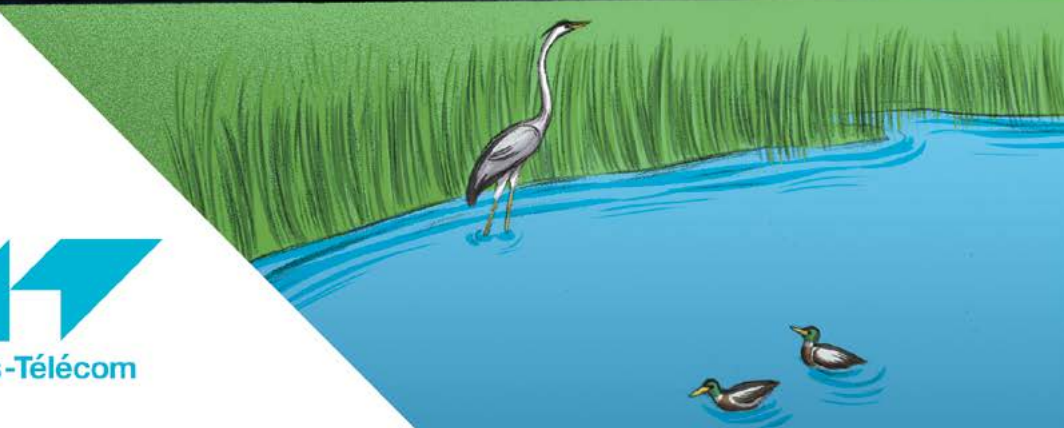


# **l'MTech. le meilleur de 2019**

► 1 an de sciences à l'IMT



# Édito

## À la croisée des décennies, l'MTech vous propose une sélection de ses articles emblématiques de l'année écoulée, en guise de regard sur les transformations scientifiques et technologiques de notre temps.

Souvenez-vous, c'était en 2010. «À l'époque», le Giec luttait encore pour asseoir sa légitimité, nous consommions du débit 3G sur des mobiles sans protection biométrique, et le mot *vlog* était réservé à des initiés. Une décennie plus tard, le renouvelable couvre 20 % de la consommation d'électricité en France, nous regardons des films en *streaming* HD sur nos *smartphones* à reconnaissance faciale, et Vine a eu le temps d'être achetée 30 millions de dollars par Twitter avant de disparaître complètement. Les années 2010 ont marqué à plus d'un titre une décennie de profondes transformations technologiques. C'est dans ce contexte qu'est né l'MTech en 2017, comme un pari : miser sur la place privilégiée de l'IMT, de ses écoles et de ses chercheurs, à la croisée des mondes académique et industriel, pour proposer une actualité pertinente sur les technologies qui nous touchent aujourd'hui, et nous concerneront demain. Un pari tenu, au fil des éclairages sur les sujets de sciences et de société dont 2019 constitue un nouveau millésime. En cette fin de décennie, nous vous proposons ainsi une sélection emblématique des sujets de l'année écoulée, comme un témoin des enjeux scientifiques qui nous attendent à l'aube des années 2020.

- La rédaction de l'MTech.

# Sommaire

## 01. Société numérique ▶6

08. L'inintelligence des intelligences artificielles

14. Des données personnelles aux intelligences artificielles : à qui profite le clic ?

20. *Data brokers* : intermédiaires de la donnée, maîtres des marchés

## 02. Matière & matériaux ▶26

28. Le sable une ressource rare qu'il faut remplacer

36. KM3Net sonde les abysses en quête des insaisissables neutrinos

42. Le difficile recyclage des composites à fibre de carbone

## 03. **Énergie & environnement** ▶46

48. Fukushima : 8 ans après, qu'est-ce qui a changé en France ?

56. Quand les plantes nous aident à lutter contre la pollution

62. La pollution pétrolière en mer s'observe depuis l'espace

## 04. **Entreprises & industries** ▶68

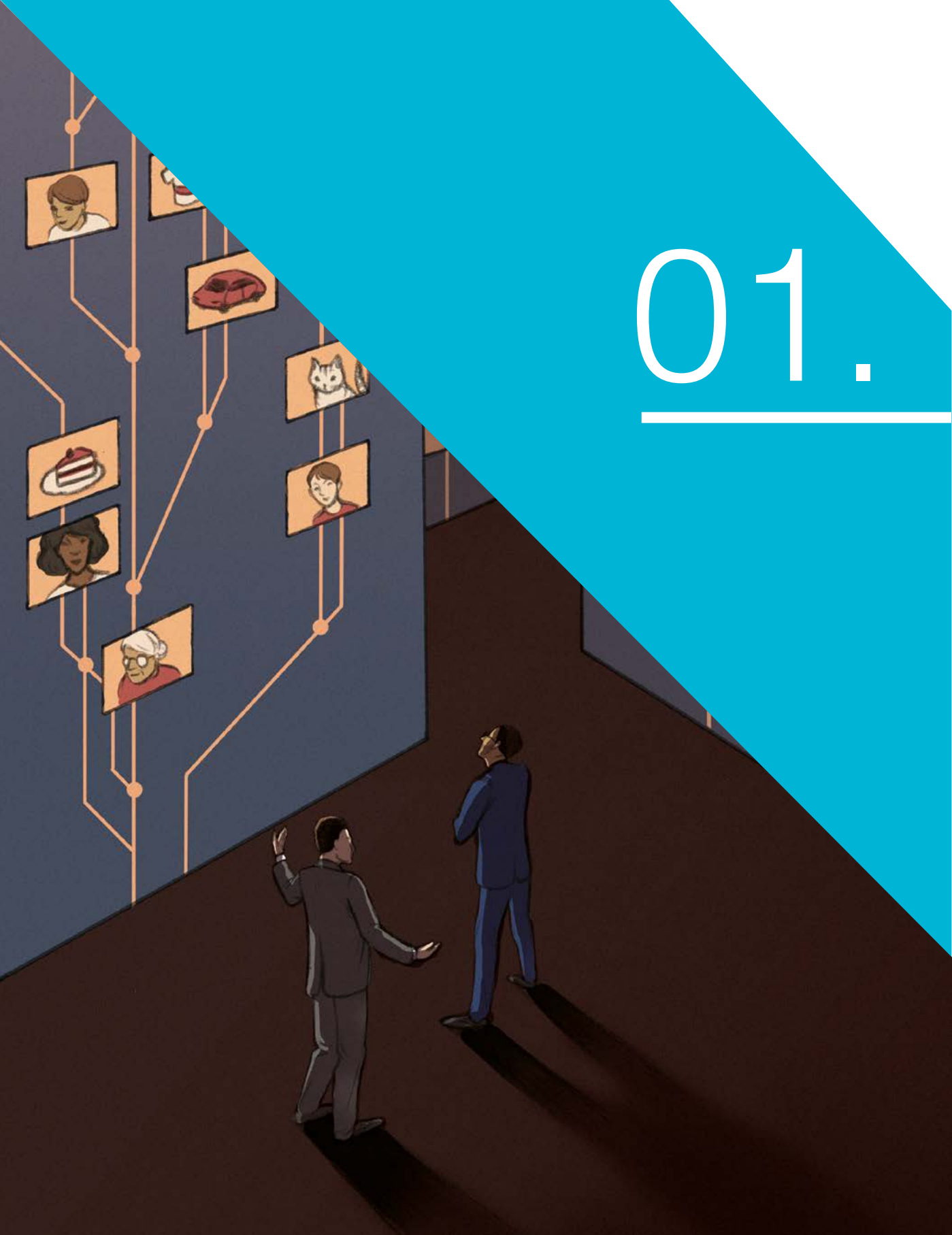
70. Servicisation des produits : vers une économie créatrice de valeur

76. Dans l'usine de demain, pas de brouhaha chez les robots

82. Collaboration homme-robot : utopie industrielle ou réalité de demain ?

01.

---



# Société numérique

---

## ▶ 08

L'inintelligence  
des intelligences  
artificielles

## ▶ 14

Des données  
personnelles  
aux intelligences  
artificielles : à qui  
profite le clic ?

## ▶ 20

*Data brokers:*  
intermédiaires  
de la donnée, maîtres  
des marchés

# L'inintelligence des intelligences artificielles

---

En dépit des avancées considérables de l'intelligence artificielle, celles-ci peinent encore à copier l'intelligence humaine. Elles demeurent orientées sur la performance des tâches, sans comprendre le sens de leurs actions, et se retrouvent ainsi limitées en cas de changement de contexte ou lorsqu'il faut passer à l'échelle. Dans son dernier ouvrage intitulé *Des intelligences très artificielles*, Jean-Louis Dessalles détaille ces problèmes. Ce chercheur à Télécom Paris propose également des pistes de réflexion pour faire des intelligences artificielles vraiment intelligentes. Dans cet entretien pour l'MTech, il présente quelques-unes de ses idées.



## Une intelligence artificielle (IA) peut-elle comprendre ce qu'elle fait ?

**Jean-Louis Dessalles :** Cela s'est déjà vu. C'est le cas du programme SHRDLU par exemple, inventé en 1970 par Terry Winograd durant sa thèse au MIT. Le programme simulait un robot capable d'empiler des blocs tout en dialoguant à propos de ses actions. Il était incroyable parce qu'il savait justifier ses actions. Après un empilement, les chercheurs pouvaient lui demander « pourquoi est-ce que tu as déplacé ce bloc vert ? » qu'ils ne lui avaient pas demandé de toucher.

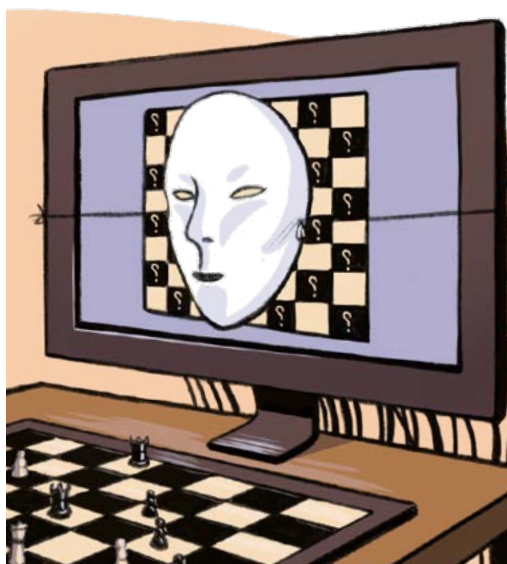
SHRDLU répondait en expliquant que c'était pour se faire de la place et pouvoir manœuvrer plus facilement les blocs qu'il devait déplacer. C'était il y a presque 50 ans, et c'est resté un des quelques cas isolés de programmes capables d'interpréter leurs actions.

« Aujourd'hui, la majorité des IA ne peuvent pas expliquer ce qu'elles font. »

## Pourquoi est-ce un cas isolé ?

**JLD :** SHRDLU était très bon pour expliquer comment il empilait des blocs dans un monde virtuel fait de cubes et de pyramides. Lorsque les chercheurs ont voulu le faire passer à l'échelle dans un monde plus complexe, le programme était nettement moins performant. Ce genre d'IA a divergé vers quelque chose qui soit capable de réaliser la tâche donnée, indépendamment

de la compréhension qu'elle peut en avoir. Récemment, IBM a sorti Project Debater, une IA capable de débattre dans un concours d'éloquence. C'est très impressionnant, mais lorsque l'on analyse ce que fait le programme, on se rend compte qu'il ne comprend à peu près rien. L'IA parcourt internet, extrait des phrases qui ont un lien logique entre elles et les assemble en un argumentaire. Face à ça, le public a l'illusion d'une construction logique, mais c'est de la compilation de phrases à partir d'une analyse superficielle. L'IA ne comprend pas le sens de ce qu'elle dit.



## Est-ce un problème qu'une IA ne comprenne pas, dès lors qu'elle est efficace ?

**JLD :**

« Les systèmes qui ne comprennent pas sont amenés à faire des erreurs que ne feraient pas les humains. »

Les systèmes de traduction automatique par exemple rendent d'énormes services. En revanche, ils peuvent parfois se tromper sur un mot très simple parce qu'ils ne comprennent pas le sens implicite, là où un enfant

saurait le comprendre à partir du contexte. Les IA qui sont derrière ces programmes vont être très performantes tant qu'elles restent dans un cadre donné, comme SHRDLU. Dès que vous les mettez dans un cas de la vie courante, dès que vous avez besoin qu'elles prennent en compte le contexte, elles deviennent limitées parce qu'elles ne comprennent pas le sens de ce que nous leur demandons.

## C'est une façon de dire qu'une intelligence artificielle n'est pas intelligente ?

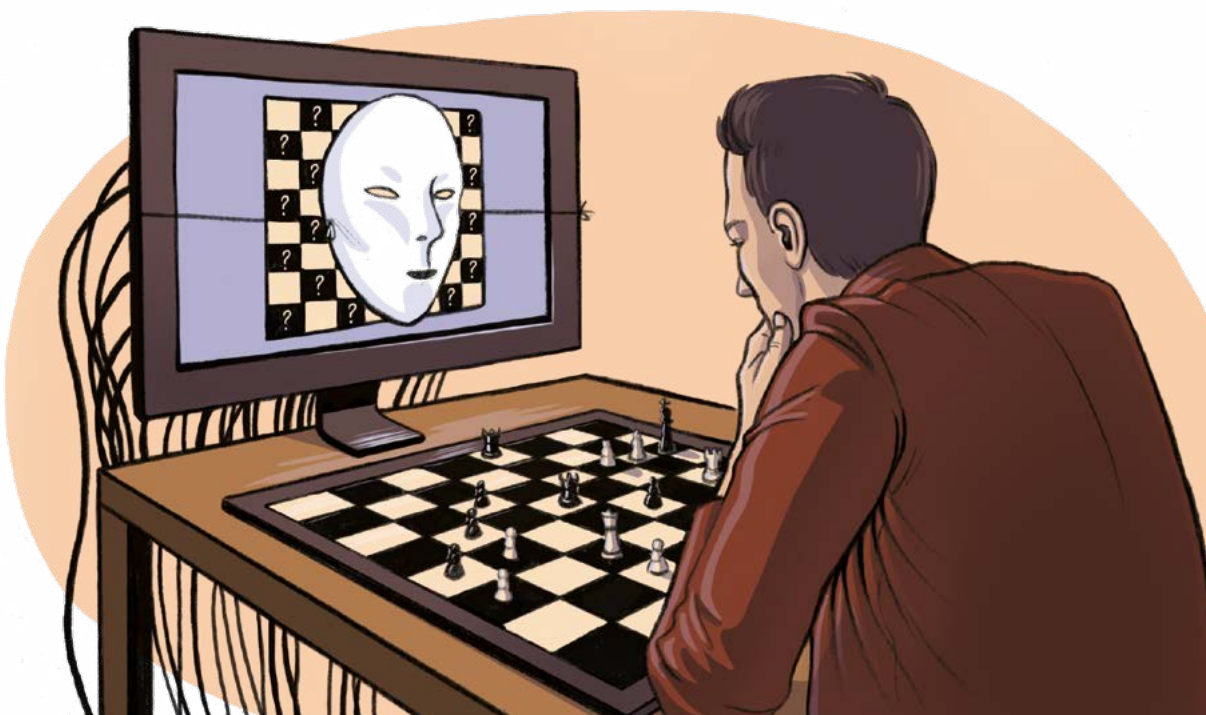
**JLD :** Il y a deux visions fondamentales de l'IA qui s'affrontent aujourd'hui. D'un côté une version majoritairement pensée aux États-Unis, qui met l'accent sur la performance. De l'autre, c'est la pensée de Turing : si une IA n'est pas capable d'expliquer ce qu'elle fait, ni d'interagir avec moi, je ne vais pas l'appeler « intelligente ». D'un point de vue utilitaire, la première vision réussit beaucoup de choses, mais elle se heurte à de grosses limites, notamment lorsqu'il s'agit de résoudre un problème. Prenons le cas d'un bâtiment ou d'une maison connectée. L'IA peut prendre des décisions optimales, mais si elles sont incompréhensibles pour l'humain, il va

considérer que l'IA est stupide. Nous voulons que les machines puissent réfléchir de manière séquentielle, comme nous : je veux faire ceci, donc je dois changer cela, si cela induit un nouveau problème, je change autre chose. L'optimisation multi-critère de la machine qui va tout paramétrer en même temps est incompréhensible pour nous. Certes ce sera performant, mais en fin de compte c'est l'humain qui jugera si la décision prise lui convient ou pas, avec ses valeurs et ses préférences, dont celle de vouloir comprendre la décision.

## Pourquoi une machine ne comprend-elle pas le sens des actions que nous lui demandons ?

**JLD :** Aujourd'hui la plupart des IA reposent sur des techniques de type numérique, qui n'intègrent pas la question des représentations. J'ai un problème, je rentre des paramètres et des variables, et le réseau de neurones me sort un résultat de calcul que je ne sais pas interpréter. Il n'y a pas de place pour intégrer des concepts ou du sens là-dedans. En parallèle, il a des tentatives liées aux ontologies, qui s'intéressent à ces questions. Le sens est représenté sous formes de structures préconçues où tout est explicite : une idée ou un concept va être apparié avec des entités linguistiques. Par exemple,

pour donner à une machine le sens du mot « mariage », je vais lui associer une description conceptuelle, qui repose à la fois sur un individu n°1 et un individu n°2 liés, et la machine peut découvrir par elle-même qu'il existe une proximité géographique entre ces deux individus — *ils habitent au même endroit, etc.* Personnellement, je ne crois pas non plus que les ontologies nous rapprochent d'une IA comprenant ses actions, et réellement intelligente au sens de Turing.



