

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

QUAND LES BATEAUX FONT LE ZÈBRE

Au cours de la Première Guerre mondiale, des centaines de navires ont échappé aux torpilles, en partie grâce aux motifs géométriques dont ils ont été peints.

E

n 1914, Pablo Picasso aurait prodigué ce conseil: «S'ils veulent rendre une armée invisible à distance, ils n'ont qu'à habiller les hommes en arlequins.» Une plaisanterie, sans doute, car comment imaginer que le costume chamarré, fait de losanges multicolores, du personnage de la *commedia dell'arte* puisse être un modèle de discrétion? Et pourtant... En matière de camouflage et de dissimulation, les techniques les plus contre-intuitives ont fait leurs preuves: ainsi les rayures rendent un zèbre très visible, mais difficilement discernable parmi le groupe.

Quant à l'astuce de Picasso, elle a bien été mise en œuvre, notamment pour des bateaux. C'est ce que rappelle une exposition au Musée national de la Marine, au château de Brest. Remontons le cours de l'histoire jusqu'en 1917. La guerre fait rage dans l'Atlantique Nord où les sous-marins allemands (les U-boote) s'en prennent aux navires marchands et civils des Alliés en représailles au blocus imposé à leur pays. Cette guerre, dite totale, précipita l'entrée en guerre des États-Unis, qui gardaient en mémoire le drame du *Lusitania*: en 1915, ce

paquebot fut coulé par les Allemands, entraînant la mort de 1120 civils dont plus de 120 Américains. Mais comment lutter contre ces sous-marins toujours plus perfectionnés et dangereux? Par l'art!

Norman Wilkinson, peintre et lieutenant de marine britannique, a l'idée de camoufler les navires grâce à d'immenses formes géométriques aux couleurs contrastées recouvrant les coques et les parties les plus proéminentes (voir la photographie page ci-contre). On parle de *dazzle camouflage*, c'est-à-dire disruptif, ou de *razzle dazzle*.

Toutefois, le bateau ne devient pas vraiment invisible. L'idée est ici de créer avec les motifs une illusion d'optique qui empêche un observateur d'identifier le type de navire, ses dimensions, sa vitesse et son cap, et même de distinguer la proue de la poupe ou si le vaisseau se rapproche ou s'éloigne (on dessinait parfois de fausses vagues d'étrave). Comment dans ces conditions ajuster le tir d'une torpille?

À cette époque, le radar n'était pas encore mis au point, et on utilisait des télémètres optiques pour évaluer la distance d'une cible. Dans ces dispositifs, fondés sur le principe de coïncidence, un jeu de miroirs montrait deux parties d'une image que l'on devait aligner pour déterminer la distance d'un objet, en l'occurrence celle d'un navire ennemi. Avec le camouflage disruptif, le chaos des lignes nuisait à la précision de la mesure et donc à la précision des réglages des pièces d'artillerie et des lance-torpilles. On retrouve ici le principe de fonctionnement des

rayures du zèbre avec des parures proches du costume d'Arlequin!

Le camouflage disruptif fut inauguré en août 1917 avec le navire marchand *HMS Alsatian*, puis étendu à l'ensemble de la flotte de guerre britannique. En une année, plus de 400 navires ont été repeints de la sorte. La conception des motifs fut confiée à quelques artistes de la Royal Academy of Art. L'un des plus prolifiques fut Edward Wadsworth, responsable du camouflage de près de 200 navires.

Cela a-t-il été efficace? Difficile à dire. Selon une étude menée en 1918, parmi les vaisseaux pris pour cible par une torpille, 43% des navires camouflés ont coulé, contre 54% des non camouflés, mais la différence de taille des bateaux (seuls les plus gros ont bénéficié du camouflage disruptif) empêche de conclure formellement.

