

la rediffusion, due au recyclage du césium-137 disponible dans le sol, lors de la croissance de l'arbre. Pour cela, il quantifie les transferts et la mobilité du césium dans les couches organiques et minérales du sol.

Pour tester leurs simulations sur un jeu plus large de données, les chercheurs viennent de compiler l'ensemble des observations réalisées à Fukushima publiées dans plus d'une soixantaine d'articles. Forts de leur nouveau modèle et de cette méta-analyse, ils sont aujourd'hui à même de décrire ce qu'il est advenu du césium-137 depuis l'accident, dans une forêt typique de cèdres ou de cyprès.

UN SCÉNARIO EN TROIS PHASES

Le modèle TREE4 confirme un scénario en trois phases : à la fin mars 2011, le césium-137 rejeté dans l'atmosphère s'est déposé sur les forêts. La végétation a capté en moyenne 80 % de ce dépôt initial, principalement par les branches et les aiguilles, le sol en ayant reçu directement 20 %. Au cours des six premiers mois, les pluies qui lessivent la canopée et la chute des aiguilles et des branches font diminuer rapidement cette contamination dans les arbres et l'augmentent dans le sol. Ainsi au bout d'un an, en mars 2012, la répartition de l'inventaire s'est inversée puisque 80 % de la contamination se retrouve dans le sol. Elle a culminé au début de l'automne 2011 dans la couche organique pour migrer ensuite dans les premiers centimètres de la couche minérale, où le césium-137 s'est fixé, préférentiellement sur les argiles.

On entre ensuite dans une deuxième phase plus lente – qui peut durer une quinzaine d'années après l'accident. La décontamination de la canopée se poursuit peu à peu. En 2018, il ne reste que 5 % du dépôt initial dans les arbres, contre 80 % dans le sol, le reste ayant disparu par désintégration radioactive. Pendant toute cette période, le bois du tronc protégé par l'écorce se contamine progressivement par deux voies. Les flux de sève descendants transportent une part de césium de la canopée et des feuilles vers le bois puis les racines. Et au printemps, par les flux ascendants, ce sont les racines qui remobilisent des nutriments pour la croissance du bois, des branches et des nouvelles feuilles, captant le césium-137 du sol. En 2018, la concentration dans le bois reste néanmoins dix fois inférieure à celle du feuillage. Mais en raison de leur biomasse relative, l'inventaire en césium-137 de ces deux compartiments est presque équivalent. Côté sol, les concentrations sont à peu près identiques dans la couche organique et le premier horizon minéral et environ dix fois moindres dans les couches plus profondes. L'ensemble n'évolue plus beaucoup depuis 2013, une part du césium étant fixée.

Lors de la troisième phase décrite par TREE4, on atteint un certain régime d'équilibre. Le transfert racinaire devient alors le mécanisme dominant de la contamination pour l'arbre. C'est vers cet état que tendent actuellement les forêts de Fukushima.

*AMORAD – Amélioration des MOdèles de prévision de la dispersion et d'évaluation de l'impact des RADionucléides au sein de l'environnement – est un programme financé par le Programme Investissements d'Avenir, piloté par l'IRSN en collaboration avec l'Andra, l'université de Tsukuba et l'IER de Fukushima pour les travaux de cet article.

NOTES

> [1] Le becquerel (Bq) est l'unité de mesure de l'activité d'une source radioactive, qui correspond au nombre de désintégrations par seconde.

QUID DES FORÊTS FRANÇAISES?

En France, comment anticiper l'impact de retombées radioactives sur nos forêts ? Transposer le modèle TREE4, calibré pour les forêts japonaises, à l'environnement français exige de collecter trois différents types de données spécifiques : les paramètres écophysologiques qui ont trait à la forêt et aux essences qui la composent (croissance, biomasse, surface foliaire, etc.), les paramètres liés au site (nature du sol, climat, cycle de l'eau, etc.) et enfin les paramètres de transfert, propres au césium-137 dans ce contexte forestier. Pour constituer cette base de données, l'IRSN a lancé un travail de thèse qui s'appuiera à la fois sur les observations du réseau RENECOFOR – une centaine de sites forestiers permanents –, géré par l'ONF, et sur l'échantillonnage de sites sélectionnés pour l'évaluation des paramètres de transfert du césium-137 entre les compartiments du système sol-arbre.

À partir du modèle TREE4, qu'indiquent les simulations à plus long terme ? Selon les calculs, après quinze à vingt ans, la contamination n'évolue plus beaucoup par recyclage mais continue de diminuer par décroissance radioactive. «Au bout de trente ans, la part du dépôt radioactif initial qui persisterait serait de l'ordre de 2 % dans les arbres et de 48 % dans le sol», explique Marc-André Gonze. Le reste ayant définitivement disparu par désintégration radioactive. Mais sur les prédictions au-delà de quinze ans, il reste prudent car des incertitudes subsistent notamment sur la localisation précise des racines et sur la part de césium-137 mobilisable qui influeraient sur le transfert racinaire.

Outre cet aspect prédictif, le modèle permet aussi de tester en amont des stratégies de gestion des zones forestières contaminées par un accident nucléaire. Au Japon, par exemple, enlever la quasi-totalité de la couche organique contaminée, une hypothèse un temps avancée, aurait-il été pertinent ? Les simulations montrent aujourd'hui qu'en enlevant cette couche après l'automne 2011 on aurait au mieux divisé le niveau de contamination par un facteur deux, tout en créant une masse considérable de déchets. Les avantages que pourraient procurer une telle solution apparaissent donc modestes en comparaison des conséquences écologiques auxquelles elle conduirait. ■

RÉFÉRENCES

> Site AMORAD : www.irs.fr/amorad

> F. Coppin et al., Radiocaesium partitioning in Japanese cedar forests following the "early" phase of Fukushima fallout redistribution, *Sci. Rep.* 6, 37618, 2016.

