

Prenons l'exemple du service Atmosphère (d'ailleurs installé au Centre européen pour la prévision météorologique à moyenne échelle ECMWF, en Angleterre, qui est aussi le Centre météorologique européen de référence). Les *Sentinel-4* et *Sentinel-5* fourniront des mesures journalières et à l'échelle globale de polluants tels que l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et les particules. *Sentinel-4*, en orbite géostationnaire, scrutera toutes les heures l'Europe, tandis que *Sentinel-5*, en orbite polaire, passera une à deux fois par jour au-dessus de chaque région du globe et permettra d'avoir une vision plus globale.

Le service Atmosphère s'appuiera notamment sur ces mesures pour alimenter des modèles de chimie atmosphérique à l'échelle globale et à l'échelle régionale. Ces modèles pourront fournir des données et des prévisions sur les concentrations de chaque polluant et sur la qualité de l'air. Ensuite, des alertes seront envoyées aux citoyens ou aux institutions abonnés à ces services. Un asthmatique pourra par exemple être informé par SMS à quel moment la pollution prévue pour les prochaines heures dépassera un seuil. Les municipalités pourront prendre des mesures préventives en cas de pic de pollution attendu. Aujourd'hui, faute d'informations intégrées, les alertes ne sont pas encore fiables, si bien que l'on ne réagit qu'après coup...

PLS

Quelles sont les retombées attendues en sciences de la Terre ?

C. C. : Aujourd'hui, nous sommes gênés par les formats différents de données fournies par des satellites divers. Les données de *Copernicus* seront « prémâchées », plus faciles à utiliser, même si les observations ne sont pas l'œuvre d'un même instrument. Cela sera notamment utile pour la question du rythme du réchauffement climatique. Depuis une dizaine d'années, l'augmentation de la température globale est plus lente que prévu. Pourtant, les gaz à effet de serre continuent à s'accumuler, le niveau des mers à monter, et la glace polaire à fondre ! Pour résoudre cette contradiction apparente, il faudrait tout regarder en même temps, au même endroit et sur le long terme, pour identifier ce qui ne fonctionne pas dans nos simulations

UNE CONSTELLATION DE SENTINELLES			
Le lancement des satellites <i>Sentinel</i> du programme <i>Copernicus</i> s'étalera jusqu'à la fin de la décennie. Un précurseur de <i>Sentinel-5</i> sera lancé dès 2016 pour combler le manque de données atmosphériques depuis la fin de la mission <i>Envisat</i> en 2012.			
Lancement	Instrument	Périodicité	Observations
SENTINEL-1 ■ 1A : lancé – 1B : 2015 ■ Radar ■ Maximum 12 jours ■ Surveillance des glaces, mouvements des sols		SENTINEL-2 ■ 2A : 2015 – 2B : 2016 ■ Imageur ■ 2 à 5 jours ■ Agriculture, érosion des sols, volcanisme	
SENTINEL-3 ■ 3A : 2015 – 3B : 2016 ■ 5 instruments ■ 2 jours ■ Température, topographie, végétation/couleur (terre et mer)		SENTINEL-4 ■ D'ici la fin de la décennie ■ Spectromètres UV/visible et infrarouge proche ■ Géostationnaire (observations toutes les 30 à 60 minutes) ■ Pollution atmosphérique, rayonnement solaire	
SENTINEL-5 ■ D'ici la fin de la décennie ■ Spectromètres UV/visible et infrarouge proche ■ 1 jour ■ Pollution atmosphérique, rayonnement solaire, climat		SENTINEL-6 (EN DISCUSSION) ■ Non défini ■ Altimètre radar ■ Non défini ■ Niveau des mers	

(les modèles sous-estiment probablement le stockage de l'énergie par l'océan). Le programme *Copernicus* devrait le permettre.

PLS

Quel est l'état d'avancement du projet ?

C. C. : Les services Atmosphère, Terre, Mer et Situations de crise ont atteint leur maturité et sont ou rentreront bientôt en phase opérationnelle (même si tous les satellites *Sentinel* ne sont pas encore lancés). Pour le service Sécurité, c'est plus compliqué, en raison des aspects politiques, mais aussi parce qu'en matière de sécurité, l'observation de la Terre n'est qu'un élément parmi d'autres. Quant au service Climat, il n'est pas encore sur pied.

