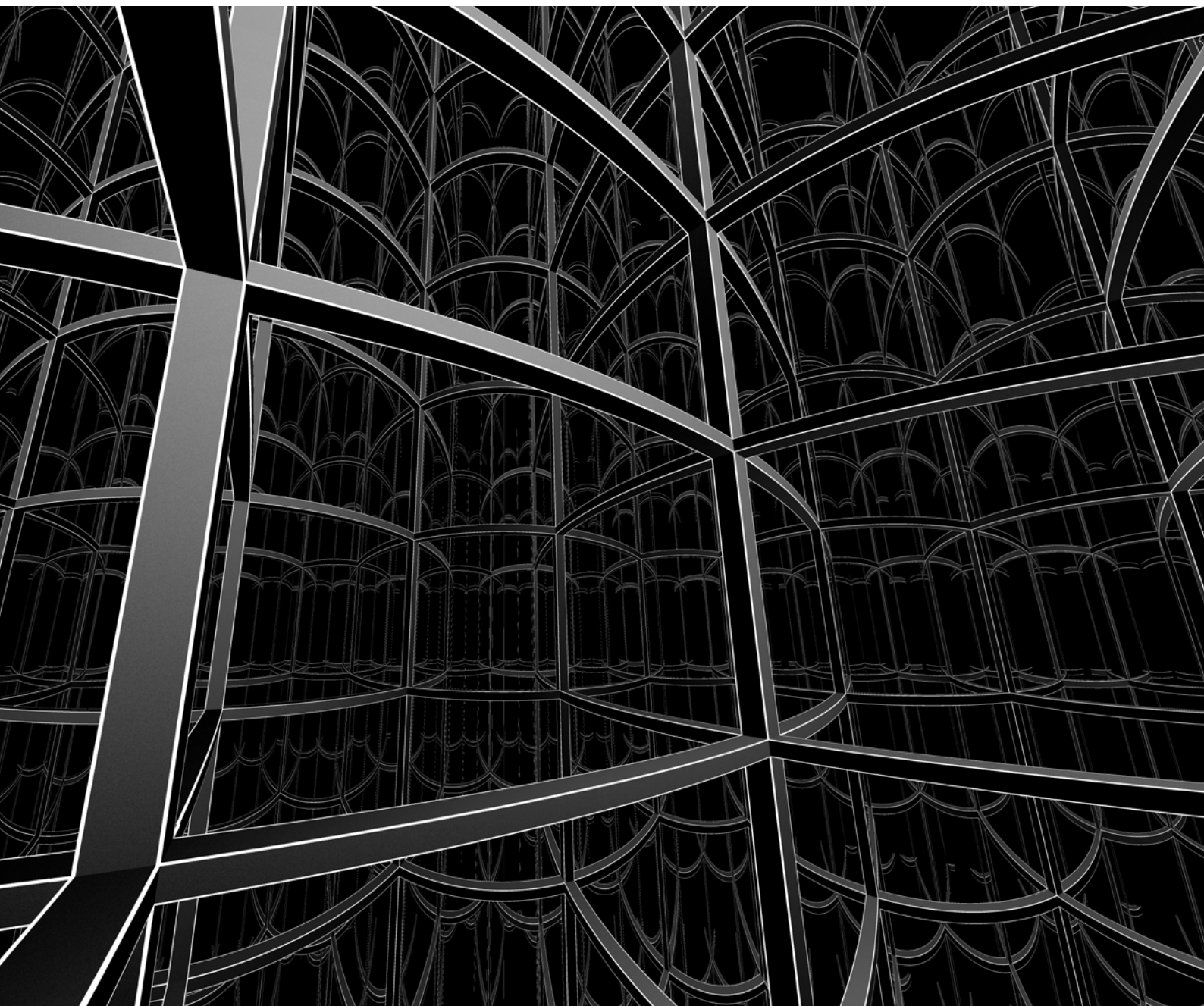




E^3 et hyperbolique H^3). Les cinq autres géométries sont restées durant plus de vingt ans des problèmes ouverts, jusqu'aux travaux récents de Pierre Berger, à l'interface des mathématiques fondamentales et numériques. Dans cette exposition sont présentés des paysages dans les huit géométries de Thurston, sept d'entre elles étant traitées rigoureusement par un logiciel créé à cet effet. À l'instar d'Einstein sur son rayon, on comprend mieux les espaces en se plaçant à l'intérieur.

