



INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

LA RÉVOLUTION DE L'INDUSTRIE 4.0

FAÇONNER L'USINE INTELLIGENTE
ET RESPONSABLE DE DEMAIN

**Open.
Studio**

Les auteurs	6
--------------------	----------

Les intervenants	8
-------------------------	----------

Introduction	15
---------------------	-----------

De nouvelles technologies industrielles bouleversent l'industrie	16
L'IA au cœur de la stratégie Industrie 4.0	17

Partie 1	
L'industrie 4.0, de quoi parle-t-on ?	20

Les grands principes de l'Industrie 4.0	21
Mise au point sur l'IA	26
L'IA et sa capacité d'apprentissage	27
Le même fonctionnement que le cerveau humain ?	30
L'IA : une histoire complexe	32
– <i>Années 30-60 : Du précurseur Alan Turing à la Conférence de Dartmouth</i>	34
– <i>Fin des années 80 : Systèmes experts, réseaux de neurones et Loi de Moore</i>	35
– <i>Années 2010 : Le Deep Learning change la donne</i>	36
Les grands enjeux de l'industrie 4.0	38
L'Industrie 4.0 : quatrième sur l'échiquier des révolutions industrielles	40
– <i>Un concept initié par l'Allemagne</i>	41
– <i>État des lieux de l'industrie 4.0 en France et dans le monde</i>	45

Partie 2	
Tour d'horizon des applications de l'Industrie 4.0	52

Chapitre 1 : La robotique collaborative pour accompagner les opérateurs sur les tâches pénibles et répétitives	53
Le Cobot-outil et Cobot-collègue comme nouveaux assistants de l'opérateur	57

Les exosquelettes pour développer les capacités physiques de l'opérateur	65
Les robots mobiles autonomes pour aider les opérateurs à transporter des marchandises	67

Chapitre 2 : Des capteurs et plateformes IIoT au service de la performance industrielle

Détecter les anomalies en amont via la maintenance et l'inspection prédictive	79
– Différents types de capteurs pour générer des données sur les performances des équipements	80
– Des plateformes intuitives pour collecter les données et superviser son usine	87
– OPC-UA comme protocole de communication entre objets IoT	91
– Des réseaux IoT faible débit - longue portée privilégiés pour la transmission des données	91
– Des plateformes intégrées dans un cloud pour le stockage et le traitement des données	94
– Big data, jumeaux numériques et edge computing pour donner sens aux données	97
Optimiser le suivi des produits en extérieur mais aussi leur traçabilité et intégrité	106
Réduire sa consommation d'énergie et ses émissions carbone	110
Localiser et sécuriser son matériel grâce aux technologies Beacons et IoT	119
Feuille de route, Proof of Concept (POC)... les étapes à ne pas rater avant de lancer un projet IIoT	124

Chapitre 3 : Des logiciels pour une fabrication industrielle agile, intelligente, performante et durable

Une intégration verticale des logiciels pour optimiser la reconfiguration des processus de production	129
– Le niveau entreprise avec le logiciel ERP et ses interfaces	129
– Le niveau organisation avec le logiciel MES	135
– Le niveau supervision avec l'IHM et le SCADA	136
– Le niveau machine avec des réseaux de capteurs	137
Une intégration horizontale des logiciels pour optimiser la chaîne de valeur du produit	138
– Gérer le flux entreprise avec les logiciels SCM et SCI	138
– Gérer le flux produit avec le logiciel PLM	139
– Gérer le flux process avec la méthode CCx	141

Des logiciels d'aide à la décision pour améliorer la performance d'une usine	143
– L'intelligence opérationnelle (IO)	143
– L'informatique décisionnelle ou business intelligence (BI)	144
Un exemple d'outil d'aide à la décision avec de l'IA pour l'optimisation de la résilience des systèmes productifs : L'Atlas des Synergies Productives	146
Focus : Modélisation des proximités entre métiers et visualisation des compétences associées à un territoire	152
– Visualisation des proximités et des évolutions métiers	154
– L'analyse des déclarations préalables à l'embauche et modélisation territoriale	156
Focus : La résilience du système productif d'un territoire dépend de sa complexité économique	164
– Diversité et ubiquité	166
– Complexité économique	170
– Parentés productives	172
– Avantage compétitif	175
– Prédictions de croissance	176

Partie 3

Les freins au développement de l'industrie 4.0

179

Chapitre 1 : L'industrie 4.0 est-elle réellement accessible ? 180

Les coûts liés à l'IA et l'industrie 4.0 dépendent des besoins spécifiques des entreprises et des aides financières disponibles	181
Un manque de compétences et formations à compenser par des solutions stratégiques internes	189
– L'arrivée de l'IIoT pose des problèmes pour lire et interpréter les données	189
– Les formations en robotique collaborative sont à la traîne	191
– Une concentration géographique des compétences pour fabriquer des semi-conducteurs, composants essentiels des capteurs en robotique et IIoT	192
– Des solutions à portée de main pour s'approprier progressivement les outils 4.0	194

Chapitre 2 : Le passage à l'industrie 4.0 va-t-il alourdir le bilan carbone d'un secteur déjà très polluant ?

203

L'industrie manufacturière : 4^{ème} secteur le plus pollueur en France 204

L'industrie 4.0, responsable d'une pollution numérique 208

L'industrie 4.0 sur la voie de la résilience 212

Chapitre 3 : L'industrie 4.0 est-elle davantage menacée par les cyberattaques ?

218

L'IoT industriel : point d'entrée aux intrusions 219

L'IA comme technologie à privilégier pour détecter les cyberattaques 221

Utilisation de l'intelligence artificielle pour la détection de cyberattaques : retour d'expérience 222

– Contexte et objectif 222

– Solution apportée 223

– Détection de groupe de logs avec les K-Means 225

– Caractérisation des clusters avec les Random Forest 229

– Conclusion et perspectives 232

Conclusion

235

L'edge computing doit se développer davantage 236

Les opérateurs peuvent-ils devenir des leaders du changement ? 237

L'industrie 4.0 : un levier de réindustrialisation en France 238

Références

239

Lexique

240

Remerciements

243

Les auteurs



Jean-Luc Marini

Directeur du Lab IA et de l'agence de Lyon
- OpenStudio

Fort de plus de 30 ans d'expérience dans le domaine de l'IA au sein de grands groupes français et internationaux, mais aussi de start-up, Jean-Luc Marini a rejoint les effectifs d'OpenStudio en 2021 en tant que directeur du Laboratoire d'Intelligence Artificielle (Lab IA) et directeur d'agence à Lyon. Une double casquette qui le conduit à la fois à faire connaître OpenStudio sur tout le bassin lyonnais jusqu'en Savoie et à faire émerger concrètement un certain nombre de projets d'innovation autour de l'IA. C'est le cas par exemple de l'Atlas des Synergies Productives, une solution technologique unique à partir d'Intelligence Artificielle et d'Open Data visant à créer une nouvelle industrie plus circulaire, plus résiliente, décarbonée et mieux distribuée sur le territoire. Jean-Luc Marini est titulaire d'un doctorat en sciences de l'information et de la communication, d'une maîtrise en Mathématiques Appliquées mais aussi d'un diplôme en informatique de gestion obtenu au sein de l'IAE de Lyon. Son goût marqué pour l'enseignement l'a également conduit pendant 25 ans à être professeur associé, responsable d'un Master en Management des Systèmes d'Information au sein de ce même IAE. Il fut également membre du centre de recherche Magellan.

**Julien Toublanc**

Journaliste

- OpenStudio

Passionné par le journalisme depuis l'âge de 15 ans, Julien Toublanc a mené de nombreux projets personnels dans les médias qui lui ont permis de décrocher ses premières expériences professionnelles au sein de différentes rédactions web et presse écrite. Titulaire d'un Master en Média, Information, Communication à l'Institut Français de Presse (IFP), à Paris, il consacre son mémoire de fin d'études au « journalisme de solutions ». Sa curiosité, sa rigueur journalistique et son esprit créatif sont maintenant au service des projets éditoriaux d'OpenStudio depuis mars 2021.

Les intervenants



Adrien Poinssot

Directeur Commercial
Universal Robots France

Ingénieur ICAM de formation, ce passionné de technique et d'aventure industrielle est en charge du développement commercial d'Universal Robots en France et de l'animation de son réseau de distributeurs. Il rejoint Universal Robots en 2015, déterminé à partager sa vision du cobot comme une des technologies clés du nouvel essor de l'industrie française. La compétitivité, la transition énergétique et la valorisation des compétences sont autant de challenges qui l'animent au quotidien. Adrien Poinssot nous explique en quoi la cobotique est aujourd'hui bénéfique et accessible à tous les acteurs industriels.

**Sotiris Manitsaris**

Directeur Adjoint du Centre de Robotique Mines ParisTech

Directeur adjoint et chercheur au Centre de Robotique Mines ParisTech, Sotiris Manitsaris est titulaire d'un diplôme universitaire en mathématiques appliquées de l'Université Aristote de Thessalonique mais aussi d'un doctorat en vision par ordinateur pour la reconnaissance des gestes de l'université de Macédoine. Il mène de nombreux projets – liés à l'usine du futur, aux véhicules autonomes ainsi qu'aux industries culturelles et créatives – qui visent à capturer, modeler et reconnaître des gestes humains afin de mettre en mouvement des machines. Il nous décrit la méthode de reconnaissance des gestes appliquée aux cobots mise au point par le Centre de Robotique Mines ParisTech.

**Éric Morand**

Chef du service calcul, ingénierie logicielle et valorisation des données au CNES

© CNES/LECARPENTIER Lydie, 2018

Coordinateur des activités IA du Centre National d'Études Spatiales (CNES), situé à Toulouse, Éric Morand a répondu à nos questions autour des applications de l'industrie 4.0 développées dans les murs du fief spatial français. Il nous éclaire sur les projets IIoT qui y sont menés en termes de maintenance prédictive et d'environnement ainsi que sur les technologies utilisées.

**Gabriel Tissandier**

Directeur Général
de Proovstation

Diplômé de l'ESCP Europe en « Innovation and Entrepreneurship », Gabriel Tissandier a co-fondé WeProov en 2015, une application d'inspection automobile, avant de co-fonder 3 ans plus tard la startup lyonnaise Proovstation dédiée aux constructeurs, transporteurs et distributeurs automobiles. Son objectif ? Inspecter le moindre dommage d'un véhicule grâce à une véritable arche technologique. Il nous raconte comment fonctionne cette solution IIoT avec de l'IA.

**Nicolas Babel**

CEO d'Ewattch

Passionné par l'IoT industriel, les nouvelles technologies et l'entrepreneuriat, Nicolas Babel a débuté sa carrière dans le développement de produits et de logiciels pour le milieu industriel. C'est en 2012 qu'il lance la startup vosgienne Ewattch qui révolutionne l'accès à des solutions IIoT à travers des kits préconfigurés et prêts à l'emploi. Une aubaine pour des entreprises, comme les PME, qui aimeraient avoir un pied dans l'industrie 4.0. Il nous explique comment leurs technologies parviennent à moderniser et optimiser rapidement un parc machine, à la fois sur le plan énergétique mais aussi de la maintenance.

**Gérald Lelong**

Directeur Général d'Easymov Robotics

Diplômé de l'ISIMA (Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications) Gérald Lelong a co-fondé en 2017 la startup clermontoise Easymov Robotics facilitant l'intralogistique des TPE et PME grâce à des robots gerbeurs autonomes. Il nous en dit plus sur les dessous de cette flexibilité manufacturière et notamment du logiciel Open Source ROS (Robot Operating System).

**Laurent Laporte**

PDG de Braincube

Ancien ingénieur process, directeur de production, directeur d'usine mais aussi directeur des opérations – en France, Italie et aux États-Unis –, Laurent Laporte a co-fondé l'entreprise issoirienne Braincube en 2007. Il nous explique en détails le fonctionnement de la plateforme IIOT déployée par sa société. Cette solution innovante intégrant des technologies d'IA permet notamment aux industriels de réduire leurs coûts de production et de diminuer fortement leur facture énergétique.

**Yann Mac Garry**

CEO et Fondateur de Ticatag

Après 25 ans d'expérience en tant que salarié dans le groupe Alcatel-Lucent, et des responsabilités dans la gestion de programme à l'international, Yann Mac Garry s'est lancé dans l'aventure entrepreneuriale en créant la startup bretonne Ticatag, spécialiste de l'asset tracking (suivi de matériel). Il répond à nos interrogations sur le fonctionnement et les atouts de leurs technologies beacons et IoT pour localiser et sécuriser son matériel en environnement industriel.



Anthony Gadiou

Chief Digital Officer de Metron

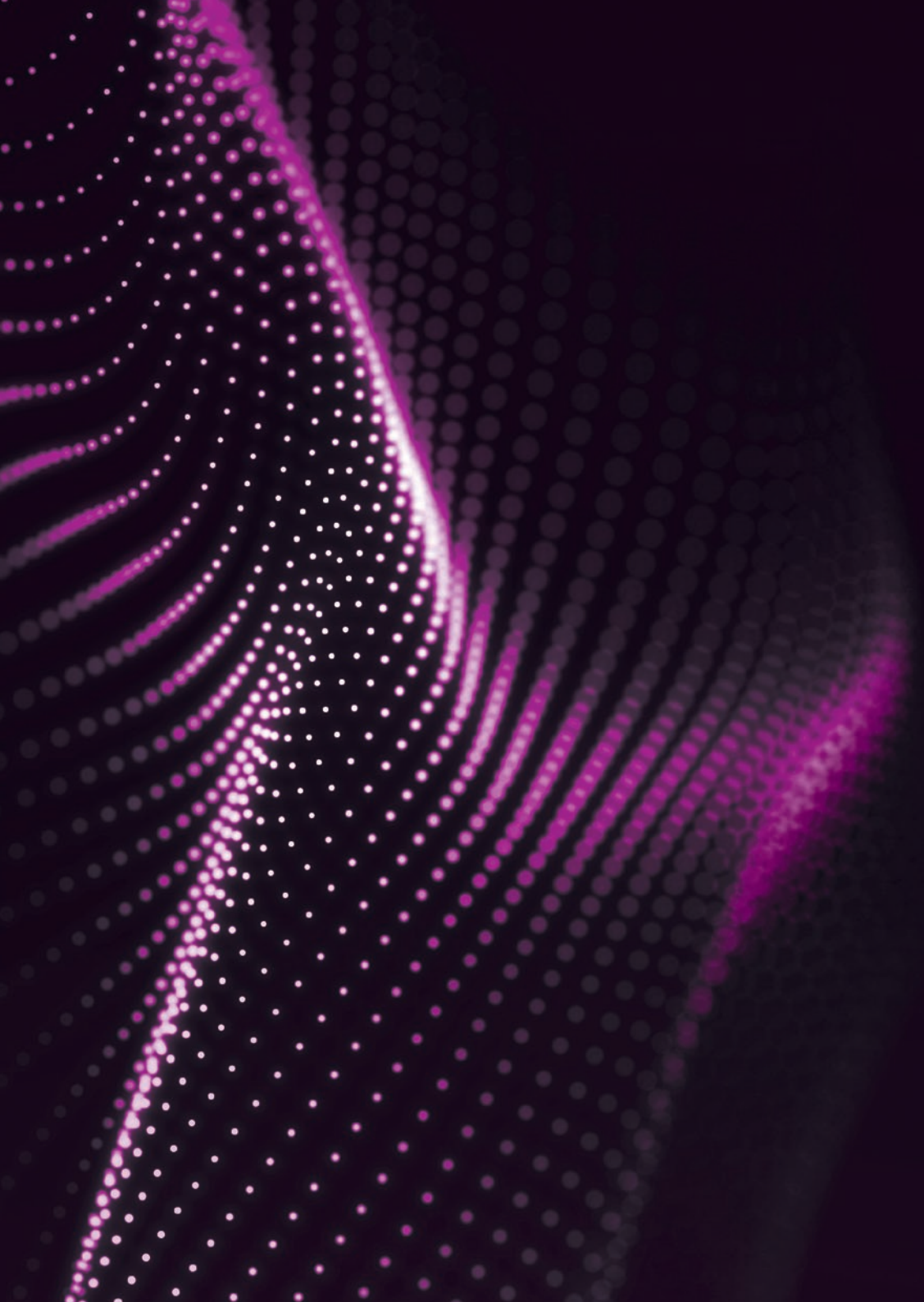
Décarboner les territoires grâce à une digitalisation de l'énergie, tel est le fer de lance de la start-up française Metron. Anthony Gadiou, son responsable digital, nous expose les tenants et aboutissants de leur plateforme dopée à l'IA qui permet de réduire les coûts énergétiques et l'empreinte carbone des entreprises industrielles.



Wael Cheaib

Directeur Général de Safecube

Wael Cheaib a plus de 12 ans d'expérience dans des domaines comme les opérations, la supply chain, l'expérience client ou encore à la direction générale. Il a travaillé au sein d'environnements très différents tels que l'industrie automobile, le conseil, l'industrie technologique et le monde des startup. Wael Cheaib est aujourd'hui à la tête de Safecube, une joint-venture lyonnaise créée par Sigfox, Michelin et Argon dont l'objectif est d'assurer la géolocalisation et le suivi des conditions de transport des marchandises à l'international. Il nous en dit plus sur leurs solutions « Goods Tracking » mêlées à de l'IA.



Introduction

Le monde de l'industrie tel qu'il a été façonné par les précédentes révolutions industrielles est d'ores et déjà en train de changer. La philosophie industrielle qui consistait à produire en masse sans prendre en compte les aspirations des consommateurs, les conditions de travail des employés, les préoccupations environnementales, ou encore les gains possibles en termes d'agilité et de productivité est désormais remise en question avec l'arrivée de l'industrie 4.0.

De nouvelles technologies industrielles bouleversent l'industrie

Initié en 2011 par l'Allemagne pour sauvegarder son leadership dans la production de biens d'équipements industriels haut de gamme, le concept d'industrie 4.0 – ou industrie du futur – propose un pilotage « intelligent » et personnalisé de la production^[1], intégrant tout le cycle de vie des produits et la relation avec le client. Les informations pertinentes sont échangées de façon autonome et directe entre toutes les instances impliquées dans la création de valeur.

Pour concrétiser cela, de nouveaux outils industriels tels que des robots collaboratifs, capteurs et plateformes IIoT (Internet Industriel des Objets) ainsi que des logiciels d'aide à la décision s'appuient sur l'intelligence artificielle pour aider les équipes de production à construire des usines intelligentes, performantes, agiles et responsables. Des technologies qui permettent par ailleurs d'enrayer le processus de désindustrialisation et de démentir les discours autour du vieillissement des outils de production et des difficultés à innover au sein de l'industrie.



le concept d'industrie 4.0 - ou industrie du futur - propose un pilotage « intelligent » et personnalisé de la production

L'IA au cœur de la stratégie Industrie 4.0

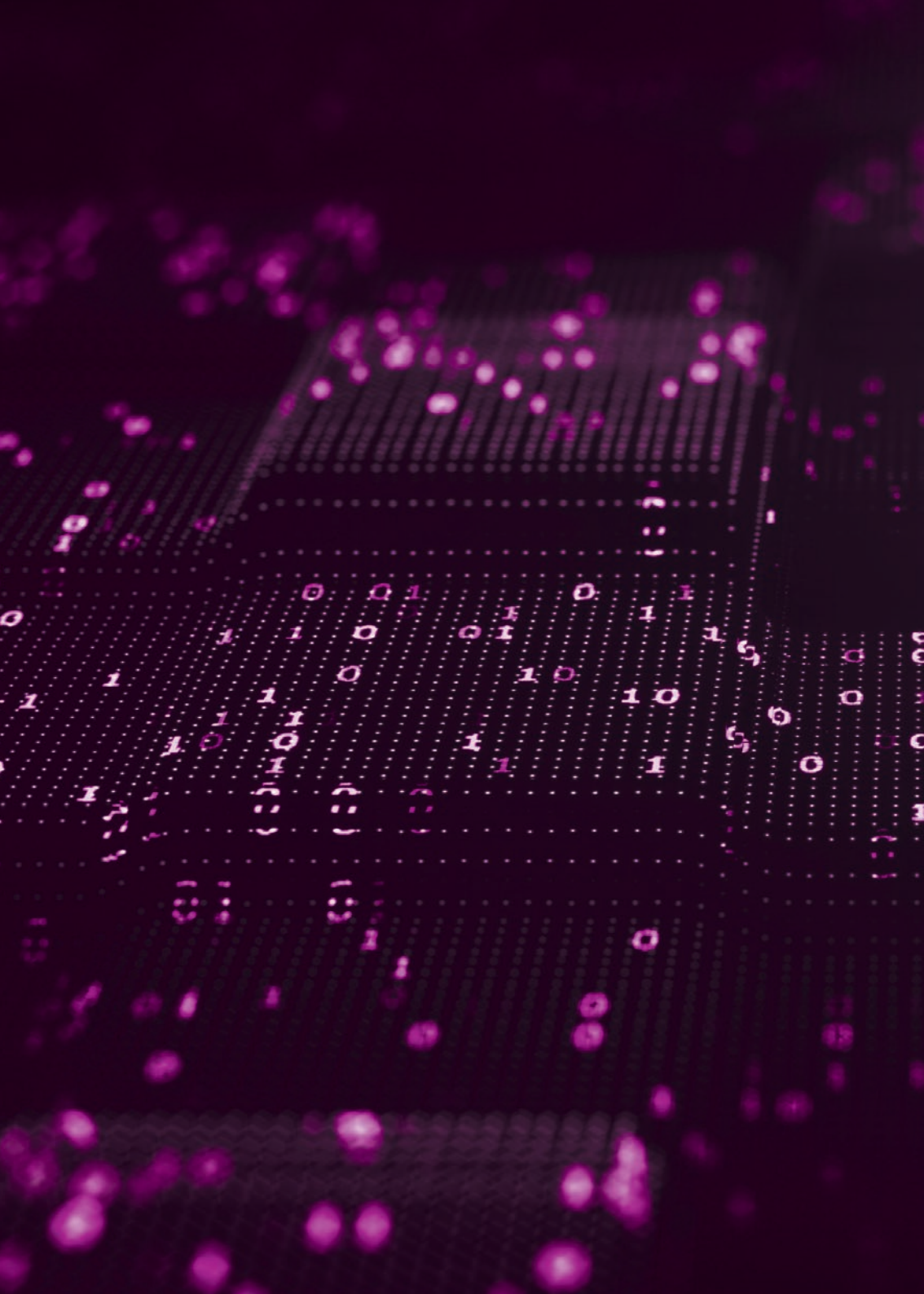
L'Intelligence artificielle est un outil, une méthode, une discipline, une technologie, quel que soit le terme qui la qualifie, le constat est le même, l'IA bouleverse de nombreux secteurs d'activité. C'est le cas avec l'industrie qui l'adopte progressivement afin d'être hyper-productive et compétitive. Des robots collaboratifs dopés à l'IA (cobots-collègues ou robots mobiles par exemple) sont en mesure d'accompagner les opérateurs sur des tâches pénibles, en toute autonomie et en s'adaptant à leur environnement. L'intelligence artificielle, appliquée au sein d'une architecture big data, edge ou intégrée à des jumeaux numériques, fait aussi bon ménage avec l'internet industriel des objets (IIoT). Elle peut en effet prédire de futures pannes ou dysfonctionnements à venir liés aux machines, trouver des variables problématiques propres au tracking et tracing de produits, ou encore réduire l'impact énergétique et carbone de l'industrie lourde comme le secteur de la métallurgie, minier ou du papier. Enfin, il est possible d'intégrer de l'IA au cœur des logiciels d'aide à la décision pour s'adapter aux contextes changeants auxquels font face les entreprises industrielles.

L'intelligence artificielle offre de nombreuses opportunités pour faire émerger l'usine intelligente de demain. Dans cet ouvrage, vous allez découvrir les grandes applications de cette révolution industrielle et technologique illustrées par des extraits d'interviews de professionnels de l'industrie qui proposent ou expérimentent des solutions 4.0.



L'intelligence artificielle offre de nombreuses opportunités pour faire émerger l'usine intelligente de demain.

Néanmoins, l'industrie 4.0 pose encore un certain nombre de questions à la fois stratégiques et éthiques. L'Industrie 4.0 est-elle vraiment accessible tant sur le plan financier que des ressources humaines ? Quel sera l'impact de l'utilisation massive de ces nouvelles technologies sur l'environnement et la sécurité des données ? Au fil des pages, nous tenterons de proposer des solutions concrètes afin d'éclaircir ces zones d'ombres.



PARTIE 1

L'industrie 4.0, de quoi parle-t-on ?

Véritable révolution numérique incarnée par la « digital factory » d'un côté et le « digital manufacturing » de l'autre, l'industrie 4.0 portée par l'intelligence artificielle se distingue des précédentes révolutions industrielles en tout point. Avant d'aborder ses différentes applications, il est nécessaire de donner quelques éclairages sur ce nouveau concept né en Allemagne en 2011 et qui se propage un peu partout dans le monde.

Les grands principes de l'Industrie 4.0

On peut définir cette notion par une mise en réseau de tous les éléments du processus de production afin de créer l'usine ultraconnectée du futur, baptisée également « smart factory ». L'objectif de l'industrie 4.0 est de mettre en place des usines dites intelligentes, capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle révolution industrielle. L'industrie 4.0 s'affranchit des anciens modes de production destinés à produire massivement pour proposer un pilotage « intelligent » et personnalisé de la production, intégrant toute la chaîne de valeur et la relation avec le client. Cette chaîne de valeur concentre tout le cycle de vie des produits : depuis l'idée en passant par la commande, le développement et la fabrication, la livraison du produit au client final jusqu'au recyclage du produit, avec tous les services associés.



Une révolution numérique qui comporte deux domaines dans lesquels l'intelligence artificielle s'invite de manière prégnante : la digital factory et le digital manufacturing^[2].

La digital factory consiste à dématérialiser et interconnecter des produits, des machines et des individus à travers des plateformes digitales relevant de l'internet industriel des objets (IIoT) et des logiciels de production. Ceci dans le but de façonner des usines connectées et ainsi aboutir à une production flexible, économe et intelligente accompagnée de services personnalisés. Des algorithmes d'intelligence artificielle (machine learning, deep learning) sont utiles pour traiter et analyser les données recueillies sur ces plateformes IIoT, elles-mêmes intégrées dans une architecture big data type cloud computing. Cela permet de révéler des informations difficilement détectables par les voies traditionnelles et susceptibles de créer de la valeur, comme les futures pannes ou dysfonctionnements à venir ou encore des dérives énergétiques à corriger.



**La digital factory
consiste à dématérialiser
et interconnecter des
produits, des machines
et des individus**

Quant au digital manufacturing, il désigne avant tout les systèmes cyber-physiques (SCP). Ces derniers regroupent des systèmes embarqués qui utilisent des capteurs pour récupérer des données et qui agissent sur des processus physiques au moyen d'actionneurs. Ils sont connectés les uns aux autres via des réseaux digitaux et bénéficient d'interfaces hommes-machines multimo-



dales. L'introduction de ces systèmes cyber-physiques vise notamment la production en petite série, c'est-à-dire la production en nombre restreint de produits standardisés, dans des délais plus courts. Ainsi, l'usine du futur peut répondre plus rapidement aux besoins du client final et de manière personnalisée. Les possibilités de personnalisation sont quasi-infinies grâce à la multiplication de capteurs dans les produits en cours de fabrication et les machines qui les manipulent. Chaque produit reçoit un traitement spécifique à chacune des étapes de fabrication. Autres avantages de ces technologies : elles peuvent détecter et corriger des défauts ou organiser la maintenance prédictive.

La mise en place de ce type de systèmes nécessite que l'on s'intéresse à la recherche de transversalité ou d'interopérabilité, c'est-à-dire le fait d'« opérer ensemble ». C'est l'ajout d'une brique technologique transversale qui va venir interconnecter et synchroniser les différents systèmes de production les uns avec les autres, quelle que soit leur localisation géographique. La compatibilité et l'interopérabilité des systèmes sont donc des prérequis obligatoires pour faire éclore des systèmes cyber-physiques. Cela impose de définir des standards de communication communs entre machines, tel que le standard ouvert OPC UA utilisé pour connecter de manière sécurisée et fiable une grande variété de systèmes et d'équipements. Une fois interconnectés, les systèmes communiquent les uns avec les autres et s'autorégulent sans commande centrale. Les lignes de production ont la possibilité d'être configurées en fonction des commandes clients avec des modules qui sont ajoutés ou retirés, grâce à des fonctions de « plug and work » ou « plug and produce ». Un modèle virtuel de l'usine peut aussi tester les différentes configurations de modules, en plus de pouvoir simuler et piloter l'ensemble du cycle de vie du produit et du processus de production.



**Une fois interconnectés,
les systèmes
communiquent les uns
avec les autres
et s'autorégulent sans
commande centrale.**

Enfin, ces systèmes cyber-physiques, embarqués dans des techniques de façonnage comme la cobotique, peuvent aussi intégrer de l'intelligence artificielle afin d'augmenter les capacités des opérateurs et réduire la pénibilité.



Mise au point sur l'IA

L'IA est un domaine si vaste, le terme lui-même « Intelligence Artificielle » est tellement galvaudé qu'il est parfois difficile de savoir quoi mettre derrière ces deux mots.

Marvin Lee Minsky, l'un des pères fondateurs de l'intelligence artificielle la définissait comme « la science de faire faire à des machines des choses qui demanderaient de l'intelligence si elles étaient faites par des humains. »

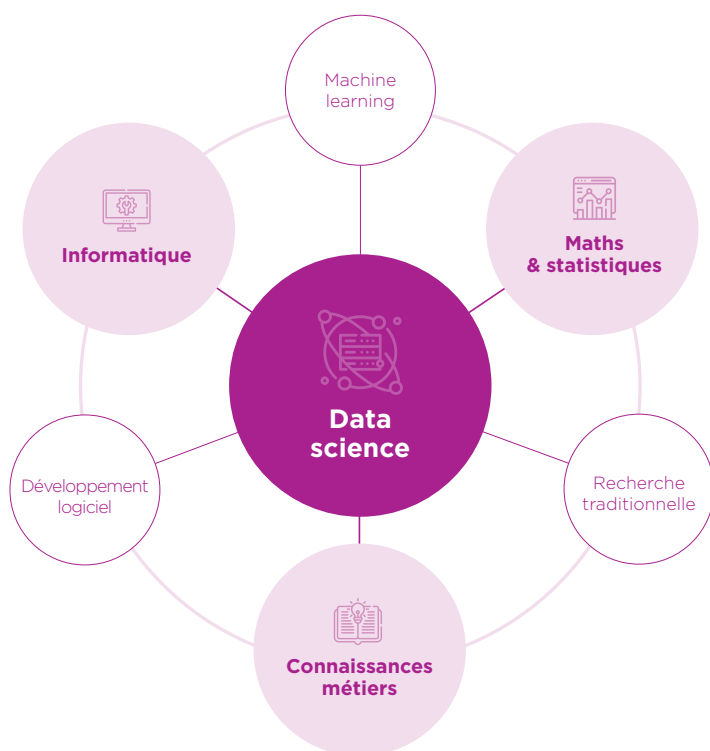
Pourtant ces deux mots accolés, « Intelligence Artificielle », provoquent des débats d'ordre philosophique. Peut-on vraiment parler d'« Intelligence » en désignant des algorithmes ? Luc Julia, le co-créateur de Siri, répond à cette question de manière radicale en intitulant son livre sorti en 2019 : *L'intelligence artificielle n'existe pas*. Pour lui, il s'agit d'une « appellation malheureuse » décidée arbitrairement en 1956 lors de la fameuse conférence de Dartmouth. En dehors des préoccupations lexicales, comment peut-on définir rationnellement l'IA ?

