

LA DOMESTICATION ANCIENNE ET MODERNE DU MAÏS



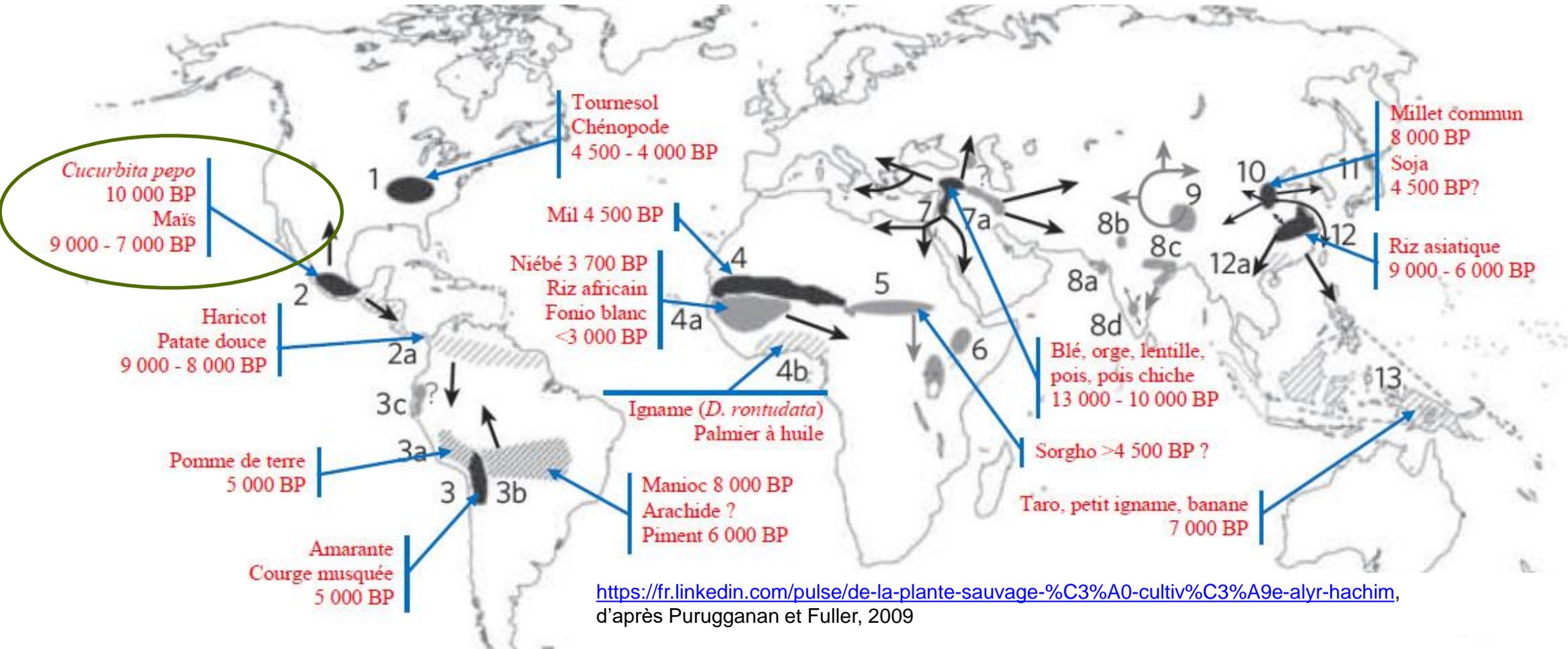
Académie d'Agriculture de France, 3 avril 2024

A. Charcosset, INRAE, Génétique Quantitative et Evolution, Le Moulon

Wikipedia :

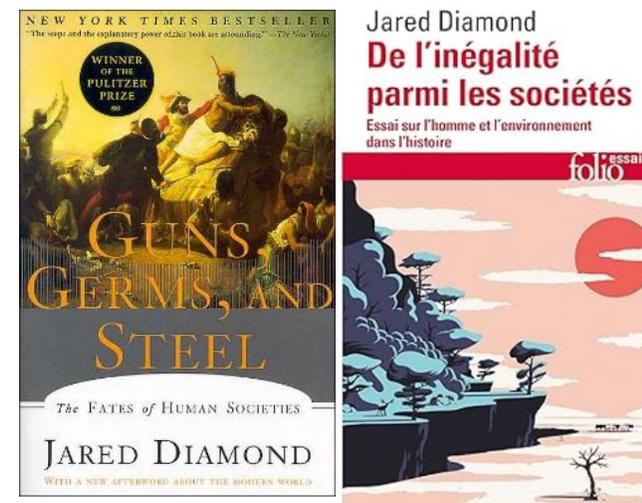
« La domestication d'une espèce, animale ou végétale, est l'acquisition, la perte ou le développement de caractères morphologiques, physiologiques ou comportementaux nouveaux et héréditaires, résultant d'une interaction prolongée, d'un contrôle voire d'une sélection délibérée de la part des communautés humaines. »

Domestication des principales plantes cultivées

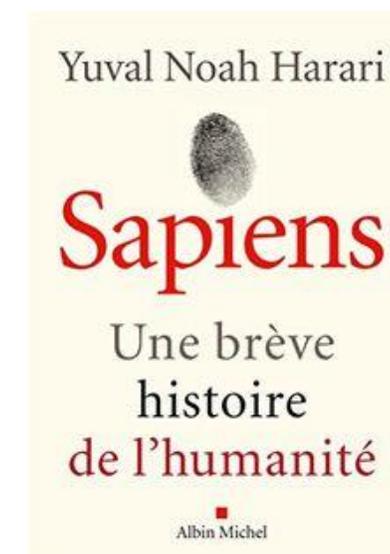


La domestication des grandes céréales (blé, riz, maïs) a été effectuée de façon indépendante mais relativement synchrone

Domestication des plantes cultivées fortement liée à l'essor des grandes civilisations (spécialisation des activités, mise en place de structures sociales complexes, etc.)



