

utilisés en génétique. Les enzymes de restriction, des protéines synthétisées par des bactéries pour se protéger des virus en coupant l'ADN viral à des endroits spécifiques, permettent d'isoler des gènes d'intérêt lors d'une opération de clonage ou de transgénèse. Des plasmides, de l'ADN bactérien circulaire, servent de vecteurs lors du transfert du gène isolé chez un organisme-cible (transgénèse) ou chez une cellule-hôte (*E. coli*) pour le cloner. Quant à la PCR, technique d'obtention de grandes quantités d'ADN à partir d'un petit échantillon, elle fait appel à des enzymes d'archées ou de bactéries. Ces outils, jusqu'à la récente technique fine d'édition du génome CRISPR-Cas, ont fait considérablement avancer les connaissances. Compréhension des mécanismes de l'évolution, reconstitution de l'histoire du vivant, étude des maladies, etc. : l'étendue des connaissances acquises grâce aux microbes est immense... à l'image du monde microbien lui-même, pourtant invisible à nos yeux.

© G. M. M. / Shutterstock.com

DÉPOLLUER LES EAUX ET LES SOLS

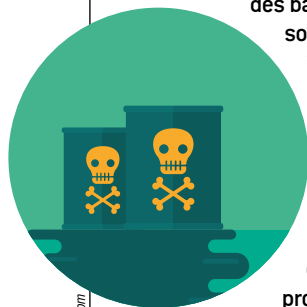
Avril 2010. Dans le golfe du Mexique, la plateforme pétrolière *Deepwater Horizon* explose, et 660 000 tonnes de pétrole se déversent. Le malheur des uns fait le bonheur des autres :

des bactéries y voient l'arrivée massive d'une source d'énergie. On estime que

200 000 tonnes de pétrole et de gaz dissous dans les eaux ont été dégradées par ces microbes. Dès les débuts de la dépollution en France, il y a plus de vingt ans, les professionnels ont su tirer parti de cette capacité des bactéries à nettoyer les sols et les eaux des hydrocarbures, de leurs dérivés et produits de combustion ainsi que d'autres polluants. « L'avantage des méthodes

biologiques, c'est qu'elles s'avèrent en général beaucoup moins coûteuses que les approches chimiques ou thermiques », explique Stéfano Colombano, chercheur au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). En effet, les bactéries étant le plus souvent déjà sur place, il faut juste stimuler leur croissance – en ajoutant des nutriments (phosphore et azote par exemple), ainsi que de l'oxygène, nécessaire au développement des bactéries aérobies. Pour les espèces anaérobies, celles qui s'attaquent entre autres aux composés chlorés tels que certains solvants et les PCB, tout apport d'oxygène est au contraire évité. « Cette biodépollution ne peut hélas pas être utilisée à tous les coups, car la plupart des bactéries ne supportent pas des concentrations élevées de polluants », commente Stéfano Colombano. Une autre approche consiste àensemencer le milieu avec des bactéries sélectionnées, voire modifiées génétiquement, pour s'attaquer à un polluant particulier, tel l'arsenic. Mais sans garantie d'efficacité, car les bactéries autochtones, mieux adaptées au milieu, tendent à freiner ces nouvelles arrivantes dans leur tâche de nettoyage.

© Visual generation/Shutterstock.com



PRODUIRE DES CARBURANTS

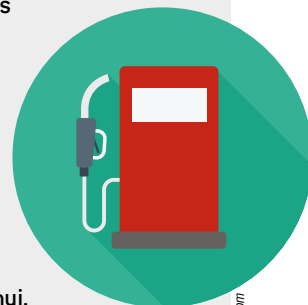
Pour passer de l'or noir à l'or vert, les biotechnologies « blanches » (ou industrielles) sont dans les starting-blocks. Depuis une vingtaine d'années, on voit fleurir dans le monde les recherches scientifiques en vue de produire des biocarburants à l'aide de microorganismes. Ces bactéries ou levures utilisent pour cela une biomasse « lignocellulosique », obtenue à partir de certains résidus agricoles ou forestiers tels que le bois ou la paille. Après hydrolyse de la cellulose, elles transforment les différents sucres ainsi obtenus en éthanol, par fermentation.

