

Ces travaux montrent qu'une chimiokine et ses récepteurs sont impliqués dans le contrôle de la fonction et de la viabilité du trabéculum, et qu'en bloquant l'accès à un récepteur, CXCR3, on peut traiter chez l'animal l'élévation de pression oculaire et la neuropathie associée. Ces résultats ouvrent de nouvelles pistes thérapeutiques où l'on ciblerait spécifiquement certains récepteurs de chimiokines au cours du glaucome. Cette stratégie permettrait non seulement de réduire la pression oculaire, mais aussi, peut-être, de diminuer voire prévenir la trabéculopathie elle-même, donc le cœur de la maladie glaucomateuse.

Par le passé, les stratégies thérapeutiques visant les chimiokines dans d'autres pathologies, en particulier du système immunitaire, se sont souvent heurtées non pas à leur inefficacité, mais à la survenue d'effets secondaires délétères. De fait, les chimiokines et leurs récepteurs sont présents dans tout l'organisme, et inhiber leurs interactions *via* une molécule généralement administrée par voie orale ou par injection perturbe l'équilibre cellulaire et tissulaire de façon globale. En ophtalmo-

logie, la problématique est différente, car l'administration peut s'effectuer au contact de l'œil par l'emploi d'un collyre, et donc sans les effets d'un traitement administré par voie générale.

Le nerf optique, le parent pauvre

Qu'il s'agisse de viser les chimiokines ou d'autres cibles, toutes les stratégies de traitement du glaucome reposent encore sur l'abaissement de la pression intra-oculaire. Aucune approche pour protéger et *a fortiori* régénérer le nerf optique après destruction par un glaucome ne s'est révélée efficace en test clinique. Pourtant, *in vitro* ou *in vivo*, de nombreuses molécules ont le potentiel de réaliser une telle neuroprotection. Les plus étudiées sont les antagonistes des récepteurs du glutamate, une molécule qui assure la communication entre les neurones. Lors d'un glaucome, on observe un excès de ce neuromédiateur dans les zones de communication entre neurones (les synapses), qui entraîne la destruction du neurone. Les antagonistes étudiés sont

prometteurs, car ils ciblent ce phénomène. Néanmoins, la démonstration clinique demeure un échec.

D'autres molécules qui imitent un autre neuromédiateur (l'adrénaline), les alpha-2 agonistes, semblent donner des résultats intéressants en termes de neuroprotection. Un représentant de cette famille, la brimonidine, commercialisé comme collyre pour faire baisser la pression oculaire, a en effet une affinité pour des récepteurs présents à la surface des neurones de la rétine. Instillée à une concentration suffisante, elle active des molécules qui protègent les neurones et favorise la sécrétion de facteurs neurotrophiques, des protéines qui assurent la croissance et l'entretien des neurones. Même si les résultats cliniques semblent prometteurs, en particulier ceux concernant de nouvelles approches de thérapie génique, il n'y a cependant pas de démonstration définitive de l'efficacité neuroprotectrice de ces traitements. Aussi, pour le moment, la meilleure neuroprotection semble donc rester l'abaissement de la pression intra-oculaire, quels qu'en soient les moyens. ■

Pour contribuer à la transmission
de la culture mathématique,
LE MAGAZINE TANGENTE ORGANISE

LES TROPHÉES tangente

DÉPÔT DES CANDIDATURES
AVANT LE 31 AOÛT 2014 MINUIT

Prix Bernard-Novelli

Soutenir les jeunes créateurs

Vous êtes collégiens, lycéens ?
Vous aimez concevoir des jeux logiques
faisant intervenir les mathématiques ?

Participez à ce concours
et transformez votre projet
en un produit mobile disponible
sur l'App Store et Google Play



Prix Tangente du livre

Donner envie d'en savoir plus

A partir du 15 juin, participez
à la sélection des ouvrages
en votant sur :
www.tropheestangente.com



Prix Tangente du meilleur article

Raconter les mathématiques

Envoyez-nous un article inédit vulgarisant un concept mathématique.
Le meilleur sera publié au sein du magazine *Tangente*



Inscriptions, informations et modalités de participation sur le site
www.tropheestangente.com

Les chauves-souris et d'autres prédateurs se servent des sons pour détecter leurs proies. Mais celles-ci ont développé des stratégies de camouflage acoustique.

Une course aux armements acoustiques

William Conner

Avez-vous déjà vu un hibou fondre sur un campagnol qui se déplace sous une couche de feuilles sèches ? Dans l'affirmative, vous avez pu constater l'efficacité de sa stratégie de détection, fondée sur une écoute passive, c'est-à-dire sur la détection des sons émis par ses proies. D'autres animaux – la plupart des chauves-souris et certains odontocètes (des cétacés à dents, tels les dauphins) – ont une stratégie active : ils émettent des sons et captent les échos, une technique qualifiée d'écholocalisation ou de sonar biologique. Les échos leur permettent de s'orienter dans leur environnement et de détecter les proies. En quelque sorte, ils voient grâce au son.

L'écholocalisation s'est développée il y a plus de 65 millions d'années chez les chauves-souris, et plus récemment chez les odontocètes. Le sonar biologique est une merveille technique, qui inspire les ingénieurs. Ces derniers ont développé des systèmes équivalents, les radars et les sonars, installés dans des stations au sol ou dans