## Quelle est la limite des ontologies selon vous ?

**JLD :** Elles connaissent aussi des problèmes de passage à l'échelle. Sur cet exemple du mariage par exemple, comment donner à la machine tous les sens que l'humain met derrière ce concept. Selon les individus, leurs valeurs, leurs croyances, l'idée de mariage sera différente. Faire comprendre cela à une IA implique de construire des représentations complexes, parfois trop complexes.

« L'humain comprend un concept et ses nuances très rapidement,

avec très peu de description initiale : personne ne passe des heures et des heures

à apprendre à un enfant ce qu'est un chat. Il le fait de lui-même, en observant quelques chats à peine, et en se demandant ce qui fait la singularité de chacun d'entre eux. Nous utilisons pour cela des mécanismes cognitifs particuliers, dont la recherche de la simplicité, qui nous permettent par exemple de reconstruire la partie manquante d'un objet à moitié caché, ou de comprendre quel sens est impliqué lors de l'utilisation d'un mot qui en compte plusieurs.

## Que manque-t-il alors aux IA pour pouvoir être réellement intelligentes et acquérir ce savoir implicite ?

**JLD :** L'auto-observation passe par le contraste, et c'est une capacité qui manque aux IA. Le sens des mots change dans le temps et selon les situations. Si je vous dis : « rangez ça dans l'armoire », vous saurez sans doute vers quel meuble vous tourner, alors même que l'armoire située dans votre bureau et celle située dans votre chambre ne se ressemblent pas du tout, ni en termes de forme, ni sur ce qu'elles contiennent. C'est ce qui nous permet de comprendre des concepts très flous, comme celui derrière le mot « grand ». Que je vous parle d'une « grande bactérie » ou d'une « grande galaxie », vous me comprenez, car vous

savez que le sens de « grand » n'est pas un sens absolu. Il repose sur une opération de contraste entre l'objet désigné et l'objet typique correspondant, réalisée en fonction du contexte. Les machines ne savent pas encore faire cela : elles reconnaîtront par exemple le mot « grand » comme une caractéristique de la galaxie, mais alors parler de grande bactérie n'aura pour elles pas de sens.

« Il faut doter les IA d'une capacité de contraste. »

## Est-ce réalisable ?

**JLD:** Très probablement, mais il faudrait augmenter les techniques numériques en ce sens. Mais les concepteurs d'IA sont à des années lumière de se poser ce genre de question. Ce qu'ils se demandent, c'est comment améliorer la performance de leur réseau de neurones multicouche pour plus de performance. Ils ne voient pas l'intérêt de se rapprocher de l'intelligence humaine. Le *Project debater* d'IBM illustre tout à fait cela : c'est avant tout de la classification, sans capacité de contraste. Au premier abord c'est très impressionnant, mais ça n'est pas aussi puissant qu'une intelligence humaine, avec ses mécanismes

cognitifs pour extrapoler et argumenter. Le programme d'IBM contraste les phrases en fonction des mots qu'elles contiennent, alors que nous les contrastons en fonction des idées exprimées. Pour être vraiment intelligentes, les IA devront peut-être aller au-delà de simples classifications et tenter de reproduire, plutôt que mimer, nos mécanismes cognitifs.

# Des données personnelles aux intelligences artificielles : à qui profite le clic ?

▶ Cliquer, liker, partager : toutes nos liaisons numériques produisent de la donnée. Ces informations, captées et monétisées par les grandes plateformes du numérique, sont en phase de devenir l'or noir – *virtuel* – du XXI<sup>e</sup> siècle. Sommes-nous tous devenus les ouvriers du numérique? À l'occasion de la sortie de son ouvrage, *En attendant les robots, enquête sur le travail du clic*, Antonio Casilli, chercheur à Télécom Paris et spécialiste du *digital labor*, revient pour nous sur les dessous de cette exploitation 2.0.

**Q**ui nous sommes, ce que nous aimons, ce que nous faisons, quand, avec qui : les assistants personnels et autres interlocuteurs virtuels savent tout de nous. L'espace numérique est le nouveau terrain de l'intime. Ce capital social virtuel est la matière brute des géants de l'internet. La rentabilité des plateformes numériques, de Facebook à Airbnb en passant par Apple ou encore Uber, repose sur l'analyse massive de données des utilisateurs à des fins publicitaires. Dans son nouvel ouvrage intitulé *En attendant les robots, enquête sur le travail du clic*, Antonio Casilli explore ainsi l'émergence d'un capitalisme de surveillance, opaque et invisible, marquant l'avènement d'une nouvelle forme de prolétariat du numérique : le *digital labor* — ou travail numérique « du doigt » en français. Du micro-travailleur du clic, conscient et rémunéré, à l'utilisateur dont l'activité de production de données est implicite, le sociologue analyse les coulisses d'un travail hors travail, et la réalité bien palpable de cette économie de l'immatériel.

Antonio Casilli interroge notamment la capacité des plateformes du net à mettre leurs utilisateurs au travail, convaincus d'être plus consommateurs que producteurs.

« La gratuité de certains services numériques n'est qu'une illusion.

Chaque clic d'une part alimente un vaste marché publicitaire, de l'autre il produit de la donnée qui nourrit des intelligences artificielles. Chaque « j'aime », chaque *post*,

chaque photo, chaque notation ou connexion remplit une condition : produire de la valeur. Ce *digital labor* est très faiblement voire non rémunéré, puisque personne ne touche une rétribution à la hauteur de la valeur produite. Mais cela reste du travail : c'est une source de valeur, tracée, mesurée, évaluée, et encadrée contractuellement par les conditions générales d'usage des plateformes » explique le sociologue.

**Certains services**  
 « **intelligents** »  
**s'appuient**  
**sur le travail**  
**de petites mains.**

## Cachez cet humain que je ne saurais voir

Ainsi, pour lui, le *digital labor* est une nouvelle forme du travail, invisibilisée, qui se manifeste au travers de nos traces numériques. Loin de marquer la disparition du travail humain remplacé par les robots, ce travail au clic questionne la frontière entre le travail implicitement produit et l'emploi formellement reconnaissable. Et pour cause, les micro-travailleurs payés à la pièce ou les usagers-producteurs de données, comme nous, sont indispensables pour les plateformes. Ces données alimentent

les modèles de *machine learning* : derrière l'automatisation d'une tâche, comme la reconnaissance visuelle ou textuelle, ce sont en fait des humains qui nourrissent les applications en indiquant, par exemple, sur des images le ciel, les nuages, ou en retranscrivant un mot. « Selon certaines idées reçues, ces machines apprendraient toutes seules. Mais pour entraîner leurs algorithmes à calibrer, à améliorer leurs services, les plateformes ont besoin d'énormément de personnes qui les entraînent et les testent » rappelle Antonio Casilli. Parmi les exemples les plus emblématiques, un service proposé par le géant américain Amazon, *Mechanical Turk*. Ironie du sort, son nom fait référence à un canular remontant au XVII<sup>e</sup> siècle. Un automate joueur d'échecs, appelé le « turc mécanique », était capable de remporter des parties contre des joueurs humains. Le Turc était en réalité manipulé par de véritables humains qui se glissaient à l'intérieur.

De même, certains services dits « intelligents » s'appuient largement sur la mise au travail de petites mains. Une intelligence artificielle « artificielle » en quelque sorte. Un travail au service de la machine, où ces ouvriers du numérique accomplissent des micro-tâches maigrement rémunérées. « Le *digital labor* marque ainsi l'apparition d'une nouvelle manière de travailler : « tâcheronnisé », parce que le geste humain est réduit à un simple clic ; « dataisé », parce qu'il s'agit de produire de la donnée pour que les plateformes numériques en tirent de la valeur »

## Ces nouvelles formes de travail échappent encore aux normes salariales.

explique Antonio Casilli. Et c'est bien là que la data blesse. Aliénation et exploitation : aux tâcherons du web installés dans le Nord, s'ajoutent le plus souvent des homologues situés en Inde, aux Philippines, ou dans des pays en voie de développement, où le salaire moyen est bas, où ils sont parfois rémunérés moins d'un centime par clic.

### Encadrer le digital labor par le droit ?

Ces nouvelles formes de travail échappent encore aux normes salariales. Néanmoins, les recours collectifs contre les plateformes numériques pour revendiquer certains droits se sont multipliés ces dernières années. À l'image des chauffeurs Uber ou des livreurs Deliveroo qui tentent, par voie de justice, de faire requalifier leur contrat commercial en contrat de travail. Face à cette précarisation du travail numérique, Antonio Casilli envisage trois évolutions possibles pour une reconnaissance sociale, économique et politique du *digital labor*. « De Uber aux modérateurs des plateformes, le droit du travail classique — donc la requalification en salariat — pourrait permettre une reconnaissance de leur statut. Mais







le travail dépendant n'est pas forcément la panacée. Aussi, on voit de plus en plus se développer des formes de plateformes coopératives où les usagers deviennent les propriétaires des moyens de production et des algorithmes.» Antonio Casilli voit toutefois des limites à ces deux évolutions. Pour lui, une troisième voie est possible.

« Nous ne sommes ni les petits propriétaires, ni les petits entrepreneurs de nos données. Nous en sommes les travailleurs.

Et ces données personnelles, ni privées, ni publiques, appartiennent à tous et à personne. La vie privée doit être une négociation collective. Il nous reste à inventer et à faire émerger des institutions pour en faire un véritable bien commun. Internet est un nouveau champ de luttes » s'enthousiasme le chercheur.

## Vers une fiscalité du numérique

Alors, les données personnelles de moins en moins personnelles ? « Chacun d'entre nous produit de la donnée. Mais cette donnée est, en fait, une ressource collective, appropriée et privatisée par des plateformes. Ces plateformes devraient non pas rémunérer à la pièce la donnée de chaque individu, mais plutôt restituer, redonner à la collectivité nationale ou internationale, via une fiscalité équitable, la valeur qu'elles ont extraite » détaille Antonio Casilli. En mai dernier, le règlement général sur la protection des données (RGPD) est entré en application dans l'Union Européenne. Entre autres, ce texte protège désormais les données comme des attributs de la personnalité et non plus comme une propriété. Ainsi, théoriquement, chacun peut désormais

consentir librement — et à tout moment — à l'exploitation de ses données personnelles et retirer son consentement aussi simplement.

Si la régulation passe aujourd'hui par un ensemble de mesures de protection, la mise en place d'une fiscalité telle que promue par Antonio Casilli permettrait l'instauration d'un revenu de base inconditionnel. Le fait même d'avoir cliqué ou partagé une information pourrait donner droit à cette redevance et permettrait à chaque utilisateur d'être rémunéré pour n'importe quel contenu posté en ligne. Ce revenu ne serait donc pas lié aux tâches réalisées mais reconnaîtrait la valeur issue de ces contributions. En 2020, plus de 20 milliards d'appareils seront connectés à l'internet des objets. Le marché de la donnée pourrait ainsi atteindre près de 430 milliards d'euros par an d'ici là selon certaines estimations, soit la moitié du PIB de la France. Les données ne sont définitivement pas des marchandises comme les autres.

# ***Data brokers :*** **intermédiaires** **de la donnée,** **maîtres** **des marchés**

---

Depuis 5 ans, les grands acteurs du numérique ont donné un coup d'accélérateur à l'activité des *data brokers*. Ils collectent et combinent les masses de traces laissées en ligne par les consommateurs. Ils les proposent ensuite à des entreprises qu'ils choisissent, pour en tirer un revenu et surtout jouer avec la concurrence sur les marchés du monde entier. Un nouveau pouvoir considérable très mal compris. Patrick Waelbroeck, économiste à Télécom Paris, étudie ce phénomène au sein de la chaire Valeurs et politiques des informations personnelles qu'il a cofondée.

Les *data brokers* existent depuis les années 70, et la naissance du marketing direct. Ces intermédiaires de la donnée collectent, trient et préparent des données de consommateurs pour des entreprises ayant besoin d'analyses de marché. Mais depuis l'arrivée du web, des *data brokers* comme Acxiom, Epsilon ou Quantum ont professionnalisé l'activité. À la différence majeure de leurs prédécesseurs, ce sont eux qui sélectionnent les partenaires à qui ils vendent les informations. Ils emploient des dizaines de milliers de collaborateurs et dépassent parfois le milliard de dollars de chiffre d'affaires.

Dès 2015, dans un article intitulé *The black box society*, Franck Pasquale, professeur de droit à l'Université du Maryland, recensait plus de 4 000 *data brokers* sur un marché de 156 milliards de dollars. En 2014, selon la *Federal Trade Commission* (FTC) américaine, l'une de ces sociétés détenait des informations sur 1,4 milliard de transactions réalisées par des consommateurs américains, et plus de 700 milliards d'éléments agrégés !

Des chiffres vertigineux pourtant déjà anciens, car ces cinq dernières années,

**Ces cinq dernières années, les géants du numérique ont décidé de rentrer dans le jeu des *data brokers*.**

les géants du numérique ont décidé de rentrer dans le jeu des *data brokers*. Or, « les économistes ne s'intéressent pas au sujet et ne le comprennent pas » déplore Patrick Waelbroeck, professeur d'économie industrielle et d'économétrie à Télécom Paris. Au sein de la chaire Valeurs et politiques des informations personnelles de l'IMT, il étudie tout particulièrement l'influence des *data brokers* sur l'économie globale et sur une juste concurrence.

## Une activité très opaque

« Il existe une offre, une demande, des sociétés qui achètent, qui collectent, qui modulent, qui construisent des bases de données et qui les revendent sous forme de segments de marché à cibler, en fonction des besoins du client » complète le chercheur. Les géants du numérique ont par ailleurs compris depuis toujours que les données personnelles n'ont que peu de valeur individuellement. L'activité de *data broker* consiste ainsi non seulement à les trouver, en ligne ou hors ligne, et à les collecter, mais surtout à les combiner pour décrire des segments de marché de plus en plus fins.

Il y a 5 ans, la FTC estimait déjà que certains *data brokers* disposaient de plus de 3 000 catégories d'information sur chaque américain, depuis les noms, prénoms, adresses, professions, situations familiales, jusqu'aux intentions d'achat de voiture ou aux projets de mariage. Mais contrairement aux *data brokers* « natifs », les géants du numérique

ne vendent pas directement ces informations à haute valeur ajoutée. Ils les échangent contre des services, des compensations. Des transactions et une activité dont on ne sait rien, et dont il est impossible aujourd'hui de mesurer l'importance.

## Un outil de manipulation de la concurrence

« Un des messages clés issus de nos recherches, indique Patrick Waelbroeck, c'est que ces *data brokers*, géants du numérique en particulier, ne font pas que collecter des données et les revendre ou les échanger. Ils s'en servent pour moduler la concurrence sur les marchés. » Ils ont la capacité d'identifier très finement un potentiel de marché pour une entreprise ou un produit n'importe où dans le monde ce qui leur donne un moyen de pression extraordinaire.

« Prenons le cas d'un petit acteur qui dispose d'un monopole sur un marché en Chine, imagine ainsi l'économiste. Un *data broker* qui dispose d'une analyse de données indiquant un intérêt du segment de marché de cette entreprise pour un produit Microsoft ou Oracle, par exemple, a le pouvoir de bouleverser cet espace concurrentiel. Pour des raisons variées — intérêt d'un de ses clients, déstabilisation d'un concurrent... — il peut vendre ses informations à un des grands éditeurs pour le favoriser ou, au contraire, décider de soutenir l'entreprise chinoise. » Illustration concrète de ce pouvoir : en 2018, le parlement britannique a révélé des e-mails

internes à Facebook. Les échanges laissent penser que l'entreprise californienne aurait partagé de façon privilégiée certaines données de marché avec des applications tierces comme Netflix, et en aurait limité l'accès à de petites comme Vine. « En économie, cela s'appelle un effet de débordement sur d'autres marchés, explique Patrick Waelbroeck. En vendant plus ou moins de données à des concurrents sur un marché, les *data brokers* peuvent rendre celui-ci plus ou moins concurrentiel et choisir d'avantager ou de désavantager tel ou tel acteur. »

**Certains *Data brokers* disposent de plus de 3 000 catégories de données sur chaque américain : noms, adresses, professions, situations familiales, intentions d'achat, projets de mariage...**

Sur un marché classique, le jeu de l'offre et de la demande induirait une forme d'autorégulation naturelle. Le consommateur, en choisissant une marque plutôt qu'une autre, exercerait un contrepouvoir. Les internautes pourraient faire de même. Mais la mécanique des marchés du numérique est si difficile à appréhender que les utilisateurs ne le font



N



pas. Si très régulièrement, des usagers quittent ainsi Facebook pour qu'il ne porte plus atteinte à leur vie privée, il est peu probable qu'ils en fassent autant parce que le réseau social fausse le jeu de la concurrence en vendant leurs données.