PLS

L'enjeu de *Copernicus* n'est-il pas aussi de donner à l'Europe une autonomie dans ces domaines ?

C. C. : Il existe certainement des enjeux stratégiques liés à ce programme, qui renforcera la place de l'Europe dans plusieurs domaines clefs. Grâce à *Copernicus*, l'Europe deviendra sans doute dans quelques années le leader mondial dans l'observation de la Terre. Les États-Unis sont loin d'avoir un système similaire, et leur flotte de satellites est vieillissante et peu coordonnée. Je collabore depuis 15 ans avec des scientifiques de la NASA et de la NOAA (*National Oceanic and*

Atmospheric Administration). Au début, cela me permettait de profiter des données et de l'expertise de mes collègues américains. Mais depuis trois ou quatre ans, la collaboration a changé de sens : ce sont eux qui sont en demande de nos données et de nos codes de traitement.

PLS

Une innovation du programme *Copernicus* est que les données seront publiques. Pourquoi ?

C. C. : C'était une volonté dès le départ. L'Union européenne et l'Agence spatiale européenne ont alloué cette année 3,78 milliards d'euros au programme *Copernicus*. Cela s'ajoute aux 3,4 milliards d'euros déjà investis depuis une dizaine d'années. L'Europe espère évidemment des retours scientifiques et industriels directs, mais aussi des retours *via* les futurs utilisateurs des services. Le pari est que le libre accès aux données dans un format « prêt à l'emploi » suscitera de nombreuses utilisations et favorisera la création de services ajoutés (services d'alerte, de visualisation, applications éducatives, etc.). Selon des études commandées par l'Union européenne, les applications dérivées du programme *Copernicus* pourraient entraîner la création de 80 000 emplois en Europe d'ici 2030, et chaque euro investi produira quatre euros en retour. ■

Propos recueillis par Philippe RIBEAU-GÉSIPPE

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



La lunette de l'anthropologue

Les réseaux d'ordinateurs sont aujourd'hui aux sciences humaines et sociales ce que la lunette de Galilée fut à l'astronomie.

Beaucoup de domaines de la connaissance et de l'activité humaines sont métamorphosés par les apports de l'informatique, mais ce qui rend ces transformations intéressantes est que chacune est particulière.

Dans le domaine des sciences humaines, la transformation la plus ancienne est la possibilité, apportée par l'informatique, de modéliser des phénomènes jusque-là rétifs à la modélisation. Depuis les années 1950, nous savons par exemple qu'il est possible de décrire la grammaire d'une langue sous la forme d'un algorithme et qu'une telle description donne à la grammaire décrite un caractère prédictif, donc réfutable. Modéliser, simuler, confronter les prédictions du modèle aux observations est aujourd'hui devenu une méthode courante dans certaines branches des sciences humaines, qui sont à rapprocher ici des sciences de la vie, elles aussi avides de nouveaux langages de modélisation.

Mais une deuxième transformation a débuté, qui est quant à elle à rapprocher d'une transformation récente des mathématiques.

Dans l'histoire de nombreuses sciences, on distingue deux périodes, séparées par l'introduction des premiers instruments. Il y a ainsi une astronomie à l'œil nu, jusqu'à la lunette de Galilée, puis une astronomie instrumentée, une biologie à l'œil nu jusqu'au microscope de Van Leeuwenhoek, puis une biologie instrumentée, etc. Les mathéma-

tiques sont longtemps restées l'une des rares sciences à ne pas utiliser d'instruments ; jusqu'à ce que, au milieu des années 1970, Kenneth Appel et Wolfgang Haken démontrent un théorème (celui dit des quatre couleurs) en utilisant un ordinateur. L'ordinateur est la lunette du mathématicien.

Les sciences humaines, quant à elles, ont longtemps utilisé peu d'instruments, même si l'un des ancêtres de l'ordinateur a été construit par l'Américain Herman Hollerith en 1887 pour dépouiller un recensement,

**Rien ne garantit
que les interactions humaines
en ligne soient identiques
aux interactions hors ligne.**

c'est-à-dire pour instrumenter la démographie. Malgré cette exception, la collecte à l'œil nu des données a longtemps demandé aux ethnographes, linguistes, psychologues, etc. un patient et minutieux travail de terrain.