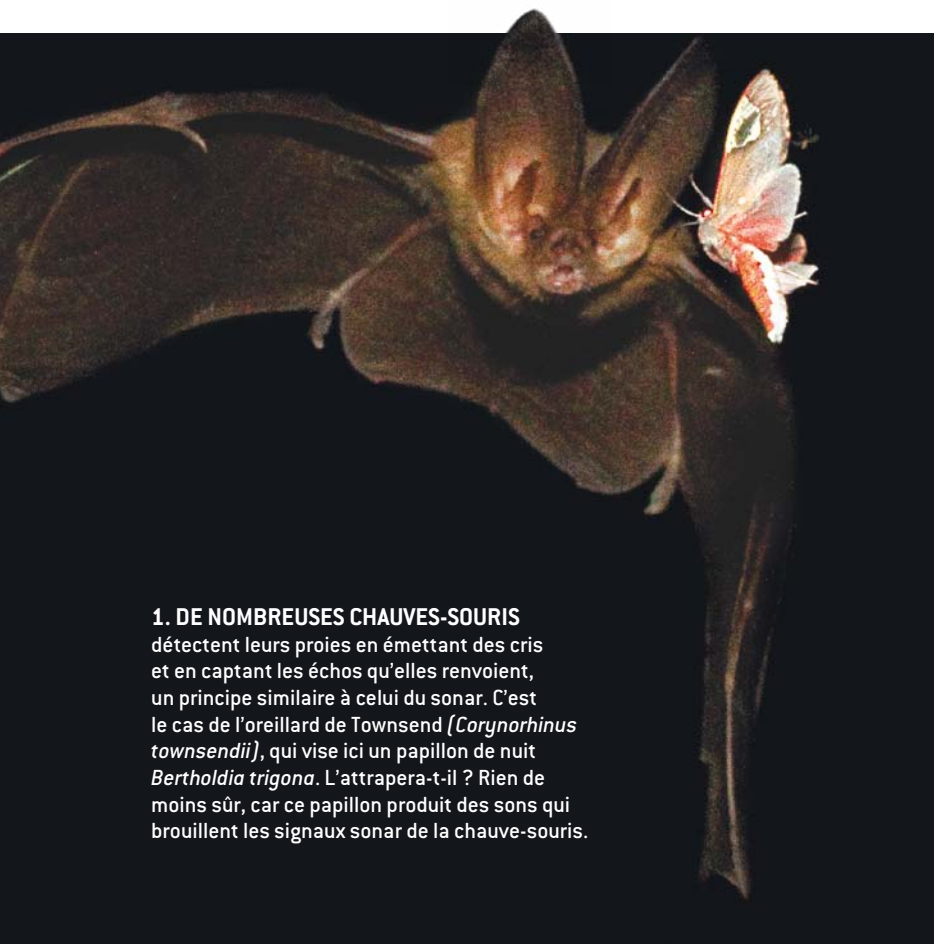
des véhicules aériens et sous-marins. Ces systèmes partagent de nombreuses caractéristiques avec l'écholocalisation animale dans la façon de produire, d'émettre, de recevoir et de traiter les signaux. Et le plus étonnant est peut-être que, chez les animaux comme chez les hommes, des contre-mesures sont apparues, telles des méthodes de furtivité et de brouillage du signal.

Un radar (*R*adio *D*etection *A*nd *R*anging, en français détection et télémétrie radio) émet des ondes radio, dont les échos après réflexion sur les objets sont détectés par une antenne. Si l'objet se déplace, les signaux réfléchis ont une fréquence différente, ce qui permet de déduire la vitesse de la cible. On utilise les ondes radio parce qu'elles parcourent de grandes distances dans l'air, même en présence de brouillard et de précipitations. Les ondes sonores se propagent mieux sous l'eau, ce qui a conduit au développement du sonar (*S*ound *N*avigation *A*nd *R*anging, en français navigation et télémétrie par le son) pour la détection dans ce milieu.

Le signal est différent, mais le principe est le même.

De nombreux scientifiques ont contribué au développement du radar, tels l'inventeur américano-serbe Nikola Tesla, et Guglielmo Marconi, l'ingénieur italo-britannique qui fut le premier à transmettre un signal radio d'un côté de l'Atlantique à l'autre. La mise au point de systèmes fonctionnels s'est accélérée à l'approche de la Seconde Guerre mondiale. Le premier d'entre eux, nommé *Chain Home*, comprenait une série de stations radar réparties sur les côtes sud et est de l'Angleterre. Il visait à détecter les bombardiers allemands qui se massaient dans l'espace aérien français, afin de permettre aux avions de combat anglais de se positionner à haute altitude pour les repousser.

Le développement du sonar précède d'une trentaine d'années celui du radar. Il s'intègre également dans une course aux armements, puisque l'objectif était de repérer les sous-marins de la Première Guerre mondiale. Les premiers dispositifs, installés sur des navires allemands, étaient fondés



© Aaron Corcoran

1. DE NOMBREUSES CHAUVES-SOURIS

détectent leurs proies en émettant des cris et en captant les échos qu'elles renvoient, un principe similaire à celui du sonar. C'est le cas de l'oreillard de Townsend (*Corynorhinus townsendii*), qui vise ici un papillon de nuit *Bertholdia trigona*. L'attrapera-t-il ? Rien de moins sûr, car ce papillon produit des sons qui brouillent les signaux sonar de la chauve-souris.

sur une écoute passive : des microphones sous-marins (ou hydrophones) pouvaient détecter aussi bien les sons des torpilles en approche que ceux des navires éloignés. Le naufrage du *Titanic* a aussi stimulé le développement du sonar, susceptible de repérer les icebergs dans l'obscurité et le brouillard. Les dispositifs actifs sont apparus pendant l'entre-deux-guerres. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la plupart des navires de guerre américains et britanniques étaient équipés de sonars sous-marins.

L'étude du sonar biologique et l'élaboration de dispositifs artificiels se sont souvent nourries l'une de l'autre. Sir Hiram Maxim, un inventeur américano-britannique du début du XX^e siècle, a voulu doter les navires d'un système inspiré de l'écholocalisation des chauves-souris, afin de prévenir les collisions. Malheureusement, les connaissances en la matière étaient rudimentaires à l'époque, et il n'est pas parvenu à développer un dispositif fonctionnel. Maxim pensait que les chauves-souris s'orientaient grâce à

L'ESSENTIEL

- Certains animaux émettent des ondes acoustiques et repèrent leurs proies grâce aux échos qu'elles produisent.
- Les chauves-souris sont ainsi capables de percevoir jusqu'aux battements d'ailes des insectes.
- Des techniques d'atténuation des échos et d'émission de bruits parasites sont alors apparues chez ces derniers. Cette « course aux armements » dure depuis plus de 65 millions d'années.

des signaux de basse fréquence produits par leurs battements d'ailes. Le physicien George Washington Pierce, qui a travaillé au laboratoire anti-sous-marins de la marine américaine, a plus tard aidé le zoologiste Donald Griffin à éclaircir les mécanismes de l'écholocalisation des chauves-souris. Il a développé un microphone fondé sur des matériaux piézoélectriques (qui produisent de l'électricité en réponse à un stress mécanique). Cet appareil a permis d'enregistrer pour la première fois les cris ultrasonores sur lesquels repose le système d'écholocalisation des chauves-souris.

Voir loin ou voir petit

Qu'ils soient biologiques ou artificiels, les dispositifs de radar et de sonar actifs émettent des trains d'onde. La longueur d'onde du signal est proportionnelle à la taille de la structure qui le produit (ainsi, plus une corde de guitare est raccourcie en étant pincée sur le manche, plus elle émet un son aigu, c'est-à-dire de courte longueur d'onde). Celle des ondes émises par les radars du *Chain Home* était de 12 mètres. Les stations étaient constituées de quatre tours de 110 mètres de hauteur, espacées de 55 mètres et reliées par un réseau de câbles d'acier magnétisés. Les cordes vocales d'une chauve-souris, en revanche, sont minuscules et produisent des ultrasons, de courtes longueurs d'onde (voir la figure 2).