## **Imaginer une neutralité des data ?**

« Un des messages importants de notre chaire, c'est le constat de méconnaissance totale de l'influence des *data brokers*, poursuit Patrick Waelbroeck. Personne ne réfléchit encore à cette question de manipulation des jeux de concurrence par les *data brokers*. Pas même les régulateurs. Pourtant, pour contrer ce phénomène, il serait possible de s'inspirer de dispositifs existants. » La neutralité du Net, par exemple, qui permet en théorie à tous d'avoir le même accès à tous les services en ligne, pourrait inspirer une neutralité de la donnée. Elle empêcherait que certains *data brokers* ou acteurs du numérique décident de fournir leurs analyses de données de façon privilégiée à certaines entreprises plutôt qu'à d'autres.

**Les data brokers  
peuvent rendre  
un marché plus  
ou moins concurrentiel.**

Autre source d'inspiration pour la régulation, le marché des ressources naturelles. Certaines d'entre elles sont considérées comme des biens communs. Si un nombre limité de personnes seulement ont accès à une ressource naturelle, le jeu de la concurrence est faussé et un refus de transaction commerciale peut être sanctionné. Il existe enfin un dispositif équivalent dans le droit de la propriété intellectuelle qui pourrait s'appliquer aux données. Certains brevets, indispensables à l'exploitation d'un standard, sont considérés comme des matières premières et protégés. Les entreprises qui détiennent ces « brevets essentiels » sont contraintes par la réglementation d'octroyer une licence d'usage à tous ceux qui le souhaitent, à un tarif raisonnable et non discriminatoire.

## **Regarder les fusions-acquisitions du numérique à l'aune de la valeur des données**

En attendant la régulation, la méconnaissance du phénomène des *data brokers* par les autorités de la concurrence entraîne des dommages collatéraux particulièrement dangereux. Inconscientes de la réelle valeur de certaines fusions-acquisitions, comme celles entre Google et DoubleClick, WhatsApp et Facebook, ou Microsoft et LinkedIn, les autorités de la concurrence appliquent une analyse classique de marché.



Elles considèrent que les deux entreprises appartiennent à des marchés différents : la messagerie instantanée pour WhatsApp et le réseau social pour Facebook, par exemple, et en concluent en général qu'elles n'auraient pas plus de pouvoir de marché en joignant leurs forces que chacune isolément. « C'est totalement faux ! s'insurge Patrick Waelbroeck. Elles sont bel et bien sur le même secteur : celui de l'intermédiation de la donnée. Après leur rapprochement, tous ces duos ont d'ailleurs fusionné leurs bases de données d'utilisateurs et augmenté leur fréquentation. »

« Il faut regarder le numérique avec de nouvelles lunettes, conclut le chercheur. Il est indispensable que tous, économistes, régulateurs, politiques, citoyens, comprennent cette nouvelle économie de la donnée, et son pouvoir considérable sur les marchés et la concurrence. D'autant qu'à terme, toutes les entreprises seront des *data brokers*. Y compris les plus traditionnelles d'entre elles. Et celles qui n'y parviendront pas pourraient bien disparaître. »

**Personne ne réfléchit  
à cette question  
de manipulation  
des jeux  
de concurrence,  
pas même les régulateurs.**

02.

---



# Matière & matériaux

---

## ▶ 28

Le sable  
une ressource rare  
qu'il faut remplacer

## ▶ 36

KM<sub>3</sub>Net sonde  
les abysses en quête  
des insaisissables  
neutrinos

## ▶ 42

Le difficile recyclage  
des composites  
à fibre de carbone

# Le sable, une ressource rare qu'il faut remplacer

L'humanité est une grande consommatrice de sable, à tel point que cette ressource devenue précieuse est en voie de disparition. Très convoité, il est extrait dans des conditions parfois peu respectueuses de l'environnement. Face à cette raréfaction du sable, et aux conséquences parfois lourdes de son prélèvement sur nos plages, il devient crucial de trouver des alternatives. Isabelle Cojan et Nor-Edine Abriak, respectivement chercheurs en géosciences et géomatériaux à Mines ParisTech et IMT Lille Douai, nous détaillent les enjeux autour de cette ressource.

« Après l'air et l'eau, le sable vient en troisième position des ressources indispensables à l'être humain »,

**n**ous fait prendre conscience Isabelle Cojan, chercheuse en géosciences à Mines ParisTech. Bien sûr, l'utilisation du sable est indirecte pour la plupart d'entre nous, puisque l'essentiel de cette ressource est consommée par l'industrie du BTP. 15 à 20 milliards de tonnes de sable permettent ainsi chaque année de construire des bâtiments ou des routes dans le monde entier, et sont utilisés pour la poldérisation. En comparaison, la part des autres utilisations — micro-informatique, verre, lessive, produits cosmétiques, etc. — se situe autour de 0,2 milliard de tonnes. Ramenée à l'échelle individuelle, la consommation mondiale de sable est de 18 kilogrammes par personne et par jour.

À première vue, cette énorme quantité de sable dont l'humanité a besoin pourrait être facilement fournie par notre planète. Un quart de la surface des continents est recouverte d'immenses déserts qui sont occupés sur près de 20 % de leur surface par des champs de dunes. Le problème, c'est que ces sables éoliens sont inutilisables pour le BTP ou la poldérisation : « Les grains des déserts sont trop lisses, trop fins, et ne peuvent pas se lier avec les ciments pour fabriquer des bétons » souligne Isabelle Cojan. Pour d'autres raisons, notamment économiques, les sables marins ne peuvent

être exploités qu'à de faibles profondeurs, comme c'est le cas actuellement en mer du Nord. Le volume de sable disponible sur Terre devient nettement plus faible une fois ces zones écartées.

**Ramenée à l'échelle individuelle, la consommation mondiale de sable est de 18 kilogrammes par personne et par jour.**

Dès lors, où donc trouver ces précieux sédiments ? Les sables riches en silice, comme ceux présents sous la forêt de Fontainebleau, sont réservés à la production de verre et de silicium. D'autre part l'exploitation de dépôts fossiles est limitée par l'anthropisation de certaines régions qui rend difficile l'ouverture de carrières. Pour le BTP, il faut se tourner vers les sables des cours d'eau, et les dépôts côtiers nourris en partie par les apports des rivières. Les grains des alluvions et des plages sont suffisamment anguleux pour s'accrocher aux ciments. Si les quantités de sable sur les plages paraissent colossales pour l'œil humain, elles ne sont en réalité pas si grandes. En effet, l'essentiel des sédiments présents dans les plaines alluviales de nos rivières et sur nos littoraux sont hérités de l'érosion massive produite lors des ères glaciaires du quaternaire. Aujourd'hui, avec

les aménagements le long des cours d'eau associés à une érosion plus faible, Isabelle Cojan rappelle que

« nous consommons deux fois plus de sable que ce que les rivières apportent au domaine littoral ».

Les barrages ne font pas que retenir l'eau, ils empêchent aussi les sédiments de descendre en aval. La chercheuse de Mines ParisTech prend pour exemple le cours d'eau de la Durance, un affluent du Rhône qu'elle a étudié : « Avant son aménagement, il délivrait 3 millions de tonnes de sédiments dans la Méditerranée par an. Aujourd'hui, cette quantité est comprise entre 0,1 et 0,5 million de tonnes ». La majeure partie des sédiments fournis par l'érosion du bassin versant se retrouve piégée par les infrastructures, et se dépose au fond des retenues d'eau artificielles.



## La ruée vers le sable, et son impact environnemental

Conséquence d'un relargage plus faible de sédiments dans les mers et les océans, certaines plages s'amenuisent naturellement, et encore plus là où l'industrie extractive prélève le sable des littoraux. Des pays se retrouvent ainsi dans une situation critique, où des plages entières disparaissent. C'est le cas du Togo par exemple, et de plusieurs pays d'Afrique où le sable est prélevé sans trop de contraintes législatives.

« Les Comores tirent énormément de revenus du tourisme, et prélèvent toujours plus de sable sur les plages pour soutenir leur développement économique car il n'y a pas de réserve de sable conséquente ailleurs dans les îles »

illustre Isabelle Cojan. Les grands volumes

extraits entraînent une érosion côtière et un recul des terres sur la mer. La situation est similaire dans d'autres régions du monde.

« Singapour a augmenté sa surface de façon notable en aménageant des polders sur la mer »

poursuit la chercheuse. « À côté, des îles à fleur d'eau qui permettent des approvisionnements faciles en sable ont disparu avant que la réglementation des pays concernés n'interdise ces prélèvements. »

En Europe, les pratiques sont plus contrôlées. En France notamment, l'extraction dans les lits des cours d'eau — héritage de pratiques millénaires — a eu cours jusque dans les années 1970. L'exploitation peu régulée des alluvions a alors entraîné des modifications du profil des rivières qui ont conduit à l'affouillement d'ancrages de ponts se retrouvant alors fragilisés, jusqu'à parfois même s'effondrer. Le prélèvement dans les cours d'eau est depuis interdit, et seuls les alluvions des plaines alluviales qui n'impactent pas directement les lits des rivières sont ouverts à l'extraction. Du côté du littoral, l'exploitation est régie par le Code de l'environnement et le Code minier, qui interdisent tout prélèvement risquant de compromettre directement ou indirectement l'intégrité d'une plage.

Cependant, malgré cette législation, les conséquences néfastes indirectes sont difficiles à prévenir. L'impact de l'extraction de sable à moyen terme est complexe à modéliser pour les chercheurs. « En domaine

côtier il faut tenir compte d'un ensemble de processus complexes liés aux marées, aux tempêtes, à la dérive littorale, au couvert végétal, aux aménagements touristiques, portuaires... » liste Isabelle Cojan. Dans certains cas, des prélèvements raisonnables n'induiront aucun risque. Dans d'autres situations, une légère modification du profil de la plage pourra avoir des conséquences dramatiques.

« Cela peut entraîner un recul significatif du trait de côte lors des tempêtes, et un ennoïement de l'arrière-pays par les eaux marines, notamment lors des tempêtes d'équinoxe »

poursuit la chercheuse. Sur les côtes en érosion naturelle, avec des arrière-pays au faible relief, l'extraction de sable peut à terme entraîner une dynamique irréversible de déstabilisation de la côte. Les implications d'une disparition de plage ne sont pas qu'esthétiques. La plage et les dunes qui très souvent les bordent constituent une barrière sédimentaire naturelle face à l'assaut des vagues. Elles sont la première et la plus importante protection contre

**Les grands volumes  
extraits entraînent  
une érosion côtière  
et un recul des terres  
sur la mer.**

l'érosion. Les plages limitent par exemple le recul des falaises de craie. Sur les littoraux aux faibles reliefs, les systèmes plage-dunes forment un rempart contre l'entrée de la mer dans les terres. La salinisation des champs qui peut se produire lorsque l'eau crée une brèche dans la barrière sédimentaire naturelle entraîne un changement drastique des conditions de culture, et peut ruiner des terres arables.

## Des alternatives au sable ?

Face à une raréfaction de la ressource, de nouvelles pistes sont explorées pour trouver une alternative au sable. Le recyclage des bétons, du verre ou des déchets de la métallurgie peut permettre de remplacer les sédiments dans la constitution des bétons. Cependant, les matériaux de construction ainsi générés se heurtent à des problèmes de performance : « Ils vieillissent très vite, et peuvent relarguer des polluants au fil du temps » pointe Isabelle Cojan. Autre limite, ces voies de remplacement ne sont actuellement pas suffisantes en volume. La France produit annuellement 370 millions de tonnes de sable. En contrepartie, le recyclage ne représente que 20 millions de tonnes.

Des efforts importants de structuration d'une filière de recyclage dédiée seraient nécessaires, avec tous les débats économiques et politiques, aux échelles nationales et locales, que cela implique. Dans la mesure

**Des travaux pionniers en géomatériaux ont démontré qu'il était possible d'exploiter le sable de dragage.**

où les industriels souhaitent des produits performants, cela ne pourrait se faire avant que la recherche n'ait trouvé un moyen de limiter le vieillissement et la pollution des matériaux issus de matière recyclée. Si le recyclage ne doit pas être écarté, il est cependant clair qu'il ne représente une solution que sur une échelle de temps relativement longue.

À plus court terme, l'alternative pourrait venir d'autres gisements de sable, considérés aujourd'hui comme des déchets. À IMT Lille Douai, Nor-Edine Abriak a démontré par des travaux pionniers en géomatériaux qu'il était possible d'exploiter le sable de dragage. Ces sédiments proviennent du fond des fleuves et des rivières, et sont extraits pour l'aménagement des cours d'eau. Le dragage étant principalement pratiqué pour permettre la navigation, de grandes quantités de sable sont extraites chaque année des ports et des embouchures de fleuves. « Lorsque j'ai commencé mes recherches sur le sujet il y a quelques années, le port de Dunkerque était très encombré par les sédiments » se souvient le chercheur. Il s'est donc associé avec les autorités locales en montant une chaire





de recherche baptisée Ecosed afin de trouver une façon de valoriser ce sable.

Pour le BTP, les sédiments de dragage ont un inconvénient majeur : ils sont riches en particules argileuses. « Pour les bétonniers, l'argile est un cauchemar » avertit Nor-Edine Abriak.

« Ces particules peuvent gonfler, ce qui retarde la prise du ciment dans le béton et peut diminuer les performances du matériau final. »

Il est d'usage d'utiliser un tamis pour séparer les argiles, ce qui demande du matériel, une logistique spécifique, et donc des coûts supplémentaires. Pour cette raison, ces sédiments sont boudés par les industriels.

« Le seul moyen d'être compétitif avec ces sédiments, c'est d'arriver à les utiliser tels quels, sans étape de séparation »

confie le porteur de la chaire Ecosed. Les recherches menées à IMT Lille Douai ont permis d'aboutir à un traitement léger et rapide à la chaux capable de s'affranchir du passage au tamis. Ce traitement décompose également la matière organique présente dans les sédiments et améliore la prise du ciment, ce qui permet d'utiliser rapidement les sables extraits du fond du port de Dunkerque.

## Pour les bétonniers, l'argile est un cauchemar.

La chaire Ecosed a également permis de s'affranchir d'un autre problème, celui de la salinité de ces sables peu profonds au contact de l'eau de mer. Le sel corrode les matériaux, et diminue donc la durée de vie des bétons. Pour le supprimer, les chercheurs ont eu recours à un simple lavage à l'eau. « Nous avons montré qu'il suffisait d'entreposer le sable de dragage dans des grandes lagunes, et de laisser la pluie drainer le sel » explique Nor-Edine Abriak. Une solution simple, dès lors qu'il y a suffisamment de place à proximité pour aménager les lagunes, ce qui est le cas dans les environs de Dunkerque.

Avec ces résultats, l'équipe de scientifiques a démontré que les sédiments de dragage pouvaient être utilisés comme alternative à celui prélevé sur les plages, plutôt que d'être considéré comme un déchet après son extraction du fond des ports. « Nous avons été les premiers au monde à prouver cette faisabilité » mentionne fièrement Nor-Edine Abriak. Cette solution n'est pas un remplacement total, car les sédiments de dragage ont des propriétés mécaniques différentes qu'il faut prendre en compte pour ne pas altérer la durabilité des matériaux. Les premiers passages à l'échelle ont montré que les sables de dragage pouvaient être utilisés jusqu'à 70 % dans la composition des matériaux pour les routes et 12 % pour

ceux des bâtiments, sans perte de qualité du matériau final.

Parce que toutes les zones portuaires ou presque doivent effectuer des dragages, ces recherches représentent une grosse opportunité de réduire l'extraction de sables des plages et des alluvions. Début mars, l'équipe d'Ecosed s'est rendue au Maroc pour lancer une seconde chaire sur la valorisation des déchets et en particulier les sables de dragage :

« La situation qu'il y avait à Dunkerque se retrouve à Tanger et à Agadir »

précise le chercheur, illustrant la globalité de la problématique. En France, la chaire Ecosed devient en juin 2019 Ecosed Digital 4.0. Elle passe de 2 millions d'euros de budget à 24 millions, avec pour ambition de structurer une filière spécifique à la valorisation des sédiments de dragage en France.

Si ces travaux ne résoudront pas à eux seuls ce problème de la raréfaction du sable, ils permettent tout de même de créer une dynamique de réduction de l'extraction du sable dans les zones où son prélèvement est sensible. Reste à faire en sorte que ce genre d'initiative passe à l'échelle, à la fois au niveau national, et international.

# KM3NeT sonde les abysses en quête des insaisissables neutrinos

Rien qu'en provenance du soleil, ils sont plus de 64 milliards, par seconde et par  $\text{cm}^2$ , à traverser la Terre de part en part. Les neutrinos, ces particules élémentaires de la matière, sont partout mais presque insaisissables. « Presque » : l'infrastructure européenne KM3NeT, en cours d'installation dans les abysses méditerranéennes, est conçue pour détecter la très faible lumière générée par les interactions des neutrinos dans l'eau. Retour avec le chercheur Richard Dallier d'IMT Atlantique sur la quête des neutrinos, un défi technique et scientifique majeur.

