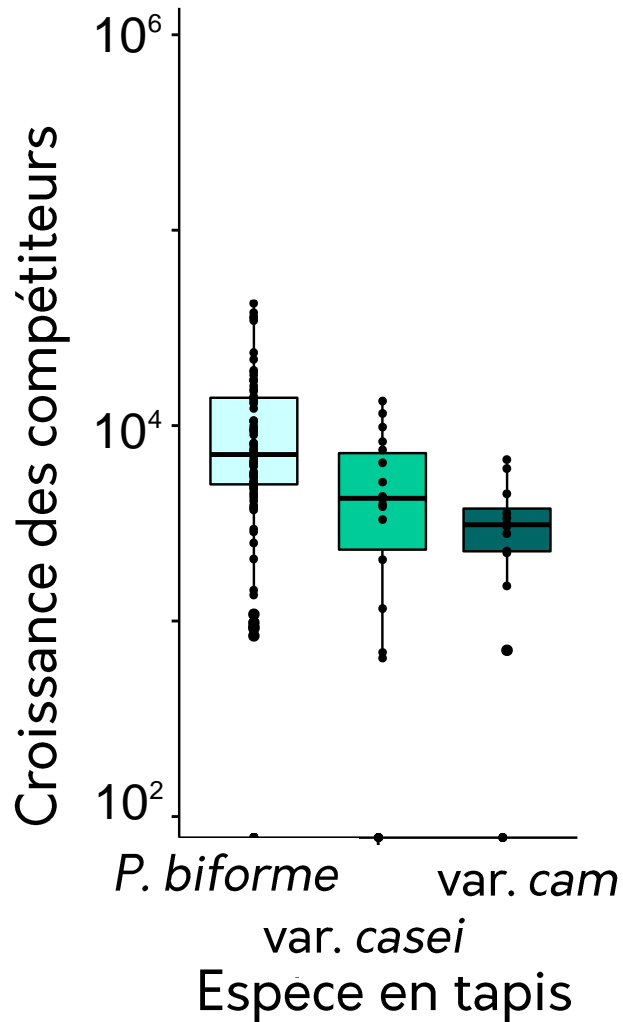
P. c. camemberti

-*P. c. caseifulvum* /
P. biforme:
plus rapide sur
fromage, moins sur
milieu pauvre

-*P. c. camemberti*:
croissance verticale



Penicillium camemberti
var. *camemberti*
exclut mieux les
compétiteurs



Compétiteur

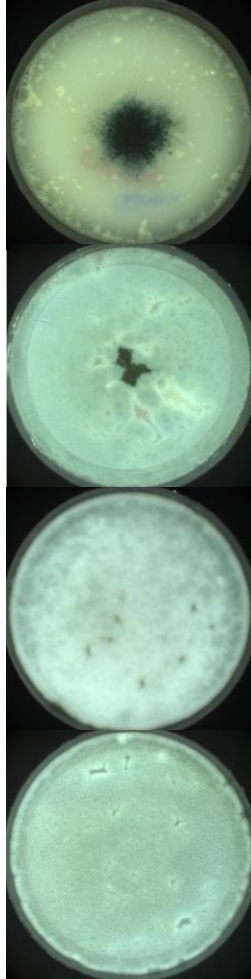
Pas de tapis

P. biforme

P. camemberti
var. "camemberti"

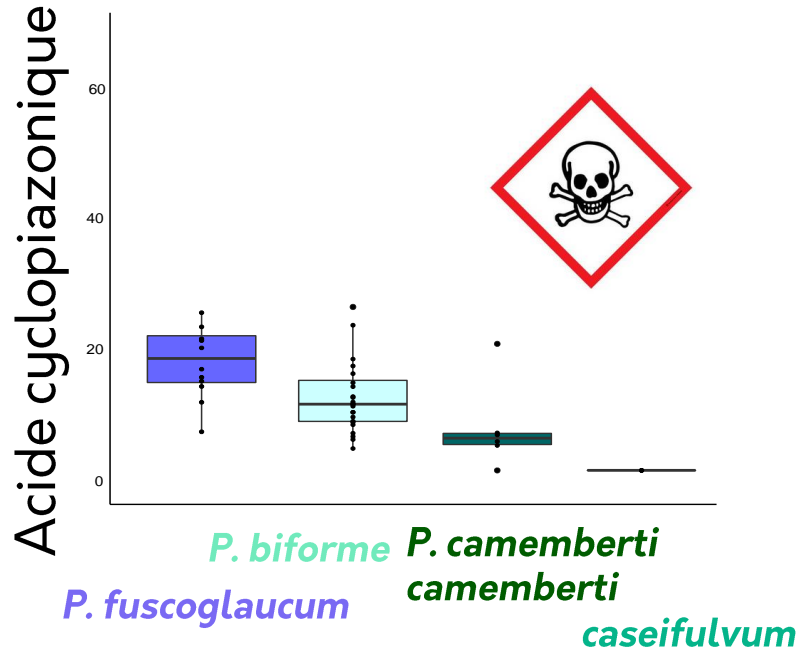
P. camemberti
var. "caseifulvum"