Une fois la guerre terminée, Edward Wadsworth mit à profit l'expérience acquise sur les chantiers navals pour se lancer dans une carrière artistique. On lui doit plusieurs gravures sur bois et quelques toiles. Certains ont vu dans le *razzle dazzle* un écho à plusieurs courants artistiques du début du xx^e siècle, notamment le cubisme (Picasso encore), le futurisme (qui voue un culte à la vitesse) et plus sûrement le vorticisme (plusieurs œuvres évoquent des tourbillons), créé par Ezra Pound.

À Brest, la centaine de documents d'époque proposés est complétée par des œuvres contemporaines des plasticiens Guillaume Duval et Jean-Baptiste Moal, du collectif XYZ, très inspirés par l'univers du *razzle dazzle*. Désormais, vous avez la recette pour vous fondre dans une foule: habillez-vous en Arlequin!

Musée national de la Marine, Château de Brest, jusqu'au 21 décembre 2018.
<http://bit.ly/RaDaz>



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

RETOURNEMENT TEMPOREL POUR TÉLÉPHONIE 5G

Le retournement temporel des ondes permet de focaliser des signaux dans l'espace et le temps. Une technique envisagée pour augmenter le débit de la téléphonie mobile et réduire la consommation d'énergie par le réseau.

En 2020, une technologie de cinquième génération (5G) est censée être déployée pour la téléphonie mobile et le wifi, afin de faire face à la multiplication par mille du trafic de données attendue en moins de dix ans. On vise des temps de latence de une milliseconde et des vitesses de téléchargement de 20 gigabits par seconde, le tout en consommant très peu d'énergie ! Comment répondre à ce défi ? L'une des solutions envisagées est une méthode conçue par des physiciens dans les années 1990 : le retournement temporel des ondes, ici électromagnétiques.

La téléphonie mobile procède par l'échange d'informations numérisées, sous forme d'ondes électromagnétiques, entre une station de base et un téléphone mobile. Les techniques actuelles souffrent de plusieurs limites. La première est que l'antenne de la station émet dans toutes les

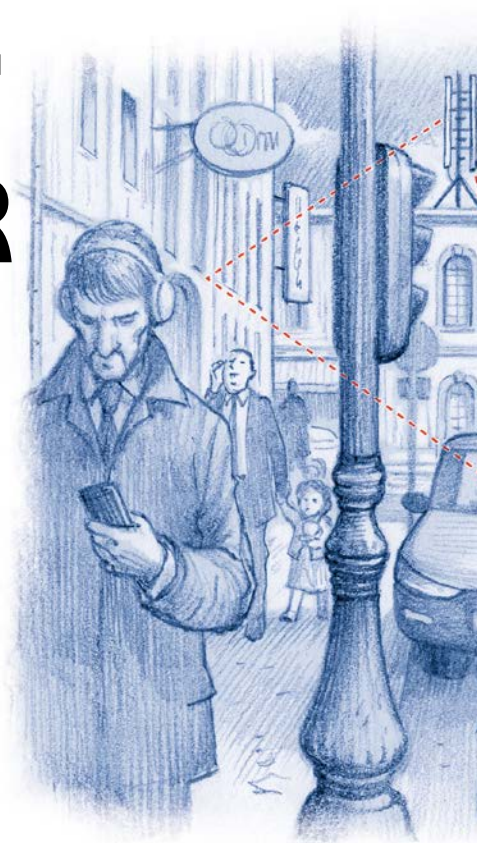
directions de façon à peu près égale. Seule une très faible fraction de la puissance émise atteint le mobile et l'essentiel de l'énergie émise est donc gaspillé.

Deuxième limite : dans un environnement encombré tel qu'une ville ou, pour le wifi, l'intérieur d'un appartement, les nombreux obstacles présents absorbent, réfléchissent ou diffusent l'onde émise. D'où une atténuation supplémentaire de l'onde et, surtout, l'existence de nombreux chemins de propagation entre l'antenne et le mobile. Cela se traduit par des interférences entre ces diverses ondes, notamment au niveau du récepteur. Ainsi, lorsque le nombre de chemins est élevé, il suffit que la position du mobile change légèrement pour que le signal reçu varie du tout au tout, ce qui peut entraîner la coupure de la communication (*voir les figures ci-contre*).