Les « petits neutres » sont parmi les particules les plus mystérieuses de l'Univers. « Les neutrinos ont une charge électrique nulle, une masse très faible et se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. Ils sont difficiles à étudier car extrêmement compliqués à détecter », explique Richard Dallier, membre de l'équipe KM3NeT du groupe Neutrino au laboratoire Subatech<sup>1</sup>.

« Ils interagissent si peu avec la matière que seule une de ces particules sur 100 milliards rencontre un atome ! ».

Si leur existence est postulée dès les années 1930 par le physicien Wolfgang Pauli, elle n'est confirmée expérimentalement qu'en 1956 par les physiciens américains Frederick Reines et Clyde Cowan – prix Nobel de physique en 1995 pour cette découverte. Et c'est une petite révolution pour la physique des particules. De fait, « cela pourrait justifier l'excédent de matière qui nous a permis d'exister. Le Big bang a créé autant de matière que d'antimatière, mais très rapidement les deux se sont annihilées mutuellement. Il ne devrait donc plus rien en rester ! Nous espérons que l'étude des neutrinos nous aidera à comprendre ce déséquilibre » raconte Richard Dallier.

## L'épopée des neutrinos

Si ces grands timides n'ont pas fini de livrer leurs mystères, on sait aujourd'hui que le neutrino existe sous trois formes, ou « saveurs » : les neutrinos de type électronique, ceux de type muonique et, enfin, les neutrinos tauiques. Une particule bien particulière car le neutrino est capable de se métamorphoser au cours de son voyage. Ce phénomène est appelé oscillation : « Le neutrino, qui peut être généré par différentes sources, comme le Soleil, les centrales nucléaires ou encore les rayons cosmiques, naît sous un certain type, il prend une forme hybride des trois saveurs en voyageant puis peut apparaître dans une saveur différente lorsqu'il est détecté » indique Richard Dallier.

L'oscillation des neutrinos a été mise en évidence la première fois en 1998 par l'expérience Super-Kamiokande, un observatoire de neutrinos japonais, et a été, là encore, récompensée par le prix Nobel de physique en 2015. Ce changement d'identité est fondamental : il apporte la preuve, indirecte, que les neutrinos ont bien une masse, même si elle est extrêmement faible. Cependant, une autre énigme demeure : quelle est la hiérarchie des masses entre les 3 saveurs ? Y répondre permettrait d'affiner davantage notre vision du modèle standard de la physique des particules.

<sup>1</sup> Subatech est une unité mixte de recherche IMT Atlantique/CNRS/Université de Nantes.

La singularité des neutrinos en fait un objet d'étude fascinant. Les observatoires et détecteurs dédiés sont de plus en plus nombreux à être installés dans les grandes profondeurs, où la conjonction entre l'obscurité et la concentration de matière est idéale. La Russie a ainsi installé un détecteur au fond du lac Baïkal, et les États-Unis

**KM3Net est le plus grand détecteur au monde.**

un autre au pôle Sud. L'Europe s'attaque quant à elle aux abysses de la mer Méditerranée. Cette étrange pêche aux neutrinos a débuté avec l'expérience Antares en 2008, un télescope d'un genre particulier qui capte la moindre lumière traversant les grands fonds. Antares a laissé place à KM3NeT, avec une sensibilité améliorée d'un ordre de grandeur. Cette expérience rassemble près de 250 chercheurs appartenant à environ 50 laboratoires et instituts, dont quatre laboratoires français. La collaboration vise, outre l'étude des propriétés fondamentales des neutrinos, la découverte et l'étude des sources astrophysiques de neutrinos cosmiques.

## Des yeux braqués sur l'univers

KM3NeT englobe en fait deux télescopes à neutrinos gigantesques en cours d'installation sur les fonds de la mer Méditerranée. Le premier est situé au large de Toulon, et s'appelle ORCA (*Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*). Immergé à près de 2500 mètres de profondeur, il sera composé à terme de 115 lignes accrochées au fond marin. « Sur chacune de ces lignes flexibles, hautes de 200 mètres et espacées de 20 mètres, sont placés des détecteurs optiques :

18 sphères d'une cinquantaine de centimètres tous les 9 mètres, contenant chacune 31 capteurs de lumière »

détaille Richard Dallier, qui participe à la construction et à l'installation de ces modules « Cette densité de détecteurs est inédite et nécessaire pour étudier les propriétés des neutrinos eux-mêmes : leur nature, leurs oscillations et donc leur masses et le classement de celles-ci... Les sources de neutrinos qui intéressent ORCA sont le Soleil et l'atmosphère terrestre, où ils sont créés en très grand nombre par les rayons cosmiques qui bombardent la Terre ».

Le second télescope de KM3Net est ARCA (*Astroparticles Research with Cosmics in the Abyss*). Il sera situé à 3500 mètres de profondeur en Sicile, avec des espacements plus larges entre les lignes



(90 mètres) qui seront aussi plus longues (700 mètres) et deux fois plus nombreuses, mais avec autant de capteurs. Occupant un volume de plus d'un km<sup>3</sup> — d'où le nom de l'instrument KM3Net pour km<sup>3</sup> Neutrino Telescope — ARCA sera dédié à la recherche et l'observation des sources astrophysiques de neutrinos, beaucoup plus rares. Au total, ce sont plus de 6 000 modules optiques rassemblant en tout 200 000 capteurs de lumière qui seront installés d'ici 2022. Ces nombres font de KM3Net le plus grand détecteur au monde, à égalité avec son cousin IceCube en Antarctique.

**Les neutrinos**  
**permettent d'observer**  
**les collisions de trous noirs**  
**et d'étoiles à neutrons,**  
**les supernovae,**  
**ou les effondrements**  
**d'astres massifs.**

Que ce soit pour ORCA ou ARCA, le principe de fonctionnement est le même. La détection des neutrinos reste indirecte. Lorsqu'un neutrino rencontre un atome de matière, comme un atome de l'air, de l'eau ou, puisqu'ils la traversent allègrement, de la Terre elle-même, il peut y « déposer » son énergie. Instantanément, cette énergie va se transformer en l'une des trois particules liées à la saveur du neutrino : un électron, un muon

ou un tau. Cette particule « fille » continue son voyage, sur la même trajectoire que le neutrino initial et à la même vitesse, en émettant de la lumière dans le milieu qu'elle traverse, ou en interagissant elle-aussi avec les atomes du milieu et en se désintégrant en d'autres particules, qui vont également rayonner en une lumière bleue.

« Tout ceci se passant à la vitesse de la lumière, c'est une impulsion lumineuse extrêmement brève de quelques nanosecondes qui va se produire. Si le milieu traversé est transparent — c'est le cas de l'eau méditerranéenne — et que la trajectoire croise le volume occupé par ORCA ou ARCA, les capteurs de lumière vont détecter ce flash très ténu » explique Richard Dallier. Ainsi, avec plusieurs capteurs touchés, on peut reconstituer dans toutes les directions du ciel la trajectoire, l'énergie et la nature du neutrino original. Mais quelle que soit sa source, la probabilité d'interaction du neutrino reste extrêmement faible : avec 1 km<sup>3</sup>, ARCA ne s'attend à détecter que quelques neutrinos par an en provenance de l'univers.



## Les neutrinos, nouveaux messagers de l'univers violent

Considérés comme des messagers cosmiques, ces particules fantômes ouvrent une fenêtre sur l'univers violent. « L'étude des neutrinos permettra, entre autres, de mieux comprendre et connaître les cataclysmes de l'univers » souligne Richard Dallier. Les collisions de trous noirs et d'étoiles à neutrons, les supernovæ, ou encore les effondrements d'astres massifs provoquent en effet des bouffées de neutrinos qui nous bombardent sans que ceux-ci ne soient absorbés ou déviés durant leur trajet. La lumière n'est donc plus le seul messager des objets de l'univers.

Les neutrinos viennent donc renforcer l'arsenal de l'astronomie dite « multi-messager » où coopèrent un maximum d'observatoires et d'instruments à travers le monde. Chaque longueur d'onde et chaque

particule permettent d'étudier des processus différents ou des aspects complémentaires d'objets et phénomènes astrophysiques. « Plus il y a d'observateurs et d'objets observés, plus il y a des chances de trouver quelque chose » résume Richard Dallier. Et, à travers ces particules extraterrestres, la possibilité de retracer, de plus en plus finement, nos origines.

# Le difficile recyclage des composites à fibres de carbone

---

Les matériaux composites à fibres de carbone sont de plus en plus répandus, et leur utilisation continue de croître chaque année. Leur recyclage reste encore délicat, mais s'avère pourtant nécessaire, à la fois pour des raisons environnementales, économiques et législatives au niveau européen. À IMT Mines Albi, les chercheurs travaillent sur une nouvelle méthode : la vapo-thermolyse. Si le procédé offre des résultats prometteurs, il reste cependant de nombreuses étapes à franchir avant de pouvoir structurer une filière de recyclage.

**N**ouveaux fers de lance des géants de l'aéronautique Airbus et Boeing, l'A350 et le 787 Dreamliner sont également des emblèmes de la prépondérance croissante des matériaux composites dans notre environnement. Les avions, mais également les éoliennes, les voitures ou les matériels de sport en contiennent de plus en plus. Les composites à fibre de carbone représentent encore une minorité des composites sur le marché — loin derrière ceux à fibre de verre — mais sont en croissance de 10 à 15 % par an. Dès lors, la question à laquelle doivent répondre les industriels est : que deviendront ces matériaux une fois la vie de leurs produits achevée ? Dans une société où la considération pour l'impact environnemental n'est plus une option, impossible de faire l'impasse sur la question du recyclage.

À IMT Mines Albi, les travaux scientifiques de Yannick Soudais<sup>1</sup> et Gérard Bernhart<sup>2</sup> sont au cœur de cette problématique. Chercheurs en chimie des polymères et matériaux, ils développent un nouveau procédé de recyclage des composites à fibre de carbone. La tâche n'est pas une mince affaire, car il s'agit de séparer la fibre présente sous la forme d'un tissu ou de filaments unidirectionnels, de la résine polymère solide qui constitue la matrice dans laquelle elle est plongée. Deux grands procédés existent actuellement pour essayer de séparer la fibre de la résine, la pyrolyse et la solvolysse. Le premier consiste à brûler la matrice

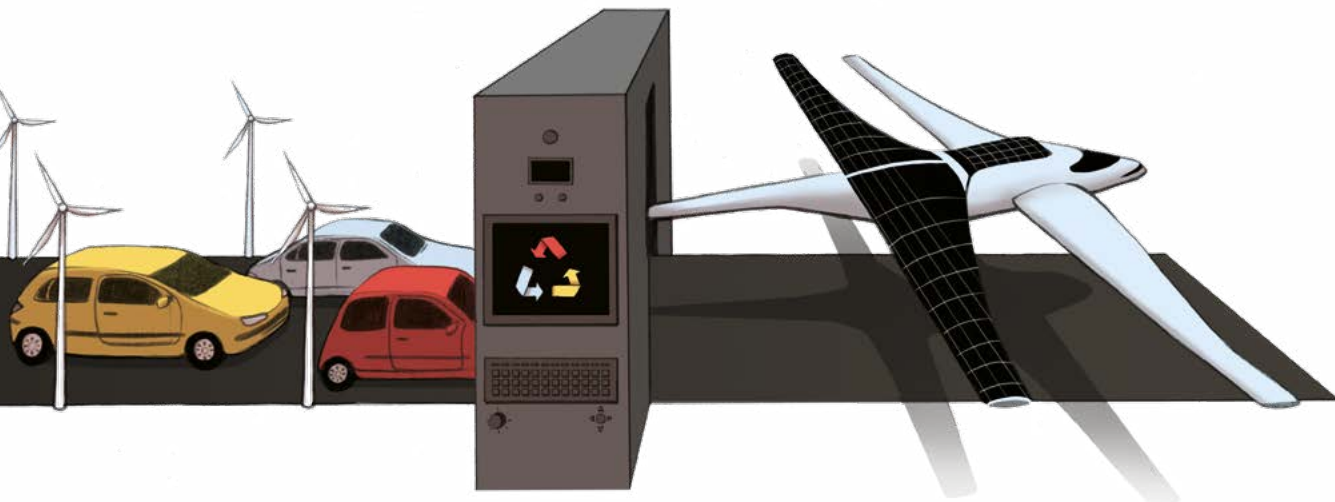
## **La vapo-thermolyse est le procédé le plus prometteur au monde pour le recyclage des fibres de carbone.**

dans une atmosphère inerte d'azote, afin d'éviter la combustion d'une partie de la fibre. Le second est une voie chimique basée sur des solvants, très « lourd », car il repose sur des hautes températures et des fortes pressions.

Le procédé des chercheurs albigeois, appelé « vapo-thermolyse » combine ces deux procédés. Il est l'un des plus prometteurs au monde actuellement pour aller vers une réutilisation à grande échelle des fibres de carbone. Avec Albi, seuls quelques autres centres de recherche dans le monde travaillent dessus (au Japon, en Chine et en Corée du Sud essentiellement). « Nous utilisons de la vapeur d'eau surchauffée qui agit comme un solvant et induit des réactions chimiques de dégradation » synthétise Yannick Soudais. À la différence de la pyrolyse, pas besoin d'azote. Et comparé à la voie chimique classique, le procédé se déroule à pression atmosphérique. En somme : la vapo-thermolyse est plus facile à mettre en place et à maîtriser industriellement.

<sup>1</sup> Yannick Soudais est chercheur au laboratoire Rapsodee, unité mixte de recherche IMT Mines Albi/CNRS.

<sup>2</sup> Gérard Bernhart est chercheur à l'Institut Clément Ader, unité mixte de recherche IMT Mines Albi/ISAE/INSA Toulouse/Université Toulouse III - Paul Sabatier/CNRS.



## Après la récupération, la réutilisation

La manière la plus simple de réutiliser les fibres de carbone consiste à étaler cet amas de fibres qui s'interpénètrent sur un plan et de le réutiliser tel quel comme une moquette. Elles serviront alors à faire des composites pour des pièces d'habillement plutôt que pour des pièces de structure. La taille des fibres récupérées peut également être diminuée encore pour être utilisées comme renforts de granulés en polymères. Cette approche permet par exemple de réaliser des pièces automobiles par injection. De telles démonstrations de réutilisation ont été effectuées par les chercheurs en collaboration avec la société Alpha Recycling Composites (ARC) basée à Toulouse.

Toutefois, le véritable enjeu reste de pouvoir réutiliser ces fibres pour des utilisations de plus haute performance. Pour cela, « il faudrait arriver à faire des fibres filées à partir des fibres courtes » résume Gérard Bernhart. « C'est une grosse action de recherche que nous poursuivons en partenariat

avec ARC car personne au monde n'y arrive encore. » Ces pistes mettent en jeu des techniques propres à l'industrie textile, d'où un partenariat des chercheurs avec l'Institut français du textile et de l'habillement (IFTH). Pour l'instant, les réflexions sont encore prospectives et consistent à déterminer des technologies qui pourraient être utilisées pour concevoir des procédés de remise en forme. Une des idées serait par exemple d'utiliser des rouleaux crantés pour constituer des pelotes homogènes, puis une carte pour créer un voile uniforme, suivi d'une étape d'étirage et de filature.

**Le véritable enjeu**  
**reste de pouvoir**  
**réutiliser ces fibres**  
**pour des utilisations**  
**de plus haute**  
**performance.**

Pour les fabricants de pièces composites, ces perspectives ouvrent la voie à des matériaux économiquement plus compétitifs. Certes, le recyclage est un enjeu environnemental, et à ce titre certaines régulations imposent des comportements aux industriels. C'est le cas par exemple des constructeurs automobiles qui, quelles que soient les pièces utilisées dans leurs voitures, doivent assurer

**Pour les fabricants  
de pièces composites,  
ces perspectives  
ouvrent la voie  
à des matériaux  
économiquement  
plus compétitifs.**

que 85 % de la masse des véhicules hors d'usage soient recyclés. Mais des procédés de recyclages matures et efficaces permettraient également de réduire les coûts de fabrication des pièces en composites à fibre de carbone.

La fibre elle-même, neuve, coûte 25 € le kilo, voire 80 € le kilo pour les fibres destinées aux matériaux à haute performance. « Le prix s'explique principalement par les coûts de matière et d'énergie que la fabrication des fibres représente » pointe Gérard Bernhart. Des fibres recyclées conduiraient donc à de nouvelles opportunités industrielles. Loin d'être décorrélée de la perspective environnementale, cette dimension économique pourrait au contraire être un moteur de la structuration d'une filière performante de recyclage des fibres de carbone.

03.

---



# Énergie & environnement

---

## ▶ 48

Fukushima : 8 ans après, qu'est-ce qui a changé en France ?