Pour mémoire, point de vue iconoclaste de YN Harari : C'est en fait le blé qui a domestiqué l'homme à son service (cf. le nombre de plantes de blé avant et après la domestication ...) en le sédentarisant dans des maisons (domus), et les ennuis ont commencé par rapport à l'âge d'or des chasseurs cueilleurs ...



1. Les premières étapes de la domestication du maïs :
domestication au sens strict
 2. Nouvelles adaptations environnementales liée à l'expansion géographique, nouveaux caractères liés à la diversification usages
 3. Peut-on parler de domestication moderne du maïs ?
- Conclusion et perspectives

Le maïs cultivé aujourd'hui (*Zea mays*)



https://en.wikipedia.org/wiki/Maize#Zea_mays_subsp._parviglumis

A la différence d'espèces comme le blé, il n'existe pas dans la nature de plante sauvage proche morphologiquement du maïs

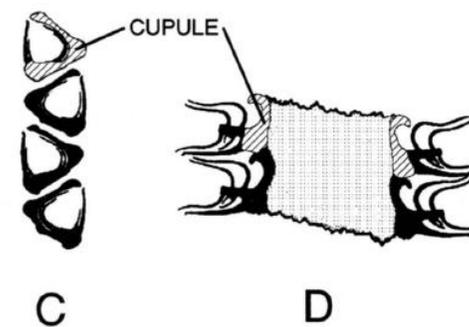
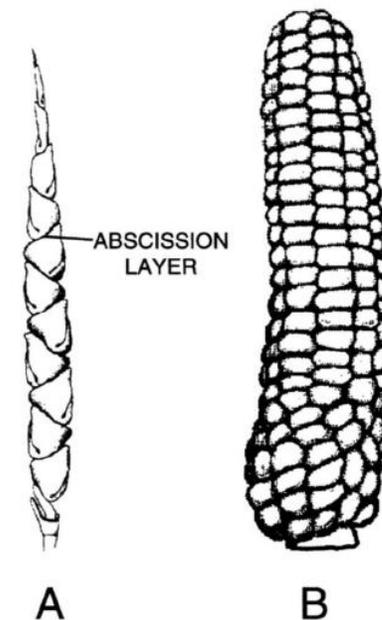
-> son origine a été l'objet de débats polémiques

-> il est aujourd'hui clairement établi (par la génomique notamment) que les téosintes *Zea mays Parviglumis* et *Mexicana* sont les ancêtres des maïs actuels

Le (premier) ancêtre du maïs cultivé : *Zea mays* subsp. *Parviglumis*



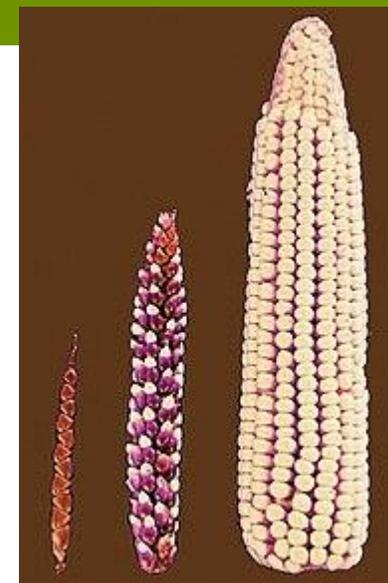
Zea mays ssp. *Parviglumis* poussant à l'état sauvage dans l'état de Jalisco, Mexique (source [Mbhufford](#))



Différences frappantes entre téosinte (A, C) et maïs (B, D) : **plantes ramifiées, grains déhiscents et indurés, caractères favorables pour la dispersion et la conservation des graines à l'état sauvage** -> **la perte de ces caractères est un cas extrême de syndrome de domestication**

Les deux plantes sont pourtant inter-fertiles, elles appartiennent donc bien à la même espèce, *Zea mays*

Epis de téosinte, hybride maïs x téosinte et maïs
https://en.wikipedia.org/wiki/Maize#Zea_mays_subsp._parviglumis



Evidences archéologiques, dont analyses d'ADN anciens, positionnent le début de la domestication du maïs dans la vallée de la rivière Balsas au Mexique, il y a 8700 ans. Les études génétiques amènent à une estimation d'environ 9000 ans



*Rafle de maïs datant de 3900 ans
 (Jaenicke-Despres Science et al. 2003)*

Pourquoi les amérindiens se sont-ils intéressés à une plante sauvage dont les grains sont pratiquement immangeables ?
 -> *hypothèse de l'intérêt de la tige comme source de sucre à des fins de fermentation alcoolique (cf. Smalley et Blake, 2003)*

Comment expliquer une telle transition ?

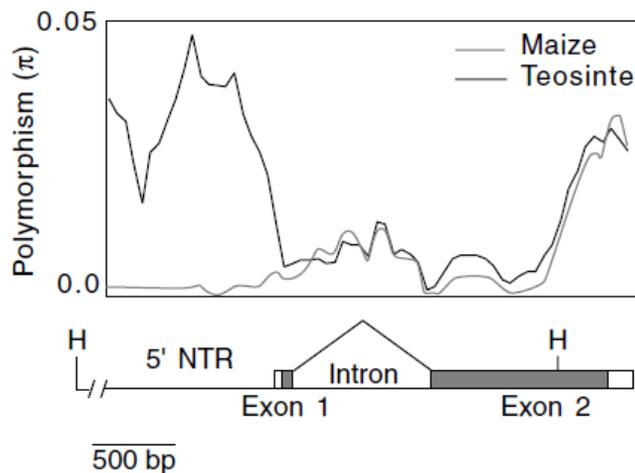
Concept de “Catastrophique transmutation sexuelle” (Iltis, 1983)
L'épi de maïs est une inflorescence mâle d'une ramification secondaire, compactée et féminisée