> M-A. Gonze et al., Meta-analysis of radiocaesium contamination data in Japanese forest trees over the period 2011–2013, *Science of The Total Environment*, 601, 301-316, 2017.

L'ESSENTIEL

> Contrairement aux autres animaux vertébrés et à nos ancêtres, nous souffrons souvent de maux de dents.

> Un appareil de mastication efficace et précise est le résultat de centaines de millions d'années d'évolution.

> Les dents humaines ont évolué dans des environnements buccaux très différents de celui que produit l'alimentation moderne. C'est là l'origine de la plupart de nos problèmes dentaires.

L'AUTEUR



PETER UNGAR
paléontologue et anthropologue dentaire
à l'université de l'Arkansas, aux États-Unis

Aux racines de nos problèmes dentaires

Dans les populations humaines d'aujourd'hui, les dents sont souvent cariées, mal alignées et à l'étroit dans les mâchoires. Principal suspect : l'alimentation moderne.

Assis dans la salle d'attente d'un chirurgien-dentiste, j'attends ma fille. Autour de moi, des patients qui semblent tous être venus, résignés, pour se faire enlever leurs dents de sagesse à la chaîne, comme dans une usine. Je les vois un à un repartir la tête entourée d'un pansement spécialement conçu pour intégrer des poches de glace, et bardés d'un T-shirt offert, d'un imprimé décrivant les soins nécessaires à domicile et, naturellement, de généreuses prescriptions d'antibiotiques et d'analgésiques.

Aux États-Unis aujourd'hui, l'extraction des troisièmes molaires ou dents de sagesse chez les jeunes adultes ressemble à un rite de passage. De mon point de vue, c'est là une mauvaise tradition. Anthropologue dentaire et biologiste évolutionniste, j'ai passé les trente dernières années à étudier les dents humaines actuelles et fossiles et celles de nombreuses autres espèces, et j'en ai conclu une chose : nos problèmes dentaires n'ont rien de normal !

La plupart des autres vertébrés n'ont pas les mêmes problèmes dentaires. Ils ont rarement des dents de travers ou des caries. Quant à nos ancêtres fossiles, ils n'avaient pas de

dents de sagesse abîmées, et il semble que leurs gencives étaient la plupart du temps saines.

La dentition des humains modernes est une profonde contradiction en soi. Parties les plus dures de notre corps, les dents sont cependant très fragiles. Alors que celles des fossiles restent préservées pendant des millions d'années, les nôtres semblent ne pas pouvoir tenir à l'intérieur de la bouche plus de quelques dizaines d'années ! Les dents ont permis à nos ancêtres mammifères de dominer la nature, mais pour garder les nôtres, il nous faut les entretenir quotidiennement.

L'ORIGINE ANCIENNE DES DENTS

Cette contradiction est nouvelle : elle concerne avant tout les populations de l'ère industrielle. Elle s'explique par la différence entre les régimes alimentaires actuels et ceux en fonction desquels nos dents ont évolué. Les paléontologues ont depuis longtemps compris que nos dents sont profondément enracinées dans notre histoire évolutive. Les cliniciens et les dentistes commencent à s'en rendre compte aussi...

Les biologistes de l'évolution soulignent souvent la merveille que constituent les yeux, mais, pour moi, ces organes ne le cèdent en



> rien aux dents. Au cours d'une vie, celles-ci broient en effet des aliments des millions de fois sans se briser, alors qu'elles sont fabriquées à partir des mêmes matériaux que ce qu'elles écrasent. Les ingénieurs ont sans doute beaucoup à en apprendre...

Leur remarquable solidité est le résultat de leur structure, qui leur confère à la fois la dureté et la résistance nécessaires pour empêcher que des fissures ne se forment et se propagent. Ces propriétés découlent d'une combinaison de deux éléments : une couche externe d'émail très dure, presque entièrement composée de phosphate de calcium, et une couche interne de dentine contenant des fibres organiques qui lui confèrent de la souplesse.

UNE MICROSTRUCTURE REMARQUABLE

C'est la microstructure de l'émail qui explique les extraordinaires performances des dents. L'émail des dents est en effet constitué de minuscules « prismes », des bâtonnets regroupant des milliers de cristallites, brins monocristallins dont chacun est 1000 fois plus fin qu'un cheveu humain (lequel fait 0,1 millimètre). Individuellement, les cristallites sont aussi cassantes qu'un spaghetti sec, mais groupées en faisceaux, elles forment des prismes nettement plus résistants. Regroupés à leur tour par dizaines de milliers par millimètre carré, souvent entrecroisés, les prismes constituent le substrat de la couche d'émail. Disposés parallèlement, ils vont de la surface de la dent à la dentine sous-jacente, formant un entrelacs au sein duquel ils se tordent et se retordent d'une façon qui confère à l'émail son impressionnante résistance.

Cette structure n'est pas apparue du jour au lendemain : l'ingénieur nature y a travaillé pendant des centaines de millions d'années. Grâce aux avancées récentes de la paléontologie, de la génétique et de la biologie du développement, les chercheurs ont reconstruit l'évolution de la structure des dents depuis l'apparition des vertébrés.