L'intérêt de ces biocarburants, dits de deuxième génération ? Ils n'accaparent pas les terres agricoles au détriment des cultures alimentaires. Aujourd'hui, cinq usines – aux États-Unis, au Brésil et en Italie – exploitent cette voie biochimique pour produire de l'éthanol destiné au moteur à essence.

L'inconvénient est que l'éthanol doit être mélangé à d'autres substances. Une autre voie de recherche vise donc à faire produire par des microorganismes des biocarburants utilisables tels quels. Elle relève de la biologie de synthèse. L'équipe de Jay Keasling, de l'université de Californie à Berkeley, a été la première à mettre le pied à l'étrier. En 2011, elle a implanté une voie métabolique artificielle au sein de la bactérie *Escherichia coli*, afin qu'elle sécrète directement du diesel à partir de biomasse. « Sur le même principe, nous avons développé un procédé inédit de production d'isobutène, dont l'un des dérivés (l'isooctane) est un additif idéal pour les essences », souligne Marc Delcourt, directeur général de l'entreprise française Global Bioenergies. Le démonstrateur industriel est lancé cette année, en Allemagne.

Enfin, on peut mentionner l'engouement pour une troisième génération de biocarburants, produits à partir de cultures de microalgues riches en lipides.

L'eldorado des biocarburants ne demande donc qu'à s'épanouir, bien que la baisse récente du prix du baril de pétrole ait déjà stoppé quelques projets en plein élan.



© T. K. / Shutterstock.com

■ LES AUTEURES

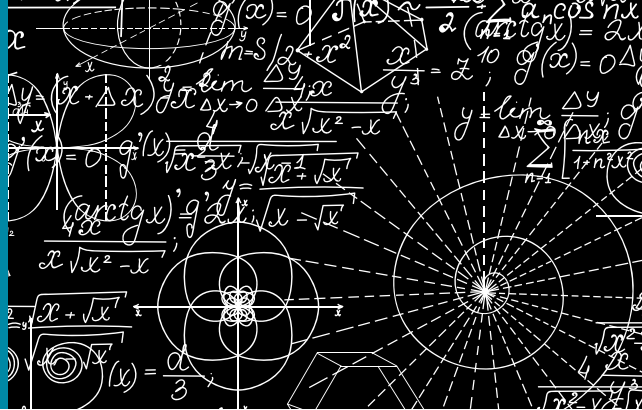
Hélène GÉLOT et Marine BOLLARD sont journalistes et éditrices scientifiques indépendantes.

■ BIBLIOGRAPHIE

P. S. Bisen, M. Debnath et G. B. Prasad, *Microbes : Concepts and applications*, Wiley-Blackwell, 2012.

I. Ahmad *et al.* [dir.], *Microbes and microbial technology : Agricultural and environmental applications*, Springer, 2011.

INDISPENSABLES MATHÉMATIQUES



Quinze pour cent du PIB et neuf pour cent des emplois sont impactés directement par les mathématiques (voir ci-dessous). C'est dire l'importance de cette discipline pour l'économie française. De fait, rendues incontournables par l'avènement de l'ère numérique, les mathématiques irriguent tous les secteurs de l'économie, se nichent au cœur de révolutions telles

que l'intelligence artificielle, interviennent dans la compréhension de problèmes majeurs de notre époque, comme ceux liés au développement durable, au climat, à la santé. Et transforment désormais notre quotidien... Aujourd'hui, il n'y a pas de véritable innovation sans mathématiques en arrière-plan. Un enjeu de développement dont doivent s'emparer étudiants, entrepreneurs et décideurs.