La multiplicité des chemins se traduit aussi par un élargissement de la durée des impulsions reçues, en raison de l'arrivée

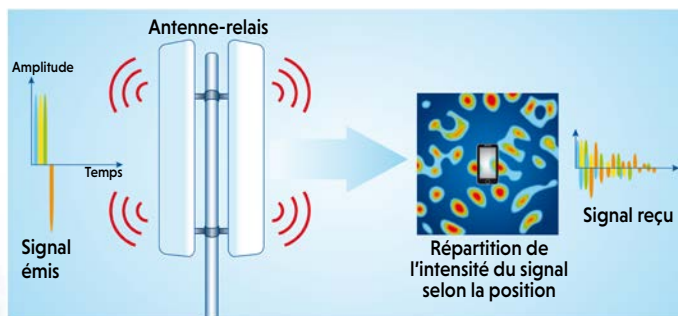
successive des échos correspondant aux divers chemins de propagation empruntés (avec 30 mètres de différence de longueur entre deux chemins, les signaux sont décalés de 0,1 microseconde). Il s'ensuit une limitation du débit de transmission.

Enfin, une troisième limite tient au fait que les ondes actuellement utilisées dans les communications ont des fréquences porteuses comprises entre 700 mégahertz (MHz) et 2,6 gigahertz (GHz), et des bandes passantes larges d'environ 10 MHz. Or Claude Shannon, l'un des pères de la théorie de l'information, nous a appris que le débit d'information maximal est proportionnel à la bande passante. Le spectre électromagnétique



BROUILLAGE SPATIAL ET TEMPOREL PAR LES OBSTACLES

Le schéma ci-dessous illustre le brouillage d'un signal constitué de 4 bits (1-1-1-0, distingués ici par leur couleur) émis par une antenne-relais et censé parvenir à un téléphone mobile distant de quelques dizaines ou centaines de mètres dans un environnement riche en obstacles. En raison des nombreux chemins suivis par l'onde émise et des décalages temporels induits dans la réception, le téléphone capte une succession d'échos où les bits se mélangent. C'est pourquoi les bits émis doivent être bien séparés dans le temps, ce qui limite le débit. En outre, les interférences de tous les échos produisent un signal dont l'intensité varie fortement selon l'endroit où il est mesuré.



Dans un environnement urbain, les obstacles à la propagation des ondes électromagnétiques sont nombreux. Un signal émis par une antenne-relais de téléphonie mobile peut être réfléchi, absorbé, diffusé... Il parvient à sa destination sous la forme de multiples signaux ayant suivi chacun un chemin différent. Ici, cinq de ces chemins ont été représentés.

étant très encombré dans le domaine de fréquences en question, les largeurs des bandes passantes ne peuvent être augmentées, ce qui là aussi limite le débit.

AUGMENTER LA FRÉQUENCE

Pour atteindre les spécifications de la 5G, il est donc crucial d'augmenter la bande passante. Cela implique d'adopter des fréquences plus élevées, moins encombrées : on parle ainsi de la bande $3,5 \pm 0,1$ GHz pour commencer, puis 26 GHz, voire plus ensuite. Cependant, cela risque de réduire la portée de l'antenne, car plus les ondes électromagnétiques sont de fréquence élevée, plus elles sont absorbées et diffusées par l'environnement. Et avec de petites

longueurs d'onde (à peine plus de 1 centimètre à 26 GHz), les variations du signal dans l'espace dues aux interférences ne peuvent être qu'exacerbées.

Une solution à cette difficulté est la technique MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*), qui transforme l'inconvénient des interférences en avantage : plusieurs antennes émettent en direction du téléphone mobile en ajustant la forme du signal émis et les délais d'émission, de telle façon que les différents signaux arrivent en même temps sur le mobile et qu'ils interfèrent constructivement à son niveau.