P. roqueforti



P. camemberti
produit moins ou
pas de toxine

Délétion de 2 pb
dans le gène CpaA



P. fuscoglaucum, *P. biforme* and *P. camemberti* var. "camemberti" SRVAIVEESGEFTYAQLGAHTNRIANVLE 3344 amino acid predicted
P. camemberti var. "caseifulvum"YYLC*AR*Y*PHCQCPS*R 2849 amino acid (truncated)

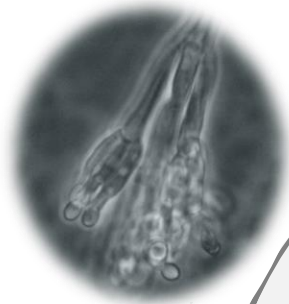
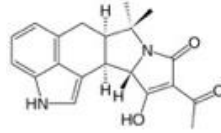
Pos 2830

Domestication de *Penicillium camemberti*

Deux variétés clonales chez *P. camemberti* avec des caractères différents



Toxine CPA



P. biforme



- Pus blanc
- Plus compétitif
- Croissance + sur fromage
- Phénotype cotonneux
- Perte de toxine CPA

P. fuscoglaucum

P. biforme
P. camemberti
var. *camembertaseifulvum*



Dégénérescence
Penicillium
camemberti :

Baisse de production
de spores

Perte de reproduction
sexuée



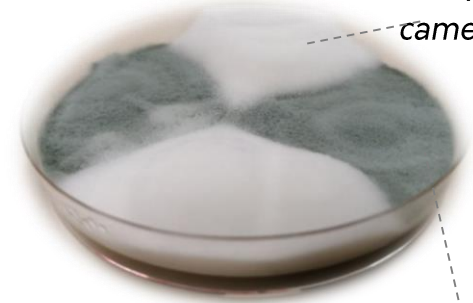
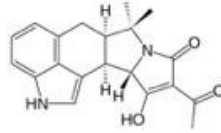
Dr. Sahay

Domestication de *Penicillium camemberti*

P. camemberti
var.
camemberti

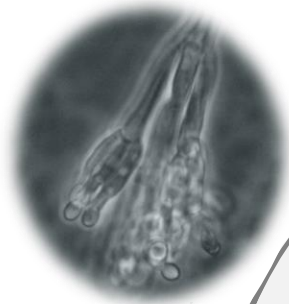


Toxine CPA



P. biforme

Dégénérescence



Transferts
de gènes
horizontaux



Croissance – sur milieu pauvre

Baisse de production de spores

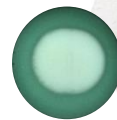
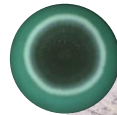
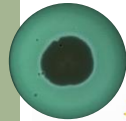
Baisse de fertilité