Cette visualisation d'espaces totalement abstraits nécessite d'y insérer des objets élémentaires, en l'occurrence une série de polyèdres identiques. On peut aussi

suivre le trajet d'un rayon lumineux qui respecte la géométrie de l'espace: rectiligne dans E^3 , la lumière est déviée dans les autres géométries et peut, selon la courbure, s'enrouler. Devant chaque photographie, qui est plus qu'une simple simulation numérique, le public est confronté à une architecture intrigante qui le conduit à s'interroger sur son propre espace.

Une autre installation propose une démarche similaire, mais avec du son. Au centre d'un cube dont des tableaux noirs constituent certaines faces, l'auditeur perçoit les sons captés par 60 micros répartis dans l'institut, puis traités mathématiquement et informatiquement pour simuler le

plongement du bâtiment dans l'espace mathématique noté $\mathbb{R}^3/\mathbb{Z}^3$. Une sélection de modèles mathématiques de l'institut, de courtes vidéos définissant les variétés d'espaces et d'autres installations encore complètent l'exposition. En fin de compte, elle vous offre l'occasion de confronter votre imagination à celle des mathématiciens. Laquelle des deux est la plus illimitée? ■

*Esthétopies, à l'institut Henri-Poincaré,
Paris, du 8 mars au 8 juillet 2017.
<http://esthetopies.ihp.fr>*



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

UNE VISION PROGRESSIVE... PAS SI NETTE

Les verres progressifs sont pour les presbytes une grande invention. Mais quelle que soit leur qualité, il leur est impossible de corriger complètement les défauts de la vision.

Dès le Moyen Âge, on savait corriger, à l'aide de lunettes constituées de verres grossièrement polis, la myopie ou l'hypermétropie – pour lesquelles l'œil voit flou respectivement de loin ou de près. Mais que faire face à la presbytie, qui vient avec l'âge et qui est due à la perte progressive de la capacité de « mise au point » de l'œil, l'accommodation ? Depuis une cinquantaine d'années, on réalise des verres dits progressifs – et plus récemment encore des lentilles de contact multifocales – qui améliorent beaucoup le confort de vision des personnes atteintes de ces troubles. Mais de tels dispositifs sont difficiles à concevoir. De plus, ils ne sauraient nous rendre une vue parfaite. Pourquoi ?

CORRIGER LA MISE AU POINT

Idéalement, lorsque l'œil est au repos, l'effet combiné de l'interface courbe air-cornée et de la lentille que constitue le cristallin focalise l'image d'un objet lointain (nous dirons « à l'infini ») sur la rétine.

En déformant son cristallin, l'œil fait varier sa puissance optique (les fameuses « dioptries ») et peut ainsi former l'image d'objets plus proches. C'est l'accommodation. Pour un œil jeune, le point le plus distant de vision nette, ou *punctum remotum*, se situe à l'infini, tandis que le point de netteté le plus proche, ou *punctum proximum*, est à environ 7 centimètres.

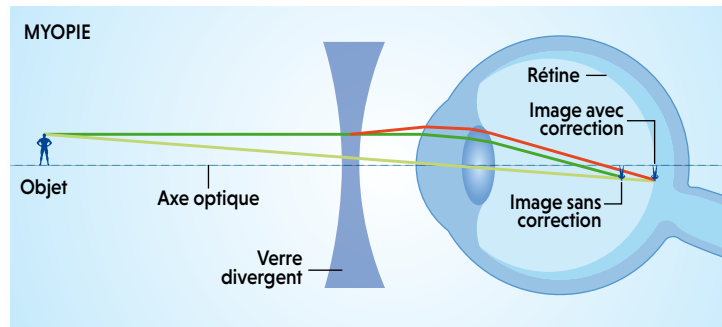
Chez les myopes, l'œil focalise trop : ils voient trouble au-delà d'une certaine distance, mais voient net de plus près. On corrige facilement ce défaut en ajoutant une lentille divergente devant l'œil.