Les premiers vertébrés étaient des « poissons » sans mâchoires apparus il y a plus d'un demi-milliard d'années, au Cambrien. Ces animaux – des vertébrés nageurs aquatiques ancêtres des poissons à écailles actuels – n'avaient pas de dents, mais beaucoup de leurs descendants ont acquis une queue écaillée et une tête blindée par des plaques de phosphate de calcium ressemblant à des dents. Chaque plaque comportait une surface extérieure de dentine, parfois durcie sur le dessus par une couche minéralisée, et une cavité intérieure – la chambre pulpaire – abritant des vaisseaux sanguins et des nerfs.

La bouche de certains de ces animaux était bordée de plaques comportant de petits picots

ou des pointes aidant à s'alimenter. D'après la plupart des paléontologues, c'est la sélection de ce genre d'écailles au cours de l'évolution qui est à l'origine des dents. De fait, les écailles des requins actuels ressemblent tellement à des dents que nous plaçons ces structures dans la catégorie des odontodes, c'est-à-dire des « objets en forme de dents » ; et de nombreux poissons ont le corps tapissé d'odontodes. Par ailleurs, les biologistes du développement ont montré que les écailles et les dents des requins se développent à partir de tissu embryonnaire en suivant le même programme, et des analyses moléculaires ont confirmé que les mêmes groupes de gènes président à leur développement.

Les premières dents définitives sont apparues bien plus tard avec les poissons à mâchoires. Il s'agissait pour la plupart de simples structures pointues servant à capturer et à immobiliser des proies ou encore à gratter, à fouiller, à saisir et à mordre tous types d'organismes. Par exemple, certains acanthodiens, des poissons à épines fossiles apparentés aux requins ancestraux, avaient déjà des dents il y a 430 millions d'années, au Silurien. Mais aucune couronne hyperminéralisée ne recou-



L'émail est apparu il y a environ 415 millions d'années, au sein des sarcoptérygiens

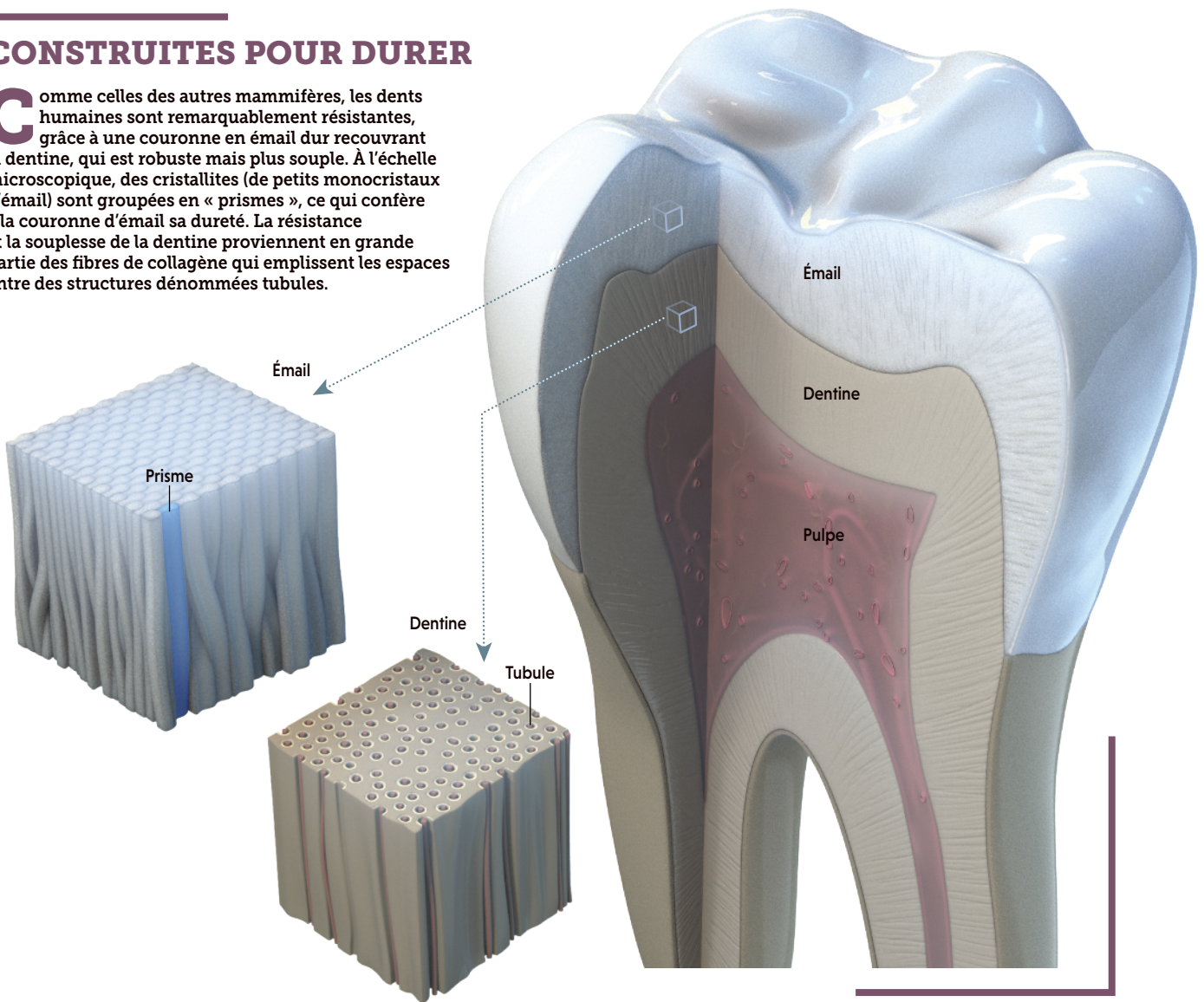


vrait la dentine de leurs dents qui, même si elles n'étaient ni perdues ni remplacées, n'en étaient pas moins des dents. Certains avaient des écailles sur les lèvres et les joues qui ressemblaient d'autant plus à des dents qu'elles étaient proches de la bouche ; c'est là un argument de poids en faveur d'un passage évolutif continu depuis certaines écailles aux dents. Même dans leurs formes les plus archaïques, les dents représentaient certainement un avantage, et elles se sont donc répandues dans les lignées des organismes des océans primitifs.