La portée du signal dépend de sa longueur d'onde et de sa fréquence : plus la longueur d'onde est grande (ou, de façon équivalente, plus la fréquence est basse), plus le signal voyage loin. Ainsi, la grande longueur d'onde des signaux émis par le *Chain Home* permettait la détection d'objets éloignés. De même, les infrasons, dont les fréquences sont inférieures à 25 hertz (ou oscillations par seconde), se propagent relativement loin dans l'air. Les éléphants et d'autres gros animaux terrestres les utilisent pour communiquer à grande distance, sur environ deux kilomètres. En revanche, les ultrasons des chauves-souris, dont les fréquences dépassent 20 000 hertz, sont vite absorbés par les molécules d'air, ce qui limite leur efficacité à quelques mètres seulement.

Autre relation importante, plus la longueur d'onde est courte, meilleure est la résolution. Avec des signaux de grandes longueurs d'onde, on détecte bien de gros

objets tels que des navires en mer, mais ils sont moins efficaces pour les cibles plus petites. Et de fait, si les premiers radars pouvaient repérer un groupe d'avions en approche, ils peinaient à déterminer leur nombre. En revanche, avec leur sonar à courte longueur d'onde, les chauves-souris détectent des insectes aussi petits que les moustiques, coléoptères et papillons de nuit qui constituent leur alimentation. Jim Simmons, de l'Université Brown, aux États-Unis, a montré qu'elles atteignent une résolution de l'ordre du micromètre, ce qui leur permettrait de percevoir jusqu'à la texture de surface de leurs cibles.

Un radar ou un sonar produit un faisceau assez comparable à celui d'une lampe de poche. Les faisceaux étroits permettent de concentrer la puissance du signal dans une direction donnée et ainsi de détecter des cibles plus lointaines. Ils améliorent également la précision avec laquelle on détermine la direction de la cible. Les ingénieurs contrôlent la forme d'un faisceau radar en faisant varier la distance entre les éléments émetteurs de l'antenne et la longueur de celle-ci. Les animaux aussi peuvent contrôler la forme du faisceau. En 2009, Rolf Müller, de l'Université Virginia Tech, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les étonnantes « feuilles » nasales du rhinolophe de Bourret (une espèce de chauve-souris) lui permettent de produire un faisceau sonar très focalisé, qui optimise ses capacités de détection (voir la figure 3).

Il peut aussi être utile de contrôler dynamiquement la forme du faisceau. Certaines lampes de poche, par exemple, ont un faisceau lumineux dont la forme est modifiable. Des faisceaux étroits sont efficaces pour repérer avec précision des cibles éloignées, tandis que des faisceaux larges permettent de balayer une zone plus étendue (mais plus proche). Certains odontocètes, tels les bélugas et les fausses orques (voir la figure 3), sont capables de focaliser leur faisceau d'écholocalisation en ajustant la forme d'une « lentille acoustique » remplie d'huile, située dans leur front et nommée melon. En 2012, Lasse Jakobsen et ses collègues de l'Université du Danemark du Sud ont montré que certaines chauves-souris adaptent leur sonar au contexte. En ouvrant grand leur bouche et en augmentant la fréquence de leur cri, elles produisent un faisceau plus étroit, permettant de « voir » plus

loin ; en faisant l'inverse, elles émettent un faisceau plus large, qui sonde une zone plus étendue.

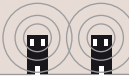
D'autres techniques sont utilisées à la fois par les ingénieurs et par leurs homologues animaux. Le balayage de fréquences, par exemple, peut augmenter de deux ordres de grandeur le pouvoir séparateur radial (qui quantifie la capacité à distinguer deux objets situés à des distances voisines). Certaines chauves-souris (parfois nommées chauves-souris FM, pour *frequency modulating*) font ainsi varier la fréquence de leurs cris. Elles chassent dans des environnements complexes, attrapant leurs proies entre des branches d'arbres ou au sommet de la végétation, voire à la surface de l'eau. D'autres chauves-souris produisent un signal de fréquence constante (elles sont qualifiées de chauves-souris CF, pour *constant frequency*). L'avantage est qu'elles peuvent alors mesurer la vitesse relative des proies grâce aux décalages Doppler (les variations de fréquence perçues quand l'émetteur du signal est en mouvement par rapport au récepteur) : de même que le sifflet d'un train paraît plus aigu quand il s'approche de vous, l'écho sur un papillon de nuit semble plus aigu à la chauve-souris quand l'insecte vole vers elle. Nous y reviendrons.

La distinction entre chauves-souris FM et CF semble aujourd'hui restrictive, car on a découvert que certaines espèces alternent les deux types d'émission. Elles utilisent des signaux à bande étroite pour la détection de proies à distance, puis passent au balayage de fréquences au moment de l'attaque, lorsque le pouvoir séparateur radial devient critique pour assurer la prise (voir la figure 4).

L'influence du milieu

Outre la longueur d'onde et la focalisation du faisceau, les caractéristiques du milieu influent sur la distance de propagation. Les ondes électromagnétiques des radars sont peu atténuées dans l'air, tandis que le son s'y propage beaucoup moins bien et est davantage sujet aux caprices de l'environnement, tels le vent ou la pluie.

Sous l'eau, en revanche, le son est roi. Il se propage sur de grandes distances et l'énergie sonore n'est absorbée qu'à raison de un pour cent par kilomètre environ. Cela permet aux baleines de communi-

Longueur d'onde = $\frac{\text{Vitesse de l'onde}}{\text{Fréquence}}$	
	
Radar Chain Home	
12 mètres =	$\frac{299\,792\,485 \text{ mètres/seconde}^*}{25\,000\,000 \text{ hertz}}$
	
Chauve-souris	
0,0068 mètre =	$\frac{343,2 \text{ mètres/seconde}^{**}}{50\,000 \text{ hertz}}$
	
Dauphin	
0,015 mètre =	$\frac{1\,500 \text{ mètres/seconde}^{***}}{100\,000 \text{ hertz}}$
* Vitesse de la lumière ** Vitesse du son dans l'air *** Vitesse du son dans l'eau de mer	

2. LES ONDES DES PREMIERS RADARS, ceux du réseau *Chain Home*, en Angleterre, avaient une longueur d'onde de 12 mètres. Ces radars « voyaient » loin, mais étaient peu précis. En revanche, la chauve-souris, avec ses cris de faible longueur d'onde, perçoit à courte distance et de façon très détaillée. Le sonar des dauphins porte plus loin, car l'eau de mer conduit bien le son.

