

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

NOUVELLE
FORMULE



FORMULE
PASSION
-28%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-42%



8,20€*



6,50€*



4,90€*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
IPV8E20

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E50

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
DPV4E90

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____@_____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

PAS480P

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

POURQUOI LE MAÏS VIENT DU POP-CORN

Ou comment la solution récente d'une énigme tricentenaire – de quelle plante sauvage le maïs est-il issu? – a renversé ce qui semblait une évidence: l'origine du pop-corn.

La provenance géographique du maïs est claire; en 1493, Christophe Colomb revient de son premier voyage avec des grains récoltés à Cuba. Plus tard, en 1535, lors de sa première remontée du Saint-Laurent, Jacques Cartier fonde Montréal au milieu de champs de maïs (ou blé d'Inde) cultivés par les Iroquois. Le maïs est donc américain. Mais de quelle plante sauvage provient-il? Dans la plupart des cas, la réponse à une telle question est évidente. Par exemple, quand on compare cerisiers sauvages et cerisiers cultivés, fraisiers des bois et fraisiers cultivés... inutile d'être un bon botaniste pour constater que, globalement, à part des variations sur le fruit, tout reste égal par ailleurs. Or, pour le maïs, aucune plante sauvage ne paraît lui ressembler. La réponse n'est apparue avec certitude que depuis peu de temps au terme d'une enquête longue et

conflictuelle, bousculant au passage une idée bien ancrée: non, le pop-corn ne vient pas du maïs...

ACTE I. LA VRAIE NATURE DE *ZEa CANINA*

Au milieu du XVIII^e siècle, le naturaliste suédois Carl von Linné nomme le maïs *Zea mays*. En 1784, l'agronome Antoine Parmentier publie le premier ouvrage sur le maïs. Un demi-siècle plus tard, en 1832, le botaniste allemand Heinrich Schrader décrit une poacée (autrefois graminée) d'Amérique centrale, appelée téosinte. Il la baptise *Euchlaena mexicana* et la considère comme proche du riz. Or, en 1896, José Segura, un agronome mexicain, découvre que téosinte et maïs sont interfertiles. Réalisant expérimentalement de tels croisements, il constate que les hybrides sont identiques à *Zea canina*, une plante trouvée dans la nature et décrite, en 1891, par le botaniste

L'épi femelle est petit et distique, c'est-à-dire que la douzaine de grains se distribue en deux rangées. Il peut se désarticuler, c'est-à-dire qu'à maturité, les grains se dissocient, ce qui facilite leur dissémination. Enfin, ces derniers sont protégés intégralement dans une enveloppe (cupule) coriace.



Téosinte

La téosinte forme un buisson: de la tige centrale partent plusieurs longues branches latérales, chacune portant de nombreux petits épis femelles et, en situation terminale, une inflorescence composée de fleurs mâles – une grappe de grappes appelée une panicule.

L'épi est polystique : ses quelque 300 grains sont organisés en plusieurs rangées. Les grains ne peuvent se désarticuler et sont enchâssés par deux dans des cupules très réduites qui les laissent à nu – des désavantages pour une plante sauvage, mais des avantages pour le cultivateur...

EN CHIFFRES

5 000

C'est le nombre de plantes de deuxième génération que George Beadle et Paul Mangelsdorf ont chacun produites en 1939 par croisements de maïs et de téosinte.

85 %

du génome de la lignée pure de maïs B73 est constitué de transposons, c'est-à-dire d'éléments mobiles qui s'y sont insérés. Ce génome de $2,3 \times 10^9$ bases compte environ 32 000 gènes codants.

7

C'est le nombre de taxons qui décrivent aujourd'hui ce que l'on appelait téosinte. Trois sont des sous-espèces de *Zea mays* (les sous-espèces *parviglumis*, *mexicana* et *huehuetenangensis*) ; quatre sont des espèces à part entière du genre *Zea* (*Zea luxurians*, *Zea nicaraguensis*, *Zea diploperennis* et *Zea perennis*).



