

tombe, avec une griffe et une dent de canidé. Dans la reconstitution, l'homme est posé sur une hache, un outil de défrichage dont plusieurs exemplaires ont été retrouvés dans les sépultures de ces premiers éleveurs (de bovins) et cultivateurs.

Y. Coppens sollicite ce type de travaux, car « on a beau avoir de l'imagination, on n'en a pas assez pour comprendre à quoi ressemblaient nos ancêtres. Pour nous, c'est une révélation, une image inaccessible par ailleurs ». Plus encore, ces reconstitutions sont parfois des sources d'informations. Par exemple, le dimorphisme sexuel apparaît de façon plus évidente qu'avec les seuls osse-

ments. Or les différences de stature entre mâles et femelles renseignent sur leur environnement. Un dimorphisme peu prononcé traduit souvent un paysage couvert, forestier, où les agressions et les prédateurs étaient rares. En revanche, un dimorphisme accentué trahit un milieu ouvert, telle la savane, dont les dangers ont sélectionné des mâles qui protégeaient les femelles et les enfants de leur groupe. C'était le cas de *Lucy* et de *Lucien*, un gros mâle de la même espèce (*Australopithecus afarensis*) vivant il y a plus de trois millions d'années.

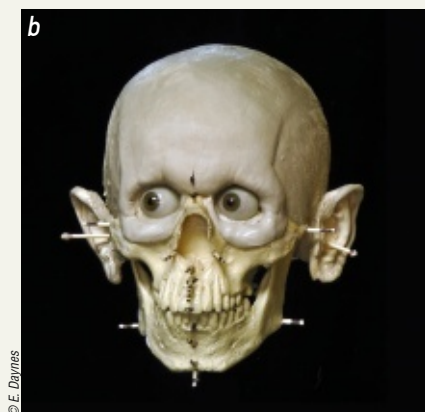
Enfin, ces reconstitutions ont éclairé la filiation des Australopithèques. En effet,

la taille de *Lucien*, sa corpulence, sa face, son allure font d'*A. afarensis* non pas l'ancêtre du genre *Homo*, mais plutôt celui de *Paranthropus*, les deux genres étant contemporains (entre 2,7 et 1 millions d'années). Ainsi, les reconstitutions des anciens hominidés renseignent sur leur apparence, leur milieu et leur devenir en tant qu'espèce. Et elles stimulent l'imagination des paléontologues. ■

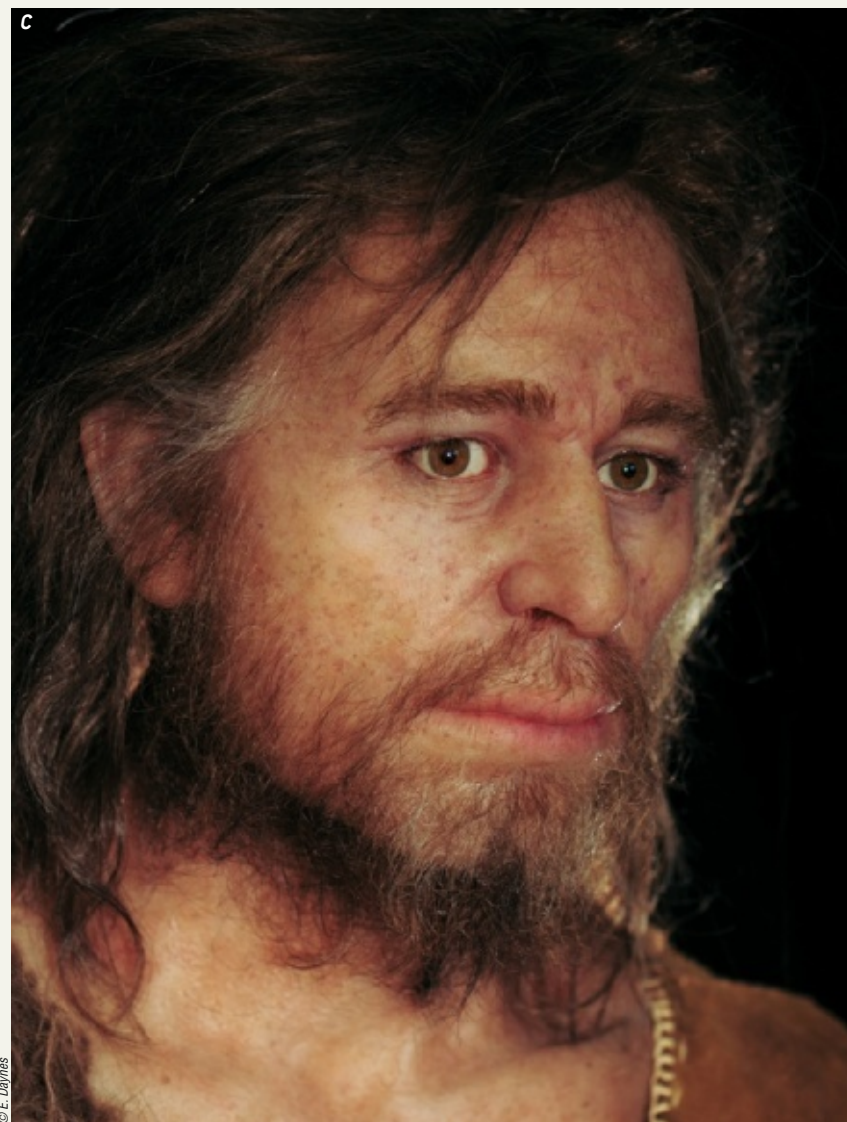
L'identité retrouvée, du 1^{er} octobre 2011 au 23 septembre 2012, Musée départemental de Préhistoire d'Île-de-France, à Nemours.