Une fois les dents en place, de nombreuses innovations ont suivi, notamment dans leur forme, leur nombre, leur répartition, leur remplacement et leur fixation à la mâchoire. C'est il y a environ 415 millions d'années, à la limite du Silurien et du Dévonien, que l'émail apparaît au

CONSTRUITES POUR DURER

Comme celles des autres mammifères, les dents humaines sont remarquablement résistantes, grâce à une couronne en émail dur recouvrant la dentine, qui est robuste mais plus souple. À l'échelle microscopique, des cristallites (de petits monocristaux d'émail) sont groupées en « prismes », ce qui confère à la couronne d'émail sa dureté. La résistance et la souplesse de la dentine proviennent en grande partie des fibres de collagène qui emplissent les espaces entre des structures dénommées tubules.



sein des sarcoptérygiens. Ce groupe de «poissons» a donné les poissons à nageoires charnues – dotés des paires de nageoires pectorales et ventrales dont les os et les muscles ressemblent à ceux des membres – et les tétrapodes modernes, c'est-à-dire les amphibiens, les reptiles et les mammifères. Les autres poissons n'ont pas le groupe de gènes codant pour les protéines nécessaires à la fabrication de l'émail, dont ils sont par conséquent dépourvus. L'émail était initialement limité aux écailles, ce qui suggère que, comme les dents, il est provenu de structures de la peau avant de devenir partie intégrante de structures buccales.

FAVORABLES À L'ENDOTHERMIE

Les dents ont joué un rôle important dans l'évolution des mammifères parce que, comme nous allons l'expliquer, elles favorisent l'endothermie (le fait d'avoir le sang chaud). Un organisme capable de créer sa propre chaleur corporelle a de nombreux avantages: il peut

vivre dans des climats froids et dans ceux aux températures variables; il peut aussi maintenir des vitesses de déplacement plus grandes et ainsi exploiter des territoires plus vastes; il aura aussi plus d'endurance dans la recherche de nourriture, l'évitement des prédateurs et les soins parentaux.

L'endothermie a toutefois un grand coût énergétique: un mammifère brûle dix fois plus d'énergie au repos qu'un reptile de taille similaire. Les mammifères doivent donc sans cesse alimenter un véritable fourneau métabolique, ce qui a induit une grande pression sélective sur la bouche: si les dents des autres vertébrés servent à capturer, à maintenir et à tuer leurs proies, celles des mammifères ont en plus pour fonction de mâcher afin d'extraire le plus possible de calories des aliments.

Les dents des mammifères guident les mouvements de mastication en dirigeant et dissipant les forces mises en œuvre, tout en positionnant, en maintenant, en fracturant et ➤

> en fragmentant les aliments. Pour que les dents fonctionnent bien pendant la mastication, leurs surfaces opposées doivent être alignées à une fraction de millimètre près. La nécessité d'une telle précision explique pourquoi, contrairement aux poissons et aux reptiles, chez la plupart des mammifères il n'y a pas de repousse de nouvelles dents tout au long de la vie, à mesure que les dents anciennes s'usent ou se cassent. C'est dans le cours de l'amélioration de la mastication que les mammifères ancestraux ont perdu cette capacité.

Les prismes d'émail font partie du même ensemble adaptatif. La plupart des chercheurs pensent qu'ils sont apparus parce qu'une meilleure résistance des dents, adaptée à la mastication, était avantageuse. La question de savoir si l'apparition évolutive des prismes s'est produite une fois ou plusieurs fois indépendamment est débattue, mais dans tous les cas, la structure de base des dents de mammifères – une couronne de dentine recouverte d'émail prismatique – était déjà en place au Trias, il y a environ 250 millions d'années. Les myriades de formes de molaires de mammifères, y compris les nôtres, qui s'en sont ensuivies, sont de simples ajustements du même plan général.

DÉSÉQUILIBRE MICROBIEN

L'histoire évolutive de nos dents explique non seulement leur résistance, mais aussi leurs défaillances. À cet égard, l'idée essentielle est que les structures biologiques évoluent pour fonctionner au sein d'un éventail spécifique de conditions environnementales. Dans le cas de nos dents, il s'agit de la présence dans la bouche de certaines substances chimiques et de certaines bactéries, ainsi que de la pression et de l'abrasion. La modification de ces conditions peut donc constituer une menace. C'est bien ce que fait l'alimentation moderne, si différente de toutes celles qui l'ont précédée dans l'histoire de la vie humaine. Le désaccord qui en résulte entre notre biologie et notre comportement explique nos caries dentaires, les dents de sagesse abîmées et les autres problèmes orthodontiques qui nous affligent.

La carie dentaire est la maladie chronique la plus courante et la plus répandue dans le monde. Elle touche près de huit Français sur dix et des milliards de personnes dans le monde entier. Pourtant, au cours des trente dernières années, j'ai étudié des centaines de milliers de dents d'espèces fossiles et d'animaux vivants et n'ai pratiquement jamais observé de caries dentaires.