Cette situation change, car nous prenons conscience de l'existence d'un instrument qui permet d'observer les interactions sociales. Cet instrument n'est ni la lunette ni l'ordinateur, mais le réseau d'ordinateurs. En effet, beaucoup de nos interactions sociales sont aujourd'hui véhiculées par un tel réseau et, chaque fois que nous apprenons, travaillons, achetons, séduisons, etc. en utilisant un tel réseau, nous y laissons des traces qui constituent un précieux matériau pour les cher-

cheurs. Par exemple, quand un enseignant se demandait naguère si tel ou tel exercice permettait de mieux faire comprendre telle ou telle notion, il ne pouvait se fonder que sur sa longue expérience, ou réaliser une expérience avec un échantillon statistique de quelques dizaines d'élèves. Il peut désormais aussi utiliser les données collectées par les plate-formes d'enseignement en ligne, et se fonder ainsi sur un échantillon statistique beaucoup plus vaste.

Ces nouvelles méthodes posent de nouvelles questions auxquelles les chercheurs devront demain – et peut-être dès aujourd'hui – apporter des réponses. La première est celle des limites que l'éthique de la recherche impose à ce genre de collecte de données. Si l'observation statistique du comportement humain est possible, les réseaux permettent aussi celle du comportement d'une personne particulière, qui peut constituer une grave intrusion dans sa vie privée.

Une deuxième est que rien ne garantit que les interactions humaines en ligne soient identiques aux interactions hors ligne. Mais rien ne garantit non plus que les mœurs des Samoanes soient identiques en présence de l'ethnographe qui les consigne et en son absence. Car, dans les sciences humaines comme ailleurs, l'observation perturbe toujours le système observé. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES chronique de Gérald Bronner



Pourquoi les soucoupes volantes n'existent pas

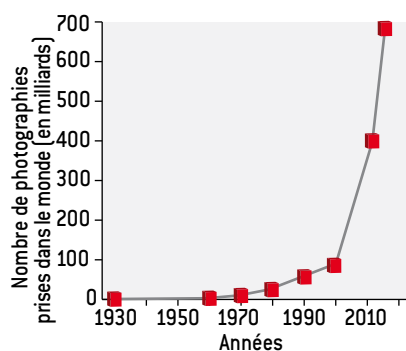
Le nombre d'« observations » d'OVNI devrait suivre la courbe exponentielle du nombre des photographies prises depuis les années 1950, ce qui n'est pas le cas.

En 2013, le ministère britannique de la Défense a fermé le bureau de renseignement qui était chargé des recherches concernant le phénomène OVNI. Une partie des réseaux sociaux a ricané, une autre s'en est émue en criant parfois au complot.

Qu'en penser ? Si l'histoire de la littérature n'a pas attendu le XX^e siècle pour évoquer la possibilité d'une intelligence extraterrestre, c'est en 1947 que, pour la première fois, le terme « soucoupe volante » est évoqué par Kenneth Arnold. Ce riche industriel américain s'envola le 24 juin 1947, avec son avion personnel. Il survolait les Monts Cascade de l'État de Washington lorsqu'il aperçut neuf appareils volants. Ils avaient une forme discoïdale à l'avant et triangulaire à l'arrière. Il ne put les suivre dans la mesure où ils lui paraissaient voler à quelque 2 000 kilomètres par heure ! Arnold eut le sentiment qu'ils rebondissaient dans l'atmosphère comme des « soucoupes » le feraient sur un lac. Son témoignage fit le tour du monde. Et ce sont bien des soucoupes volantes que des milliers de personnes prétendent voir peu après, plutôt que des engins ressemblant à la description d'Arnold !

Ces observations affluent souvent par vagues. Après le témoignage d'Arnold, une première vague de phénomènes fut déclarée aux États-Unis, puis, quelques années plus tard, l'épidémie toucha la France. Si l'intérêt pour le phénomène OVNI précède généralement les vagues d'observations, c'est que plus grand est le nombre de regards tournés vers le ciel, plus grandes sont les chances de prendre des vessies pour des lanternes.

Cette interprétation paraît attestée par le fait que les statistiques effectuées entre 1947 et 1995 montrent que le mois de l'année où les témoignages sont les plus abondants est juillet, tout simplement parce que nous passons plus de temps dehors à cette saison et que cela augmente la proportion d'observateurs sincères de nuages aux formes bizarres, de satellites ou de ballons sondes qui seront pris par certains pour ce qu'ils ne sont pas.