© D. Mordant



© E. Daynes



© E. Daynes

IDÉES DE PHYSIQUE

L'effet domino

On peut estimer la vitesse de propagation des chutes dans une file de dominos. Pour autant, le phénomène garde ses zones d'ombre.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

L'effet domino ? L'expression a envahi de nombreux domaines, de la géopolitique à la finance. Elle fait référence aux chutes successives observées dans une file de dominos lorsqu'on a fait vaciller le premier élément : il fait tomber le domino voisin, qui se couche sur le suivant, et ainsi de suite. Lors de l'événement *Domino Day* de 2009, 4 491 863 dominos sont tombés sur les 4 800 000 placés, ce qui a établi un nouveau record du monde. Au-delà de la performance, les vidéos du spectacle intriguent : à quelle vitesse le « front de chute » se propage-t-il ? Y a-t-il un espacement optimal qui maximise cette vitesse ? Quelle pente les dominos peuvent-ils gravir ? Malgré l'apparente simplicité du système, des travaux récents montrent que tout n'est pas encore bien compris.

La vitesse par analyse dimensionnelle

Une analyse dite dimensionnelle permet d'estimer la vitesse de propagation de l'effondrement d'une ligne de dominos. Quels sont les paramètres physiques pertinents ? Il y a d'abord l'accélération g de la pesanteur, puisque c'est la gravité qui fait tomber les dominos. Ensuite, il y a la hauteur h d'un domino dressé et le rapport k

entre l'espacement entre dominos successifs et cette hauteur ; ces deux paramètres caractérisent entièrement la géométrie du problème — à condition de supposer que l'épaisseur du domino est suffisamment faible par rapport aux deux autres longueurs pour n'introduire que de petites corrections au cas idéal du domino infiniment mince. Cette épaisseur est néanmoins utile pour qu'un domino puisse tenir debout...

La masse d'un domino n'intervient pas : en effet, dans les problèmes où la gravité

est la force motrice, et tant que l'on ne considère pas de forces dissipatives, la masse n'apparaît jamais dans le résultat final, car elle est en facteur à la fois dans le poids, qui provoque le mouvement, et dans l'inertie, qui s'oppose aux changements de vitesse. C'est ainsi que la période d'oscillation d'un pendule ne dépend pas de sa masse ou que la vitesse des vagues, encore nommées ondes de gravité, ne fait pas intervenir la densité de l'eau.

Avec les trois paramètres g , h et k ainsi identifiés, il n'est possible d'obtenir une vitesse que d'une seule façon : en multipliant $\sqrt{gh}$ (qui a la dimension d'une vitesse) par une fonction inconnue de k (qui est sans dimension). En général, dans de telles analyses dimensionnelles, les coefficients de proportionnalité sont de l'ordre de 1 (c'est un acte de foi du physicien !) ; il en résulte que pour des dominos hauts de quatre centimètres, la vitesse sera de l'ordre de 60 centimètres par seconde. Une expérience chez soi ou le visionnage d'une vidéo nous convainc que l'estimation donne le bon ordre de grandeur.