Pour comprendre pourquoi les dents des humains modernes sont si sujettes aux caries, il nous faut considérer le milieu buccal naturel. Une bouche saine fourmille de vie: elle est peuplée de milliards de microbes comprenant jusqu'à 700 espèces différentes de bactéries. La plupart d'entre elles sont bénéfiques. Elles

combattent les maladies, aident à la digestion et régulent diverses fonctions corporelles. D'autres sont nuisibles, tels les lactobacilles et *Streptococcus mutans* (ou streptocoques mutans, ainsi nommés car leurs cellules passent souvent d'une forme de coque à celle de courts bâtonnets). Le métabolisme de ces bactéries produit de l'acide lactique, qui attaque l'émail. Mais leurs concentrations sont en général trop faibles pour entraîner des dommages permanents. Leur nombre est en effet contrôlé par les populations de streptocoques *mitis* (*Streptococcus mitis*) et *sanguinis* (*Streptococcus sanguinis*). Ces bactéries produisent des bases – ce qui réduit l'acidité – et des protéines antimicrobiennes – qui inhibent la croissance des espèces nuisibles.

Par ailleurs, la salive tamponne la bouche, c'est-à-dire qu'elle maintient constant son pH (niveau d'acidité), ce qui limite les attaques acides; et, comme elle contient du calcium et du phosphate en solution, elle reminéralise aussi la surface des dents. Un équilibre entre déminéralisation et reminéralisation se maintient depuis des centaines de millions d'années dans les bouches des mammifères, de sorte que des bactéries bénéfiques et nocives cohabitent dans les microbiomes buccaux de l'ensemble des mammifères. Nous avons coévolué en maintenant une communauté stable de microbes, ou, comme le formule Kevin Foster, de l'université d'Oxford, en «tenant l'écosystème en laisse».

Les caries apparaissent quand la laisse se rompt. Les régimes riches en glucides nourrissent les bactéries productrices d'acide, ce qui réduit le pH buccal. Les *Streptococcus mutans* et les autres espèces cariogènes se développent dans l'environnement acide qu'ils produisent, et finissent par noyer par leur nombre les bactéries bénéfiques, ce qui réduit encore le pH. Cette chaîne d'événements conduit à ce que les cliniciens nomment la «dysbiose», un changement d'équilibre dans lequel quelques espèces nuisibles supplantent celles qui dominent normalement le microbiome buccal.

Dans ces situations, la salive ne peut plus reminéraliser l'émail assez vite pour compenser la déminéralisation, et l'équilibre entre perte de



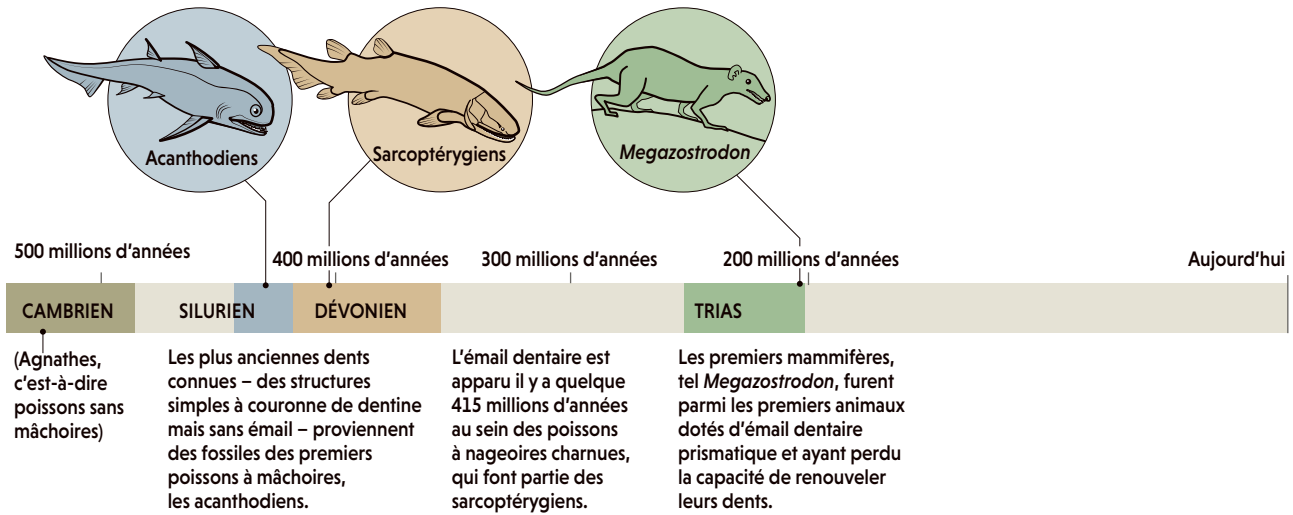
Les caries apparaissent quand l'écosystème bactérien de la bouche est déstabilisé



DES RACINES PROFONDES

Nos dents sont le produit de centaines de millions d'années d'évolution. Les fossiles, la génétique et la biologie du développement suggèrent qu'elles proviennent d'une adaptation de certaines écailles spécialisées de poissons. Les propriétés qui les rendent si résistantes sont apparues petit à petit. Les caries et autres problèmes

dentaires qui affectent la plupart de nos contemporains sont en grande partie dus à l'inadéquation de notre appareil masticateur à la nourriture moderne, constituée de beaucoup d'aliments mous, transformés et riches en sucres, un régime alimentaire très différent de celui de nos ancêtres chasseurs-cueilleurs.



masse et réparation est rompu. Le saccharose – sucre très commun – est particulièrement problématique. Les bactéries nocives l'utilisent pour former la plaque dentaire, un film épais qui les colle aux dents, et pour stocker de l'énergie entre les repas, ce qui signifie que l'exposition aux attaques acides est prolongée.

