

> en augmentant le plus possible ce risque d'erreur, tout en changeant le moins possible l'image manipulée. De proche en proche, sans que l'œil humain ne perçoive de changements notables, l'algorithme construit une image qui fera trébucher le réseau.

UN NOUVEAU DOMAINE DE RECHERCHE

Comme souvent en recherche, quand une bonne idée est découverte, une multitude de travaux la précisent et la prolongent. Depuis l'article de 2014, des dizaines d'équipes ont trouvé et perfectionné toutes sortes d'astuces produisant des images pièges, et cela quelle que soit la méthode d'apprentissage mise en œuvre pour instruire le réseau. Dans certains cas, un seul pixel modifié induit en erreur le réseau (voir l'encadré 4). Assez souvent, une image qui piège un réseau trompera aussi d'autres réseaux ayant appris selon une méthode différente. Christian Szegedy explique :

« Nos exemples pièges sont relativement robustes, et trompent aussi des réseaux de neurones ayant un nombre différent de couches que celui qui les a engendrés ou provenant de phases d'apprentissage n'utilisant que des sous-ensembles des données. »

En apprentissage automatique, l'erreur que commettent les systèmes est parfois due à ce qu'on nomme le surajustement (*overfitting*). La méthode apprend au système à réagir sur un nombre limité d'exemples, mais dès qu'on en sort, le système se trompe, un peu comme une courbe que l'on force à passer par tous les points de mesure disponibles et qui est incapable de prédire correctement une nouvelle valeur.

Cependant, on a du mal à y voir la bonne explication des exemples pièges, puisque la classification automatique par le réseau

fonctionne en général. Ce qui se produit est plus subtil qu'un surajustement : le réseau a généralisé les exemples utilisés dans la phase d'instruction, mais cette généralisation a laissé des failles que détectent les méthodes d'optimisation employées pour le piéger, en faisant apparaître des cas d'erreur inattendus.

De surcroît, on a su fabriquer des objets 3D qui, quand on les photographie, produisent des images pièges : ce n'est pas une image très spécifique qui trompe le réseau, mais toutes celles qu'engendre un objet réel. C'est inquiétant : on pourrait par exemple fabriquer un faux panneau « Stop » qu'un véhicule autonome interpréterait comme un panneau lui donnant la priorité ! Ces images pièges rendent possibles de nouveaux types d'attaques contre des systèmes informatiques intégrant des réseaux de neurones. Parmi les travaux menés, mentionnons ceux ayant établi qu'on peut piéger plusieurs images à la fois : on cherche à optimiser le pixel qui augmente le plus la mesure du risque d'erreur non pas sur une seule image, mais sur un ensemble d'images. On construit ainsi de proche en proche une perturbation unique, une matrice de valeurs, qui, appliquée à chaque image d'un vaste ensemble d'images, produira une image piège.

Ce que l'on a réussi à faire pour les images a été adapté aux sons. Les méthodes décrites par Moustafa Alzantot, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues permettent de modifier insensiblement le son d'une voix qui prononce « yes » de façon que le système neuronal l'interprétera comme « no » (https://nesl.github.io/adversarial_audio/). On imagine les graves conséquences qu'auraient de telles méthodes si on les utilisait à des fins malveillantes...

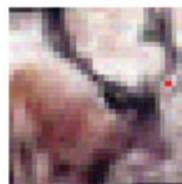
Pour évaluer l'effet du bruit ajouté aux sons initiaux pour fabriquer les exemples

TROMPER AVEC UN SEUL PIXEL

4

Les images comportant un petit nombre de pixels sont plus délicates à déchiffrer. Pourtant, nous savons le faire assez bien, comme l'illustrent ces six images en basse résolution, assez facilement identifiables.

Dans l'article « One pixel attack for fooling deep neural networks » (prépublication arXiv:1710.08864, 2017), les chercheurs Jiawei Su, Danilo Vasconcellos Vargas et Sakurai Kouichi expliquent comment, après une phase d'apprentissage conduisant à de bonnes identifications (respectivement un cerf, un oiseau, un chien, un cheval, un bateau, un chat), ils ont réussi, en ne modifiant qu'un seul pixel de chaque image (qu'on voit assez nettement), à berner le réseau qui a alors reconnu autre chose, respectivement un avion, une grenouille, un chat, un chien, un avion, un chien.



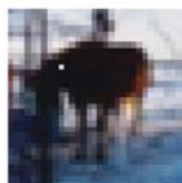
Cerf
Avion (49,8 %)



Oiseau
Grenouille (88,8 %)



Chien
Chat (75,5 %)



Cheval
Chien (88 %)



Bateau
Avion (62,7 %)



Chat
Chien (78,2 %)

pièges, les chercheurs ont mené une comparaison avec des sujets humains. Chacune des personnes d'un groupe de 23 participants a écouté 1500 séquences sonores pièges sans être informée de ce qu'il fallait trouver. Dans 89% des cas, la reconnaissance par les sujets humains n'a pas été affectée, alors que la machine s'est trompée dans 100% des cas.

CORRIGER LES MÉTHODES

Ce qu'on a découvert donne des pistes pour créer de nouvelles méthodes d'apprentissage plus résistantes. L'idée la plus simple consiste, après la première période d'apprentissage, à construire de nombreuses images pièges et à les faire apprendre en complément au réseau en lui indiquant les bonnes réponses, tout comme un professeur de langue indique les faux amis à l'étudiant qui, averti, ne commettra pas l'erreur associée à ces expressions trompeuses.

Une autre idée simple fournit facilement une première protection : la compression de données. Gintare Dziugaite, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont noté dès 2016 l'intérêt et les effets des méthodes de compression informatique pour se protéger des images pièges. Avant de faire apprendre une image au réseau, on lui appliquera un algorithme de compression d'images d'usage courant. Cela modifie un peu certains pixels, mais la compression, en simplifiant l'image, la débarrasse des caractéristiques inutiles que le réseau pourrait prendre en compte alors qu'elles ne sont qu'accidentelles. Ce lissage ramène à ce qui est essentiel dans l'image.

On se retrouve une fois encore dans une situation où le perfectionnement des armes conduit aux perfectionnements des protections. Quelle sera l'issue finale de cette coévolution du glaive et du bouclier ? Nul ne le sait, mais cela fera globalement progresser la science de l'apprentissage automatique.

LE POSSIBLE ET L'IMPOSSIBLE

Les réseaux de neurones artificiels sont formidables pour une catégorie de tâches particulières que Andrew Ng, chercheur principal chez Baidu, entreprise chinoise, décrit comme suit : « Si un individu moyen est capable de réaliser une certaine tâche en moins de une seconde, alors il est probable que vous pourrez l'automatiser. » En revanche, leur mode de fonctionnement et leur programmation par apprentissage à base d'exemples entraînent des caractéristiques dont plusieurs sont des limitations.

Gary Marcus, professeur de psychologie à l'université de New York, énumère dans une prépublication (arXiv:1801.00631, 2018) dix problèmes liés aux réseaux de neurones profonds qui nous aident à percevoir ce qu'il faudrait faire pour aller au-delà.

1. L'apprentissage profond exige énormément de données : lors de la phase d'apprentissage, il faut donner au système plus d'exemples que n'en aurait besoin un humain.

2. L'apprentissage à l'aide de réseaux de neurones profonds est en réalité superficiel ; l'utilisation de l'adjectif *profond* concerne la structure des réseaux utilisés, mais pas la nature de ce qui est appris et maîtrisé.

3. L'apprentissage profond ne sait pas, jusqu'à présent, traiter de manière directe les structures hiérarchiques ou impliquant une combinatoire complexe entre éléments (par exemple le fonctionnement d'un moteur de voiture).

4. L'apprentissage profond est inefficace pour mener des raisonnements logiques enchaînés, comme déduire de « Lucie est la mère de Jacques et la fille de Jean » que « Jacques est le petit-fils de Jean ». On sait construire des méthodes symboliques (non neuronales) qui réussissent ces tâches de raisonnement qu'il faudra probablement associer aux méthodes neuromimétiques.

5. L'apprentissage profond est opaque. Lorsque le réseau a appris à mener une certaine tâche, des milliers de paramètres ont été fixés et, sauf dans les cas les plus simples, il est impossible de les interpréter et de comprendre pourquoi ils ont les valeurs retenues : ils vous donnent une réponse, contentez-vous en !

6. L'apprentissage profond ne permet pas, jusqu'à présent, d'intégrer des connaissances *a priori* ou formulées abstraitement, par exemple du type : « Si sur le dos de l'animal il y a une selle, il est assez probable que c'est un cheval. » Les humains ne comprennent pas tout à l'aide d'exemples, ils intègrent aussi des connaissances élaborées par d'autres auxquels ils font confiance, leurs enseignants par exemple.

7. L'apprentissage profond ne distingue pas une corrélation d'une cause. Il repère des liens, mais n'est pas en mesure de les analyser.

8. L'apprentissage profond suppose un monde stable, ce qui est ennuyeux dans un univers en mouvement ou en évolution rapide.

9. L'apprentissage profond ne garantit pas les résultats. La découverte de méthodes insoupçonnées qui engendrent des exemples pièges en a été une preuve spectaculaire.

10. L'apprentissage profond n'est pas facile à mettre en œuvre, car on ne sait pas à l'avance ce qui marchera, et à chaque nouvelle application, il faut ajuster les paramètres généraux (profondeur du réseau, nombre de neurones, technique d'apprentissage, etc.) sans savoir *a priori* ce qui fonctionnera le mieux.

Vive l'intelligence artificielle, et bravo pour ses succès récents grâce à l'apprentissage profond... Mais restons lucides sur ce qui est fait et reste à faire avant de parler de machines en tout point meilleures que les humains. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Akhtar et A. Mian, **Threat of adversarial attacks on deep learning in computer vision : A survey**, prépublication arXiv:1801.00553, 2018.

M. Alzantot et al., **Did you hear that ? Adversarial examples against automatic speech recognition**, prépublication arXiv:1801.00554, 2018.

Y. Bengio, **La révolution de l'apprentissage profond**, Pour la Science Hors-Série n° 98, pp. 43-48, février-mars 2018.

A. Géron, **Machine Learning avec Scikit-Learn et Deep learning avec TensorFlow**, Dunod, 2017.

G. K. Dziugaite et al., **A study of the effect of jpg compression on adversarial images**, prépublication arXiv:1608.00853, 2016.

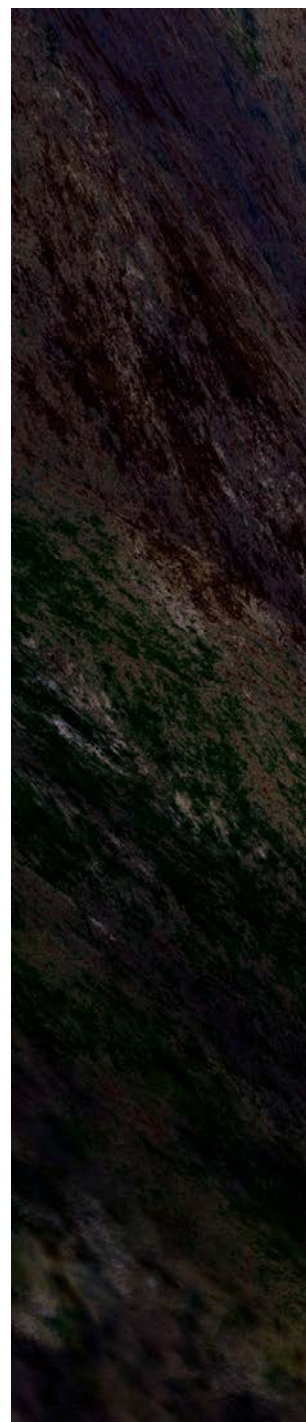
A. Ng, **What artificial intelligence can and can't do right now**, Harvard Business Review, vol. 9, 2016.

C. Szegedy et al., **Intriguing properties of neural networks**, International Conference on Learning Representations, 2014, prépublication arXiv:1312.6199, 2014.

L'AUTEUR

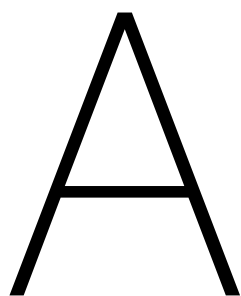


LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*



UN PAYSAGE PLUS VRAI QUE NATURE

Un artiste espagnol détourne un logiciel de création de paysages tridimensionnels pour composer des mondes virtuels réalistes à partir de toiles de peintres classiques. Invitation au voyage dans l'irréel.



André Derain, pionnier du fauvisme au début du ^{xx}^e siècle avec Henri Matisse, Maurice de Vlaminck, Georges Braque... est une figure incontournable de l'art moderne. *Bosquet*, l'une de ses toiles, peinte en 1912 et conservée au musée de l'Ermitage, à Saint-Petersbourg, en Russie, est visible au Grand Palais, à Paris, jusqu'à cet été (*voir page ci-contre*). Pas convaincu par ce que vous voyez? Rien d'étonnant: l'œuvre (*voir ci-dessus*) est passée entre les mains de l'artiste espagnol Joan Fontcuberta. Plus déconcertant

encore, elle est présentée dans le cadre d'une exposition intitulée *Artistes & Robots!* Le mystère s'éclaircira.

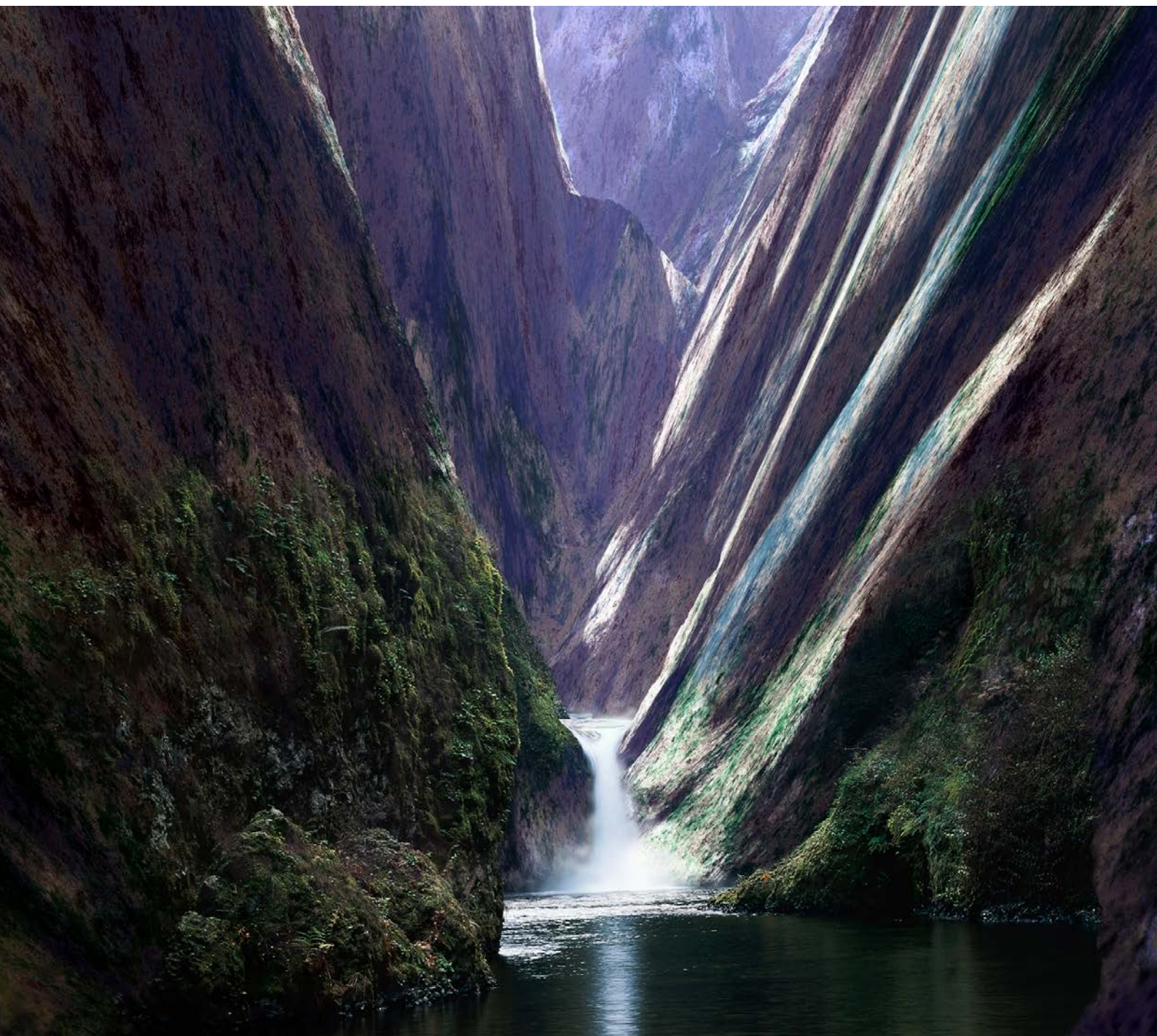
La manifestation propose une quarantaine d'œuvres pour lesquelles les artistes se sont adjoint l'aide de machines, de robots, de programmes informatiques, d'intelligence artificielle. Des machines à peindre bricolées par le Suisse Jean Tinguely dans les années 1960 jusqu'aux œuvres les plus récentes conçues grâce à l'«apprentissage profond», l'autonomie du créateur humain s'estompe à mesure que l'on progresse dans l'exposition, laissant une place toujours plus grande à la technologie. De même, l'interactivité avec le public va croissant. L'œuvre s'échappe et vit sa propre vie.

Chemin faisant, les questions surgissent, nombreuses. Une intelligence artificielle peut-elle avoir de l'imagination? Que peut faire un robot qui soit inaccessible à un humain? Une œuvre

Le *Bosquet* d'André Derain interprété en un paysage 3D par un logiciel informatique.

d'art est-elle nécessairement d'origine humaine? Jusqu'où une machine peut-elle revendiquer le statut d'artiste? Et bien d'autres encore.

Et l'on découvre le travail de Joan Fontcuberta. Dans son projet *Orogenesis* (qui concerne la naissance des montagnes), il utilise des logiciels, notamment Terragen, qui traduisent des informations bidimensionnelles en paysages tridimensionnels virtuels et réalistes. Ces programmes ont d'abord été mis au point pour des applications



militaires et scientifiques, par exemple pour reconstruire des reliefs à partir de données satellitaires ou cartographiques. Mais l'artiste les détourne.

Il leur soumet des toiles de Paul Cézanne, William Turner, John Constable, Caspar David Friedrich... et donc d'André Derain, et contraint les logiciels à les interpréter afin qu'ils créent des mondes parallèles. Les contours et les tons des peintures deviennent des montagnes, des rivières, des vallées, des cascades, des nuages. Les paysages qui en résultent,

splendides, extrêmement réalistes et plausibles, mais de pure fiction, sont ensuite photographiés, et ce sont ces clichés qui sont à voir au Grand Palais.

Selon Joan Fontcuberta, il s'agit d'«hallucinations contemporaines définies par la technologie». Les machines acquerraient ainsi une capacité d'imagination, et de fait, l'artiste n'est ici que l'instigateur, le travail de production étant délégué à l'ordinateur.

Le choix du médium n'est pas anodin. En effet, la photographie a longtemps été

considérée comme le reflet de la réalité, un témoin digne de foi. Or là, Joan Fontcuberta brouille les frontières entre réel et imaginaire, entre vérité et mensonge. Il le revendique: il souhaite semer le doute, détruire les certitudes, annihiler les convictions... ■

«Artistes & Robots»,
au Grand Palais, à Paris, jusqu'au 9 juillet 2018.



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

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LE NEC PLUS ULTRA DE LA CHUTE LIBRE

La situation où un objet tombe sous la seule influence de la gravitation, sans perturbations externes, est impossible à réaliser, même en orbite autour de la Terre. Mais la mission spatiale *Microscope* s'en approche en compensant les forces résiduelles.

Le 2 avril 2018, la station spatiale chinoise *Tiangong-1* se désintégrait dans l'atmosphère après une interminable chute. Depuis mi-2016 et la coupure des communications avec les opérateurs au sol, il n'était plus possible de maintenir son altitude en actionnant à distance ses moteurs. Moralité: même à 400 kilomètres d'altitude, la station n'était pas en parfaite chute libre le long de son orbite, mais subissait, outre la gravité, des forces résiduelles qui la freinaient et qui l'ont finalement fait tomber vers le sol.

Cet événement illustre une question qui se pose aussi dans d'autres contextes: comment s'approcher au mieux d'une chute libre, c'est-à-dire d'un mouvement dû uniquement à la gravitation? Y répondre est crucial par exemple pour vérifier avec précision un principe fondamental de la physique, le «principe

d'équivalence», qui implique que tous les corps chutent de la même façon.

Depuis Galilée, en effet, les physiciens cherchent à tester avec la meilleure précision possible si des corps de compositions différentes tombent de la même façon dans le vide. Comme Newton l'a ensuite compris, cela revient à vérifier l'égalité entre la «masse pesante», qui caractérise la manière dont un corps est attiré gravitationnellement par d'autres corps, et la «masse inerte», qui caractérise la difficulté qu'il y a à modifier sa vitesse en lui appliquant une force.

COMPARER LA CHUTE D'UNE PLUME ET CELLE D'UNE BILLE

À l'air libre, une telle expérience est vouée à l'échec: à cause du frottement de l'air, une plume tombe bien plus lentement qu'une bille de plomb. Ainsi, avec une feuille de papier de format A4 faisant 80 grammes par mètre carré qui tombe à

Dans l'air, deux objets différents chutent rarement de la même façon: la traînée aérodynamique a une grande influence.



plat, la traînée aérodynamique compense le poids pour une vitesse de chute de l'ordre de 1 mètre par seconde, une valeur atteinte et dépassée en un dixième de seconde par des objets plus compacts.

La force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse de l'objet par rapport à l'air, à la masse volumique de l'air et à la surface que présente l'objet dans la direction du mouvement. Comment la diminuer?

Une solution est de réduire la masse volumique de l'air, autrement dit de faire le vide. Le gain est alors considérable: sans atteindre les valeurs de l'ultravide (10^{-7} Pascal) réservées généralement à des cavités