Chalco teosinte
Zea mays *parviglumis*

Protomaize
based on maize
X teosinte hybrid

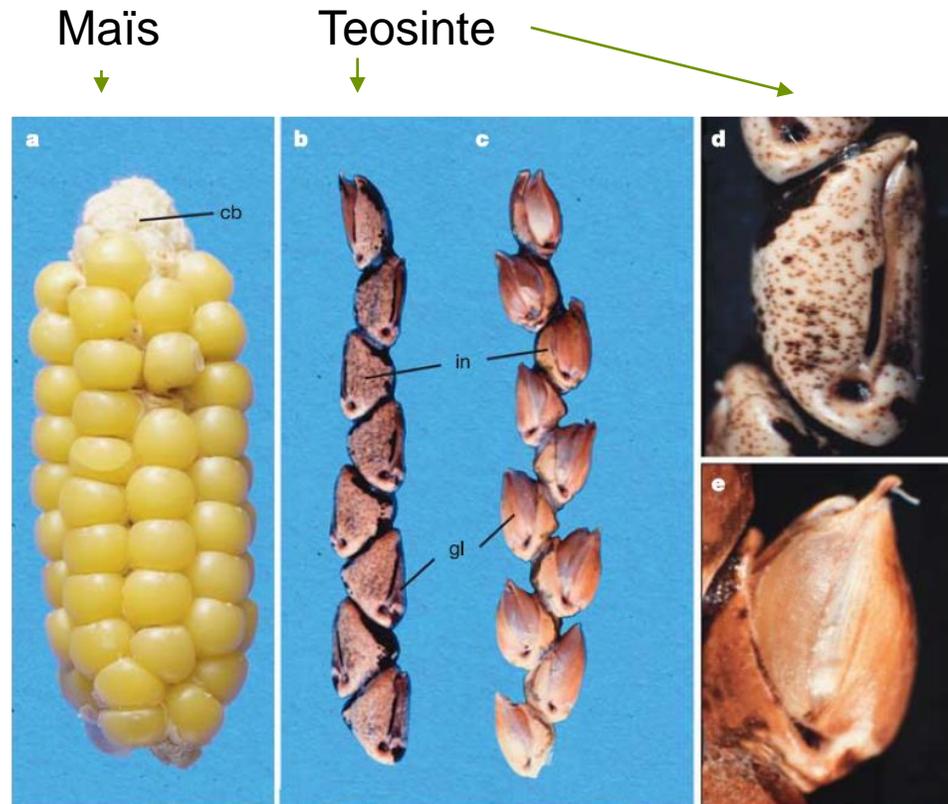
Maize
Zea mays mays



Rôle majeur du gène *tb1* dans le contrôle de la dominance apicale, découvert par le groupe de John Doebley, initialement par cartographie de QTL (Doebley et al., 1995, Wang et al., 1999)

A fait l'objet d'une très forte pression de sélection (perte de diversité totale dans la région régulatrice)

Perte de l'induration du grain par mutation du gène *tga1*



Téosinte avec un allèle maïs à *tga1*
 -> la glume indurée régresse

LETTERS

The origin of the naked grains of maize

Huai Wang^{1*}, Tina Nussbaum-Wagler^{1*}, Bailin Li², Qiong Zhao¹, Yves Vigouroux^{1†}, Marianna Faller², Kirsten Bomblies¹, Lewis Lukens³ & John F. Doebley¹



Préparation de la masa à partir de grains bouillis (Nixtamalisation), utilisée pour les tortillas, etc.

1. Les premières étapes de la domestication du maïs :
domestication au sens strict
 2. Nouvelles adaptations environnementales liée à l'expansion géographique, nouveaux caractères liés à la diversification usages
 3. Peut-on parler de domestication moderne du maïs ?
- Conclusion et perspectives

Un second ancêtre sauvage, *Zea mays ssp. Mexicana* : apport de gènes d'adaptation

Rôle décisif des croisements entre premiers maïs et *Mexicana* dans le développement de l'adaptation environnementale aux climats plus froids des hauts plateaux Mexicains.
A facilité la diffusion vers le nord après 6000 BP