L'IA et sa capacité d'apprentissage

Pour définir de manière concrète l'intelligence artificielle, il faut tout d'abord comprendre ce qui la différencie d'un système informatique classique. Contrairement à un logiciel lambda, un système doté d'une intelligence artificielle sera capable d'apprendre à partir d'exemples. Quand le premier aura besoin d'un développeur pour déterminer son comportement, un logiciel d'intelligence artificielle se programmera lui-même pour que ses résultats correspondent à une série d'exemples qui lui sont fournis. Imaginons que vous appreniez à un enfant à reconnaître un animal à partir d'une série de photos, son cerveau tout neuf va se calibrer automatiquement pour qu'il le reconnaisse la prochaine fois dans un autre contexte. C'est la même idée pour l'IA, un système intelligent sera capable, sur la base de données d'apprentissage, de se calibrer lui-même pour pouvoir ensuite s'exécuter et donner les résultats attendus pour de nouvelles données.

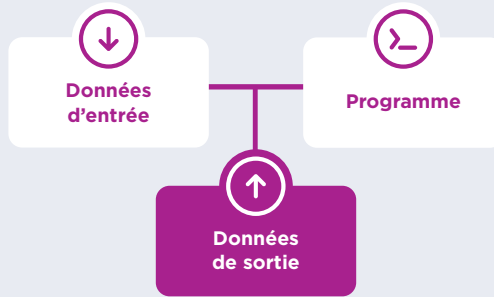


**la science de faire
faire à des machines
des choses qui
demanderaient de
l'intelligence si elles
étaient faites par des
humains**



Programmation traditionnelle

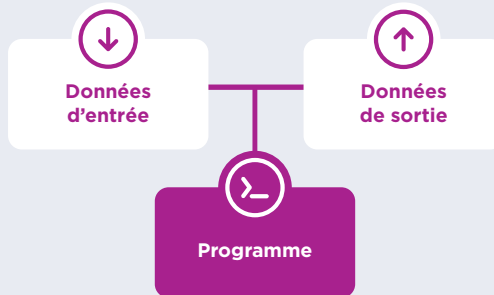
La programmation traditionnelle est un processus manuel, ce qui signifie qu'une personne (le développeur) crée le programme. Mais sans personne pour programmer la logique, il doit formuler manuellement les règles.



Machine Learning

D'un autre côté, en machine learning, l'algorithme formule automatiquement les règles depuis les données. Contrairement à la programmation traditionnelle, le machine learning est un processus automatisé. Cela peut augmenter la qualité de votre restitution de données dans de nombreux domaines, incluant la préparation de données, les interfaces en langage naturel, la détection d'aberration statistique, les recommandations, et la détection de causalité et leur signification.

Toutes ces fonctionnalités aident à accélérer la compréhension des utilisateurs et réduisent les biais de décision.



Le même fonctionnement que le cerveau humain ?

La particularité de l'intelligence artificielle est de pouvoir produire une fonction de généralisation à partir d'un grand nombre d'exemples appris. On pourrait croire qu'un enfant capable de reconnaître seulement les exemples appris, aurait « appris par cœur ». Il n'en est rien ! Son cerveau va réaliser une abstraction consistant à extraire les caractéristiques communes et spécifiques d'un animal, par exemple le cheval, pour le différencier des autres animaux appris précédemment. Ainsi, s'il n'a pas appris ce qu'était un zèbre, il risque de confondre les deux animaux. Puis, lorsqu'il aura des exemples de zèbres à sa disposition, il sera en mesure de différencier les deux espèces, en décelant la présence de rayures. Son cerveau aura attribué un « poids » particulier à la présence de rayures pour différencier un zèbre d'un cheval. Un tigre possède également des rayures ? Alors le cerveau de l'enfant va prendre en compte la présence de rayures, mais également la couleur des rayures, avec encore une fois un système de pondération pour chaque caractéristique. Et c'est ainsi que le cerveau d'un enfant apprend le monde qui l'entoure. Un système intelligent fonctionnera de la même manière, en fonction de la complexité du modèle qu'il applique et du nombre de données d'apprentissage, il progressera petit à petit dans sa capacité à prédire



**Prédire, raisonner
et décider sont
trois notions liées.**

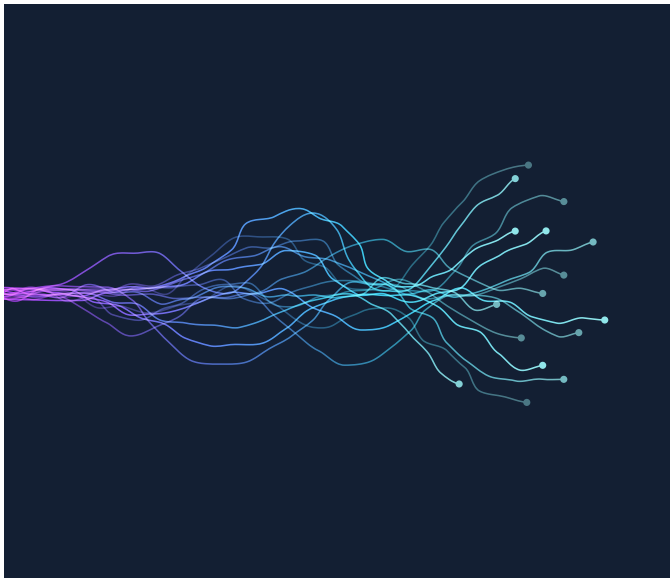
la classe d'objets ou d'événements qui surviennent. On peut noter d'ailleurs que si les phases d'apprentissage peuvent être longues, les phases de classification (ou d'exécution) sont, quant à elles, beaucoup plus rapides.

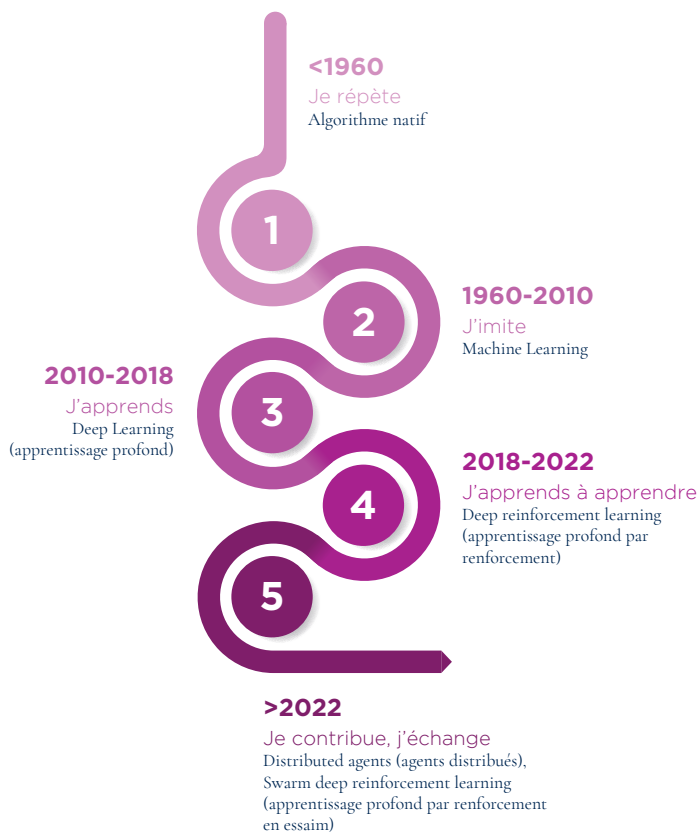
Prédire, raisonner et décider sont trois notions liées. C'est par sa capacité à prédire mentalement l'effet d'une action (ou plus généralement le futur), sans avoir à la réaliser réellement, que le cerveau va être en mesure de raisonner pour décider des meilleurs choix à faire. Ce fonctionnement probabiliste du cerveau consiste à calculer les probabilités de différentes actions successives, en les combinant entre elles. Cette capacité à prévoir permettra à un système intelligent de décider de la meilleure option à suivre. On parle d'ailleurs très souvent de logiciels « d'aide à la décision ».



L'IA : une histoire complexe

L'histoire de l'intelligence artificielle n'est pas une courbe évoluant de manière progressive, il s'agit plutôt d'une succession de piques d'innovations entrecoupées de périodes de stagnation qu'on appelle les hivers de l'IA. Aujourd'hui, avec la quantité de données à notre disposition et les puissances de calcul de nos ordinateurs, nous vivons dans une période d'euphorie autour de l'IA. Pour mieux comprendre l'engouement actuel, il est toujours utile de revenir aux sources de cette technologie bien plus ancienne qu'on ne le pense.





Années 30-60 : Du précurseur Alan Turing à la Conférence de Dartmouth

L'histoire de l'IA est intrinsèquement liée aux progrès des mathématiques à la base de cette technologie, on pourrait même faire remonter l'origine de cette science à l'antiquité, avec l'attribution du premier algorithme au mathématicien Euclide en 300 avant notre ère.

Bien plus proche de nous, le célèbre mathématicien britannique Alan Turing fait sensation dans les années 1930-1940. Il prouve qu'un ordinateur est capable de simuler un processus logique en décryptant les messages codés envoyés par l'armée allemande via la machine de chiffrement électromécanique Enigma, pendant la Seconde Guerre Mondiale. Toutefois le terme « Intelligence Artificielle » sera choisi officiellement pour nommer cette discipline, lors de la conférence de Dartmouth en 1956. Si cette conférence regroupant de nombreux pionniers de l'IA est considérée comme la date de naissance officielle de la matière académique, il est toujours difficile de placer le curseur sur ce qui peut être considéré ou non comme de l'IA. Dans les années 50, lorsque Marvin Minsky et John McCarthy organisent cette conférence, pouvait-on réellement parler d'intelligence artificielle ?

Avec des ordinateurs à la puissance limitée et des volumes de données restreintes, dès les années 70 l'IA entre dans une longue période hivernale.

Fin des années 80 : Systèmes experts, réseaux de neurones et Loi de Moore

À la fin des années 80, on note toutefois de belles avancées, avec les systèmes experts et les réseaux de neurones de John Hopfield et Yann LeCun. Au début des années 90, les recherches sur l'IA tournent au ralenti jusqu'à l'arrivée déterminante de la Loi de Moore, qui va permettre une multiplication des puissances de calcul des processeurs. En 1996 l'IA fait un énorme « buzz » médiatique avec Deep Blue, un superordinateur conçu par IBM, qui bat le champion du monde des échecs Garry Kasparov.



Années 2010 : Le Deep Learning change la donne

Après une autre période d'hibernation, l'IA provoque un nouveau coup d'éclat en 2012 : la victoire de Geoffrey Hinton lors du concours de reconnaissance d'image ImageNet, qui se démarque grâce à des réseaux de neurones artificiels fonctionnant sur des processeurs graphiques. Quelques années plus tard, en 2016, Alpha Go se mesure à Lee Seedol, champion du monde du jeu de go, considéré comme le jeu le plus complexe du monde. Grâce à l'apprentissage profond, autrement dit le deep learning, mis au point entre autre par le français Yann LeCun, une fois encore la machine surpasse l'homme, vingt ans après Deep Blue.

Nous sommes donc entrés dans une ère favorable aux progrès de l'IA, qui s'invite désormais partout dans notre quotidien, se rendant peu à peu indispensable dans de nombreux domaines.^[9]

**Nous sommes
donc entrés dans
une ère favorable
aux progrès de
l'IA, qui s'invite
désormais
partout dans
notre quotidien**

Machine Learning



Données d'entrée



Extraction
des caractéristiques



Classification



**C'est
une voiture** **Ce n'est pas
une voiture**

Données de sortie

Deep Learning



Données d'entrée



Neurones cachés



Extraction
de caractéristiques
+ classification



C'est une voiture

Coleur : Rouge
Constructeur : Ford
Modèle : Mustang

**Ce n'est pas
une voiture**

Données de sortie

Les grands enjeux de l'industrie 4.0

Cette industrie est tout d'abord performante et efficace, elle respecte aussi bien la qualité que la diversité des produits et services associés mais aussi leur adaptation au client : ses exigences variées, pressantes, changeantes pilotent la production. Pour répondre à ses besoins et attentes, une différenciation des produits est donc appliquée via une configuration personnalisée. L'approche « client centric » se fait aussi ressentir au niveau de la qualité et la traçabilité des produits ainsi que dans l'apport de solutions complètes avec les services associés.

L'innovation est évidemment au cœur du concept d'industrie 4.0. Les techniques et organisations de production, que l'on peut déjà simuler et optimiser en réalité virtuelle, sont amenées à évoluer constamment au vu du rythme effréné de l'évolution des technologies, des connaissances scientifiques associées et de leur diffusion massive^[2].

C'est aussi une industrie agile, connectée en réseau avec ses fournisseurs et ses clients. Connectée par le IIOT et le cloud, l'usine 4.0 pilote la production avec des modes de production flexibles et des outils de production reconfigurables comme les robots ou l'impression 3D. Ces derniers sont mis au point par simulation et optimisation en mode virtuel et sont capables de fournir des produits et services individualisés à des prix compétitifs, en petites et moyennes quantités.

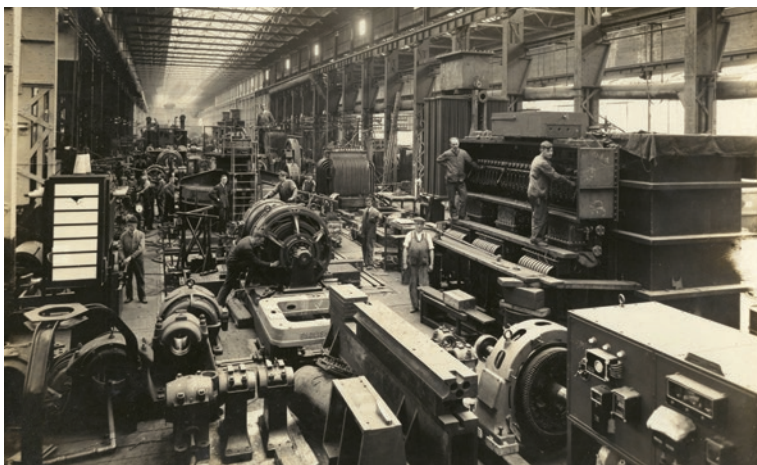
L'arrivée de l'industrie du futur est également l'occasion de renouveler notre réflexion sur la place de l'industrie dans nos sociétés et particulièrement sur sa responsabilité environnementale. Une usine propre, silencieuse, impliquée dans son écosystème industriel, économe en matières premières et en énergie répondra positivement à la demande sociétale de développement durable. Elle remet aussi la responsabilité sociale des entreprises au centre des préoccupations. Une industrie centrée sur l'humain prend en compte les attentes des collaborateurs, développe une organisation participative et collaborative afin d'encourager la prise d'initiatives, la formation et la créativité. Les tâches pénibles ou répétitives prises en charge par l'automatisation et la robotique collaborative permettent une amélioration des conditions de travail.



**une industrie agile,
connectée en réseau
avec ses fournisseurs
et ses clients**

L'Industrie 4.0 : quatrième sur l'échiquier des révolutions industrielles

L'industrie 4.0 est la petite dernière d'une lignée de révolutions industrielles. La première commence dès le XVIII^e siècle, en Grande-Bretagne, avec l'apparition de la machine à vapeur en 1705, puis la machine à tisser mécanique en 1769 et la locomotive à vapeur en 1804^[2]. La seconde démarre à la fin du XIX^e siècle et marque les développements de l'électricité, de la mécanique, du pétrole et de la chimie ainsi que des moyens de communication (télégraphe et téléphone) et du transport collectif (chemins de fer et bateaux à vapeur) pour les échanges internationaux. Rappelons par ailleurs qu'en 1911, l'ingénieur américain Frederick Winslow Taylor invente le taylorisme, une organisation scientifique du travail permettant d'augmenter la productivité des salariés, et Henry Ford crée le montage à la chaîne.



La troisième, quant à elle, apparaît à partir de 1970 avec l'électronique et la création du transistor. C'est l'essor des télécommunications, de l'informatisation et de l'automatisation avec notamment l'arrivée du robot



**une révolution non
pas technologique
mais plutôt systémique**

en 1959 et de l'automate en 1968. Enfin, l'émergence récente de l'industrie 4.0 comme quatrième révolution industrielle relève d'un système global intercommuniquant via des usines flexibles, intégrées et connectées. C'est une révolution non pas technologique mais plutôt systémique, voire interactionnelle entre des briques technologiques déjà existantes : objets connectés et capteurs, automates, robotique, mobilité, big data et cloud, biotechnologies, énergies renouvelables, intelligence artificielle, stockage de l'énergie électrique, nouveaux matériaux...

Un concept initié par l'Allemagne

À partir de 1993, l'Allemagne revoit sa politique industrielle en l'axant sur une approche défensive, dominée par la notion du Standort Deutschland, littéralement « l'Allemagne comme site de production ». Le pays venait de vivre l'expérience de la réunification et la question du maintien de la production manufacturière sur le sol national était essentiel tout comme la défense de sa compétitivité.

Un point de bascule s'est alors produit dès le milieu des années 2000 avec le développement d'une approche plus offensive de cette politique industrielle^[3]. Dès 2005,

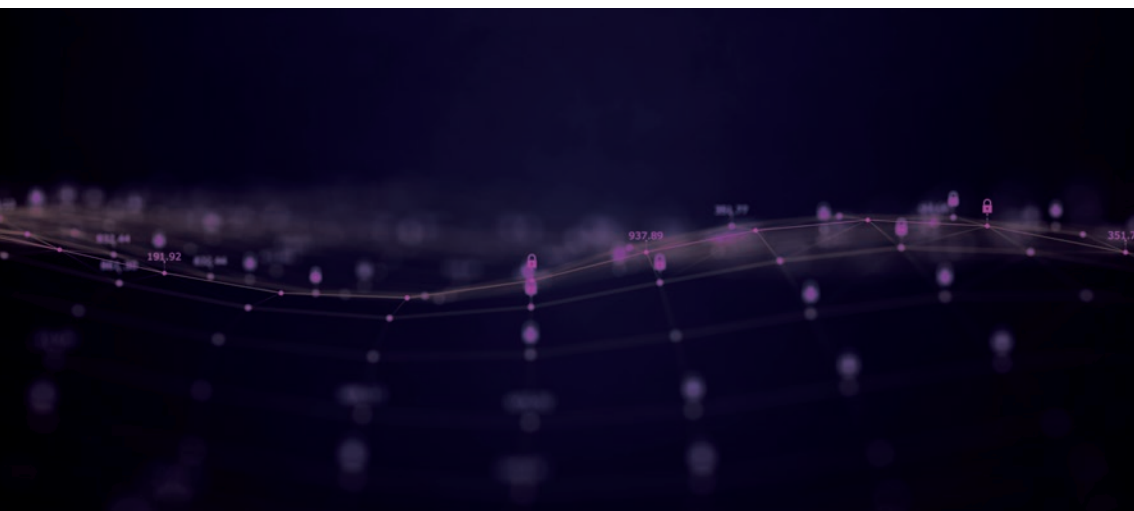
un processus de maturation intellectuelle et institutionnelle commence à se mettre en place, le Centre de recherche allemand pour l'intelligence artificielle lance alors un projet de démonstrateur Smart Factory avec le concours d'entreprises industrielles. En 2006, c'est le ministère fédéral de la Formation et de la Recherche qui finance l'écriture d'un rapport sur les systèmes cyber-physiques (SCP). Une stratégie high-tech est donc bel et bien lancée par le gouvernement allemand. Une initiative impulsée à l'origine grâce à un décryptage des grands enjeux sociétaux (santé, sécurité, climat et protection des ressources, mobilité) déclinés en 17 champs d'innovation dont les technologies de l'information et de la communication.

En 2011, l'Allemagne est finalement la première nation à propulser un programme national industrie 4.0 qui vise à réunir l'ensemble des parties prenantes autour d'un objectif : la sauvegarde du leadership allemand dans la production de biens d'équipements industriels haut de gamme. Son leadership à ce niveau était en effet de plus en plus pris en étau entre des concurrents coréens et chinois ainsi que les géants américains du numérique. Les acteurs allemands du monde économique et de la recherche ont alors identifié les principales tendances de société, les évolutions des modes de consommation et notamment la multiplication des objets connectés. Ils ont imaginé leur impact sur les modes de production et c'est ainsi qu'a émergé le concept d'industrie 4.0.



Une stratégie high-tech est donc bel et bien lancée par le gouvernement allemand.

Il n'existe pas de définition canonique de l'industrie 4.0, ses déclinaisons hors d'Allemagne sont d'ailleurs nombreuses. L'association des entreprises de télécommunications allemandes BITKOM a relevé pas moins de 104 définitions^[1], caractérisations et descriptions différentes. Chaque pays, chaque acteur insiste sur des priorités différentes vis à vis de l'industrie 4.0. Les changements induits par l'industrie du futur peuvent suivre trois types de scénarios selon l'écrivain allemand Peter Stephan^[4] : il y a d'abord une perspective de rupture favorisant l'émergence de modèles sociaux et des modèles de création de valeur entièrement nouveaux ; une perspective liée au progrès qui permettrait de résoudre les problèmes d'aujourd'hui avec les technologies de demain ; une perspective destructrice qui mettrait un terme aux emplois et disloquerait les modèles sociaux. Les Allemands mettent en priorité l'accent sur les perspectives de progrès issues de ces changements tandis que les Français sont plus méfiants en raison du déficit de compétitivité initial de leur industrie.



L'émergence du concept d'industrie 4.0 a donné le feu vert au développement d'une stratégie en trois temps autour d'un « marché du 4.0 » : le développement d'une offre allemande d'équipements industriels et de services pour intégrer les systèmes cyber-physiques dans la production, la diffusion des technologies dans le tissu industriel pour booster la demande, le développement de modèles d'affaires autour de l'internet des services exploitant les données générées par ces équipements.



**Le taux d'utilisation
des équipements
de production en
Allemagne est passé
de 85 % en 1998 à 95 %
en 2014**

En 2013, un rapport final donnant des recommandations de déploiement de l'industrie 4.0 est remis à la chancelière Angela Merkel. Une plateforme institutionnelle Industrie 4.0 sera lancée dans la foulée. Cet outil est avant tout l'expression d'une ambition et représente un intérêt collectif qui vient mettre sous tension l'ensemble du système productif allemand.

Le taux d'utilisation des équipements de production en Allemagne est passé de 85 % en 1998 à 95 % en 2014 avec un parc largement renouvelé, grâce à l'introduction de 95 000 nouvelles machines^[2].

État des lieux de l'industrie 4.0 en France et dans le monde

L'industrie française fait face à un retard important en matière de 4.0 qu'elle doit rattraper. Entre 2000 et 2014, elle subissait même des pertes d'emplois de l'ordre de 20 %. Le taux d'utilisation des machines, quant à lui, était passé de 85 % à 81 % sur la même période.^[2] Les constructeurs français coopèrent également assez peu contrairement aux constructeurs automobiles allemands qui mettent en œuvre des logiques de coopération. Peu de grandes entreprises adoptent ce fonctionnement coopératif alors qu'il existe des exemples avec des résultats probants, comme dans la vallée de l'Arve pour le décolletage, dans la région d'Oyonnax pour la plasturgie ou encore aux Herbiers en Vendée.



L'industrie française fait face à un retard important en matière de 4.0 qu'elle doit rattraper.

Un « réveil » de l'industrie française a eu lieu en 2015. Cette année-là, la Stratégie Nationale de la Recherche « France Europe 2020 » mettait en avant, parmi 10 défis, le « renouveau industriel » autour de différentes orientations : usine numérique, usine verte et citoyenne, procédés de fabrication flexibles centrés sur l'homme, conception de nouveaux matériaux, capteurs et instrumentation. Le projet Industrie du futur lancé en 2015, et piloté par l'Alliance industrie du futur, avait aussi pour objectif de relancer et faire gagner en compétitivité le secteur industriel français en comblant son retard, en modernisant l'appareil productif et en accompagnant

sa transformation numérique afin de s'adapter aux nouveaux usages. Onze thématiques prioritaires furent identifiées et retenues :

- La chaîne numérique de production,
- L'intégration de la chaîne de contrôle non destructif à la chaîne de production,
- Les nouveaux procédés de fabrication agile – tels que la fabrication additive, la robotique industrielle, la cobotique, la réalité augmentée –.
- L'efficacité énergétique et l'empreinte environnementale des entreprises,
- L'utilisation de matériaux composites et de nouveaux matériaux,
- L'économie circulaire dont la récupération et la réutilisation de matériaux,
- L'organisation,
- L'ordonnancement et la logistique,
- L'interface homme / machine.



Construire l'industrie de demain en France nécessite également d'investir dans les technologies les plus prometteuses telles que les batteries innovantes ou les piles à hydrogène afin d'éviter qu'elles ne deviennent de nouvelles zones de fragilité pour l'économie française¹. Le gouvernement a par exemple lancé un appel à projets nommé « solutions et technologies innovantes pour les batteries »², en octobre 2021, qui s'inscrit dans le cadre du 4^{ème} programme d'investissements d'avenir (PIA4) et du plan France Relance. Ouvert jusqu'au 10 janvier 2023, il vise à soutenir la recherche, l'innovation et le premier déploiement industriel de projets pertinents sur tous les maillons de la chaîne de valeur des batteries. Les priorités d'intervention portent notamment sur les domaines suivants :

- Les batteries et systèmes pour l'automobile, l'aéronautique, le marché ferroviaire et spatial, les bus et camions électrique, les engins spéciaux, le stockage stationnaire, etc.),
- Les matériaux et équipements utiles à la fabrication de ces batteries,
- Le reconditionnement des batteries lithium-ion et les prochaines générations de batteries.

1 « Une nouvelle trajectoire pour l'industrie française » : <https://www.accenture.com/fr-fr/insights/industry-x-o/souverainete-industrie-francaise>

2 « Lancement de l'appel à projets « solutions et technologies innovantes pour les batteries » - Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance » : <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/lancement-appel-projets-solutions-technologies-innovantes-batteries>

En Italie, la robotisation est bien en marche, le pays est producteur de biens d'équipements industriels mais connaît des difficultés pour pérenniser cette démarche industrie 4.0. Le cluster Fabbrica Intelligente, créé en 2013, comporte 4 axes : fabrication durable, approches modulaires et adaptives pour l'usine numérique, smart manufacturing et fabrication hautes performances.

Au Royaume-Uni, le plan « Catapult » existe depuis 2012 et vise à mettre en réseau, à travers son axe « High Value Manufacturing Catapult », des centres de recherche de pointe et des entreprises industrielles dans des domaines tels que la fabrication avancée et l'innovation dans les procédés. Le gouvernement britannique avait alors débloqué 170 millions de livres sterling à un fond baptisé « Advanced manufacturing supply chain ».

Aux États-Unis, le National Network for Manufacturing Innovation (NNMI), créé en 2013 et doté d'un budget d'un milliard de dollars sur huit ans, vise la création de 45 institutes for Manufacturing Innovation d'ici 2025. Ces structures se concentrent sur l'apprentissage de la fabrication additive, des nouveaux matériaux, des énergies durables et de la digitalisation des relations avec la chaîne d'approvisionnement.



Ces structures se concentrent sur l'apprentissage de la fabrication additive, des nouveaux matériaux, des énergies durables et de la digitalisation des relations avec la chaîne d'approvisionnement.

La Corée du Sud est le pays le plus automatisé au monde avec 855 robots pour 10 000 employés, selon une étude de la Fédération internationale de robotique publiée en 2019. Le pays a présenté en 2015 un projet Manufacturing Innovation 3.0 dont le but est de s'appuyer sur les technologies IoT et du Big Data afin d'encourager les industriels à investir dans des usines intelligentes. L'objectif de sortir de terre 10 000 smart factories pour 2020 a d'ailleurs largement été dépassé puisqu'on en dénombrait quasiment 20 000 cette même année. Le gouvernement ambitionne désormais de créer 30 000 usines intelligentes d'ici 2022 pour améliorer la compétitivité de l'industrie manufacturière sud-coréenne³. Le ministère a également annoncé qu'il souhaitait élargir son soutien aux PME - 100 000 d'entre elles ont déjà été accompagnées - afin d'incorporer des solutions d'intelligence artificielle et le cloud pour stimuler leur transformation numérique.

**La Corée du Sud
est le pays le plus
automatisé au monde
avec 855 robots pour
10 000 employés**

³ « Le nombre d'usines intelligentes augmente fortement à près de 20 000 », Agence de Presse Yonhap : <https://fr.yna.co.kr/view/AFR20210114002200884>

Au Japon, l'industrie 4.0 a été introduite tardivement avec des programmes lancés mi-2015. Le pays figure pourtant sur le podium des pays industriels les plus automatisés au monde et se positionne comme leader dans le domaine de la conception de robots. Le plan 4.0 japonais est basé sur trois axes : le développement de la robotique avec l'initiative « Robotics Revolution », la création d'une organisation académique appelée « Industrial Value Chain Initiative » pour développer des cas d'usages – ou des preuves de concept (POC) – et un accélérateur d'idées sur l'internet des objets (IoT). Enfin, la Chine souffre d'un tissu industriel faiblement équipé. En 2015, un plan décennal Made in China 2025 a été lancé dans le but de promouvoir l'automatisation et le numérique. Son premier axe vise par exemple l'accompagnement de la robotisation tandis que le second consiste à développer le secteur des biens d'équipements industriels. La priorité est donnée au développement d'un langage de communication inter-machines chinois. Des freins au 4.0 subsistent à cause notamment du pouvoir politique ou encore du contrôle de l'accès à internet par les autorités chinoises.



PARTIE 2

Tour d'horizon des applications de l'Industrie 4.0

Robots autonomes, prédiction de dysfonctionnements, recommandations énergétiques... se lancer dans l'aventure de l'industrie 4.0 et de l'IA impose aux industriels de transformer l'ensemble de leur stratégie, que ce soit au niveau de leur chaîne de production, de la logistique mais aussi de leur management. Selon une étude de CapGemini publiée en 2019⁴, les applications de l'industrie 4.0, telles que l'automatisation afin de réduire les tâches pénibles et répétitives ou encore la mise en place de capteurs et plateformes IIoT pour détecter les pannes en amont, offrent un potentiel significatif pour réduire les coûts de production, augmenter la productivité mais aussi améliorer la qualité des produits. Passage en revue des applications de l'industrie 4.0 qui profitent aux PME comme aux grandes entreprises.

⁴ « *Scaling AI in manufacturing operations : A practitioner's perspective* », CapGemini Research Institute, 2019 : <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/12/AI-in-manufacturing-operations.pdf>

Chapitre 1

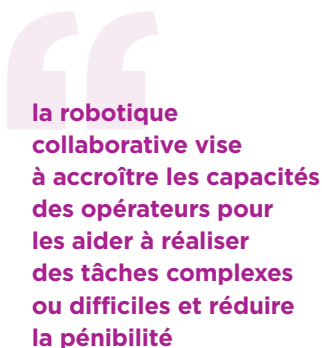
La robotique collaborative pour accompagner les opérateurs sur les tâches pénibles et répétitives

Bien avant la robotique collaborative et même les robots en général, les automates au XVII^e siècle pouvaient déjà reproduire en autonomie une séquence d'actions prédéterminées sans l'intervention humaine. On retrouve par exemple parmi les automates les plus célèbres le Canard Digérateur de Jacques de Vaucanson fabriqué en 1738. Les premiers robots industriels étaient d'ailleurs des synthèses des automates et des ordinateurs pouvant effectuer de façon automatique des tâches physiques à la place des humains, avec davantage d'efficacité, rapidité et précision. C'est en 1954 que l'Américain George Devol dépose le brevet du premier robot industriel nommé Unimate⁵. Il s'agissait d'un bras articulé capable de transférer un objet d'un endroit à un autre. Installé en 1961 sur les lignes d'assemblage de l'usine Ewing Township (appartenant à General Motors), il était chargé de saisir des pièces de métal à très haute température et de les déplacer dans des bains de refroidissement. Cependant, depuis une vingtaine d'années, cette recherche d'autonomie totale n'est plus une priorité. L'offre s'oriente de plus en plus vers des robots travaillant « main dans la main » avec l'opérateur au lieu de l'écartier, collaboratifs en somme. L'objectif affiché est de réconcilier l'homme et la machine de façon à constituer un système à la fois plus efficace et plus intelligent.