quer à travers l'immensité des océans. La communication à grande distance sous l'eau est facilitée par la présence de canaux naturels de transmission sonore, que suivent les ondes : à mesure que l'on descend, la vitesse du son est modifiée par les changements de température, de salinité et de pression (voir la figure 5), et on montre qu'en raison de ces gradients de vitesse, les ondes sonores se courbent et se focalisent à certaines profondeurs particulières. Dans l'océan, l'un de ces canaux est en surface : les ondes sonores se courbent vers la surface, sur laquelle elles rebondissent, se propageant de bonds en bonds sur de grandes distances. Plus en profondeur, un deuxième canal (nommé SOFAR, pour *SOund Fixing And Ranging*, ou Extension et stabilisation du son) piège les sons. Ces canaux limitent la dispersion du son et les sous-marins comme les mammifères marins les mettent à profit pour optimiser la puissance sonore diffusée (voir la figure 5).

Le rayonnement électromagnétique, quant à lui, est tellement atténué en milieu aquatique qu'il n'y est pas très utilisé : pour la plupart des longueurs d'onde,

■ L'AUTEUR



William CONNER est professeur de biologie et titulaire de la chaire David et Lelia Farr d'innovation, de créativité et d'entrepreneuriat à l'Université de Wake Forest, en Caroline du Nord, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

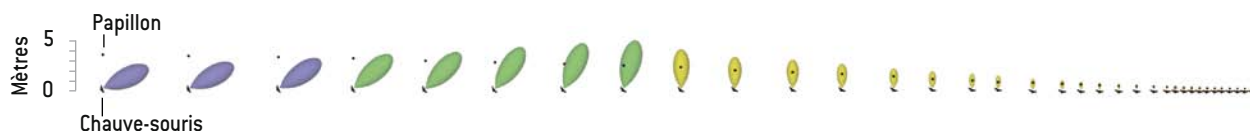
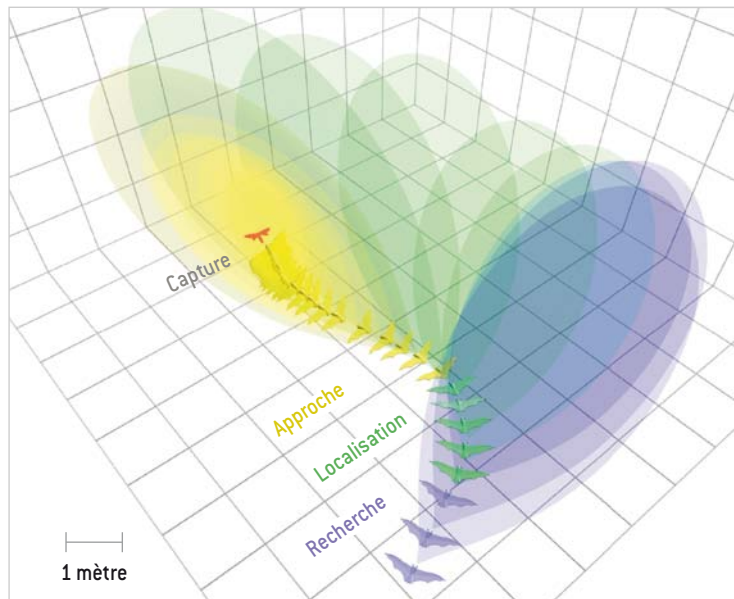
l'eau absorbe 99,99 pour cent de l'énergie du rayonnement par mètre parcouru. Notons que dans l'étroite bande de 400 à 700 nanomètres, qui correspond à la lumière visible, le rayonnement est moins atténué ; les organismes aquatiques l'exploitent pour la communication visuelle.

Les radars et les sonars détectent respectivement les signaux grâce à des antennes et des hydrophones piézoélectriques. Comme de nombreux mammifères, les chauves-souris captent les sons par les oreilles. Celles-ci comprennent un tympan, qui vibre au rythme du son porté par l'air, et un organe rempli de liquide, nommé cochlée, qui traduit les vibrations mécaniques en influx nerveux. La vibration est transmise du tympan à la cochlée par de petits os (les osselets de la chaîne ossiculaire).

Les grands pavillons mobiles des oreilles agissent comme des déflecteurs paraboliques, qui acheminent le son vers le conduit auditif. Chez de nombreuses espèces de chauves-souris, leur taille est liée à la plage de fréquences des signaux sonar produits : les oreilles sont d'autant plus petites que les fréquences sont élevées. Les plus grandes sont l'apanage des chauves-souris dites

COMMENT LES CHAUVES-SOURIS DÉTECTENT LEUR PROIE

La chauve-souris commence par chercher sa proie avec des faisceaux directionnels d'ondes acoustiques (en violet), similaires aux faisceaux électromagnétiques des radars, jusqu'à ce qu'elle accroche une cible (en vert). Elle diminue alors l'intensité de ses cris pour maintenir les échos à un niveau sonore constant pendant la poursuite (en jaune). La reconstitution tridimensionnelle ci-contre montre le faisceau acoustique d'une chauve-souris attaquant un papillon de nuit. Elle est fondée sur les positions des protagonistes et les intensités des cris enregistrées pendant une attaque réelle d'une chauve-souris du genre *Myotis*. La forme et la direction du faisceau ont été établies à partir des données scientifiques préexistantes, et son volume correspond à celui qui serait « éclairé » par des intensités sonores d'au moins 90 décibels. Les graphiques bidimensionnels (ci-dessous) présentent la forme et l'intensité du faisceau d'écholocation (d'autant plus importante qu'il est grand), ainsi que sa direction par rapport à la cible.