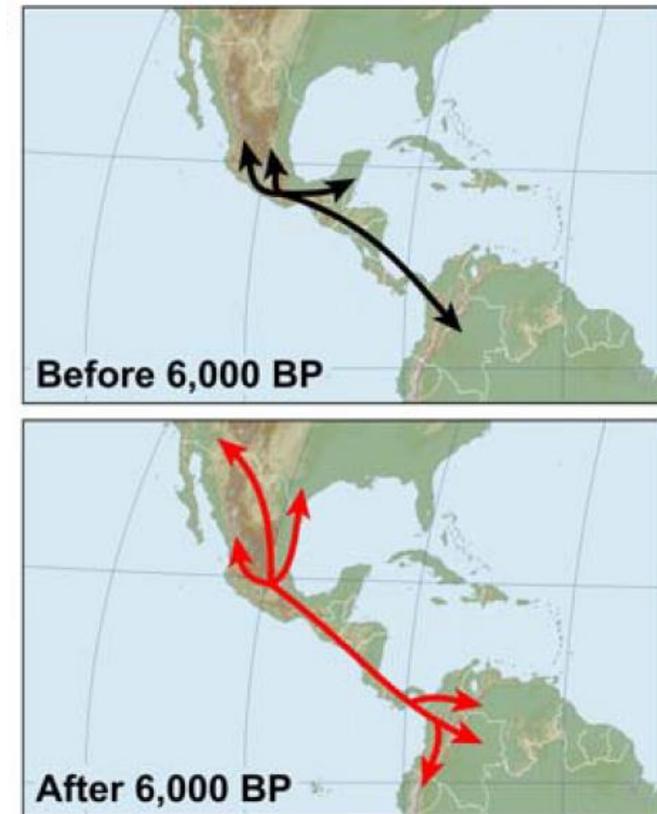


Mexicana

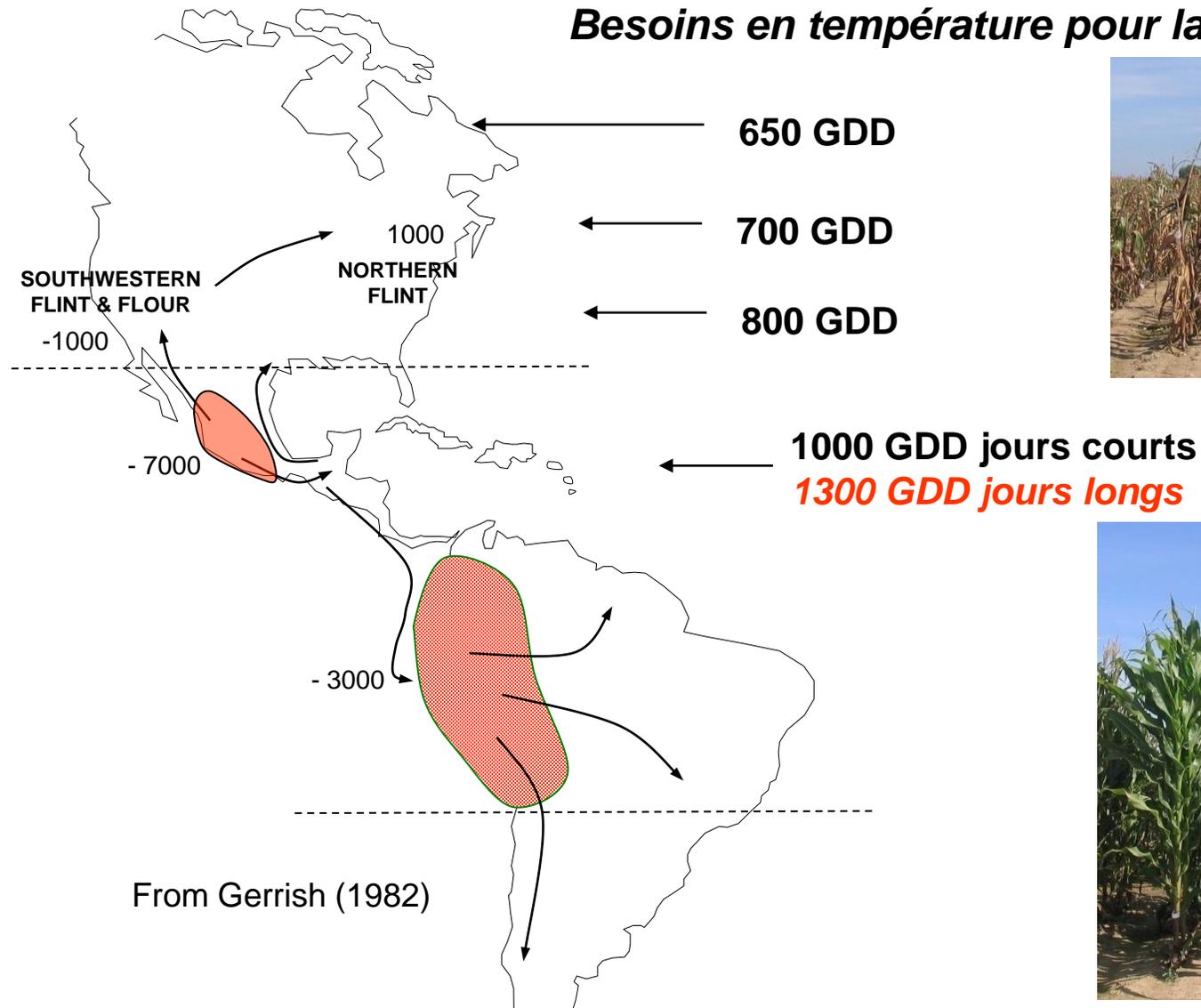
MAIZE GENETICS

Two teosintes made modern maize

Ning Yang*†, Yuebin Wang†, Xiangguo Liu†, Minliang Jin, Miguel Vallebuena-Estrada, Erin Calfee, Lu Chen, Brian P. Dilkes, Songtao Gui, Xingming Fan, Thomas K. Harper, Douglas J. Kennett, Wenqiang Li, Yanli Lu, Junqiang Ding, Ziqi Chen, Jingyun Luo, Sowmya Mambakkam, Mitra Menon, Samantha Snodgrass, Carl Veller, Shenshen Wu, Siying Wu, Lin Zhuo, Yingjie Xiao, Xiaohong Yang, Michelle C. Stitzer, Daniel Runcie, Jianbing Yan*, Jeffrey Ross-Ibarra*