⁵ « Cobotique : Quand hommes et robots collaborent », Dossier de veille Unitec, 2018 : <https://www.unitec.fr/wp-content/uploads/2018/11/25-DossierVeille-Cobotique-oct18.pdf>

Cette notion de robotique collaborative s'applique à tout robot capable de partager le même espace de travail que les opérateurs et d'interagir avec eux de manière sûre. Englobant à la fois les cobots-outils, les cobots-collègues, les exosquelettes ou encore les robots mobiles autonomes, la robotique collaborative vise à accroître les capacités des opérateurs pour les aider à réaliser des tâches complexes ou difficiles et réduire la pénibilité. Son introduction permet ainsi de gagner en productivité, qualité mais aussi en flexibilité et capacité de personnalisation.

La réduction des troubles musculo-squelettiques (TMS) est l'enjeu principal du développement de ces technologies robotisées d'assistance à la personne. Les TMS ont été responsables de 42 000 maladies professionnelles en 2016, soit 87 % des maladies reconnues en France^[2], ils représentent donc un problème de santé publique majeur et sont aussi la cause d'une baisse de productivité importante pour les entreprises. Raideur, douleurs, perte de force au niveau du cou, des épaules, du coude, des poignets ou encore du dos en sont les manifestations les plus fréquentes et peuvent aller jusqu'à contraindre un opérateur d'arrêter son travail. En cause, une forte répétitivité de gestes précis, des positions inconfortables et statiques ou encore un manque d'alternance entre les tâches.



la robotique collaborative vise à accroître les capacités des opérateurs pour les aider à réaliser des tâches complexes ou difficiles et réduire la pénibilité

Selon le « World Robotics Report 2020 »⁶ publié par la fédération internationale de la robotique, la vente de robots collaboratifs industriels est en hausse dans le monde chaque année. Le rapport montre notamment que la vente de robots industriels traditionnels a diminué en 2019 (355 000 contre 406 000 en 2018) alors que l'on constate au contraire une progression des ventes de robots collaboratifs (18 000 contre 16 000 en 2018).



⁶ « World Robotics Report 2020 », International Federation of Robotics (IFR) : https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf

Le Cobot-outil et Cobot-collègue comme nouveaux assistants de l'opérateur

Le terme cobot, issu de « collaboration » et de « robotique » est apparu en 1996 pour désigner un dispositif robotique manipulant des objets en collaboration avec un opérateur^[5]. On parle alors de comanipulation, c'est-à-dire la manipulation conjointe d'objets par un opérateur humain et un robot dans le même espace de travail. Le cobot peut prendre plusieurs formes mais la plus commune est celle d'un bras robotisé et articulé, capable de visser, poncer, saisir, frapper, coller, souder...

La robotique collaborative représente donc le stade le plus avancé d'interaction, puisqu'il s'agit pour l'opérateur et le robot de réaliser ensemble une tâche complexe, qui nécessite une coordination. La dextérité et la flexibilité cognitive de l'humain doivent être complétées par la précision et la force du robot. Deux cas de coordination peuvent donc être distingués : le cobot-outil et le cobot-collègue.

Dans le cas du cobot-outil, le robot accompagne le geste humain dans la réalisation d'une tâche, comme le ponçage, le vissage ou encore l'assemblage, et joue alors le rôle d'outil. En d'autres termes, l'opérateur

doit en permanence établir un contact physique avec le robot, ce dernier n'agit donc jamais seul en totale autonomie. Une technologie appelée « guide virtuel » peut se jumeler au cobot-outil afin d'accompagner et



La dextérité et la flexibilité cognitive de l'humain doivent être complétées par la précision et la force du robot.

corriger si besoin certains mouvements indésirables de l'opérateur. Concrètement, ce guide virtuel correspond à une trajectoire enregistrée dans la mémoire du robot, ce dernier va donc être en mesure de ramener la main de l'opérateur vers cette trajectoire si celui-ci en dévie, via un feedback haptique, c'est-à-dire un retour de force sur la main. Un casque de réalité augmentée peut aussi compléter ce retour de force en projetant directement sur le plan de travail la trajectoire à suivre.

Contrairement au cobot-outil, le cobot-collègue quant à lui dispose de capacités cognitives grâce à l'introduction d'intelligence artificielle. Ces nouvelles aptitudes lui permettent de reconnaître le geste de l'opérateur, de se synchroniser avec lui, d'adapter sa cadence mais aussi de comprendre si un événement inattendu se produit. Sur un poste d'assemblage, le cobot-collègue se charge de passer des pièces à l'opérateur qui va les assembler, encore faut-il qu'il le fasse au bon moment, sans retarder l'opérateur dans l'exécution de son geste. C'est justement l'objectif de son système d'intelligence artificielle afin de parvenir à une collaboration efficace entre les deux parties. Exit donc tout

contact physique, ou programmation explicite, pour que la magie s'opère. Par exemple, ce type de robot collaboratif peut être déployé sur des postes de préparation manuelle, comme lors du montage de raccords d'air de moteurs automobiles. Au lieu de laisser l'opérateur s'empêtrer dans différents bacs afin de choisir les



**ce type de robot
collaboratif peut être
déployé sur des postes
de préparation manuelle**

bonnes pièces pour les assembler, le cobot-collègue va s'en charger en tendant les bonnes pièces à l'opérateur. Le robot lui évite ainsi de potentielles erreurs, une pénibilité psychologique ou encore une perte de temps.



Le cobot UR10e, d'Universal Robots, présenté au salon Global Industrie 2021 à Lyon.



ADRIEN POINSSOT
Directeur Commercial
Universal Robots France

En quoi la cobotique est-elle bénéfique pour le secteur industriel ?

Le robot collaboratif permet d'une part de répondre au challenge de l'automatisation d'un poste et d'autre part de changer de process en fonction de la saisonnalité des productions afin de subvenir à de nouveaux besoins de l'entreprise. Par exemple, le cobot est capable de passer sans problème de la palettisation au vissage ou bien de la dépose de colle à l'application de ganache en pâtisserie. Nos cobots UR chez Universal Robots possèdent en tout plus de 150 applications différentes pour appuyer des équipes de production. Ce nouvel outil est devenu un élément central dans les décisions stratégiques puisque le secteur industriel a désormais besoin de plus d'agilité et de flexibilité pour pouvoir s'adapter aux demandes. L'agilité est le critère numéro 1 à prendre en compte plutôt que les besoins de performance et de cadence absolus. L'industrie a besoin d'un tout terrain et non pas d'une Formule 1.

Mettre en place un ou des cobots dans son atelier de production permet aussi de résoudre des difficultés liées au recrutement ou au maintien d'un poste. Les populations sont vieillissantes dans les ateliers et il faut les accompagner avec ces outils pour qu'elles puissent surmonter toute pénibilité et travailler dans les meilleures conditions. Les jeunes, habitués aux tablettes et aux tâches qui ne sont pas monotones, sont aussi plus enclins à postuler s'ils sont amenés à travailler avec des outils innovants tels que des cobots.

La cobotique augmente donc la compétitivité des ateliers de production et le gouvernement propose des aides pour

favoriser son déploiement, ce qui amène des PME françaises à s'y intéresser de plus en plus. Beaucoup d'entre elles nous consultent d'ailleurs tous les jours.

L'IFR (Fédération Internationale de la Robotique) a relevé une tendance claire au cours de ces deux dernières années : la cobotique a une croissance extrêmement forte et soutenue contrairement à la robotique traditionnelle et cela devrait se poursuivre comme tel à l'avenir.

Quelles sont les spécificités de vos cobots UR ?

L'UR3 est le plus petit de notre gamme UR, il possède une charge utile de 3 kg et peut exécuter des tâches sur table, qu'un opérateur effectuerait assis en temps normal, comme des montages de petites pièces. Le plus polyvalent de nos cobots est l'UR5 avec 5 kg de charge utile, il ressemble davantage à un bras humain en terme de corpulence et il est en mesure de réaliser des tâches qu'un opérateur ferait debout comme le triage de pièces par exemple. Quant à notre UR10, il soulève jusqu'à 10 kg de charge utile et peut se déplacer dans une même pièce pour mener des opérations de palettisation, visser des pièces, mettre des produits dans des cartons... Enfin l'UR16 est adapté pour des pièces et palettisations encore plus lourdes (16 kg).

Avez-vous un exemple d'une PME avec laquelle vous avez travaillé ?

Nous avons en effet collaboré avec Normaero, une TPE située à Mautauban (82) qui fabrique des pièces pour les plus grands noms de l'aéronautique comme Ariane Group, Airbus, Rolls-Royce etc. Ils nous ont contacté pour acquérir un cobot UR5 afin d'automatiser des gestes répétitifs pour le chargement de machines. La CARSAT (Caisse d'Assurance Retraite et de Santé au Travail) leur a fourni une aide de 25 000 euros et ils ont pu installer le robot en quelques semaines dans leur atelier. Cela leur a permis de réduire les TMS de leurs opérateurs mais aussi de gagner en productivité.

**SOTIRIS MANITSARIS**

Directeur Adjoint du Centre
de Robotique Mines ParisTech

L'arrivée du projet européen Collaborate en 2018, dont le centre de robotique MINES ParisTech est partenaire, avait pour objectif d'innover dans le domaine de la cobotique autour de 4 cas d'usages. Pouvez-vous me présenter un des cas d'usages sur lequel vous avez été particulièrement impliqué ?

Le projet Collaborate s'articule en effet autour de 4 cas d'usages : l'assemblage de pièces de démarreur de voiture, l'assemblage de LED sur des téléviseurs, le rivetage de structures dans l'aéronautique et le contrôle qualité de pare-brise. Nous avons été particulièrement impliqués dans le projet d'assemblage de LED sur des téléviseurs au cours duquel nous devions montrer qu'une relation humain-cobot était possible. Nous ne souhaitons plus que l'assemblage soit assuré par deux opérateurs car un des deux devait réaliser des gestes relativement pénibles impliquant des risques de TMS. Nous avons alors décidé de déplacer cet opérateur dans un autre atelier de production et de confier ses tâches à un cobot. Au final, nous avons réussi à obtenir une collaboration synchronisée humain-cobot pour mener à bien ce projet : le cobot est capable de s'adapter dans l'espace et dans le temps en fonction du comportement opérateur. Par exemple, lorsque l'opérateur tend sa main, le robot détecte la position de la paume et y positionne la pièce indépendamment du gabarit de l'opérateur. Le robot s'adapte aussi en fonction du rythme de l'opérateur, chaque individu avance en effet différemment par rapport aux cadences à respecter.

Quelle méthode de reconnaissance des gestes appliquée aux cobots a mis au point le centre de robotique Mines ParisTech ?

La mise au point d'un système de reconnaissance des gestes par apprentissage automatique nécessite plusieurs étapes. Il s'agit d'abord de choisir les gestes de l'opérateur que le robot doit reconnaître. La tâche effectuée doit donc être décomposée en différents gestes pour le robot. La seconde étape consiste à choisir la manière dont on collecte des informations sur les mouvements effectués par l'opérateur, comme à l'aide d'un capteur des gestes, cela peut être une caméra. La troisième étape est la collecte effective des gestes à reconnaître. Plus les capteurs filment un nombre important d'opérateurs exécutant leurs gestes, plus les données fournies au modèle d'apprentissage seront nombreuses et plus le système de reconnaissance final sera robuste. La quatrième étape consiste à constituer une base de données que le robot sache lire et qui sera traitée par la suite à l'aide de modèles statistiques. La cinquième et dernière étape est la reconnaissance du geste en lui-même par l'apprentissage automatique. L'objectif est de prédire le geste qu'est en train d'effectuer l'opérateur à partir des données sur la posture des mains. Il faut déterminer la classe la plus probable à laquelle appartient un geste parmi un ensemble de gestes que le robot a déjà appris à reconnaître.

Figure 6

La décomposition des gestes à reconnaître dans le montage de raccords d'air de moteurs automobiles (traduction par La Fabrique de l'Industrie)

**1**

Prendre la 1^{ère} pièce dans la pince gauche du robot.

**2**

Prendre la 2^{ème} pièce dans la pince droite du robot.

**3**

Assembler les pièces.

**4**

Visser les pièces.

**5**

Mettre le produit assemblé dans une boîte.

Les exosquelettes pour développer les capacités physiques de l'opérateur

Exemple bien connu de la robotique collaborative, l'exosquelette d'assistance à l'effort est une structure mécanique doublant celle du squelette humain qui lui confère des capacités physiques supplémentaires. Par exemple, cette sorte de squelette externe permet des déplacements, des manipulations de charge, des manœuvres d'outils que le corps seul ne pourrait effectuer. Dépourvu d'autonomie globale, ce robot assistant reste dépendant de l'intention, du geste ou du comportement de l'utilisateur. Les exosquelettes visent à réduire la charge physique et donc logiquement les troubles musculo-squelettiques (TMS) qui concernent les muscles, tendons, nerfs ou articulations. Les facteurs favorisant ces TMS peuvent être de nature physique (biomécanique) comme lors d'efforts excessifs si un opérateur porte une charge lourde, ou lorsqu'il maintient une posture inconfortable durant une longue période, tel qu'un travail bras au-dessus du niveau des épaules. Par exemple, Ford a équipé les ouvriers d'une quinzaine d'usines dans le monde d'exosquelettes, de la société Ekso, afin de soulager les opérations d'assemblage réalisées les bras en l'air.



**ce robot assistant
reste dépendant de
l'intention, du geste
ou du comportement
de l'utilisateur**

Cependant, selon Jean Theurel, physiologiste du mouvement à l'INRS, l'état actuel des connaissances ne permet pas de préconiser l'utilisation sans réserve de cette technologie pour la prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS)⁷. En effet, la réduction du niveau de sollicitation des muscles assistés, démontrée par les expérimentations du laboratoire « physiologie-mouvement-travail » de l'INRS sur les exosquelettes, est dépendante des contraintes posturales générées par la tâche et des caractéristiques de l'exosquelette utilisé. Les entreprises qui souhaitent se procurer un exosquelette doivent donc être vigilantes sur la définition des tâches susceptibles de faire l'objet d'une assistance, pour choisir le modèle d'exosquelette le plus adapté.

⁷ « Exosquelettes au travail : intérêts et limites pour la prévention des TMS ? », *Compte-rendu de la journée technique organisée par l'INRS, 2020* : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=CC%2032>

Les robots mobiles autonomes pour aider les opérateurs à transporter des marchandises

En parallèle des cobots et des exosquelettes, les opérateurs peuvent aussi s'appuyer sur des robots mobiles autonomes capables d'effectuer une mission spécifique sur un lieu ou dans un endroit donné sans assistance. Les premiers robots mobiles ont d'ailleurs émergé dans les années 1970 avec notamment le robot Shakey, développé par l'institut de recherche de Stanford, qui pouvait grâce à ses capteurs et son algorithme de planification se déplacer d'une pièce à une autre, allumer ou éteindre les lampes, ouvrir et fermer des portes, monter et descendre sur des rampes ou encore pousser devant lui des objets. En industrie, les robots mobiles autonomes représentent un atout indéniable pour la collecte de produits dans des entrepôts, l'inspection dans des usines mais aussi dans des zones de catastrophe comme sur des sites contaminés ou radioactifs. Même si beaucoup de robots mobiles en général nécessitent encore l'intervention d'un opérateur humain pour être téléopérés dans l'exécution de leur tâche, à cause notamment des contraintes liées à l'environnement et d'un manque de maturité technologique, d'autres parviennent à opérer de manière autonome. C'est le cas des robots mobiles utilisés pour la logistique dans les entrepôts car ils évoluent dans des intérieurs fermés et structurés, facilitant leur apprentissage de l'environnement.

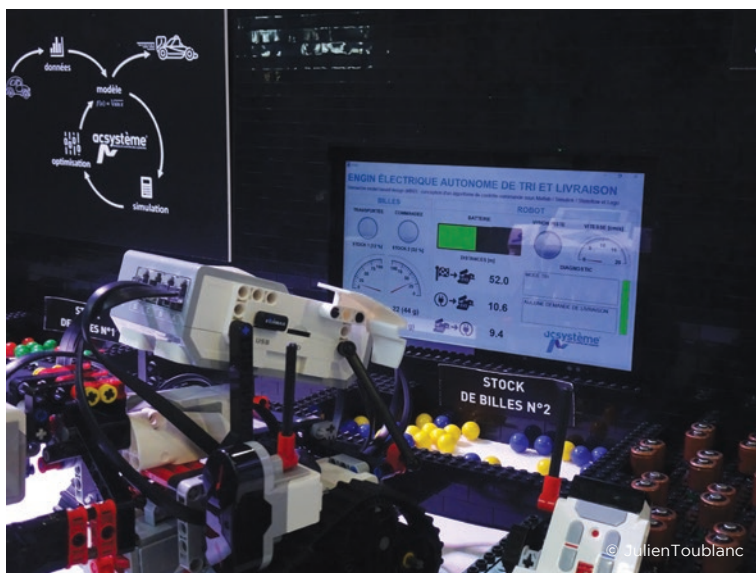


Les premiers robots mobiles ont d'ailleurs émergé dans les années 1970 avec notamment le robot Shakey

Cependant, pour qu'ils puissent devenir pleinement autonomes, ils doivent respecter un schéma de type perception-localisation-raisonnement-action⁸. Concrètement, le robot lâché au milieu de l'usine doit être en mesure d'extraire les informations pertinentes, grâce à ses capteurs, pour qu'il puisse se localiser et cartographier son environnement. En s'appuyant sur sa position et son entourage, il est alors capable de raisonner, grâce à l'introduction d'algorithmes de machine learning, en traitant les ordres de missions à accomplir, en planifiant ses trajectoires mais également en contournant les obstacles sur son parcours. Enfin, ces actions de haut-niveau vont être traduites en actions de bas-niveau, en agissant sur les actionneurs et moteurs du robot de sorte à ce qu'il puisse se rendre à une position donnée avec une vitesse donnée, vers l'objectif à atteindre.

Par exemple, les robots mobiles collaboratifs et autonomes conçus par la société MIR sont capables d'automatiser les transports répétitifs de matériel susceptibles de provoquer des blessures, et ainsi d'accroître la productivité d'une entreprise. Les modèles MIR100 et MIR200 peuvent transporter des charges jusqu'à 200 kg. Ford a d'ailleurs déployé trois robots MIR100, au sein d'une de ses usines de fabrication, pour transporter 100 kg de pièces de rechange chacun. Ces derniers contournent les obstacles imprévus mais peuvent aussi modifier leur trajet ou s'immobiliser si cela est nécessaire.

⁸ « Système de déploiement d'un robot mobile autonome basé sur des balises » Automatique / Robotique, Lionel Génévé, Université de Strasbourg, 2017 : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01713665/document>



La PME bretonne Acystème, bâtisseuse de solutions algorithmiques, fait la démonstration d'un engin électrique miniature et autonome de tri et livraison au salon Global Industrie 2021 à Lyon.

Les robots mobiles autonomes ne servent pas seulement à transporter des charges lourdes et répétitives mais peuvent aussi remplir un rôle d'inspection comme c'est le cas avec le Air-Cobot, développé par Akka Technologies en collaboration notamment avec Airbus. Ce robot a été imaginé pour effectuer l'inspection visuelle que le commandant de bord est censé faire avant chaque décollage. Air-Cobot doit pouvoir se rendre de façon autonome de son hangar à l'appareil, pour vérifier de façon fiable, rapide et sans interruption l'état de l'avion (comme les différents impacts sur le fuselage, les volets etc...).

**GÉRALD LELONG**

Directeur Général
d'Easymov Robotics

Pouvez-vous expliquer précisément votre cœur de métier ?

Nous commercialisons des robots gerbeurs autonomes, nos machines sont conçues pour déplacer en toute autonomie des palettes au sein d'une usine ou d'un entrepôt. Tous les ateliers de production ou centres logistiques déplacent des marchandises, majoritairement sur des palettes. Cette manutention est effectuée avec des gerbeurs ou des transpalettes conduits par un opérateur. Notre solution automatise ces manutentions. C'est une réorientation de notre activité principale qui se concentrait, il y a encore un an et demi, sur le développement de logiciels pour la robotique. Une opportunité avec un acteur extérieur s'est présentée à nous pour faire évoluer notre activité. Nous sommes désormais en mesure de proposer aux industriels, qui souhaitent automatiser, une solution complète comprenant des robots, des terminaux opérateurs de type smartphone ainsi que le serveur de supervision. Notre force est d'être en mesure de proposer une solution clé en main.

  quel type d'entreprise destinez-vous votre solution complète ?

Nous concentrons notre effort commercial sur les PME du secteur manufacturier car ce sont elles qui ont le plus à gagner en automatisant. En effet, ces entreprises ont beaucoup de manutention, une montée en production impliquant des flux de plus en plus importants. Elles cherchent donc des solutions d'automatisation pour gérer les flux logistiques de leurs ateliers de sorte à ce que leurs opérateurs se concentrent plutôt sur des opérations à forte valeur ajoutée, comme le montage ou encore des opérations de test.

Nos robots gerbeurs autonomes peuvent remplacer un cariste ou un opérateur sur des opérations de manutention répétitives. Par exemple, dans un contexte d'une chaîne de montage, imaginons qu'un opérateur soit chargé d'emmener une palette à l'étape suivante après avoir fini son montage. Avec notre solution, l'opérateur scanne juste un QR Code entraînant l'appel d'un robot gerbeur pour transporter ladite palette à l'étape d'après.

Nous pouvons déployer notre solution robotisée au sein d'un entrepôt en seulement quelques jours.

Avez-vous un cas d'usage concret en tête explicitant votre activité ?

Effectivement, nous travaillons pour une usine fabriquant des chauffages industriels et pour laquelle nous automatisons deux choses grâce à nos robots gerbeurs autonomes : la première concerne le déplacement du produit en cours de fabrication, d'atelier en atelier, afin de rassembler tous les éléments nécessaires à sa construction. L'intérêt étant de proposer de la flexibilité pour la production puisqu'il ne s'agit plus d'une chaîne linéaire : le robot se déplace de l'atelier A à B en passant éventuellement par l'atelier C. La deuxième chose est l'approvisionnement en pièces détachées auprès de ces différents ateliers : le robot va venir enlever, sur chaque poste d'opérateur, les palettes vides et les remplacer par des palettes neuves contenant d'autres pièces à monter par exemple.

En quoi consiste le logiciel Open Source ROS (Robot Operating System) avec lequel vous développez vos robots gerbeurs autonomes ?

Le ROS est une technologie que nous connaissons depuis un long moment, c'est un logiciel Open Source datant d'une dizaine d'années destiné à proposer des interfaces plutôt générales pour la robotique. Nous l'utilisons aujourd'hui dans le cadre du développement de notre logiciel bas niveau. Des caméras de marques différentes au sein d'un système ROS pourront par exemple envoyer le même type de données et ainsi être interchangeable facilement. Par ailleurs, comme ce logiciel est Open Source nous avons accès au code source si un problème se présente, contrairement à un logiciel propriétaire, et nous pouvons donc le résoudre par nous-même. La maintenabilité est primordiale. L'attrait communautaire de ce logiciel, à travers un effort de développement collectif, est également gratifiant.

Que voulez-vous dire par “logiciel bas niveau” et “logiciel haut niveau” ?

Notre logiciel bas niveau correspond à un logiciel embarqué sur le robot. Il permet d'interfacer du matériel comme des capteurs et actionneurs afin de contrôler le soulèvement des fourches par exemple. En revanche, notre logiciel haut niveau va gérer des données, issues des différents robots, pour en extraire des informations et les partager entre les robots. Sous ROS, nous utilisons aussi le logiciel Gazebo Open Source, préconisé pour des simulations 3D, afin d'entraîner nos robots dans des environnements plus ou moins réalistes et tester des algorithmes ou configurations.

**ÉRIC MORAND**

Chef du service calcul, ingénierie
logicielle et valorisation
des données au CNES

© CNES/LECARPENTIER Lydie, 2018

Pouvez-vous nous présenter certains projets 4.0 du CNES liés à la robotique collaborative au sein de vos 5 domaines d'intervention (lanceurs, sciences, l'observation, les télécommunications, la défense) ?

En termes de robotique collaborative, nous en sommes au stade préliminaire avec quelques tests de robots. Nous menons des travaux en partenariat avec des industriels majeurs sur des problématiques d'intégration de satellites. Lorsque nous sommes en train de monter un satellite avec des instruments à l'intérieur par exemple, nous aimerions y introduire un robot muni d'une caméra qui va vérifier si les vis et les câbles ont bien été positionnés. Cela permettrait d'avoir des informations sur l'état d'avancement du satellite, s'il est compatible au plan initial d'intégration décidé en amont. Le travail pourrait donc se dérouler en binôme puisque l'humain travaillerait sur le satellite en journée tandis que le robot s'occuperait de faire les analyses la nuit.

Côté sciences, nous pourrions introduire des robots collaboratifs dans le cadre du projet Spaceship, un projet visant à combiner un ensemble de technologies afin de permettre l'installation et l'utilisation de futures bases lunaires et martiennes. Au CNES, des études ont été menées pour que des caméras optiques puissent reproduire l'environnement en 3D, ceci afin de permettre à des futurs Rovers de se déplacer en toute autonomie.

Chapitre 2

Des capteurs et plateformes IIoT au service de la performance industrielle

Inventé en 1999 par l'entrepreneur Kevin Ashton, chercheur en technologies RFID, le terme « Internet des objets » (IoT) pénètre désormais tous les domaines d'activité y compris l'industrie, sous le nom Internet industriel des objets (IIoT). Cette version industrielle de l'IoT se définit comme un grand nombre de systèmes industriels connectés qui communiquent et coordonnent leurs analyses et actions données pour améliorer les performances, l'efficacité et réduire ou éliminer les temps d'arrêt. Ils sont équipés de capteurs miniaturisés capables de générer des données comme des paramètres physiques d'utilisation, des mesures de l'environnement... et de les transmettre à des plateformes IIoT, intégrées dans un cloud, grâce à des réseaux appropriés (Sigfox, LoRaWan, 4G, Wifi, Bluetooth...). Ces données seront ensuite traitées et analysées par des algorithmes d'intelligence artificielle. Grâce à ces capteurs, une machine peut, entre autres, détecter une usure d'outil, une dérive ou un dysfonctionnement dans le processus et modifier son comportement ou déclencher des demandes de mises à jour.



**Ces données seront
ensuite traitées
et analysées par
des algorithmes
d'intelligence
artificielle.**

Cette conception de l'IoT ne date pas d'hier puisqu'elle est née à partir de la création des télégraphes électriques à la fin du XIX^{ème} siècle. Le premier appareil intelligent a d'ailleurs été inventé en 1982 par quatre étudiants en informatique de l'Université Carnegie-Mellon, située à Pittsburgh en Pennsylvannie⁹. Ces derniers avaient eu l'idée d'installer des capteurs dans un distributeur de boissons Coca-Cola afin de relever le nombre de bouteilles de coca présentes dans chaque rangée et depuis combien de temps. Les données générées étaient ensuite mises à disposition des autres étudiants sur une interface digitale, via le réseau Arpanet. Une expérience qui a depuis inspiré d'autres inventeurs pour créer leurs propres objets connectés.

La mise en œuvre de l'IIoT est aujourd'hui un sujet prégnant pour de nombreux industriels dans le monde, à quelques différences près en termes de niveau de déploiement¹⁰. En Europe, on constate une maturité des entreprises en matière d'IIoT. Beaucoup de sites de production sont en effet déjà bien équipés en capteurs. Dans les pays de la région Asie-Pacifique, les industriels développent aussi activement ces technologies au sein de leurs propres entreprises, soutenus par leurs gouvernements respectifs. On pense notamment au pro-

⁹ « L'Internet des Objets (IoT) révolutionne le monde. Mais quelle est son histoire ? » : <https://byothe.fr/2018/10/histoire-internet-des-objets-iot/>

¹⁰ « Internet industriel des objets : grandes tendances » : <https://www.journaldunet.com/ebusiness/internet-mobile/1495229-internet-industriel-des-objets-grandes-tendances/>

gramme gouvernemental « Made in China 2025 » visant à accroître la compétitivité de l'industrie nationale. De l'autre côté du globe, les entreprises américaines ne sont pas enclines à moderniser leurs projets IIoT craignant de potentielles cyberattaques et des menaces d'espionnage industriel. Enfin, dans les pays en développement, les technologies IIoT sont souvent trop coûteuses pour les entreprises locales qui ont déjà du mal à renouveler leurs machines obsolètes. Cette conduite du changement autour de l'internet industriel des objets est aussi entravée par le manque de personnel qualifié et de managers expérimentés.

Malgré tout, l'IIoT s'inscrit de plus en plus dans les feuilles de route des industriels. Le baromètre de la maturité IoT industriel, effectué par Wavestone en 2017^[6] auprès de 90 responsables et décideurs de divers secteurs industriels (aéronautique, énergie, logistique et transport, ferroviaire et navale), montrait notamment que 67 % d'entre eux mettaient l'IIoT dans leur liste de priorités. Deux tiers des répondants

disaient être en phase d'expérimentation de projets IIoT et prévoyaient par conséquent de collaborer avec des acteurs externes comme des start-up innovantes pour affronter

ces nouveaux défis technologiques. C'est en effet grâce à la capacité d'innovation de celles-ci qu'une multitude de nouveaux usages liés à l'IIoT pourront naître et ainsi améliorer les performances industrielles et la réduction des coûts des entreprises. Par ailleurs, la mise en



**67 % d'entre eux
mettaient l'IIoT dans
leur liste de priorités**

place de capteurs et plateformes IIoT induit l'apport de l'intelligence artificielle pour traiter et analyser les données récoltées. De ce côté-ci, tous les voyants sont au vert puisqu'une étude menée par Google Cloud en 2021¹¹ dans sept pays (Allemagne, Italie, Japon, Corée, Royaume-Uni, États-Unis et France), auprès de plus de 1000 cadres et dirigeants de l'industrie, révèle que 76 % d'entre eux misent sur l'IA pour mieux gérer leurs données suite à la pandémie de Covid-19.

¹¹ « Google Cloud Industries : Artificial Intelligence acceleration among manufacturers », 2021 : https://services.google.com/fh/files/blogs/google_cloud_manufacturing_report_2021.pdf

Détecter les anomalies en amont via la maintenance et l'inspection prédictive

La maintenance et l'inspection prédictive figurent parmi les usages principaux de l'Internet Industriel des Objets. L'intérêt ici est d'anticiper les anomalies et pannes potentielles avant qu'elles ne se produisent grâce à une série de procédés technologiques : captation des données en temps réel via des capteurs, choix d'un protocole et d'un réseau pour la transmission des données vers une plateforme – elle-même intégrée dans un cloud pour les besoins de stockage – puis le traitement et l'analyse de ces données grâce au big data pour enfin remonter des informations pertinentes sur des anomalies ou pannes à venir au sein d'un logiciel de gestion de la maintenance.