Avec des longueurs d'onde plus petites, on peut diminuer la taille des antennes et ainsi concevoir des dispositifs

qui en intègrent un grand nombre. Ces antennes peuvent même communiquer simultanément avec plusieurs mobiles en superposant les signaux envoyés à chacun d'eux. Lorsque l'environnement est assez encombré, les parties du signal adressées à un mobile donné et provenant des différentes antennes interfèrent destructivement au niveau des autres mobiles.

Dans l'implémentation habituelle de la technique du MIMO « massif », on mesure >

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



> les caractéristiques des liaisons individuelles entre chaque antenne d'émission et chaque antenne de réception, puis on détermine les signaux à émettre à l'aide d'algorithmes de calcul appropriés. Cela nécessite du temps de calcul si l'on augmente le nombre d'antennes et n'a de sens que pour des bandes passantes étroites.

RÉÉMETTRE LE SIGNAL REÇU, MAIS À L'ENVERS

Une autre solution consiste à exploiter une propriété particulière de la propagation des ondes: son invariance par renversement du temps. L'idée est la suivante. Imaginons une source localisée complètement entourée de capteurs. La source émet un signal, et chacun des capteurs enregistre le signal reçu; si les capteurs réémettent les signaux enregistrés en les retournant temporellement (on les renverse, comme lorsqu'on passe un film à l'envers), les ondes feront le chemin inverse et se focaliseront au niveau de la source.

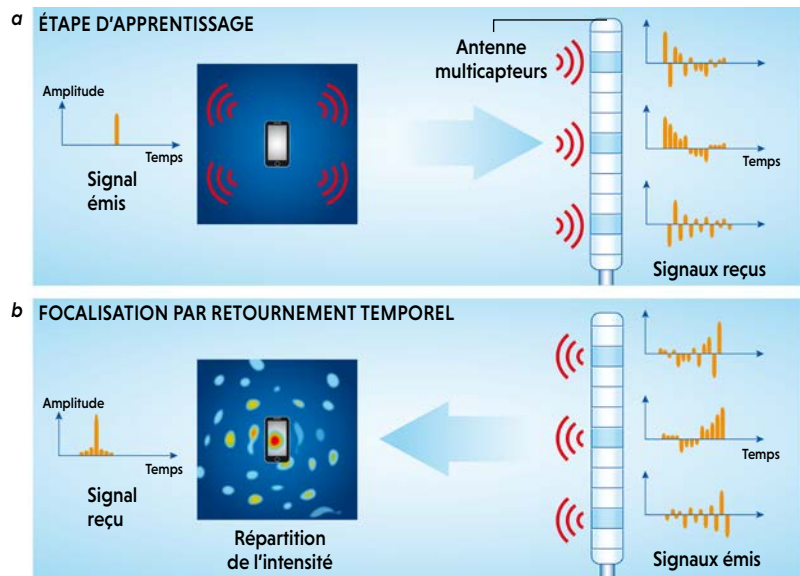
Cette propriété semble nécessiter une surface entière de capteurs. Mais dans les années 1990, l'équipe de Mathias Fink, à l'ESPCI, à Paris, a établi que lorsque le milieu de propagation est assez complexe, un nombre limité d'antennes suffit, sans que la focalisation soit dégradée. Ces physiciens ont ainsi montré que le procédé peut s'appliquer à des ondes électromagnétiques de 2,4 GHz. Et en 2016, les ingénieurs de chez Orange ont fait la démonstration d'un prototype d'une antenne 5G à retournement temporel.

Comment fonctionne-t-elle? Dans une étape d'«apprentissage», le mobile émet une brève impulsion; celle-ci arrive au niveau de chaque capteur de l'antenne sous la forme d'une suite d'échos (différente pour chaque capteur), qui est enregistrée (voir l'encadré ci-contre). Cette étape est cruciale et nécessite une bande passante large, pour garantir un bon échantillonnage du signal et une bonne séparation des différents échos. On sait alors que si chaque capteur de l'antenne réémet son signal reçu en le retournant temporellement, on focalisera au niveau du mobile une brève impulsion, presque identique à l'impulsion initiale.