Migration vers le nord et le sud du continent américain



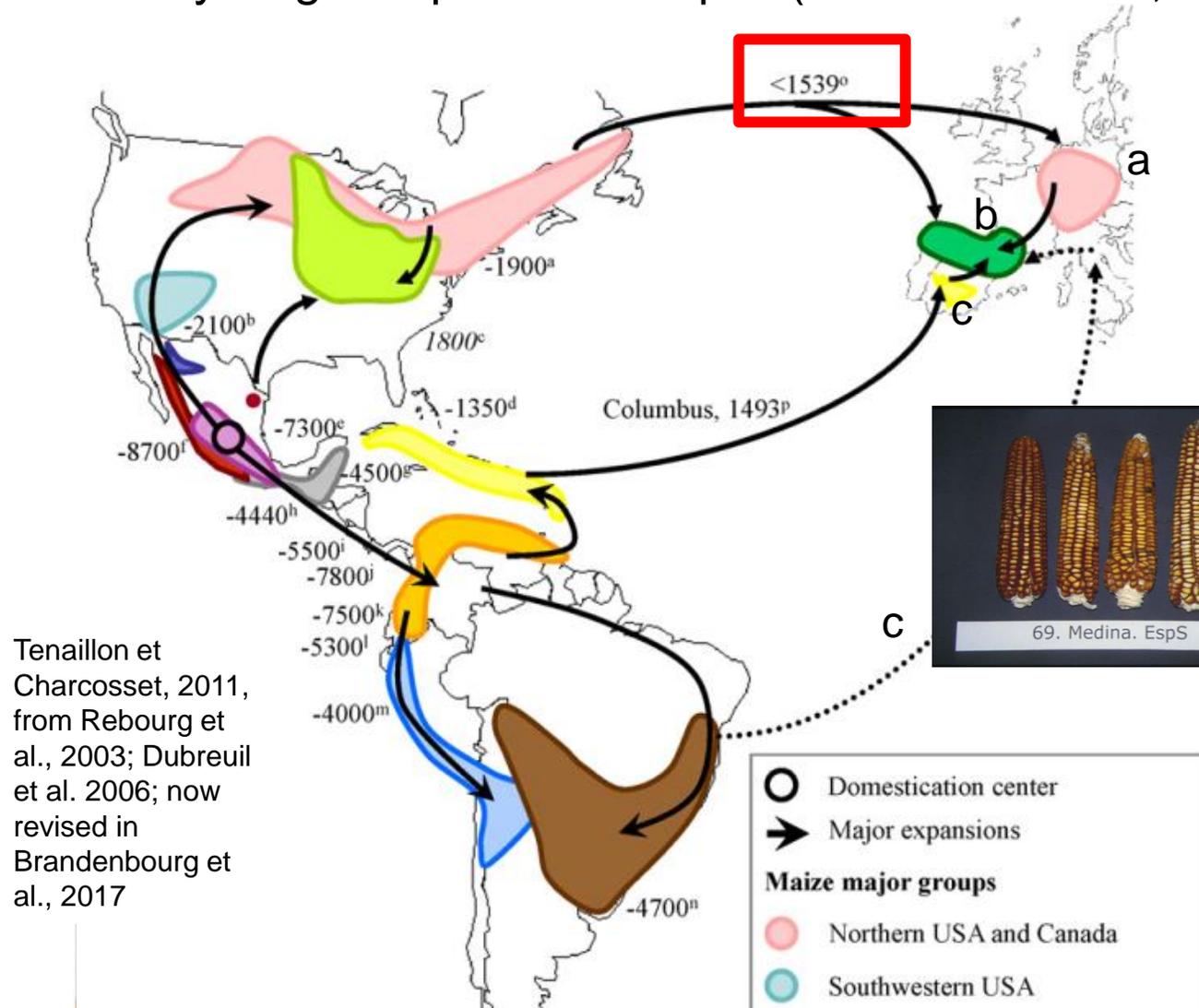
Observation début octobre en région parisienne (même date de semis)



-> changement spectaculaire de phénologie pour s'adapter aux climats plus froids et aux jours longs (**perte de sensibilité à la durée du jour et précocité intrinsèque**)

Introduction /migration du maïs en Europe

Inférée d'analyses génétiques et historiques (coll. M. Chastanet, CNRS)