Au lieu de procéder à une maintenance préventive et d'opérer selon une logique calendaire, c'est-à-dire à la révision de tel ou tel équipement tous les six mois par exemple, et ainsi risquer d'avoir une panne et donc des coûts inutiles, la maintenance prédictive permet de bénéficier d'un gain de temps et de productivité immédiat grâce au traitement en temps réel des données recueillies sur un équipement en particulier.

Différents types de capteurs pour générer des données sur les performances des équipements

Il existe une large palette de capteurs permettant de détecter et de mesurer des paramètres physiques : position, inclinaison, énergie, pression, humidité, température, lumière, vibrations, sons... Dans les faits, un capteur est un organe qui récupère une mesure (comme la température d'un four par exemple...) ou un état (ouvert-fermé, marche-arrêt)^[7]. Seulement, la méthode de mesure doit être adaptée aux conditions ambiantes, elle ne doit pas être affectée par l'accumulation de poussière et de saleté, d'huile ou d'humidité.



Présentation d'un capteur de vibrations, fabriqué par la société allemande ifm electronic, au salon Global Industrie 2021 à Lyon.

Les vibrations constituent l'un des principaux paramètres de détection d'une défaillance potentielle. La surveillance vibratoire permet d'identifier très rapidement un dysfonctionnement sur une machine, et d'anticiper une panne à venir. D'autres paramètres peuvent également être suivis, comme la température, la pression des machines... mais aussi le son¹². La startup Octonion intègre par exemple l'analyse acoustique au niveau des microcontrôleurs dans sa solution Brainium Edge AI. En plus des mesures vibratoires, l'analyse sonore, en particulier de certains types de fréquences, développée par Octonion permet de mettre les machines ou les équipements industriels « sous écoute » continue¹³. Enfin, l'analyse de la lumière via des capteurs de vision industrielle (ou optique) permettent également d'y voir plus clair pour détecter des défaillances. Ces derniers, positionnés sur une ligne de production, peuvent par exemple analyser la lumière réfléchie par les produits qui passent devant eux, identifier le produit en question et détecter d'éventuels défauts grâce à un référentiel contenu dans une base de données^[7].



**Les vibrations
constituent l'un des
principaux paramètres
de détection d'une
défaillance potentielle.**

¹² « Maintenance prédictive : définition et intérêt dans l'industrie » : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iiot/1489507-maintenance-predictive-definition-et-interet-dans-l-industrie/>

¹³ « Maintenance prédictive : Octonion lance une fonctionnalité d'analyse acoustique pour les industriels » : <https://www.actuia.com/actualite/maintenance-predictive-octonion-lance-une-fonctionnalite-d-analyse-acoustique-pour-les-industriels/>



Présentation d'un capteur de vision industrielle, fabriqué par la société allemande SICK, au salon Global Industrie 2021 à Lyon.

Selon le portail de statistiques Statista, le coût de la majorité des capteurs IIoT en 2020 se situait entre 30 et 100 euros pour une durée de vie de 3 à 6 ans¹⁴. C'est grâce à la croissance du nombre d'objets IoT que ces coûts ont diminué ces dernières années pour atteindre un plateau. Le prix du capteur va dépendre des technologies utilisées et du nombre de capteurs. La durée de vie, quant à elle, dépend du nombre et de la fréquence de chargement des données.

¹⁴ « IoT for Supply Chain », Aslog & Wavestone, 2020 : <https://www.wavestone.com/app/uploads/2020/06/Wavestone-Aslog-2020-Radar-IoT-for-Supply-Chain-2.pdf>

Les questions liées au prix mais aussi au design et à l'exploitation sont très différentes s'il s'agit d'un capteur dit complexe, c'est-à-dire doté d'une intelligence de calcul et de traitement importants, ou bien d'un capteur simple capable d'effectuer une ou deux mesures physiques voire d'exécuter un ordre, on parlera alors dans ce cas d'actuateur. Des leviers importants d'économie sont possibles dans la manière de bien penser, acheter et intégrer les parties électroniques et mécaniques d'un capteur simple^[6]. Le prix de la partie électronique va donc dépendre du nombre et de la qualité des modules retenus. Les contraintes d'encombrement et de résistance aux conditions extérieures sont bien plus élevées pour un capteur simple. Il faut trouver une harmonie parfaite entre résistance mécanique, autonomie en énergie et performance radio. La performance (portée et débit) du signal radio va par exemple dépendre fortement de l'environnement métallique et électromagnétique immédiat du capteur.



Il faut trouver une harmonie parfaite entre résistance mécanique, autonomie en énergie et performance radio.

Les entreprises industrielles qui souhaitent se doter de capteurs IIoT peuvent soit les acheter, soit les faire produire en interne ou via un prestataire externe. Une réflexion à mener qui trouve ses réponses selon le volume de données escompté, le type de données à capter, les intégrations mécaniques à d'autres objets, etc. Les industriels ont la possibilité de se placer en position de « makers » : ils font un choix précis des composants qu'ils souhaitent utiliser avec l'aide d'un bureau d'étude interne. Autre option, ils peuvent se mettre en situation de « designers » en s'appuyant cette fois-ci sur un bureau d'études externe afin de piloter l'industrialisation. Enfin, ils ont aussi le choix de se mettre dans la peau de « consumers » et donc d'acheter un capteur standardisé ou peu personnalisé.



NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

D'où vient ce besoin de créer des solutions IIoT facilement accessibles pour l'industrie ?

Nous nous sommes intéressés à la création de solutions IIoT car l'industrie et ses parcs machines en général sont vieillissants depuis plusieurs années. Peu d'investissements sont réalisés. Même si certains industriels parlent d'intelligence artificielle, d'optimisation des performances, de 4.0... la réalité est toute autre. En Europe par exemple, 80 % des usines sont dans une situation bien loin du 4.0. Ces dernières doivent d'abord générer des données, via des capteurs, avant de s'intéresser à l'IA.

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Comment fonctionne votre solution de portique automatisé ?

Concrètement, c'est un scanner prenant la forme d'une arche, qui permet de détecter où se trouvent les dommages présents sur la carrosserie d'un véhicule, et ce à partir de deux millimètres. Cela est rendu possible grâce à des capteurs optroniques et un système d'éclairage structuré, on parle de 800 à 1000 images prises sous tous les angles par une vingtaine de caméras. Notre plateforme de supervision peut ensuite, grâce à toutes ces images et à des algorithmes d'intelligence artificielle, analyser de quels types sont ces dommages. Faire des tâches à partir de caméras, c'est-à-dire de la computer vision, est un pan primordial de l'industrie 4.0 associant du deep learning avec de l'image. On possède toute une qualification du système optique qui peut parfois être très longue, cela fait 4 ans que nous faisons de la recherche et développement à ce niveau-là pour combiner au mieux l'éclairage, les capteurs, les objectifs et la vitesse.

Des plateformes intuitives pour collecter les données et superviser son usine

Les données générées par les capteurs IIoT sur les performances de tel ou tel équipement sont centralisées sur différents types de plateformes, ergonomiques et interactives, afin d'être partagées avec un maximum de collaborateurs comme des techniciens chargés de la maintenance.

En d'autres termes, la plateforme IIoT doit permettre de gérer des centaines de machines et d'équipements connectés, mais également de fournir une couche d'analytique, voire de machine learning. Les données sont ainsi traitées afin de faciliter la gestion de la production, éviter les pannes ou encore assurer la sécurité des opérateurs.

Il est donc loin le temps des immenses panneaux de contrôle avec voyants lumineux, alarmes sonores... pour superviser son usine. Aujourd'hui, les systèmes de supervision ont bien changé grâce à plusieurs facteurs : l'évolution de l'informatique qui est passée de l'architecture « monoposte » à une architecture « client-serveur »^[7], les progrès de la virtualisation, l'évolution des réseaux de (télé)communication qui sont de plus en plus interopérables. L'opérateur ne consulte plus un pupitre de contrôle par machine, il peut consulter les indicateurs clefs de plusieurs équipements sur sa tablette, qu'il soit dans les allées de l'usine ou hors de celle-ci. Il est possible de superviser à distance non seulement une usine mais plusieurs, c'est ce qu'on appelle alors l'« hypervision ».

Si ces plateformes IoT ont émergé, c'est aussi parce que de nombreuses entreprises tentaient de réinventer leur système d'information (SI) tant bien que mal en intégrant des solutions IoT. Devant cette tâche fastidieuse, de nombreux acteurs du marché ont réagi en créant des plateformes IoT à part entière. Ce marché est d'ailleurs loin d'être mature, il reste complexe et ses nombreux acteurs sont mouvants. On compte aujourd'hui plus de 300 plateformes proposées sur le marché^[6], réparties en plusieurs catégories, comme des plateformes Open Source et donc collaboratives, des plateformes cloud player pouvant s'adapter à de nombreux cas d'usages ou encore des plateformes pure player IoT s'adressant à des cas d'usages spécifiques pour un secteur donné.



Présentation d'une plateforme IIoT, développée par ifm electronic et dédiée à la maintenance prédictive, au salon Global Industrie 2021 à Lyon.

Deux évolutions caractérisent ces plateformes. La première est horizontale car ces dernières sont capables de traiter de plus en plus de données, en les orientant par métiers. Les utilisateurs ont en effet une vision à 360° de leurs process : un même équipement peut être analysé de différentes manières en fonction du rôle de chacun. Par exemple, un technicien de maintenance peut observer la liste des dernières interventions réalisées sur un équipement ou encore sa documentation technique, tandis qu'un responsable de production peut tirer des conclusions en observant le nombre de pièces produites par rapport à la cadence théorique ou encore le niveau de qualité des derniers échantillons prélevés. La seconde évolution est verticale, car ces plateformes servent de passerelle entre les capteurs et les logiciels du système d'information de l'entreprise type GMAO, PLM, ERP... On trouve par exemple des plateformes connectées à des logiciels de gestion de la maintenance (GMAO), la remontée d'une anomalie de la plateforme vers le logiciel GMAO entraîne par ailleurs un ordre de maintenance. Connectée au reste du système d'information de l'entreprise, l'usage d'une plateforme permet une meilleure collaboration entre les équipes de terrain et la direction de l'entreprise.

Choisir telle ou telle plateforme s'avère être une décision compliquée pour les industriels car c'est un projet qui s'inscrit dans la construction d'une architecture IoT plus large. Des enjeux d'interopérabilité posés par les capteurs, comme la nécessité de mettre en place un protocole et un réseau IoT, interviennent en amont de la plateforme. Puis il faut aussi réfléchir à l'intégration de celle-ci avec les logiciels du système d'information de l'entreprise.



NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

Quelles sont les particularités de vos plateformes Ewattch Cloud, EasyVision et ProdConnect ?

Ewattch Cloud est le socle de l'ensemble de nos solutions. C'est une plateforme IIoT qui va agglomérer et gérer, dans des tableaux de bord élaborés, toutes les données du parc de capteurs.

La plateforme EasyVision permet de superviser des sites industriels, non pas à l'aide de tableaux de bords mais avec des plans dessinés en 3D. Ceci afin de mettre en avant la data d'une manière différente.

Quant à ProdConnect, c'est une application mobile complémentaire pour enrichir, avec les opérateurs sur le terrain, les datas extrêmement pertinentes fournies par les capteurs.

L'opérateur se sent-il à l'aise à l'idée d'utiliser une plateforme ?

Je dirais que les opérateurs ne sont pas forcément les plus intéressés par la plateforme et les capteurs. Nous devons d'abord leur expliquer que ces équipements ne servent non pas à surveiller leurs moindres faits et gestes, comme leur temps de pause par exemple, mais à recueillir les problèmes liés aux machines. L'acceptation de ces technologies est principalement liée à la politique et au management interne d'une entreprise.

OPC-UA comme protocole de communication entre objets IoT

Un « langage » commun pour interconnecter capteurs et plateformes IoT est nécessaire. Pour cela, la norme OPC-UA s'impose largement parmi les fabricants. Poussé par des centaines d'industriels en Allemagne, en Amérique du Nord et en France notamment, OPC-UA est une sorte de traducteur de protocoles, disponible librement, et compatible avec un très grand nombre de protocoles propriétaires très difficiles à interopérer.

Des réseaux IoT faible débit - longue portée privilégiés pour la transmission des données

Il existe une multitude de réseaux IoT pour le transport de données des capteurs vers leur plateforme IIoT. Parmi les réseaux LPWAN à faible débit et longue portée, on retrouve par exemple les réseaux Sigfox et LoRaWAN^[6]. Disponibles en France, les solutions de connectivité LPWAN se développent progressivement à l'international et peuvent durer sur une période de 10 ans. Leur dynamique industrielle est par ailleurs très active. Les réseaux via nanosatellites peuvent même couvrir une plus longue distance en restant dans du faible débit. Les technologies LAN s'en rapprochent en étant utilisées notamment pour du faible débit mais sur une moyenne distance. Quant aux réseaux cellulaires traditionnels (2G, 3G, 4G et 5G), ils s'avèrent utiles pour du moyen et fort débit sur des moyennes et longues distances. Dans la catégorie courte distance, on retrouve le Wifi, mais seulement

pour un usage en fort débit, puis les solutions RFID pour du moyen débit et enfin des technologies Beacons pour du faible débit.

Ce sont les usages qui vont permettre de déterminer les choix de solutions de connectivité. Parmi les critères déterminants à prendre en compte, nous retenons d'abord l'échelle de mobilité du capteur et donc les besoins en termes de couverture (intérieur ou extérieur), la quantité de données à transporter (le faible débit sera recommandé si le cas d'usage IoT ne nécessite pas des mesures en continu de la part des capteurs et donc une vitesse de transmission et un apport de données important), l'autonomie des objets en énergie, ou la sécurité. Une combinaison de technologies courte et longue portée peut se révéler pertinente.



**Une combinaison
de technologies courte
et longue portée peut
se révéler pertinente.**



NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

Vous avez choisi le réseau low power LoRa pour la transmission des données. Pourquoi ce choix ?

C'est un réseau Open Source, mondial et sécurisé. Ewattch fait aussi de l'infrastructure réseau 4G car il y a une certaine demande d'industriels intéressés. La 4G permet certes d'avoir un débit plus conséquent, entraînant un envoi plus massif de données, mais cela n'est pas si intéressant pour nous car nous souhaitons développer davantage de capteurs en edge computing en interne. Cet objectif à terme ne nécessiterait donc pas l'envoi de tonnes d'informations, seulement les plus pertinentes, c'est pour cela qu'un réseau bas débit LoRa ferait l'affaire. Ce réseau nous a forcés à repenser le fonctionnement de nos projets.

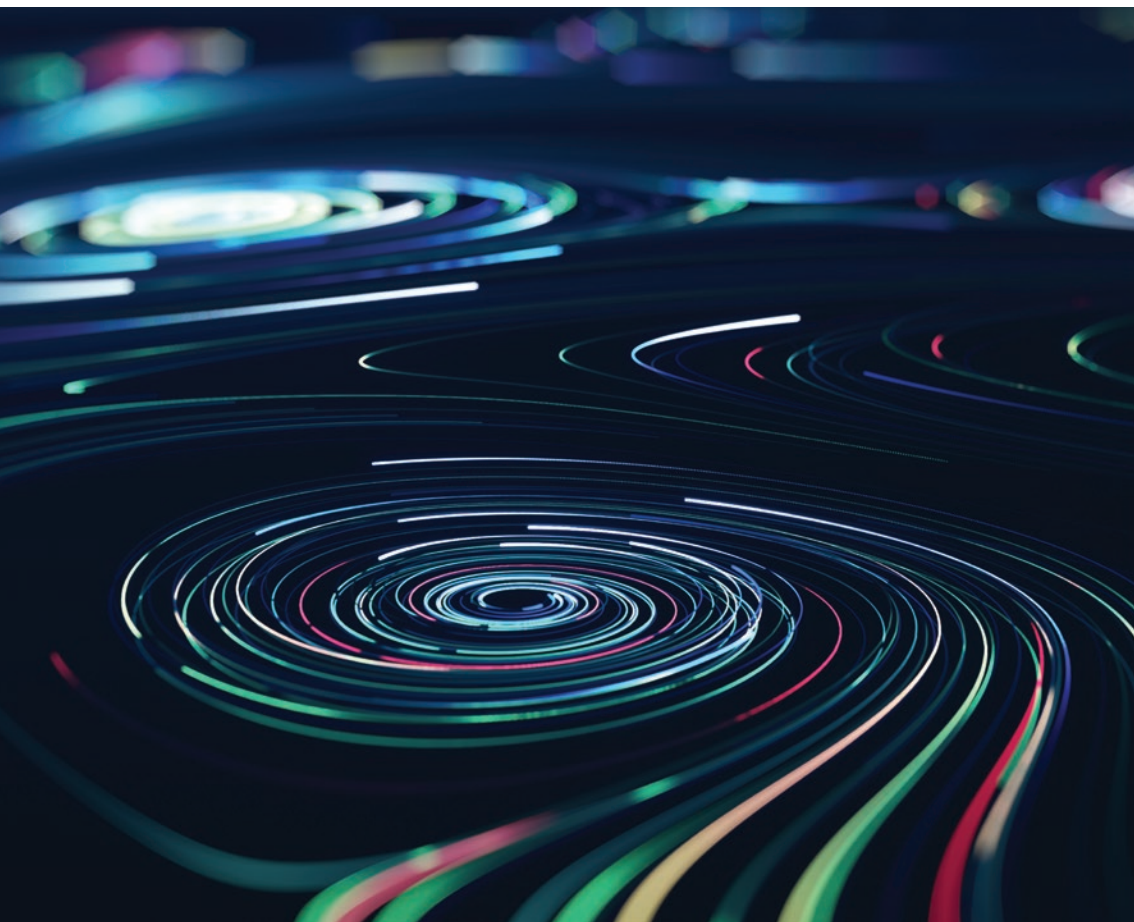
Des plateformes intégrées dans un cloud pour le stockage et le traitement des données

L'inflation de données à venir dans les usines, renforcée par la connexion au réseau 5G qui permet de contrôler en temps réel l'ensemble du parc de machines et robots, nécessite l'installation d'un cloud computing ou cloud en SaaS (Software as a service). En effet, l'analyse des données, collectées par une plateforme IIoT, doit se poursuivre dans un cloud car c'est la seule option avec une capacité de stockage et de traitement suffisante. C'est une stratégie impérative afin d'extraire les meilleures données, et procéder en conséquence à des opérations de maintenance par exemple, qui impacteront positivement la santé économique de l'entreprise et sa productivité. Les industriels doivent d'abord identifier leurs besoins avant de concevoir ou sélectionner la meilleure solution cloud en fonction de leurs cas d'usages spécifiques. Opter pour un cloud en SaaS signifie que l'industriel privilégie une suite logiciel accessible sous forme de service en ligne, payable selon l'usage (forfait ou réel). Tandis que choisir une offre en cloud computing^[7] implique de louer des serveurs, pour une capacité de stockage donnée, avec un accès uniquement en ligne. Un choix qui pourrait réduire les coûts car ce service de location est amorti sur un grand nombre d'utilisateurs, les coûts de fonctionnement



Opter pour un cloud en SaaS signifie que l'industriel privilégie une suite logiciel accessible sous forme de service en ligne

sont proportionnellement plus bas que ceux d'une installation individuelle dans une entreprise. Autre avantage : la gestion des données du parc de machines et les mises à jour logicielles sont déléguées à l'hébergeur. Cependant, il existe des risques associés à cette solution comme la confidentialité et la sécurité des données : celles-ci étant hébergées en dehors de l'entreprise, elles peuvent potentiellement être piratées ou corrompues. Il faut s'assurer que le fournisseur possède une sécurité et une politique de confidentialité à la hauteur des enjeux.



**LAURENT LAPORTE**

PDG de Braincube

Pour quelles raisons proposez-vous votre plateforme dans un cloud ?

Le cloud est une architecture élastique qui a pour vocation de stocker une grande quantité d'informations, à contrario du edge qui optimise le flux de données. Autrement dit, l'architecture edge gère immédiatement des données, là où un cloud sert à réfléchir dessus en utilisant le big data. Avec le cloud, nous pouvons faire du learning, de l'apprentissage. Si l'on reprend mon analogie avec le GPS d'une voiture, le téléphone exécute le trajet que lui a confié le cloud et va s'adapter parfois au cas où l'on rate une route. Le cloud va utiliser l'ensemble des trajets stockés pour optimiser votre trajet.

Big data, jumeaux numériques et edge computing pour donner sens aux données

Donner un sens rapidement à un très grand nombre de données non structurées, comme des informations sur la performance des équipements, est la mission du Big Data. Ce terme désigne la capacité à collecter, stocker et traiter en temps réel des flux très importants de données de nature diverse en vue de leur appliquer toutes sortes de traitements analytiques et statistiques avancés qui relèvent de l'intelligence artificielle (machine learning, deep learning...)^[2]. Stocker des données et en tirer une synthèse sur le passé de l'entreprise n'est plus suffisant. Grâce au Big Data, ces données peuvent indiquer une direction à suivre, avec des probabilités de réalisation.



Donner un sens rapidement à un très grand nombre de données non structurées [...] est la mission du Big Data.

Citons par exemple un cas d'usage ayant impliqué de l'inspection prédictive avec de l'intelligence artificielle : Enedis a signé un contrat avec Alteia, le spécialiste des solutions de gestion des données visuelles pour les entreprises, dans le cadre de la transformation digitale d'une partie des opérations de maintenance des installations de son réseau électrique en 2021¹⁵. Ce sont près d'un demi-million d'images, collectées par drones, héli-

¹⁵ « Performance industrielle : Enedis et Alteia développent une plateforme d'analyse d'images du réseau électrique aérien moyenne tension » : <https://www.actuia.com/actualite/performance-industrielle-enedis-et-alteia-developpent-une-plateforme-danalyse-dimages-du-reseau-electrique-aerien-moyenne-tension/>

coptères ou smartphones sur un périmètre initial de 6500 kilomètres de lignes, qui seront analysées par des algorithmes d'intelligence artificielle. L'objectif pour Enedis est d'anticiper et d'identifier les travaux à mener sur ses installations en France.

Alteia est donc capable de construire des modèles prédictifs et peut compter pour cela sur l'appui de jumeaux numériques. Modèle virtuel d'un produit, d'un équipement, d'un composant, d'un processus, de la ligne de production, de l'usine, du groupe... un jumeau numérique, intégré dans une solution d'intelligence artificielle (type machine learning), permet de détecter des problèmes en amont comme une panne, de tester et simuler des scénarios. L'industriel est désormais en mesure d'analyser les données opérationnelles en temps réel dans le but de mieux comprendre le fonctionnement des équipements et de prendre des décisions rapides pour optimiser leur efficacité. La phase d'analyse de l'équipement, via des réseaux de capteurs, est donc primordiale afin de récolter des données pertinentes à l'élaboration du modèle adapté. L'évaluation prédictive des performances du produit et du système de fabrication, via un jumeau numérique, apporte donc à un industriel des gains significatifs en efficacité, temps et au niveau des coûts.

Le concept du jumeau numérique date seulement de 2003 et se développe progressivement. Selon les prévisions d'ABI research, 54 % des systèmes de surveillance des infrastructures industrielles seront alimentés par des jumeaux numériques d'ici 2026^[2].

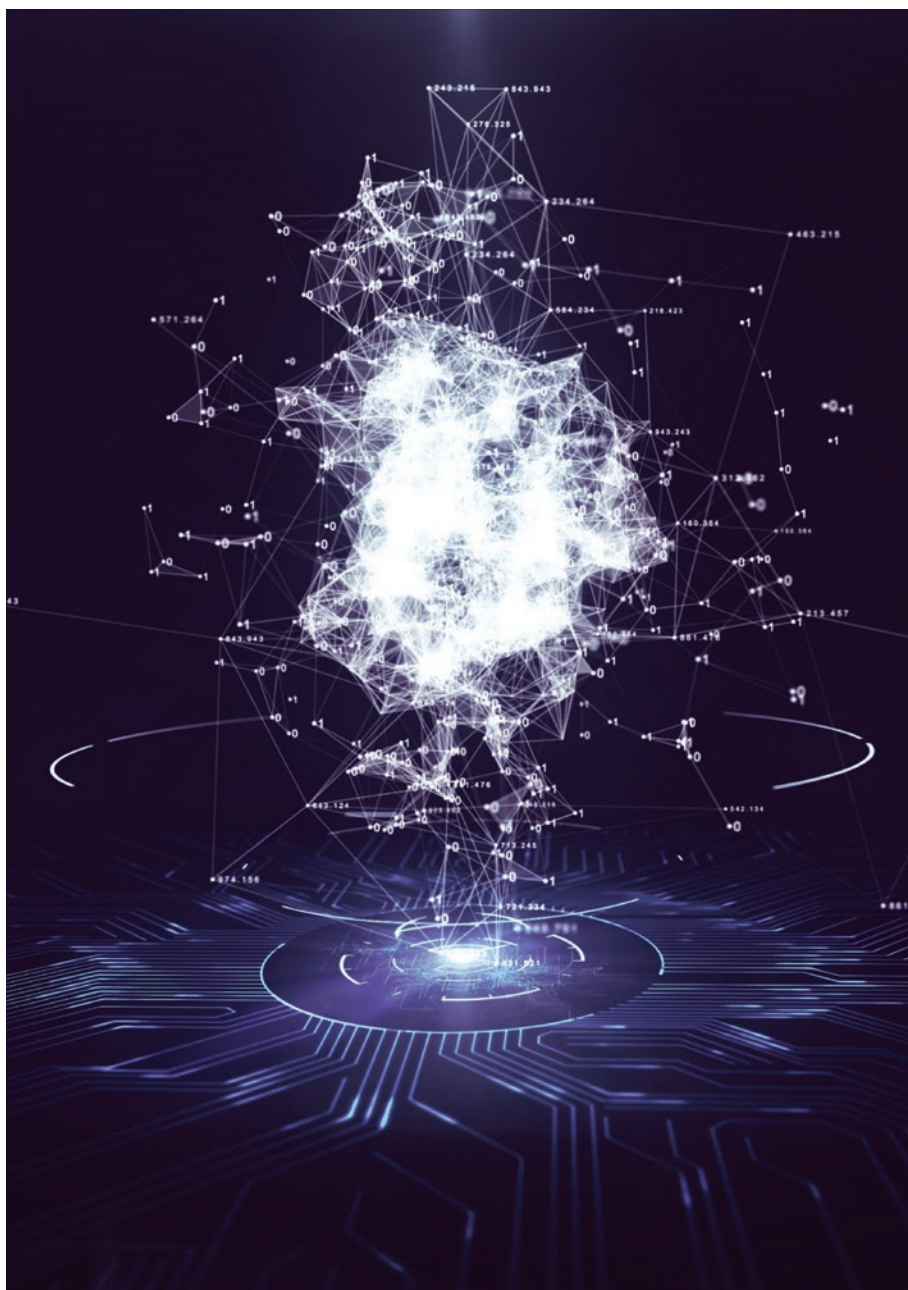
Comme autre solution de traitement des données, le edge computing s'avère être une solution alternative au Big Data en remontant uniquement l'information nécessaire, la smart data ou donnée intelligente, et non une quantité importante de données. Les industriels pourraient alors se passer de besoins extrêmement énergivores en serveurs informatiques. L'edge computing, « à la frontière du réseau », intègre en effet de l'intelligence artificielle dans un capteur positionné sur une machine ou à proximité afin d'en analyser l'état de fonctionnement en temps réel sans passer par le cloud. Cette technologie permet d'envoyer sur le cloud uniquement des messages d'alerte de dysfonctionnement, ce qui permet d'éviter un partage massif de données de production et ainsi favoriser une sécurisation efficace des données¹⁶. Il est aussi plus facile pour les éditeurs de crypter un message qu'un flux de données. Autre argument de poids : l'edge computing évite les coûts de stockage de l'architecture cloud et réduit les frais de bande passante.

¹⁶ « L'edge computing, un outil incontournable dans l'industrie 4.0 » : <https://www.journaldunet.com/ebusiness/internet-mobile/1420755-l-edge-computing-un-outil-incontournable-dans-l-industrie-4-0/>

La start-up Cartesiam a par exemple lancé, en mai 2018, en collaboration avec le fabricant Eolane, un boîtier de maintenance prédictive dénommé Bob et fonctionnant en edge computing. Ce boîtier permet d'enregistrer la vibration d'un appareil sur lequel il est positionné et d'en surveiller directement les anomalies. Comme l'explique Joël Robino, le co-fondateur et directeur général de Cartesiam, l'analyse par machine learning est effectuée là où la donnée est produite. Cette dernière est ensuite détruite, seule une alerte cryptée est envoyée à l'utilisateur.



**54 % des systèmes
de surveillance
des infrastructures
industrielles seront
alimentés par des
jumeaux numériques
d'ici 2026**





NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

À quel niveau de développement de l'IA êtes-vous ?

Pour le moment, nos solutions se basent sur de l'algorithmie relativement simple. Nos data scientists et spécialistes IA analysent la meilleure intégration IA possible, que ce soit dans le capteur ou dans la plateforme. Nous créons aussi des jumeaux numériques par machine, le but étant de leur définir un fonctionnement type, optimal. Le jumeau est aussi une référence pour pouvoir mettre des alertes plus pertinentes et modéliser des structures plus complexes.

Nous venons de réaliser une levée de fond qui nous permettra d'aller plus loin sur l'IA, notamment autour de l'edge computing et de la maintenance prédictive. De plus, nous avons déjà une quantité suffisante de données pour démarrer ces projets, nous ne partons pas de zéro. L'edge computing, ou le pré-traitement de datas directement dans le capteur, est un des enjeux liés à l'IA et permet de ne pas surcharger les data centers avec des volumes de données astronomiques. C'est aussi bénéfique pour sécuriser les données et faire une analyse pertinente de celles-ci. Les capteurs fonctionnent avec des réseaux sans fil longue portée qui ont une latence à la minute ou toutes les deux minutes. Envoyer chacune des données sans pré-traitements préalables avec ce délai peut faire perdre l'essence même des datas.

Nous ne sommes pas en retard pour autant sur nos projets vis-à-vis de notre cible. Nous avons des clients qui ont déjà beaucoup de choses à faire avant de se plonger dans des réflexions autour de l'IA, et nous sommes à leur côté.

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Pouvez-vous être plus précis sur votre usage de l'IA ?

Nous avons développé une chaîne de 25 algorithmes mettant en œuvre une segmentation sémantique pour définir des formes. Ils peuvent retrouver une porte arrière gauche, une poignée ou encore une vitre. Un algorithme va par exemple connaître des règles comme des statistiques de dommages probables tandis que d'autres sont créées pour la détection de dommages purs. Nous souhaitons que notre solution IIoT soit la plus performante possible grâce à l'apprentissage numérique et la labellisation des données. Nous avons dans nos équipes en France une douzaine de personnes formées sur de la labellisation haute-définition de dommages précis. Nos data scientists récupèrent les données labellisées et les entraînent avec des algorithmes existants. Ils procèdent ensuite à des tests de performance pour un déploiement et un apprentissage continu. Nos algorithmes peuvent également être associés à une autre brique appliquée, spécifique à des dommages de type enfoncement et pour laquelle nous utilisons la technique de déflectométrie.