Inversement, les hypermétropes ont des yeux qui ne focalisent pas assez. Même pour voir à l'infini, leurs yeux doivent travailler et ils voient mal de près. La correction consiste alors à ajouter une lentille

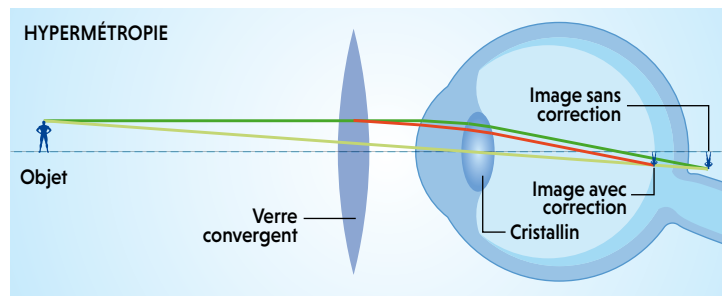


VUE CORRIGÉE

Des verres divergents, plus épais en leur périphérie qu'en leur centre, permettent de corriger la vision d'un myope. Chez une telle personne, l'œil non corrigé focalise trop et forme l'image en avant de la rétine. Chez un hypermétrope, dont l'œil ne focalise pas assez et forme donc l'image en arrière de la rétine, ce sont des verres convergents (analogues à des loupes, plus minces en leur périphérie qu'en leur centre) qui assurent la correction.



- Trajet du rayon lumineux sans verre correcteur
- Trajet du rayon lumineux avec verre correcteur
- Trajet d'un rayon lumineux passant par le centre optique (non dévié, avec ou sans verre correcteur)



Même les superhéros peuvent avoir des défauts de vision ! Les verres corrigeant la myopie sont des lentilles divergentes, et font donc apparaître les yeux plus petits. L'effet est inverse avec les verres corrigeant l'hypermétropie, qui sont convergents, comme les loupes.

convergente. Mais, avec l'âge, les capacités d'accommodation diminuent et le *punctum proximum* s'éloigne. À plus de 50 centimètres, il devient impossible de lire dans de bonnes conditions. C'est la presbytie. Et que dire quand, après une opération de la cataracte, qui remplace le cristallin opacifié par un cristallin artificiel, l'accommodation n'est plus du tout possible ?

Ainsi, nombre de personnes ont besoin d'au moins deux corrections différentes : une pour la vision de près et une pour la vision de loin. Que faire dans ce cas ? Changer de lunettes selon ses besoins ? Ce n'est plus nécessaire aujourd'hui, grâce à des dispositifs qui assurent simultanément plusieurs corrections.

C'est le cas des lentilles de contact multifocales. Dans leur version de base, la

région centrale de la lentille assure la correction de loin tandis que la périphérie se charge de la correction de près. Lorsqu'on regarde une scène lointaine (plus de 5 mètres) ou proche (30 centimètres), deux images, correspondant aux rayons lumineux qui traversent le centre ou la périphérie de la lentille, se superposent alors sur la rétine. Si l'une est nette, l'autre est très floue : le cerveau fait le tri et ne conserve que l'image nette.

Cette solution, utile pour ceux qui ont besoin de fortes corrections, a toutefois quelques désavantages : d'une part, la présence d'un halo dû à l'image floue ; d'autre part, aux distances intermédiaires, la présence simultanée de deux images un peu floues que le cerveau peine à discriminer.

Lorsque les corrections nécessaires ne sont pas très fortes, il y a une solution plus simple. La plupart du temps, pour voir de loin, le regard traverse la partie supérieure du champ de vision. Et pour voir de près, le regard traverse généralement sa partie inférieure. On peut donc concevoir un dispositif qui corrige différemment dans sa partie supérieure et dans sa partie ➤

Les auteurs ont
dernièrement publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



> inférieure. Ce sont par exemple les demi-lunettes, qui ne couvrent que la partie basse du champ de vision et corrigent donc uniquement de près, ou encore les lunettes à double foyer, qui corrigent à la fois de près et de loin.

Une stratégie analogue est possible pour les lentilles de contact, mais il faut qu'elles restent orientées correctement. À cette fin, le bas de la lentille est légèrement lesté. Lorsque l'œil bouge dans son orbite, il glisse sur la lentille qui reste à peu près en place. Cette dernière se déplace donc relativement à la cornée. Ainsi, une partie différente de la lentille corrige la vision selon la direction du regard.