Maïs moderne

Le maïs comporte une haute tige unique arborant à son sommet une panicule mâle. Une ou deux très courtes branches sont terminées par de gros épis femelles pourvus de nombreux grains.

américain Sereno Watson comme une nouvelle espèce. C'est une surprise de taille, car téosinte et maïs paraissent bien différents, tant dans leur structure que dans les caractères de leurs épis (voir la figure ci-dessus).

ACTE II. OÙ L'ON EXPLORE LES CHROMOSOMES

La découverte de cette interfertilité survient quelques années avant la « redécouverte », en 1901, des lois de Mendel sur l'hérédité. Les généticiens commencent alors à explorer le matériel héréditaire de divers organismes en utilisant des

mutants trouvés dans la nature. Parmi eux, Rollins Emerson, de l'université Cornell, aux États-Unis, s'intéresse au maïs. Il s'entoure de plusieurs étudiants, dont deux au nom désormais célèbre, George Beadle et Barbara McClintock.

Beadle, Prix Nobel 1958, est surtout connu pour ses travaux de génétique des mutants métaboliques du champignon *Neurospora crassa*. Avec Edward Tatum, il proposa, en 1941, l'hypothèse simplificatrice « un gène – une enzyme », étape qui se révéla indispensable pour approcher le fonctionnement du gène. McClintock, Prix Nobel 1983, est la cytogénéticienne de génie qui, en 1950, fut la première à détecter dans le génome l'existence d'éléments mobiles, appelés « gènes sauteurs » et aujourd'hui transposons.

En 1932, Emerson et Beadle arrivent à la conclusion que, suivant leur garniture chromosomique, il existe plusieurs formes de téosinte, dont les hybrides avec le maïs ont plus ou moins de succès reproducteur. Les hybrides maïs-téosinte mexicaine du type Chalco sont parfaitement fertiles, et la disposition des gènes sur les chromosomes est identique chez les deux espèces. Ils en déduisent que la >



Retrouvez les Chroniques de l'évolution sur www.pourlascience.fr

> téosinte Chalco et le maïs sont une seule et même espèce et, en 1939, proposent cette solution pour l'origine du maïs. Mais ce n'est pas aussi simple, comme nous allons le voir. En 1972, d'ailleurs, ces deux plantes seront classées comme des sous-espèces (ssp.) différentes, respectivement *Zea mays* ssp. *mexicana* et *Zea mays* ssp. *mays*.

ACTE III. L'ÉNIGME DES CINQ GÈNES

Paul Mangelsdorf, un agronome très en vue aux États-Unis, travaillant à la station agronomique expérimentale du Texas, s'intéresse également aux hybrides téosinte-maïs. Comme Beadle, il mène des croisements jusqu'à obtenir des F₂, c'est-à-dire des plantes de deuxième génération. Indépendamment, en 1939, les deux généticiens arrivent au même résultat : 2 individus sur 500 présentent un retour vers l'une des deux plantes parentales, à savoir le maïs ou la téosinte. Les lois de Mendel leur font postuler l'existence de quatre ou cinq « gènes » majeurs. Mêmes résultats maïs, comme nous allons le voir, leurs interprétations sont complètement différentes !

Mangelsdorf est prisonnier d'une vision darwinienne orthodoxe, celle popularisée par le biologiste britannique Ronald Fischer : l'évolution procède par accumulation graduelle de petites modifications héréditaires (mutations), dûment sélectionnées. Il lui semble donc impossible d'imaginer que l'évolution de seulement cinq gènes puisse suffire à expliquer la domestication du maïs, avec des changements si profonds de l'aspect des plantes obtenus en si peu de temps.

Il propose alors l'« hypothèse tripartite » suivante : les cinq gènes sont, en réalité, cinq groupes de gènes qui ont évolué lentement. Cette évolution ne se serait pas réalisée à partir de la téosinte, mais d'un maïs sauvage, actuellement disparu. Or cette hypothèse amène une nouvelle question : d'où vient la téosinte ? Celle-ci serait d'origine hybride, le descendant d'un croisement entre cet hypothétique maïs sauvage et une autre plante, *Tripsacum dactyloides*, qui, elle aussi, peut s'hybrider avec le maïs. Enfin, la principale source de la diversité existante dans les variétés modernes de maïs aurait été une « infection » par ce *Tripsacum*...