Mais, répondraient ceux qui « veulent y croire », pourquoi ne pas supposer que plus il y a d'observateurs, plus les chances sont importantes de déceler l'existence de discrets visiteurs extraterrestres ?

Si c'était le cas, les preuves de l'existence de vaisseaux extraterrestres auraient explosé, parce que le nombre de photographies prises dans le monde a suivi une courbe exponentielle (voir le graphique). Le développement des téléphones portables en mesure de prendre des photographies explique en partie ce phénomène spectaculaire. Par conséquent, puisque le nombre de possibilités d'enregistrer le réel

et de verser ces enregistrements sur Internet a progressé de façon exponentielle, les preuves auraient dû faire de même. Or ce n'est pas ce que l'on constate. Pour la France, par exemple, on a enregistré des pics d'observations de ces phénomènes : en 1954 (après la vague américaine) ou en 1976 (époque où Jean-Claude Bourret, présentateur du journal télévisé, popularisa le thème OVNI) qui tiennent à des modes. Ainsi, malgré la multiplication des appareils qui nous permettraient d'apporter des témoignages adossés à des preuves, on n'enregistre pas de frémissement notable de preuves de l'existence de visiteurs spatiaux à partir des années 2000.

Plusieurs hypothèses sont possibles. On peut d'abord supposer qu'il est probable que les soucoupes volantes n'existent pas. On peut ensuite considérer que les extraterrestres ont pris conscience de notre développement technologique (le téléphone portable) et qu'ils se montrent moins (mais un peu tout de même, car il demeure des observations). Enfin, supposer que les extraterrestres ont développé, conjointement à la multiplication des appareils photo, une technologie de furtivité accrue (mais une fois de plus imparfaite, car ils sont vus de temps en temps).

En toute raison, il n'est pas possible d'apporter une réponse définitive à ces questions, mais tous ceux qui savent qu'en science on doit privilégier la parcimonie interprétative devineront à quelle hypothèse il convient raisonnablement de donner crédit. ■

Gilles BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

Enseigner le numérique à l'école, une nécessité

par Thierry Vieville, sur le blog *Intelligence mécanique*

Dans un article publié récemment sur le blog Internetactu (<http://bit.ly/1n58dj0>), son rédacteur en chef Hubert Guillaud s'insurge contre l'enseignement de l'informatique à l'école et, si l'on suit son raisonnement jusqu'au bout, contre l'intérêt même de faire comprendre à chaque enfant les fondements scientifiques des technologies numériques.

L'argument principal est que « aussi omniprésente que soit une technologie, nous n'avons pas besoin de savoir comment elle fonctionne ». C'est effectivement l'argument des multinationales du secteur numérique, qui nous expliquent que leurs produits sont si faciles à utiliser qu'il suffit de les consommer. Ce raisonnement n'est sans doute pas étranger au fait que la France est aujourd'hui complètement dominée dans le secteur mondialisé du numérique.

Mais cela va plus loin. Ne pas vouloir comprendre comment le numérique fonctionne est une régression intellectuelle. Dès lors qu'il leur serait refusé de s'initier aux fondements scientifiques des technologies numériques, les jeunes ne pourraient en construire que des représentations « mythiques ».

Or que se passerait-il dans une société sans éducation au numérique ? Le savoir numérique ne serait que de la mémorisation. Sans comprendre les lois sous-jacentes, on ne peut rien inférer, mais seulement réciter. Le savoir-faire numérique ne serait que de la répétition : sans comprendre comment cela fonctionne, on ne peut pas innover. Et le savoir-être numérique serait limité à la consommation. Gageons que, comme dans d'autres domaines, le vide laissé par le manque de connaissances sur le numérique serait comblé par des « maîtres à penser », qui sauront construire un discours rassurant.

Sans éducation au numérique, nos enfants n'auront pas la possibilité d'être

acteurs de la construction de leur environnement numérique, et donc de la société qui sera la leur demain. Ils devront se contenter de subir. La liberté numérique finit là où l'ignorance informatique débute.

Mais quels sont au juste les arguments avancés contre l'enseignement du numérique à l'école ? Premièrement, au motif que l'informatique requiert une nouvelle façon d'enseigner – le tableau noir et les livres ne sont pas suffisants ! –, il faudrait surtout s'intéresser aux nouvelles façons d'enseigner, sans s'encombrer d'informatique. Cet argument suppose que le résultat de l'éducation est secondaire et que seule compte la méthode

La liberté numérique commence là où l'ignorance informatique finit.

pédagogique. Pour ma part, peu m'importe la méthode, je fais confiance aux femmes et aux hommes dont c'est le métier d'enseigner pour former les jeunes générations.