Le souci avec les verres ou lentilles à double foyer est que la démarcation entre les deux zones est brutale. En outre, il se peut pour les presbytes que le *punctum proximum* de la vision de loin soit plus éloigné que le *punctum remotum* de la vision de près. Autrement dit, aux distances intermédiaires, par exemple celle qui correspond à un écran d'ordinateur ou à bout de bras, c'est trop près pour la vision de loin, mais trop loin pour la vision de près!

CORRECTION GRADUELLE

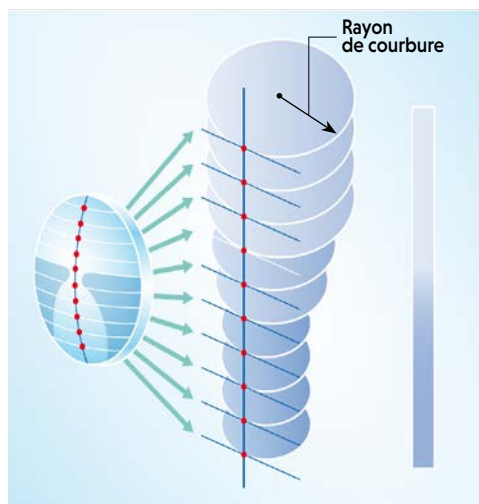
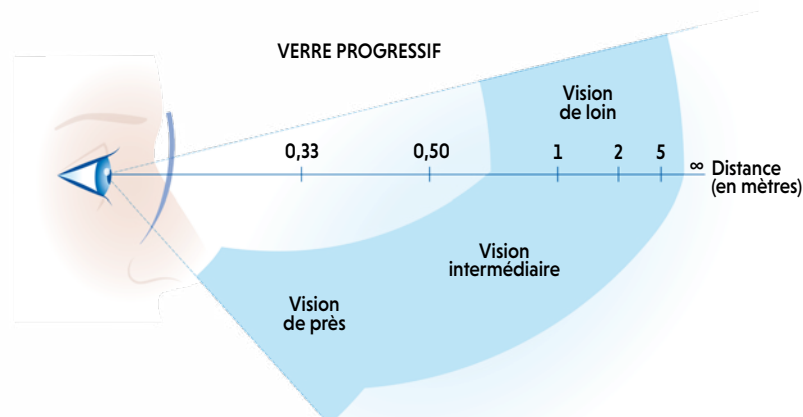
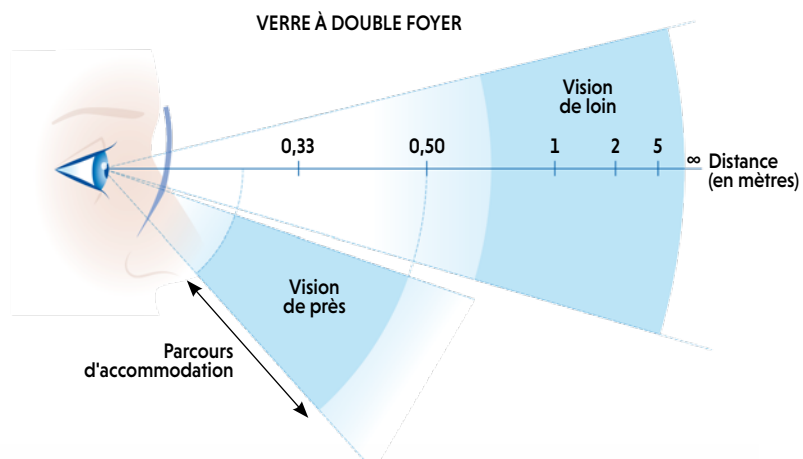
Pour y remédier, on a conçu des verres ou lentilles à triple foyer. Mais aujourd'hui, avec les progrès techniques, on fait mieux: on fabrique des verres dont la puissance optique varie progressivement le long de leur surface. Cela signifie que le rayon de courbure des interfaces air-verre (ou lentille-cornée) évolue continûment à la surface du verre.

La conception et la fabrication d'un tel verre n'est pas facile. Pourquoi? En chacun de ses points, une surface quelconque est similaire à celle d'un ovoïde: elle présente différents rayons de courbure selon la direction considérée. Les valeurs minimale et maximale définissent les «rayons de courbure principaux» au point considéré. Or un ovoïde n'est pas une surface adéquate du point de vue optique, car cette forme engendre de l'astigmatisme: les images produites sont brouillées selon certaines directions. C'est pourquoi les verres et les lentilles les plus simples ont des surfaces sphériques, où les deux rayons de courbure principaux ont la même valeur.