Une étude fondatrice pour une prise de conscience élargie

La 1^{re} Étude de l'impact socio-économique des mathématiques en France

Publiée en mai 2015, l'étude* révèle l'impact, à la fois très fort et en augmentation, des mathématiques sur la compétitivité et la croissance de l'économie française :

- les mathématiques influent directement sur 15 % du PIB et 9 % des emplois en France ;
- il apparaît que 44 % des technologies clés, identifiées comme telles par les rapports gouvernementaux, sont fortement impactées par les progrès en mathématiques ;
- de nombreux secteurs d'activité, en particulier l'énergie, la santé ou encore l'industrie et les télécommunications mobilisent les champs de compétences mathématiques. Cinq en forment le peloton de tête : traitement du signal et analyse d'images, gestion des données (*Big Data*), la modélisation-simulation-optimisation, le calcul intensif (HPC), et la cryptographie.

Les entreprises prennent progressivement conscience de cet impact : elles commencent tout juste à s'organiser pour gérer en leur sein une expertise mathématique. Et les étudiants en mathématiques ne connaissent pas le chômage. L'étude souligne la nécessité de renforcer les liens entre le dispositif d'enseignement supérieur et les entreprises : lisibilité du dispositif d'enseignement supérieur et de recherche, attractivité de carrière pour les docteurs, soutien en expertise mathématiques à renforcer pour les PME. C'est en cherchant à corriger ces points de faiblesse que l'excellence scientifique française en mathématiques pourra véritablement constituer un avantage concurrentiel pour notre économie.

Dans ce contexte, l'Agence Maths-Entreprises AMIES met en œuvre tout le soutien nécessaire aux entreprises pour leur permettre d'accéder aux ressources mathématiques susceptibles de leur être utiles. (infoprojets@agence-maths-entreprises.fr)

* Cette étude a été réalisée par le cabinet CMI à la demande d'AMIES, en partenariat avec la FSMP et la FMJH et le soutien des Labex Archimède, Bézout, Carmin, CEMPI, CIMI, IRMIA, Lebesgue, LMH (FMJH), Milyon, PERSYVAL-Lab, SMP (FSMP).



« Une évaluation objective à l'instant t » (t = 2015), a souligné Cédric Villani lors de la présentation de l'étude EISEM.



f : EISEM2015



Des événements à retenir

- Treize Minutes Marseille, le 1^{er} décembre 2016, à l'Alcazar : petites conférences pluridisciplinaires rythmées : 6 intervenants, 13 minutes par orateur ! Un butinage intellectuel incontournable, et certaines fleurs font la part belle aux mathématiques. Diffusion en streaming live. <http://treize.lif.univ-mrs.fr>
- 15 décembre 2016 à la Cité des Sciences de la Villette : le Forum Emploi-Maths (FEM2016), l'événement référent pour les relations entreprises-mathématiciens. Les entreprises y découvrent les bénéfices des maths et parfois y recrutent, les étudiants et PhD en maths y pullulent. <http://www.forum-emploi-maths.org>



Des Laboratoires d'Excellence

Les mathématiques disposent sur l'ensemble du territoire d'un important réseau de structures les reliant aux entreprises et à la société. Leurs actions sont nationales et internationales. Parmi celles-ci, les LabEx préfigurent les nouvelles passerelles entre recherche, formation et monde économique, telles que voulues par les Investissements d'Avenir. Deux nouveaux exemples pour mieux comprendre l'importance de ces laboratoires.

Le LabEx CIMI

Le Centre International de Mathématiques et Informatique de Toulouse est porté conjointement par l'Institut de Mathématiques de Toulouse (IMT) et l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). Il vise à apporter de nouvelles perspectives de développement de la recherche dans ces deux disciplines et à leur interface; il rassemble plus de 450 chercheurs.

Au cœur de l'actualité scientifique

Cette combinaison originale au sein d'une structure unique va au-delà des collaborations classiques et crée une véritable synergie appropriée pour atteindre l'excellence mondiale dans la recherche et l'exploration de domaines de recherche innovants. Elle a d'ores et déjà conduit à la création d'équipes de projets de recherche communes entre les deux instituts.