## ▶ 56

Quand les plantes nous aident à lutter contre la pollution

## ▶ 62

La pollution pétrolière en mer s'observe depuis l'espace



# Fukushima : 8 ans après, qu'est-ce qui a changé en France ?

---

Fukushima constitue l'accident nucléaire le plus important depuis Tchernobyl. Si la catastrophe ukrainienne de 1986 avait abouti à des changements radicaux en matière de gouvernance nucléaire à l'échelle internationale, qu'en est-il de l'accident japonais ? C'est la question posée par le projet AGORAS. Il associe IMT Atlantique, l'IRSN, Mines ParisTech, Orano et SciencesPo pour comprendre les conséquences de Fukushima sur la filière nucléaire française. Stéphanie Tillement, sociologue à IMT Atlantique, nous présente les résultats du projet AGORAS qui se clôture après 6 ans de recherches.



## Pourquoi s'interroger sur les conséquences en France d'un incident nucléaire au Japon ?

**Stéphanie Tillement :** Fukushima n'a pas été un choc que pour les japonais. En Europe, en Amérique du Nord, en Russie... l'évènement a eu un écho dans toutes les régions où le nucléaire occupe une part importante de la production d'énergie bien sûr, mais dans des pays moins nucléarisés également. Fukushima a questionné la sécurité, la sûreté, la fiabilité des centrales. Les acteurs nucléaires, les contre-experts, les associations,

les politiques se sont tous sentis concernés. Compte tenu de l'implication forte de ces différents acteurs, nous pouvions nous attendre à ce que Fukushima ait des conséquences sur la gouvernance du nucléaire. Une autre raison est historique : les accidents de Tchernobyl et de Three Mile Island ont eu un impact sur l'organisation de cette filière. Fukushima pouvait donc s'inscrire dans cette lignée.

## Quelles ont été les conséquences de Tchernobyl et de Three Mile Island sur la filière justement ?

**ST :**

Les conséquences de ces catastrophes se ressentent généralement 10 à 20 ans après l'évènement lui-même.

En France, Tchernobyl a contribué à modifier profondément le système de gouvernance des risques nucléaires, avec en 2006 la loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Cette loi a notamment conduit à la création de l'autorité de sûreté nucléaire — l'ASN. Quelques années plus tôt, l'institut de radioprotection et de sûreté

nucléaire — l'IRSN — avait été créé. C'est la loi de 2006 qui fixe encore aujourd'hui la gouvernance de la filière nucléaire en France. Pour Three Mile Island, l'incident a conduit les acteurs du nucléaire à s'interroger sur la place de l'homme dans ces systèmes complexes, et notamment sur la notion d'erreur humaine. Cela a entraîné de grands changements sur les interfaces hommes-machines au sein des infrastructures nucléaires, mais aussi sur la compréhension des mécanismes de l'erreur humaine.

## L'accident de Fukushima entraîne-t-il aujourd'hui des changements de même ordre ?

**ST :** Nous ne sommes pas encore 10 ans après la catastrophe, puisqu'elle date de 2011. Cependant, nous voyons déjà que l'impact de Fukushima ne sera très probablement pas le même en France que lors des derniers accidents. Fukushima a été géré et digéré par les acteurs d'une façon qui les a conduits à confirmer le bien-fondé du mode de gouvernance actuel, plutôt qu'à le remettre

en cause en profondeur. Je ne parle pas ici des questions techniques — *qui ont connu des évolutions, en lien notamment avec les évaluations complémentaires de sûreté (ECS)* — mais bien de l'organisation entre les exploitants, l'ASN, et l'IRSN. Les relations entre ces trois entités n'ont pas été réellement déstabilisées par Fukushima.



## Comment expliquer qu'un tel accident ne remette pas profondément en cause le mode de gouvernance français ?

**ST :** Pour les acteurs français, le cas Fukushima a d'abord été décrit comme assez exceptionnel, parce qu'il ne repose pas sur les mêmes modalités de gouvernance. Au Japon, plusieurs exploitants se partagent les centrales nucléaires du pays. L'étude post-accident de la gestion de crise a montré que l'indépendance des acteurs n'était pas assurée, que des relations de collusion existaient entre l'autorité de contrôle, l'État et les exploitants. En France, la loi de transparence et de sécurité en matière nucléaire

encadre très rigoureusement les relations entre acteurs et assure l'indépendance de chacun. C'est d'ailleurs une force du modèle de gouvernance français reconnue au niveau international. En plus de cela, l'exploitation des centrales françaises repose sur un seul exploitant, EDF, qui contrôle 58 tranches identiques. Les problèmes de gouvernance au Japon ont pu conforter les acteurs français dans le sens où ils renforçaient le bien fondé d'encadrer légalement l'indépendance de l'autorité de contrôle.



## Comment les mobilisations anti-nucléaires ont-elles réagi face à ce non-changement ?

**ST:** Nous nous sommes rendu compte lors de nos enquêtes sur le terrain que

Fukushima n'a pas fait émerger des positions ou des acteurs anti-nucléaires totalement nouveaux.

Les oppositions existaient déjà. Cela a certes donné de la matière aux associations,

collectifs et experts anti-nucléaires, mais ça n'a pas radicalement changé leur mode de mobilisation ni leurs arguments. Là aussi, Fukushima n'incarne pas une rupture. Le débat sur la filière nucléaire est globalement structuré de la même façon qu'il l'était avant la catastrophe.

## Sur le plan politique, cela veut-il dire qu'il n'y a pas eu de conséquences post-Fukushima non plus ?

**ST:** Non, et c'est là aussi un des résultats du projet AGORAS. Les décisions politiques récentes en matière de stratégie sur la filière nucléaire reposent principalement sur des dynamiques antérieures à Fukushima. L'abandon du projet ASTRID par exemple n'est pas la conséquence d'un changement politique radical sur le nucléaire. C'est un mélange d'arguments économiques et de volonté politique de ne pas s'engager sur le sujet. Il est clair que les acteurs politiques n'ont pas envie de s'engager sur ces questions, car les décisions prises ont des impacts sur 10, 20 voire 30 ans. Ce n'est pas du tout compatible avec les périodes de mandat.

Le *turn-over* en politique fait en plus que très peu d'acteurs de ce milieu acquièrent une expertise adéquate sur le sujet. Cela questionne de manière générale la capacité de l'État à s'impliquer dans une politique nucléaire, et donc énergétique.



## Le bilan de vos travaux dresse le portrait d'un changement quasiment inexistant sur tous les plans de la gouvernance nucléaire.

**ST :** Le projet AGORAS partait de la question : Fukushima incarne-t-il une rupture dans la gouvernance nucléaire, comme les accidents qui l'ont précédé ? De ce point de vue, la réponse apportée par nos travaux est non, pour toutes les raisons déjà évoquées. Pour autant, il faut relativiser.

Plusieurs choses ont changé, mais pas de manière aussi radicale qu'après Tchernobyl ou Three Mile Island.

Parmi ce qui a été modifié, on peut notamment citer l'adaptation de certaines caractéristiques techniques au sein des infrastructures. Les exigences de l'ASN pour qu'EDF revoie les soudures du réacteur EPR sont en partie justifiées par les évolutions techniques décidées suite à Fukushima. Il y a également eu des changements sur la gestion de crise et la gestion post-accident.

## Quels ont été ces changements sur la manière de gérer une telle catastrophe ?

**ST :** Pour la phase d'urgence, une force d'action rapide du nucléaire (FARN) a été créée en France suite à Fukushima. Les mesures prises ont également été modifiées pour impliquer plus rapidement la sécurité civile et les préfets. L'évolution la plus notable concerne la phase post-accident. Historiquement les efforts de préparation aux accidents se concentraient sur la phase d'urgence. Grâce à cela, les rôles des différents acteurs sont bien définis en phase d'urgence. En revanche,

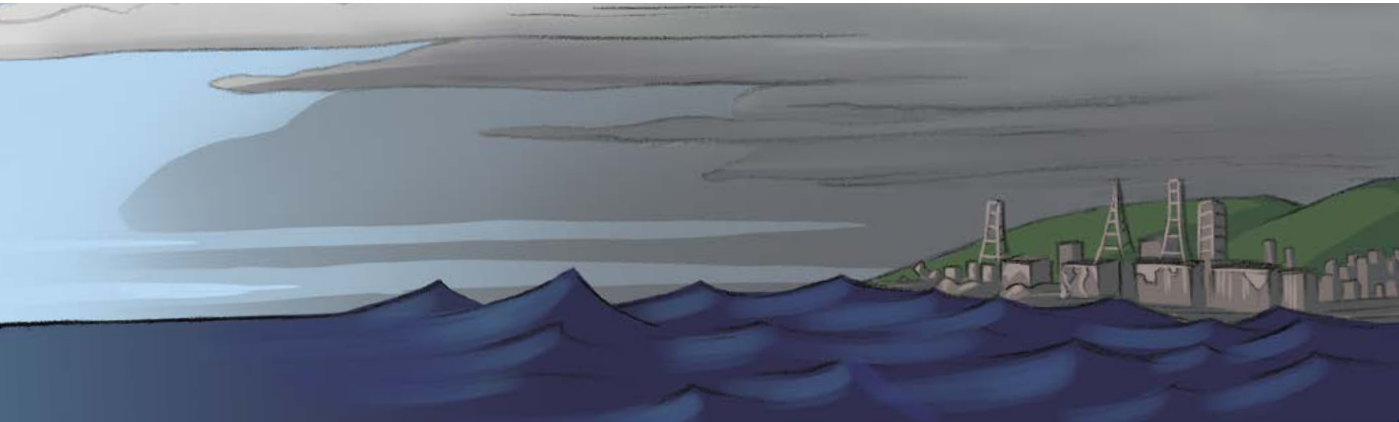
Fukushima a mis en évidence à quel point gérer l'après-crise était également important.

La spécificité de l'accident nucléaire, c'est qu'il a des conséquences sur des temps très longs. Or une fois la crise terminée, l'organisation était moins précise : qui a la responsabilité du contrôle de la consommation alimentaire, de la contamination des sols, de l'urbanisme ? Les commissions locales d'information (CLIS) notamment ont donc beaucoup travaillé sur le post-accident, avec les acteurs nucléaires. Mais encore une fois, nous nous sommes rendu compte dans nos recherches que ces réflexions avaient été lancées avant l'accident de Fukushima. Celui-ci n'a fait qu'accélérer les choses, et montrer l'importance de cette question.

## Cela ne fait pas encore 10 ans que Fukushima a eu lieu. Comptez-vous poursuivre vos travaux pour étudier les conséquences de l'incident à 10 et 20 ans?

**ST :** Nous aimerions poursuivre en effet, notamment pour aborder d'autres questions et approfondir nos résultats. Nous avons fait des enquêtes de terrain avec l'ASN, l'IRSN, les commissions locales d'information, des acteurs politiques, des associations, des industriels comme Framatome ou Orano... Mais l'une des limites de notre travail est notamment de n'avoir pas pu travailler avec EDF, qui est pourtant un acteur majeur de la gouvernance des risques nucléaires.

Nous aimerions pouvoir travailler du côté de l'exploitant des centrales pour étudier l'impact de l'accident sur son fonctionnement. En parallèle, la compréhension du rôle des acteurs politiques pourrait être améliorée également. Il y a un réel enjeu à comprendre le positionnement des décideurs politiques vis-à-vis de la gouvernance nucléaire, et sur les processus de décision en matière de stratégie nucléaire. ▲





# Quand les plantes nous aident à lutter contre la pollution

► Pour dépolluer ou stabiliser une pollution dans les sols ou les eaux, les plantes sont une solution assez efficace et peu coûteuse. Elles nécessitent une mise en œuvre au cas par cas, et pourraient être déployées sur de nombreux sites.



**S**elon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), 300 000 à 400 000 sites industriels ou miniers seraient potentiellement pollués en France, totalisant environ 100 000 hectares, l'équivalent de 140 000 terrains de football. Nombre d'entre eux sont « orphelins », sans propriétaire connu.

Comment les dépolluer ? La solution la plus radicale consiste à enlever la terre polluée et à la stocker dans une décharge adaptée. C'est aussi un des pires choix, car c'est extrêmement coûteux, et surtout peu écologique : il faut quelques milliers d'années pour qu'un sol se constitue ! Cette solution est donc réservée aux cas où on a absolument besoin du terrain, et où le sol pollué représente un risque important pour la santé. Par exemple si l'on veut construire une école. Dans tous les autres cas, une approche plus douce est privilégiée. Les chercheurs de Mines Saint-Étienne développent ainsi des méthodes de dépollution des métaux « lourds » (essentiellement plomb, cadmium, cobalt, nickel, zinc, cuivre, chrome et arsenic) à l'aide de plantes — on parle de phytoremédiation.

Il existe deux grandes techniques pour traiter un sol pollué par phytoremédiation. La phytoextraction consiste à cultiver des espèces de plantes capables d'accumuler de grandes quantités de métaux lourds, et de très bien le supporter. Il suffit alors de faucher périodiquement ces plantes, et d'incinérer ce qui est coupé dans

des incinérateurs spécialisés, pour extraire petit à petit ces métaux. Cependant, cette dépollution est lente, entre 10 et 100 ans pour une décontamination totale.

**Chaque site pollué  
étant unique,  
le choix de la méthode  
de dépollution  
se fait au cas par cas.**

L'autre technique est la phytostabilisation, une démarche adoptée par les chercheurs de Saint-Étienne : plutôt que d'enlever les métaux, faisons en sorte qu'ils ne soient plus dangereux. Il s'agit donc de stabiliser les polluants sur place. « Un polluant est dangereux lorsqu'il se déplace, rappelle Olivier Faure, chercheur à Mines Saint-Étienne. C'est le cas lorsqu'il migre vers une nappe phréatique, lorsque des animaux broutent l'herbe qui contient ce polluant, ou encore en cas d'érosion mécanique. Mais un polluant bien « fixé » n'a pas d'impact sur le vivant. » Chaque site pollué étant unique, le choix de la méthode se fait au cas par cas, après avoir analysé les risques qui dépendent du type de polluant, de sa faculté à être mobile, et de la nature du terrain : argileux ou sableux, acide ou basique, plus ou moins riche en matière organique... La phytostabilisation est essentiellement utilisée sur les sites de grande taille non habités.

Fixer la pollution consiste à faire pousser des plantes qui accumulent le moins possible les polluants, tout en étant capables d'y résister. C'est donc le contraire de la phytoextraction. Ces plantes empêchent l'érosion par les vents et les précipitations, absorbent une partie de l'eau qui n'ira donc pas vers la nappe phréatique. De plus, leur système racinaire modifie les propriétés du sol, en stimulant les micro-organismes, et en modifiant la forme chimique des polluants, ce qui les rend moins mobiles.

« Ces plantes restaurent la vie des sols, même si on ne comprend pas encore tous les mécanismes »,

observe Olivier Faure. Les chercheurs combinent des graminées comme le gazon, qui couvrent rapidement le sol, et des légumineuses comme la luzerne, qui fixent l'azote de l'air et enrichissent le sol. Ils ajoutent parfois d'autres espèces pour enrichir la biodiversité, par exemple les astéracées comme les pissenlits qui attirent les insectes pollinisateurs.

Ces techniques de phytostabilisation ont été testées pour réhabiliter des crassiers métallurgiques, ces amoncèlements de déchets de l'industrie métallurgique riches en métaux. « Ces crassiers sont très inhospitaliers pour les plantes, car ils contiennent très peu de matière organique ou d'azote, et drainent l'eau, décrit le chercheur. En partenariat avec Arcelor Mittal, nous avons développé un procédé de revégétalisation applicable

à ce type de crassiers dans le cadre d'un programme ANR baptisé Physafimm. Pour aider les espèces à s'implanter, nous restimulons le développement du sol en apportant des « matériaux d'intérêt agronomique issus du traitement des eaux. » Ce sont des boues de stations d'épuration compostées avec des déchets verts. Nous atteignons un taux de recouvrement végétal de 100 %.

## Dépolluer l'eau avec des marais flottants

Les sols pollués ne sont pas les seuls à pouvoir bénéficier du secours des plantes. Les eaux aussi sont parfois chargées d'hydrocarbures, de matières en suspension ou de métaux. C'est le cas par exemple des bassins de rétention des eaux de pluie à proximité des autoroutes. La solution sur laquelle travaillent les chercheurs d'IMT Atlantique est simple : installer des matelas flottants dans lesquels ils incorporent des plantes (dénommé couramment « Marais Flottants »). Les racines se développent dans le matelas fibreux et atteignent l'eau, où elles forment un véritable réseau. Leur rôle est multiple : elles agissent comme un filtre physique pour les polluants particuliers, et servent de support pour le développement de bactéries qui dégradent ou retiennent les indésirables.

Karine Borne, aujourd'hui chercheuse à IMT Atlantique, a testé cette solution à l'université d'Auckland en Nouvelle-Zélande, avec une plante appelée *Carex virgata*. « Par rapport



à un bassin de contrôle sans plantes, nous avons observé une réduction supplémentaire de 40% des matières en suspension, et de bons résultats sur le cuivre et le zinc, indique-t-elle. Ces résultats sont totalement transposables en France, notamment en Bretagne où le climat est similaire.» Cette réduction, certes partielle, de la pollution, permet souvent de rester sous les valeurs limites européennes caractérisant un bon état de qualité de l'eau.