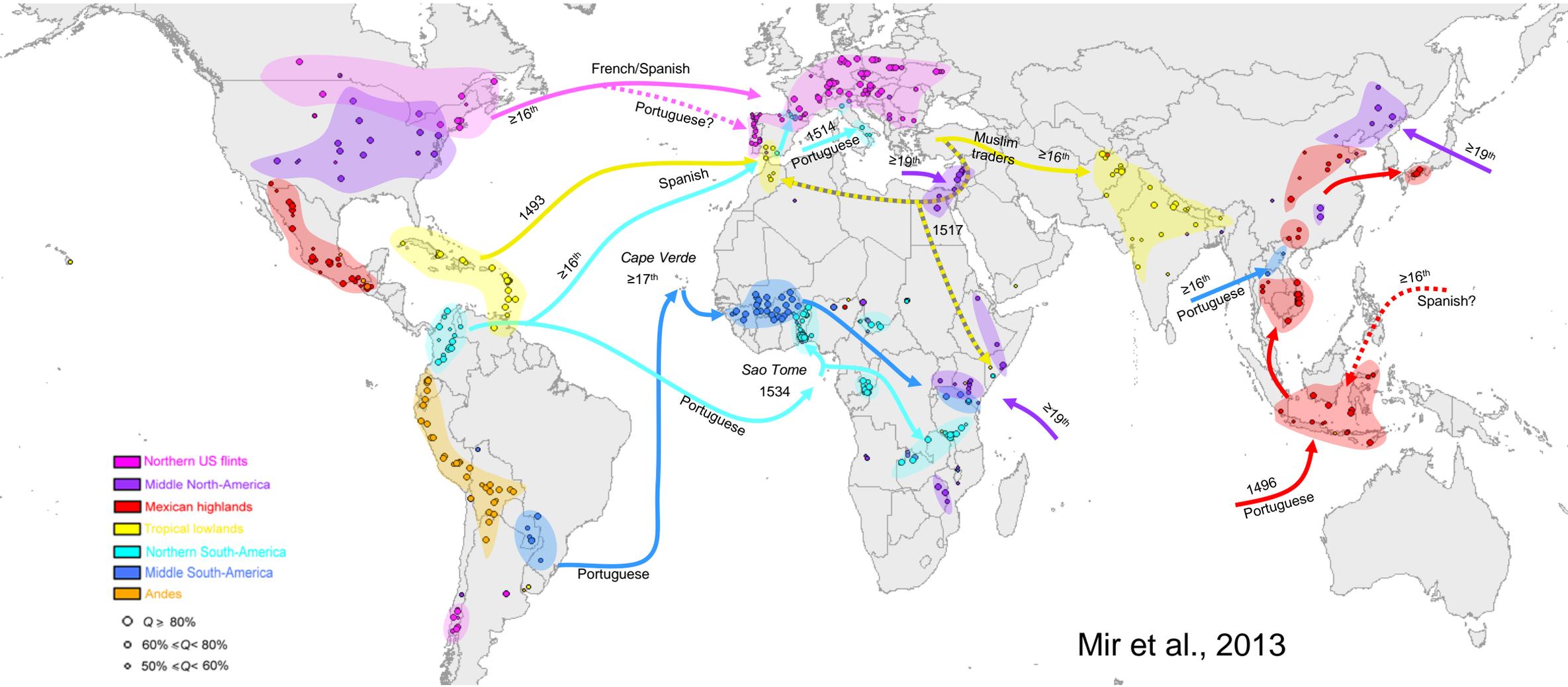


Tenaillon et Charcosset, 2011, from Rebourg et al., 2003; Dubreuil et al. 2006; now revised in Brandenburg et al., 2017



L'adaptation du maïs au climat européen s'est faite rapidement à partir de plusieurs introductions "pré-adaptées" et de leur hybridation (admixture)

Au niveau mondial (coopération avec le CIMMYT)



Mir et al., 2013

-> Adoption très rapide du maïs dans de nombreuses régions du monde

Caractères liés à la diversification des usages alimentaires

Pop-Corn : groupe génétique spécifique, cultivé au Mexique < 3600 BCE



Maïs doux

(mutations produisant un blocage de la chaîne de synthèse de l'amidon), cultivé par les Iroquoiens à l'époque de la découverte



Maïs waxy : amidon = 100% amylopectine. Formes mutantes détectées très rapidement après l'introduction du maïs en Asie, pour faire des préparations culinaires "gluantes")



Maïs à forte

vitrosité : formes les plus typiques en Italie et en Argentine, adaptées à la production de semoule (polenta, corn-flakes, crackers).

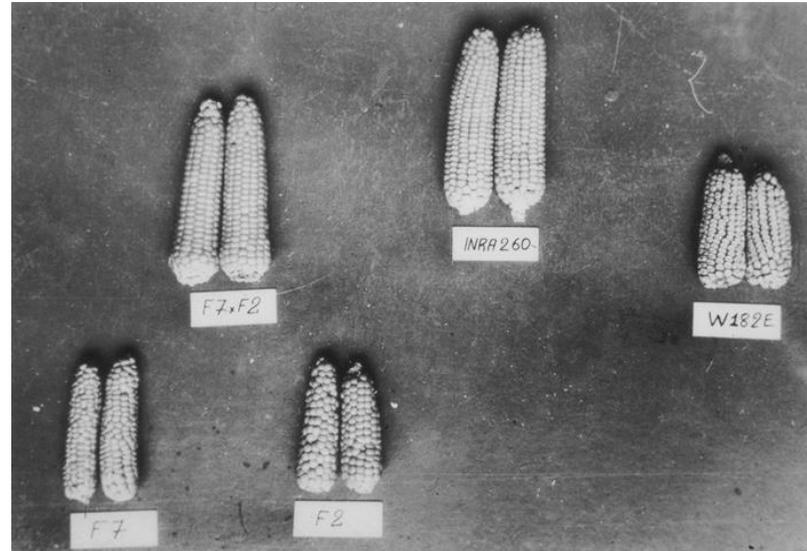


1. Les premières étapes de la domestication du maïs :
domestication au sens strict
 2. Nouvelles adaptations environnementales liée à l'expansion géographique, nouveaux caractères liés à la diversification usages
 3. **Peut-on parler de domestication moderne du maïs ?**
- Conclusion et perspectives

Sélection moderne du maïs liée à l'invention des hybrides (Shull, 1908)

Exemple de la France

- Lignées développées à partir de variétés traditionnelles françaises à grain cornés
- Hybrides denté x corné développés par l'INRA après la 2^{de} guerre mondiale (1950s), productivité supérieure d'environ 20 % aux hybrides de même maturité
- Adoptés par les agriculteurs du nord de la France, schéma continué ensuite par les sociétés privées



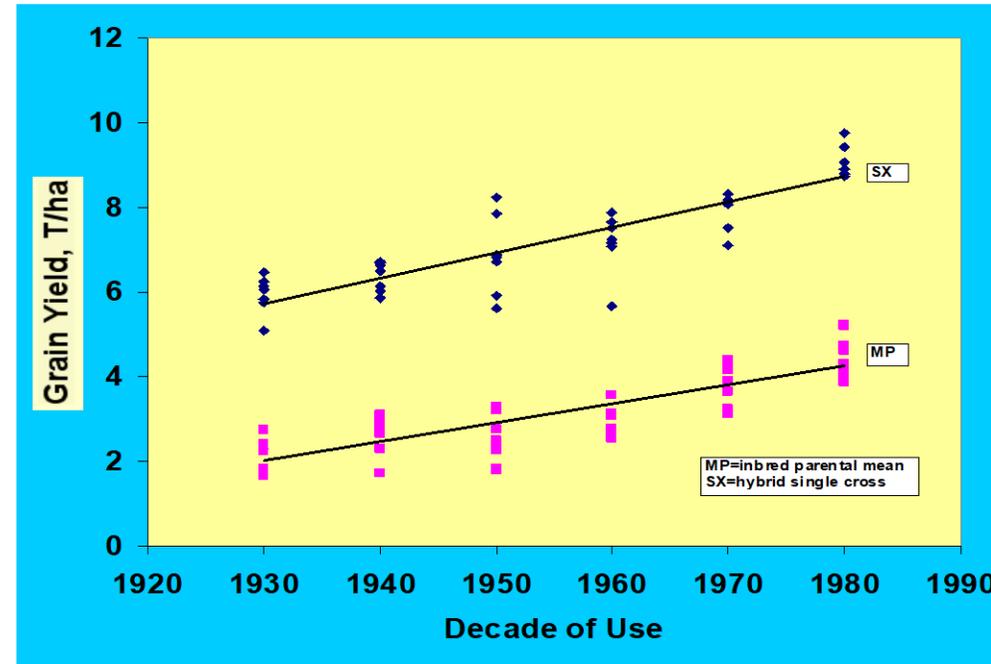
Source: INRAE
Versailles (1961)