Curieuse démarche, qui consiste à proposer une hypothèse indémontrable pour remplacer le problème de l'origine d'une plante cultivée (le maïs) par celui d'une plante sauvage (la téosinte) !



Une seule variété de maïs, *Zea mays* ssp. *mays* var. *everta*, est capable de produire du pop-corn. Mais la téosinte aussi...

Pourtant, ce sera longtemps l'hypothèse la plus populaire.

De son côté, Beadle n'a aucun carcan conceptuel. Il se tient au courant des résultats récents en génétique, et en particulier ceux du théoricien américain Sewall Wright, qui démontre mathématiquement qu'une évolution rapide peut se réaliser, à condition qu'il y ait, au départ, autonomie d'une très petite population – ce qu'on appelle un goulot d'étranglement.

Beadle se forge donc un tout autre scénario : les agriculteurs ont utilisé une petite population de téosinte à partir de plants judicieusement triés dans la nature, puis l'ont mise sous forte sélection – la domestication. Or les principaux caractères phénotypiques différenciant téosinte et maïs sont au nombre de cinq : une enveloppe – la cupule – qui entoure les grains ou non ; un ou deux grains par cupule ; désarticulation de l'épi ou non ; deux ou de nombreux rangs de grains par épi ; longues branches axillaires ou non.

Beadle postule alors que chacun de ces traits est sous la dépendance d'un des gènes mis en évidence par l'étude des plantes F₂ (de deuxième génération). Cette hypothèse, qu'on peut résumer par « un gène – un caractère », est vraisemblablement la première phase du raisonnement qui, plus tard, le conduira à la maxime « un gène – une enzyme », quand il comprendra que chacun des mutants

métaboliques de *Neurospora crassa* présente la déficience d'une enzyme.

ACTE IV. LA TÉNACITÉ DE JOHN DOEBLEY

L'énigme des cinq gènes reste plusieurs dizaines d'années sans réponse, mais n'est pas oubliée pour autant. Le généticien John Doebley, de l'université du Wisconsin, est dans la continuité intellectuelle de Beadle. Dans les années 1990, son laboratoire utilise les techniques et concepts les plus modernes pour trancher entre l'« hypothèse téosinte » de Beadle et l'« hypothèse tripartite » de Mangelsdorf. Tout d'abord, en analysant les propriétés physiques des protéines de différents plants de téosinte, il démontre qu'il existe une grande variété de téosintes, dont certaines sont actuellement répertoriées comme sous-espèces de *Zea mays*.

Par cette approche protéique, le maïs est pratiquement indistinguable d'une téosinte mexicaine appelée « Balsas », *Zea mays* ssp. *parviglumis*. Les protéines sont quasi identiques, mais les plantes sont très différentes ! Cela signifie que les gènes sont structurellement les mêmes, mais que leurs expressions diffèrent.

Des études menées en 2002, fondées sur la diversité de séquences répétées d'ADN dans le génome – dites microsatellites – confirmeront cette proximité et ajouteront deux informations majeures.

La domestication du maïs est un événement unique – ce qui n'était pas évident – et il est survenu il y a 9000 ans environ, ce qui est en accord avec les données archéologiques.

Mais revenons à John Doebley. Parallèlement à ses recherches sur les plants de téosinte, il lance des études ambitieuses qui conjuguent la recherche de nombreux marqueurs moléculaires et l'utilisation de nouvelles méthodes statistiques, ce qui permet de localiser des «locus de caractères quantitatifs» ou QTL (pour *quantitative trait locus*). Un tel élément est une région plus ou moins grande d'un chromosome associée à un caractère quantitatif – comme le nombre de rangs dans l'épi ou le nombre de ramifications de la plante. La plupart du temps, dans une telle région chromosomique sont localisés plusieurs gènes. Dès 1993, John Doebley arrive à un résultat majeur: cinq régions du génome ont un rôle particulièrement puissant quant aux principaux caractères phénotypiques. Cinq, le même nombre que celui trouvé auparavant par Beadle et Mangelsdorf!