Notre portique combine plusieurs techniques pour fabriquer une intelligence artificielle performante qui pourra en plus s'adapter au type de véhicule et ses spécificités. Un véhicule neuf n'est pas analysé de la même manière qu'un véhicule vieux de 10 ans. Lorsqu'une IA est mal adaptée au type de véhicule, nous constatons la plupart du temps un phénomène de sur-qualité en vision industrielle. En effet, les caméras associées à l'IA voient mieux que l'humain, alors certains industriels appliquent volontairement une baisse de la qualité de leurs systèmes de vision pour éviter que le client passe d'une infime partie à près d'un quart de ses produits à jeter.

**ÉRIC MORAND**

Chef du service calcul, ingénierie
logicielle et valorisation
des données au CNES

© CNES/LECARPENTIER Lydie, 2018

Concernant l'analyse des données grâce à l'intelligence artificielle, êtes-vous favorables à des pré-traitements à bord des satellites via l'edge computing ?

L'edge computing représente un important axe de développement sur nos problématiques satellitaires. Un satellite n'est pas toujours visible, et de plus très contraint sur la transmission des données, c'est pour cela que nous aimons pouvoir faire des pré-traitements à bord. Concernant la maintenance prédictive, nous testons aujourd'hui le système Nostradamus en vol.

L'optimisation des réseaux de neurones utilisés à bord des satellites est primordial sachant que leur consommation électrique est limitée. Il faut donc utiliser des puces à très basse consommation qui résistent aux environnements radiatifs. Celles développées pour des problématiques terrestres, comme les puces que l'on retrouve dans les Tesla, ne tiendraient pas dans un environnement spatial.

**LAURENT LAPORTE**

PDG de Braincube

L'IA combinée au cloud permet de faire éclore des jumeaux numériques. Quelle stratégie avez-vous adopté à ce sujet ?

Comme nous sommes passionnés par la maîtrise du processus pour fabriquer des produits, nous avons mis en place un jumeau numérique particulier pour chaque produit fabriqué. Ce jumeau numérique est conçu à partir de l'ensemble des données récoltées dans le cloud, via les capteurs sur le produit, puis traitées avec des algorithmes de machine learning. Nous pouvons suivre tout l'arbre généalogique de fabrication du produit automatiquement et nous allons chercher les conditions de fabrication de chacun des sous-ensembles. De cette façon, nous capturons la variabilité du processus au niveau du produit et non pas de la chaîne de fabrication. Nous créons une base de données d'apprentissage parfaite car nous nettoignons plein d'erreurs.

Les jumeaux numériques sont des outils qui nous permettent d'évoluer au plus vite. Avant, les opérateurs devaient prévoir des essais durant la phase de production afin de procéder à des réajustements si besoin. Aujourd'hui, ces essais sont réalisés virtuellement, ce qui permet de gagner un temps considérable. Il existe une quantité importante d'applications d'un jumeau numérique. Certains en font pour une machine, d'autres pour une ligne de production...je pense que nous sommes les seuls à le dédier au produit.

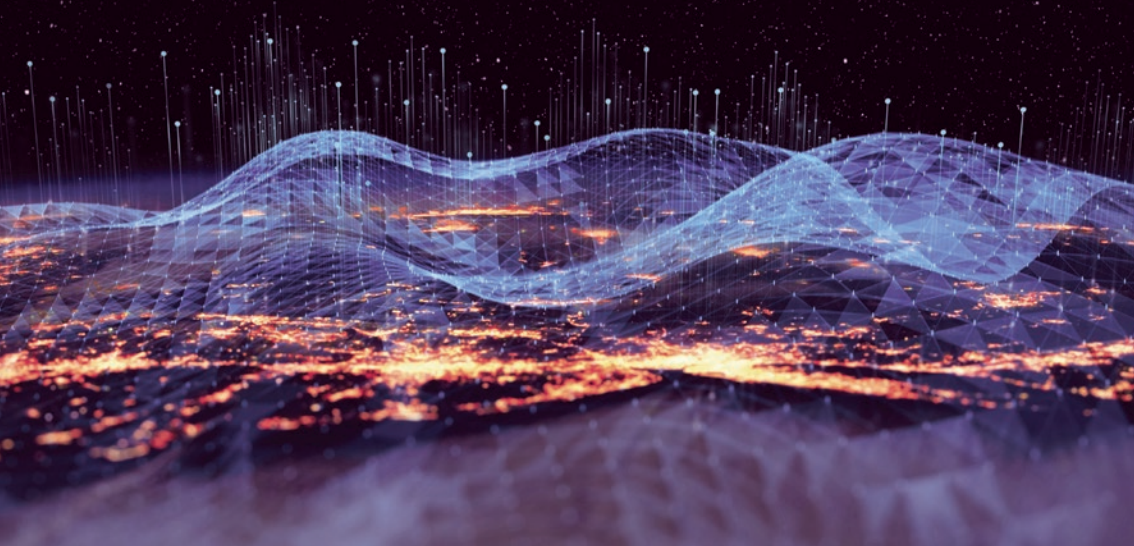
Nos jumeaux numériques sont installés dans un cloud car il faut les stocker et cela nécessite d'importants calculs. Parfois, il faut rattacher des données de plusieurs mois d'écart, on doit rassembler toutes les informations récupérables pour comprendre chaque élément constitutif du produit. Le cloud nous aide bien car il nous permet d'utiliser massivement l'historique pour constituer ce jumeau numérique.

Optimiser le suivi des produits en extérieur mais aussi leur traçabilité et intégrité

Détecter les anomalies en amont grâce à la maintenance prédictive n'est pas le seul cas d'usage propre à l'IoT. D'autres cas d'usages existent comme la localisation d'un produit en déplacement via différents moyens de transport (route, mer...), il s'agit alors d'une solution IoT de tracking. Les industriels ont aussi la possibilité, grâce à l'IoT, de suivre les données historiques d'un produit et son parcours dans la supply chain ainsi que son intégrité, c'est-à-dire ses conditions environnementales (température, humidité...) qui pourraient avoir des conséquences à terme sur son état. Il s'agit dans cet autre cas d'une solution IoT de tracing. Cette combinaison de solutions IoT de tracking et de tracing font intervenir des types de capteurs spécifiques, notamment destinés à relever des positions, des mesures de température et d'humidité, mais aussi des plateformes collectant ces types de données et qui sont complètement pensées pour ces cas d'usages. On peut évoquer par exemple la plateforme EasyTrack développée par la joint venture Safecube. Cette dernière permet par exemple de connaître, visuellement et de façon intuitive, les positions d'objets IoT tout au long d'un trajet maritime intercontinental ou encore leurs conditions environnementales. Comme pour la maintenance prédictive, le tracking et tracing nécessitent de choisir un



le traitement des données à l'aide de l'intelligence artificielle, type machine learning, est une étape primordiale



réseau adapté selon les besoins en termes de mobilité des capteurs, de couverture et de quantité de données à transporter... Les solutions IoT proposées par Safecube utilisent par exemple un réseau bas débit et longue portée car les données n'ont pas besoin d'être récoltées en temps réel mais seulement ponctuellement, et sur une longue distance, tout au long de tel ou tel trajet maritime. Enfin, le traitement des données à l'aide de l'intelligence artificielle, type machine learning, est une étape primordiale pour trouver des variables problématiques et régulières, propres au tracking et au tracing, et engager des prises de décisions afin de les corriger.

**WAËL CHEAIB**

Directeur Général de Safecube

À quoi servent vos solutions « Goods Tracking » ?

Nous développons nos solutions « Goods Tracking » : IoTrack (avec IoT) et EasyTrack (sans IoT) pour assurer principalement un suivi de transport international de marchandises et de matériels, à travers le monde, comme c'est le cas avec Michelin qui achemine ses pneumatiques via le transport maritime. Les produits de nos clients sont en transit durant de longues semaines entre le point de départ et d'arrivée. Nos trackers IoT sont positionnés dans les conteneurs et notre plateforme SAS (Statistical Analysis System) est alors en mesure de fournir au client de la visibilité sur les déplacements de ses marchandises, afin qu'il adapte sa stratégie de stock, de vente ou de production, mais aussi sur les conditions de transport (température, humidité, chocs...).

Quels avantages tirez-vous de l'utilisation de l'IA ?

Une fois que les données des trackers IoT sont agrégées sur la plateforme, elles sont analysées grâce aux algorithmes prédictifs que nous développons. Cela permet par exemple à nos clients manufacturiers d'anticiper des retards. Nous avons mis en place des logiques de machine learning pour relever des effets saisonniers, des tendances sur certaines lignes maritimes traversées en fonction des compagnies maritimes sélectionnées, des conditions météorologiques etc. L'idée est d'exploiter l'intégralité de l'historique de nos expéditions pour ajuster nos estimations. Notre objectif est d'affiner toujours plus la qualité des prédictions que l'on met à disposition des clients.

Travaillez-vous avec des PME ?

Nous avons des clients de toutes tailles, certains exportent 10 conteneurs par mois, d'autres 10 000. Nous travaillons par exemple avec un petit transitaire qui s'occupe du réapprovisionnement en produits frais des supermarchés aux Antilles. Concrètement nous l'aidons à se passer de tous ses loggers statiques de température dans les conteneurs nécessitant d'être connectés par USB sur un PC afin d'avoir des relevés. Notre solution lui permet désormais de suivre en temps réel les conditions de transport de sa marchandise tout comme ses déplacements et les retards éventuels.

Réduire sa consommation d'énergie et ses émissions carbone

En moyenne, la chaleur produite dans les usines est à l'origine de 60 % de leur consommation énergétique, répartie entre les fours et sécheurs, les chaudières, les moteurs, le traitement des matières premières ou encore le froid et l'air comprimé^[7]. Les industriels, électro-intensifs ou pas, ont besoin d'un approvisionnement en énergie continu avec des coûts relativement faibles pour ne pas entacher leur compétitivité. L'énergie est en effet fondamentale aux machines produisant des biens, aux bâtiments qui les abritent ainsi qu'aux systèmes d'information qui participent à leur bon fonctionnement.

L'association de l'internet industriel des objets (IIoT) à l'intelligence artificielle peut alors permettre, en premier lieu, de réduire l'impact énergétique négatif qui colle à la peau de l'industrie lourde, comme le secteur de la métallurgie, minier ou encore du papier.

Apposés sur des machines, des capteurs permettant de réaliser des mesures de pression, d'énergie ou encore de température sont à même de déterminer les optimisations énergétiques à effectuer. Encore faut-il que des solutions d'intelligence artificielle puissent analyser les données générées et ainsi trouver les variables problématiques, comme une dépense trop grande en énergie. Si ces capteurs fonctionnent en edge computing, cela signifie qu'ils sont en mesure d'analyser les données en temps réel, et donc d'avertir sans perte de temps les opérateurs de possibles dérives énergétiques. Déployer une

technologie edge est par ailleurs pertinente pour une entreprise qui souhaite se lancer dans une démarche d'optimisation énergétique, car elle permet d'éviter une collecte trop importante de données au sein de serveurs informatiques beaucoup trop gourmands en énergie.

Certains cas d'usages nécessitent néanmoins une infrastructure Big data, et non pas smart data, pour détecter des dérives énergétiques. En 2016 par exemple, Google a réduit ses coûts et augmenté ses revenus en associant l'IIoT à l'IA afin de réduire les coûts énergétiques des centres de traitement des données de 30 %. Toutes les cinq minutes, l'IA cloud prend une photographie instantanée du système de refroidissement à partir de milliers de capteurs pour ensuite la transmettre à des réseaux neuronaux profonds DeepMind. Ces réseaux en deep learning prédisent comment différentes combinaisons d'actions potentielles pourraient affecter la consommation énergétique future¹⁷.

Des capteurs de haute précision peuvent aussi participer à réduire les émissions carbone d'une usine, en déterminant la source de pollution et la quantité de gaz générés. Mêlée à de l'intelligence artificielle, notamment du machine learning pour l'analyse des données, la précision des indicateurs augmente à chaque rapport grâce à l'auto-apprentissage. Une fois ces données récoltées

¹⁷ « Bon travail, IA : comment les technologies aident à sauver la nature » : <https://www.journaldunet.com/solutions/dsi/1497625-bon-travail-ia-comment-les-technologies-aident-a-sauver-la-nature/>

et analysées, tout le processus de productivité peut être optimisé en minimisant les effets néfastes sur le climat. Selon un rapport du CapGemini Research Institute¹⁸, réalisé en 2020, l'intelligence artificielle pourrait aider les organisations à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 16 % au cours des trois à cinq prochaines années. Sur un total de 800 dirigeants en charge du développement durable ou de la technologie au sein de 400 organisations interrogées - appartenant aux secteurs de l'automobile, de la fabrication industrielle / process, de l'énergie et des services publics, des produits de consommation et de la vente au détail - 48 % d'entre eux affirment utiliser l'IA pour lutter contre le changement climatique. Depuis 2017, leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) ont diminué de 12,9%, leur efficacité énergétique s'est améliorée à hauteur de 10,9% et leurs déchets ont été réduits de 11,7%.



**l'intelligence artificielle
pourrait aider les
organisations à réduire
les émissions de gaz à
effet de serre de 16 %**

Des plateformes, comme celles développées par Braincube ou Metron, existent afin d'aider les collaborateurs d'une usine à visualiser, de façon interactive et ergonomique, les optimisations énergétiques et les efforts en matière de réduction carbone à effectuer.

¹⁸ « Climate AI : How artificial intelligence can power your climate action strategy », CapGemini Research Institute, 2020 : <https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2020/12/Report-Climate-AI.pdf>

**LAURENT LAPORTE**

PDG de Braincube

Quels sont les cas d'usages de votre plateforme IIoT ?

Les cas d'usages de notre plateforme tournent autour du mieux produire. Premièrement, elle permet d'avoir un produit sans défaut, sans taux de rejet, donc sans gaspillage de matière. Deuxièmement, on souhaite qu'elle nous aide à optimiser la vitesse de production car si une entreprise est en capacité de produire davantage de produits, elle va augmenter son rendement et ses coûts vont chuter. En fabriquant 1200 produits au lieu de 1000 par exemple, ceux-ci vont être moins chers et l'entreprise va pouvoir rentabiliser ses équipements. La troisième utilisation de la plateforme se concentre autour de l'énergie qui est toujours utilisée pour transformer le produit, le chauffer, le refroidir, faire fonctionner la mécanique etc. Si l'usine est capable de réduire sa consommation d'énergie par produit, ça lui coûtera moins cher en plus de créer un impact positif sur l'environnement. Ensuite, la plateforme vise à réduire tous les consommables utilisés dans la production des produits comme les additifs, les polymères ou autres. À la place, l'entreprise pourra améliorer l'intégration de matière recyclée par exemple. Enfin, la plateforme doit être un moyen d'éviter l'utilisation de produits générant des rejets de gaz à effet de serre ou des déchets solides et liquides.

En résumé, les données récoltées par la plateforme vont nous permettre de travailler sur cinq domaines : la qualité du produit, la productivité des machines, l'énergie consommée dans le processus, la capacité à utiliser le minimum de matière ou les matières les moins chères et les plus recyclées et enfin le fait d'avoir le moins d'impact polluant possible.

C'est sur ces sujets que Braincube a un impact positif sur la planète. En proposant ce genre de plateforme, nous parvenons à réduire les fortes consommations énergétiques de nos clients comme dans le secteur de la métallurgie qui doit 85 % de ses coûts à l'électricité.

À quel niveau de développement de l'IA êtes-vous ?

Depuis les débuts de la société, nous intégrons du machine learning dans nos applications. Nous sommes acteurs des systèmes apprenants et de l'IA depuis longtemps. La recommandation nous passionne particulièrement, afin de donner des indications de process par exemple. Dans mon analogie du GPS, nous nous rendons compte que cet outil fournit deux informations : une idée du temps qu'il vous reste, c'est la prédiction, mais aussi une instruction pour tourner à tel moment, c'est de la recommandation. Cela fait désormais 12 ans que nous nous perfectionnons dans la recommandation à partir de l'analyse des données historiques de nos clients. Grâce aux solutions Braincube par exemple, un laboratoire rattaché à une usine peut faire de la prédiction puis recommandation en temps réel, comme le fait un GPS, sur la qualité d'un produit. L'usine peut donc désormais réagir pour optimiser sa production : les outils basés sur du machine learning peuvent indiquer au bon moment qu'il faut baisser une température avant de fabriquer avec des défauts.

Pouvez-vous me raconter un cas d'usage client qui vous a marqué ?

En 2008, nous avons travaillé avec la plus grande papeterie française Norske Skog Golbey, ils avaient un problème endémique depuis 1995 avec leur papier journal, très fin, fabriqué sur 10 mètres de large à 120 km/h. De temps en temps, ce papier cassait sur la ligne de production de 150 mètres de long, ce qui impliquait de la redémarrer souvent, entraînant une perte de temps et donc de rendement. Grâce à l'analyse de trois ans de données historiques, nous avons découvert qu'ils ne procédaient pas de la bonne façon et

qu'il y avait d'autres choses à mettre en place, mais qu'ils ne considéraient pas comme prioritaires. Ils utilisaient deux pâtes à papier dont une neuve à partir de bois, c'est celle-ci qui venait causer les casses à cause de ses composants collants. L'autre était un papier recyclé de moins bonne qualité, avec une fibre moins noble. Pour y remédier, nous les avons aidé à maîtriser des paramètres de vieillissement, de température des produits de blanchiment et ainsi réduire les casses. Nous avons immédiatement divisé par sept le phénomène de casse. Ce résultat a été le point de bascule de ce site les années qui suivirent notre collaboration. Ils se sont lancés dans la recherche durant trois ans avec un laboratoire et ont fini par découvrir que notre solution avait en fait permis de réduire un développement bactérien, à l'origine de la casse, dans la pâte à papier utilisée. Nous leur avons donc fait gagner trois années avant qu'eux-mêmes ne comprennent le problème, cela les a incité à installer un système de production basé sur l'analyse de données en formant l'ensemble des ingénieurs. Ils ont pris tous les problèmes les uns après les autres comme la nécessité d'intégrer davantage de papier recyclé, de rejeter moins de matières... et les ont traités systématiquement en divisant l'usine en quatre afin de procéder, tous les ans, à un test sur un quart d'usine pendant trois mois. À chaque fois, ils trouvaient des choses sur lesquelles s'améliorer pour mieux produire, grâce notamment à nos outils edge que nous avons installés par la suite pour afficher toutes les consignes de production critiques. Leur site a fini par exploser en termes de rendement, ils ont réduit leurs coûts, la qualité de leurs produits a nettement progressé.

**ANTHONY GADIOU**

Chief Digital Officer de Metron

Pourquoi s'être lancé dans le Green IT à travers une plateforme digitale dédiée à la décarbonation et la performance énergétique des entreprises industrielles ?

Nous nous sommes lancés dans le Green IT à travers notre plateforme car nous sommes engagés, d'une part, dans une démarche écologique et environnementale et nous sommes convaincus, d'autre part, que le secteur de l'énergie et de la technologie est en train de subir de profondes mutations et révolutions. Ce sont des changements avec lesquels nous devons évoluer. En termes de marché, la forte digitalisation du monde de l'énergie et les technologies de rupture sont de formidables opportunités pour travailler à un avenir plus durable.

Pouvez-vous nous expliquer comment fonctionne votre plateforme pour établir des recommandations énergétiques à ses utilisateurs ?

Notre plateforme digitale aide les industriels à optimiser leurs consommations énergétiques ainsi qu'à réduire leurs émissions de Gaz à effet de serre (GES). Dans un premier temps, elle permet de centraliser toutes les données existantes de l'usine, récupérées grâce à un collecteur de données, afin de proposer à l'opérateur un premier niveau d'energy management totalement digitalisé. Plus précisément, elle vient collecter et croiser les informations liées à la consommation mais aussi à la production via l'ERP de l'usine. Par la suite, la plateforme va traiter ces données avec des algorithmes d'intelligence artificielle pour détecter des opportunités d'optimisation aussi bien sur l'énergie (électricité, gaz, vapeurs...) que pour la réduction des GES

par exemple. La majorité, pour ne pas dire la totalité, des traitements sont exécutés dans le cloud car ils nécessitent des technologies de big data et donc une puissance importante de calcul. La plateforme devient de plus en plus intelligente, grâce à un apprentissage continu réalisé à chaque déploiement de la plateforme chez un client. Tout ceci est possible grâce à nos équipes portées sur l'innovation, l'IA et l'énergie mais aussi la R&D.

C'est dans le cloud finalement que l'on trouve toute la partie applicative de la plateforme. Elle s'apparente à une application web sur laquelle l'utilisateur va se connecter et retrouver ses indicateurs, recommandations énergétiques pour optimiser au quotidien, heure par heure, son process industriel. Par exemple, un industriel va savoir combien il consomme pour la production de ses produits. S'il existe une variabilité dans ses ratios, le but est de déterminer grâce à l'IA la meilleure performance énergétique qui s'est déjà produite afin de rejouer ce scénario en continu.

Quel est l'intérêt d'utiliser des ontologies ?

Chez Metron nous avons toujours été convaincus que seule l'IA verticale a du sens, c'est-à-dire dédiée et optimisée à une verticale métier, dans notre cas l'énergie. Ainsi, si l'on souhaite que l'intelligence artificielle joue un vrai rôle et puisse avoir un degré d'autonomie suffisant pour apporter de réels bénéfices aux utilisateurs de la plateforme, il va falloir qu'elle ait connaissance de l'environnement dans lequel elle opère. Cela passe par une modélisation du contexte et des connaissances métier. C'est ce que permettent les ontologies ; qui sont des bases de données dédiées au stockage et à la structuration de la connaissance humaine. Nous les utilisons pour stocker, structurer puis modéliser des connaissances liées par exemple aux actifs industriels (compresseurs ou chaudières par exemple). Grâce à cela, la plateforme permet de créer un jumeau numérique, qui va connecter les données industrielles aux connaissances nécessaires pour automatiser la détection des optimisations énergétiques.

Vos clients ont-ils une conscience écologique forte ou devez-vous jouer un rôle d'éducateur à ce niveau là ?

On constate une maturité évidente de nos clients sur les sujets liés à l'impact du CO₂ et de la neutralité carbone, le marché qui y est associé est en progression ces dernières années. La réduction des coûts dédiés à l'énergie est un objectif motivant pour bon nombre d'industriels, surtout qu'en Europe s'ajoute un prix carbone en nette augmentation. Cela fait un certain temps que les plus gros consommateurs d'énergie cherchent à réduire leurs dépenses, surtout ceux pour qui l'énergie sert de matière première. Aujourd'hui, on leur propose de nouveaux outils pour pousser encore plus loin leurs optimisations d'énergie. Nous sommes capables de détecter une dérive au plus vite et proposer des actions correctives dans la foulée.

Par ailleurs, la question de l'image entre aussi en jeu pour ces entreprises, elles ressentent le besoin de communiquer sur ces thématiques et d'être en phase avec les attentes de leurs consommateurs finaux. Par exemple, la transparence sur l'impact environnemental d'un produit fini est aujourd'hui un critère déterminant pour leurs achats. C'est une information de plus en plus recherchée, un vrai sujet de traçabilité et de communication qui devient aujourd'hui une clé stratégique pour les grands groupes industriels.

Quel gain en termes d'économie d'énergie peut prétendre une entreprise qui dispose de votre solution ?

En moyenne les économies d'énergie réalisables avec notre plateforme se situent à 8 %. Le ROI (retour sur investissement) va dépendre de ce que l'on met en place avec tel ou tel industriel.

Au-delà d'un aspect économique, visualiser sa performance énergétique permet déjà de sensibiliser les opérateurs sur le site industriel et pose les bases d'une culture d'efficacité énergétique. Concernant la certification ISO 50001 (Energy Management), la plateforme Metron apporte tous les outils nécessaires pour être conforme à la norme, faciliter sa mise en place et son suivi.

Localiser et sécuriser son matériel grâce aux technologies Beacons et IoT

Les Beacons sont des balises positionnées sur des équipements et fonctionnent avec du Bluetooth Low Energy (BLE), largement présent sur des terminaux mobiles, ce qui leur permet d'avoir une consommation d'énergie très faible. En milieu industriel, on retrouve trois familles d'applications exploitant les balises beacons : l'identification, la localisation et la sécurisation¹⁹. Concrètement, une technologie Beacon dispose de plusieurs atouts dans sa manche, elle peut par exemple valider des gestes d'opérateurs en détectant les actions réalisées comme le rangement d'un colis à un emplacement magasin, le chargement d'un camion... apporter à un technicien de maintenance les informations contextuelles d'équipements à proximité ou la localisation d'outils, ou encore réguler la vitesse des véhicules au sein d'un entrepôt. Un beacon est extrêmement simple et peut être couplé à d'autres innovations telles que des capteurs IIoT de température, d'humidité ou de vibration, à des plateformes IIoT et même à l'intelligence artificielle.

Des capteurs IIoT, embarquant des puces RFID, sont aussi capables de tracker en temps réel des colis et machines. En résumé, grâce aux beacons, un chef d'entreprise a la possibilité de repérer sur son smartphone les parcours inutilement longs et coûteux pour réorganiser ses flux de production, retrouver des objets perdus et limiter les erreurs d'inventaire.

¹⁹ « Transformation numérique de l'industrie : le beacon, un potentiel considérable » : <https://www.journaldunet.com/ebusiness/internet-mobile/1495917-la-transformation-numerique-de-l-industrie-le-beacon-un-potentiel-considerable/>

**YANN MAC GARRY**

CEO et Fondateur de Ticatag

À quelles applications sont destinées vos technologies ?

Nous travaillons avec des acteurs de domaines différents, dans le monde de la logistique essentiellement auprès des secteurs du BTP et du transport. Nous pouvons leur proposer des solutions beacons et IoT afin de sécuriser et prévenir les vols d'équipements de chantier, mais aussi pour résoudre des problèmes opérationnels de localisation liés aux remorques.

L'objectif est d'offrir au client final une solution de bout en bout. Pour cela, notre démarche est quasiment toujours la même : il faut d'abord comprendre son problème, puis identifier la technologie qui va permettre de le corriger. La technologie ne se limite pas à la technique, il faut aussi prendre en compte la dimension économique. Nous pourrions avoir des solutions techniques qui résoudraient le problème mais qui n'auraient pas de sens économiquement parlant.

Fabriquez-vous vos propres capteurs IoT et balises beacons ?

Nous proposons seulement notre propre plateforme IoT "Connect". Nous ne sommes pas des fabricants de capteurs IoT et balises beacons, nous avons pour cela, aujourd'hui, un catalogue de fournisseurs avec lesquels nous travaillons et nous intégrons leurs solutions dans notre plateforme. Nous sommes en relation avec des fabricants de capteurs Sigfox mais aussi de capteurs 2G, 3G, voire 4G.

Comment fonctionnent concrètement ces balises beacons sur un chantier par exemple ?

Prenons par exemple une pelleteuse sur un chantier que l'on souhaite surveiller, nous connectons une balise sur celle-ci, c'est-à-dire un tracker GPS avec une batterie autonome, et si jamais elle vient à quitter le chantier sans raison, l'entreprise reçoit une alerte. Elle peut ensuite localiser l'engin et enfin avertir les forces de l'ordre pour le récupérer.

Lorsqu'il s'agit de surveiller du matériel moins volumineux tels que des outils électroportatifs, une boîte à outils ou autres... on dispose des beacons sur chacun d'entre eux puis on installe une gateway à un endroit du chantier, c'est-à-dire une passerelle qui prend la forme d'un petit boîtier avec une interface Bluetooth, afin de scanner tous ces beacons dans un rayon de 50 ou 100 mètres. Cette passerelle transmet ensuite les informations reçues, via une carte SIM, à notre plateforme IoT. Le responsable du site peut donc suivre, grâce à cette plateforme, son parc matériel tous les soirs. Cela fonctionne aussi pour surveiller son kit d'outils dans une camionnette : en installant une gateway à l'intérieur, le propriétaire saura à chaque pointage si le kit est complet et s'il n'y a pas eu un oubli quelque part.

Vous proposez un capteur IoT capable de gérer les approvisionnements de stocks, pouvez-vous nous en dire plus ?

Nous proposons effectivement un capteur IoT BELL qui peut être un moyen de déclencher un réapprovisionnement de stock via un simple appui bouton. Contrairement à des boutons Bluetooth ou Wifi qui nécessitent une box pour faire le relai d'information, ce capteur dispose d'un bouton fonctionnant avec le réseau basse consommation d'énergie Sigfox comme s'il avait une carte SIM intégrée. Un bouton Sigfox a du sens si la zone où se trouve l'entrepôt ou la machine est dépourvue d'électricité. Par exemple, un employé agricole qui travaillerait dans un champ loin de toute électricité pourrait appuyer sur un bouton Sigfox afin d'alerter sur un manque d'eau dans un réservoir. Un signal

de réapprovisionnement serait alors envoyé. Cette solution Sigfox est certes plus chère qu'un bouton bluetooth mais il faut avoir à l'esprit qu'elle reste plus économique qu'une installation d'infrastructures électriques.

Pourquoi privilégier le réseau Sigfox plutôt qu'un autre ?

Le réseau Sigfox, qui a pour équivalent le réseau LoRa par exemple, ne permet pas de tracking en temps réel mais permet de consommer beaucoup moins d'énergie qu'un réseau 4G. Nous ne sommes pas obligés de changer la batterie du capteur en permanence, nous proposons au contraire des solutions qui durent des mois voire des années.

Un industriel doit-il privilégier des balises beacons ou des capteurs IoT ?

Tout dépend de ce que cherche à résoudre l'entreprise : est-ce un problème d'inventaire, de vol ? Si c'est pour du vol, est-ce qu'elle souhaite une technologie ultra réactive, avec un pointage toutes les minutes, toutes les trente secondes, avec une intervention de la police si nécessaire ? Si c'est le cas, l'information n'apparaîtra pas selon la même échelle de temps qu'un capteur bas débit (Sigfox / loRa), et un capteur IoT sur réseau GSM avec un meilleur débit sera alors déployé. Si à l'inverse, quelques positions par jour suffisent, les capteurs Sigfox/loRa conviendront parfaitement ! Enfin, les tags beacon permettent de résoudre des problèmes d'inventaires dans des zones prédéfinies, extrêmement facilement, et à moindre coût.

Quelles sont les perspectives d'avenir du Beacon ?

L'industrie qui fonctionne aujourd'hui à 99 % avec des capteurs RFID ou NFC va sans doute évoluer et trouver des usages différents et intéressants avec les beacons. Le Bluetooth dans l'industrie va se développer, il faut laisser le temps à ce secteur de mûrir et de se laisser convaincre par cette technologie.

Pouvez-vous nous éclairer sur les fonctionnalités de votre plateforme IoT « Connect » ?

Cette plateforme a plusieurs objectifs. Elle est intégrée dans un cloud avec une architecture permettant de collecter en temps réel des données issues de milliers de capteurs. Elle est capable d'encaisser des pics de charge, de trafic etc. Les données stockées dans le cloud sont présentées au client sur la plateforme soit sous forme de cartes pour illustrer les données de navigation, soit sous forme de tableaux de bord, c'est du sur-mesure selon la demande et le type de client. Nous proposons enfin une API ouverte pour s'interconnecter avec le système d'information du client si celui-ci le souhaite.

Réfléchissez-vous à utiliser l'IA pour traiter vos données ?

Une solution IIoT ou même une balise Beacon peuvent effectivement être couplées à de l'intelligence artificielle. De notre côté, on se contente pour le moment de présenter seulement les données, sans avoir de traitement avec IA. Notre métier est de récupérer l'information du mieux possible, en étant malin, pour que la solution ait du sens économiquement et apporte un ROI favorable au client.

Lorsque nous pouvons filtrer des informations le plus en amont possible, comme le fait l'edge computing, nous le faisons en ajoutant par exemple une ligne de code supplémentaire dans la balise de manière à transmettre seulement l'information pertinente.