Comment aller plus loin ? Une première approche est de considérer qu'un domino déséquilibré bascule sans rester en contact avec le domino précédent jusqu'à venir frapper le suivant. Avec cette hypothèse, la propagation se fait par une succession de chocs et basculements indépendants.



Dessins de Bruno Vaara

1. LA VITESSE DE L'ONDE DE CHUTE dans une file de dominos peut être estimée en ordre de grandeur à l'aide d'une analyse dimensionnelle. Cette dernière consiste à combiner les paramètres physiques pertinents du problème (ici l'accélération de la pesanteur, la hauteur d'un domino, l'espacement entre dominos successifs) de façon à former une grandeur ayant la dimension d'une vitesse. On obtient ainsi une vitesse de l'ordre de 60 centimètres par seconde pour des dominos hauts de quatre centimètres, valeur du même ordre de grandeur que celles constatées.

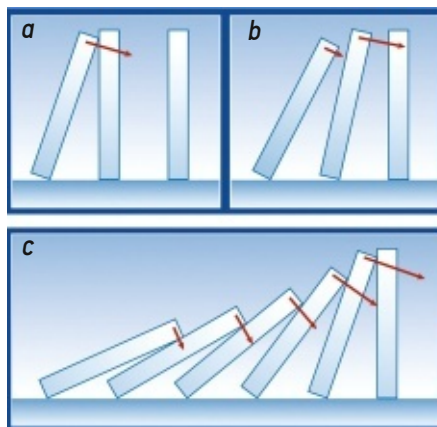
Cette modélisation a l'avantage d'expliquer pourquoi la file de dominos atteint une vitesse limite. Lors d'un choc, le domino en mouvement est penché : par conséquent, la vitesse de son point d'impact n'est pas horizontale, mais inclinée vers le bas. La surface frappée est en revanche verticale, mais le domino percuté, initialement immobile, acquiert une vitesse surtout horizontale. À la différence du carreau à la pétanque, seule une partie de l'énergie cinétique sera donc transférée d'un domino au suivant.

Un transfert d'énergie à deux ?

Supposons, pour fixer les idées, que la moitié de l'énergie cinétique soit transférée. Que se passe-t-il au début de la ligne ? Lors de l'impact, le premier domino, parti sans vitesse initiale, a acquis une énergie cinétique $\mathcal{E}$ égale à l'énergie potentielle perdue lors de sa chute depuis la position verticale. Le deuxième domino commence donc sa chute avec une énergie $\mathcal{E}/2$ et, au moment de percuter le troisième, se retrouve avec une énergie $\mathcal{E}$ supplémentaire, soit $3\mathcal{E}/2$ au total. Le troisième domino part avec l'énergie $3\mathcal{E}/4$ et se retrouve avec $7\mathcal{E}/4$ au total, et ainsi de suite. Au fur et à mesure des chocs, les dominos gagnent ainsi de l'énergie, mais la vitesse ne croît pas indéfiniment : cette énergie tend vers une valeur limite (ici $2\mathcal{E}$).

Ce modèle se prête bien à des calculs analytiques ou numériques pour décrire avec précision la rotation du domino autour de son arête entre deux chocs, par exemple le calcul de la durée de la chute, puis de la vitesse de propagation. Hélas, en comparant les prédictions de ce modèle avec des mesures, on constate un franc désaccord, notamment sur l'évolution avec l'espacement des dominos.

Alors que le modèle prédit que la vitesse augmente fortement lorsqu'on rapproche les dominos (le choc ressemble alors de plus en plus à un carreau), la vitesse expérimentale varie très peu dès que la distance entre dominos est inférieure au quart de leur hauteur. Et si l'on cherche à affiner ce modèle



2. UN MODÈLE SIMPLIFIÉ DE L'EFFET DOMINO consiste à supposer qu'un domino qui bascule le fait sans être en contact avec le domino précédent, jusqu'à frapper le suivant (a, b). Dans cette hypothèse, la propagation s'effectue par une succession d'étapes impact-chute indépendantes. Ce modèle se prête bien aux calculs, mais ses prédictions s'écartent parfois beaucoup de la réalité. Les désaccords sont surtout dus au fait que les dominos restent en contact après un choc : la chute est ainsi un phénomène collectif qui met en jeu plusieurs dominos à la fois (c). L'analyse de la situation est alors beaucoup plus compliquée, et encore inachevée.