Les archéologues ont depuis longtemps suggéré un lien entre les caries et le passage au Néolithique, il y a environ 10 000 ans, du mode de vie de chasseurs-cueilleurs à celui d'agriculteurs-éleveurs. En effet, les bactéries productrices d'acide consomment les glucides fermentables, qui abondent dans le blé, le riz et le maïs. Les recherches menées par exemple par Clark Larsen, de l'université d'État de l'Ohio, ont révélé que l'incidence des caries avait plus que sextuplé avec l'adoption et la propagation de la culture du maïs le long de la côte préhistorique de la Géorgie américaine.

Le lien entre carie dentaire et agriculture n'est cependant pas si simple : chez les premiers agriculteurs, le taux de caries varie dans le temps et l'espace, et les dents de certains chasseurs-cueilleurs, ceux par exemple qui ont une alimentation riche en miel, peuvent être aussi criblées de caries.

En fait, la fréquence des caries a surtout augmenté avec la révolution industrielle, car elle a généralisé le saccharose et les aliments hautement transformés. Ces dernières années, des chercheurs ont effectué des études génétiques sur des bactéries piégées dans le tartre de dents anciennes, lesquelles documentent la transition

qui s'est ensuivie dans les communautés microbiennes. Les aliments transformés sont plus mous et plus propres, d'où des conditions très favorables aux caries, à savoir moins de mastication susceptible de détruire la plaque dentaire et moins d'abrasifs alimentaires en mesure d'atteindre les recoins où se réfugient les bactéries.

L'ÉMAIL NE REPOUSSE PAS

Malheureusement, à cause de la façon dont se forment les couronnes de nos dents, l'émail ne repousse pas comme la peau ou les os. Cette limitation a été établie dès l'apparition de l'émail chez des poissons à nageoires charnues. Les améloblastes, les cellules qui fabriquent l'émail, migrent depuis l'intérieur de la dent vers la surface à venir de la couronne, laissant des traces d'émail – des prismes – derrière elles. Si nous ne pouvons resécréter de l'émail, c'est parce que les cellules qui le fabriquent sont arrachées et perdues une fois la couronne complète.

Pour la dentine, c'est une autre histoire. Les odontoblastes, les cellules qui la produisent, commencent leur travail dos à dos avec les améloblastes, mais migrent vers l'intérieur, pour finalement venir tapisser la chambre pulpaire. Elles continuent à produire de la dentine tout au long de la vie d'un individu et peuvent réparer ou remplacer des tissus usés ou blessés. Les lésions plus graves nécessitent que des cellules nouvellement formées fabriquent de la dentine pour tapisser la chambre pulpaire et protéger la dent.

Cependant, à mesure que les caries se développent, elles submergent ces défenses ➤

> naturelles, infectent la pulpe et finissent par tuer la dent. D'un point de vue évolutif, quelques siècles sont un intervalle de temps trop bref pour que nos dents aient eu le temps de s'adapter au changement majeur de notre environnement buccal dû à l'introduction du sucre de table et des aliments transformés.

QUAND LES CONTRAINTES MÉCANIQUES MANQUENT

Les troubles orthodontiques ont également atteint aujourd'hui des niveaux épidémiques. Neuf personnes sur dix ont des dents imparfaitement alignées ou souffrent de malocclusion dentaire, c'est-à-dire un mauvais positionnement des dents les unes par rapport aux autres. Les trois quarts d'entre nous ont des dents de sagesse qui n'ont pas assez de place pour émerger correctement. En deux mots, nos dents n'arrivent pas à tenir sur nos mâchoires. Comme dans le cas des caries, la cause en est le déséquilibre dû à un nouveau milieu buccal, très différent de celui dans lequel baignaient les dents de nos ancêtres.

Dès les années 1920, un célèbre orthodontiste australien, «Tick» Begg (Raymond Begg), a relevé cette étonnante indigence de nos dents. Il a remarqué que les Aborigènes, des chasseurs-cueilleurs, perdaient moins leurs dents que ses patients européens. Ils avaient aussi des arcades dentaires parfaites; leurs dents de devant étaient droites et leurs dents de sagesse sorties et fonctionnelles. Begg en déduisit que la nature «s'attend» à ce que l'usure entre dents adjacentes réduise les besoins d'espace dans la bouche. Il pensait que la longueur des mâchoires était «pré-programmée» par l'évolution pour tenir compte de cette usure. Alors que nos dents ont évolué pour mâcher des aliments durs dans un environnement abrasif, notre régime alimentaire mou et propre a perturbé l'équilibre entre taille des dents et longueur des mâchoires. D'où cette chaîne de (dé)montage que j'ai vue à l'œuvre dans le cabinet du chirurgien-dentiste évoqué plus haut: que ce soit par usure ou par extraction, de la masse dentaire doit disparaître!

Cette logique à l'esprit, Begg développa ce qui resta longtemps la référence en matière de redressement des dents. Pour créer de l'espace sur la mâchoire, il imagina extraire les premières prémolaires, puis attacher un fil à des crochets fixés sur les dents restantes afin de donner un bon profil à l'arcade dentaire tout en refermant les espaces. Auparavant, d'autres orthodontistes utilisaient des fils pour redresser les dents de travers, mais ils n'extraient pas les prémolaires, et par conséquent les dents redressées reprenaient souvent une position en biais.

De nombreux dentistes ont d'abord refusé l'idée d'extraire des dents saines pour bien reformer l'arc dentaire, mais la technique de Begg marchait bien et durablement. Begg est

même allé jusqu'à suggérer que les enfants mâchent du chewing-gum contenant de la poussière abrasive de carbure de silicium afin d'user leurs dents et ainsi d'éviter complètement tout traitement orthodontique...