Son programme scientifique comprend des chaires d'excellence sur plusieurs mois, des financements pour des post-doctorants, et des étudiants de master. L'attractivité est renforcée par des trimestres thématiques organisés autour de sujets au cœur de l'actualité scientifique: traitement du signal, calcul intensif, ou encore apprentissage automatique. En outre, CIMI finance des projets de recherche liés à l'innovation.

CIMI est un lieu unique attirant des scientifiques et des étudiants de haut niveau à l'échelle internationale avec une stratégie proactive de recrutement de scientifiques renommés et d'étudiants exceptionnels (français et étrangers).

Des ouvertures vers l'industrie et la société

Sa collaboration avec la SATT Toulouse Tech Transfer a conduit à la création d'un annuaire de compétences dans ces deux domaines et d'un portail pour les industriels. Un accord de coopération a été signé avec l'Institut de Recherche Technologique Saint-Exupéry permettant le renforcement de la coopération avec la communauté aéronautique dans plusieurs domaines tels que l'apprentissage, le *machine learning* ou l'optimisation.

Enfin CIMI se veut un outil de la promotion et de la diffusion des mathématiques et de l'informatique auprès d'un public plus jeune et a soutenu en 2016 l'équipe de lycéens toulousains qui a remporté la finale du Tournoi International des Jeunes Mathématiciens à Saint-Petersbourg.

Le LabEx IRMIA

L'Institut de Recherche en Mathématiques, Interactions et Applications est un des 11 Labex de l'université de Strasbourg, elle-même labellisée Initiative d'Excellence. Regroupant recherche, formation, et valorisation, son activité se situe à l'interface entre mathématiques pures et appliquées (IRMA), statistique médicale (LBIM), informatique et calcul scientifique (ICPS); il regroupe environ 150 chercheurs.

L'interdisciplinarité math-info-médecine

IRMIA soutient la recherche dans plusieurs domaines. En physique mathématique, l'étude du chaos quantique appréhende l'apparition de phénomènes inattendus dans les systèmes quantiques. Fruit d'une étroite collaboration avec les équipes médicales de l'université de Purdue, aux États-Unis, le projet Eye2Brain vise à modéliser les flux sanguins de l'œil avec pour but de déceler des pathologies du cerveau; un autre projet cherche à résoudre le problème de statistique posé par les données médicales manquantes. En informatique, un objectif est la génération automatique de codes s'adaptant à un environnement donné.

Des partenariats précoces avec les industriels

Le centre de modélisation CEMOSIS a été mis en place afin de développer des collaborations recherche-industrie, dans les domaines de la modélisation, du calcul haute performance (HPC) et de l'analyse des données. Ce centre a noué des collaborations avec plusieurs entreprises comme AxesSim, Hager et Électricité de Strasbourg.

Ces collaborations avec des partenaires industriels commencent dès le niveau des stages en entreprise pour les étudiants des Masters de mathématiques appliquées, et se poursuivent jusqu'au niveau de la recherche et de l'innovation avec des projets développés dans le domaine du HPC, des sciences actuarielles ou de l'analyse de données. Par ailleurs, le diplôme universitaire d'actuaire de Strasbourg (DUAS) offre une formation en alternance qui permet une insertion aisée dans le monde du travail.

Formation et diffusion des connaissances

IRMIA organise chaque année des stages de formation pour les étudiants en master (*master class*) ainsi que des conférences grand public, et la publication annuelle d'un calendrier mathématique.



LOGIQUE & CALCUL

Du bitcoin à Ethereum : l'ordinateur-monde

Les « organisations autonomes décentralisées » sont des programmes indestructibles fonctionnant sans que personne ne puisse en prendre le contrôle. Elles ouvrent des perspectives inattendues, pour le meilleur et pour le pire.