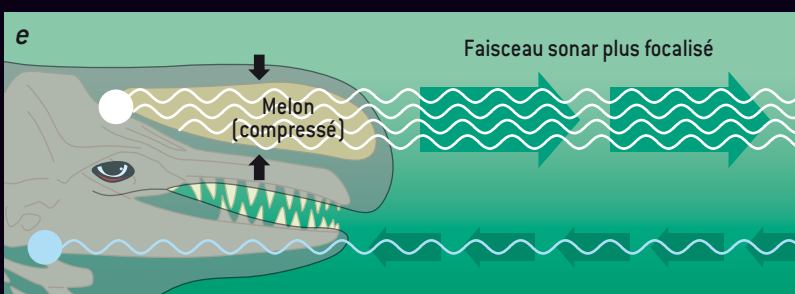
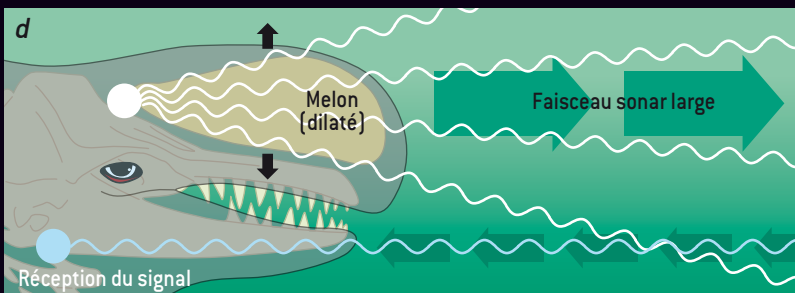




© Rolf Mueller, Virginia Tech



© Doug Perrine/Nature Picture Library/Corbis



3. PLUS LE FAISCEAU SONAR EST FOCALISÉ, plus il porte loin et est précis, mais moins la zone balayée est large. Les chauves-souris du genre *Rhinolophus* [a, b] émettent leurs signaux par le nez. Celui du rhinolophe de Bourret [b] a une structure permettant de bien focaliser le faisceau. La fausse orque *Pseudorca crassidens* [c] peut faire varier cette focalisation en modifiant la forme d'une lentille acoustique naturelle – une structure remplie de fluide située dans son front et nommée melon [d, e].

glaneuses, qui chassent souvent des proies au sol ou à la surface de l'eau (tandis que d'autres attrapent les papillons de nuit en vol), et utilisent l'écoute passive pour trouver leurs cibles. Elles peuvent entendre le battement des ailes d'un papillon ou les pas d'un mille-pattes qui marche dans le voisinage. Les pavillons auriculaires jouent aussi un rôle important dans la localisation de l'émission sonore. Chacun sert d'antenne acoustique directionnelle et les différences entre les signaux qu'ils reçoivent, notamment entre les intensités et les temps d'arrivée, permettent de localiser la source.

Comme celle des autres mammifères, la cochlée de la chauve-souris comporte une « membrane basilaire ». Il s'agit d'une structure rigide où sont fixées les cellules ciliées internes, qui transforment les vibrations en signaux électriques. Chaque partie de cette membrane vibre en réponse à une plage particulière de fréquences. Via le nerf auditif, les cellules ciliées transmettent alors l'information au cerveau, qui finit de traiter le signal.

Déterminer la distance et la vitesse de la cible

La chauve-souris détermine l'éloignement de sa cible grâce à la mesure précise du moment d'arrivée de l'écho. Ce dernier est difficile à extraire du bruit de fond, dont l'intensité peut être mille fois plus puissante. Le cerveau de l'animal effectue un traitement qualifié de corrélation croisée, c'est-à-dire qu'il conserve une copie du signal perçu au moment de son cri et compare en continu ce qu'il entend à cette copie, jusqu'à ce qu'il obtienne une bonne correspondance. Cette méthode est encore plus efficace chez les chauves-souris qui modulent la fréquence de leur cri.

La cible localisée, une information importante manque encore : sa vitesse relative. Pour la déterminer, la chauve-souris évalue le décalage Doppler. Imaginez une chauve-souris qui vole au-dessus de la végétation. Tous les éléments du fond, tels le sol, les arbres et les buissons ont une vitesse relative égale à la vitesse de la chauve-souris. Imaginez maintenant un papillon de nuit solitaire qui vole vers le prédateur. Sa vitesse relative – et donc le décalage Doppler du son qu'il renvoie – est différente. En conséquence, son écho n'a pas la même fréquence que ceux renvoyés par le fond, dont il se démarque.

Certaines chauves-souris qui émettent un cri de fréquence constante atteignent une telle précision dans la mesure des décalages Doppler qu'elles peuvent détecter le mouvement des ailes d'un papillon, une information intéressante pour distinguer le type de proie. C'est ce qu'a montré l'équipe de Han-Ulrich Schnitzler, de l'Université de Tübingen, en Allemagne, sur le murin à moustaches (*Pteronotus parnellii*). Les chauves-souris mobilisent alors une part significative de leurs ressources cérébrales pour mesurer les décalages Doppler. Une portion importante de leur membrane basilaire est consacrée à l'étroite bande entourant la fréquence qu'elles émettent. Cette portion de la membrane est surnommée fovéa auditive, par analogie avec la fovéa de l'œil (la partie centrale de la rétine, qui contient une grande concentration de récepteurs lumineux). Grâce à elle, la résolution spectrale est maximale autour de la fréquence émise. Notons que le mouvement des ailes peut aussi être détecté à partir des variations d'amplitude de l'écho (voir la figure 6).

La détection sonar ou radar est notablement gênée par le nuage d'échos, c'est-à-dire la réception d'échos parasites, renvoyés par des objets non ciblés. Les échos indésirables sont par exemple produits par la pluie ou par diverses surfaces. Ainsi, le même problème se pose à un radar positionné à haute altitude qui tente de détecter un avion survolant un fond urbain en rase-motte et à une chauve-souris qui traque un papillon volant près d'un buisson : les bâtiments et les feuilles renvoient une multitude d'échos complexes et perturbants. Là encore, les chauves-souris exploitent les décalages Doppler. Certaines utilisent aussi un second stratagème : elles émettent des sons par paires, chaque cri ayant une fréquence différente, ce qui leur permet de trier plus efficacement les échos et de mieux les distinguer des parasites.