André Cauderon

-> combine des facteurs d'adaptation environnementale des maïs cornés européens (printemps frais, automne pluvieux) avec la productivité des dentés d'Amérique du Nord

Progrès génétique
des hybrides et
leurs lignées
parentales, société
Pioneer (Duvick,
2002)



hybrides

Lignées
parentales

Les progrès des lignées ont permis la production d'hybrides F1 viables économiquement à partir des années 1960 (avant : hybrides doubles ou trois voies)

→ Peut être vu comme un nouveau caractère : l'**adaptation à la consanguinité** (purge du fardeau génétique)

→ L'invention des hybrides ne peut pas être assimilée en elle-même à un phénomène de domestication mais en a eu les conséquences à moyen terme

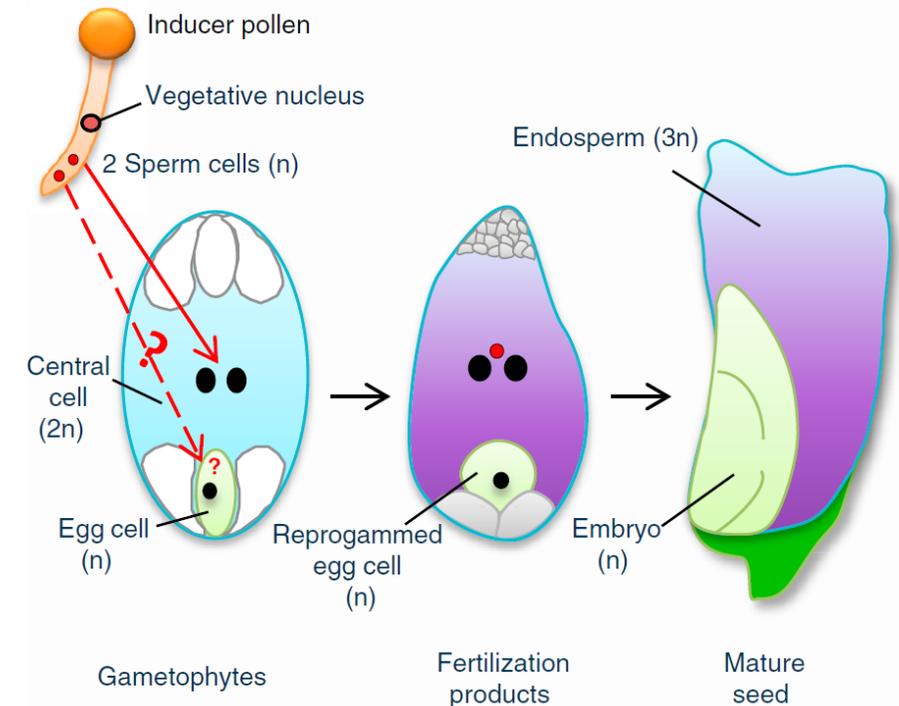
Autres caractères nouveaux et héréditaires liés au contrôle de la reproduction

Stérilité mâle cytoplasmique découverte par Rhoades en 1933. Permet de produire des hybrides sans recours à une castration physique.

Haplo-diploidisation par Gynogénèse in situ

- Capacité à produire du pollen induisant des embryons haploïdes : rôle clé du gène NLD (« not like dad », Gilles 2017)
- Capacité de doublement des individus haploïdes (groupe Lubberstedt, ISU)

-> ***s'est généralisée pour produire les lignées***



Gilles et al., 2017, Current Biology

Et aussi ***applications de la transgénèse*** (Tolérance au glyphosate notamment)

Résumé

- **Le maïs représente un cas extrême de syndrome de domestication**, sans barrière reproductive, liée très essentiellement au départ à deux gènes, *tb1* et *tga1*
- **Diversification spectaculaire** des caractères d'adaptation environnementale (phénologie) et d'usage
- Sélection moderne de **caractères liés à la reproduction**, facilitant la création variétale

Perspectives

- **Attention à la diversité génétique**, le type hybride élite nord-américain est devenu prépondérant à l'échelle mondiale (cf. Smith, 2022)
- Changement climatique, transition agroécologique et alimentaire amènent de **nouveaux cahiers des charges** pour des variétés de maïs "disruptives":
 - ✓ adaptation aux stress extrêmes au détriment du potentiel en condition favorables (cf. Welcker et al., 2022)
 - ✓ Fixation de l'azote (bactéries dans mucilage sur racines aériennes)
 - ✓ ...