Jean-Paul DELAHAYE

On attribue à l'ingénieur mathématicien Héron d'Alexandrie, au I^{er} siècle de notre ère, l'invention d'une machine à distribuer de l'eau qu'on mettait en marche en introduisant des pièces de monnaie. D'autres distributeurs automatiques ont été exploités dans les tavernes anglaises au XVII^e siècle pour vendre du tabac. Aujourd'hui, on trouve des versions de plus en plus perfectionnées et variées de ce type de dispositifs. Il y a la machine à café capable de prendre une dose de grains, de la moudre, de chauffer l'eau nécessaire et de préparer en quelques secondes la boisson que vous avez choisie dans une longue liste et payée avec des piécettes. Il y a les distributeurs de sachets de bonbons, de barres chocolatées, etc. Ajoutons les machines à distribuer des billets, les parcmètres, les bandits manchots des casinos, les flippers des bars. Et, plus récemment, les vélos et autos que vous louez dans la rue sans intermédiaire humain.

L'idée est de concevoir et fabriquer un dispositif qui travaillera tout seul. La machine offre un contrat implicite au client potentiel : ce dernier paye, le mécanisme fonctionne et le client reçoit son dû : un produit, une boule lancée sur le plan incliné du flipper, une voiture en prêt, etc.

Puisque l'automate est un objet matériel coûteux à construire, il a un propriétaire qui en effectue la maintenance et renouvelle les produits de base nécessaires (eau, doses de café, sachets de bonbons, etc.).

C'est lui qui réserve l'emplacement où est déposé le dispositif ; c'est lui qui en tire du profit et qui est victime s'il y a vol ou dégradation.

L'informatique vient d'inventer une version perfectionnée de ces « entreprises autonomes automatiques » qui, jusqu'à présent, n'étaient que partiellement autonomes et imparfaitement automatiques, puisque l'humain devait intervenir pour maintenir le système en marche et qu'à chaque instant il pouvait en interrompre le fonctionnement.

Les descendants actuels de la machine d'Héron d'Alexandrie ont des propriétés inattendues. Ils sont décentralisés, car situés partout sur le réseau, et ne sont pas nécessairement au service d'un propriétaire identifié. Ils peuvent fonctionner selon des procédures sans aucune limite de complexité ou presque, recevoir des informations variées et se comporter en fonction de ces dernières. Ils possèdent et dépensent de l'argent. Ils sont quasiment indestructibles et inviolables, car leur bonne marche s'appuie sur des protections cryptographiques et sur la copie en multiples exemplaires de leur mémoire. Une fois lancés, leur autonomie et leur indépendance sont aussi parfaites que possible, même si aujourd'hui, certaines étapes restent à franchir entre le rêve et la réalité. On les nomme organisations autonomes décentralisées ou DAO (pour *Decentralized Autonomous Organization*), sigle commode qui s'est imposé.

Tout provient des monnaies cryptographiques, dont le *bitcoin* créé en 2009 est de loin la principale, et de la technologie sur laquelle elles s'appuient : les réseaux pair à pair et la *blockchain*.

L'idée centrale est de créer un ordinateur virtuel, un ordinateur-monde, dont le fonctionnement ne s'appuie pas sur une machine particulière, mais sur une multitude de machines indépendantes, liées en un réseau robuste.

Un système disséminé et permanent

Ce réseau dit pair à pair, car aucun nœud central ne le dirige et ne le contrôle, assure que les programmes de l'ordinateur-monde continuent de fonctionner quoi qu'il arrive à l'un de ses composants, voire à plusieurs d'entre eux. Aucun n'est indispensable, tous communiquent sur un pied d'égalité. Ils se suppléent, faisant fonctionner les mêmes instructions et gérant une mémoire collective recopiée partout à l'identique, la *blockchain*. Ils s'occupent aussi à chaque instant de créer un consensus sur les informations qu'ils détiennent.

Ce réseau est conçu pour que, une fois en marche, l'ordinateur-monde auquel il donne vie ne s'arrête plus et ne puisse être pris en main par personne. Les règles fixées au départ pour ses programmes s'exécutent sur toutes les machines du réseau sans que quiconque puisse intervenir. Le