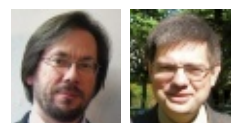
en intégrant des frottements ou des pertes d'énergie, on obtient, pour les espacements moyens, des vitesses de propagation inférieures aux vitesses expérimentales.

Pour comprendre l'origine de ces désaccords, il faut regarder des films pris avec des caméras rapides. Ils montrent que les dominos restent en contact après le choc : la chute est un phénomène collectif qui implique tout un ensemble de dominos, plus de cinq par exemple quand l'espacement est de l'ordre de 40 pour cent de la hauteur. Ces dominos appuient les uns sur les autres, si bien que le basculement du domino de tête fait aussi bouger ses prédécesseurs.

Une dynamique collective

Christophe Clanet, à l'École polytechnique, a un beau raisonnement pour déterminer l'énergie acquise par les dominos durant cette phase. Entre le moment où un domino entame sa chute et le moment où il percute le suivant, les autres dominos ont poursuivi leur rotation, chacun prenant l'inclinaison de celui qui le précédait. Par conséquent, à la fin, la figure s'est déplacée d'un domino : il y a un domino pour

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. M. J. van Leeuwen,
The domino effect,
American Journal of Physics,
vol. 78(7), pp. 721-727, 2010.

C. Clanet, **Dominoes race**, 2003
(<https://www.irphe.fr/~clanet/PaperFile/domino2.pdf>).

W. J. Stronge et D. Shu,
**The domino effect :
successive destabilization
by cooperative neighbours**,
Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 418,
pp. 155-163, 1988.

chaque angle intermédiaire, un domino debout en moins et un domino couché en plus. L'énergie récupérée entre deux chocs est donc l'énergie potentielle d'un seul domino vertical : elle ne dépend pas du tout de l'espacement entre dominos.

Que faire de cette brillante constatation ? Il est tentant d'imaginer que cette énergie alimente le mouvement du seul domino de tête. Il s'ensuit d'intrigantes prédictions, comme le calcul de la vitesse maximale de propagation ($\sqrt{3}$ fois la valeur estimée plus haut) et le fait que les dominos vont moins vite quand ils grimpent et quand ils descendent (ce qui reste surprenant) par rapport à la situation à plat.

Il est cependant difficile de s'en satisfaire. D'une part, il semble qu'il faille vraiment tenir compte de la dynamique d'ensemble : pour l'essentiel, cela revient à

introduire un moment d'inertie effectif (avec des contributions de tous les dominos en train de chuter) pour étudier le basculement du domino de tête. Subissant une partie du poids de tous les autres, il chute plus vite que s'il était seul. D'autre part, les mesures expérimentales ne donnant pas toujours les résultats escomptés, il faut peut-être tenir compte d'autres paramètres propres aux dominos. Leur épaisseur ? Les frottements mutuels ? Les frottements au sol ?

Nous sommes ainsi étonnés qu'on ne mentionne jamais la possibilité d'un glissement minime sur le sol au moment des chocs. Tous les modèles estiment que le domino bascule immédiatement sur son arête... Il y a donc encore de la marge (et du travail) pour approfondir ce sujet, qui résiste. De quoi se livrer à des expérimentations ce Noël avec les cadeaux des enfants ?



SCIENCE & GASTRONOMIE

Le minimum culinaire

Quatorze idées essentielles sont à retenir pour maîtriser la composante technique de l'activité culinaire.

Hervé THIS



Le cuisinier effectue des gestes qui provoquent des phénomènes : il cuit, et le steak brunit ; il fouette, et le blanc d'œuf foisonne et blanchit... Or la recherche des mécanismes des phénomènes est le propre de la science... laquelle peut avoir un impact sur la technologie, c'est-à-dire l'amélioration des pratiques. Examinons les 14 idées essentielles qui nous aident à cuisiner.

