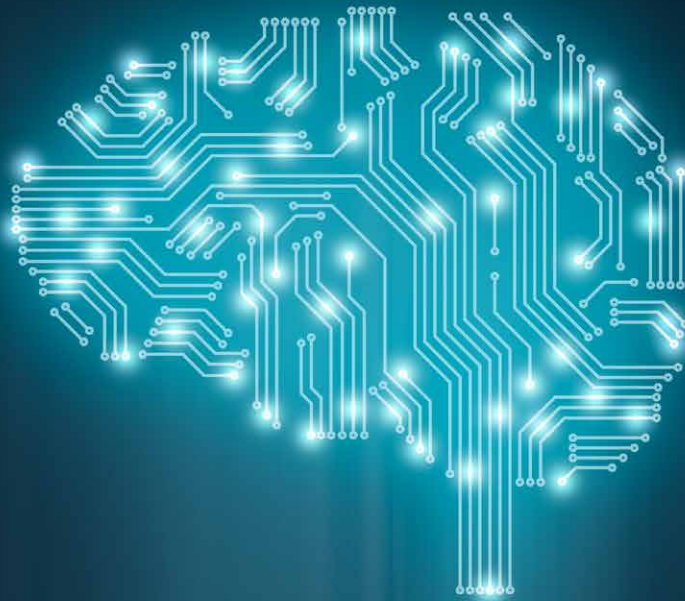


Le CAHIER DES PONTS

# L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

NUMÉRO 1 - MARS 2019



École des Ponts  
ParisTech

Carte blanche à Axel Parmentier (CERMICS, École des Ponts ParisTech)

**Mathieu Aubry**

Chercheur dans l'équipe IMAGINE  
du LIGM

**Pierre-Alain Langlois**

Doctorant dans l'équipe IMAGINE  
du LIGM

**Jérémie Guez** (BNP Paribas)

**Kévin Dedieu** (AXA)

**Dominique Volot** (Artelia)

# SOMMAIRE

**3** Édito Sophie Mougard

**4** Carte blanche à Axel Parmentier

**8** Percer le mystère des réseaux  
de neurones profonds Mathieu Aubry

**10** Éclairer le BIM avec la vision  
Pierre-Alain Langlois

**12** Du côté des entreprises

**14** Les essentiels

**15** Quiz





**SOPHIE MOUGARD**

Directrice de l'École des Ponts ParisTech

# ÉDITO

Depuis sa création, l'École des Ponts ParisTech s'inscrit dans une démarche de diffusion des connaissances, que les *Annales des ponts et chaussées* ont incarnée de 1831 à 2004. Quinze ans après l'arrêt de leur parution, l'École souhaite renouer avec cette tradition, en lançant ce premier numéro du *Cahier des Ponts*. Cette revue concentre pour vous des connaissances scientifiques sur une thématique en particulier. La parole est donnée à plusieurs acteurs de l'École, issus de domaines différents, chacun révélant une nouvelle facette du sujet. Au fil des pages, la communauté des Ponts au sens large – étudiants, chercheurs, enseignants, mais aussi entreprises, alumni, etc. – découvrira les projets de recherche et d'enseignement en cours. Véritable miroir des activités de l'École, *Le Cahier des Ponts* est aussi un espace où s'esquissent les mondes de demain.

Le premier numéro est axé sur l'intelligence artificielle, parce qu'elle constitue un enjeu central dans de très nombreux domaines, tels que la mobilité, l'industrie, les loisirs, la finance, la santé et bien d'autres. La France tient dans cet ensemble une place de choix, notamment grâce à son excellence en mathématiques et à ses grandes écoles d'ingénieurs. Dans un tel contexte, il est crucial de se pencher sur l'intelligence artificielle pour bien discerner ses enjeux.

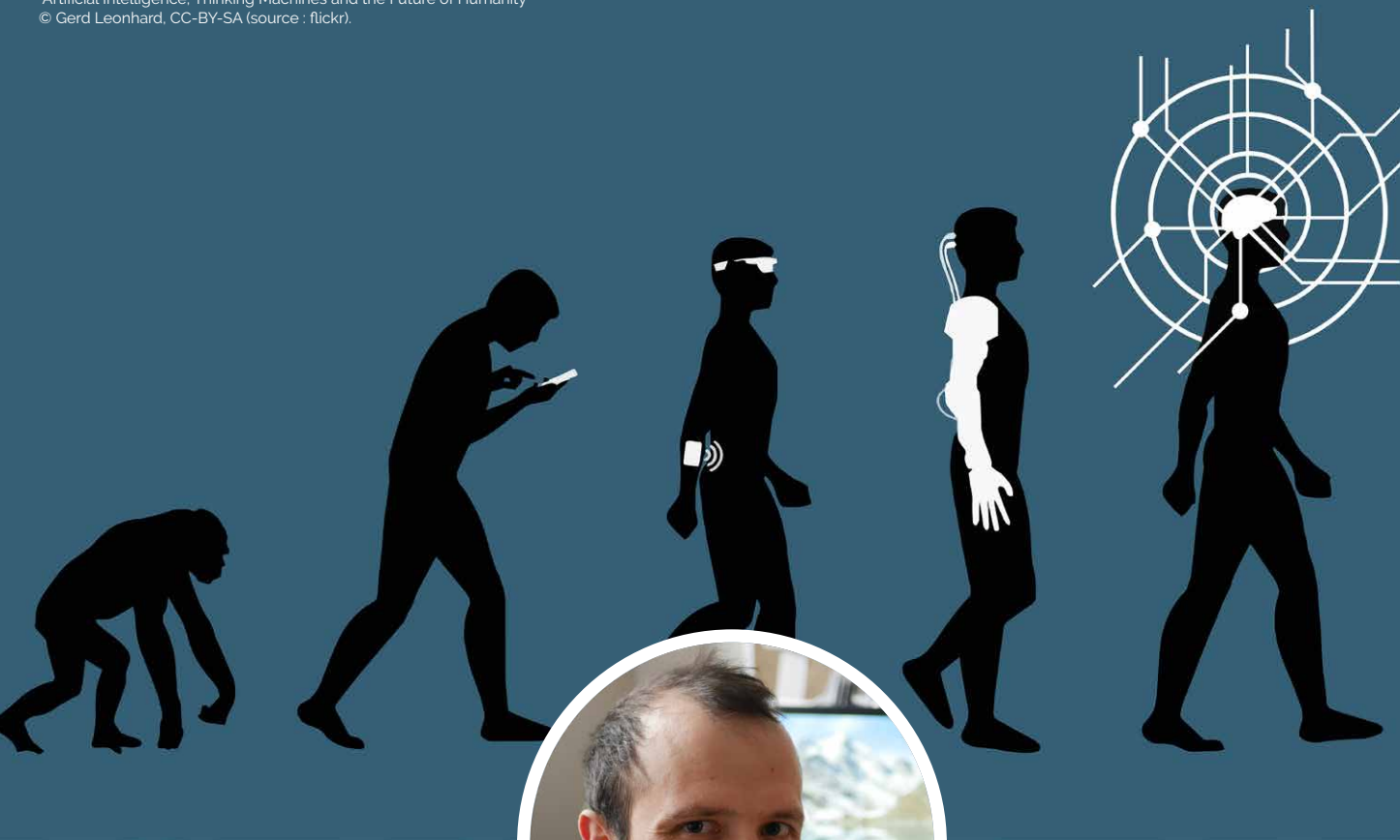
À l'École des Ponts ParisTech, les chercheurs des laboratoires se sont emparés du sujet dans leurs projets et avec leurs étudiants. Dans le domaine de l'enseignement, la [formation d'ingénieur](#) et les [Mastères Spécialisés®](#), centrés sur l'approche de la conception et de la construction via l'intelligence artificielle, étudient aussi ces problématiques.

C'est par la pluralité de ces approches que ce premier numéro aborde l'intelligence artificielle sous la forme de quatre articles. Le regard d'Axel Parmentier, chercheur de l'École, donne la ligne directrice de ce premier *Cahier*, qu'il ouvre sous l'angle de la maintenance prédictive. Viennent s'y greffer les approches d'un enseignant, d'un doctorant et de trois entreprises. Cette mosaïque de points de vue permet de faire un tour d'horizon des problématiques actuelles de l'intelligence artificielle, complétées par des définitions, des suggestions de lecture et bien d'autres informations.

Une fois le numéro refermé, nous espérons que *Le Cahier des Ponts* vous aura donné l'occasion d'enrichir vos connaissances et de faire germer des idées. S'il est pour vous le point de départ de réflexions stimulantes et vous inspire dans vos projets à venir, nous aurons réussi notre pari.

# CARTE BLANCHE À

"Artificial Intelligence, Thinking Machines and the Future of Humanity"  
© Gerd Leonhard, CC-BY-SA (source : flickr).



AXEL  
PARMENTIER



Chercheur au  
laboratoire CERMICS  
(École des Ponts ParisTech)  
en recherche opérationnelle

Chercheur et enseignant au sein du CERMICS (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques et Calcul Scientifique), le laboratoire de mathématiques appliquées de l'École des Ponts ParisTech, Axel Parmentier est en première ligne de cette révolution scientifique et technologique.

**A**vant d'être cybernétique, l'intelligence artificielle (IA) exige d'abord de l'intelligence humaine. Et c'est bien là ce qui anime les équipes de recherche de l'École des Ponts ParisTech. Comme ses pairs qui s'activent à repousser les limites de l'IA en France et dans le monde, Axel Parmentier est un des acteurs de cette révolution scientifique et technologique en train de bouleverser d'innombrables activités : de

l'économie numérique au véhicule autonome, en passant par l'optimisation des *process* industriels. « Ici, nous sommes à la fois les héritiers de plus d'un siècle de traditions et de compétences très fortes en mathématiques appliquées et les acteurs d'une discipline scientifique et technologique en pleine effervescence », explique le jeune chercheur.

L'intelligence artificielle recouvre aujourd'hui trois types d'applications essentielles. La première est la *data-mining*, c'est-à-dire la description d'ensembles gigantesques de données pour en extraire un résumé pertinent. C'est le gros des applications aujourd'hui matures dans l'économie traditionnelle, indique Axel Parmentier. La deuxième, c'est l'utilisation des données pour faire des prédictions via l'apprentissage supervisé. C'est notamment un sujet d'expertise de l'équipe d'IMAGINE (au laboratoire d'informatique Gaspard-Monge), en particulier dans le domaine de la vision par ordinateur. Enfin la troisième est l'aide à la décision, qui va permettre de recommander la meilleure décision possible sur des problèmes complexes en s'appuyant sur des modèles d'optimisation « *data-driven* », et sur laquelle travaille notamment l'équipe optimisation du CERMICS.

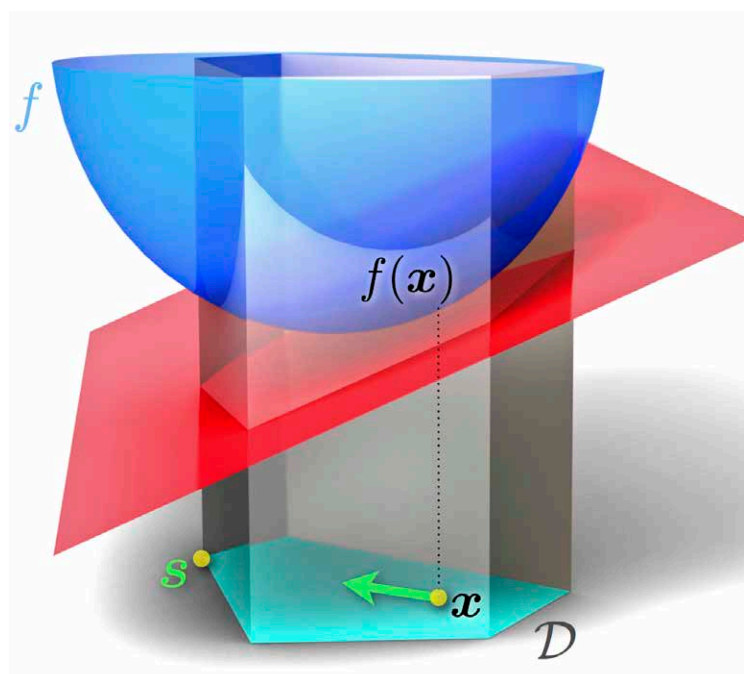
**« Le laboratoire ya créé entre autres, avec les équipes de R&D de la compagnie aérienne, un algorithme qui construit les séquences de vols pour les avions et les équipages et qui permet d'opérer ces vols à moindre coût ».**

Dans cette grande famille de l'IA, Axel Parmentier, un X-Ponts de 29 ans, est un expert de la recherche opérationnelle. Cette discipline combine mathématiques appliquées et informatique pour aider les industriels à mieux allouer leurs ressources. Elle fournit par exemple des outils pour planifier une chaîne logistique ou gérer des réseaux d'énergie (*smart grids*).

Elle est mise en application au sein de l'École à travers une chaire avec Air France inaugurée fin 2016, intitulée « Recherche Opérationnelle et Apprentissage », la première en France à porter sur l'interface entre ces disciplines. Le laboratoire y a créé entre autres, avec les équipes de R&D de la compagnie aérienne, un algorithme qui construit les séquences de vols pour les avions et les équipages et qui permet d'opérer ces vols à moindre coût. Un problème épineux sur lequel butent les logiciels commerciaux. Sur ce type de problème, il n'est pas rare qu'un algorithme puisse résoudre en quelques secondes des problèmes à 500 vols, en quelques heures, des problèmes à 600 vols, mais être totalement incapable de résoudre des problèmes à 700 vols. « Cette barrière s'explique, non par des raisons de puissance de calcul », précise Axel Parmentier, « mais par un mur de complexité théorique. Il faut donc définir des modèles mathématiques et des algorithmes pour trouver des solutions, ce qui constitue de beaux sujets de thèse pour notre laboratoire ! ». ➔

## BIOGRAPHIE

- Diplômé de l'École polytechnique, X 2009 ; entré dans le corps des ingénieurs des ponts, des eaux et des forêts ; IPEF 2012
- Auteur d'une thèse en recherche opérationnelle sous la direction de Frédéric Meunier au CERMICS, en partenariat avec Air France, sur l'optimisation simultanée des rotations avions et équipages
- Lauréat du prix jeune chercheur de la ROADEF (société française de recherche opérationnelle) en 2016 et du prix de thèse AMIES (Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société) en 2017
- Post-doctorat en 2016 à l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle sur l'utilisation de l'apprentissage automatique dans les solveurs de programmation linéaire en nombres entiers
- Chercheur au CERMICS depuis 2016
- Initiateur et co-titulaire de la chaire « Recherche Opérationnelle et Apprentissage » entre Air France et l'École des Ponts ParisTech
- Enseigne la recherche opérationnelle en deuxième année de la formation d'ingénieur de l'École des Ponts ParisTech



En recherche opérationnelle, on souhaite trouver la meilleure décision à prendre ; en apprentissage automatique, il s'agit de trouver le modèle qui fait les meilleures prédictions. Mathématiquement, cela revient à trouver le minimum d'une fonction, ici le point en bas de la sphère bleue. Beaucoup d'algorithmes efficaces, comme l'algorithme Frank-Wolfe illustré ici, s'appuient sur la géométrie.  
"Frank-Wolfe Algorithm" © Stephanie Stutz, CC-BY-SA (source : Wikimedia Commons).

## DÉFINITIONS | AXEL PARMENTIER

### IA (Intelligence Artificielle)

Théories et technologies permettant à des machines de simuler l'intelligence. En pratique, une problématique (question, tâche) est modélisée sous la forme d'un problème mathématique, qui est résolu à l'aide d'algorithmes exécutés sur un ordinateur, en tirant souvent parti de données. Les disciplines derrière l'IA sont l'apprentissage automatique et la recherche opérationnelle, qui s'appuient sur l'optimisation et les statistiques.

### Modéliser

Traduire une réalité sous une forme mathématique. C'est une étape nécessaire pour lui appliquer les méthodes de l'intelligence artificielle.

### Problème mathématique

Une question à laquelle un ordinateur doit être en mesure de répondre. Par exemple, étant donné une carte routière, une origine et une destination, le problème du plus court chemin consiste à trouver le meilleur itinéraire entre l'origine et la destination.

### Algorithme

Une « recette » permettant à un ordinateur de résoudre un problème. C'est une suite non ambiguë d'opérations élémentaires que l'ordinateur exécute sur une donnée d'entrée d'un problème pour trouver le résultat.

### Apprentissage automatique (*machine learning*)

Discipline qui construit des algorithmes permettant aux ordinateurs d'apprendre à résoudre certains problèmes en s'appuyant sur des données. L'apprentissage supervisé permet de prédire efficacement la réponse à des questions fermées, comme « cet email est-il un spam ? » Un champ de recherche actif, l'apprentissage par renforcement, s'intéresse au contrôle de systèmes, comme conduire une voiture.

### Réseau de neurones

Un type d'algorithme en apprentissage automatique.

### Deep learning

Un ensemble de méthodes récentes permettant de construire des réseaux de neurones efficaces.

### Recherche opérationnelle

Discipline mathématique qui fournit des algorithmes d'aide à la décision, principalement dans un contexte industriel.

### Optimisation

Branche des mathématiques qui fournit des méthodes et des algorithmes pour trouver la « meilleure » solution parmi un ensemble de solutions possibles.

### Statistique

Branche des mathématiques s'intéressant à l'étude de phénomènes via la collecte, l'analyse et l'interprétation de données.

L'IA existe depuis des décennies, mais elle a très récemment connu des avancées importantes dans un nombre croissant de secteurs. La raison ? « Ces progrès sont rendus possibles par l'augmentation de la puissance des ordinateurs ou la mise à disposition de données massives (*big data*), rappelle Axel Parmentier, mais la clé tient au développement d'algorithmes de plus en plus performants, c'est-à-dire au travail des chercheurs comme ceux de notre laboratoire ».

L'algorithme, c'est selon ses mots « l'équivalent pour un ordinateur de la recette de cuisine pour un pâtissier » qui, grâce à une succession d'opérations mathématiques élémentaires, permet à l'ordinateur de réaliser des tâches comme prendre des décisions ou faire des prédictions. Une ligne de code d'un logiciel, c'est une opération élémentaire. Là réside le travail quotidien des chercheurs ! On peut penser par exemple à l'algorithme AlphaGo Zero de la société DeepMind qui a battu le cerveau humain en 2015 dans le jeu de go, qui ne constitue rien d'autre qu'une suite de prédictions et de décisions.

**« Avec les algorithmes de dernière génération, les progrès se chiffrent en milliers de milliards de fois ! »**

« Les progrès des algorithmes ont été colossaux ces dernières décennies. Prenez l'exemple du *deep learning* : les modèles fonctionnaient mal voilà 20 ans pour partie par manque de données à exploiter, mais surtout parce qu'on ne disposait pas encore de bonnes architectures de réseaux de neurones ». Ainsi, faire tourner les algorithmes de 1990 de programmation linéaire en nombres entiers (un outil phare de la recherche opérationnelle) avec les ordinateurs actuels permet des gains de vitesse de l'ordre de centaines de milliers de fois par rapport aux ordinateurs de l'époque. Avec les algorithmes de dernière génération, les progrès se chiffrent en milliers de milliards de fois ! Des progrès des algorithmes d'apprentissage et de vision par ordinateur découlent les avancées en matière de reconnaissance automatique d'objets dans des séquences vidéos, une technologie déployée dans la voiture autonome.

L'École des Ponts ParisTech participe aux progrès de la recherche en ce qu'elle développe de nouveaux modèles et améliore la compréhension de ceux produits par la communauté scientifique. De fait, ses partenaires industriels comme Air France, EDF ou Total recherchent des algorithmes pouvant résoudre leurs problèmes, mais surtout la garantie scientifique du résultat. « Avant de valider des algorithmes qui permettent l'établissement d'un planning de centrale électrique ou le déplacement d'une voiture, on doit être certain de la qualité des résultats qu'ils retournent, ce

qui nécessite de comprendre leurs propriétés mathématiques », explique le chercheur. « C'est la beauté des mathématiques : on modélise une problématique concrète sous forme de problème mathématique abstrait, on construit une belle théorie pour résoudre ce problème et on obtient des algorithmes efficaces qui trouvent une multitude d'applications insoupçonnées ». Et de citer la programmation linéaire en nombres entiers, qui permet de modéliser une grande variété de problèmes. Elle trouve aujourd'hui des applications qui vont du placement de spots de publicité sur une chaîne de télévision au planning d'une compagnie aérienne, en passant par la gestion optimale des vallées de barrages hydroélectriques, ou encore l'organisation de la production pour un industriel.

Toutes ces facettes de l'IA sont à la fois objets de recherche et sujets d'enseignement pour les élèves ingénieurs ou les nombreux doctorants de l'École. Les besoins de l'économie et le progrès scientifique conduisent même au mélange des disciplines au sein de ses laboratoires. C'est le cas par exemple entre le CERMICS et IMAGINE qui opèrent traditionnellement sur des champs distincts : les probabilités, l'analyse numérique et l'optimisation pour le premier, les statistiques, la prédiction, la vision artificielle et le *machine learning* pour le second. L'évolution des technologies, comme dans l'apprentissage par renforcement popularisé par AlphaGo, brouille les frontières entre optimisation et *machine learning*. « Cela conduit à des recherches croisées entre nos équipes, note Axel Parmentier. Ces travaux trouvent leur application chez notre partenaire industriel Air France autour de la maintenance prédictive des avions, c'est-à-dire la capacité à utiliser les données qui sont remontées par l'avion pour anticiper avec précision quand telle ou telle partie d'un appareil est susceptible de dysfonctionner et éviter ainsi des pannes ». En combinant les domaines de la prédiction et de la décision, leur objectif commun est de faire progresser connaissances pratiques et théoriques.

**« Notre niveau scientifique est un gage d'avenir, y compris pour répondre à la mission première de l'École : former des ingénieurs compétents pour servir les besoins de nos entreprises et de la société de demain ».**

« À l'heure de l'intelligence artificielle, les applications potentielles des mathématiques appliquées deviennent quasi infinies, mais notre priorité absolue demeure l'excellence académique », affirme Axel Parmentier. Comme pour les autres champs de recherche, cette quête d'excellence se mesure aussi par un rythme régulier de publications dans des revues scientifiques de rang A, des participa-

tions fréquentes aux conférences qui donnent le « la » dans cet univers, une coopération avec des universités européennes ou américaines ou une collaboration étroite avec des instituts comme Inria (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique). Une des équipes du CERMICS a ainsi développé une compétence de premier plan avec cet institut dans le domaine de la simulation moléculaire, qui devrait devenir un axe majeur de progrès ces prochaines années pour l'industrie chimique ou pharmaceutique.

En fait, conclut Axel Parmentier, « notre niveau scientifique est un gage d'avenir, y compris pour répondre à la mission première de l'École : former des ingénieurs compétents pour servir les besoins de nos entreprises et de la société de demain ». Et en la matière, ce chercheur a un message aux élèves : au-delà des effets de mode, une connaissance de base en apprentissage automatique va devenir un pré-requis dans le bagage scientifique d'un ingénieur. Maîtrisez-le en plus d'un autre domaine d'expertise et vous serez la perle rare ». Cette discipline n'est-elle pas, selon lui, l'un des outils les plus puissants jamais créés *par l'homme* ? On en revient à l'intelligence humaine ! •

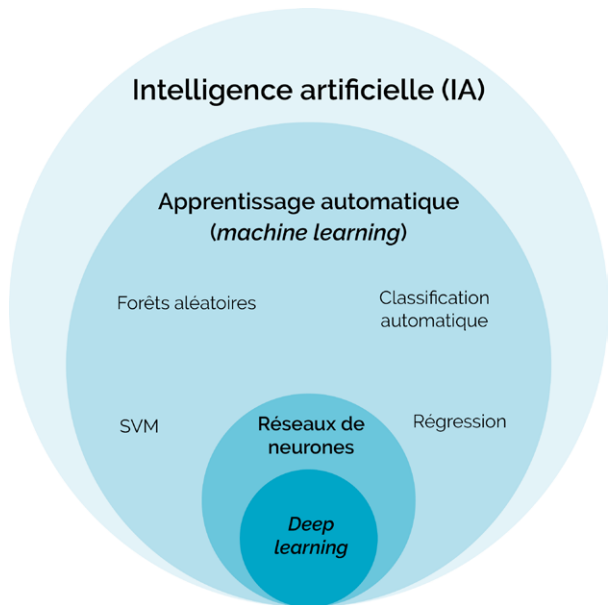


Schéma permettant de visualiser l'emboîtement des concepts de l'intelligence artificielle. © Laetitia Mussard, inspiré de « Carto IA deepLearning », © Bouliche, 2018, CC-BY-SA (source : Wikimedia Commons).

# PERCER LE MYSTÈRE DES RÉSEAUX DE NEURONES PROFONDS



## MATHIEU AUBRY

Chercheur dans l'équipe IMAGINE  
du LIGM (École des Ponts ParisTech)

## BIOGRAPHIE

Diplômé de l'École polytechnique, X 2006 ; diplômé du master MVA (Mathématiques, Vision, Apprentissage) de l'ENS Paris-Saclay, co-habilité par l'École des Ponts ParisTech ; ingénieur des ponts, des eaux et des forêts, IPEF 2011

Auteur d'une thèse en informatique sous la direction de Daniel Cremers (université technique de Munich) et de Josef Sivic (Inria) à l'ENS d'Ulm sur la représentation de modèles 3D pour l'alignement et la reconnaissance

Post-doctorat dans le groupe d'Alexei Efros à l'université de Californie, Berkeley

Chercheur dans l'équipe IMAGINE (Images Apprentissage Géométrie Numérisation Environnement) du LIGM (Laboratoire d'Informatique Gaspard-Monge), à l'École des Ponts ParisTech depuis 2014

L'engouement sans précédent pour l'intelligence artificielle trouve sa traduction dans le cursus de formation de l'École des Ponts ParisTech où Mathieu Aubry, un X-Ponts, intervient en tant qu'enseignant. « Les rapides développements technologiques et économiques de ces thématiques, par exemple dans la voiture autonome, la finance ou la robotique, et la forte demande actuelle du marché du travail suscitent évidemment une appétence croissante des élèves », relève-t-il.

Outre la « semaine data science » organisée chaque année à l'École, les étudiants sont exposés aux sujets de l'intelligence artificielle et de la *computer vision* par des cours d'ouverture dès la première année avant, pour certains, d'opter pour un parcours plus spécialisé en deuxième année via le cursus « Ingénierie mathématique et informatique » (IMI). Ce département de l'École compte aujourd'hui une cinquantaine d'élèves, un record ! Beaucoup d'entre eux suivent ensuite le master Mathématiques Vision Apprentissage (MVA) commun à plusieurs grandes écoles et universités (l'École des Ponts ParisTech, l'ENS Paris-Saclay, l'université Paris-Descartes, l'université Paris-Dauphine, l'École polytechnique, Telecom ParisTech, CentraleSupélec, l'ENS Ulm, Mines ParisTech, l'université Paris-13 et Inria). Formation de référence dans le domaine en France, ce master compte plus de 150 étudiants chaque année. Mathieu Aubry y a d'ailleurs été étudiant avant d'y enseigner.

**« Tout cela peut changer le travail d'un historien en automatisant les tâches fastidieuses pour lui permettre de se concentrer sur l'analyse ».**

Les connaissances en intelligence et en vision artificielles que Mathieu Aubry cherche à transmettre à ses étudiants, il les emploie au quotidien dans ses travaux de recherche, menés à l'École des Ponts ParisTech au sein de l'équipe IMAGINE (une composante du laboratoire d'informatique Gaspard Monge). Actuellement, dans le cadre d'un projet financé par

l'Agence nationale de la recherche (ANR), il s'emploie avec plusieurs doctorants à mettre au point des outils de reconnaissance d'images non photo-réalistes sur des toiles, gravures ou dessins anciens. Le but ? Permettre notamment aux historiens d'identifier automatiquement des détails sur un grand nombre d'œuvres, par exemple pour analyser quantitativement les récurrences d'un courant artistique ou d'une école de peinture. « Ce type de système pourrait aussi être utilisé pour identifier le filigrane du papier sur des documents anciens et les classer en masse. Tout cela peut changer le travail d'un historien en automatisant les tâches fastidieuses pour lui permettre de se concentrer sur l'analyse », explique Mathieu Aubry, qui collabore sur ce projet avec l'École des chartes, l'École normale supérieure ou encore l'université de Californie à Berkeley, où il a travaillé un an.

Mais le champ d'exploration de l'équipe, qui compte une vingtaine de chercheurs et de doctorants, est bien plus vaste. De fait, Mathieu Aubry, ses collègues et les doctorants travaillent sur une foule de sujets liés à la vision artificielle et l'apprentissage automatique.

Parmi ceux-ci, des projets liés à la représentation et la génération de modèles 3D entre autres avec Adobe, Thales, Facebook... Le point commun de ces projets réside dans l'apprentissage à l'aide de réseaux de neurones profonds ou *deep learning*, une méthode qui connaît un essor considérable depuis une célèbre publication en 2012 de l'équipe du canadien Geoffrey Hinton.

La meilleure compréhension et l'amélioration des algorithmes qui sous-tendent les réseaux de neurones profonds, ou encore le développement de nouveaux algorithmes constituent ainsi l'un des fondements des travaux de l'équipe. Ces réseaux de neurones fonctionnent bien aujourd'hui pour certaines tâches, comme reconnaître un objet lorsque l'on dispose de nombreuses images annotées. « Pour autant, expose Mathieu Aubry, il demeure une grande part d'empirisme et de caractère expérimental sur ce sujet, d'où le



terme de 'black box' parfois employé. On ne comprend pas bien ce bon fonctionnement de manière théorique. Et l'on ne saisit pas vraiment l'influence des données d'entraînement utilisées ou des 'poids' qu'on accorde à tel ou tel paramètre sur les résultats ». Dans cette veine, cette équipe de recherche vient de lancer par exemple avec Valeo une thèse Cifre pour expliquer, selon un modèle théorique, la régularité ou non des résultats livrés par un réseau de neurones : cela pourrait fournir certaines garanties sur les prédictions faites par le réseau, une propriété particulièrement souhaitable pour les questions de sécurité dans le cas des véhicules autonomes.

IMAGINE s'intéresse aussi à l'interaction entre la vision artificielle et la robotique dans le bâtiment, notamment avec le laboratoire Navier, pour apprendre à des

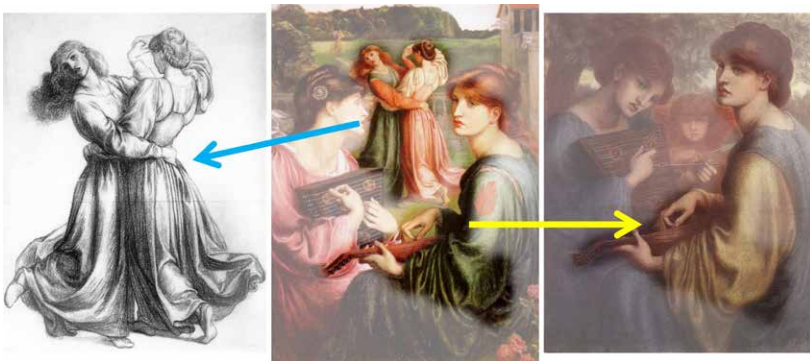
robots à interagir à partir d'images. Une thématique qui conduit l'équipe à collaborer avec Willow, une équipe-projet d'Inria, spécialisée dans la reconnaissance et la modélisation d'objets et de scènes tridimensionnels.

**« Le succès actuel des réseaux de neurones et de l'apprentissage profond est dû au fait qu'ils peuvent être mis en œuvre dans un grand nombre d'applications. Les scientifiques et les entreprises en imaginent en continu ».**

Mais l'intérêt pour l'intelligence artificielle dépasse le seul domaine de la recherche. En effet, « le succès actuel des réseaux de neurones et de l'apprentissage profond est dû au fait qu'ils

peuvent être mis en œuvre dans un grand nombre d'applications. Les scientifiques et les entreprises en imaginent en continu » insiste Mathieu Aubry, qui estime même que « chaque idée peut générer des start-up ». En matière de collaboration avec les jeunes pousses, l'équipe travaille notamment avec la société parisienne Deepomatic (ainsi qu'avec Airbus), dans le but de reconnaître des images sur des vidéos ou des réseaux sociaux à partir de très peu, voire pas, de données annotées.

On le voit donc, l'intelligence artificielle concerne divers domaines des sciences, mais aussi à diverses échelles : les laboratoires de recherche, les salles de classe et les entreprises. C'est la preuve que c'est un sujet à fort potentiel, qui intéresse l'avenir de tous. « Développer des compétences et de la recherche sur ces sujets prend du temps, mais c'est un véritable enjeu d'avenir pour l'École et notre pays », conclut Mathieu Aubry. •



Lien établi par un algorithme entre une peinture et deux études parmi une collection de 195 œuvres d'art de Dante Gabriel Rossetti. À gauche, *The Bower Meadow Study (Study of Dancing Girls)* étude à la craie, 1872, conservée au Birmingham Museum & Art Gallery. Au centre, *The Bower Meadow*, huile sur toile, 1872, conservée au Manchester Art Gallery. À droite, *The Bower Meadow*, pastel, 1871-1872, conservé au Fitzwilliam Museum à Cambridge (source : [www.wikiart.org](http://www.wikiart.org)).

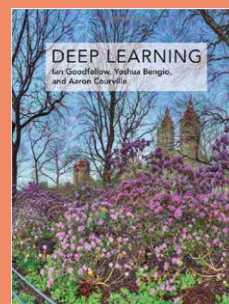


Mathieu Aubry vous conseille la lecture de trois références, disponibles à La Source, bibliothèque de l'École des Ponts ParisTech. Ces titres écrits par des experts offrent une première approche du sujet. D'un côté, l'article de la revue *Nature* résume les progrès récents permis par le *deep learning* dans divers domaines, de la reconnaissance d'objets à l'étude des génomes. De l'autre, deux manuels de référence permettent d'acquérir les bases en IA, illustrés par des exemples concrets, des exercices et des projets.

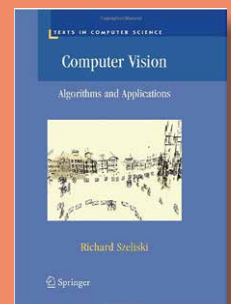
**Voir la bibliographie complète en page 14.**



LECUY, Yann, BENGIO, Yoshua et HINTON, Geoffrey, 2015, *Deep Learning*. In : *Nature*. 28 mai 2015. Vol. 521, n° 7553, p. 436-444. DOI 10.1038/nature14539.



GOODFELLOW, Ian, BENGIO, Yoshua et COURVILLE, Aaron, 2016, *Deep Learning*. The MIT Press. ISBN 978-0-262-03561-3.



SZELISKI, Richard, 2011, *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer. ISBN 1-8488-2934-5.

# ÉCLAIRER LE BIM AVEC LA VISION



## PIERRE-ALAIN LANGLOIS

Doctorant dans l'équipe IMAGINE du LIGM (École des Ponts ParisTech), thèse en cours sur la production automatique de maquettes numériques de bâtiments

## BIOGRAPHIE

Diplômé de l'École des Ponts ParisTech, IPC 2016 ; diplômé du master MVA de l'ENS Paris-Saclay, co-habilité par l'École des Ponts ParisTech

Lauréat du prix du meilleur stage scientifique de la Fondation des Ponts pour son stage de recherche à l'École polytechnique de Varsovie en 2014

Projet de recherche en apprentissage statistique mené avec une start-up, Pzartech Ltd., en partenariat avec l'équipe IMAGINE du LIGM

Projet de fin d'études de la formation d'ingénieur en 2018 chez Safran Identity & Security à Paris sur le suivi multi-objet, dans le domaine de l'apprentissage statistique

Doctorant dans l'équipe IMAGINE du LIGM depuis 2017. Travaux sur la production automatique de maquettes numériques de bâtiments

Au sein de l'équipe IMAGINE, cet ingénieur de l'École des Ponts ParisTech conduit une thèse qui met à profit le *machine learning* et la vision pour produire et exploiter plus facilement la modélisation numérique de bâtiments existants.

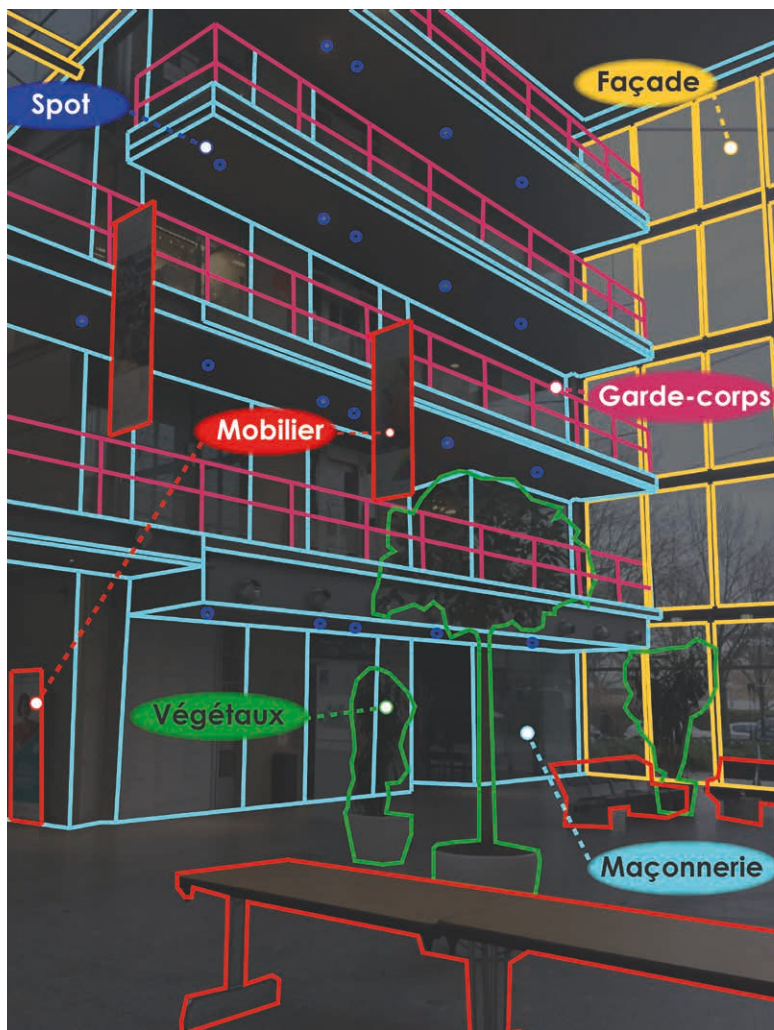
Pierre-Alain Langlois est un thésard heureux au sein d'IMAGINE, l'équipe de recherche de l'École intégrée au laboratoire d'informatique Gaspard Monge et centrée sur la vision artificielle, le *machine learning* et l'optimisation. C'est là en effet que cet ingénieur des Ponts, passé par le département IMI et le master de référence MVA (Mathématiques, Vision, Apprentissage), travaille depuis fin 2017 sur sa thèse qui porte sur la reconstruction sémantique de maquettes numériques à partir d'images dans le bâtiment. « C'est un cadre scientifique stimulant. L'équipe a un long historique dans le *machine learning* et publie chaque année dans des revues ou participe à des conférences majeures », se félicite le doctorant dont les directeurs de thèse sont Re-

naud Marlet d'IMAGINE et Alexandre Boulch de l'Onera.

« Dans le cadre du BIM, on cherche à constituer le jumeau numérique d'un bâtiment existant pour optimiser ses performances, par exemple en termes d'énergie ou d'acoustique ».

Son projet, qui s'inscrit dans le cadre de l'école doctorale MSTIC (Mathématiques et Sciences des Technologies de l'Information et la Communication) de l'université Paris-Est, vise à développer des algorithmiques permettant, à partir de simples images, de reconstruire la maquette 3D d'un bâtiment, dans laquelle chaque partie (fenêtres,

Objectif de la thèse : reconstruire automatiquement à partir d'images une maquette numérique, au sein de laquelle chaque élément est séparé et labellisé © Pierre-Alain Langlois, 2019.



murs, toits, etc.) est identifiée. « Dans le cadre du BIM [Building Information Modeling], on cherche à constituer le jumeau numérique d'un bâtiment existant pour optimiser ses performances, par exemple en termes d'énergie ou d'acoustique. Pour cela, il faut les outils permettant de caractériser facilement ces sous-ensembles », note Pierre-Alain Langlois.

**« Nous utilisons les réseaux de neurones : à partir de grosses bases de données d'images déjà décrites, le modèle apprend de lui-même. Il doit être à même ensuite de transformer des images jamais vues ».**

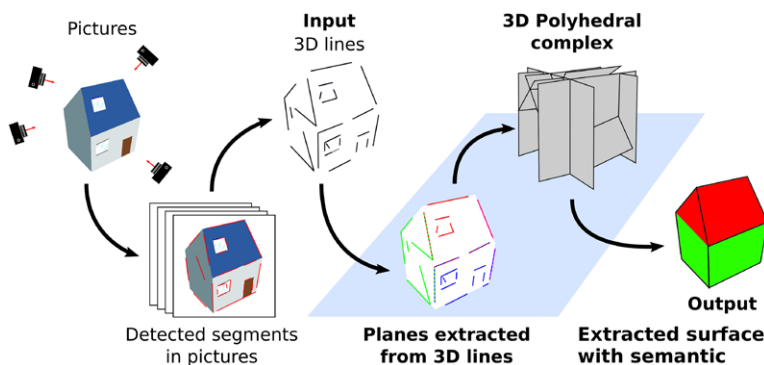
L'idée est de pouvoir, avec un simple smartphone, reconstituer une maquette en 3D, la classifier et la sémantiser,

c'est-à-dire en identifier les différents éléments, ce qui passe par la mise au point d'une bonne structuration des données. « Nous utilisons les réseaux de neurones : à partir de grosses bases de données d'images déjà décrites, le modèle apprend de lui-même. Il doit être à même ensuite de transformer des images jamais vues ». C'est le concept de la « *black box* » et des modèles d'algorithmes autoapprenants. « Notre travail consiste notamment à faire varier la forme et les paramètres de cette boîte noire pour approcher efficacement le résultat, même avec des images à faible définition ou peu texturées comme un mur blanc », c'est-à-dire des images qu'une machine a du mal à interpréter.

Un travail de longue haleine et une expérience de plus pour celui qui s'est déjà frotté à d'autres environnements. Lors de son stage long, Pierre-Alain

Langlois avait ainsi travaillé pour Pzar-tech, une start-up israélienne centrée sur la nomenclature par vision de pièces détachées, une expérience qui l'a même conduit à MassChallenge, un des plus grands incubateurs de start-up au monde, situé à Boston. Quant à son projet de fin d'études d'ingénieur, il l'avait effectué dans la reconnaissance de personnes au sein des équipes R&D de la société Morpho (Idemia).

Tout au long de ce parcours, Pierre-Alain Langlois a gardé le virus de la recherche. Pourquoi ? « Il y a une réelle valeur ajoutée professionnelle à évoluer dans un milieu scientifique qui génère de la connaissance ». Discipline en plein boom au plan mondial, la *machine learning* évolue très vite. De ce fait, en marge des revues scientifiques à comité de lecture, son mode de production d'idées passe par la publication, sur sélection stricte, de papiers lors de conférences de référence. Et ensuite ? Après sa soutenance de thèse début 2021, il envisage déjà un post-doc, peut-être à l'étranger. Il se voit bien, plus tard, revenir dans le monde des start-up. Un autre univers avec ses cycles de développement ultra-courts. •



Exemple de *pipeline* pour la reconstruction sémantique de bâtiments © Pierre-Alain Langlois, Alexandre Boulch, Renaud Marlet, 2018.



## MULTI-TÂCHE HIÉRARCHIQUE POUR L'APPRENTISSAGE DE WORD EMBEDDINGS

Victor Sanh, IMI, promotion 2018

Victor Sanh revient sur le contenu de son projet de fin d'études (PFE) à l'École, où l'intelligence artificielle est envisagée sous un autre angle.

« Usain Bolt, un des plus grands sprinters de tous les temps, a un entraînement très varié : il s'entraîne à courir, mais aussi au saut d'obstacle, au saut en longueur, etc. Pratiquer une diversité d'exercices lui permet d'améliorer ses performances. Pour mon PFE, j'ai appliqué cette analogie au traitement automatique du langage naturel (*Natural*

*Language Processing*), qui repose aujourd'hui sur les *word embeddings* : faire apprendre à l'IA les mots dans leur contexte et non plus isolément, en représentant les mots par des vecteurs de nombres réels. Or, en introduisant un nouveau modèle hiérarchique, je montre qu'un mode d'apprentissage multi-tâches permet d'engranger des représentations plus riches et expressives de mots, car la diversité des tâches permet le transfert de connaissances d'une tâche à l'autre. »



# DU CÔTÉ DES ENTREPRISES



'Artificial Intelligence, Thinking Machines and the Future of Humanity'  
© Gerd Leonhard, CC-BY-SA (source : flickr), modifiée par Laetitia Mussard, 2019.



KÉVIN DEDIEU

Manager assurance  
paramétrique et  
risques climatiques  
(groupe AXA)  
en novembre 2018

## AXA génère des modèles d'assurance avec l'IA

Avec une base de clientèle mondiale dépassant 100 millions d'assurés et une masse gigantesque de données disponibles, AXA a placé l'intelligence artificielle au cœur de sa stratégie de transformation digitale, par exemple avec le lancement en France d'un assistant virtuel dénommé « Maxime ».

Au delà de la relation client, l'assureur s'appuie sur ces technologies pour mieux évaluer les risques et développer des modèles d'affaires innovants. Le traitement en temps réel des retards de vols aériens, des données climatiques ou de la disruption de certaines infrastructures lui permet par exemple de créer de nouveaux services d'assurance « annulation » sur les billets d'avion et de

leur attribuer un prix. « AXA développe des modèles d'aide à la décision s'appuyant sur l'IA pouvant analyser un grand nombre de données d'origines diverses, structurées ou non. Le but est d'obtenir une meilleure mesure du risque et donc un potentiel d'assurance », explique Kevin Dedieu.

Le groupe va jusqu'à alimenter ses modèles prédictifs avec des données satellitaires, s'appuyant sur les progrès de l'IA dans l'analyse automatisée d'images. De quoi avoir une évaluation rapide du coût des dommages et donc des indemnisations potentielles lors d'inondations ou d'incendies majeurs, comme récemment en Californie.



## JÉRÉMIE GUEZ

Responsable du *data lab* (BNP Paribas)

### BNP Paribas s'appuie sur un *data lab*

Le sujet de l'intelligence artificielle et du traitement massif des données a été pris à bras le corps chez BNP Paribas. Le groupe a créé en son sein plusieurs entités, dont un *data lab* dans sa branche « personal finance », l'activité connue par sa marque Cetelem. Pour Jérémie Guez, responsable du *data lab*, « il s'agit de conduire une démarche à la fois intégrée et autonome dans l'exploitation de nos données, un de nos actifs les plus précieux ».

Reposant notamment sur la *machine learning* et plus particulièrement sur le traitement du langage naturel, les applications visent par exemple à obtenir des informations pertinentes à partir de données non structurées, à mieux évaluer le profil de risque des clients ou encore à anticiper les défauts de paiements.

Les équipes de Jérémie Guez ont aussi développé en interne un « *chatbot* » (un « agent conversationnel », un programme informatique capable de simuler une conversation avec des humains par échange vocal ou textuel) à l'usage des collaborateurs, à même de répondre aux questions les plus courantes, ainsi qu'un moteur de traduction intelligent.

Jérémie Guez indique par ailleurs la fonction du *data lab* chez BNP Paribas : « nous avons un rôle d'évangéliste dans les différents métiers du groupe et devons aussi distinguer en permanence les applications qui ne dépasseront pas le stade du concept (*proof of concept*) de celles pouvant être mises en production ».



## DOMINIQUE VOLOT

Senior Business Partner à la Direction Innovation & Digital (Artelia)

### Artelia veut anticiper la construction intelligente

Évaluer les opportunités d'affaires et anticiper les évolutions... tels sont les mots d'ordre au sein du groupe d'ingénierie de la construction Artelia. À la différence d'autres secteurs comme la finance ou le e-commerce, l'intelligence artificielle trouve encore peu d'applications de terrain dans le BTP.

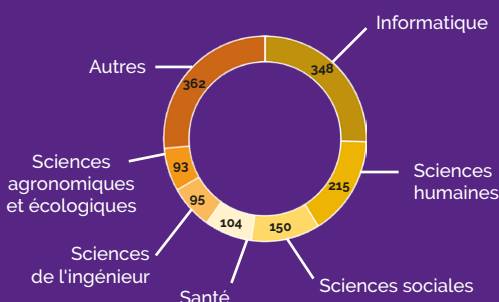
« Mais ce sera très bientôt le cas. À partir du BIM et bien au-delà, on perçoit déjà l'émergence de ces technologies dans nos activités », analyse Dominique Volot, *senior business partner* de la direction Innovation & Digital qui conduit une cellule de veille sur ce sujet au sein du groupe.

Par ailleurs, « grâce au *deep learning*, les progrès dans le traitement d'images à grande vitesse vont, par exemple, conduire assez vite à la commercialisation de systèmes de diagnostic automatisé de l'état des routes ou des ouvrages d'art ». Et de citer les outils d'aide à la décision dans les processus constructifs ou d'approche commerciale dans les appels d'offres.

« Le champ est infini, surtout si demain, on combine l'IA avec la construction robotisée, pointe cet ingénieur des Ponts. La question pour Artelia est de trouver les bons modèles pour pouvoir monétiser cette révolution et aussi commencer par valoriser la masse de données internes dont nous disposons ».



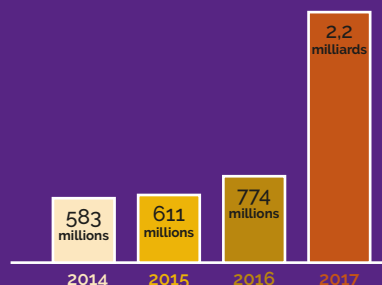
### Un sujet de recherche plébiscité



Répartition du nombre de laboratoires étudiant l'IA en fonction de leur domaine

Source : scanR (consulté le 7 février 2019).

### Un secteur croissant



Investissements privés dans les start-up en France (en euros)

Source : Serena Capital cité dans *Les Échos* (Deborah Loyer, « Intelligence artificielle : le financement des start-up accélère fortement en Europe », 29 octobre 2018, consulté le 15 février 2019).

### L'IA recrute

+ 28 % de recrutement des Data analyst et Data scientist d'ici 5 ans

Source : Burning Glass Technologies, BHEF et IBM, 2017 (étude citée dans le *Rapport Villani*).

# LES ESSENTIELS

## POUR S'INITIER



### CEA. *Découvrir & Comprendre - L'intelligence artificielle.*

Disponible sur : <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-intelligence-artificielle.aspx> (page consultée le 6 février 2019)

Des contenus interactifs pour comprendre aisément les fondamentaux de l'IA, avec en bas de page, un quizz pour faire le point.



GENDLER, Alex. *The Turing test: Can a computer pass for a human?* TED-Ed. Disponible sur : <https://ed.ted.com/lessons/the-turing-test-can-a-computer-pass-for-a-human-alex-gendler> (page consultée le 6 février 2019)

En présentant le célèbre test de Turing, Alex Gendler fait émerger des questions plus philosophiques sur le langage humain et les frontières entre homme et machine aujourd'hui.



### TED Talks. *Artificial Intelligence.*

Disponible sur : [https://www.ted.com/playlists/310/talks\\_on\\_artificial\\_intelligence](https://www.ted.com/playlists/310/talks_on_artificial_intelligence) (page consultée le 6 février 2019)

Dans cette playlist de vidéos, la parole est donnée à des experts sur la question de l'IA dans des domaines aussi variés que l'informatique, la philosophie ou la neuroscience.



### ScienceEtonnante. *Le Deep learning.*

Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=trWfEWfhtVg> (page consultée le 6 février 2019)

Une vidéo de ScienceEtonnante qui explique par des exemples concrets les différentes notions de base de l'IA.

## POUR APPROFONDIR

### BISHOP, Christopher M. et HUNG, John, 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning.* Springer.

ISBN 978-0-387-31073-2.

COTE LA SOURCE : 006.4 BIS REZ-DE-CHAUSSÉE

Suggéré par Pierre-Alain Langlois : « une excellente référence (plutôt technique sur le *machine learning* en général) ».

### GOODFELLOW, Ian, BENGIO, Yoshua et COURVILLE, Aaron, 2016. *Deep Learning.* The MIT Press.

ISBN 978-0-262-03561-3.

COTE LA SOURCE : 006.3 600 REZ-DE-CHAUSSÉE

Suggéré par Axel Parmentier et Mathieu Aubry : « une référence incontournable ! ».

### HARTLEY, Richard et ZISSERMAN, Andrew, 2003. *Multiple View Geometry in Computer Vision.* Cambridge University Press.

ISBN 978-0-521-54051-3.

COTE LA SOURCE : 006.37 HAR REZ-DE-CHAUSSÉE

Suggéré par Pierre-Alain Langlois : « ce livre ne traite pas directement d'intelligence artificielle mais il est incontournable dans le domaine de la reconstruction 3D ».

### HASTIE, Trevor John, TIBSHIRANI, Robert John et FRIEDMAN, Jerome Harold, 2017. *The Elements of Statistical Learning: Data mining, Inference and Prediction.* Springer.

ISBN 978-0-387-84857-0.

COTE LA SOURCE : 006.31 HAS REZ-DE-CHAUSSÉE

Suggéré par Axel Parmentier.

### KAHNEMAN, Daniel, 2012. *Système 1 / système 2 : les deux vitesses de la pensée.* Flammarion.

ISBN 978-2-08-121147-6.

COTE LA SOURCE : 840 ESS KAH

Suggéré par Axel Parmentier : « une référence pour comprendre le fonctionnement de l'intuition et du raisonnement ».

### KORTE, Bernhard et VYGEN, Jens, 2008. *Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms.* Springer.

ISBN 978-3-642-09092-9.

COTE LA SOURCE : 519.6 KOR REZ-DE-CHAUSSÉE

Disponible en ligne via bibliothèque.enpc.fr : <https://link.springer.com.extranet.enpc.fr/book/10.1007%2F978-3-540-71844-4>

Suggéré par Axel Parmentier.

### LECUN, Yann, BENGIO, Yoshua et HINTON, Geoffrey, 2015. *Deep Learning.* In : *Nature*. 28 mai 2015. Vol. 521, n° 7553, p. 436-444.

DOI 10.1038/NATURE14539.

Disponible en ligne pour les laboratoires CNRS.

Suggéré par Mathieu Aubry.

### NIELSEN, Michael Aaron, 2015. *Neural Networks and Deep Learning* [en ligne]. Determination Press.

[Consulté le 21 janvier 2019].

Disponible à l'adresse : <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.

Suggéré par Pierre-Alain Langlois : « ce livre en ligne est une bonne introduction à la technique et aux fameux modèles 'boîte noire', nécessitant peu de pré-requis ».

### SZELISKI, Richard, 2011. *Computer Vision: Algorithms and Applications.* Springer.

ISBN 1-8488-2934-5

COTE LA SOURCE : 006.37 SZE REZ-DE-CHAUSSÉE

Suggéré par Mathieu Aubry.

### VILLANI, Cédric, SCHOENAUER, Marc, BONNET, Yann et al., 2018. *Donner un sens à l'intelligence artificielle : pour une stratégie nationale et européenne* [en ligne]. Rapport public. Premier ministre. [Consulté le 21 janvier 2019].

Disponible à l'adresse : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/184000159/index.shtml>

# QUIZ

## Concrètement, l'IA c'est pour les entreprises :

- a. des algorithmes intelligents capables d'aller au-delà de la réflexion humaine
- b. des algorithmes intelligents remplaçant certains métiers existants
- c. des outils de réalité augmentée incluant des algorithmes d'aide à la décision
- d. des outils de réalité virtuelle incluant des algorithmes d'aide à la décision
- e. des chatbots intelligents pour assister des opérateurs

**Toutes les réponses** : Les deux premiers types existent déjà, tandis que les trois suivants sont en cours de déploiement, parfois assez avancé.

## Les résultats fournis par les réseaux de neurones :

- a. sont toujours justes, car ils sont objectifs et neutres
- b. peuvent être faussés, donc ils doivent toujours être interprétés

**Réponse b** : Un réseau de neurones n'est pas neutre : ses conclusions dépendent des données dont il dispose. Par exemple, s'il ignore la météo, il pourrait faussement attribuer aux compétences des vendeurs la hausse soudaine des ventes de parapluies. L'humain est encore nécessaire pour interpréter les résultats, il doit seulement y être formé.

## Quels sont les pays les plus en avance en matière d'IA ?

- a. les États-Unis
- b. la Chine
- c. la France
- d. les pays européens

**Toutes les réponses** : Les GAFAM et la Chine investissent massivement dans l'IA, devant la France. Mais l'Europe peut encore devenir un acteur important de l'IA si elle donne les moyens et si elle met en place une stratégie capable de contrer la puissance de ses concurrents.

## L'intelligence artificielle est un moyen de :

- a. faire progresser l'humanité
- b. déshumaniser la société
- c. nous libérer des tâches répétitives et abrutissantes
- d. limiter notre liberté en prenant des décisions à notre place

**Aucune bonne réponse** : Libre à vous de penser ce que vous voulez de l'IA. Mais il faut bien comprendre que c'est un outil : il n'existe pas sans nous, il dépend donc de notre société actuelle de bien étudier le sujet pour éviter que l'avenir ne prenne des allures de dystopie.

# LE PROCHAIN NUMÉRO

## THÉMATIQUE : L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

De l'approvisionnement durable aux cycles de vie des objets, l'économie circulaire est un des sujets de la transition écologique, qui est au cœur des préoccupations de l'École.

## Abonnez-vous pour recevoir les prochains numéros en suivant ce lien :

[http://bit.ly/cahierdesponts\\_abonnement](http://bit.ly/cahierdesponts_abonnement)

### DIRECTRICE DE LA PUBLICATION

**Sophie Mougard**  
Directrice de l'École des Ponts ParisTech

### CONCEPTION ET RÉALISATION

**Laetitia Mussard, Brunilde Renouf, Isabelle Gautheron**  
Direction de la Documentation, École des Ponts ParisTech

### COMITÉ ÉDITORIAL

#### Pour l'École des Ponts ParisTech :

**Hassane Akka**, directeur adjoint des Relations Internationales et Entreprises  
**Marie-Christine Bert**, directrice des Relations Internationales et Entreprises  
**Sandrine Courchinoux**, chargée de valorisation, direction de l'Enseignement  
**Karin Danjaume**, webmaster, direction de la Communication  
**Chantal Dekeyser**, coordinatrice administrative, direction de la Recherche  
**Emmanuelle Delforge**, directrice de la Communication

### COMITÉ DE RÉDACTION

**Pierre-Olivier Rouaud**, journaliste, rédaction des 4 articles principaux

#### Pour l'École des Ponts ParisTech :

**Axel Parmentier**, chercheur  
**Mathieu Aubry**, chercheur  
**Pierre-Alain Langlois**, doctorant

### IMPRESSION

**Service reprographie de l'École des Ponts ParisTech**  
6-8 Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes  
Champs-sur-Marne - F-77455 Marne-la-vallée cedex 2

### CRÉDITS ICONOGRAPHIQUES

**Pages 1 et 2** (couverture) : © Jakub Jirsák (source : Adobe Stock).

**Page 9** : logo encart "À La Source" © David Delaporte, 2018.

**Page 11** : logo encart "PFE remarquable" © David Delaporte, 2018.

**Page 13** : logo encart "Chiffres-clés" © Gaspard-Clair-François-Marie Riche de Prony (1755-1839), "Tables des logarithmes, sinus et tangentes pour la division décimale du quart de cercle calculées avec 8 ou 9 décimales pour être imprimées avec 7 décimales exactes au bureau du Cadastre," Bibliothèque numérique patrimoniale des ponts et chaussées, [https://patrimoine.enpc.fr/document/extrait\\_4\\_292-1\\_C16](https://patrimoine.enpc.fr/document/extrait_4_292-1_C16).

**Page 16** (quatrième de couverture) : © David Delaporte, 2018.

### CONTACT

Pour toute information, veuillez adresser vos demandes à : [cahierdesponts@enpc.fr](mailto:cahierdesponts@enpc.fr)

### ISSN - EN COURS