Mesures et contre-mesures

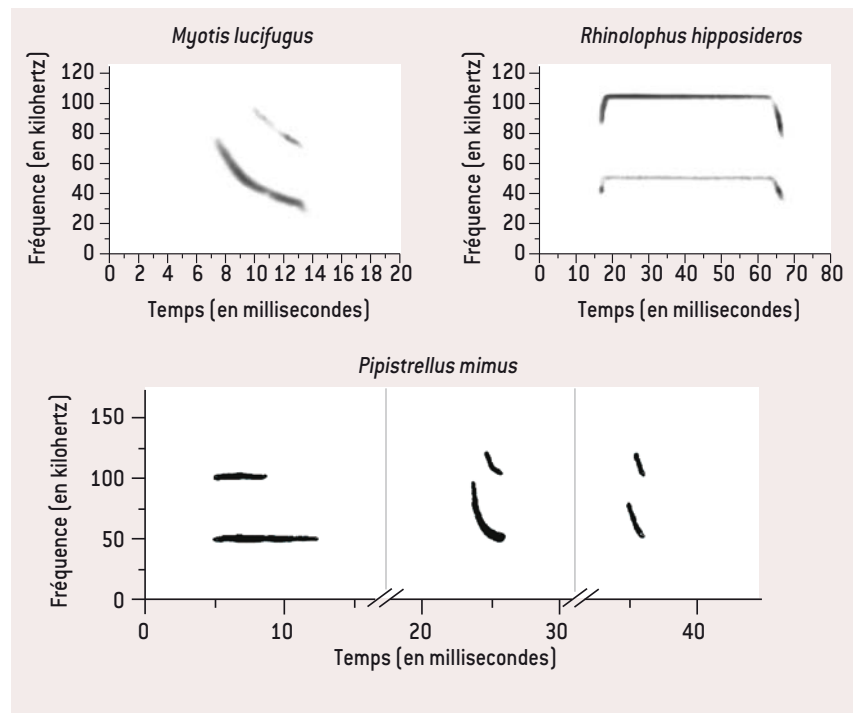
Malgré tout, certains insectes parviennent à se dissimuler dans le nuage d'échos. Les papillons de nuit *Hepialus humuli* se cachent aux chauves-souris en s'accouplant juste au-dessus de la végétation (à moins de 50 centimètres d'elle), de sorte que leur écho se fond dans ceux des feuilles et des tiges avoisinantes. De nombreux

autres insectes utilisent probablement cette stratégie de camouflage.

Chez l'homme, chaque progrès des systèmes de radar et de sonar donne lieu à des efforts pour mettre au point une contre-mesure. Les ingénieurs ont ainsi conçu des avions dits furtifs, en réduisant notablement leur « surface équivalente radar » (ou RCS, pour *radar cross section*) : ce paramètre, exprimé en mètres carrés, quantifie la propension d'un objet à renvoyer le rayonnement électromagnétique vers le radar, et mesure donc sa détectabilité. Selon certaines rumeurs, les bombardiers furtifs B-2 auraient une RCS de la taille d'un timbre postal. Elle aurait été obtenue en cachant les réacteurs et les gouvernes à l'intérieur des ailes, en accentuant les angles des composants qui dévient les ondes radar hors du champ des récepteurs et en utilisant des matériaux composites et des peintures qui absorbent les ondes incidentes ou atténuent leur réflexion.

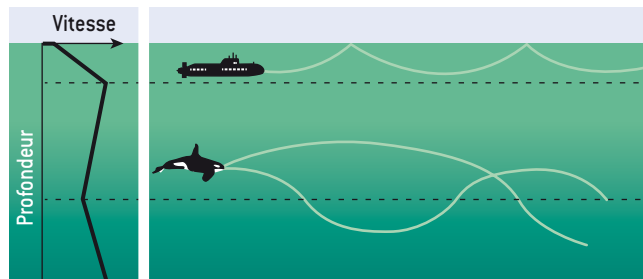
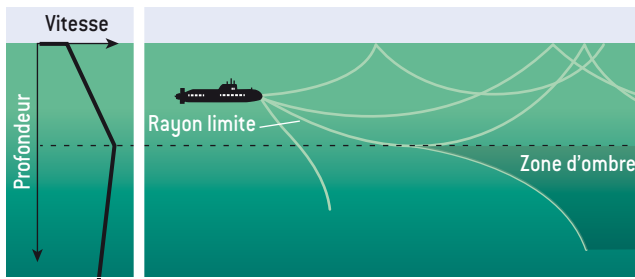
Les insectes sont aussi lancés dans une course à la furtivité. Certains, appréciés des chauves-souris, atténuent l'écho qu'ils produisent. En 2011, Jinyao Zeng et ses collègues de l'Université normale de la Chine de l'Est, à Shanghai, ont suggéré

Les écailles qui recouvrent les ailes des papillons de nuit absorbent les cris des chauves-souris, diminuant ainsi l'amplitude des échos renvoyés et compliquant la détection.



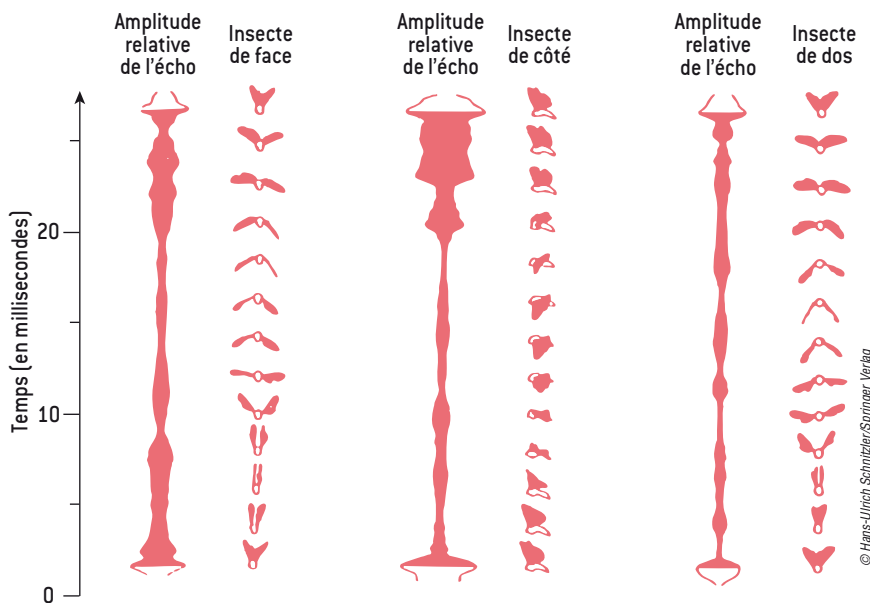
4. LA FRÉQUENCE DU CRI varie chez certaines chauves-souris, dites à modulation de fréquence (*spectrogramme en haut à gauche*), tandis qu'elle reste constante chez d'autres espèces (*en haut à droite*). Une fréquence constante permet de mieux déterminer la vitesse de la proie, mais un balayage de fréquences améliore la résolution. Certaines chauves-souris sont capables de passer d'un mode à l'autre selon les besoins (*en bas*).

© Paul Faure/Journal of Experimental Biology - image du bas : © G. Neuweiler, 1983/Springer Verlag



5. LA VITESSE DU SON DANS L'Océan varie en fonction de la profondeur. Par conséquent, les ondes acoustiques sont focalisées dans des canaux naturels. Celles émises par un sous-marin se courbent vers la surface et se propagent sur de longues distances via une succession de rebonds [à gauche]. Cependant, pour les

ondes qui plongent en dessous d'un rayon limite, la courbure s'inverse à partir d'une certaine profondeur, ce qui crée une zone d'ombre où aucun signal ne pénètre. Un mammifère marin nageant à plus grande profondeur peut envoyer ses cris dans un autre canal, nommé SOFAR, dont la profondeur varie avec la latitude [à droite].