Pour transmettre des données numériques de la station au mobile, on convient d'émettre le signal enregistré retourné temporellement pour coder le bit 1, ou le même multiplié par -1 (son opposé) pour le bit 0. Inutile aussi d'attendre la fin de l'émission d'un enregistrement pour en commencer une autre: il suffit qu'elles soient décalées d'une durée supérieure à

ÉMISSION CIBLÉE GRÂCE AU RETOURNEMENT TEMPOREL

Le principe du retournement temporel des ondes peut être appliqué à la téléphonie afin que l'antenne-relais focalise son signal sur le téléphone destinataire et lui seul. La méthode nécessite une première étape d'«apprentissage» où le destinataire émet un signal bref (a). L'antenne est formée d'une série d'éléments indépendants, dont chacun enregistre le signal reçu. Celui-ci diffère selon la position du capteur, car les chemins suivis par les ondes jusqu'à lui ne sont pas tout à fait les mêmes. Pour émettre de façon ciblée un bit vers le téléphone destinataire, il suffit alors que chaque élément de l'antenne réémette le signal enregistré et retourné temporellement (b). Les ondes qui atteignent alors le téléphone donneront un signal focalisé temporellement, proche de l'original; ailleurs, le signal reçu sera d'intensité faible ou nulle.



l'impulsion originelle pour être discriminées au niveau du mobile. Par ailleurs, on peut profiter de la focalisation spatiale pour émettre simultanément les signaux enregistrés de plusieurs mobiles ou objets connectés. Chacun recevra distinctement le signal qui lui est destiné, et uniquement celui-ci. On peut ainsi augmenter fortement le débit et réduire de beaucoup l'énergie consommée par le réseau, la focalisation spatiale assurant une plus grande efficacité énergétique.

Devant de telles promesses, le retournement temporel sera-t-il choisi pour la 5G? Pas sûr. Ses performances doivent beaucoup à la complexité de l'environnement de propagation et se heurtent à la nécessité de renouveler la phase d'apprentissage lorsque les chemins de propagation ont changé. C'est notamment le cas lorsque l'appareil connecté se déplace: ce n'est pas un problème pour un piéton, ça l'est davantage pour un véhicule en mouvement. Mais les ingénieurs n'ont pas dit leur dernier mot, puisque ceux d'Orange ont conçu un dispositif qui semble fonctionner pour le TGV... ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Chen et al., **Why time reversal for future 5G wireless?**, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33(2), pp. 17-26, mars 2016.

T. Dubois, **Application du retournement temporel aux systèmes multi-porteuses : propriétés et performances**, thèse de doctorat de l'INSA de Rennes, 25 mars 2013.

G. Lerosey et al., **Time reversal of wideband microwaves**, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, article 154101, 2006.

RETOUR SUR « DÉCOLLAGES À CHAUD »

Notre article «*Décollages à chaud*», paru dans le numéro d'octobre (*Pour la Science* n° 480), a suscité plusieurs courriers de lecteurs portant d'une part sur le pilotage des avions et d'autre part sur les effets physiques évoqués. Nous remercions ces lecteurs pour leurs commentaires et les précisions qu'ils nous ont fournies. Nous avons repris certains passages de leurs courriers dans la suite de ce texte afin de clarifier certains points.

Commençons par quelques précisions données par des professionnels sur la phase de décollage.

Lors de l'accélération sur la piste, le pilote ne fait pas décoller l'avion dès que la portance est suffisante, ce qui correspondrait à la vitesse de décrochage. «Au contraire, le pilote empêche l'avion de décoller, lui fait dépasser la vitesse de décrochage pour avoir de la sécurité et tire sur le manche quand est atteinte la "vitesse rotation", déterminée avant le décollage en fonction de la masse, de la température et de la pression.» L'avion commence à s'incliner pour prendre l'assiette de montée, continue à accélérer, puis, lorsque la vitesse décidée pour décoller est atteinte, il quitte le sol. Lors du décollage proprement dit, en tirant sur le manche, «le pilote agit plutôt sur la gouverne de profondeur située sur l'empennage arrière, et non sur les ailerons des ailes, destinés à contrôler le mouvement de roulis [inclinaison sur le côté].»