ACTE V. LE MUTANT DU MAÏS QUI RESSEMBLAIT À LA TÉOSINTE

La localisation d'un QTL n'est qu'une étape, car on ignore s'il se compose de nombreux gènes interdépendants – l'hypothèse Mangelsdorf –, ou s'il contient un gène majeur à découvrir – l'hypothèse Beadle. Le gène *tb1* (pour *teosinte branched 1*) est connu depuis longtemps, car des mutants de ce gène trouvés en 1959 chez le maïs font surgir un port proche de celui de la téosinte: un maïs «branché», maïs dépourvu d'épis femelles fertiles. Or la situation du gène *tb1* sur le chromosome coïncide avec celle d'un des QTL trouvés.

Sa localisation chromosomique avait été déterminée par de la génétique classique à une époque où l'on ne pouvait aller plus loin; mais à présent, à la fin des années 1990, on peut avoir accès à la séquence du gène et étudier son expression spatiotemporelle. Étude délicate, car son expression est complexe, étant donné que les ARN messagers du gène, intermédiaires entre le gène et la protéine, sont trouvés dans de multiples organes (bourgeon, primordium d'étamine...). Pourtant un thème commun apparaît: tous les organes où le gène *tb1* s'exprime sont de taille réduite ou avortés chez le maïs normal, mais développés chez le maïs portant le gène *tb1* muté. Le gène *tb1* semble donc agir comme un régulateur négatif de la croissance des organes végétatifs.

La comparaison téosinte-maïs devient alors riche d'enseignement, car l'expression du gène *tb1* dans les inflorescences du maïs est deux fois plus importante que celle mesurée dans les inflorescences de la téosinte. Par ailleurs, il n'y a aucune expression de *tb1* dans les bourgeons axillaires de la téosinte, alors que l'expression est forte chez le maïs. Comme soupçonné précédemment, la mutation paraît donc concerner non pas la partie codant la protéine, mais la partie régulatrice de l'expression du gène.

La domestication du maïs s'est bien produite très vite, avec des changements drastiques

Or une analyse moléculaire fine le confirme en 2011: les parties codantes du gène diffèrent peu entre les deux espèces, alors qu'on observe de grandes différences entre leurs séquences régulatrices. Chez le maïs, on remarque que la séquence régulatrice a subi un «balayage sélectif» qui montre une baisse de diversité, signe d'une forte pression de sélection. Surtout, un transposon s'y est inséré, lequel change complètement le mode de régulation du gène. Ainsi voit-on revenir le rôle clé des éléments mobiles déchiffrés par Barbara McClintock!

Par conséquent, Beadle avait raison et le scénario de Mangelsdorf s'effondre: le maïs provient de la téosinte, et la domestication s'est vraisemblablement bien produite très vite, avec des changements drastiques de port et de structure de l'épi, comme le suggère l'évolution du gène *tb1*.

Et le pop-corn, me direz-vous? Beadle s'est évidemment demandé ce qui a poussé les agriculteurs à sélectionner des plantes pourvues de grains entourés de leur cupule coriace. Or des grains de téosinte projetés sur des pierres très chaudes éclatent et forment du pop-corn quand leur protection explose. L'invention du pop-corn est à l'origine du maïs, et non l'inverse! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Doebley, **The genetics of maize evolution**, *Annu. Rev. Genet.*, vol. 38, pp. 37-59, 2004.

A. Weber et al., **The genetic architecture of complex traits in teosinte (*Zea mays* ssp. *parviglumis*): new evidence from association mapping**, *Genetics*, vol. 180, pp. 1221-1232, 2008.

Y. Matsuoka et al., **A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping**, *PNAS*, vol. 99(9), pp. 6080-6084, 2002.

A. Studer et al., **Identification of a functional transposon insertion in the maize domestication gene *tb1***, *Nature Genetics*, vol. 43(11), pp. 1160-1163, 2011.

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

BAVAROIS SANS CRÈME

Comment s'affranchir de la crème et résoudre le problème délicat du mélange de la purée de fruits avec la crème fouettée froide?

Les bavares sont des entre-mets alliant le sucré et l'acide du fruit à la saveur douce et à la légèreté du foisonnement de la crème. En pratique, on mêle une purée de fruits additionnée de gélatine à de la crème Chantilly. Évidemment, il y a des variantes. Ainsi, en version salée, on peut remplacer la purée sucrée par une purée d'avocats, d'asperges, de tomate, de poisson, un caviar d'aubergine, etc., et la crème Chantilly par une crème fouettée non sucrée.