Essayons maintenant de concevoir un verre progressif. Pour simplifier, considérons seulement une seule interface air-verre. Intéressons-nous aux deux zones du verre que traverse le regard pour voir de loin et de près. La seconde est plus basse que la première et, à cause de la

DU BIFOCAL AU PROGRESSIF

Un verre à double foyer, ou bifocal, assure dans sa partie supérieure la vision de loin d'un œil presbyte et dans sa partie inférieure la vision de près. Mais en général, il reste une gamme de distances intermédiaires pour lesquelles l'œil ne peut pas accommoder et voit donc flou. Un verre progressif comble cette lacune sur une partie du champ de vision; cette partie est assez étroite dans la direction latérale (voir la figure du bas). Les deux schémas ci-dessous indiquent (en bleu) les zones de netteté possible en fonction de la direction du regard dans le plan vertical.



Le rayon de courbure d'un verre progressif est représenté ci-contre (par des disques de rayon correspondant) en différents points du verre le long d'une verticale centrale. La courbure varie progressivement, de faible en haut à forte en bas. Les zones du verre représentées en bleu foncé correspondent à des zones non sphériques qui brouillent les images (astigmatisme).

convergence des yeux pour la vision de près, n'est pas à sa verticale, mais plus proche du nez. Sur le couloir qui relie ces deux zones, il est tout à fait envisageable de modeler la surface pour qu'elle soit localement proche d'une calotte sphérique et que son rayon de courbure passe continûment de la valeur requise pour la correction de loin à celle requise pour la correction de près.

IMPOSSIBILITÉ GÉOMÉTRIQUE

En revanche, il est impossible d'imposer que les deux rayons de courbure principaux soient égaux sur l'ensemble de la surface. Par conséquent, sur une partie du verre, les rayons de courbure principaux seront nécessairement différents, ce qui produira de l'astigmatisme. C'est donc au verrier de trouver le compromis pour garantir le meilleur confort visuel possible.

Il y a deux grandes options. L'une est d'avoir, entre les zones de visions proche et lointaine du verre, un couloir où l'astigmatisme est très faible. Cela implique qu'en s'éloignant de ce couloir, ce défaut

BIBLIOGRAPHIE

D. Keeports, **Building a multifocal lens**, *The Physics Teacher*, vol. 51(4), pp. 250-251, 2013.

Collectif, **Les verres progressifs**, *Les Cahiers d'Optique Oculaire*, Essilor Academy Europe, 2006, disponible sur www.essiloracademy.eu

S. S. Lane et al., **Multifocal intraocular lenses**, *Ophthalmology Clinics of North America*, vol. 19(1), pp. 89-105, 2006.

deviendra rapidement très important et aura un impact négatif sur la vision périphérique. L'autre option est de s'autoriser des défauts plus également répartis sur toute la surface, mais qui seront d'amplitudes plus faibles. Le verre progressif qui corrige parfaitement tout le champ de vision des presbytes n'existe pas!

Un autre problème, d'ordre plus pratique, est lié à l'épaisseur du verre: comme la courbure de la partie supérieure du verre est différente de celle de sa partie inférieure, le haut du verre sera en général plus épais qu'en bas.

Pour obtenir des verres plus minces dans leur partie haute et plus légers, les opticiens ont une astuce qui consiste à incliner verticalement la surface postérieure du verre. On peut le faire de telle façon que la correction optique ne soit pas modifiée; mais cela décale légèrement et verticalement tout le champ de vision. Avec l'existence du couloir de vision sans astigmatisme, c'est l'une des raisons pour lesquelles il vaut mieux s'habituer progressivement aux verres... progressifs. ■

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

Organisme de formation continue

cnrs
formation
entreprises

→ 200 formations technologiques courtes proposées par le CNRS sur ses plateformes de recherche pour les ingénieurs et les techniciens

→ Domaines de formation

Big data, robotique, énergie, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, RMN... et plus encore

+ de 1100 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur **cnrsformation.cnrs.fr**



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

🐦 @CNRS_CFE

L'AUTEUR



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

COMMENT L'OURS POLAIRE A CONQUIS L'ARCTIQUE

Prenez une population ancestrale d'ours bruns sur le déclin, plongez-la dans une période interglaciaire bien chaude, et vous obtiendrez un mammifère aux capacités plus qu'étonnantes.