6. L'AMPLITUDE DE L'ÉCHO RENVOYÉ PAR UN INSECTE varie suffisamment au cours de son battement d'ailes pour que certaines chauves-souris détectent ces changements, ce qui leur permet de déterminer le type de proie. L'écho capté dépend aussi de l'orientation de l'insecte par rapport au prédateur ou au dispositif d'enregistrement.

que les écailles recouvrant les ailes des papillons de nuit absorbent les cris des chauves-souris, diminuant ainsi l'amplitude des échos renvoyés et compliquant la détection. Ces écailles font plus que doubler le coefficient d'absorption des ailes pour les fréquences comprises entre 40 et 60 kilohertz, ce qui se traduit par une baisse d'intensité de l'écho allant jusqu'à deux décibels. Les mécanismes d'absorption du son restent à préciser, mais ils pourraient être voisins de ceux des matériaux antibruit fabriqués par l'homme : les écailles sont souvent séparées par des espaces et recouvertes de micropores et de lacunes (des espaces oblongs) ressemblant à ceux des matériaux artificiels. Les éthologistes commencent juste à mettre en évidence ces cas de furtivité

naturelle, où les proies se dissimulent à l'écholocation des prédateurs, et de nombreux autres exemples restent probablement à découvrir.

Outre la furtivité, une autre façon d'échapper aux sonars et aux radars consiste à interférer avec la réception ou le traitement des échos, autrement dit à utiliser des techniques de brouillage. Aux débuts de ces dispositifs de détection, deux organisations en particulier se sont illustrées dans cette guerre électronique : les *Skunk Works*, de l'entreprise *Lockheed Martin*, et une organisation internationale à but non lucratif nommée *Association of old crows* (en référence aux équipes radar alliées de la Seconde Guerre mondiale, qui portaient le nom de code *Raven*, *crow* et *raven* signifiant tous deux « corbeau » en anglais). Ces

deux groupes ont développé des contre-mesures électroniques et des « contre-contre-mesures » pour des applications militaires.

Les méthodes de brouillage peuvent être soit passives soit actives. Les méthodes passives incluent les leurres, des matériaux (tels de fines bandes d'aluminium ou des fibres de verre métallisées) largués par un appareil afin de masquer sa position précise et ses mouvements aux radars ennemis. Les méthodes actives consistent à envoyer des signaux électroniques pour aveugler ou tromper le radar. Ainsi, les brouilleurs dits à bruit submergent le récepteur radar de bruit électronique, ce qui complique la détection de l'écho relativement faible de la cible. Les brouilleurs-répéteurs fournissent une copie de l'écho réel, mais dans un délai fictif, ce qui conduit le récepteur à détecter un objet fantôme allant dans la mauvaise direction. Le brouillage actif est à double tranchant, car le brouilleur risque de livrer un signal à un récepteur radar qui n'avait rien détecté.

Les insectes, experts en brouillage

De telles techniques pourraient sembler hors de portée des insectes, mais leur course aux armements avec les chauves-souris dure depuis 65 millions d'années, assez longtemps pour que prédateurs et proies développent des mesures et contre-mesures élaborées. Des chercheurs de mon laboratoire ont découvert que les papillons de nuit tigres équatoriens du genre *Bertholdia* (de la famille des *Erebidae*) produisent une cacophonie de clics quand ils sont ciblés par une chauve-souris pratiquant l'écholocation. Les insectes détectent les signaux sonar du prédateur en approche grâce à leur appareil auditif sensible aux

hautes fréquences. Ils produisent alors les clics grâce à des morceaux de cuticule striés nommés timbales et situés de part et d'autre du thorax. Chaque timbale présente une trentaine de bandes successives, que l'insecte déforme l'une après l'autre, produisant une succession de clics. La timbale émet une seconde série de clics en reprenant sa forme initiale. La fréquence atteint 4500 clics par seconde. C'est un exemple typique de brouilleur de sonar, dont le principe est identique à celui des brouilleurs de radar. Les timbales sont caractéristiques des papillons du genre *Bertholdia* et de leurs cousins, et leur distribution taxonomique suggère que ces organes représentent une parade ancienne au sonar des chauves-souris.

Mon étudiant Aaron Corcoran a montré que les clics émis par les papillons empêchent les chauves-souris de les attraper, en laboratoire comme sur le terrain. Comment ce brouillage sonore modifie-t-il la perception des chauves-souris ? Certains chercheurs ont suggéré que si les clics du papillon ont des caractéristiques spectrales et temporelles assez semblables à celles des échos que renverraient des proies, les chauves-souris les interpréteraient comme des échos produits

BIBLIOGRAPHIE

W. Conner et A. Corcoran, **Sound strategies : The 65-million-year-old battle between bats and insects**, *Annual Review of Entomology*, vol. 57, pp. 21-39, 2012.

L. Jakobsen *et al.*, **Convergent acoustic field of view in echolocating bats**, *Nature*, vol. 493, pp. 93-96, 2012.

L. Kloepper *et al.*, **Active echolocation beam focusing in the false killer whale, *Pseudorca crassidens***, *Journal of Experimental Biology*, vol. 215, pp. 1306-1312, 2012.

W. Conner, **Tiger Moths and Woolly Bears : Behavior, Ecology and Evolution of the *Arctiidae***, Oxford University Press, 2008.