Un troisième point de pilotage concerne le contrôle de la vitesse de l'avion, en référence à l'encadré de la page 90. Levons l'ambiguïté du texte: lorsque l'avion est en vol, ce que contrôle effectivement le pilote, c'est la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Comme l'indiquent les flèches représentant les vitesses dans la figure, la vitesse au sol de l'avion est alors la somme vectorielle de cette vitesse et de la vitesse du vent. Donc, pour une même vitesse par rapport à l'air, la vitesse par rapport au sol sera plus faible si le vent est de face, et plus importante si le vent est de dos, comme écrit dans le texte.

Venons-en à présent aux effets physiques discutés. Un lecteur nous signale que l'un des effets majeurs de l'augmentation de température (ou de la diminution de la densité) de l'air est la réduction de la poussée des moteurs. Nous avons

mentionné cet effet dans notre article, mais nous ne l'avions ni expliqué ni quantifié. L'origine de cet effet est le suivant: «Si l'on augmente le débit de carburant brûlé, la poussée augmente, la température devant la turbine et le régime de rotation augmentent. Lorsque la température devant la turbine ou le régime de rotation atteignent une valeur limite imposée par la résistance des matériaux, on ne peut plus augmenter le débit de carburant, ce qui limite la poussée à une valeur maximale. Or la température devant la turbine ou le régime de rotation augmentent si la densité de l'air alimentant le moteur diminue, puisque le débit massique d'air à chauffer et à brasser par le compresseur diminue. Ainsi, le débit de carburant maximal autorisé, donc la poussée, diminue si la densité diminue.»

Cela signifie que l'accélération de l'avion sera moindre et que le temps et la distance requis pour atteindre la vitesse nécessaire au décollage seront augmentés. Cet effet est dominant par rapport à

par exemple que pour un 737-100, un jour standard, pour les aéroports situés à plus de 6000 pieds d'altitude, le poids maximum au décollage est limité par la vitesse que peuvent supporter les pneus. Dans cette situation, lorsque la température est plus élevée, comme la portance diminue, cette vitesse est atteinte pour une masse plus faible et l'avion doit être moins chargé.

Ces courriers nous donnent l'occasion de rappeler notre démarche: présenter et expliquer ce que peuvent apporter le regard et les outils du physicien dans des situations diverses. Bien souvent, nous choisissons des sujets où nous pouvons expliquer qualitativement et quantitativement le phénomène abordé (par exemple les tubes hurleurs, *Pour la Science* n° 479). Mais nous ne nous interdisons pas d'aborder des sujets qui ne sont pas encore totalement compris (comme l'effet Mpemba, *Pour la Science* n° 342) ou des situations technologiques complexes, comme dans le cas présent. Après un travail bibliographique substantiel, nous



la diminution de la portance évoquée dans le texte qui, comme nous l'avions écrit, ne permet pas de retrouver les valeurs de longueurs de piste données par les constructeurs.

Ajoutons d'ailleurs que l'une des limites non évoquées pour la vitesse de décollage est la vitesse limite d'utilisation des pneus. Les abaques de vitesse donnés dans la brochure de Boeing sur les caractéristiques des différents modèles de 737 pour la conception des aéroports indique

tentons d'explicitier les phénomènes physiques qui interviennent, d'évaluer quantitativement leur effet et veillons à donner les limites de ces explications. C'est une démarche qui demeure généraliste et nous ne saurions, malgré nos efforts, atteindre la précision du vocabulaire et la richesse de l'analyse que peuvent offrir des années d'expériences dans le domaine concerné. ■

J.-M. COURTY ET É. KIERLIK