L'ours polaire (*Ursus maritimus*) est un excellent nageur. L'utilisation de colliers GPS sur des femelles a révélé que certaines parcourent plusieurs centaines de kilomètres dans l'eau glacée en quelques jours! En 2005, des biologistes de l'université d'Anchorage, en Alaska, ont ainsi suivi les déplacements d'une vingtaine d'ourses dans le nord de l'Alaska. Partie le 20 juin de la péninsule de Point Hope, une ourse a nagé 210 km jusqu'au 25 juin, s'est reposée une journée sur un petit iceberg, puis a repris sa traversée, parcourant 144 km avant d'atteindre la banquise, le 30 juin. Soit 354 km parcourus en 9 jours, à une vitesse moyenne de 1,6 km/h, dans une mer à moins de 4°C et sans ravitaillement.

Cet exploit met en évidence les principales adaptations que l'ours polaire a acquises au fil de l'évolution: protection contre le froid, capacités musculaire et

cardiaque étonnantes, gestion énergétique optimale... Aujourd'hui, les études de son génome nous content les originalités de cet athlète extraordinaire, dont les prouesses, connues des Inuits, ont longtemps été considérées comme des exagérations par les Occidentaux. Analysées dans un cadre évolutif, ces données non seulement étayent le scénario d'une adaptation rapide à un milieu extrême, mais invitent aussi à revisiter la différence entre le normal et le pathologique.

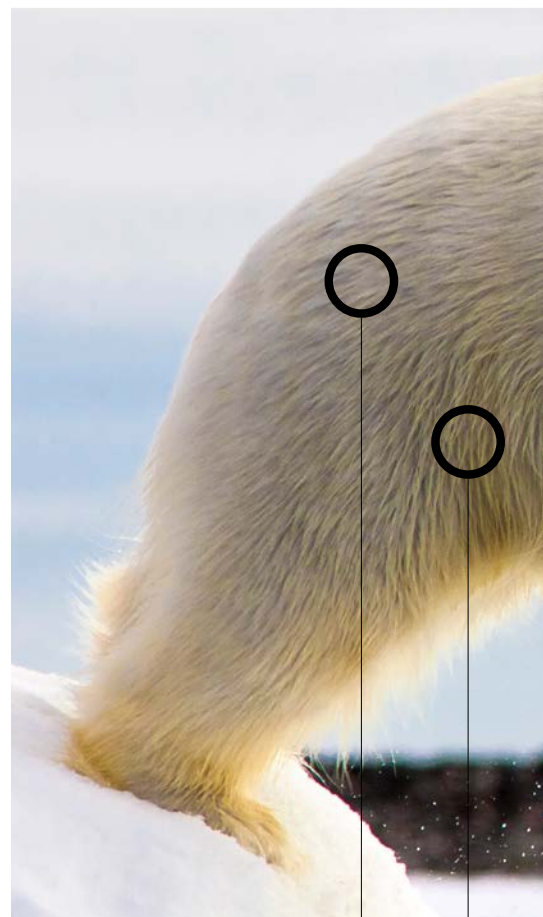
En 2014, un consortium international a précisé l'origine évolutive d'*Ursus maritimus* en étudiant les phylogénies moléculaires de cette espèce et de l'ours brun *Ursus arctos* – le grizzly américain –, c'est-à-dire en recherchant des liens de parenté à l'aide de séquences de gènes communs aux deux espèces. Résultat: l'ours polaire s'est différencié de l'ours brun il y a environ 400 000 ans. D'un point de vue évolutif, cette séparation

*Ursus maritimus*

Poids: entre 400 et 600 kg (mâle),
entre 200 et 350 kg (femelle)

Taille: 2 à 3 m (mâle), 1,8 à 2 m (femelle)

Durée de vie moyenne: 25 à 30 ans



3 à 4 g/l de cholestérol et 2 à 3 g/l de triglycérides dans le sang: une charge lipidique sanguine qui serait fatale à la plupart des mammifères (le sang humain porte de l'ordre de 1 g/l de cholestérol et 1,5 g/l de triglycérides).

Couche de graisse sous-cutanée comparable à celle des autres mammifères, malgré le froid polaire