L'entretien de ce système est aisé. On peut couper les parties aériennes des plantes une fois par an pour qu'elles soient plus vigoureuses. Les racines meurent, se détachent et sédimentent, ainsi que les polluants, dans le bassin, si bien qu'il faut le curer un peu plus fréquemment. Les sédiments sont analysés, et selon leur niveau de toxicité, valorisés ou mis en décharge selon la législation.

Outre la dépollution des eaux pluviales, cette technique peut être utilisée en traitement tertiaire dans des stations d'épuration d'industriels ou domestiques, après les traitements classiques. C'est important notamment en été, lorsque les rivières ont des débits

**Tout comme les sols,  
les eaux polluées  
peuvent aussi  
bénéficier du secours  
des plantes.**

faibles, et sont donc vulnérables à la moindre pollution. Les industriels doivent alors attendre l'automne pour rejeter ces eaux, ce qui les oblige à construire d'énormes lagunes de stockage. La solution par les plantes est bien plus facile à mettre en œuvre, avec très peu de génie civil.

Qu'il s'agisse des sols ou des eaux, les plantes sont donc de précieuses alliées pour lutter contre les pollutions. Reste à présent à passer à l'échelle industrielle. Dans le cas des sols, « nous sommes dans une période charnière entre la R&D et les premières applications commercialisées, présente Olivier Faure. L'Ademe encourage ces approches, avec de nombreux appels à projet, mais il reste quelques freins administratifs ou réglementaires. La validation appartient aux Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), qui sont pour l'instant frileuses mais devraient rapidement évoluer. »

Pour sa part, Karine Borne a démarré en janvier, avec ses collègues du Département Systèmes Énergétiques et Environnement et en collaboration avec la société SVITEC, des recherches dans le cadre du projet ANR FloWAT. Le but est de tester la technique de dépollution des eaux en traitement tertiaire pour l'industrie agroalimentaire (abattoir et volailles). Le chemin est donc encore long avant que ces techniques ne prennent une vraie ampleur industrielle à la mesure des enjeux.



# La pollution pétrolière en mer s'observe depuis l'espace

Qu'il s'agisse de marées noires ou de dégazages volontaires, les nappes noires à la surface des océans ne passent pas inaperçues aux yeux radars des satellites. Il y a plus de 15 ans, René Garello et son équipe d'IMT Atlantique travaillaient sur les premières preuves de concept d'une telle surveillance de la pollution pétrolière depuis l'espace. Aujourd'hui, ils poursuivent leurs efforts sur ces technologies bien intégrées aux actions de répression en mer. René Garello détaille pour nous le fonctionnement de ces techniques, et le travail déployé pour continuer de les améliorer.

## La pollution pétrolière est incarnée par les marées noires, mais est-ce la plus importante source de pollution marine par le pétrole ?

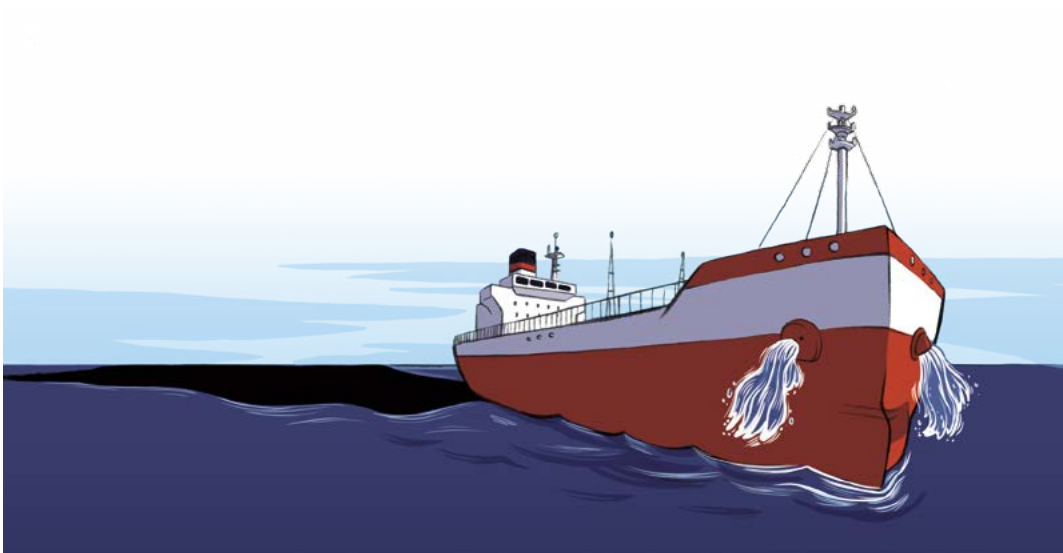
**René Garello :** Les accidents qui conduisent à des marées noires sont spectaculaires, mais ponctuels. Lorsque l'on regarde d'un peu plus près les quantités de pétrole relâchées dans les mers et les océans, on observe que la source principale de pollution vient des dégazages de nature volontaire.

À l'échelle d'une année ou d'une décennie, ils représentent des volumes de pétrole dix à cent fois plus importants que ceux libérés dans le cas des marées noires. C'est moins médiatique, mais le pétrole des dégazages arrive sur les côtes de la même façon.

## Existe-t-il des moyens de détecter les bateaux qui pratiquent des dégazages ?

**RG :** Il existe des dispositifs de surveillance à grande échelle, grâce à des capteurs placés sur des satellites. Ils permettent de surveiller des surfaces de 100 kilomètres par 100 kilomètres environ. Les zones maritimes proches des côtes sont ciblées en priorité, puisque c'est là que les tankers naviguent — ils ne sont pas faits pour la haute-mer. Les moyens de détection par satellite ont beaucoup progressé dans la dernière décennie.

Il y a 15 ans encore, repérer un dégazage depuis l'espace relevait de la recherche fondamentale. Aujourd'hui, c'est un outil intégré par les organismes étatiques pour lutter contre cette pratique.



## Comment cette détection par satellite fonctionne-t-elle ?

**RG :** La détection repose sur la technologie des radars imageurs, accessible en quantité pour les besoins de recherche depuis les années 2000 — d'où les premiers travaux fondamentaux sur de grandes quantités de données il y a 20 ans, auxquels nous avons participé à IMT Atlantique [à l'époque Télécom Bretagne]. Les satellites envoient une onde radar vers la surface de l'océan, qui se réfléchit et revient vers le satellite. Selon la rugosité de la surface d'eau, la réflexion de l'onde sera différente. La rugosité va être accrue par des phénomènes comme le vent, les courants, les vagues, et diminuée par des remontées d'eau froide,

des masses d'algues, ou des nappes de pétrole produites lors des dégazages. Chaque image reconstruite par le satellite lorsque l'onde radar lui revient comporte donc une signature de la rugosité de la surface. Les événements naturels, accidentels ou malveillants qui diminuent la rugosité vont faire apparaître une tâche noire sur l'image. C'est un travail de recherche européen, en collaboration avec l'agence spatiale européenne et une start-up issue de nos laboratoires, Boost Technology — *rachetée par CLS depuis* — qui a montré la pertinence de cette technique pour repérer les nappes de pétrole.

## Si plusieurs phénomènes modifient la rugosité de la surface de l'océan, comment différencier une nappe de pétrole d'une remontée d'eau froide ou d'algues ?

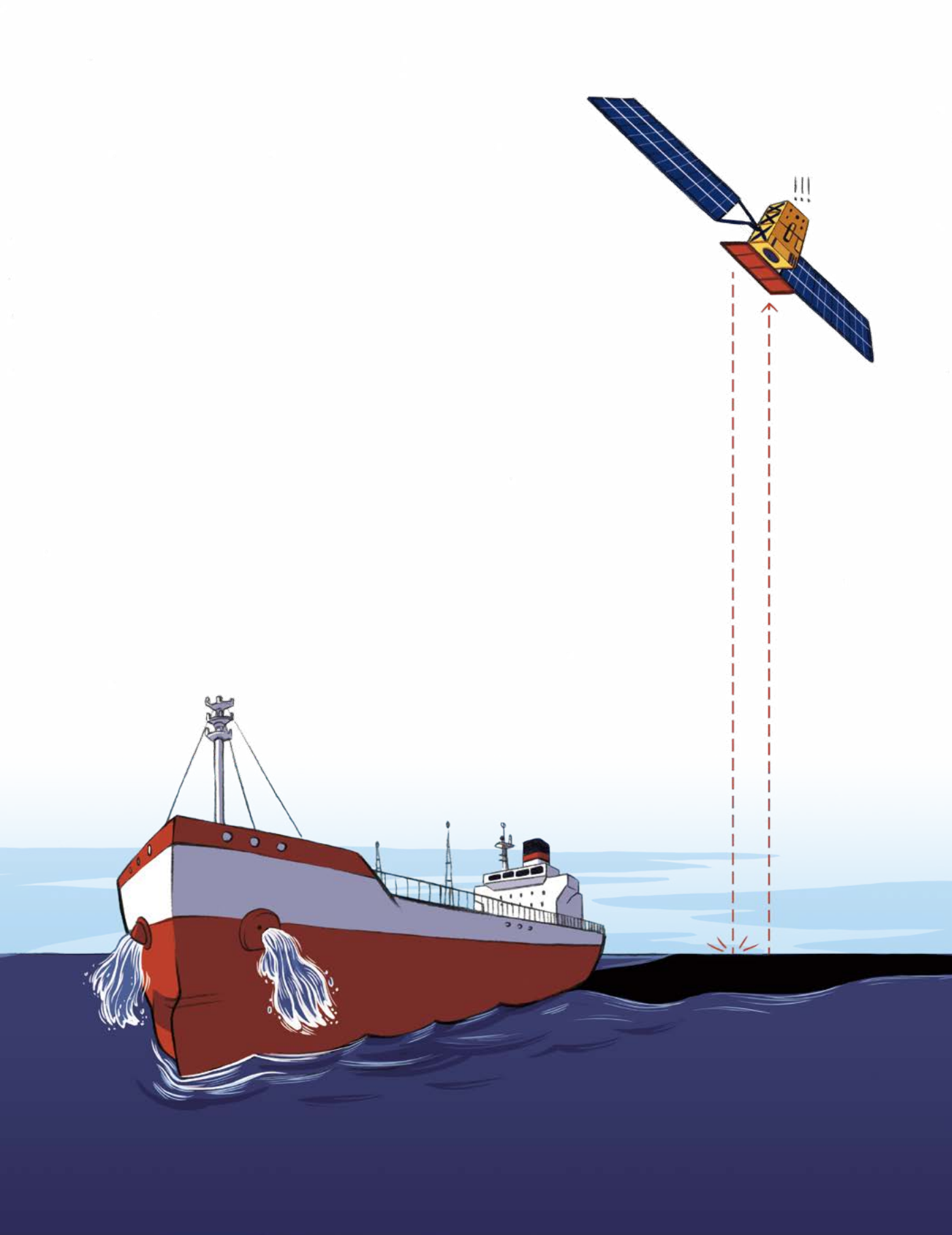
**RG :**

La détection de nappe depuis l'espace est un jeu d'enquête.

Le point de départ c'est la taille et la forme de zone noire. En général, le spécialiste photo-interprète derrière l'écran n'a pas de doute car une nappe de pétrole a une forme longue, régulière, qui ne correspond à aucun phénomène naturel. Mais ce n'est pas suffisant, il faut des éléments rigoureux avant de lancer une alerte. On croise donc nos observations avec des jeux de données auxquels nous avons un accès direct : météo, température

et état de la mer, vents, cycles de floraison des algues... Et tout ça doit être fait en moins de 30 minutes après repérage de la nappe pour alerter la préfecture maritime dans un temps qui lui permette une action en mer au besoin. Cet aspect opérationnel est réalisé par CLS, grâce à la station de réception de données radars satellite Vigisat, qu'ils opèrent à Brest et qui implique IMT Atlantique. Par ailleurs, nous avons aussi des collaborations avec l'Ifremer, l'IRD, ou encore Météo France pour rendre ce travail d'enquête plus rapide et plus efficace encore pour les opérateurs.





## Détecter une nappe de pétrole est une chose, mais est-il possible ensuite de remonter au navire pollueur facilement ?

**RG :** La technologie radar et le croisement de données permettent d'identifier avec certitude une nappe de pétrole.

En revanche, le radar ne donne pas une réponse sans ambiguïté sur quel navire en est responsable.

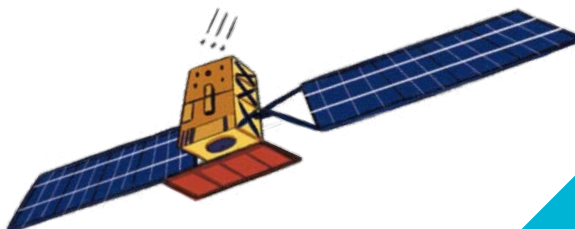
La rapidité de transmission de l'information permet parfois aux autorités d'aller trouver le responsable directement en mer mais parfois nous repérons la nappe plusieurs

heures après qu'elle a été créée. Pour résoudre ce problème, nos travaux consistent à croiser les données radars avec les données du système d'identification automatique des bateaux, ou AIS. Chaque navire a en effet un AIS qui donne des informations GPS sur son positionnement en mer. En remontant à la zone de départ de la nappe et son heure de formation, nous pouvons identifier quels étaient les bateaux dans la zone, susceptibles d'avoir dégazé.

## Cela implique de savoir remonter dans le temps sur la génération et l'évolution de la nappe en mer.

**RG :** Ce sont aussi des travaux que nous menons en complément avec des océanographes et géophysiciens. Comment une nappe dévie ? Comment elle change de forme au fil du temps ? Pour répondre à ces questions, nous utilisons encore une fois des données sur les courants et le vent. À partir de celles-ci, les physiciens utilisent des modèles de mécanique des fluides pour simuler comment une nappe de pétrole serait impactée par l'état

de la mer. Nous arrivons très bien à retracer l'évolution de la nappe dans l'heure qui précède la détection. En couplant aux données AIS on peut éliminer les candidats dont la position à un instant donné est incompatible avec le comportement observé du pétrole en surface. L'idée à présent est de pouvoir remonter plus loin dans le temps.



## Toutes ces recherches sont-elles spécifiques aux nappes de pétrole ou peuvent-elles trouver d'autres applications ?

### RG :

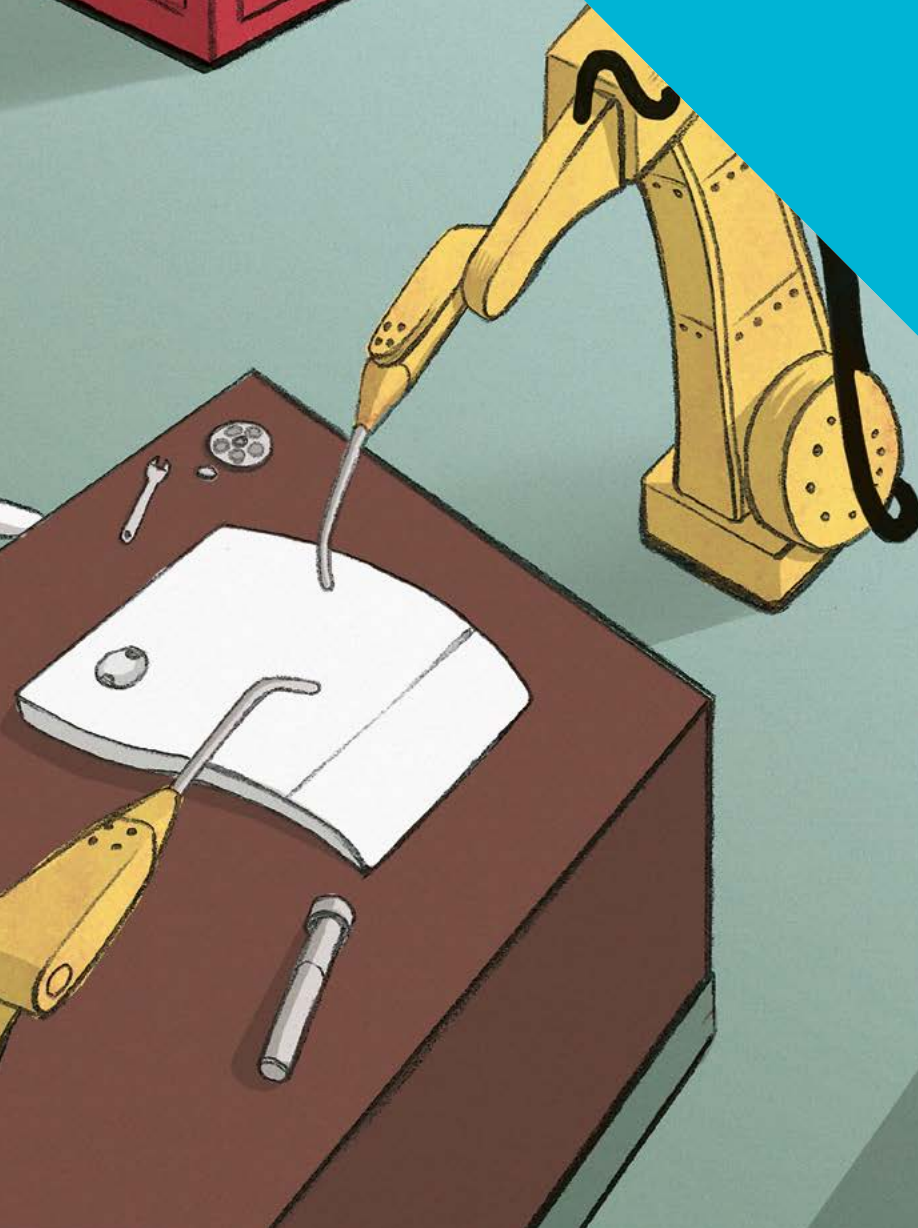
Nous aimerions utiliser tout ce qui a été développé dans le cas du pétrole pour d'autres types de pollution.