Feuille de route, Proof of Concept (POC)... les étapes à ne pas rater avant de lancer un projet IIoT

Avant de s'engager hâtivement dans une recherche de cas d'usages IIoT à développer, il est important qu'une entreprise industrielle définisse d'abord une stratégie et une feuille de route vis-à-vis de l'IIoT en fonction de ses priorités^[6]. Il peut s'agir d'une réduction des coûts de maintenance des actifs, d'une exploitation plus fine des données, d'une optimisation des délais et des coûts au niveau de la logistique ou bien du développement de nouveaux services vers les clients ou vers les collaborateurs. L'IIoT vient s'inscrire plus largement dans une feuille de route digitale et doit s'articuler efficacement avec les priorités fixées dans le domaine du traitement et de la valorisation des données. Ces priorités exprimées de la part des entreprises vont laisser place à des idées plus concrètes comme le besoin de se procurer des capteurs, d'une connectivité, d'une plateforme de gestion des données... L'objectif est de transformer les meilleures idées en Proof of Concept (PoC), voir même en Proof of Value (PoV) : Au-delà de vouloir démontrer la capacité technologique à capter la donnée, la transmettre, la traiter et la visualiser, il s'agit surtout de confirmer, à travers le prototype et l'expérimentation,



il s'agit surtout de confirmer, à travers le prototype et l'expérimentation, la valeur ajoutée du cas d'usage désiré

la valeur ajoutée du cas d'usage désiré. Ces expérimentations peuvent être menées dans des labs et trouver le soutien d'un réseau de partenaires, qui aident également à déployer des compétences technologiques spécifiques à l'IoT. Il faut aussi prendre en compte les problématiques liées à la sécurité dès la conception de projets IoT.

La plupart des entreprises industrielles sont aujourd'hui au stade d'expérimentation de projets IoT 4.0 et appréhendent la complexité du passage à l'industrialisation. Des freins subsistent en effet autour des choix technologiques dans un environnement en évolution constante, mais aussi autour de l'organisation et la gouvernance des projets IoT, ainsi que la conduite du changement.

Chapitre 3

Des logiciels pour une fabrication industrielle agile, intelligente, performante et durable

Façonner un système de fabrication intelligent (Smart Manufacturing System en anglais) implique d'interconnecter un écosystème numérique de logiciels afin que les entreprises industrielles puissent maîtriser de bout en bout leur chaîne de valeur, de la commande client à la livraison en incluant l'approvisionnement et les interactions avec les fournisseurs. Une maîtrise due aussi à l'application de l'intelligence artificielle qui va permettre de s'adapter aux contextes changeants auxquels font face les entreprises, en s'ouvrant par exemple à d'autres marchés ou en modifiant la manière d'approcher leur marché historique.

Numérisée et synchronisée, la chaîne de valeur industrielle se caractérise ainsi par sa flexibilité et sa modularité. Elle peut se reconfigurer automatiquement, s'ajuster en fonction de la demande, s'adapter aux potentielles variabilités telles que l'augmentation des prix, la baisse du volume des matières premières, les aléas liés à l'approvisionnement, les pannes de machines, les fluctuations de la qualité etc. Virtualisée, la chaîne n'est également plus ancrée géographiquement, ouvrant par conséquent la voie à une logique de production personnalisée à grande échelle et de lignes multi-produits. En bref, un système de fabrication intelligent maximise les performances (coûts, délais, flexibilité et qualité) en utilisant des logiciels qui favorisent un flux rapide et une utilisation généralisée de l'information numérique dans et entre les systèmes de fabrication.



la chaîne de valeur industrielle se caractérise ainsi par sa flexibilité et sa modularité

On qualifie les performances d'un Smart Manufacturing System (SMS) à l'aide d'indicateurs de productivité, d'agilité mais aussi de qualité et de durabilité^[2]. En effet, il faut aussi prendre en compte dans un SMS des mesures d'innovation et de personnalisation des produits, en plus des métriques de qualité traditionnelles comme le rendement ou encore les retours clients. Quant à la durabilité de la fabrication, elle est définie en termes d'impact environnemental (comme l'énergie et les ressources naturelles), de sécurité et de bien-être des employés ainsi que de viabilité économique.

L'ensemble des logiciels mis en place pour obtenir un système de fabrication intelligent doivent remplir les objectifs propres à ces indicateurs tout au long de la durée de vie du produit. On peut distinguer deux intégrations possibles de ces logiciels :

d'une part une intégration verticale pour gérer le flux classique d'information entre les logiciels, c'est-à-dire le cheminement des données depuis la machine, en passant par la supervision et l'organisation de celles-ci (l'ordonnancement des ordres de

fabrication par exemple) jusqu'au niveau de l'entreprise. D'autre part une intégration horizontale visant à optimiser la chaîne de valeur du produit, en connectant tous ses acteurs (fournisseurs, clients...), au-delà du seul périmètre de l'entreprise. Cette intégration horizontale décrit à la fois les flux de l'entreprise, du produit et du process.



Quant à la durabilité de la fabrication, elle est définie en termes d'impact environnemental

Une intégration verticale des logiciels pour optimiser la reconfiguration des processus de production

Une intégration verticale des logiciels vise à optimiser la reconfiguration des processus de production en connectant l'ensemble des systèmes cyber-physiques (capteurs, actuateurs...) avec les différents outils de gestion de production (planification, stocks...), ce qui permet de reconfigurer aisément le processus de production selon la demande des clients.

On dégage quatre niveaux de logiciels suivant cette verticalité : le niveau entreprise, organisation, supervision et enfin machine.

Le niveau entreprise avec le logiciel ERP et ses interfaces

Chef d'orchestre de l'entreprise, le logiciel ERP (Enterprise resource planning) est un progiciel de gestion intégrée de l'entreprise, mis en place dans de nombreuses unités de production pour la gestion des ressources, notamment en matières premières mais aussi pour des fonctions comptables et des relations client^[2]. Il met à disposition une base de données unique dont il assure l'intégrité, mais aussi la non-redondance de l'information et la réduction des temps de traitement. Un ERP peut intégrer de nombreux modules spécifiques selon les secteurs d'activité.

Mettre en place des technologies IIoT ainsi que l'intelligence artificielle au sein de son usine, sans déployer d'outils comme un ERP permettant la centralisation des données analysées et le déclenchement de prises de décision au niveau des processus de production, aura une efficacité très limitée. Au-delà de centraliser des volumes importants de données, l'ERP permet de coordonner les échanges entre l'industriel et son écosystème (interne et externe), il rend les données exploitables afin de les convertir en actions concrètes pour l'entreprise²⁰. Aujourd'hui, deux tendances se dégagent pour l'ERP :



**L'ERP permet
de coordonner
les échanges entre
l'industriel et
son écosystème**

une verticalisation de plus en plus poussée avec des éditeurs d'ERP dédiés par métier mais aussi une intégration dans le cloud (en SaaS) grâce auquel il devient facile à déployer et à maintenir, interopérable et ouvert, mobile et capable de gérer des quantités de données toujours plus importantes.

L'« ERP industriel » trouve son origine dans le besoin de planifier la production et peut-être interfacé avec différents logiciels tels que des logiciels de gestion d'entrepôts, de gestion du transport, de la maintenance etc^[7]. Le module industriel est associé à la gestion de la production assistée par ordinateur (GPAO). Couram-

²⁰ « L'ERP a-t-il encore sa place dans l'industrie du futur ? » :
<https://www.journaldumet.com/solutions/dsi/1488070-l-erp-a-t-il-encore-sa-place-dans-l-industrie-du-futur/>

ment intégré aux ERP depuis la fin des années 1970, début des années 1980, ce logiciel dispose notamment des fonctions suivantes : la gestion des stocks et des achats, la gestion de commandes, la gestion des produits engendrés par ces commandes, la gestion des articles entrant dans la fabrication de ces produits et de leurs nomenclatures gammes, la gestion de l'emploi du temps du personnel de la production, la création et gestion du calendrier de fabrication ou encore les expéditions des produits et la facturation.

D'autres logiciels peuvent être interfacés à l'ERP comme les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO), d'entreposage-stockage (WMS) ou encore de gestion du transport (TMS).



Un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) est utile pour concevoir des produits, non pas via des plans dessinés à la main mais grâce à des plans numériques réalisés à l'aide d'un ordinateur. Cela fait chuter d'environ 30 % le taux d'erreurs des cotations (indications sur un dessin technique des dimensions réelles d'un objet et de la position des différents éléments de ce même objet). Mieux encore, la CAO permet de concevoir des produits en trois dimensions ainsi que les outils pour les fabriquer. Des simulations numériques sont aussi envisageables afin d'étudier les comportements de ces derniers. Une avancée amenant plus de flexibilité dans le processus de production puisque cela va faire émerger des technologies d'impression 3D, qu'on appelle encore la fabrication additive : ce procédé de fabrication transforme en effet un modèle numérique 3D en un objet physique, par ajout de couches successives d'un matériau. Plusieurs matériaux (plastique, métal...) et techniques peuvent être utilisés^[2]. Grâce à ces technologies, les industriels sont désormais en mesure de contrôler et superviser leur production depuis n'importe quel endroit et donc de maintenir la productivité de leurs chaînes de fabrication²¹. Des logiciels spécifiques de préparation à l'impression 3D retravaillent les fichiers issus de la conception CAO de modèles et de pièces pour les envoyer ensuite à l'imprimante qui exécute le travail en quelques minutes, sans nécessiter de commande manuelle.

²¹ « Travail à distance et industrie : comment l'impression 3D favorise la productivité à l'ère de la Covid 19 » : <https://www.journaldunet.com/web-tech/start-up/1494907-travail-a-distance-et-industrie-comment-l-impression-3d-favorise-la-productivite-a-l-ere-de-la-covid-19/>

En 2019, une start-up valenciennoise a par exemple imprimé une maison en 3D de 50 m² en moins de 24 heures, à Bruay-sur-l'Escaut, dans le Nord-Pas-de-Calais²². Doté d'un bras télescopique, une imprimante 3D pilotée par un ordinateur à distance a reproduit millimètre après millimètre les plans de cette maison. Un chantier qui a seulement mobilisé deux personnes du début à la fin. Ce type d'imprimante 3D possède dans les faits une zone d'impression pouvant aller jusqu'à 265 m² pour 10 mètres de hauteur.

Un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) peut aussi permettre de traduire le fichier CAO en un fichier contenant le programme de pilotage d'une machine-outil. En clair, la FAO va décrire, via la commande numérique, les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée.

Destiné aux services de la maintenance, le logiciel de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) permet de limiter la casse en fournissant des indicateurs qui facilitent les prises de décisions, par exemple le maintien d'un équipement dans un état de marche ou son rétablissement. Ses principales fonctions vont de la gestion des équipements (inventaire des équipements et localisation des équipements), à la gestion de la maintenance en passant par la gestion de la mise en sécurité des installations pour les travaux de maintenance.

²² « Innovation : la première maison en béton de France imprimée en 3D sort de terre à Valenciennes » : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/hautes-de-france/nord-o/valenciennes/innovation-premiere-maison-beton-france-imprimee-3d-sort-terre-valenciennes-1739759.html>

La mission du logiciel WMS (Warehouse Management System) est d'optimiser au mieux la gestion d'un entrepôt : la réception des colis, l'entreposage avec une optimisation des emplacements, la préparation des commandes, la gestion des stocks, l'expédition et l'inventaire. On peut aussi ajouter les fonctions d'allotissement (le fait de grouper des marchandises en lots, selon leur destination), d'inventaire tournant, consistant à compter périodiquement différents groupes de références en stock plutôt que d'effectuer un seul inventaire annuel, mais aussi de traçabilité.

Quant au logiciel de gestion du transport TMS (Transport Management System), ses priorités restent la rationalisation et la réduction des coûts de transport. Les commandes issues de l'ERP passent d'abord par le

WMS, puis sont regroupées par le TMS qui prend en compte les contraintes liées au transport. Lorsque cette opération est effectuée, le TMS en informe le WMS qui peut alors lancer les préparations. L'influence du TMS peut aller jusqu'à l'ordonnancement de la fabrication, donc jusqu'au MES d'un site de production.



**cet outil permet
d'optimiser au mieux
la gestion d'un entrepôt**

Le niveau organisation avec le logiciel MES

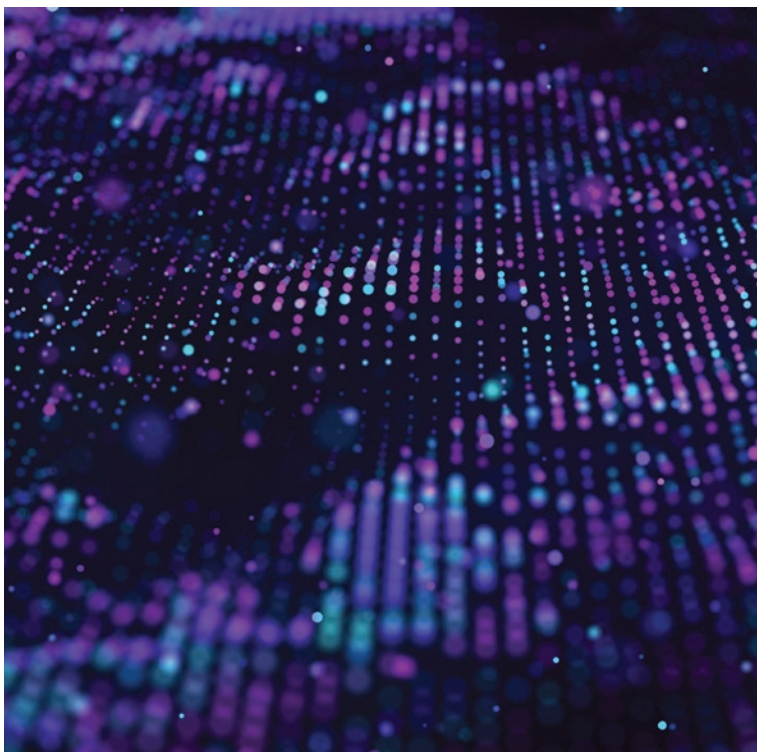
Situé entre l'ERP en amont et les capteurs-actionneurs en aval, le logiciel de pilotage de la production MES (Manufacturing Execution System) a pour objectif de délivrer aux automates les données nécessaires (provenant de l'ERP) à l'exécution de l'ordre de fabrication^[7]. Plus précisément, il est chargé de l'ordonnancement des ordres de fabrication, du cheminement des lots de produits, de suivre des opérations en temps réel, de la collecte et l'acquisition de données, puis de la traçabilité^[2]. Même si l'on parle davantage d'axe descendant des données de l'ERP vers le MES, ce dernier peut aussi recueillir les données issues de la production afin d'en rendre compte à la planification, il est également contributeur d'informations utiles à l'ERP.

Le niveau supervision avec l'IHM et le SCADA

Le niveau supervision correspond aux IHM qui signifient Interface Homme-Machine. Cela fait référence à un tableau de bord permettant à un utilisateur de communiquer avec une machine. Le but premier d'une IHM est de permettre aux opérateurs de visualiser des données quant aux opérations de fabrication en cours, de sorte à les surveiller, mais aussi à contrôler les machines.

Un système de contrôle et d'acquisition des données de type SCADA (Supervisory control and data acquisition) communique avec les automates programmables ainsi que les capteurs d'entrée et sortie pour obtenir des informations sur le fonctionnement des équipements, lors d'opérations de fabrication. Ce sont ces informations qui sont affichées sur une IHM, que ce soit sous forme de graphique, de tableau ou d'autres représentations visuelles facilitant la lecture et la compréhension.²³

²³ « Qu'est-ce qu'une IHM ? » : <https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/visualisation-controle/quest-ce-qu-une-ihm-interface-homme-machine-copa-data/>



Le niveau machine avec des réseaux de capteurs

Le niveau machine permet d'interconnecter les dispositifs de terrain, via des réseaux de capteurs tels que AS-I, DeviceNet, Interbus, P-Net, Profibus-DP et Profinet-IO. Opérant au plus bas niveau d'une installation automatisée, ces réseaux permettent de communiquer avec les capteurs et actionneurs, tout en réduisant considérablement les coûts de câblage. Certains de ces réseaux et protocoles, à l'instar du réseau IO-link, offrent la possibilité de gérer des capteurs et actionneurs « intelligents » via des fonctions de réglages et de diagnostic.^[2]

Une intégration horizontale des logiciels pour optimiser la chaîne de valeur du produit

En connectant tous les acteurs internes et externes impliqués dans la chaîne de valeur d'un produit, l'intégration horizontale de logiciels industriels s'avère efficace pour leur donner des informations sur les flux de l'entreprise, du produit et du process.

Gérer le flux entreprise avec les logiciels SCM et SCI

Le flux entreprise correspond à la gestion de la chaîne d'approvisionnement, de production et de distribution. Le logiciel de Supply Chain Management (SCM), ou management de la chaîne logistique, va par exemple prendre en charge la gestion des flux de matières, de produits finis et d'informations connexes entre les fournisseurs, l'entreprise, les revendeurs et les consommateurs finaux. Le logiciel de Supply Chain Information (SCI) intègre quant à lui tous les plans portant sur les estimations prévisionnelles d'activité : planification de la distribution, plan directeur de production et planification de la chaîne d'approvisionnement.^[2]

Gérer le flux produit avec le logiciel PLM

Le flux d'un produit représente la durée de vie de ce dernier. Des logiciels permettent d'optimiser son cycle de vie, via des flux d'information et des contrôles débutant dès la phase de conception et qui se poursuivent jusqu'à ce que le produit meurt. Un cycle de vie entier, dans un contexte de fabrication intelligente, comprend six phases : conception, planification des processus, ingénierie de production, fabrication, utilisation et service, fin de vie et recyclage.

Le logiciel de Product Life Management (PLM) s'occupe de gérer ces six phases. Il est composé de plusieurs outils informatiques comme la CAO mais aussi la gestion^[7] :

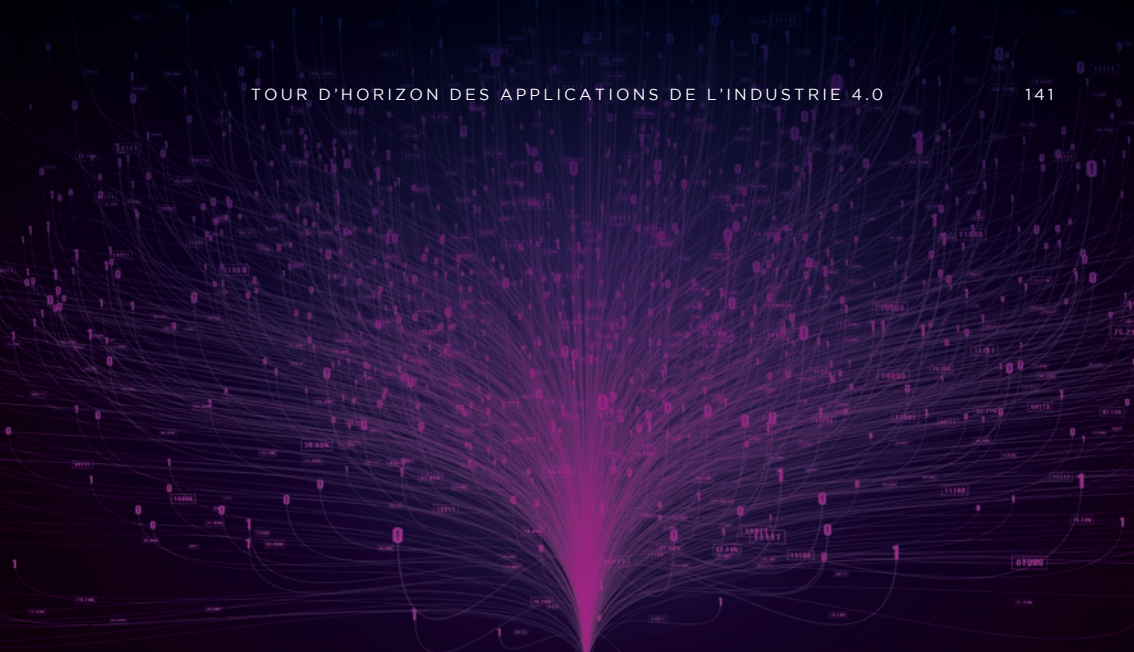
- électronique des données et documents techniques (GEDT)
- de la maquette numérique (au moyen de modèles 3D)
- de la simulation numérique
- de configuration
- des modifications
- des connaissances métier et des projets (pour de futurs développements).

Le PLM met l'accent sur la définition des produits qui seront régulièrement modifiés au cours de leur vie, de la conception initiale jusqu'à la mise à la retraite (démantèlement ou recyclage). Les fabricants interagissent avec leurs produits tout au long des étapes de la fabrication, l'utilisation puis le recyclage. Les équipes dispersées restent connectées sans interruption, en temps réel, afin d'échanger des données autrefois transmises de manière formelle. Un ensemble de fonctionnalités clés est donc mis en place pendant l'utilisation des produits pour générer de la valeur sur le long terme, mais aussi pour apporter une valeur ajoutée au client. Chaque phase du cycle de vie peut être optimisée à la fois en termes de coût pour le fabricant, de valeur ajoutée pour le client et d'impact sur l'environnement, grâce à des architectures innovantes plus flexibles.

Prenons l'exemple du Falcon 7X qui a bénéficié des fonctionnalités d'un PLM. Dassault Aviation a réussi l'assemblage physique de l'avion d'affaires sans passer par un prototype physique ni le moindre ajustement. Les délais d'assemblage et d'aménagement ont été considérablement réduits.²⁴

En résumé, un PLM apporte donc plusieurs bénéfices : il réduit le temps entre la conception et la mise sur le marché des produits, le coût des prototypes, les déchets et améliore en théorie la qualité.

²⁴ « Dassault Aviation selects Dassault Systemes' 3D PLM Solutions for new Falcon 7X » : <https://www.3ds.com/press-releases/single/dassault-aviation-selects-dassault-systemes-3d-plm-solutions-for-new-falcon-7x/>



Gérer le flux process avec la méthode CCx

Le flux process représente le flux du système de production composé de l'ensemble des machines, des équipements et des systèmes auxiliaires organisés pour créer des biens et des services à partir de diverses ressources. Le cycle de vie du système de production est axé sur la conception, le déploiement, l'exploitation et la désaffectation d'une installation de production complète, y compris ses systèmes. Les systèmes de production ont généralement un cycle de vie beaucoup plus long que les biens qu'ils produisent. De plus, ils doivent être reconfigurés fréquemment et ont donc des besoins uniques concernant leur conception.

La méthode CCx^[2], dédiée à l'amélioration des performances des systèmes de production mais aussi à leur diagnostic et pronostic continu, consiste à tester l'ensemble du système de production, y compris l'équipement, l'usine et les installations, et à remettre le système en fonctionnement. Le système est vérifié pour fonctionner conformément aux objectifs et aux spécifications de conception. Il est soumis à des opérations de tactiques et d'activités de maintenance stratégique. Lorsque des changements radicaux internes ou externes interviennent – typiquement des sous-systèmes principaux qui tombent en panne ou un groupe de produits ciblé qui est retiré du marché – alors la durée de vie du système de produits arrive à son terme. La production va cesser définitivement ou le système est recyclé. Dans cette phase, grâce à la méthode CCx, la planification de l'adaptation ainsi que la remise en service sont effectuées pour maintenir et améliorer la performance du système. Le but est de rechercher des moyens de reconfiguration du système pour l'adapter aux changements du marché et de la chaîne d'approvisionnement.



**Le système est vérifié
pour fonctionner
conformément aux objectifs
et aux spécifications
de conception.**

Des logiciels d'aide à la décision pour améliorer la performance d'une usine

Axe majeur de développement pour l'usine du futur, les logiciels d'aide à la décision se distinguent par deux niveaux de maturité : l'intelligence opérationnelle qui permet d'avoir une vision en temps réel des performances de l'entreprise et l'informatique décisionnelle ou business intelligence qui vient guider les choix des responsables.

L'intelligence opérationnelle (IO)

Les logiciels d'intelligence opérationnelle (IO)^[2] (ou de big data pour l'intelligence de production) récupèrent les données issues de l'IIoT et des différents logiciels de l'usine (MES, PLM, ERP...) ainsi que leurs historiques pour proposer aux managers d'avoir une vision en temps réel des performances de l'entreprise. Ces derniers sont amenés à suivre ces performances via des tableaux de bord, des indicateurs clés de performance (ou KPI : Key Performance Indicator) ou encore des alertes. Les contributeurs suivent les résultats opérationnels grâce au reporting. Le logiciel IO est même capable de fournir aux managers des suggestions d'actions au regard de qui se passe en temps réel dans l'usine, afin d'accélérer la prise de décision et la communiquer facilement. Les employés, en ayant accès aux mises à jour et alertes, peuvent aussi être incités à remonter d'eux-mêmes des suggestions d'amélioration de fonctionnement.

Le logiciel IO permet par exemple d'optimiser le planning de maintenance, d'alerter sur le risque de rupture des stocks en fournissant la meilleure solution d'approvisionnement ou d'avertir les acteurs concernés via le MES, mais aussi de prévenir que le palier de réapprovisionnement des stocks est à revoir pour suivre le planning de production...

L'informatique décisionnelle ou business intelligence (BI)

Les logiciels de Business Intelligence (BI)^[2] ont aussi pour objectif de fournir au manager des indicateurs clés de performance et un tableau de bord pour l'aide à la décision. La différence à noter est que le flot d'informations provenant de différentes sources et comportant des données hétérogènes est traité et analysé par un acteur intermédiaire ayant une expertise métier poussée. D'autres méthodes d'analyse peuvent être appliquées comme le data mining, c'est-à-dire l'exploration de données, ou fouille de données, qui consiste en la recherche de connaissances pour la prise de décision à partir de l'analyse d'un grand nombre d'informations et de données corrélées.

Nous pouvons dégager trois niveaux de pilotage propres aux logiciels de business intelligence : D'abord, un pilotage opérationnel permettant de superviser les processus en cours, traiter les erreurs et alertes pour donner lieu à des réactions rapides. Par exemple, le manager peut être amené à satisfaire une commande urgente, changer de lot ou de format de production, réorienter

la production en fonction des disponibilités machines ou opérateurs, ou encore faire appel à un sous-traitant. Deuxièmement, on assiste aussi à un pilotage tactique via un traitement et une analyse des données poussée par des experts, cela permet d'améliorer considérablement les processus et de s'aligner stratégiquement. Enfin, le troisième niveau de pilotage, découlant du second, est le management stratégique qui vient définir des facteurs clés de succès, fixer, planifier puis contrôler les objectifs. Le management de la performance globale est assuré. Le manager peut notamment prendre la décision stratégique d'adapter les capacités de production au lancement de nouveaux produits, mais aussi estimer le potentiel d'un nouveau fournisseur à répondre à la demande ou bien prédire la pertinence de l'implantation d'une nouvelle ligne.

Comme outil de business intelligence, on trouve le logiciel ERP Magisoft, développé par la société CMRE en partenariat avec Magic Software. Il est utile notamment pour la gestion de production (GPAO), la gestion des relations avec les clients (CRM)... mais aussi pour l'informatique décisionnelle (ou BI) à travers des fonctionnalités d'étude des coûts et de rentabilité des produits ainsi que des tableaux de bord intégrant des indicateurs de performance personnalisés.

Parmi les logiciels d'aide à la décision, l'informatique décisionnelle (ou business intelligence) représente donc le niveau le plus évolué de pilotage entraînant la prise de décision la plus élaborée.

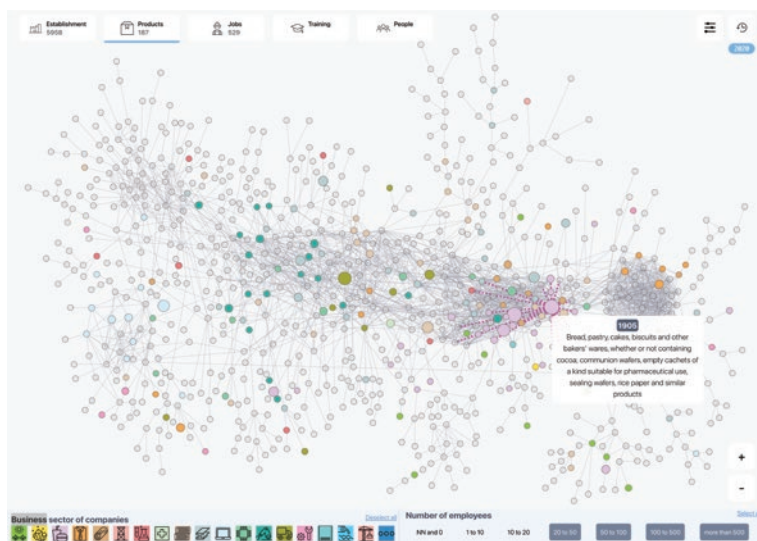
Un exemple d'outil d'aide à la décision avec de l'IA pour l'optimisation de la résilience des systèmes productifs : L'Atlas des Synergies Productives

En collaboration avec l'Institut Pascal (unité de recherche et de formation sous la tutelle de l'Université Clermont Auvergne (UCA) et du CNRS), l'entreprise OpenStudio développe l'Atlas des Synergies Productives. Cette solution technologique conçue à partir d'Intelligence Artificielle et d'Open Data vise à créer une nouvelle industrie plus circulaire, plus résiliente, décarbonée et mieux distribuée sur le territoire.

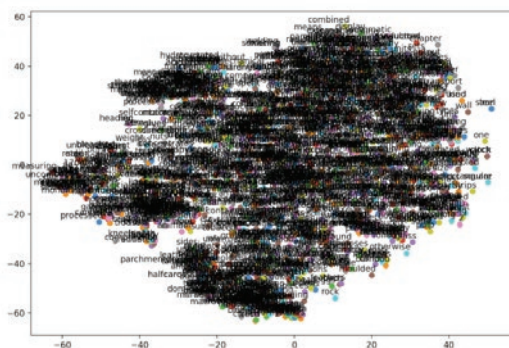
Unique en France, l'Atlas des Synergies Productives est destiné aux services de l'État en Région, des collectivités (développement économique), des chambres et syndicats professionnels et des entreprises (diversification, relocalisation, digitalisation de la fonction achats). Basé sur l'analyse fine des données ouvertes (bases INSEE, SIRENE, ROME, Pôle emploi, douanes et modélisation localité/produits issue des travaux de recherche de l'Université d'Harvard), l'Atlas des Synergies Productives utilise l'intelligence artificielle afin d'analyser mais aussi prédire des biens et des connexions pour des entreprises d'une localité donnée. Il est donc à la fois un outil de diagnostic pour identifier et documenter les zones de fragilités industrielles et un outil d'aide à la décision pour l'optimisation de la résilience productive et la décarbonation des filières industrielles.