Il y a une difficulté: en mélangeant les deux masses essentielles, à savoir la purée gélifiée, qui ne doit pas être prise, et la crème fouettée, qui ne prend bien qu'à froid, le froid de la crème peut faire prendre la gelée localement et engendrer ainsi des grumeaux caoutchouteux. Examinons le problème.

La gélification des solutions de gélatine, qui produit un réseau emprisonnant la solution, s'effectue vers 36 °C. La crème fouettée s'obtient par stabilisation des bulles par des protéines, puis par l'établissement d'un réseau de matière grasse cristallisée, lorsque les globules gras de la crème sont malaxés à froid. Pour l'analyse, il est bon de savoir que la matière grasse commence à fondre dès -10 °C et finit de fondre à 55 °C, mais, pour constituer un réseau continu, un minimum de 5 % de cette matière grasse doit passer à l'état solide (c'est pourquoi, en été, la crème monte mieux si l'on y ajoute des glaçons).

Il y a quelques années, Keiichi Ihara et ses collègues, de la société japonaise Morinaga, ont examiné la structure des crèmes fouettées selon la température de battage (*Journal of Dairy Science*, vol. 93, pp. 2887-2895, 2010). Ils ont notamment

Un bavares à la fraise et au kiwi. Classique ou sans crème?



montré que la taille des bulles diminue quand les crèmes sont fouettées aux plus hautes températures utilisables.

Cependant, tout cela est classique. Pourrions-nous conserver le principe du bavares, sans crème? Oui, en confectonnant deux préparations dénommées *liebig* (une émulsion gélifiée) et *würtz* (une mousse gélifiée).

Partons d'environ 50 grammes d'eau, et dissolvons une feuille de gélatine (il faut faire tremper la feuille dans l'eau, puis chauffer quand elle est ramollie). Dans cette solution gélifiée, ajoutons de l'huile en fouettant: on obtient une émulsion blanche, qui gélifie quand elle refroidit et forme une émulsion gélifiée nommée *liebig* en l'honneur du chimiste allemand Justus von Liebig (qui a donné son nom à une société de concentrés de bouillon de viande). La transition de gélification de cette émulsion s'effectue vers 36 °C.

Par ailleurs, pour faire un *würtz*, partons d'un verre d'eau où l'on ajoute deux feuilles de gélatine. On laisse tremper, on chauffe, puis on fouette: on obtient une mousse blanche qui peut également gélifier quand on la refroidit à moins de 36 °C.

Avant la gélification de ces deux masses, mélangeons-les, comme on fait d'une crème fouettée et d'une purée de fruit gélifiée, et nous obtiendrons le même système physicochimique que

celui du bavares, sans l'écueil associé aux températures. Évidemment, l'eau pure est remplaçable par une autre solution aqueuse ou par une purée, solution aqueuse où sont dispersées des particules solides. Et l'on peut substituer à l'huile simple une macération, obtenue en laissant quelques jours du café moulu dans de l'huile, en cuisant des carapaces de crustacés dans l'huile, ou en macérant, toujours dans l'huile, de la cannelle... ■



LA RECETTE

- 1 Dans un récipient, verser 50 grammes de jus d'orange, ajouter une feuille de gélatine (environ 2 grammes) et une pincée de sel.
- 2 Laisser la gélatine s'amollir, puis chauffer doucement pour la dissoudre.
- 3 Ajouter un peu d'extrait liquide de vanille.
- 4 Fouetter en ajoutant de l'huile d'olive goutte à goutte, comme lorsqu'on monte une sauce mayonnaise, et s'arrêter quand on a une émulsion blanche de consistance crémeuse.
- 5 Dans un autre récipient, mettre 200 grammes de jus de carotte et deux feuilles de gélatine. Laisser reposer pour que la gélatine s'amollisse, puis chauffer doucement afin de la dissoudre.
- 6 Fouetter pour obtenir le *würtz*.
- 7 Mélanger les deux masses émulsifiées et foisonnées. Laisser prendre la préparation.