Van Deynze et al., 2018

Reconnaissance envers
tous les acteurs de cette
domestication pour
l'héritage qu'ils nous
laissent

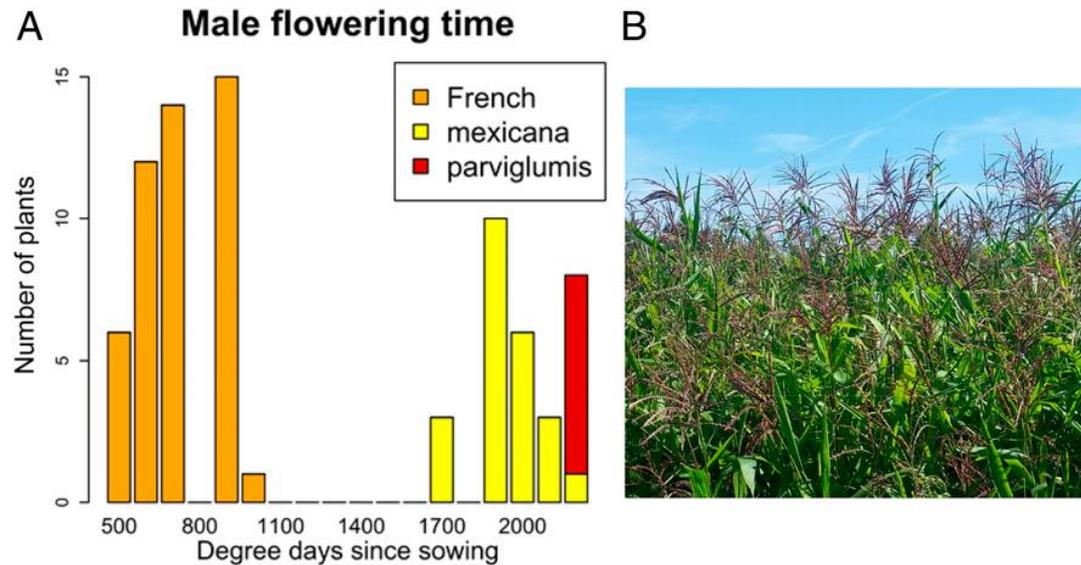
Merci pour votre attention



Flux de gènes reverse

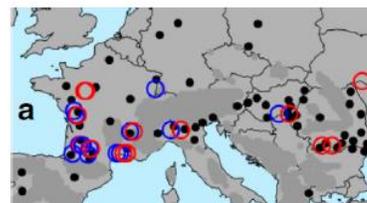
Adaptive introgression from maize has facilitated the establishment of teosinte as a noxious weed in Europe

Valérie Le Corre^{a,1} , Mathieu Siol^a , Yves Vigouroux^b , Maud I. Tenailon^c , and Christophe Délye^a 

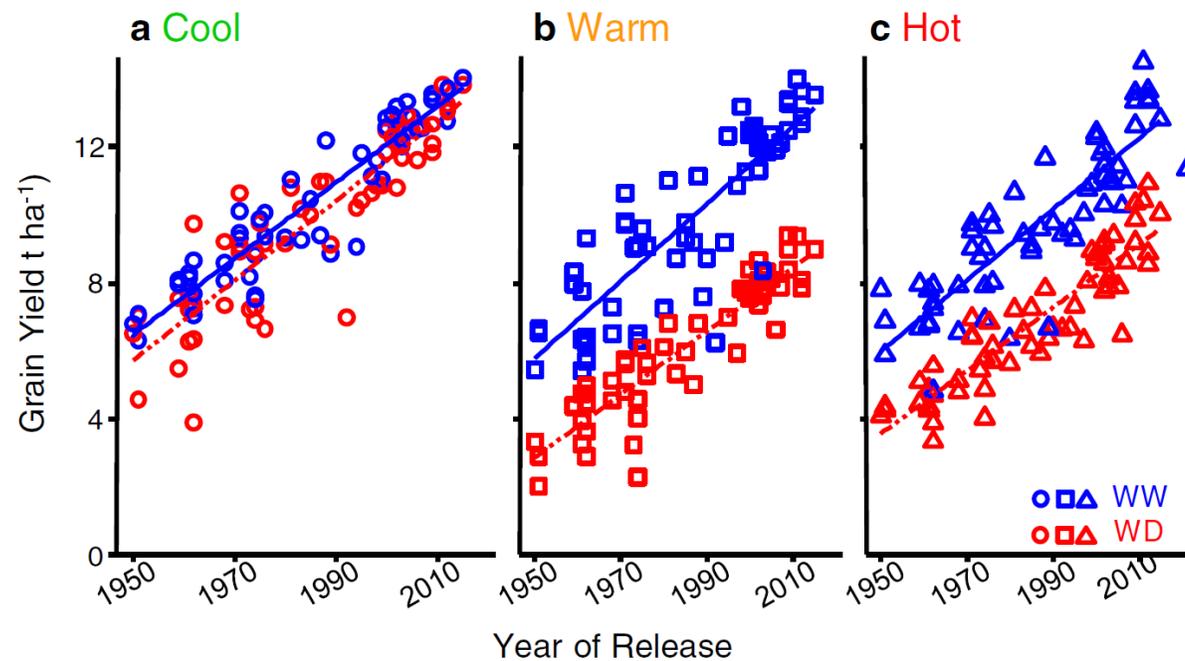


Genetic Gain in Europe (Welcker et al., 2022, F. Tardieu's group at LEPSE)

Assessment of hybrid varieties released between 1950 and 2010 in a same field network, 26 well “envirotyped” experiments



Genetic gain of yield was strong (101 kg ha⁻¹ per year) and *similar in all studied environmental scenarios* (WW: well watered; WD: water deficit), also observed in the US (Duvick 2002)



Physiological adaptive traits are a potential allele reservoir for maize genetic progress under challenging conditions

Claude Welcker^{1,14}, Nadir Abusamra Spencer^{1,14}, Olivier Turc^{1,14}, Italo Granato¹, Romain Chapuis², Delphine Madur³, Katia Beauchene⁴, Brigitte Gouesnard⁵, Xavier Draye⁶, Carine Palafre⁷, Josiane Lorgeou⁸, Stephane Melkior⁹, Colin Guillaume¹⁰, Thomas Prester¹¹, Alain Murigneux¹², Randall J. Wisser¹, Emilie J. Millet¹³, Fred van Eeuwijk¹³, Alain Charcosset³ & François Tardieu^{1,14}