Perte de toxine CPA

P. fuscoglaucum

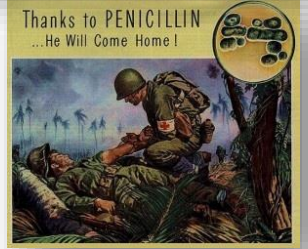
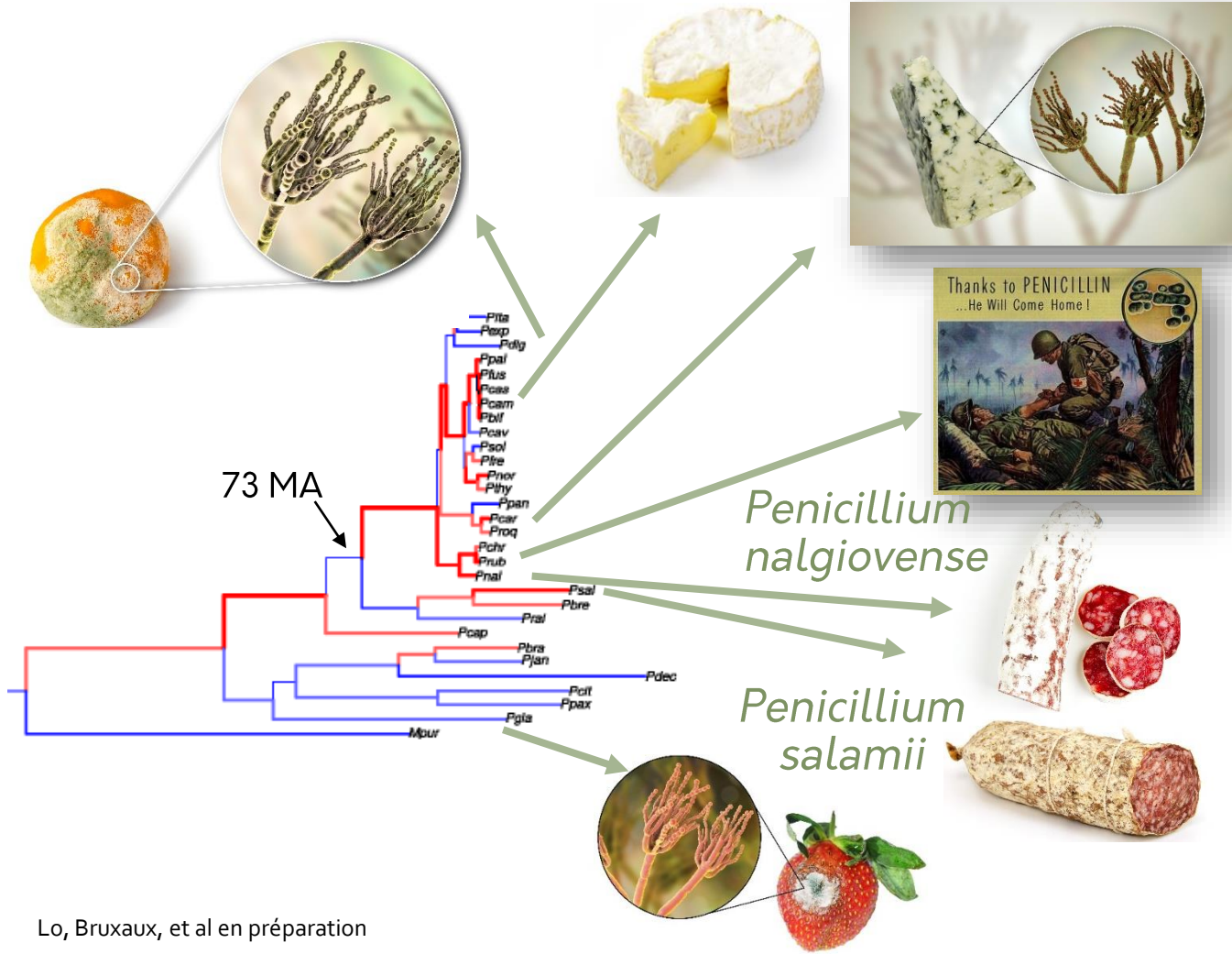
P. biforme
P. camemberti
var.

camembertaseifulvum
var.



Convergence
aussi chez les
champignons
des saucissons:

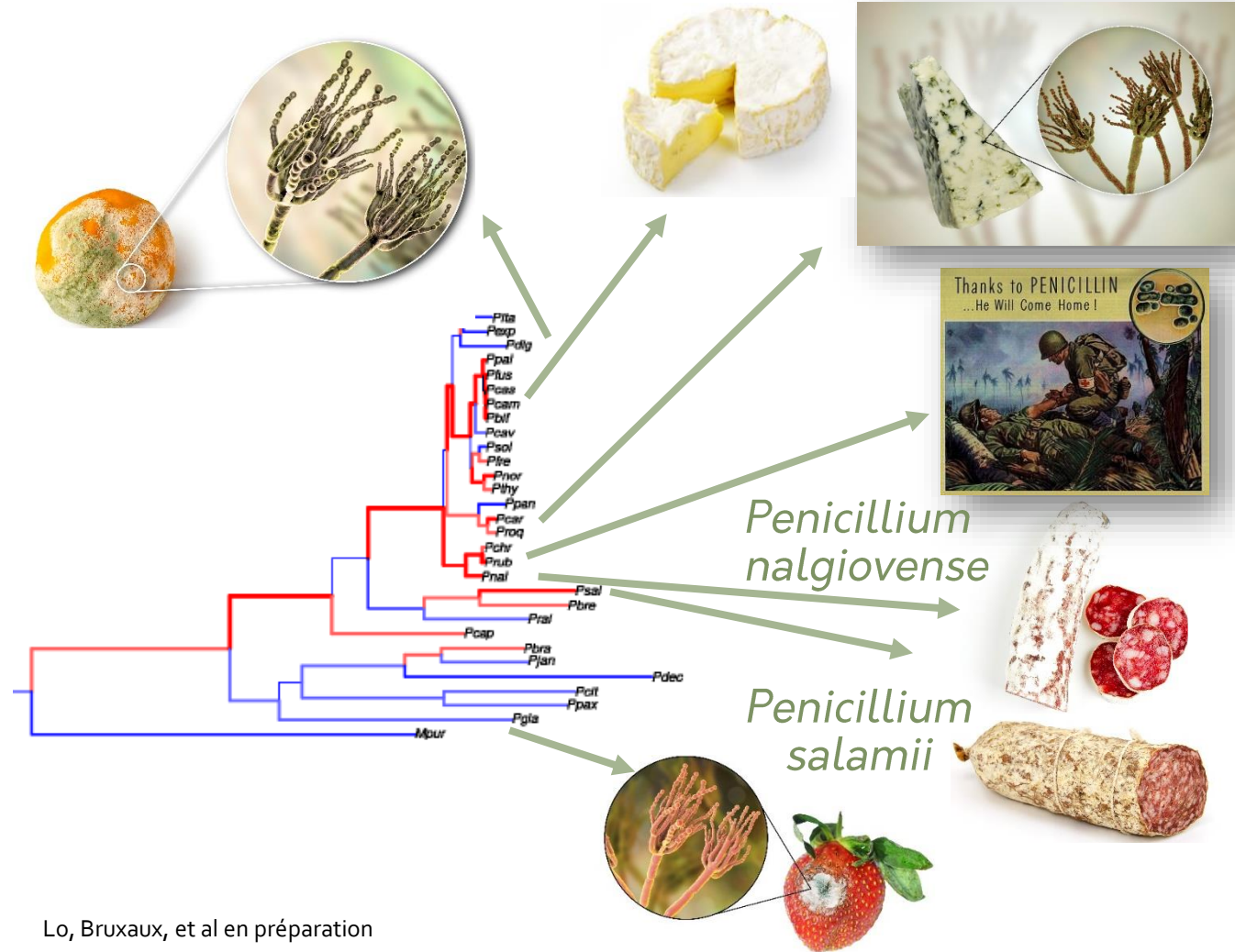
Divergence
73MA:
équivalent
homme-souris



Lo, Bruaux, et al en préparation

Convergence aussi chez les champignons des saucissons:

- Forte baisse de diversité
- TH partagés
- Plus blanc
- Lipolyse et protéolyse plus lentes
- pertes de toxines



Lo, Bruaux, et al en préparation

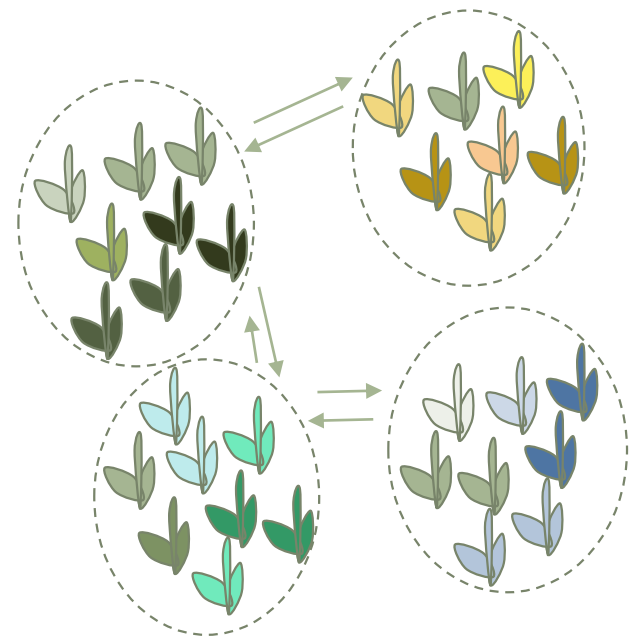
Domestication des champignons : conclusions