Par ailleurs, c'est oublier que l'apprentissage de l'informatique fait l'objet d'études pluridisciplinaires précises depuis plusieurs années, tant en France (citons le laboratoire Sciences, techniques, éducation, formation de l'École normale supérieure de Cachan) qu'à l'international. Reposer sans cesse la question de ce « que serait un enseignement de l'informatique dans le cadre de l'école, et pour apprendre quoi » est en fait obsolète : on le sait, et on est déjà en train de l'enseigner, en terminale S en France ainsi que dans d'autres pays européens.

Second argument : il y aurait « d'autres façons de soutenir l'apprentissage de l'informatique que de passer par la création d'un nouveau contenu disciplinaire avec des enseignants spécialisés ». Certes. Mais pourquoi rejeter d'emblée un outil existant qui garantit à tous un enseignement gratuit et de qualité, l'Éducation nationale ?

Réduire les excellentes initiatives extrascolaires d'éducation au numérique (*Magic Makers*, *École 42*, *Simplon.co*, etc.) à des alternatives à l'éducation nationale, c'est se tromper d'un facteur 1 000. Ces initiatives touchent quelques milliers de jeunes de 13 à 18 ans, alors que plusieurs millions sont concernés !

La question n'est pas de savoir comment éduquer « des jeunes » au numérique, mais comment éduquer des millions de jeunes au numérique. Et refuser la mise en place d'un enseignement généralisé, c'est proposer que seuls des privilégiés bénéficient de cette éducation, par des activités périscolaires ou dans les établissements favorisés.

L'apprentissage pour tous de la science informatique est indispensable. Mais est-il réalisable ? Des arguments tels que « c'est trop cher », « les professeurs n'y arriveront pas » ou « cela se fera au détriment d'autre chose » ne tiennent pas devant les retours d'expérience : l'enseignement de la science informatique a été introduit depuis 2012 comme spécialité en classe de terminale S pour un coût minime et avec succès. Et ce sans empiéter sur les autres spécialités. Il ne reste plus qu'à le généraliser progressivement, au rythme des moyens disponibles et de la formation continue des enseignants. ■



Thierry VIEVILLE est directeur de recherche en neurosciences computationnelles à l'Inria et auteur du blog *Intelligence mécanique* <http://www.scilogs.fr/intelligence-mecanique>

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.



DOSSIER

Réinventer le vivant

Quels enjeux pour la biologie de synthèse?

Fabriquer des formes minimales de vie, explorer de nouveaux codes génétiques, modifier génétiquement des organismes pour qu'ils produisent de nouvelles fonctions, concevoir et construire un génome synthétique viable... Ces dernières années, les projets de recherche renouvelant les approches de l'origine de la vie et de la compréhension du vivant se multiplient, suscitant enthousiasme et débats.

Depuis les années 1990, avec l'avènement du séquençage massif et de la bio-informatique, la recherche en biologie a amorcé un tournant. De nouvelles disciplines ont émergé. La biologie des systèmes utilise l'ensemble des données collectées sur un organisme, un organe ou une cellule afin de modéliser le fonctionnement de systèmes vivants dans leurs moindres détails. La biologie de synthèse, avec l'aide de la biologie des systèmes et de l'ingénierie, vise à concevoir des systèmes complexes fondés sur le vivant ou inspirés du vivant, et dotés de fonctions absentes dans la nature.

Que permet aujourd'hui la biologie de synthèse? Quels sont ses objectifs, ses applications à court et moyen termes, ses limites? Quels sont ses impacts sur la société? Telles sont les questions qu'abordent les trois articles de ce dossier, à travers un exemple de biologie des systèmes (voir l'article de Markus Covert, page 20), une présentation de la biologie de synthèse (voir l'article de François Képès, page 28) et une réflexion sur la façon dont les sciences sociales pourraient accompagner cette discipline émergente (voir l'article de Pierre-Benoit Joly et Benjamin Rimbault, page 36). Comprendre ces nouvelles approches de la biologie est une étape indispensable pour mesurer les enjeux et les risques potentiels associés.

– Marie-Neige Cordonnier