Begg avait raison quant au décalage entre les dents et les mâchoires, mais il s'est trompé sur les détails. Selon l'anthropologue Robert Corruccini, de l'université d'Illinois du Sud, le changement clé ne concernait pas l'environnement abrasif, mais plutôt les contraintes mécaniques auxquelles étaient soumises les dents lors de la mastication des aliments. Et ce ne sont pas les dents qui sont trop grandes, mais la mâchoire qui est trop petite!

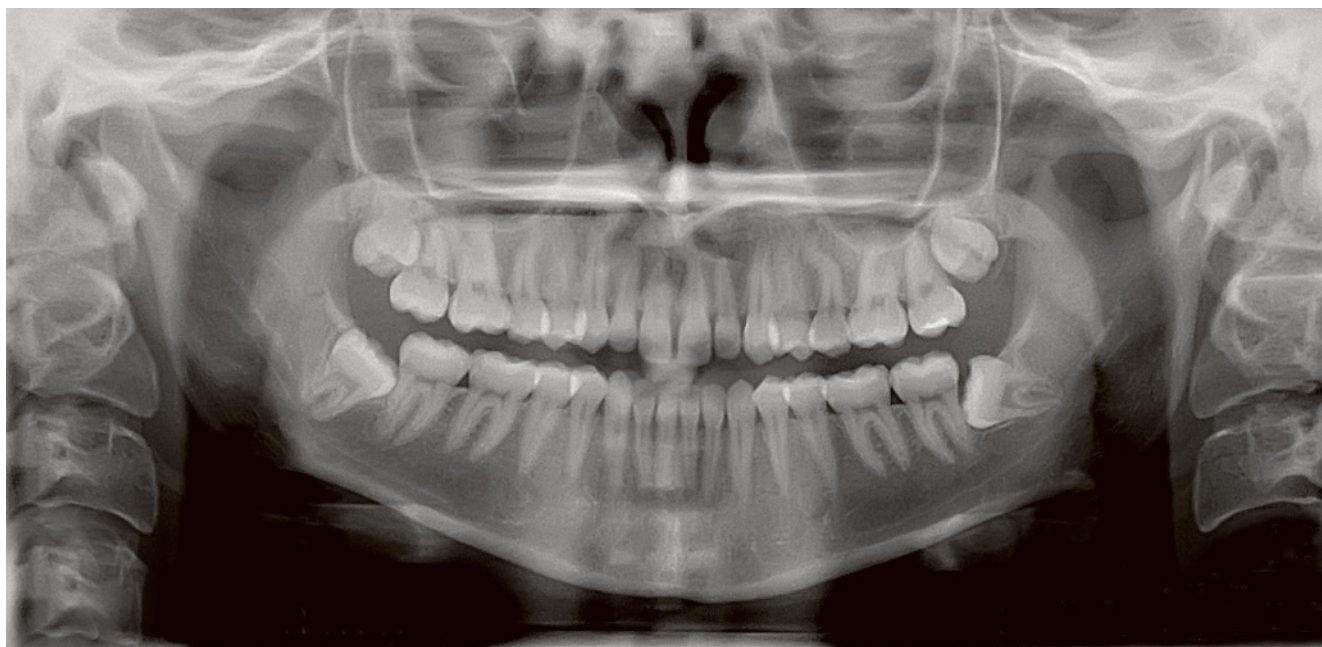
Charles Darwin avait déjà, dans *La Filiation de l'homme* (*The Descent of Man*, 1871), fait le lien entre contraintes mécaniques et taille de la mâchoire. Robert Corruccini fut toutefois l'un des premiers à apporter la preuve définitive du problème que représente l'absence de ces contraintes. Il venait de commencer à enseigner à l'université du sud de l'Illinois lorsqu'un étudiant issu d'une communauté



Chez la plupart des gens, les dents de sagesse n'ont pas assez de place pour bien pousser

campagnarde du Kentucky lui expliqua que les personnes âgées y avaient été nourries dans leur enfance avec des aliments difficiles à mâcher, tandis que leurs enfants et petits-enfants profitaient d'un régime alimentaire plus raffiné et plus élaboré.

L'étude de cette communauté rurale révéla qu'en effet, ses anciens mâchaient mieux que les jeunes, et ce malgré l'absence presque totale, à leur génération, de soins dentaires professionnels. Robert Corruccini expliqua cette constatation par la consistance des aliments consommés autrefois. Ainsi, les différences constatées entre les dentitions des diverses générations ne sont pas d'origine génétique, mais environnementale. Robert Corruccini découvrit ensuite de nombreux autres exemples du même phénomène, notamment chez les Pimas de l'Arizona avant et après leur accès aux aliments achetés en magasin, ou entre les



Les dents de sagesse n'ont pas la place de pousser correctement lorsque la mâchoire est trop petite, ce qui est le cas lorsque les enfants sont nourris d'aliments plus faciles à mâcher que ceux de nos ancêtres.

ruraux et les citadins de la région de Chandigarh, en Inde, les premiers se nourrissant de millet grossier et de légumes durs, et les seconds de pain mou et de purée de lentilles.

Selon Robert Corruccini, la taille des dents est préprogrammée pour s'adapter à une mâchoire soumise, pendant la croissance, aux contraintes mécaniques d'un régime alimentaire naturel d'enfant. Si, par la suite, l'appareil masticateur ne connaît pas la stimulation nécessaire au cours de son développement, les dents s'accumulent en trop grand nombre vers l'avant de la mâchoire et s'abîment vers l'arrière. Une théorie qu'il a confirmée par des travaux expérimentaux sur des singes : une alimentation à base de nourritures molles tendait à rapetisser leurs mâchoires et à dégrader leurs dents.