D. Nguyen, **La communication chez les dauphins et les baleines**, *Dossier Pour la Science*, n° 34, 2002.

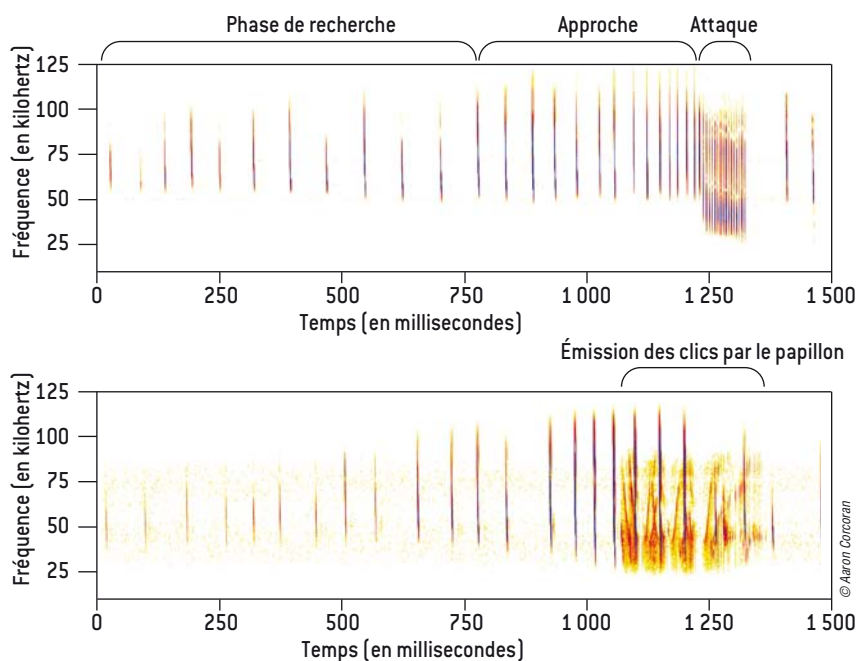
par des « cibles fantômes ». Deuxième hypothèse, des clics assez nombreux et intenses pourraient masquer les véritables échos, rendant la cible invisible. Enfin, des clics qui se superposent aux échos ou les précèdent de peu diminueraient la précision avec laquelle le prédateur détermine la distance de la proie. Les trois hypothèses se distinguent par ce que perçoit la chauve-souris : de multiples objets entourant le papillon pour l'hypothèse des cibles fantômes, aucune cible pour celle du masquage et une cible floue dans le cas d'interférences avec les indications de distance. Les travaux d'A. Corcoran accréditent pour l'instant cette dernière hypothèse, qui prédit de façon fidèle l'écart avec lequel la chauve-souris manque sa proie.

A. Corcoran a aussi montré que les papillons brouilleurs ne produisent leurs signaux que lorsqu'ils sont menacés par une chauve-souris (voir la figure 7). Quand celle-ci a repéré sa proie et se met en chasse, elle augmente l'intensité de ses cris et diminue l'intervalle qui les sépare. Le papillon détecte ces modifications et déclenche alors son brouillage.

Des chauves-souris furtives

Les chauves-souris ne sont pas en reste dans la course aux armements : en 2010, Holger Goerlitz et ses collègues de l'Université de Bristol, au Royaume-Uni, ont découvert que certaines d'entre elles sont furtives. Ainsi, les cris d'écholocation de la chauve-souris *Barbastella barbastellus*, qui chasse les insectes en vol, sont 10 à 100 fois moins intenses que ceux de ses consœurs. En conséquence, elle n'est détectée par les papillons dotés d'un système auditif que lorsqu'elle fonce sur eux et que leur sort est déjà scellé.

Ces stratagèmes et contre-stratagèmes constituent ce qu'on nomme une course aux armements diffuse, où de multiples espèces de chauves-souris mènent une lutte évolutionniste contre de multiples espèces de papillons. Les découvertes devraient se multiplier : on compte environ 11 000 espèces de papillons tiges dans le monde et 200 000 autres espèces de papillons de nuit, auxquels s'ajoutent des insectes variés (coléoptères, sauterelles, criquets, mouches, mantes, etc.). Tous doivent se protéger des chauves-souris, le plus redoutable des prédateurs nocturnes. ■



7. CERTAINS INSECTES BROUILLENT LES SIGNAUX SONAR des chauves-souris en émettant de nombreux clics parasites. Les deux spectrogrammes ci-dessus ont été enregistrés lors d'attaques d'une chauve-souris du genre *Myotis* sur un papillon de nuit entravé. Quand la proie n'émet pas de clics (en haut, cas d'un papillon de la famille des *Noctuidae*), la chauve-souris l'attrape. En revanche, quand le papillon émet des clics (en jaune et rouge sur le spectrogramme du bas, obtenu avec un papillon de l'espèce *Bertholdia trigona*), le prédateur manque sa cible.

Alan Gershenfeld

Apprendre grâce aux JEUX VIDÉO

**Les jeux vidéo pourraient
transformer l'enseignement.
Divers jeux éducatifs commencent
déjà à apparaître...**

En 1993, quand j'ai démarré ma carrière dans les jeux vidéo, le plus célèbre d'entre eux était *Mortal Kombat*. Deux joueurs s'y affrontaient jusqu'à ce que l'un d'eux soit étourdi, puis son adversaire lui donnait le coup de grâce. Chaque personnage avait sa méthode: le dénommé Sub-Zero, par exemple, arrachait la tête de son adversaire, avant d'extirper la moelle épinière du corps encore debout. Les parents et les politiciens étaient horrifiés, et un organisme a été créé pour classer les jeux vidéo en fonction de l'âge avec lequel ils sont compatibles.

Nombre de gens pensaient que les jeux vidéo étaient au mieux frivoles, au pire dangereux. Pourtant, ils sont variés et comprennent des jeux d'aventure, de stratégie ou de simulation (qui permettent par exemple de gérer une ville ou d'endosser divers rôles). Ces jeux consistent à explorer,

évaluer, choisir, décider, résoudre. Ainsi, *Spycraft*, un jeu que nous avons développé avec William Colby, ancien directeur de la CIA, et Olga Kalugin, ancien général au KGB, confrontait les joueurs avec des choix éthiques et moraux inspirés d'événements réels de la guerre froide. Dans le jeu *Civilisation: Appel au Pouvoir*, les joueurs devaient prendre des décisions complexes pour construire et conserver un empire en conciliant les progrès culturels, diplomatiques, militaires et scientifiques.

Bien que ces jeux aient eu de nombreux adeptes, leur notoriété était loin de celle des grands jeux d'action. Jusqu'au milieu des années 1990, le public associait les jeux vidéo avec ceux dits de tir en vue subjective, où les joueurs voient l'action du point de vue des personnages; surarmés, ces derniers s'affrontent à mort dans

des environnements tridimensionnels. Après le massacre du lycée américain de Columbine en 1999, on a découvert que les tireurs adoraient les jeux de ce genre, ce qui a conduit encore une fois au déniement des jeux vidéo.

Aujourd'hui, les divergences sont plus prononcées que jamais. D'un côté, des conférences, des articles et des livres à succès renforcent l'idée que les jeux et la « ludification » (l'intégration de principes de jeux à des méthodes de résolution de problèmes réels) peuvent sauver la planète. D'un autre côté, les parents cherchent à limiter le temps que leurs enfants consacrent aux activités numériques – environ huit heures par jour en moyenne aux États-Unis – et s'inquiètent de les voir massacrer des humains virtuels à l'artillerie lourde pendant des heures.