Notre intérêt se porte vers les sargasses, des algues brunes que nous voyons souvent sur les côtes. Leur production s'accroît avec le réchauffement climatique. Elles envahissent le littoral, et relâchent des gaz désagréables lorsqu'elles se désintègrent. La question que nous nous posons est de savoir si nous pouvons les détecter

par radar imageur avant qu'elles n'arrivent sur les plages. Une autre problématique de travail est celle des micro-plastiques. Eux ne se voient pas depuis les satellites. Nous nous demandons donc s'ils modifient les caractéristiques du volume d'eau dans lequel ils se trouvent d'une façon qui serait repérable par des phénomènes secondaires, comme un changement de rugosité de la surface. Il y a également la perspective de surveillance et de prévision de la dispersion des débris marins de grande taille... Les pistes envisagées sont nombreuses !

04.

---



# Entreprises & industries

---

## ▶ 70

Servicisation  
des produits :  
vers une économie  
créatrice de valeur

## ▶ 76

Dans l'usine  
de demain, pas  
de brouhaha  
chez les robots

## ▶ 82

Collaboration  
homme-robot :  
utopie industrielle  
ou réalité de demain ?

# Servicisation des produits : vers une économie créatrice de valeur

---

Les entreprises s'orientent de plus en plus vers la vente d'usages de leurs produits. Ce changement de modèle économique touche aussi bien les PME que les grandes entreprises. En pratique, il impacte l'ensemble de l'organisation de l'entreprise, depuis sa chaîne de conception jusqu'à la mise en place de collaborations pour déployer de nouvelles offres clients. Xavier Boucher et ses collègues, chercheurs en conception et optimisation des systèmes industriels à Mines Saint-Étienne, accompagnent les entreprises dans cette transformation.

**V**endre l'usage et non plus le produit. Ce mouvement du monde de l'entreprise vers une économie de fonctionnalité émerge depuis le début des années 2010. Il s'appuie sur de nouvelles offres dans lesquelles le produit est encapsulé dans un service et vise à augmenter la création de valeur. De grands industriels sont à l'origine de ce mouvement, comme Michelin qui, avec la Michelin Fleet Solutions, est passé de la vente de pneus à la vente de kilomètres auprès des flottes de transporteurs routiers européens. Mais la tendance touche également de plus en plus de PME. D'autant qu'on lui reconnaît de nombreux avantages : nouvelles opportunités de création de valeur, génération de croissance, impacts environnementaux positifs, fidélisation client, accroissement de la motivation et de l'implication des employés, etc.

**Orienter son activité  
vers un système  
produit-services  
implique  
un changement  
de modèle d'affaire.**

Toutefois, cette transition n'est pas si simple à mettre en œuvre et demande une stratégie sur le long terme. Quelles stratégies d'innovation ? Quels services déployer et comment ? Quelles structures d'entreprise et quelles compétences mettre en place ? Cela dépend des évolutions du marché, des impacts

économiques d'une telle transformation sur une entreprise ou encore des moyens à mettre en œuvre seul, ou avec des partenaires, pour aboutir à une transformation durable. Plus globalement, orienter son activité vers un système produit-services implique un changement de modèle d'affaire. Avec son équipe, Xavier Boucher, chercheur à Mines Saint-Étienne, accompagne les entreprises dans ce virage.

En région Rhône-Alpes où le chercheur mène ses travaux, une majorité des industriels développe une dimension services plus ou moins importante sous forme d'actions logistiques et de maintenance. « Mais parmi plus de 150 000 entreprises dans la région, seules quelques centaines ont réellement migré leur activité sur la vente d'usage et la gestion du cycle de vie des produits », rapporte le chercheur. Toutefois, son équipe fait aujourd'hui face à une demande croissante des industriels.

## Un accompagnement adapté à chacun

La transformation d'un modèle de commercialisation de produits vers un système produits-services repose sur plusieurs problématiques d'organisation d'entreprise, de reconfiguration de la chaîne de production, ou encore de gestion des relations clients que les chercheurs analysent à l'aide de modèles. Après une phase de diagnostic, il s'agit souvent d'accompagner un projet de transformation

d'entreprise. En premier lieu, la manière de concevoir le produit doit évoluer :

« Lors de la conception d'un produit, il faut considérer toutes les transformations qui permettront de développer des services lors de son usage et lors de toute autre phase de son cycle de vie »,

explique Xavier Boucher. Ainsi, il est souvent pertinent d'équiper un produit de capteurs qui permettront la traçabilité des performances et du cycle de vie chez les clients. Mais la gestion de production est également impactée : cette stratégie d'entreprise s'installe dans le contexte plus global d'agilité. L'objectif ? Créer de la valeur qui évolue en permanence et sur laquelle des processus industriels flexibles et reconfigurables doivent être alignés.

**Le niveau d'avancement  
vers la servicisation  
varie selon chaque  
entreprise.**

En ce sens, l'équipe de Xavier Boucher développe différents outils qui vont de l'analyse stratégique à l'aide à la décision pour industrialiser une solution. « Nous avons créé, par exemple, un modèle économique utilisable au moment du développement d'une nouvelle offre de service qui permet d'identifier la bonne chaîne de création de valeur à mettre en place et le mode de vente de service le plus pertinent pour une entreprise », détaille le chercheur. À partir d'une plateforme générique de simulations et une démarche de customisation, les chercheurs adaptent ces calculateurs économiques au contexte spécifique des industriels.

Car chaque parcours est unique et requiert un modèle économique adapté. En effet, la commercialisation d'un téléphone portable ou le déploiement d'un robot de nettoyage ne s'appuient pas sur les mêmes leviers d'action. Le second fera appel à des services d'installation adaptés au client, de maintenance et évolutivité, mais aussi de gestion des consommables, ou encore de mesure et garantie de la qualité de nettoyage. De plus, le niveau d'avancement vers la servicisation varie selon l'entreprise. Les chercheurs peuvent ainsi collaborer avec une *start-up* entrant directement dans le modèle produit-service, ou bien avoir affaire à des entreprises ayant une économie ancienne, demandant un processus de transformation long et adapté.





## Quelles étapes vers un système produit-services ?

L'expertise des chercheurs de Mines Saint-Étienne peut intervenir à différentes phases d'avancement des projets des entreprises. Par exemple, un industriel s'interroge en amont sur comment la vente d'usage va influencer son équilibre économique. Cette transformation est-elle pertinente selon son contexte ? Dans ce cas, les modèles établissent une trajectoire progressive de sa transformation et la décomposent en étapes.

Un autre type de collaboration peut se faire avec une entreprise prête à s'engager dans la vente d'usage et qui se demande comment appliquer sa première offre. À l'aide de leurs outils de simulation, les chercheurs identifient trois modèles économiques possibles : le premier consiste à commercialiser son produit et ajouter de la vente de services tout au long du cycle de vie ; le deuxième bascule l'économie de l'entreprise sur de la vente d'usage et encapsule son produit dans un service ; et enfin, le troisième modèle vend de la performance aux clients.

La PME Innovtec a ainsi été accompagnée sur la conception d'une offre de robots autonomes pour du nettoyage industriel. « Nous avons développé des outils informatiques d'aide à la conception : modélisation, scénarios organisationnels, simulation. L'enjeu était d'élargir les outils classiques orientés produits en apportant une dimension packages

de services », explique Xavier Boucher. L'entreprise bénéficie alors de différents scénarios : identification des technologies pour assurer la performance de ses robots, quels services adaptés à ce nouveau produit, etc. Mais les projections abordent aussi des thèmes au-delà de la chaîne de production : doit-elle intégrer les nouveaux services à l'entreprise actuelle ou bien créer une nouvelle structure juridique pour les déployer, etc.

**À l'aide d'outils  
de simulation,  
les chercheurs  
identifient les modèles  
économiques possibles.**

Dans un dernier cas de figure, une entreprise déjà mature dans la servicisation souhaite aller plus loin. C'est le cas de la PME Clextral qui produit des machines d'extrusion utilisées par l'industrie agroalimentaire et qui a été accompagnée lors du projet européen DiGiFoF (*Digital Skills for Factories of the Future*). Ses machines ont une longue durée de vie et permettent de créer de la valeur sous la forme d'activité de maintenance et de remise à niveau. Un axe de développement de services identifié par les chercheurs s'appuie alors sur des offres de *retrofitting*, sortes de mises à jour techniques. Elles consistent à échanger des pièces obsolètes en maintenant la configuration d'une machine, voire à modifier la configuration d'un équipement pour permettre une utilisation industrielle différente de celle d'origine.

## **Digitalisation et gestion des risques dans un contexte multi-acteurs**

Si la servicisation est aujourd'hui en train de se développer, c'est notamment grâce à la digitalisation des entreprises. L'Internet des Objets (IoT) leur permet de récolter des données pour suivre les performances de leurs machines. D'ici quelques années, on peut même envisager une automatisation complète du processus de suivi allant de la commande de pièces détachées jusqu'à la planification d'intervention sur le terrain. Les systèmes produits-services intelligents permettant de coupler digitalisation et servicisation est un axe de recherche émergent.

**Si la servicisation est aujourd'hui en train de se développer, c'est notamment grâce à la digitalisation des entreprises.**

Il est au cœur de travaux réalisés avec l'entreprise *elm.leblanc* qui souhaite mettre en place une offre de traitement en temps réel de l'information afin d'intervenir rapidement auprès des clients.

Toutefois, ce changement de modèle d'affaire n'impacte pas uniquement l'entreprise mais aussi l'ensemble de son écosystème. Notamment, *elm.leblanc* s'interroge sur le partage des coûts et des risques entre différents acteurs. Une piste serait, par exemple, d'intégrer des entreprises partenaires pour l'application de ce service. Mais comment répartir la valeur économique ou encore l'image de marque entre les partenaires sans que ceux-ci ne prennent le marché à l'entreprise ? La recherche sur la gestion des risques et des incertitudes est un enjeu majeur pour l'équipe de Xavier Boucher. À lui d'ajouter : « une des difficultés dans nos travaux est le nombre d'échecs potentiels pour les entreprises, liés aux difficultés de bien gérer la transition. Si la servicisation est très clairement confirmée comme un chemin d'avenir, elle n'est pas associée à une réussite économique immédiate et systématique. Anticiper les difficultés est essentiel ».

# Dans l'usine de demain, pas de brouhaha chez les robots

---

Les robots doivent apprendre à mieux communiquer pour gagner leur place dans l'usine de demain. Il s'agit là d'une étape nécessaire vers l'autonomie et la flexibilité des systèmes de production. C'est sur cette problématique que se concentre le projet SCHEIF de l'Académie franco-allemande pour l'industrie du futur. En particulier, les chercheurs doivent choisir les technologies de communications adéquates, et trouver comment organiser la transmission d'information dans un environnement aussi complexe.

« Le système de l'industrie est monolithique pour les robots. Ils sont statiques et spécialisés sur une tâche, mais si nous voulons les respecialiser, notamment en fonction de leur environnement, c'est impossible ». Ce constat est le point de départ du projet SCHEIF<sup>1</sup>. Mené dans le cadre de l'Académie franco-allemande pour l'industrie du futur, SCHEIF souhaite permettre aux robots de s'adapter plus facilement aux changements de fonctions. Pour y parvenir, le projet associe des chercheurs d'EURECOM, de l'université technique de Munich (TUM) et d'IMT Atlantique. Objectif des scientifiques : « créer un robot "plug and play" qui puisse être déployé n'importe où, comprendre son environnement facilement, et interagir avec des humains ou d'autres robots rapidement » résume Jérôme Härrî, chercheur en communications à EURECOM sur ce projet.

Dans la poursuite de ce but, les capacités de communication des robots sont particulièrement critiques. Pour s'adapter, ils doivent être capables d'obtenir des informations de manière efficace. Les machines doivent aussi pouvoir communiquer sur ce qu'elles font aux autres agents — humains ou robotiques — afin de s'intégrer dans leur environnement sans perturbation. Sans ces dimensions, pas de coordination, et donc pas de flexibilité.

Là réside l'un des grands défis de SCHEIF, car le contexte industriel implique de nombreuses contraintes sur les communications

## Les communications entre machines doivent allier débit, portée de transmission, adaptabilité et sécurité.

des machines. Elles doivent être rapides en cas d'urgence, et flexibles pour permettre de prioriser les informations selon leur importance pour la sécurité et l'efficacité de la chaîne de production. Elles doivent également être fiables, car les informations transmises sont sensibles. Les machines doivent aussi pouvoir communiquer sur des distances à l'échelle d'une grande usine, et pas seulement sur quelques mètres. Il faut donc allier débit, portée de transmission, adaptabilité et sécurité.

### Le casse-tête des technologies

« La solution ne peut pas être fournie par une seule technologie » souligne Jérôme Härrî. Les technologies capteurs par exemple, comme Sigfox ou LoRa qui sont dédiées aux objets connectés, ont une bonne fiabilité et une grande portée, mais ne sont pas capables de communiquer entre elles directement. « Il faut un superviseur qui se charge de l'interface, mais s'il tombe en panne c'est problématique, et cela impacte le critère de robustesse des communications » pointe le chercheur. « De plus, ces données remontent en général

<sup>1</sup> SCHEIF est l'acronyme de *Smart cyber-physical environments for industry of the future*, ou en français : *environnements cyber-physiques intelligents pour l'industrie du futur*.

à l'opérateur des stations de base des réseaux, et l'industriel doit souscrire à une offre pour les obtenir.»

À l'inverse, la 4G fournit la fiabilité et la distance, mais pas forcément le débit et l'adaptabilité envisagés pour l'industrie du futur. Quant à la 5G, elle répond à la question du débit, et elle permet d'envisager des systèmes propriétaires où l'industriel n'aurait plus à passer par un opérateur. En revanche, sa fiabilité dans un contexte industriel est encore en cours de spécification.

Face à ce casse-tête, deux grandes approches sont possibles. La première consiste à partir des technologies capteurs en augmentant leur interopérabilité et leur débit. La seconde est d'étendre la 5G aux besoins de l'industrie, notamment en lui conférant des atouts similaires aux fonctionnalités des technologies capteurs. C'est cette seconde option que les chercheurs ont retenue. « Nous améliorons les protocoles de la 5G en regardant comment allouer les ressources du réseau, afin de gagner en fiabilité et flexibilité » précise Jérôme Härrri.

Les équipes franco-allemandes de chercheurs peuvent s'appuyer pour cela sur une forte expérience en communications véhiculaires, qui exploitent la 4G et la 5G pour des problématiques liées aux transports et à la mobilité. La technologie cellulaire utilisée dans le cas des véhicules a l'avantage de comporter une spécification d'ordonnanceur coopératif. Il s'agit là d'un composant du système

d'information qui décide qui doit communiquer, quel message, à quel moment. Un ordonnanceur coopératif est essentiel dans le cas des flottes de véhicules sur une autoroute, tout comme il l'est dans le cas des flottes de robots évoluant dans une usine. Il assure que tous les robots jouent avec les mêmes règles de priorité. Grâce à lui par exemple, une information urgente pour un robot l'est également pour tous les autres robots, et toutes les machines peuvent s'organiser pour libérer le réseau et laisser la priorité à cette information. « L'un de nos travaux actuels est de mettre au point un ordonnanceur coopératif 5G adapté aux robots dans un contexte industriel » illustre ainsi Jérôme Härrri.

**Face au casse-tête  
des technologies  
de communication,  
deux grandes  
approches  
sont possibles.**



## Le deep learning pour gagner en flexibilité

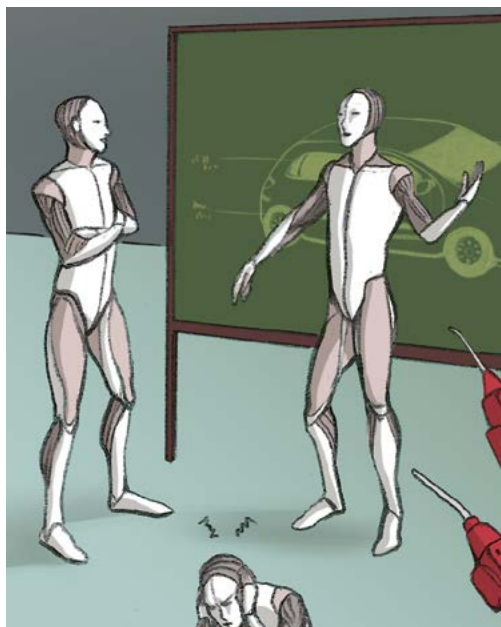
Si les machines peuvent se reposer sur l'ordonnanceur pour savoir quand communiquer, il faut tout de même que celui-ci sache quelles règles appliquer. Le but de l'ordonnanceur est de mettre de l'ordre dans le réseau, pour éviter notamment les saturations et les collisions entre paquets de données. Cependant, il ne peut pas simplement prendre en compte la charge du canal de communication pour savoir s'il doit autoriser ou non une communication. Mais procéder avec cette logique reviendrait à communiquer à l'aveugle : le message est envoyé quand il y a de la place sans savoir ce que les autres robots vont faire. Or dans les réseaux critiques, le but est de pouvoir planifier sur du moyen terme afin de fournir des garanties de fiabilité et de délai. Les robots bougent, et l'environnement change. Il faut donc prévoir si dans quelques secondes tous les robots vont se mettre à communiquer soudainement, ou si au contraire il y aura très peu de messages.