DENTISTERIE DARWINIENNE

Considérer les dents dans une perspective évolutive révèle que nos troubles dentaires sont la conséquence d'un changement écologique. Ce nouveau point de vue commence à aider les chercheurs et les cliniciens à s'attaquer aux causes profondes des maladies dentaires.

Des matériaux de scellement (plus connus sous leur nom anglais de *sealants*) des sillons dentaires (une mince couche de résine fluide) protègent nos couronnes et le fluorure renforce et reminéralise l'émail. Pour bénéfiques qu'elles soient, ces techniques ne changent rien aux conditions responsables des caries. Les bains de bouche antiseptiques tuent les bactéries qui causent les caries, mais ils tuent aussi les souches bénéfiques qui gardent les bactéries nocives sous contrôle. Inspirés par les récentes innovations dans le domaine des thérapies microbiennes, les chercheurs

commencent à se concentrer sur le remodelage de la communauté de la plaque dentaire. Et des probiotiques oraux, des antimicrobiens ciblés et des transplantations de microbiote se profilent à l'horizon.

Nous pouvons aussi avoir à l'esprit la nécessité d'un environnement buccal naturel lorsque nous réfléchissons aux traitements orthodontiques. Les dentistes et les orthodontistes se rendent compte que les aliments pour bébés hautement transformés et ramollis modifient les contraintes mécaniques sur le visage et les mâchoires. Les contraintes induites par la mastication stimulent la croissance normale de la mâchoire et du milieu du visage chez les enfants. La consommation d'aliments pour bébés, en purée, laisse ces parties du corps chroniquement sous-développées. Cette réalité a des implications qui vont au-delà de l'encombrement des dents : certains experts suggèrent que la constriction des voies respiratoires qui en résulte est responsable de l'apnée du sommeil, un trouble assez fréquent de nos jours.

Personne ne veut que les tout-petits s'étouffent en mangeant, mais il existe peut-être de meilleures solutions de sevrage que la purée de pois ! Au cours des dernières années, une nouvelle industrie s'est développée qui se concentre sur la croissance des mâchoires pour ouvrir les voies respiratoires et adapter les dents en fonction de ce que la nature a prévu. Les traitements efficaces vont d'extenseurs palatins amovibles et autres appareils de guidage de la croissance à la chirurgie. Mais peut-être que si, comme nos ancêtres, nous donnions à nos enfants, dès leur plus jeune âge, des aliments nécessitant une vigoureuse mastication, nous leur épargnerions les ennuis dentaires et de tels traitements. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. S. Ungar, **Le vrai régime paléo**, *Pour la Science*, n° 494, décembre 2018.

P. S. Ungar, **Evolution's Bite : A Story of Teeth, Diet and Human Origins**, Princeton University Press, 2017.

P. Sharpe et C. Young, **Des dents en éprouvette**, *Pour la Science*, n° 336, octobre 2005.

R. Corruccini, **How Anthropology Informs the Orthodontic Diagnosis of Malocclusion's Causes**, Edwin Mellen Press, 1999.

L'ESSENTIEL

> De nombreux secteurs d'activité ont besoin d'appareils mélangeurs efficaces.

> Il y a une trentaine d'années, des mélangeurs sans pales ou hélices sont apparus sur le marché.

> Inspiré par des travaux de géophysique, l'auteur

a proposé un nouveau concept de mélangeur sans pales, bien plus simple que les dispositifs existants.

> Ce mélangeur a plusieurs avantages qui le rendent intéressant pour, notamment, des applications aux biotechnologies.

L'AUTEUR



PATRICE MEUNIER
directeur de recherche du CNRS
à l'Institut de recherche sur les phénomènes
hors équilibre (Irphé), Aix-Marseille
Université-CNRS-École centrale de Marseille

Mélanger en s'inspirant du mouvement de la Terre

Comment mélanger avec efficacité une préparation liquide, par exemple un colorant dans un pot de peinture ? À partir de leurs recherches fondamentales, des géophysiciens ont breveté un procédé étonnamment simple : faire tourner le récipient sur lui-même en l'inclinant légèrement !

De nombreux secteurs industriels ont besoin d'équipements et de procédés permettant de mélanger rapidement et efficacement des poudres, des liquides, des pâtes ou des matériaux granulaires. On peut penser au secteur du bâtiment, avec les peintures, les ciments ou le béton, à l'industrie chimique ou pharmaceutique, à l'industrie agroalimentaire... Le plus souvent, les mélangeurs ou malaxeurs sont des appareils qui accomplissent leur tâche grâce à des pales ou des hélices en mouvement au sein du matériau à homogénéiser. Ces systèmes à intrusion souffrent de plusieurs inconvénients, notamment la nécessité d'ouvrir le récipient et de

nettoyer les pales après usage, opération souvent longue et fastidieuse – comme l'a constaté toute personne qui a mélangé un colorant dans un pot de peinture !

MÉLANGER SANS PALES

Depuis le début des années 1990, plusieurs fabricants ont développé des malaxeurs qui s'affranchissent de pales ou d'hélices. Le principe est simple, bien que techniquement délicat : faire tourner autour de lui-même le récipient contenant le matériau à mélanger, l'axe de cette rotation subissant lui-même un mouvement de rotation afin d'éviter la mise en place d'un écoulement régulier. Dans les appareils commercialisés (voir la photo page 47), le récipient cylindrique, dont la >

Les procédés usuels pour mélanger des liquides font appel à des pales ou une hélice en mouvement dans le fluide. L'un des principaux inconvénients réside dans le long nettoyage du dispositif introduit. Il existe aujourd'hui des mélangeurs sans pales ; celui conçu par l'auteur repose sur un mouvement particulièrement simple du récipient.