- Plusieurs adaptations indépendantes des *Penicillium* au fromage/charcuteries
- Adaptation convergente: croissance, compétition, perte de toxine et de reproduction sexuée...
- Adaptation rapide par les mêmes transferts de gènes
- Perte de diversité et dégénérescence
- L'AOP peut protéger ou appauvrir la diversité

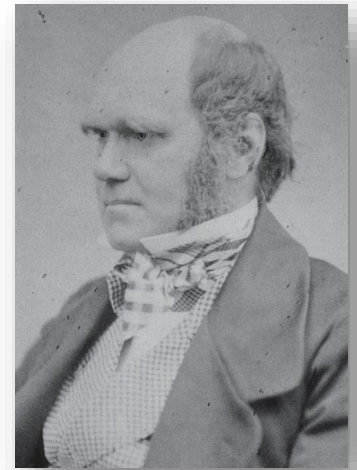
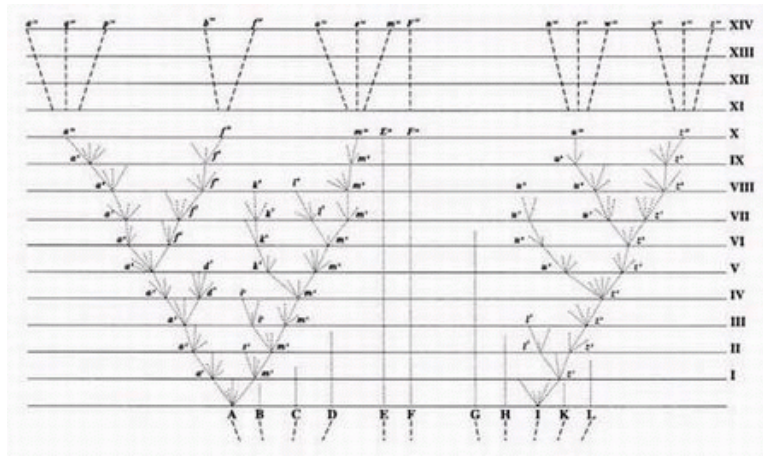
Nikolai Vavilov
1887-1943


Domestication:
centres d'origine,
importance de la
diversité génétique,
de l'isolement et
des échanges
génétiques



«La vie, c'est
comme une
bicyclette, il faut
avancer
pour ne pas
perdre
l'équilibre»

Albert Einstein





« Ce n'est pas l'espèce la plus forte qui survit, ni la plus intelligente. C'est celle qui est la plus adaptable face aux changements »

Charles Darwin

OGM:

progrès et bien
pour l'humanité?



OGM:

appauvrissement
de la biodiversité

appropriation du
vivant

augmentation des
pesticides



OGM :

gènes
insecticides,
résistances aux
antibiotiques ou
aux herbicides,
de stérilité...



Le pollen et
les grainent
dispersent...

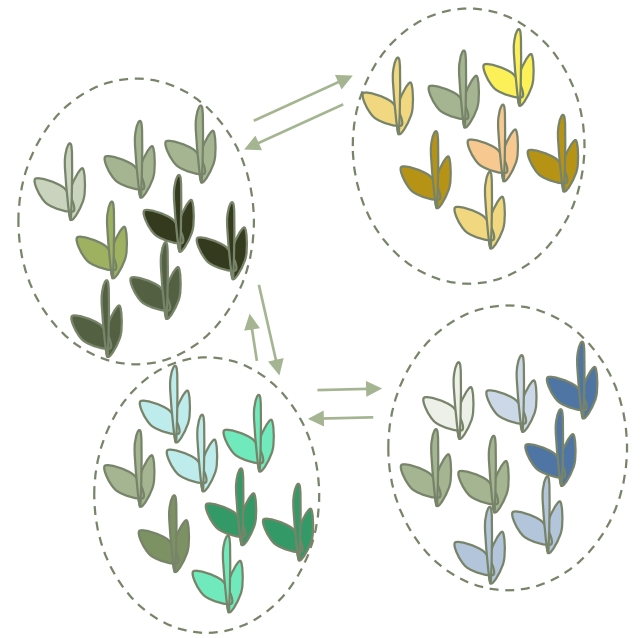


Appropriation du vivant



Nikolai Vavilov
1887-1943

Domestication:
centres d'origine,
importance de la
diversité génétique,
de l'isolement et
des échanges
génétiques