Le *deep learning* est un outil de choix pour enseigner aux réseaux et aux machines à anticiper ces cas de figure. « Nous leur faisons apprendre sur des jeux de données de mobilité la façon dont plusieurs agents en mouvement communiquent. Ils reconnaîtront ensuite des situations similaires dans leur utilisation réelle, et sauront les conséquences qui peuvent découler en matière de qualité du canal, ou du nombre de messages envoyés » détaille le chercheur.

« Parfois, il est difficile de garantir que le jeu d'apprentissage corresponde à ce que le réseau va rencontrer réellement par la suite. Nous devons donc compléter par un apprentissage à la volée lors de l'usage. Chaque fois qu'une décision est prise, elle est analysée. Les décisions du système sont ainsi améliorées au fur et à mesure. »

**Dans les réseaux critiques, les robots bougent, et l'environnement change.**

Des premiers résultats sur cette utilisation du *deep learning* pour optimiser le réseau ont été publiés par les équipes d'EURECOM et de l'université technique de Munich. Les chercheurs sont en effet parvenus à organiser des communications entre agents mobiles autonomes pour éviter les collisions des paquets de données transmis. « Surtout,





nous avons pu faire cela sans que chacun ne soit averti si les autres agents allaient communiquer ou non » pointe Jérôme Härrri.

« Nous sommes parvenus à faire anticiper à un agent quand les autres vont communiquer simplement sur la base de leur comportement qui, dans le passé, précédait une communication. »

Les chercheurs entendent bien poursuivre leur effort, notamment en augmentant le degré de complexité de leurs expérimentations pour les faire se rapprocher des situations

réellement rencontrées dans un contexte industriel. Plus il y a d'agents, plus les comportements sont erratiques et difficiles à prévoir. L'enjeu est donc d'arriver à un apprentissage coopératif. Ce serait alors un pas de plus vers des environnements industriels pleinement autonomes.

# Collaboration homme-robot : utopie industrielle ou réalité de demain ?

---

Dans l'usine du futur, le robot n'a plus vocation à remplacer l'humain mais à l'assister.

Les chercheurs Sotiris Manitsaris de Mines ParisTech, et Patrick Hénaff de Mines Nancy, travaillent à la conception de systèmes de contrôle à base d'intelligences artificielles s'implémentant sur tout type de robot. Le but de ces IA ? Pouvoir identifier des gestes humains et s'adapter au rythme des opérateurs dans un contexte industriel. La clé de la réussite pour une bonne collaboration avec la machine tient avant tout à la connaissance de l'Homme et de ses mouvements.

Un bras robotique frottant le fond d'une cuve en parfaite synchronisation avec la main de chair et d'os à côté de lui. Leurs mouvements sont rythmés par la même « musique », celle imposée par le corps de l'opérateur. Tantôt rapide, puis plus lente, cette symphonie du fond de cuve est rendue possible par l'intelligence artificielle dont est doté le robot anthropomorphe. À l'atelier voisin, un véhicule guidé automatiquement danse à travers l'usine, esquivant chaque obstacle sur son passage jusqu'à ce qu'il livre les pièces qu'il transporte à un agent de la chaîne de production. Dans un timing redoutable, l'opérateur humain les récupère et dépose les objets qu'il a fini d'assembler sur le plateau de transport du petit véhicule qui repart aussitôt. La machine laisse dans son sillage des dizaines d'ateliers où humains et robots effectuent leur tâche « main dans la main ».

Si les robots anthropomorphiques comme les bras robotisés ou les petits véhicules autonomes sont déjà utilisés par des industriels, ils ne sont pas encore capables de collaborer avec l'Homme de cette façon. Les robots actuels sont munis de capteurs et d'algorithmes pré-intégrés par leur constructeur. Toutefois, leurs futures interactions avec l'humain ne sont pas prises en compte lors de leur développement. « Pour le moment, on trouve beaucoup de situations de coprésence dans les usines au cours desquelles un opérateur humain et un robot partagent le même espace mais n'interagissent pas vraiment ensemble car les robots ne captent l'humain que lorsqu'il

est en contact physique avec eux », décrit Sotiris Manitsaris, chercheur spécialisé en robotique collaborative à Mines ParisTech.

## **Les futures interactions des robots avec les humains ne sont pas prises en compte lors de leur développement.**

La collaboration Homme-robot – ou cobotisation – est une branche émergente de la robotique qui redéfinit la place du robot comme travaillant « avec » et non « à la place de » l'opérateur. Cette approche permet d'augmenter la productivité tout en préservant l'emploi, en compensant les faiblesses de l'humain et du robot par les atouts de l'autre. Flexibilité, dextérité, prise de décision sont apportées par le travail manuel alors que l'automatisation mise sur l'efficacité, la vitesse et la précision. Mais pour parvenir à une réelle collaboration, les robots doivent être flexibles, interactifs et surtout intelligents. « La robotique est l'aspect concret de l'intelligence artificielle. Elle lui permet d'agir sur le monde extérieur avec une boucle constante perception-action sans laquelle le robot ne pourrait pas agir », témoigne Patrick Hénaff, spécialiste en intelligence artificielle bio-inspirée à Mines Nancy. De l'industrie automobile à celles de la mode et du luxe, tous les secteurs sont concernés par la problématique d'intégration de la collaboration robotique.

## Vers un duo gagnant centré sur l'humain

Au-delà de l'interaction directe entre l'Homme et la machine, c'est l'ensemble du cycle de production qui pourrait devenir plus flexible et qui dépendrait davantage du rythme et du fonctionnement de l'opérateur. « Le robot doit répondre aux besoins de l'humain mais aussi anticiper son comportement pour s'adapter de façon dynamique », précise Sotiris Manitsaris. Dans une chaîne de montage de l'industrie automobile par exemple, chaque tâche est réalisée en un temps précis. Si le robot anticipe les gestes de l'opérateur, alors il peut aussi s'adapter à sa vitesse. Cette problématique a fait l'objet de travaux avec le groupe PSA Peugeot Citroën dans le cadre de la chaire industrielle robotique et réalité virtuelle de Mines ParisTech. Les chercheurs ont pu mettre en place de premières collaborations prometteuses : sur un banc de travail, un robot apportait des pièces en fonction de la vitesse d'exécution d'un opérateur qui les assemblait et les vissait avant de les lui rendre.

**Si le robot anticipe  
les gestes de l'opérateur,  
alors il peut aussi  
s'adapter à sa vitesse.**

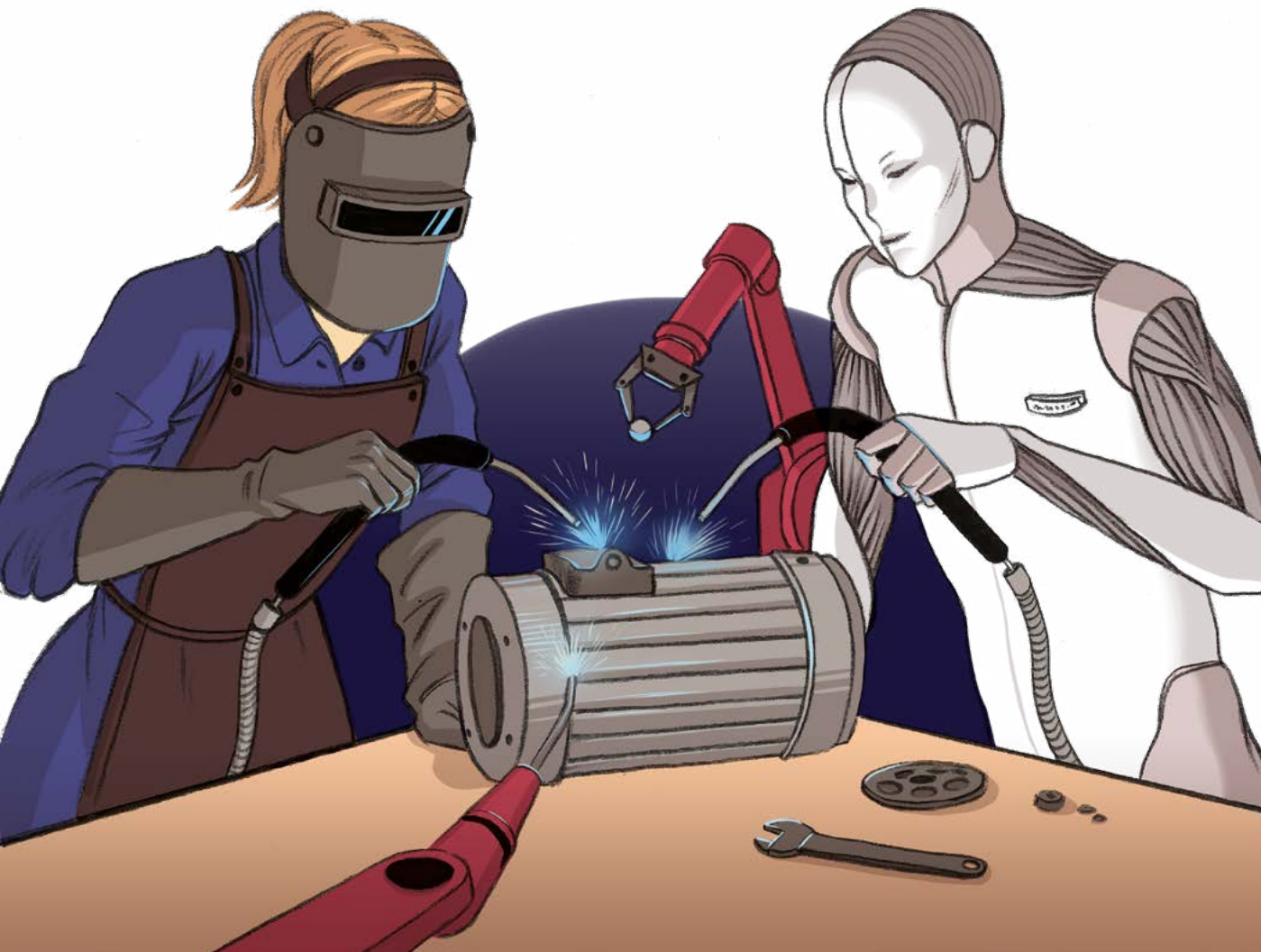
Un autre but de la cobotique est de soulager les opérateurs de tâches pénibles. Dans le cadre du projet H2020 Collaborate démarré fin 2018, Sotiris Manitsaris s'attelle au développement de technologies de reconnaissance des gestes ergonomiques et à la communication de ces informations aux robots. Les gestes sont dans un premier temps mesurés à l'aide d'objets communicants (montre connectée, *smartphone*, etc.) que porte l'opérateur. Les postures sont ensuite apprises par une intelligence artificielle. Ces nouveaux modèles de collaboration centrés sur l'humain et ses gestes sont conceptualisés en vue d'être implémentés sur n'importe quel modèle robotique. La question désormais est de savoir, une fois le geste reconnu, quelle information communiquer au robot pour qu'il puisse adapter son comportement sans perturber sa performance ni celle du collaborateur humain.

## Collaborer en rythme

Comprendre les mouvements et les implémenter dans des robots est également au cœur des travaux menés par Patrick Hénaff. Ce dernier utilise une approche inspirée de la neurobiologie axée sur la compréhension des systèmes nerveux moteurs des animaux. « On peut considérer l'intelligence artificielle comme étant constituée d'une structure haut-niveau – le cerveau – et d'intelligences bas-niveaux qui peuvent être dédiées au contrôle de mouvements sans avoir besoin de recevoir des informa-

tions en permanence du niveau supérieur », explique-t-il. Ses recherches portent plus particulièrement sur les gestes rythmiques, des mouvements automatiques qui ne sont pas commandés par notre cerveau mais par des réseaux de neurones situés dans notre moelle épinière. C'est le cas par exemple de la marche ou du passage d'une éponge sur une surface.

**Pour certains gestes,  
le corps humain  
est capable  
de se synchroniser  
naturellement avec  
des signaux extérieurs.**



Une fois initié par le cerveau, un mouvement rythmique se fait naturellement et à un rythme dépendant de notre morphologie. Néanmoins, il a été démontré que pour certains de ces gestes, le corps humain est capable de se synchroniser naturellement avec des signaux extérieurs (visuels ou auditifs) qui sont également rythmiques. C'est par exemple le cas lorsque deux personnes marchent ensemble. « Dans nos algorithmes, nous cherchons à déterminer quels signaux extérieurs intégrer à nos équations pour qu'une machine se synchronise avec l'humain ou avec son environnement lorsqu'elle réalise un geste rythmique », décrit Patrick Hénaff.

**Des robots peuvent  
réaliser des tâches  
rythmiques sans  
contact physique.**

## Du laboratoire à l'usine, il n'y a qu'un pas

Les chercheurs ont démontré en laboratoire que des robots peuvent réaliser des tâches rythmiques sans contact physique. Un robot observe à l'aide d'une caméra le mouvement de main d'une personne lui faisant coucou et peut le reproduire au même rythme et se synchroniser sur celui-ci. Les expériences ont également été réalisées sur une interaction avec contact : la poignée de main. Le robot apprend la façon de serrer la main d'un humain

et synchronise son geste en fonction de la personne en face de lui.

Dans le cadre industriel, un opérateur réalise de nombreux gestes rythmiques : scier un tuyau, gratter le fond d'une cuve ou encore polir une surface ne sont que quelques exemples. Pour réaliser des tâches en coopération avec un opérateur, le robot doit pouvoir reproduire ses mouvements. Par exemple, si un robot scie un tuyau avec un être humain, alors la machine doit adapter son rythme de façon à ne pas générer des troubles musculo-squelettiques. « Nous venons de démarrer un partenariat avec un industriel afin de réaliser une preuve de concept et démontrer que les robots de nouvelle génération peuvent effectuer, en milieu professionnel, une tâche rythmique qui ne nécessite pas de trajectoire précise mais dont le résultat final est correct », rapporte Patrick Hénaff. En ligne de mire, s'attaquer aux milieux dangereux et aux tâches les plus pénibles pour les opérateurs non pas en les remplaçant mais en misant sur la complémentarité.



**Lecteurs  
et contributeurs : —  
merci !**



**En 2019, vous avez été plus de 80 000 à parcourir les pages web de l'MTech. Depuis 2017 et le lancement du média, ce chiffre est en constante augmentation grâce à vous, et nous vous en remercions !**

Les articles que vous consultez ne seraient pas ce qu'ils sont sans la participation, volontaire, des chercheurs et chercheuses des écoles de l'IMT. Leur concours nous est précieux, et c'est un plaisir de noter qu'ils sont de plus de plus en nombreux à se prêter au jeu de la vulgarisation ; un exercice qui souvent n'est pas évident, mais toujours gratifiant. Pour leur engagement dans le partage de leurs connaissances et de leurs regards éclairés sur les évolutions du monde, nous tenons également à les remercier chaleureusement.

Et enfin, un grand merci aux journalistes scientifiques qui rédigent pour l'MTech, de manière ponctuelle ou régulière. Ils nous aident grandement dans l'exercice quotidien d'affinage des témoignages de chercheurs, afin de vous proposer les articles les plus cohérents et pertinents possible.

**- La rédaction de l'MTech.**



**Rédacteurs contributeurs :**  
Anne-Sophie Boutaud, Emmanuelle Bouyeux,  
Anaïs Culot, Cécile Michaut

**Illustrations :**  
Diane Rottner

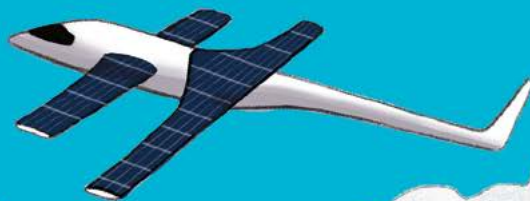
**Création graphique et réalisation :**  
Marjorie Garry

**Équipe éditoriale l'MTech 2019 :**  
Véronique Charlet, Tiphaine Claveau,  
Jérôme Vauselle, Benjamin Vignard

**Conception éditoriale :**  
IMT - 19 place Marguerite Pery  
91120 Palaiseau  
recherche@imt.fr

---

**Imprimé en janvier 2020 par Fabrication ALIZES**



# I'MTech.

---

L'actualité scientifique  
et technologique de l'IMT

 [www.imtechnews.fr](http://www.imtechnews.fr) —  @IMTechfr —  I'MTech