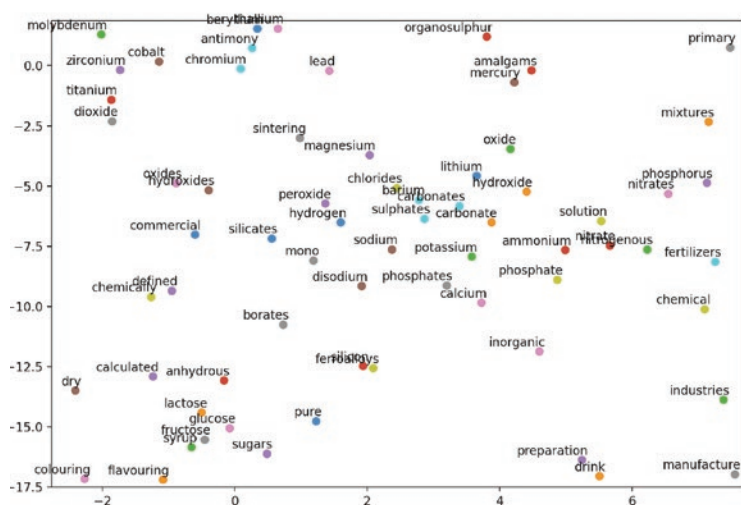
L'Atlas des Synergies Productives offre les fonctionnalités opérationnelles suivantes :

- La visualisation du potentiel productif d'un territoire donné avec les établissements présents et leurs biens fabriqués. Cette visualisation permet l'identification des établissements qui ont le potentiel de transformer leur production rapidement afin de faire face aux aléas et/ou de développer de nouveaux biens préalablement ciblés ou à fort potentiel économique. Un exemple est donné ci-dessous. Il s'agit de l'espace productif de la Région Auvergne-Rhône-Alpes dans lequel chaque couleur correspond à une catégorie de produits et les points grisés à des produits non fabriqués sur le territoire.

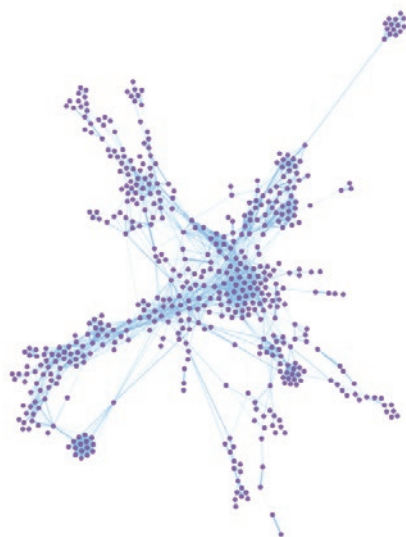


On peut enrichir le modèle par une analyse sémantique des désignations de produits, qui nous offre une piste pour appréhender la proximité sémantique entre les produits. En utilisant des techniques d'IA d'analyse du langage naturel telles que word2vec (plongement lexical des mots dans un espace vectoriel) on pourra mieux lier sémantiquement chaque produit. Ce n'est pas étonnant car les désignations de produits ont justement été rédigées pour être compréhensibles et éviter les ambiguïtés.



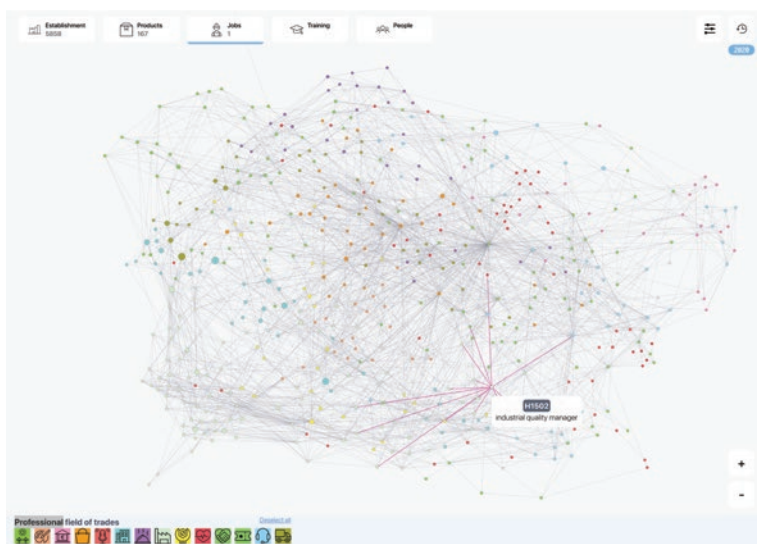


Plongement lexical Word2Vec appris à partir des désignations de produits de la nomenclature internationale (harmonized system HS6) et zoom aléatoire sur une section du modèle.



*Visualisation des proximités sémantiques
entre produits selon la nomenclature HS4.
Les proximités entre les produits sont calculées
en utilisant sentencevec à partir
du corpus English CoNLL17. Le graph est généré
avec le logiciel Gephi.*

- L'identification des besoins en ressources humaines des entreprises par la mise en évidence des compétences métiers. L'outil participe donc au développement de solutions adaptées aux problématiques locales : identification des compétences transférables, développement de nouvelles formations, mobilités professionnelles.

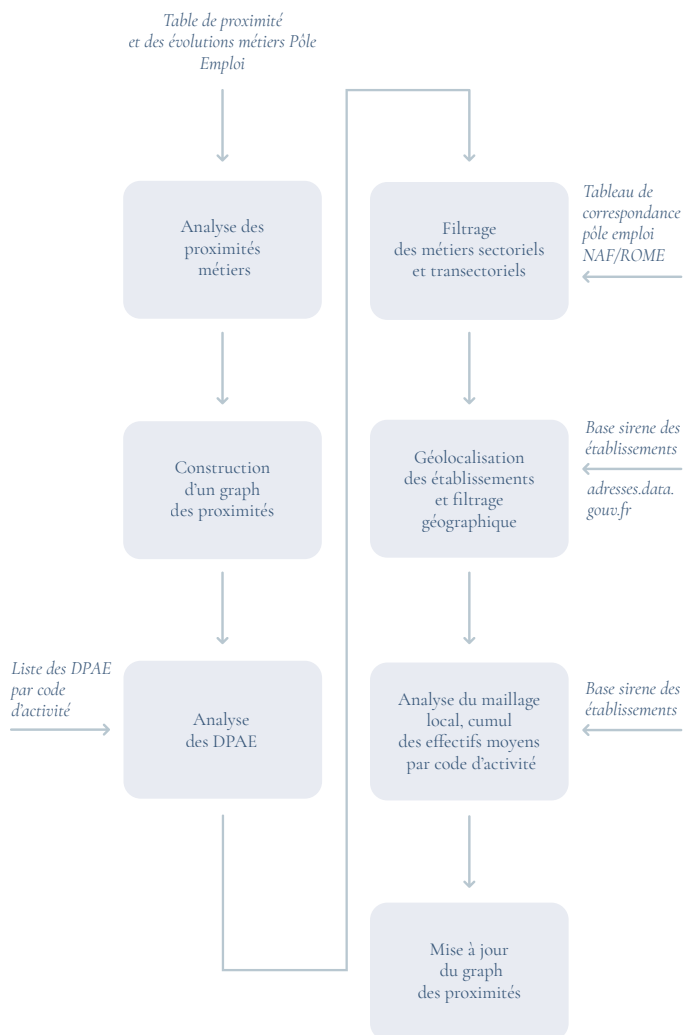


Focus : Modélisation des proximités entre métiers et visualisation des compétences associées à un territoire

Dans le cadre des recherches d'OpenStudio sur l'Atlas des Synergies productives et ses thématiques associées – la résilience des territoires et leur capacité à surmonter des choc désstabilisateurs –, l'entreprise s'est intéressée à la dimension RH.

Une modélisation des compétences présentes sur un territoire était indispensable pour tenter de répondre aux nombreuses questions qui se sont posées dans le contexte fluctuant actuel. Quels sont les métiers présents sur un territoire et quels sont les liens de proximité et d'évolution qui existent entre eux ? Comment une collectivité locale pourrait mieux piloter l'offre de formation qu'elle propose pour quelle soit en adéquation avec les besoins des entreprises ? Quels sont les territoires d'industrie, les communes, les départements, ou les régions idéales pour installer mon unité de production ? Si les métiers requis pour l'installation d'une nouvelle unité de production ne sont pas présents sur le territoire, quels sont les métiers proches pour lesquels des profils sont disponibles et que nous pourrions former vers les métiers cibles ? Comment mesurer le niveau de résilience d'un territoire sur le plan de la diversité et de la redondance des métiers qui y sont représentés ?

OpenStudio a donc travaillé sur le sujet de manière à intégrer la dimension RH dans l'Atlas des Synergies productives. Voici les premiers résultats obtenus.



Workflow des traitements nécessaires pour la visualisation des métiers présents sur un territoire

Visualisation des proximités et des évolutions métiers

La première chose à faire est de mettre en relation les métiers de la nomenclature ROME. Pour cela les data scientists ont pu s'appuyer sur le travail réalisé par Pôle Emploi disponible en open data²⁵. Cette table de proximité est mise à disposition des conseillers pour orienter les demandeurs d'emplois dans leur recherche. Elle contient deux niveaux de proximité entre les métiers selon qu'il s'agisse de deux métiers proches ou qu'une évolution soit possible du premier métier vers le second.

Une proximité²⁶ de 0,5 dans le cas de deux métiers proches et une proximité de 0,9 lorsqu'il s'agit d'une évolution ont été décidées pour générer une table de proximité pondérée.

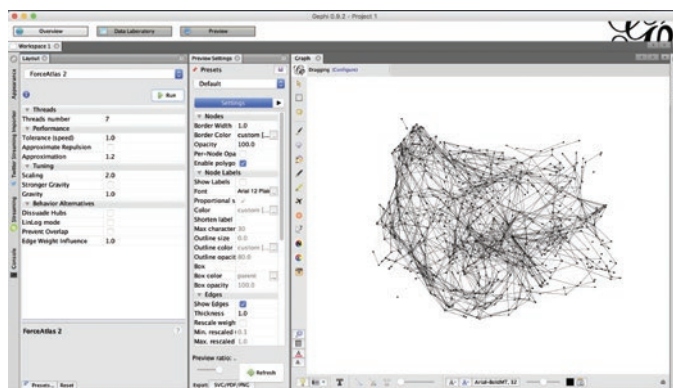
²⁵ « Répertoire Opérationnel des Métiers et Emplois », 2021 : <https://www.pole-emploi.org/opendata/repertoire-operationnel-des-metiers.html?type=article>

²⁶ Voir « Proximités métiers selon la nomenclature ROME (format CSV) » : <https://www.openstudio.fr/2021/03/09/modelisation-des-proximites-entre-metiers-et-visualisation-des-competences-associees-a-un-territoire/>

²⁷ « The Open Graph Viz Platform » : <https://gephi.org>

À l'aide du logiciel Gephi²⁷, les équipes d'OpenStudio ont construit un graphe 2D des proximités métiers. Les options de Gephi permettent de maximiser les distances entre les points éloignés. Les résultats obtenus avec une projection selon la méthode « Force Atlas 2 »²⁸ se sont révélés satisfaisants.

Gephi peut générer ensuite le graphe dans le format GEXF (Graph Exchange XML Format), de manière à l'importer ensuite dans un logiciel. Il existe également des viewers affichant les fichiers GEXF sur une page web.



Création d'une représentation 2D des proximités métiers avec le logiciel Gephi.

²⁸ « ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the gephi software », 2014 : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098679>

L'analyse des déclarations préalables à l'embauche et modélisation territoriale

Il était nécessaire de faire le lien entre les établissements présents sur un territoire et les métiers associés. Il existe bien une table de correspondance NAF/ROME²⁹ mais elle n'est pas pondérée et ne concerne que les deux premiers chiffres du code NAF, elle ne sera utilisée que par la suite pour filtrer les résultats. On y trouve pour chaque code d'activité NAF (sur 2 chiffres) la liste des métiers associés, mais également une liste des métiers transsectoriels (avec une distinction tertiaire et industrie).

Un fichier en open data qui recense les volumes de DPAE³⁰ (Déclarations Préalables À l'Embauche) pour chaque code d'activité a été analysé. Un travail indispensable pour générer à partir de ce fichier une table de correspondance pondérée³¹ entre des codes d'activités (code NAF) et des codes métiers (code ROME).

²⁹ Voir « L'analyse des déclarations préalables à l'embauche et modélisation territoriale » : <https://www.openstudio.fr/2021/03/09/modelisation-des-proximites-entre-metiers-et-visualisation-des-competences-associees-a-un-territoire/#zp-ID-5019-5452838-WMTN3VB6>

³⁰ « Nombre d'embauches par code APE et code ROME », 2017 : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/nombre-dembauches-par-code-ape-et-code-rome/>

³¹ Voir « Table de correspondance pondérée NAF / ROME (format CSV) » : <https://www.openstudio.fr/2021/03/09/modelisation-des-proximites-entre-metiers-et-visualisation-des-competences-associees-a-un-territoire/#zp-ID-5019-5452838-WMTN3VB6>

La liste des métiers associés à une entreprise (quel pourcentage de chaque métier y est présent) étant définie, le graph des proximités métiers a pu être adapté à la typologie précise d'un territoire donné.



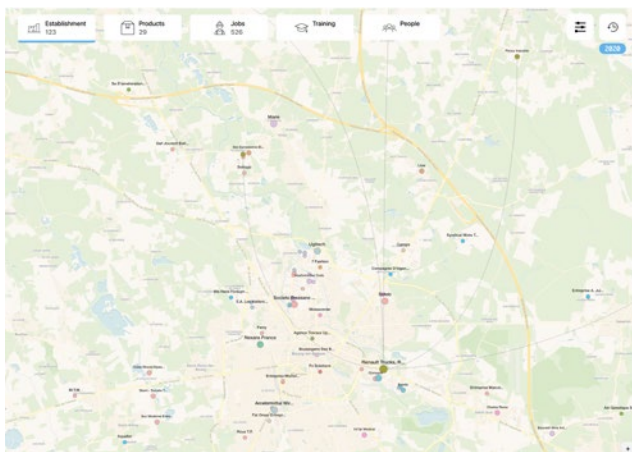
Nous avons ainsi pu générer à partir de ce fichier une table de correspondance pondérée

En effet, la liste des établissements français est une donnée ouverte³². Pour chaque établissement l'équipe d'OpenStudio dispose de sa tranche d'effectif, de son code d'activité et de son adresse. En utilisant un service en ligne de résolution d'adresse³³, les adresses sont converties en coordonnées GPS. Il est donc possible de lister précisément les établissements présents sur une zone géographique donnée, et d'obtenir un graphe des proximités métiers avec les effectifs cumulés de chaque établissement d'un territoire.

³² <https://www.sirene.fr/sirene/public/accueil>

³³ <https://adresse.data.gouv.fr>

- Propositions de scénarios de nouvelles synergies entre établissements qui permettent à la fois de prendre en compte des nouvelles exigences des consommateurs pour le local (transparence, traçabilité, circuits courts, réindustrialisation, soutien à l'économie de proximité) mais aussi des exigences de sécurisation des approvisionnements et des chaînes de valeurs industrielles. Pour cela, une modélisation des réseaux de production en rythme avec l'évolution du tissu économique local a été développée. Elle permet de générer des modèles temporalisés à partir des flux d'indicateurs sémantisés et reliés. Il est alors possible d'évaluer la capacité qu'aurait un établissement A à fabriquer un produit B ou d'anticiper des collaborations potentielles entre N établissements proches au sens du savoir-faire industriel. Cette évaluation sera utilisée pour les systèmes de recommandation issues des techniques d'intelligence artificielle.



Pour passer du modèle à la recommandation personnalisée, il est possible de s'orienter vers une plateforme intelligente capable d'apprendre des comportements des industriels lors de leurs recherches de fournisseurs. Il existe de nombreuses approches possibles (filtrage collaboratif, recommandation réciproque et apprentissage par renforcement). Toutes ces techniques pourraient être mises à profit pour concevoir une plateforme collaborative dans le respect de la confidentialité des données de chacun. Cette plateforme multi-faces permettrait de collecter des données plus précises sur les préférences de chaque établissement, renseignées par les utilisateurs, prenant en compte les particularités et les attentes de chaque acteur.

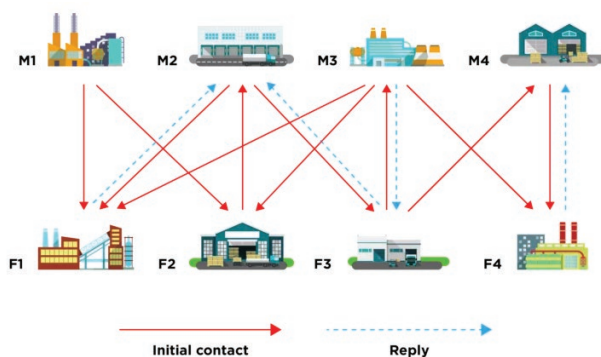
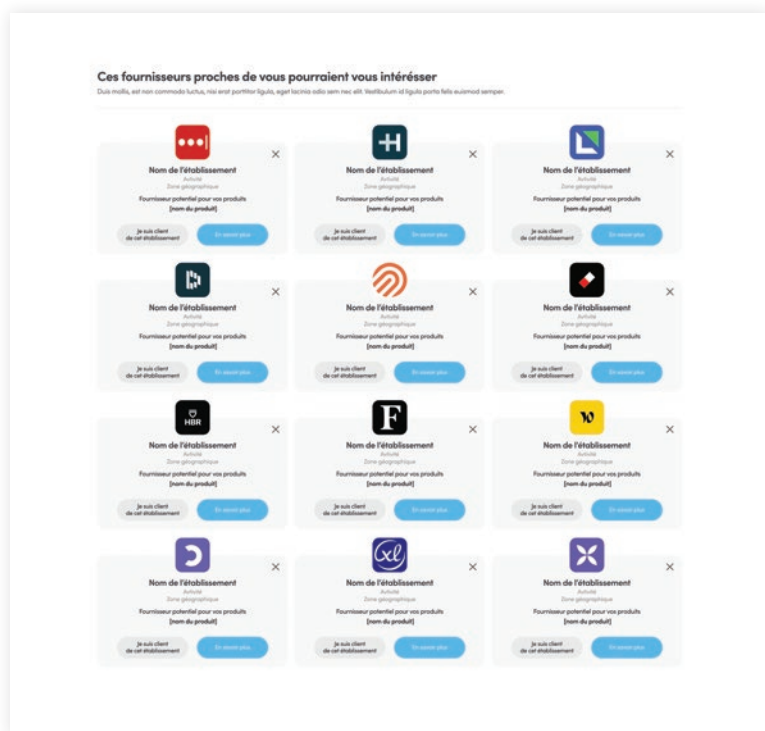
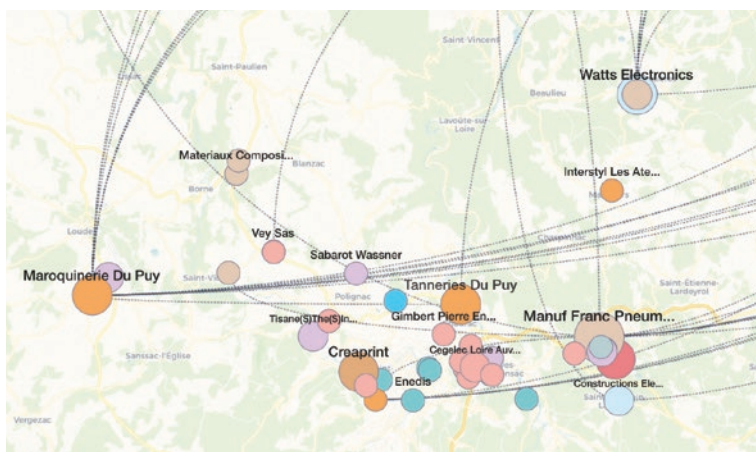


Illustration d'un système de recommandation réciproque de fournisseurs basé sur du filtrage collaboratif. Les établissements M1 à M4 fabriquent des produits qui entrent dans la composition des produits fabriqués par les établissements F1 à F4.



Une plateforme multi-face serait en mesure d'apprendre du comportement des établissements, et de leur faire des recommandations de fournisseurs en utilisant des techniques de filtrage collaboratif.

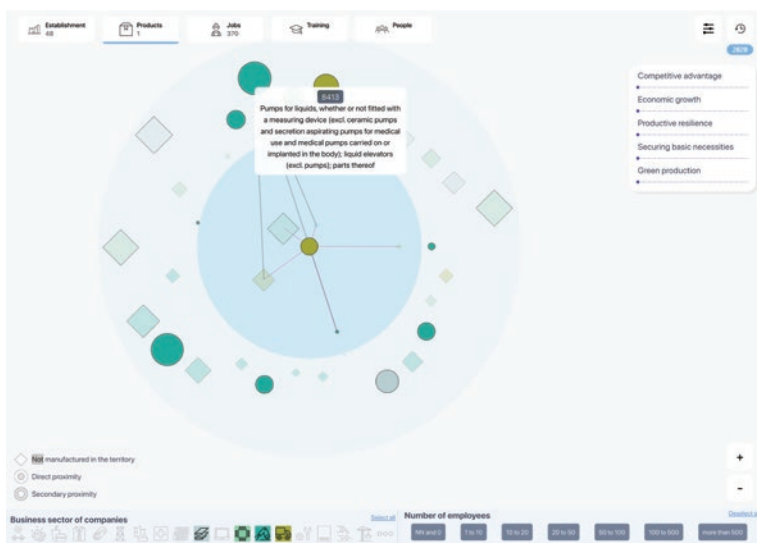
Le maillage des établissements peut également être optimisé. En s'appuyant sur la théorie des réseaux, des indicateurs de robustesse du tissu industriel d'un territoire peuvent être obtenus. Cette modélisation offrira un large terrain d'investigation prospectif pour dérouler des scénarios de crise et en mesurer les incidences. Par exemple, la simulation d'une rupture des approvisionnements asiatiques, ou la simulation de l'arrêt brutal d'une usine, permettrait de mesurer précisément les incidences sur l'écosystème productif, et ainsi le niveau de résilience productive réelle d'un territoire.



*Représentation du maillage productif sous la forme d'un graphe
exemple du territoire d'industrie Le Puy Jeune Loire.*

Les futurs secteurs de production (ou sauts productifs) favorisent la vitalité territoriale durable. Ces secteurs permettent l'émergence de deux types de compétences :

- des compétences productives uniques qui se caractérisent par la création d'un bien qui n'existe pas sur le territoire mais qui possède un lien de compétences productives avec un bien existant.
- des compétences productives collectives qui se caractérisent par la création d'un bien qui n'existe pas sur le territoire mais qui possède plus d'un lien de compétences productives avec d'autres biens existants.



Focus : La résilience du système productif d'un territoire dépend de sa complexité économique

Avec l'Atlas des Synergies Productives, l'objectif d'OpenStudio est d'accompagner les acteurs publics et privés vers l'amélioration de la résilience du système productif d'un territoire. Néanmoins, cette résilience industrielle et alimentaire est dépendante de la capacité d'un pays à faire évoluer rapidement son outil de production pour faire face à une crise. Les travaux présentés ici décrivent plusieurs méthodes pour caractériser le savoir-faire industriel d'un pays : niveau de diversification, niveau de complexité productive, proximités productives. Certains de ces indicateurs pourraient avantageusement être déclinés sur une maille plus locale afin d'obtenir des évaluations de la performance industrielle et alimentaire (ainsi que des niveaux de fragilité, ou de maturité) de nos territoires français. En outre l'usage de l'IA offre de nouvelles perspectives, pour modéliser, optimiser et prédire. Depuis plusieurs années, les équipes de l'Université d'Harvard travaillent sur la modélisation de la complexité économique des pays en s'appuyant sur l'analyse des échanges commerciaux. En observant les

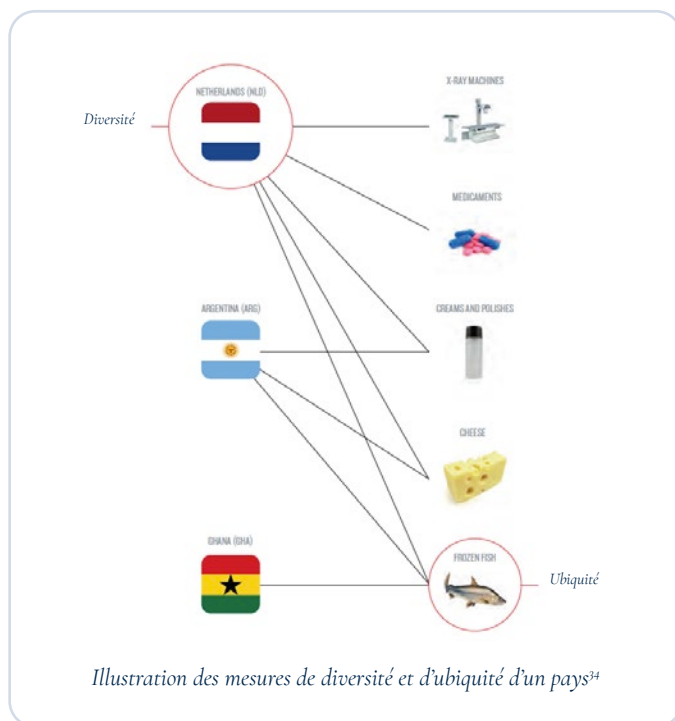


cette résilience industrielle et alimentaire est dépendante de la capacité d'un pays à faire évoluer rapidement son outil de production

exportations de chaque pays, on est capable de déterminer « ce que le pays sait produire » et ainsi de mesurer son savoir-faire productif. Ce savoir-faire productif est la clé de la prospérité économique d'un pays et peut requérir un maillage complexe de compétences particulières dont l'acquisition s'est réalisée sur plusieurs années. L'indicateur de complexité économique d'un pays (ECI) est l'indicateur de la complexité du savoir-faire productif de ce pays.

Diversité et ubiquité

Le calcul de la complexité économique s'appuie sur deux mesures : la diversité productive et l'ubiquité. La diversité illustre la variété de produits différents exportés par un pays. L'ubiquité est une indication du nombre de pays qui exportent un même produit.



³⁴ « The Atlas of economic complexity : mapping paths to prosperity. », 2011 : https://growthlab.cid.harvard.edu/files/growthlab/files/atlas_2013_part1.pdf

Afin de mesurer la complexité économique d'un pays ou d'un produit, les chercheurs introduisent plusieurs variables intermédiaires déclinées à partir de la diversité et l'ubiquité. Les variables sont définies récursivement les unes par rapport aux autres comme nous le verrons par la suite.

<i>Définition</i>	<i>Description de la variable / Question associée</i>
Diversification $K_{c,0}$	Nombre de produits exportés par un pays c . Combien de produits sont exportés par le pays c ?
Ubiquité $K_{p,0}$	Nombre de pays exportant le produit p . Combien de pays exportent le produit p ?
$K_{c,1}$	Ubiquité moyenne des produits exportés par le pays c . Quelle est la banalité des produits exportés par le pays c ?
$K_{p,1}$	Diversification moyenne des pays exportant le produit p . Quel est le niveau de diversification des pays qui exportent le produit p ?
$K_{c,2}$	Diversification moyenne des pays aux exportations similaires au pays c . Niveau de diversification des pays exportant des produits similaires à ceux exportés par le pays c ?
$K_{p,2}$	Ubiquité moyenne des produits exportés par les pays qui exportent le produit p . Quel est le niveau de banalité des produits exportés par les pays qui exportent le produit p ?

Interprétation des variables utilisées dans les calculs de complexité économique.³⁵

³⁵ « Supplementary material for : The building blocks of economic complexity » : https://www.pnas.org/content/suppl/2009/06/22/0900943106.DCSupplemental/Appendix_PDF.pdf

Soit M une matrice des produits exportés par pays, telle que $M_{cp}=1$ si le pays c exporte le produit p :

Diversity: $k_{c,0} = \sum_p M_{cp}$

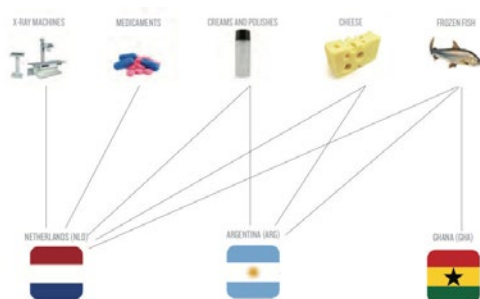
Ubiquity: $k_{p,0} = \sum_c M_{cp}$

À partir des mesures de diversité $k_{c,0}$ et d'ubiquité $k_{p,0}$, on peut définir récursivement les variables $k_{c,N}$ et $k_{p,N}$.

$$k_{c,N} = \frac{1}{k_{c,0}} \sum_p M_{cp} \cdot k_{p,N-1}$$

$$k_{p,N} = \frac{1}{k_{p,0}} \sum_c M_{cp} \cdot k_{c,N-1}$$

Prenons un exemple simple pour illustrer cette méthode. Nous avons 3 pays et 5 types de produits exportés. Chaque pays produisant tout ou une partie des 5 produits.



On peut alors mesurer plusieurs variables liées à la diversification et l'ubiquité de chaque pays et de chaque produit.

Variable	Valeur
$kNLD,o$	5
$kARG,o$	3
$kGHA,o$	1
$kX-RAYMACHINES,o$	1
$kMEDICAMENTS,o$	1
$kCREAMSANDPOLISHES,o$	2
$kCHEESE,o$	2
$kFROZENFISH,o$	3
$kNLD,1$	$(1/5) \times (1+2+2+3) = 1,6$
$kARG,1$	$(1/3) \times (2+2+3) = 2,3$
$kGHA,1$	$(1/1) \times (3) = 3$
$kX-RAYMACHINES,1$	$(1/1) \times (5) = 5$
$kMEDICAMENTS,1$	$(1/1) \times (5) = 5$
$kCREAMSANDPOLISHES,1$	$(1/2) \times (5+3) = 4$
$kCHEESE,1$	$(1/2) \times (5+3) = 4$
$kFROZENFISH,1$	$(1/3) \times (5+3+1) = 3$
$kNLD,2$	$(1/5) \times (5+5+4+4+3) = 4,2$
$kARG,2$	$(1/3) \times (4+4+3) = 3,7$
$kGHA,2$	$(1/1) \times (3) = 3$
$kX-RAYMACHINES,2$	$(1/1) \times (1,6) = 1,6$
$kMEDICAMENTS,2$	$(1/1) \times (1,6) = 1,6$
$kCREAMSANDPOLISHES,2$	$(1/2) \times (1,6+2,3) = 1,95$
$kCHEESE,2$	$(1/2) \times (1,6+2,3) = 1,95$
$kFROZENFISH,2$	$(1/3) \times (1,6+2,3+3) = 2,3$

Calcul des variables pour l'exemple donné

Complexité économique

Nous souhaitons exprimer $k_{c,N}$ en fonction de $k_{c,0}$.