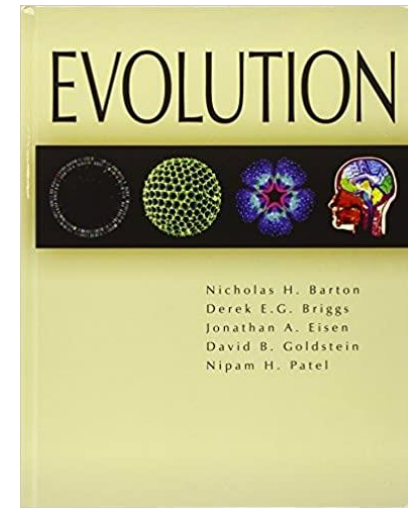
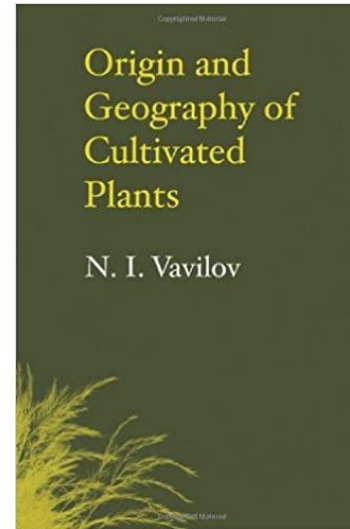
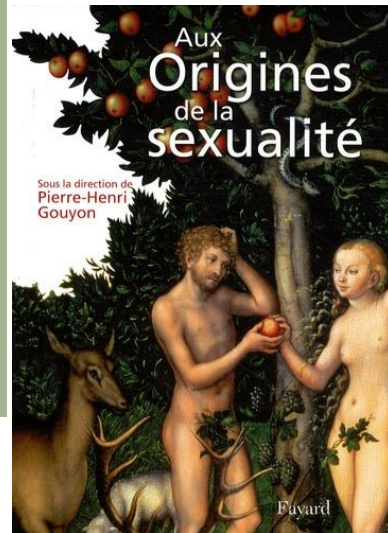
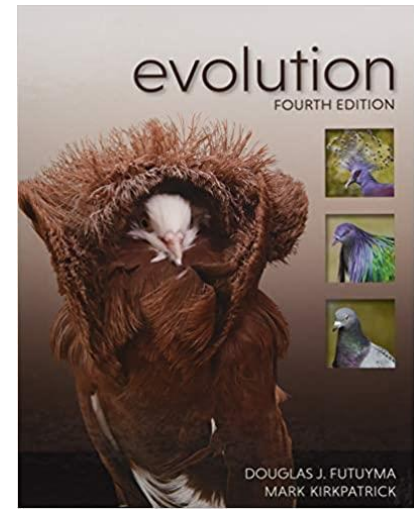
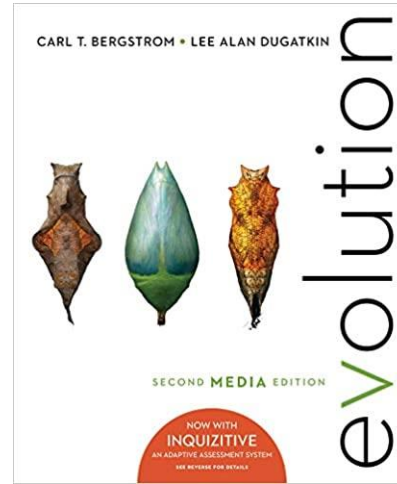
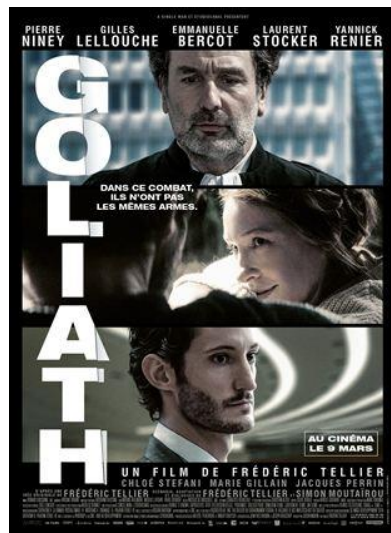
Etudier la domestication pour
comprendre l'évolution et l'adaptation:
cas des pommiers et
des champignons du fromage



Origine de la vie?



Conseils lectures & film



COLLÈGE
DE FRANCE
1530



Fondation
Jean-François et Marie-Laure
de Clermont-Tonnerre