1) Les aliments sont majoritairement faits d'eau : viandes, légumes, poissons, fruits sont des assemblages de cellules, lesquelles enferment des solutions aqueuses.

2) L'eau s'évapore à toute température. C'est pour cette raison que les croûtes se forment, notamment.

3) Les aliments sans liquide sont durs. Pensons aux chips, où l'eau de l'intérieur des cellules de pomme de terre a été évaporée...

4) L'eau bout à 100 °C aux altitudes habituelles... et l'ébullition conduit à une augmentation de volume (un gramme d'eau conduit à environ un litre de vapeur).

5) Les aliments sont des « systèmes colloïdaux » : mousses, gels, émulsions, suspensions... Bien sûr, il y a aussi des solides purs (caramel durci), mais, le plus souvent, une certaine mollesse est de bon aloi... sans quoi nous y laisserions les dents.

6) Les systèmes colloïdaux étant formés de plus d'une phase, tenons compte de la phase « huile », par laquelle on désigne tout corps gras à l'état liquide : elle ne se dissout pas dans l'eau, et l'eau ne se dissout pas dans l'huile. Ajoutons que quand on écrit « eau », il faut penser thé, café, jus de fruits, bouillons, vins, etc. Et terminons par un corollaire : si l'huile ne se dissout pas dans

l'eau, ni l'eau dans l'huile, on peut, en revanche, disperser de l'eau dans l'huile ou de l'huile dans l'eau... et obtenir des émulsions délicieuses, telles que la mayonnaise.

7) Le sel et d'autres composés se dissolvent dans l'eau, mais pas dans l'huile : de l'huile où l'on aurait mis du sel resterait non salée, même après des siècles ! En revanche, on peut disperser du sel, qui reste solide, en le plaçant dans un corps gras solide.

8) Les composés odorants, peu solubles dans l'eau, sont au contraire solubles dans l'huile et dans la plupart des autres corps gras : le chocolat, le beurre, le foie gras...

9) Quand on voit une teinte blanche apparaître, pensons à une mousse ou à une émulsion. Par exemple, quand on bat du blanc d'œuf [jaune et transparent] en neige, il blanchit (quand il est éclairé par de la lumière blanche). Ou encore, si le gaspacho rosit quand on fouette de l'huile dans du jus de tomate, c'est parce que l'on disperse des gouttelettes d'huile et que l'on fait une émulsion.

10) Certains réarrangements d'atomes (ce qui est couramment nommé « réactions chimiques ») s'accompagnent de nouveaux goûts. Pensons au brunissement du rôti.

11) Certaines protéines coagulent. Par exemple, les protéines du blanc d'œuf, de la viande, du poisson, quand elles coagulent, engendrent respectivement de l'œuf dur, des terrines : une terrine est une sorte d'œuf dur de viande, si l'on peut dire.

12) Le collagène se dissout dans l'eau à plus de 55 °C : les cellules des tissus animaux (viandes et poissons) sont gainées de « tissu collagénique » et réunies en faisceaux par ce même tissu. Aussi, quand la viande est longtemps chauffée à plus de 55 °C, le tissu collagénique se désagrège, et les fibres peuvent se séparer. C'est la clef de l'attendrissement des viandes ou des poissons. D'ailleurs, quand cette « cuisson » a lieu dans une solution aqueuse, le tissu collagénique libère la gélatine, qui fait prendre le bouillon en gelée, au refroidissement. En outre, un parallèle existe entre le règne animal et le règne végétal. Dans les tissus végétaux, les cellules sont réunies par des parois, où les pectines sont le pendant des protéines collagéniques : quand on chauffe, les pectines se dégradent, et le tissu végétal s'amollit ; puis, quand on laisse refroidir, on obtient... de la confiture !

13) Les liquides migrent par capillarité. Ainsi, l'encre monte immédiatement entre les poils d'un pinceau... et un liquide qui a du goût peut s'introduire à cœur d'un filet de poisson. Un mécanisme à ne pas négliger.

14) Enfin, il y a l'osmose : quand on met un cornichon dans un vinaigre très salé, il se ratatine ; inversement, des mirabelles dans l'eau pure gonflent jusqu'à éclater. Un phénomène constant, en cuisine.

Voilà l'essentiel dont nous avons besoin. Mettons vite ces préceptes en cuisine !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr