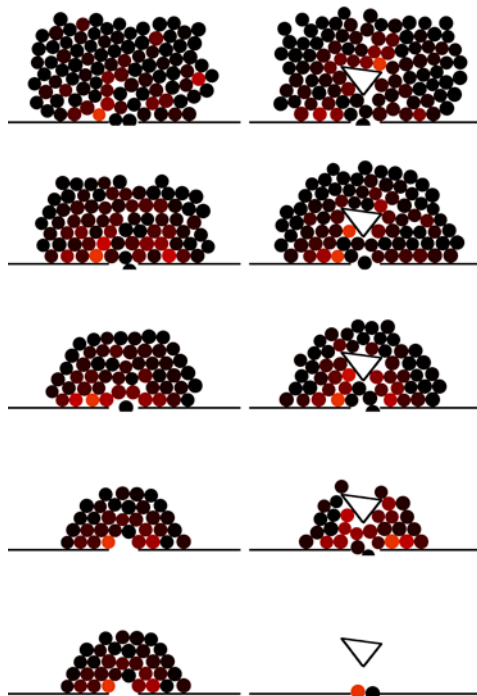


« FASTER IS SLOWER » ET INVERSEMENT

Quand une foule se presse vers une sortie, les contraintes sont telles à l'abord de l'ouverture que l'évacuation ralentit, ou même se bloque (voir la séquence à gauche, effectuée en utilisant le modèle granulaire, où plus une bille est rouge, plus elle subit de pression de ses voisines) – un effet connu sous le nom de *faster is slower*. En revanche, lorsque l'on place un obstacle devant la sortie, l'écoulement est bien plus efficace (à droite).



granulaire – qui reproduisent chacun ce phénomène paradoxal tout en étant fondés sur des ingrédients très différents. Cet exemple illustre une difficulté essentielle de la démarche de modélisation en général : il ne suffit pas de reproduire un effet pour être certain d'en avoir identifié les causes...

Ces dernières années, la science encore jeune de la modélisation des mouvements de foule a connu des succès spectaculaires et s'étend peu à peu à toutes sortes de domaines. Le modèle de forces sociales est intégré à des logiciels commerciaux utilisés par exemple pour modéliser les flux de touristes sous la tour Eiffel ou le mouvement des passagers dans les grands centres de transit. Il est aussi de plus en plus fréquent que la conception d'un projet architectural s'accompagne de la simulation des flux piétonniers à travers des espaces non encore construits. L'utilisation de ces modèles pour obtenir un rendu plus réaliste des mouvements de personnages de films ou de jeux vidéo s'est par ailleurs généralisée : les scènes de bataille du *Seigneur des Anneaux* et de *Game of Thrones*, par exemple, impliquant un nombre considérable d'entités dotées de capacités cognitives proches des nôtres, ont été réalisées à l'aide de modèles particuliers de foules.

Remarquons que, dans tous les exemples cités, les tendances spontanées des individus étaient assez simples à décrire, soit prévisibles dans le cas de l'évacuation d'un bâtiment ou du transit de passagers dans une gare, soit issues d'un scénario préétabli pour les films d'animation. Dans des situations plus générales, qui mélangent des individus aux tendances multiples et aux modalités d'interaction complexes,

les modèles actuels présentent des limites et les défis à relever sont nombreux.

En premier lieu, l'intégration à ces modèles de facteurs psychologiques dynamiques reste balbutiante. Un pétard qui explose au sein d'une foule dense peut entraîner un mouvement de panique qu'il est très difficile d'appréhender à l'heure actuelle. La notion même de panique à l'échelle d'un individu n'est pas clairement définie, son apparition et son évolution variant très fortement d'un individu à l'autre et les modalités de sa propagation au sein d'une foule dense étant mal connues. À partir des modèles, il est certes possible de reproduire *a posteriori* un mouvement de panique qui a été filmé, mais élaborer un modèle général de mouvement qui prédirait ce qui se passerait pour un large spectre de situations de ce type est actuellement hors de portée.

DU PIÉTON À LA THÉORIE DES JEUX

En second lieu, l'interaction des individus avec un milieu potentiellement hostile nécessite de coupler ces modèles avec d'autres variables, par exemple un niveau de visibilité conditionné par la présence de fumée en cas d'incendie. Enfin, la capacité de chacun à développer des stratégies fines d'évitement et d'optimisation des trajectoires, sans même en avoir conscience, est délicate à mettre en équations. Chaque individu élabore, pour les secondes à venir, un projet de trajectoire fondé sur son intuition de ce que les autres piétons feront. Le comportement effectif résulte donc d'un processus de négociation plus ou moins conscient, dont certains aspects relèvent de la théorie des jeux : le gain consécutif à un choix de stratégie dépend des choix des autres. Il est à prévoir que les travaux déjà entamés vers l'élaboration de modèles intégrant ces aspects se multiplieront ces prochaines années et permettront d'affiner le caractère prédictif des modélisations.

Par ailleurs, l'accroissement récent et considérable de la masse de données que l'on acquiert sur les mouvements de personnes (voir l'encadré page ci-contre) ouvre la voie à d'autres approches de modélisation, non plus fondées sur la formalisation de phénomènes bien identifiés, mais pilotées par les données. Malgré le caractère un peu frustrant pour le scientifique de s'éloigner d'une logique phénoménologique et causale, ces approches naissantes, fondées sur des techniques d'apprentissage profond, ont un potentiel prédictif considérable et devraient bouleverser prochainement ce domaine déjà en pleine ébullition. Dans les années à venir, il n'est pas exclu que se généralise comme nous en avons pris l'habitude pour le trafic routier, une « météo des foules » qui nous donnerait des indications sur le niveau de congestion attendu zone par zone, à l'échelle d'une ville. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Moussaïd, **Foulescopie : Ce que la foule dit de nous**, HumenSciences, 2019.

N. Bain et D. Bartolo, **Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds**, *Science*, vol. 363, pp. 46-49, 2019.

B. Maury et S. Faure, **Crowds in Equations**, World Scientific Publishing Europe Ltd., 2018.

D. Helbing et P. Molnár, **Social force model for pedestrian dynamics**, *Phys. Rev E*, vol. 51, pp. 4282-4286, 1995.

Un petit pas qui a 50 ans

L'anniversaire de la mission *Apollo 11* est l'occasion de revenir sur cet exploit que l'on pensait quasi impossible à l'époque. Avec l'émergence de nouveaux projets, nous pourrions revivre une aventure similaire dans les années à venir.





L'AUTEURE



CLARA MOSKOWITZ
cheffe des rubriques
physique et espace
au magazine
Scientific American

▶ L'empreinte de la botte de Buzz Aldrin s'est imprimée de façon très nette dans la poudre qui recouvre le sol lunaire.



Neil Armstrong salue le photographe tandis qu'il se dirige, avec ses coéquipiers, vers le pas de tir.

George Low, responsable du programme des missions Apollo, suit avec ses collègues la progression des astronautes depuis la salle de contrôle des opérations.

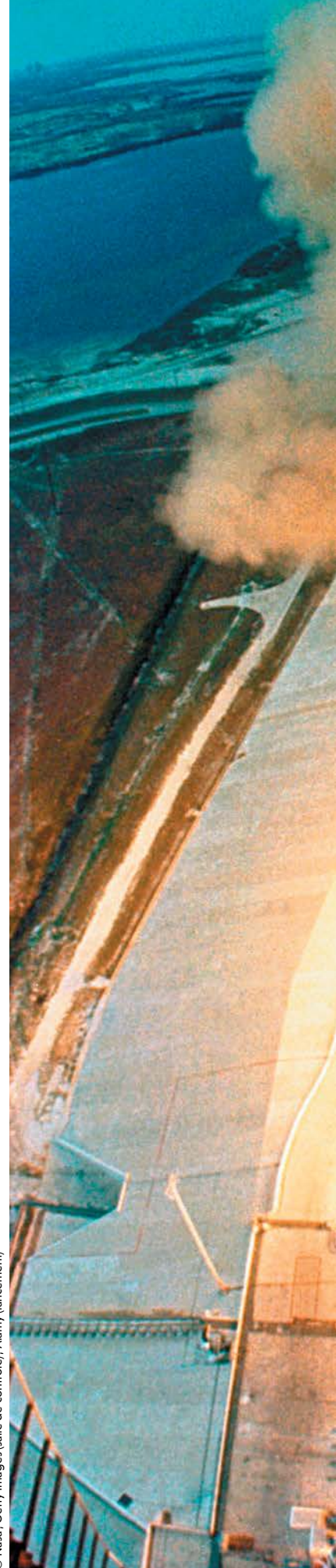


Neil Armstrong pensait qu'il avait une chance sur deux d'aller au bout de cette mission. « Il y avait tellement d'inconnues, » a expliqué, en 2011, le premier homme à poser le pied sur la Lune. « La probabilité était forte qu'un événement que nous n'avions pas anticipé survienne, ce qui nous aurait obligés à annuler la mission et à rentrer sur Terre sans nous poser sur la Lune. » Malgré ces incertitudes, Neil Armstrong, Edwin « Buzz » Aldrin et Michael Collins – avec l'aide de milliers d'ingénieurs, scientifiques et opérateurs sur Terre – ont accompli l'un des exploits les plus incroyables de l'humanité.

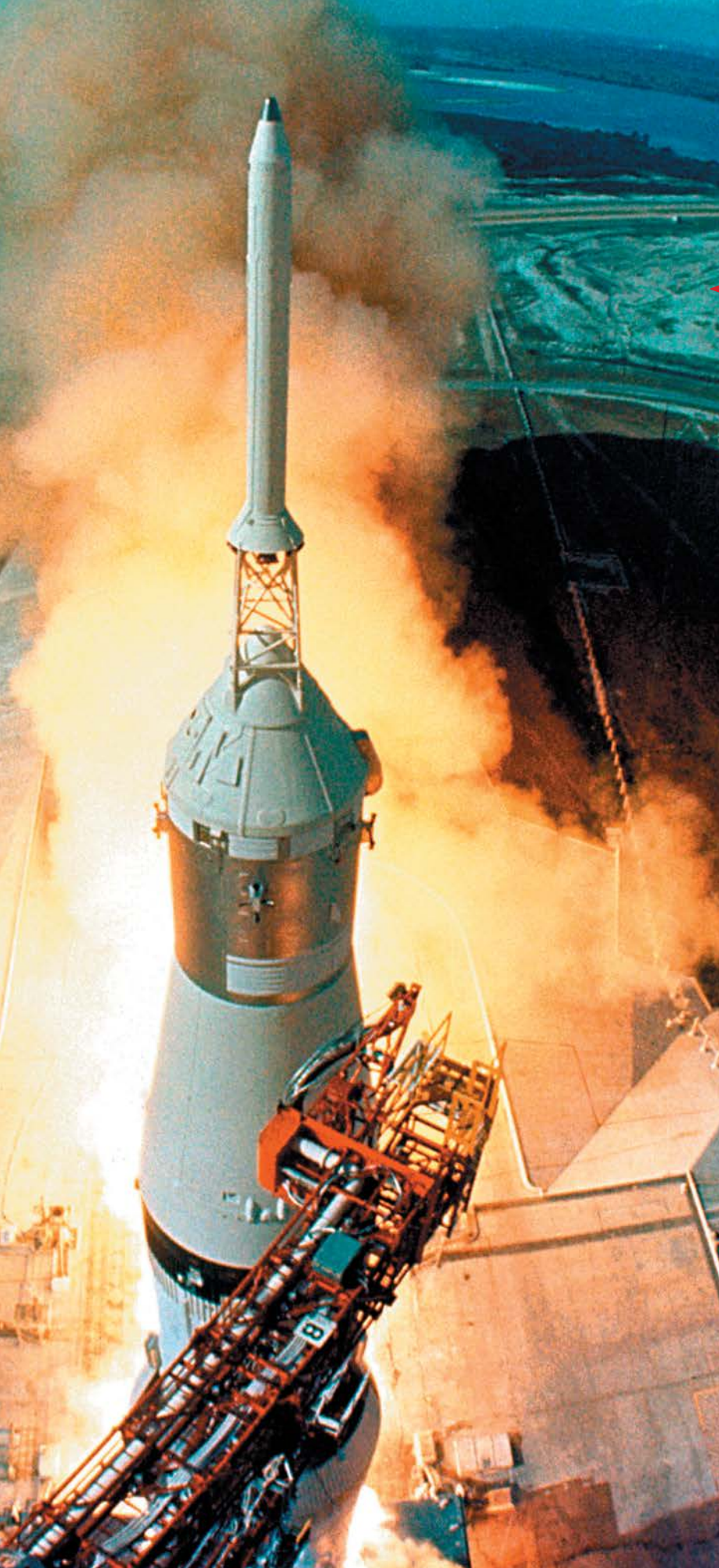
Il y a tout juste 50 ans, avec à son bord les trois astronautes, une fusée *Saturn V*, haute

comme 36 étages et pesant le poids d'environ 400 éléphants, s'est propulsée loin de la Terre dans une explosion plus puissante que la production de 85 grands barrages hydrauliques.

Une fois dans l'espace, les astronautes ont échappé à l'orbite terrestre pour rejoindre celle de la Lune. Ils ont alors décroché une partie de leur vaisseau et l'ont dirigée vers le sol lunaire, où ils ont atterri en douceur. Peut-être plus impressionnant, après avoir marché sur ce monde étranger, ils sont remontés dans le module lunaire et ont décollé de la surface de cet autre corps céleste (également une première) pour rejoindre le module principal qui les attendait en orbite, 90 kilomètres au-dessus de leurs têtes. Puis ils sont rentrés sur Terre, en terminant leur voyage par un plongeon dans les eaux de l'océan Pacifique.



© Nasa, Getty Images (salle de contrôle), Alamy (lancement)



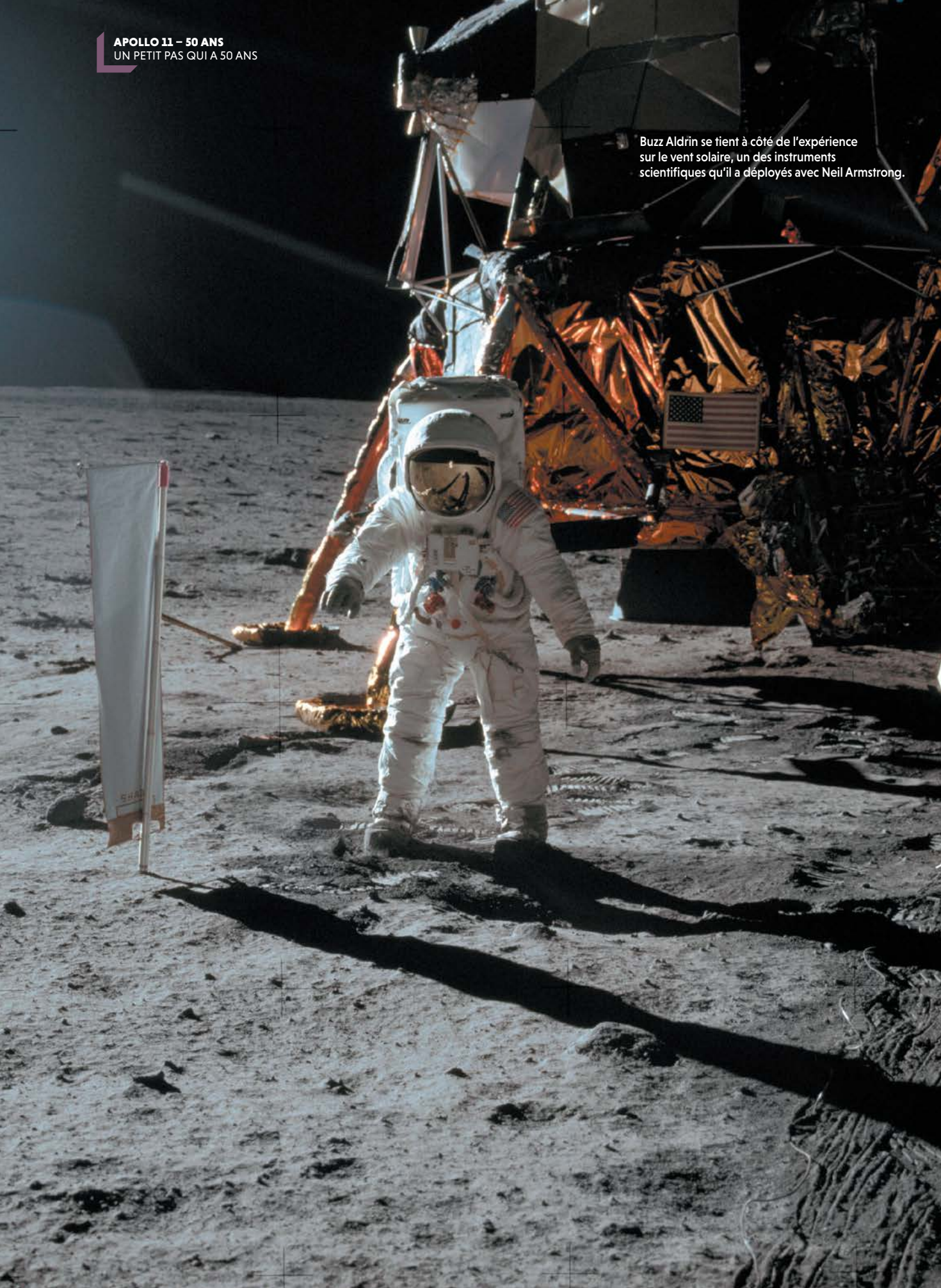
La mission *Apollo 11* décolle à bord d'une fusée *Saturn V* depuis la base de Cap Canaveral, en Floride, le 16 juillet 1969.

Le monde entier a été témoin de ce formidable exploit et de nombreuses personnes ont pensé qu'il ne faudrait pas grand-chose pour coloniser la Lune, voire prendre des vacances sur Mars. Pourtant, aucun humain n'a remis les pieds sur la Lune depuis les astronautes de la dernière mission *Apollo* en 1972. Et les plans pour envoyer des gens sur Mars, ou n'importe où dans le Système solaire, ne sont pas plus avancés aujourd'hui qu'ils ne l'étaient à l'époque.

Cette situation serait-elle en train de changer? L'administration du président américain Donald Trump semble déterminée à poser des astronautes sur la Lune d'ici à 2024. En outre, si à l'époque les États-Unis et l'Union soviétique étaient les seuls à pouvoir atteindre la Lune, depuis, d'autres acteurs sont entrés dans cette course: des pays comme la Chine, le Japon et l'Europe... et des sociétés privées.

Mais pourquoi retourner sur la Lune? Différentes raisons motivent une multitude de projets: des volontés politiques visant à la fois à redonner une sorte d'objectif commun, à créer une union sacrée en temps de crise, et à affirmer une puissance toujours intacte ou nouvelle; des enjeux économiques pour exploiter les ressources du sous-sol lunaire et développer le tourisme; sans oublier l'intérêt scientifique. Les missions *Apollo* ont rapporté plusieurs kilogrammes d'échantillons du sol lunaire. Meticuleusement analysés, ils ont fourni des informations précieuses pour comprendre comment est née la Lune. Mais pour en savoir plus, quoi de mieux que d'y retourner? ■

Buzz Aldrin se tient à côté de l'expérience sur le vent solaire, un des instruments scientifiques qu'il a déployés avec Neil Armstrong.



© Nasa (Aldrin à gauche, Aldrin sur l'échelle, Armstrong, module en orbite); Getty Images/Mario de Biasi (journalistes); Getty Images (Aldrin à bord)



Les journalistes suivent le décollage d'Apollo 11 depuis le centre spatial Kennedy.

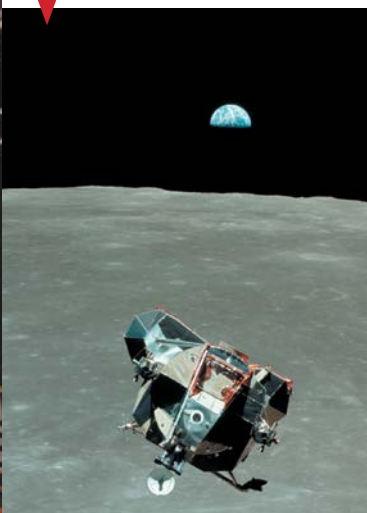


À peine de retour à bord du module après leur sortie sur la Lune, Buzz Aldrin prend ce portrait de Neil Armstrong.

Buzz Aldrin descend du module lunaire *Eagle* pour mettre le pied sur la Lune.



En arrière-plan, la Terre semble suspendue au-dessus de la Lune alors que le module lunaire entame sa remontée vers l'appareil resté en orbite.



Sur le module lunaire, Aldrin maintient le contact radio avec la Terre.

Sur les traces d'Apollo 11



L'AUTEUR



EDWARD BELL
directeur artistique à *Scientific American*
et auteur d'un livre iPad sur les exoplanètes

Les images satellites et des modélisations 3D récentes donnent un nouvel aperçu de la mission *Apollo 11*.

En 1969, les gens sur Terre ont suivi en direct l'aventure historique de la mission *Apollo 11* grâce à des images vidéo de mauvaise qualité, mais qui n'en étaient pas moins enthousiasmantes. Ils n'avaient cependant aucune idée de l'endroit où l'action se déroulait précisément sur la Lune et à quel point les astronautes s'étaient promenés à la surface du satellite, dans la mer de la Tranquillité. Aujourd'hui, grâce à des modèles numériques en 3D créés à partir des relevés de sondes en orbite, nous pouvons suivre pas à pas la mission et avoir une meilleure vision du terrain exploré. Cette reconstitution du site où le module lunaire s'est posé a été réalisée avec des photographies de la sonde *Lunar Reconnaissance Orbiter* (LRO) datant de 2012. La carte en relief montre le paysage que Neil Armstrong et Buzz Aldrin ont exploré, la position du module lunaire et des différentes expériences, et même des chemins que les astronautes ont empruntés.

Ces images satellitaires nous aident à préserver certains détails de la mission avant leur disparition. En effet, les températures extrêmes, le rayonnement solaire et le bombardement permanent de micrométéorites sur la surface lunaire érodent les empreintes de pas et finiront par désagréger les appareils laissés sur place. Petit à petit, la «base de la Tranquillité» s'efface...

CRATÈRE LITTLE WEST

LES ULTIMES MINUTES

Bien que méticuleusement planifiée, la mission a connu quelques péripéties alors que le module *Eagle* entamait sa descente. La figure ci-dessous indique la position de l'appareil en fonction de son altitude dans les derniers instants, quand Neil Armstrong a décidé de poser le module au-delà de la zone prévue – couverte de rochers potentiellement dangereux – et a improvisé pour choisir un autre site d'atterrissage.

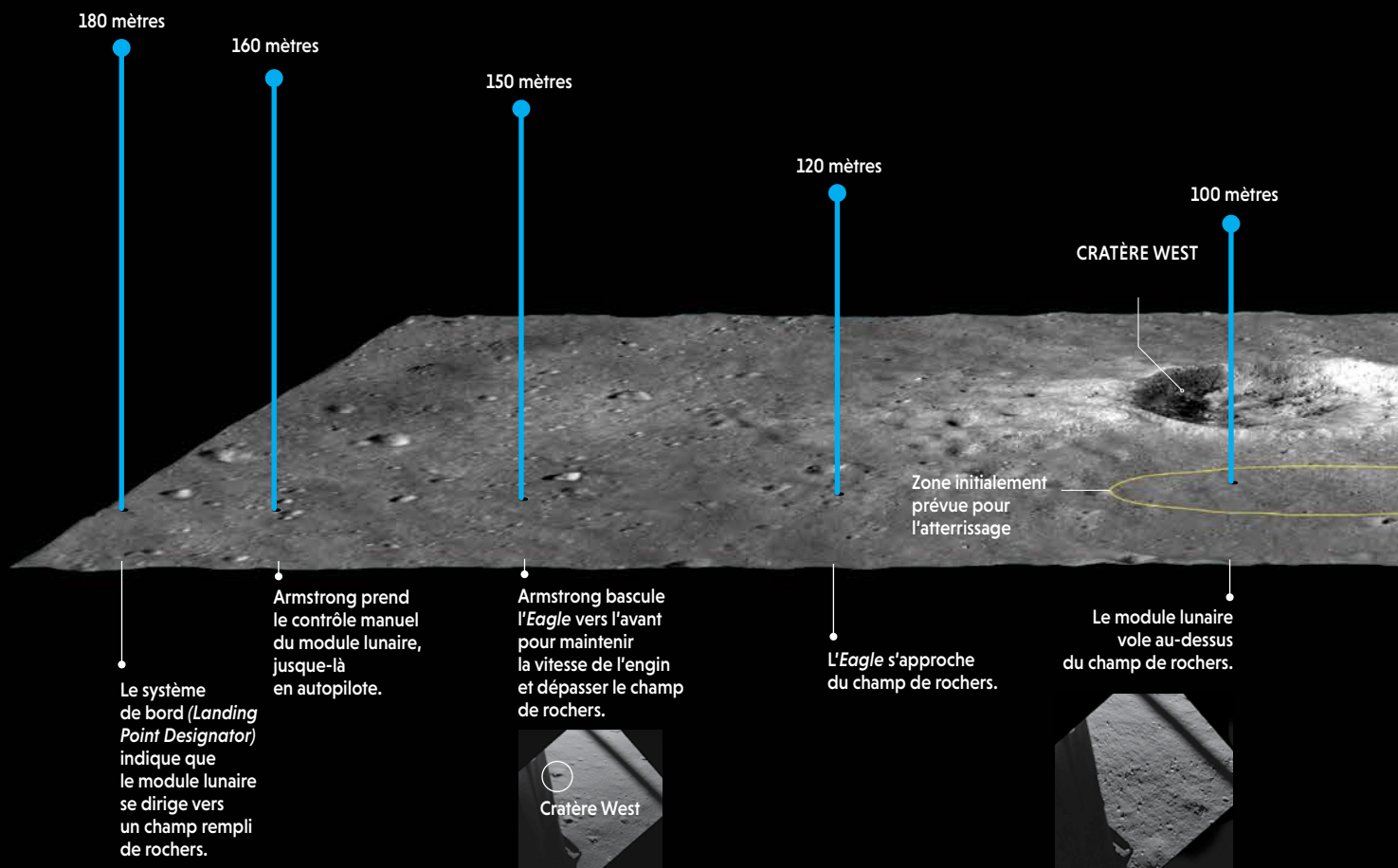
Les soucis avaient déjà commencé plus tôt. À 10000 mètres d'altitude, une alarme lumineuse étiquetée «alarme 1202» a commencé à clignoter sur le panneau de contrôle de l'*Eagle*. «Qu'est-ce que ça veut dire?» a demandé Neil Armstrong à son coéquipier, Buzz Aldrin, alors que la lumière clignotait et l'alarme sonnait à un rythme irrégulier. Les deux astronautes n'avaient aucun souvenir d'avoir rencontré cette alerte pendant les exercices d'entraînement. Les ingénieurs de la mission, depuis le centre de contrôle à Houston, ont fini par conclure que l'alarme pouvait être ignorée sans risque. Mais trouver son origine a fait perdre un temps précieux aux astronautes.

Alors que les réserves de carburant du module s'amenuisaient, l'*Eagle* est devenu de plus en plus difficile à manœuvrer. Quand le réservoir a été à plus de la moitié vide, le liquide

a commencé à balloter fortement. Ce mouvement a agité l'appareil dans toutes les directions. Cela a entraîné le déclenchement d'une alarme «faible niveau de carburant», 30 à 45 secondes plus tôt que prévu, donnant aux astronautes l'impression qu'ils avaient moins de temps pour rejoindre sans risque le sol que ce qui était estimé.

À 600 mètres d'altitude, Armstrong a regardé par le hublot pour examiner le site d'atterrissage initialement choisi. (Il aurait dû le faire plus tôt, mais, comme il l'a expliqué lors d'une réunion après son retour, «notre attention avait été mobilisée afin de traiter les alarmes, maintenir la machine en vol et nous assurer que nous contrôlions assez la situation pour ne pas annuler la mission. Nous étions donc concentrés sur ce qui se passait à l'intérieur du module.») Il a trouvé le site peu propice pour poser le module en toute sécurité. Comme il l'a décrit plus tard, le site d'atterrissage était «un large cratère entouré d'une vaste zone remplie de gros rochers.»

Presque à court de temps et de carburant, Armstrong a pris le contrôle manuel du vaisseau à 160 mètres d'altitude. Au dernier moment, il a guidé l'*Eagle* au-delà du champ de rochers pour le poser sur un site moins accidenté. ■

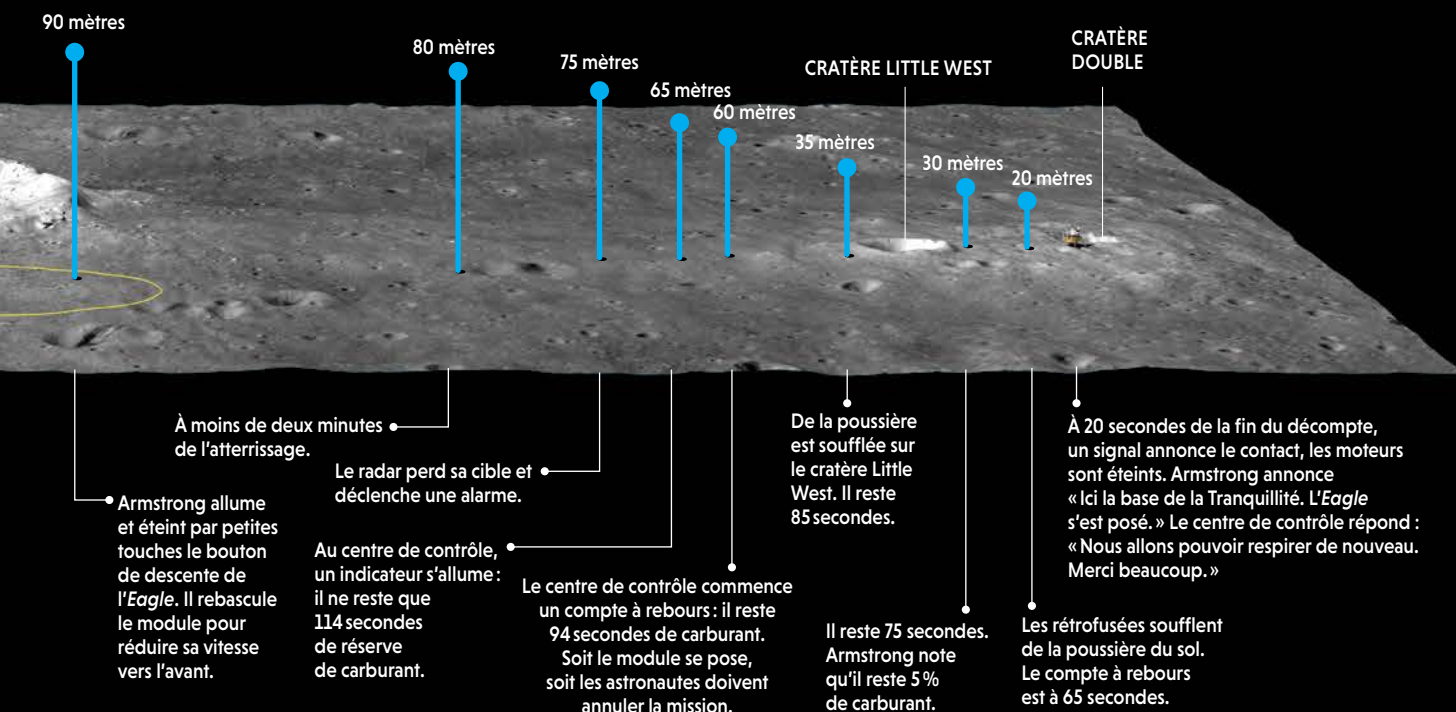
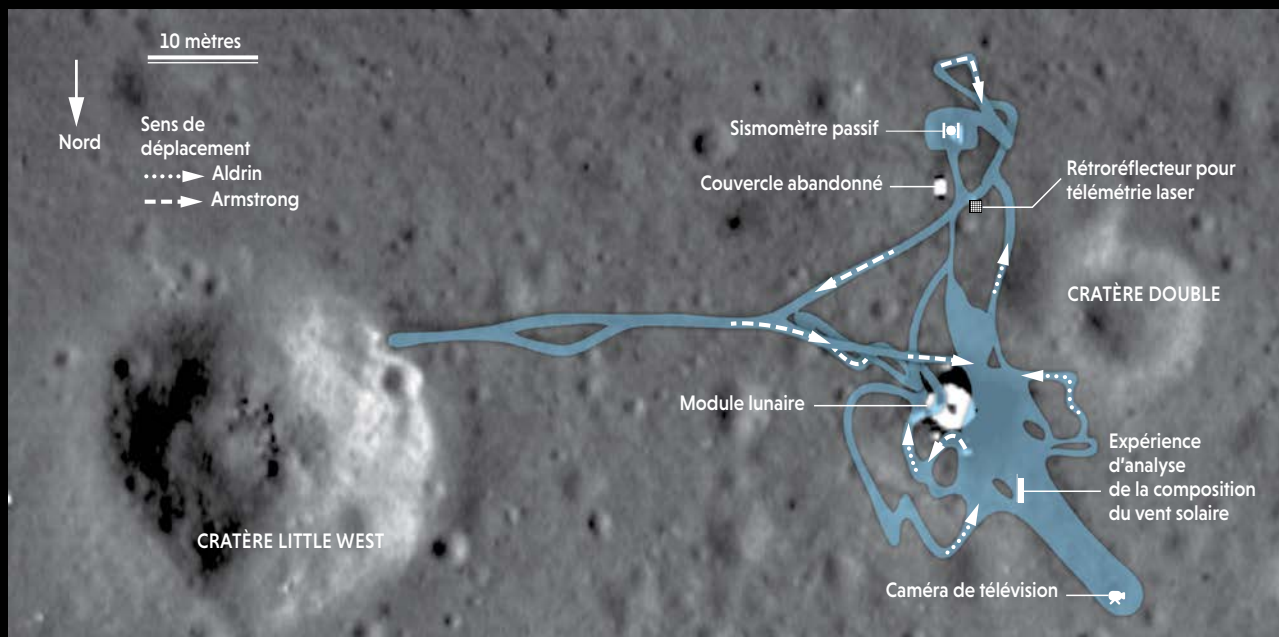


DANS LES PAS DES DEUX ASTRONAUTES

« **U**n petit pas pour l'homme » a été suivi de nombreux autres pas pour Neil Armstrong et Buzz Aldrin. Durant les 2 h 30 de leur sortie lunaire, ils ont installé de l'équipement et exploré les environs. L'image haute résolution de la caméra de la sonde LRO (ci-dessous) montre où les deux astronautes (en bleu) ont perturbé la poussière lors de leur passage sur la base de la Tranquillité. La plupart de leurs déplacements visaient à installer

des instruments scientifiques : un sismomètre passif pour détecter des séismes lunaires, un détecteur de la composition du vent solaire, dont les échantillons ont été analysés plus tard, un réflecteur laser, permettant de mesurer la distance Terre-Lune avec une grande précision et les variations dans l'orbite du satellite. C'est Armstrong qui s'est le plus éloigné de l'Eagle, lors d'une escapade non prévue vers le cratère Little West, à 60 mètres de distance.

© Nasa ; Centre Goddard pour le vol spatial ; T. Schwagmeier et E.M. Jones



© Infographie : Edward Bell (atterrissage) et Éléonore Dixon-Roche (traces de pas)

Légendes

Statut de la mission

- ⊗ Échec
- ⊙ Succès
- À venir

Pays

- ▲ États-Unis
- ▲ URSS et Russie
- ▲ Chine
- ▲ Japon
- ▲ Europe
- ▲ Inde
- ▲ Israël

Première mission américaine
à atteindre la Lune

Premier objet construit par l'homme
à atteindre un autre corps céleste

ATTESSAGES RÉUSSIS

Années 1950

NOM DE LA MISSION

Date de lancement (UTC)

OBJECTIF

SURVOL

MISE EN ORBITE

IMPACT

ATTESSAGE

ROVER ROBOTISÉ

ÉQUIPAGE

AU SOL

La proximité de la Lune est trompeuse : cette destination est bien difficile à atteindre. À peine plus de la moitié des 122 missions ont atteint leur objectif. Jusqu'en 1990, les États-Unis et l'Union soviétique ont été les seuls pays à lancer des missions lunaires. Le Japon, d'abord, puis d'autres les ont rejoints.

Objectifs Lune

2028 - Federatsiya (Federation)

2024-20XX - Gateway

2024 - Exploration Mission-3 (EM-3)

20XX - Chang'e-6

2023 - #dearMOON

2022-2023 - Exploration Mission-2 (EM-2)

2021 - Peregrine

2020 - Exploration Mission-1 (EM-1)

2020 - ALINA

20XX - Lunar Scout

20XX - Chang'e-5

2019 - Chandrayaan-2

22-02-2019 - Beresheet

07-12-2018 - Chang'e-4 / Yutu-2

20-05-2018 - Queqiao / Longjiang-1

18-04-2018 - TESS

23-10-2014 - Manfred Memorial Moon Mission

23-10-2014 - Chang'e-3 / Yutu

01-12-2013 - LADEE

07-09-2013 - Chang'e-5-T1

10-09-2011 - GRAIL (Ebb & Flow)

01-10-2010 - Chang'e-2

18-06-2009 - LCROSS

18-06-2009 - Lunar Reconnaissance Orbiter

22-10-2008 - Chandrayaan-1 / Moon Impact Probe