Pour cela on remplace

$$k_{p,N-1} \text{ par } \frac{1}{k_{p,0}} \sum_c M_{cp} \cdot k_{c,N-2}$$

puis on simplifie l'équation :

$$\begin{aligned} k_{c,N} &= \frac{1}{k_{c,0}} \sum_p M_{cp} \frac{1}{k_{p,0}} \sum_{c'} M_{c'p} \cdot k_{c',N-2} \\ &= \sum_{c'} k_{c',N-2} \sum_p \frac{M_{c'p} M_{cp}}{k_{c,0} k_{p,0}} \end{aligned}$$

Nous considérons la matrice $\tilde{M}_{c,c'}$ comme une matrice des similarités de diversification pondérée (et normalisée). Celle-ci reflète dans quelle mesure les types de produits exportés de deux pays sont similaires³⁶ :

$$\tilde{M}_{c,c'} \equiv \sum_p \frac{M_{c'p} M_{cp}}{k_{c,0} k_{p,0}}$$

On réécrit l'équation :

$$k_{c,N} = \sum_{c'} \tilde{M}_{c,c'} \cdot k_{c',N-2}$$

³⁶ « Interpreting economic complexity », 2019 :
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau1705>

On note que $kc, N = kc, N-2=1$ satisfait cette équation lorsque le vecteur propre de $\tilde{M}_{c,c'}$ est associé à la plus grande valeur propre. Puisque ce vecteur propre est un vecteur composé uniquement de 1, il ne contient pas d'information. De ce fait, il est préférable de s'intéresser au vecteur propre associé à la deuxième plus grande valeur propre. C'est le vecteur propre qui capture la plus grande quantité de variance dans le système et constitue donc une mesure pertinente de la complexité économique. On nomme $\vec{K}_i$ le i -ème vecteur propre de $\tilde{M}_{c,c'}$ associé à la i -ème valeur propre de $\tilde{M}_{c,c'}$, ordonnés de façon décroissante³⁷, de telle sorte que :

$$\tilde{M}_{c,c'} \cdot \vec{K}_2 = \lambda_2 \vec{K}_2$$

L'indice de complexité économique ECI ³⁸ est obtenu en normalisant le vecteur propre de $\tilde{M}_{c,c'}$ associé à sa seconde plus grande valeur propre. $\langle \vec{K}_2 \rangle$ correspond à la moyenne de $\vec{K}_2$ et $stdev(\vec{K}_2)$ à son écart type.

$$ECI = \frac{\vec{K}_2 - \langle \vec{K}_2 \rangle}{stdev(\vec{K}_2)}$$

³⁷ « *Methods and Concepts in Economic Complexity* », 2018 :
<https://arxiv.org/abs/1809.10781>

³⁸ « *The Building Blocks of Economic Complexity* », 2009 :
<https://www.pnas.org/content/106/26/10570>

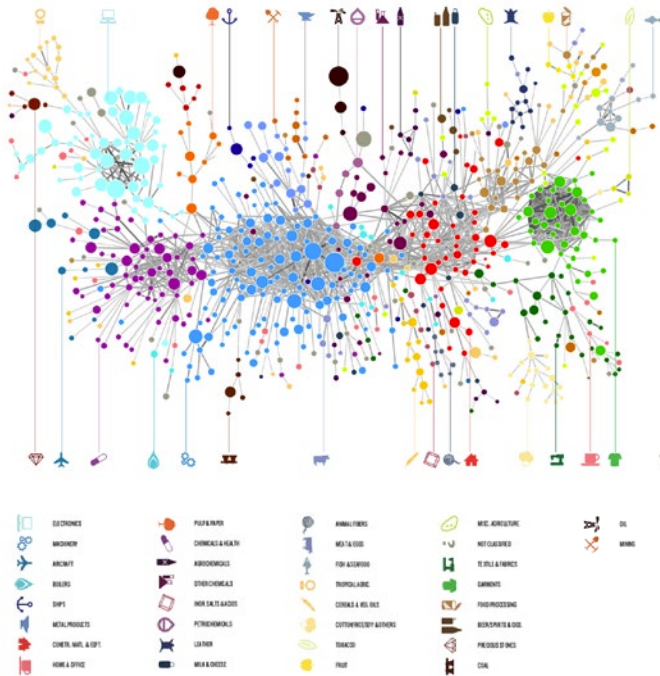
De la même manière la complexité d'un produit (PCI) est définie par la formule suivante, avec $\vec{Q}$ le vecteur propre de $\tilde{M}_{p,p'}$ construite sur le même principe que $\tilde{M}_{c,c'}$, mais en échangeant les pays c avec les produits p :

$$PCI = \frac{\vec{Q}_2 - \langle \vec{Q}_2 \rangle}{stdev(\vec{Q}_2)}$$

Parentés productives

L'étude de la liste précise des produits exportés par un pays nous informe implicitement sur la proximité des savoir-faire productifs de ces produits. Par exemple si les produits de type « viande bovine » et « farine » sont plus souvent co-exportés, que des produits de type « viande bovine » et « carte électronique », cela indique que le savoir-faire nécessaire à la production de viande est plus proche de celui de la farine que de celui des cartes électroniques. En se basant sur l'analyse à grande échelle des types de produits exportés par pays, l'équipe de Harvard a pu mesurer la proximité des savoir-faire productifs (également appelée « proximité productive ») entre chaque type de produit et construire un graphe de l'espace productif³⁹.

³⁹ Les résultats obtenus pour chaque pays du monde sont consultables sur le site de l'Atlas Économique de la Complexité : <https://atlas.cid.harvard.edu>

Espace productif⁴⁰

⁴⁰ « The Atlas of economic complexity : mapping paths to prosperity. », 2011 : https://growthlab.cid.harvard.edu/files/growthlab/files/atlas_2013_part1.pdf

Avantage compétitif

Ainsi la complexité économique d'un pays augmente année après année grâce à la production de nouveaux produits voisins dans le graphe, plus complexes. Plus un produit requiert un savoir-faire complexe, plus il octroie au pays qui le produit un avantage compétitif fort.

Soit X_{cp} les exportations du produit p par le pays c , alors l'avantage compétitif révélé⁴² que le pays c a pour le produit p peut s'exprimer en fonction des exportations :

$$RCA_{cp} = \frac{X_{cp}}{\sum_c X_{cp}} / \frac{\sum_p X_{cp}}{\sum_{c,p} C_{cp}}$$

Notez qu'on considère qu'un pays c exporte un produit p si et seulement si RCA_{cp} est supérieur à 1.

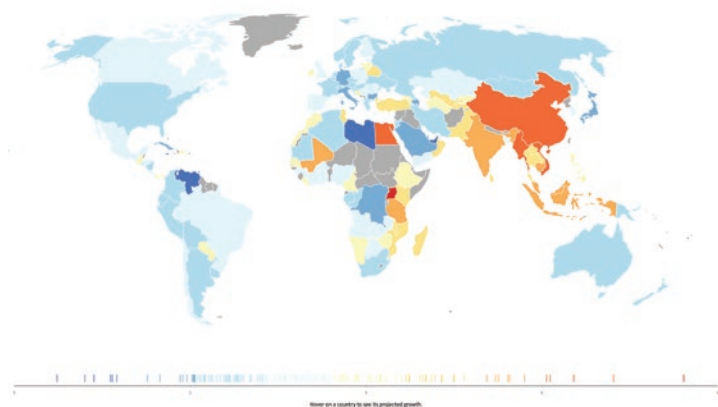
$$M_{cp} = \begin{cases} 1 & \text{si } RCA_{cp} \geq 1; \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

⁴² « Trade liberalisation and « revealed » comparative advantage », 1965 : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9957.1965.tb00050.x>

Par exemple, en 2018, le vin représentait 0,54 % du commerce mondial (19,5 billions) sur un total d'exportations dans le monde représentant 105,3 milliards de dollars. Sur ce total, la France a exporté près de 9,5 milliards de dollars en vin. Cela équivaut à 5,11 % des exportations totales de la France (861 milliards de dollars) sur cette année-là. En divisant 5,11 % / 0,54 %, nous constatons que la France a un avantage compétitif révélé (RCA) important de 9,32 pour le vin, ce qui signifie que la France exporte 9,32 fois sa juste part des exportations de vin.

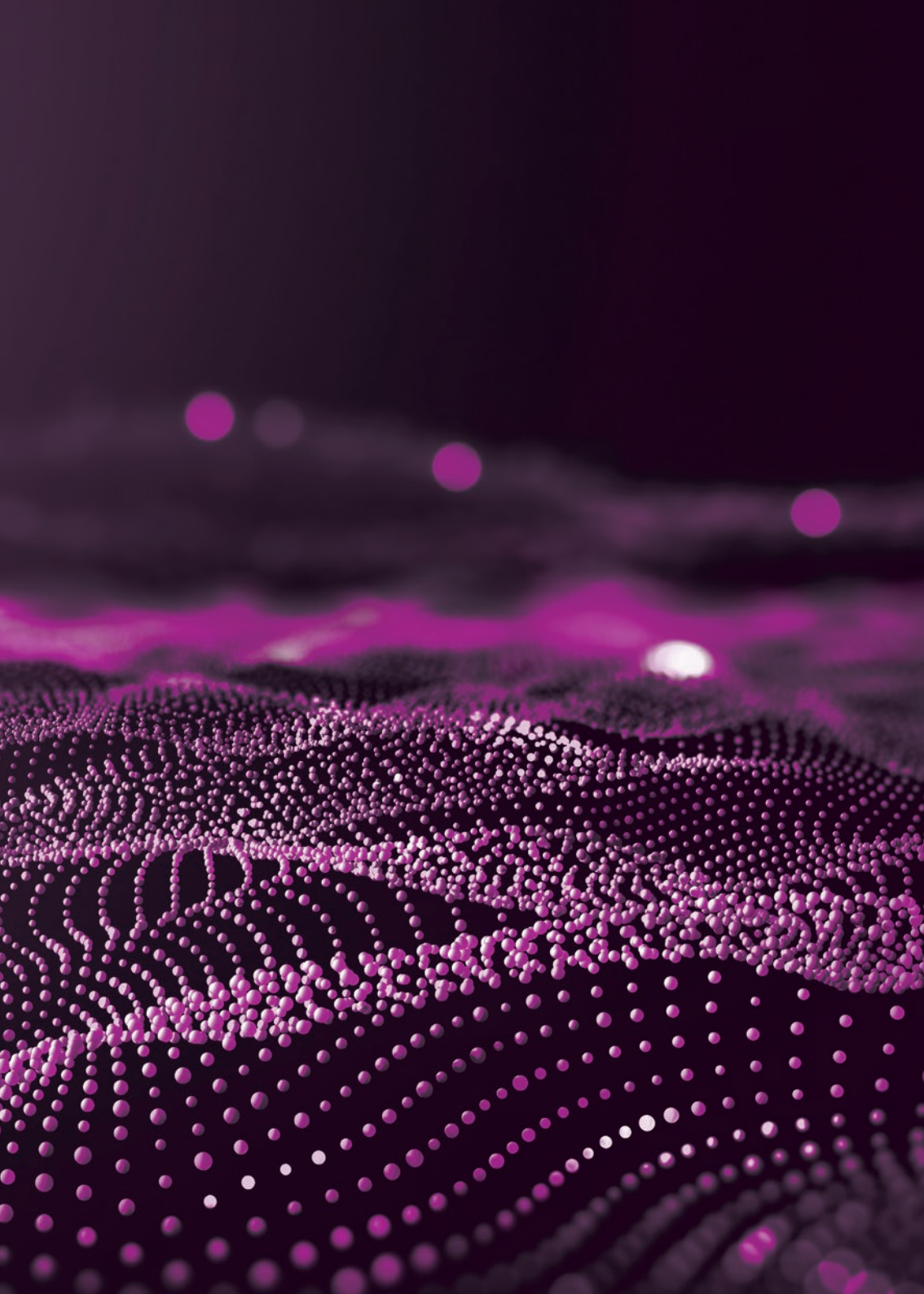
Prédictions de croissance

En connaissant le nombre de « chemins » (et les distances associées) qui mènent un pays à l'amélioration de sa complexité économique, on peut réaliser une prédiction de sa croissance économique sur les prochaines années. Par exemple si un pays ne produit que des biens qui se situent aux extrémités du graphe, il lui faudra de nombreuses années pour faire évoluer son savoir-faire productif et en particulier vers les biens complexes au centre du graphe, lesquels sont facteurs de prospérité économique, par l'avantage compétitif qu'ils octroient.



Projection de croissance en 2027⁴³

⁴³ « India slowing, China resilient in Harvard's new global growth projections », 2019 : <https://atlas.cid.harvard.edu/growth-projections>



PARTIE 3

Les freins au développement de l'industrie 4.0

L'industrie 4.0, aidée par l'IA, offre de nombreuses opportunités aux industriels pour façonner des usines agiles, performantes et responsables. Seulement, ces derniers ne peuvent passer à côté d'un certain nombre de défis à surmonter pour se mettre au diapason de cette transition technologique. L'industrie 4.0 est-elle réellement accessible d'un point de vue des coûts, compétences et formations ? Va-t-elle alourdir le bilan carbone d'un secteur déjà très polluant ? Est-elle davantage menacée par les cyberattaques ? Certaines réponses restent à trouver, mais de nombreuses pistes existent déjà et doivent être creusées dès maintenant pour éviter ces écueils.

Chapitre 1

L'industrie 4.0 est-elle réellement accessible ?

Se procurer des solutions 4.0 telles que des cobots ou bien une plateforme IIoT peut sembler inaccessible en termes de coûts, de compétences et formations pour certains industriels, notamment les PME. Or, nous verrons qu'un certain nombre de réflexions et solutions à mettre en place laissent penser le contraire.

Les coûts liés à l'IA et l'industrie 4.0 dépendent des besoins spécifiques des entreprises et des aides financières disponibles

L'intelligence artificielle s'avère cruciale en industrie 4.0 pour mettre en mouvement des robots collaboratifs tels que des cobots, des robots mobiles autonomes mais aussi optimiser les données d'une plateforme IIoT (à des fins de maintenance par exemple). Si l'introduction d'IA paraît hors d'atteinte d'un point de vue financier pour certaines entreprises, notamment les PME, le prix associé au niveau d'algorithmie déployé (machine learning, deep learning), par des sociétés spécialisés en robotique collaborative et en IIoT, dépend en réalité bien souvent des besoins spécifiques en terme d'automatisation ou d'IIoT de chaque industriel. Une entre-

prise peut avoir envie de mettre un terme aux tâches répétitives et épuisantes liées à un poste de travail clé, comme la palettisation de pots de peinture en fin de ligne de production, et va donc vouloir automatiser ce poste en investissant dans un cobot-collègue doté de puissants algorithmes d'IA. Elle pourrait alors établir un devis personnalisé afin d'acquérir le cobot UR10e, vendu par Universal Robots, qui en plus de réaliser des gestes précis et efficaces possède une importante capacité de charge (12,5 kg) et une longue portée (1300 mm). Compris en moyenne entre



L'intelligence artificielle s'avère cruciale en industrie 4.0 pour mettre en mouvement des robots collaboratifs tels que des cobots

10 000 euros – pour le modèle le moins cher – et 50 000 euros, un cobot coûte moins cher qu'un robot industriel classique lourd et rigide. Ce bras robotisé pourrait donc avoir sa place sur les lignes de production des petites et moyennes entreprises (PME) qui ont un budget limité et des besoins d'automatisation plus ou moins précis. De plus, des vendeurs de cobots mettent à disposition des programmes spécifiques pour aider les PME. Universal Robots proposait par exemple jusqu'à fin 2021, à travers son plan cobots PME, un audit gratuit des ateliers et opérations et des solutions de financement flexibles (location, crédit-bail) aux tarifs compétitifs et sur-mesure. La société met aussi en avant un retour rapide sur investissement (ROI) de ses cobots à court ou moyen terme (6 à 18 mois en moyenne).



**le tarif relatif à
leur intégration
peut varier suivant
la problématique
adressée**

Du côté des plateformes IIoT avec de l'IA, comme celles de Safecube, Proovstation, Metron ou Braincube, le tarif relatif à leur intégration peut varier suivant la problématique adressée : maintenance prédictive, optimisation énergétique, traçabilité de produits sur une longue distance... À condition d'avoir au préalable suffisamment de données à collecter, traiter et analyser, au risque de devoir investir dans une solution IIoT globale avec des capteurs.

Les coûts liés à l'IA et l'industrie 4.0 dépendent aussi des aides financières disponibles à l'échelle nationale et régionale. La facture pour une PME pourrait alors s'alléger de sorte à ce qu'elle puisse s'insérer plus facilement et rapidement dans une démarche 4.0.

Agnès Pannier-Runacher, la secrétaire d'état auprès du ministre de l'Économie et des Finances, a par exemple annoncé le 24 octobre 2020 une aide de l'État à hauteur de « 280 millions d'euros pour la modernisation des PME et ETI » dans le cadre du plan France Relance. Cette aide revue à la hausse en mai 2021, avec 175 millions d'euros en plus, est valable jusqu'à fin 2022 et a pour objectif d'impulser des investissements dans les technologies de l'industrie 4.0⁴⁴. Elle s'applique notamment aux achats liés à des équipements neufs ou d'occasion en robotique et cobotique, mais aussi à l'impression additive, aux machines de calcul intensif, aux capteurs, logiciels ou encore à la réalité augmentée et virtuelle.

⁴⁴ « Communiqué de Presse - Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance », 13 mai 2021 : https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/plan-de-relance/CP-20210513-France-Relance-guichet-2021-transformation-industrielles-industrie-futur-ferme.pdf

Les régions s'engagent à leur tour financièrement pour aider les industriels ancrés sur leur territoire à développer une vision 4.0. C'est le cas avec le programme « Parcours Régional Industrie du Futur »⁴⁵, déployé en région Occitanie, ou encore à travers le dispositif « Transformation Digitale »⁴⁶ mis en place dans la région Grand Est. Des initiatives importantes qui encouragent par la même occasion la réindustrialisation de ces territoires.



⁴⁵ « Détails du Parcours Régional Industrie du Futur » :
https://www.laregion.fr/IMG/pdf/fiche_detaillee_-_parcours_industrie_du_futur.pdf

⁴⁶ « Grand Est Transformation Digitale - Règlement d'intervention » :
<https://www.grandest.fr/wp-content/uploads/2020/12/annexe-3-reglement-transformation-digitale-parcours-individuel-v3.pdf>



NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

Quel budget doit avoir une PME pour s'équiper avec vos solutions IIoT ?

Il faut compter environ 1000 euros pour équiper une machine avec des capteurs multifonctions capables de réaliser une grande quantité de mesures. Quant à nos capteurs environnementaux, on se situe autour d'une centaine d'euros. C'est le ROI qui sera le plus intéressant pour les industriels plutôt que le prix initial. Il faut aussi compter l'abonnement à 7 euros par mois pour accéder aux tableaux de bord renseignant les données.

**LAURENT LAPORTE**

PDG de Braincube

Ce sont les entreprises qui vous contactent directement car elles veulent évoluer sur les sujets liés à la transition écologique ?

Non, c'est nous qui sommes à l'origine de l'activité de prospection. Cela nous conduit à démarcher certains grands groupes avec lesquels nous souhaitons travailler pour des utilisations optimales de nos solutions. Je pense par exemple aux secteurs de la construction, de la métallurgie, du papier, du ciment mais aussi de la production de pneus, de la chimie, du verre ou encore de l'agroalimentaire. Ces secteurs sont fortement automatisés, génèrent beaucoup de données mais ne les exploitent pas encore très bien. Certains ont des besoins spécifiques lorsqu'il s'agit de travailler avec nous, cela peut concerner leurs problèmes de pollution, de coûts, de production ou encore de qualité. Nous engageons une collaboration autour de leurs premiers besoins, sans les effrayer avec des projets impressionnants autour de l'utilisation de leurs données. Une fois que nous avons établi une relation de confiance avec le client, nous élargissons les usages liés à ses données.



ANTHONY GADIOU
Chief Digital Officer de Metron

À qui adressez-vous votre solution ?

Metron s'adresse en priorité à des grands industriels, sans distinction par secteur, qui ont des consommations d'énergie assez importantes, que ce soit de l'électricité ou du gaz. Nous travaillons aussi bien avec des groupes dans l'agroalimentaire comme Danone ou Cémoi qu'avec des industries automobile, sidérurgique, verrière, pétrochimique... Nous proposons d'autres produits qui permettent d'apporter un suivi énergétique global sur des sites avec des petites consommations d'énergie comme les PME. Ici, nous parlons alors d'energy management, de monitoring plutôt que d'IA. L'intelligence artificielle a un intérêt lorsqu'il y a une complexité avec beaucoup de data puisque cela représente un coût, il faut un retour sur investissement.

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Avez-vous un cas d'usage à nous partager ?

Nous avons travaillé avec la PME lyonnaise Starterre, un concessionnaire qui fait de la vente de véhicules d'occasion. Sa demande portait sur du remarketing ou « reconditionnement », première étape lors de l'achat d'un véhicule d'occasion afin d'optimiser sa valeur de revente. Ils avaient besoin d'accélérer le temps d'inspection des voitures pour gagner en productivité. Concrètement, le déploiement de notre station R a permis de diviser par quatre leur temps d'inspection et a entrouvert d'autres possibilités d'optimisation possibles. En une heure, la station permet d'examiner 12 voitures au lieu de 3 en temps normal.

Avant d'introduire notre solution au sein de leur entreprise, il faut préciser que Starterre était déjà une société organisée, agile et pragmatique. Leur niveau d'industrialisation était également poussé : seul un code barre à scanner était nécessaire par exemple pour rentrer les véhicules dans leur système plutôt qu'une identification via une plaque d'immatriculation. L'installation de notre station était pour eux l'occasion de performer sur ce qu'ils avaient déjà mis en place.

Un manque de compétences et formations à compenser par des solutions stratégiques internes

Savoir lire et interpréter des données, prendre en main des robots collaboratifs ou encore fabriquer des semi-conducteurs, composants essentiels aux capteurs, est encore loin d'être une réalité pour bon nombre d'opérateurs. La faute à une offre de formations en trop faible quantité avec souvent des contenus qui ne parviennent pas à suivre les avancées rapides de l'IA et de l'IoT en milieu industriel. Heureusement, des solutions rapides et faciles à mettre en place subsistent pour changer la donne comme l'usage de logiciels Open Source, l'accompagnement personnalisé par des entreprises 4.0 ou encore l'application du modèle CALT.

L'arrivée de l'IIoT pose des problèmes pour lire et interpréter les données

Le développement de l'IoT au cœur du secteur industriel a provoqué une arrivée massive de données difficiles à assimiler pour les opérateurs. Ils doivent connaître tous les tenants et aboutissants de ce flot d'informations afin d'en tirer parti le mieux possible. C'est ce qu'on appelle la « Datalphabétisation » ou « Data Literacy » (littératie des données). Selon l'étude « Data Literacy Index »⁴⁷, publiée en octobre 2018, le fait de savoir lire

⁴⁷ « The Data Literacy Index », 2018 : <https://www.qlik.com/us/-/media/files/resource-library/global-us/register/analyst-reports/ar-the-data-literacy-index-en.pdf>

et interpréter les données permettrait de générer de l'agilité en entreprise ainsi que des revenus supplémentaires pouvant aller jusqu'au million de dollars. Former les employés à la lecture des datas est donc primordial pour 93 % des décideurs privés sondés dans cette étude.

Malheureusement, cette formation n'est pas encore démocratisée, non seulement par manque d'investissement mais également par la faute du langage encore complexe. L'étude du Data Literacy Index révèle que seulement 24 % de la main d'œuvre mondiale serait pleinement confiante vis-à-vis de la capacité à lire, étudier et maîtriser les données. Il y aurait 63 % de grandes entreprises qui souhaiteraient avoir davantage d'employés aptes à maîtriser celles-ci. Pourtant, ces sociétés se montrent plus frileuses lorsqu'il s'agit de payer des salaires plus élevés à ce type de profil qualifié, et semblent hésiter à faire confiance au traitement de la data pour les aider à diriger leur production.

Des solutions existent, il suffit de simplifier la lecture des données afin de permettre aux employés de les analyser et les interpréter plus rapidement. Cela passe par la datavisualisation (ou visualisation des données) via des diagrammes, nuages de points ou encore des graphiques linéaires proposés sur des plateformes intuitives.

Ces nouvelles compétences se nomment alors les « interactions Hommes-données » ou HDI (Human Data Interactions), un terme qui englobe la totalité des dispositifs liés au brassage des informations en usine.

Les formations en robotique collaborative sont à la traîne

Quant à la robotique en milieu industriel, Kai-Fu Lee, écrivain taïwanais et expert en intelligence artificielle, fait des pronostics en lien avec l'arrivée inévitable de l'IA dans les entreprises dans son livre *IA, la plus grande mutation de l'histoire*^[8]. Selon lui, un changement graduel des compétences requises sur le marché du travail est en cours. Des formations ponctuelles existent pour que les opérateurs puissent maîtriser des postes automatisés nécessitant une assistance humaine. Les employés qui arriveraient à se former et monter en compétences rapidement pourraient ralentir l'augmentation du taux de chômage. Kai-Fu Lee explique cependant que le rythme de formations proposées serait trop lent par rapport aux avancées rapides de l'IA ; un manque de formation se profile alors et les employés doivent emmagasiner un nombre élevé de connaissances en un temps record, là où d'autres y consacraient des années d'études. Un retard qui provoquerait inévitablement un taux de chômage important selon l'auteur. De plus, il paraît difficile de connaître dès à présent les futurs et nouveaux métiers qui seront automatisés. Pour éviter d'être à la traîne, Kai-Fu Lee suggère de requalifier, et donc de former, le plus tôt possible les salariés à l'intelligence artificielle qui deviendra centrale dans l'économie de demain.



**un changement graduel
des compétences
requises sur le marché
du travail est en cours**

Une concentration géographique des compétences pour fabriquer des semi-conducteurs, composants essentiels des capteurs en robotique et IIoT

Matériaux qui se situent entre un conducteur et un isolant, les semi-conducteurs gèrent et contrôlent le flux de courant dans l'électronique. Ils sont souvent fabriqués à partir de matières premières comme le silicium et le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium⁴⁸.

Bien que ces composants, relevant de la microélectronique, soient très complexes à fabriquer, ils demeurent indispensables aux capteurs utilisés en robotique et IIoT. Cela sollicite des compétences humaines et techniques à la fois pointues et uniques, ainsi que plusieurs années de R&D pour assurer la conception et le développement d'une seule gamme de semi-conducteurs. La plupart des entreprises préfèrent alors délocaliser leur fabrication dans des pays d'Asie de l'Est, comme la Corée du Sud ou Taïwan, disposant d'une main d'œuvre hautement qualifiée dans ce domaine. Une stratégie chancelante puisque la pandémie mondiale de Covid-19 a notamment mis à l'arrêt plusieurs usines de fabrication de la Taïwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) au printemps 2020 ; les graves sécheresses à Taïwan ont également nui à l'approvisionnement en eau de l'entreprise, élément nécessaire au processus de fabrication.

⁴⁸ « Semi-conducteurs : que sont ces puces électroniques dont la pénurie perturbe l'économie mondiale ? » : https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/10/22/semi-conducteurs-que-sont-ces-puces-electroniques-dont-la-penurie-perturbe-l-economie-mondiale_6099502_3234.html

Aujourd'hui, les semi-conducteurs connaissent une pénurie qui ralentissent certaines industries comme l'automobile. Résultat : Renault a annoncé, vendredi 22 octobre 2021, anticiper une perte de production « proche de 500 000 véhicules sur l'année ».

Cette concentration géographique des lieux de production et donc des compétences est inquiétante, surtout lorsque des événements imprévisibles tels qu'une catastrophe naturelle ou la Covid-19 se produisent. Pour les anticiper, il est alors devenu impératif de relocaliser la fabrication des semi-conducteurs sur

divers territoires nationaux, en formant davantage de personnel qualifié pour réduire le déficit de compétences sur ce sujet. L'Europe compte déjà des fabricants de puces et des équipementiers de pointe comme STMicroelectronics, Infineon Tech-

nologies, NXP Semiconductors ou encore Global Foundries avec ses usines allemandes, Intel et ASML, mais a besoin d'une stratégie solide et durable pour renforcer ces fournisseurs. En France, le président Emmanuel Macron a présenté le 12 octobre 2021 son plan France 2030, qui vise à développer la compétitivité industrielle nationale. Un plan d'investissement de 30 milliards d'euros dans lequel 6 milliards seront consacrés à développer une production nationale de composants clés, tandis que 2,5 milliards d'euros seront destinés à la formation des « talents » de demain et à l'amélioration du financement des start-up industrielles.



**6 milliards seront
consacrés à développer
une production
nationale de
composants clés**

Des solutions à portée de main pour s'approprier progressivement les outils 4.0

Des solutions stratégiques internes aux entreprises, faciles et rapides à adopter, sont en mesure à court terme de pallier ce manque de compétences et formations pour mener à bien des projets IIoT ou de robotique collaborative. À commencer par l'utilisation de logiciels Open Source, le plus souvent gratuits, comme le logiciel ROS⁴⁹ (Robot Operating System). En effet, des développeurs travaillant sur un projet robotique, comme un robot mobile autonome par exemple, pourraient avoir besoin d'approfondir leurs connaissances sur le sujet en utilisant un logiciel Open Source, type ROS, déjà enrichi de fonctionnalités diverses.

Dans l'écosystème informatique, l'Open Source est un moyen d'aller plus vite dans leurs réalisations. Ils peuvent récupérer un code ouvert pour l'enrichir et en faire un nouveau produit adapté pour leurs propres usages. Basé sur un code source, un projet libre peut être consulté, utilisé, modifié et partagé par n'importe qui. La collaboration offre alors des logiciels complets aux fonctionnalités multiples pouvant séduire de nombreux industriels dans la conception de projets 4.0.⁵⁰

⁴⁹ <https://www.ros.org>

⁵⁰ « Initiation à la philosophie Open Source » : <https://www.openstudio.fr/2021/06/08/initiation-philosophie-open-source/>

Comme autres solutions, des entreprises qui développent des applications ou « services » 4.0, comme Universal Robots ou Ewattch, ont fait le choix d'accompagner progressivement en interne des petites et moyennes entreprises dans leurs projets d'industrie 4.0.

Universal Robots avait par exemple mis en place un plan cobots dédié aux PME, jusque fin 2021⁵¹, pour automatiser et booster leur production dans un contexte de reprise industrielle post-pandémie. L'entreprise de cobotique proposait notamment, à travers ce plan, des démonstrations personnalisées et complètes de ses cobots au sein même des PME ou en ligne. L'objectif étant de faire découvrir aux opérateurs les avantages des robots collaboratifs pour qu'ils sachent s'en servir : mise en route rapide, programmation simple mais aussi déploiement flexible.

La start-up Ewattch tente également de faciliter en interne l'adoption des technologies IIoT grâce à des « kits machine 4.0 prêt à l'emploi »⁵². C'est-à-dire des solutions packagées et évolutives qui donnent toutes les clés en main à une PME, du capteur à la plateforme IIoT en passant par le réseau.



**La collaboration
offre alors des
logiciels complets aux
fonctionnalités multiples
pouvant séduire de
nombreux industriels**

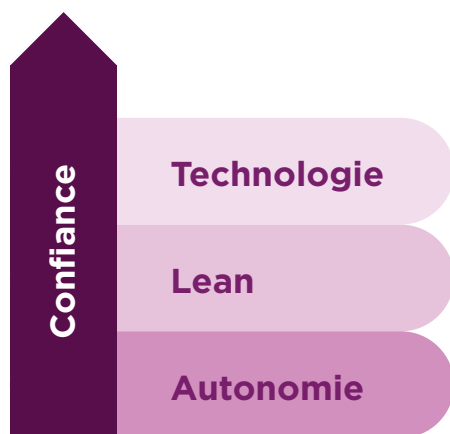
⁵¹ « Plan Cobot PME - Universal Robots » : <https://www.universal-robots.com/fr/plan-cobot-pme-30-jours-pour-automatiser-votre-atelier/>

⁵² <https://ewattch.com/kit-machine-lora/>



Proposé par François Pellerin et Marie-Laure Cahier dans leur livre *Organisation et compétences dans l'usine du futur*, le modèle « CALT » (Confiance-Autonomie-Lean-Technologie)⁵³ peut aussi permettre aux entreprises industrielles de s'appropriier plus facilement ces nouvelles technologies industrielles. Avant toute chose, précisons en quoi consiste le « Lean » : cette méthode a pour but de rechercher la performance (en matière de productivité, de qualité, de délais et de coûts) grâce à l'amélioration continue et à l'élimination des gaspillages.

⁵³ « Articulation entre Autonomie, Lean et Technologie : le modèle CALT » : <https://fpellerin.medium.com/articulation-entre-autonomie-lean-et-technologie-le-mod%C3%A8le-calt-67c492036c03>



Articulation entre Autonomie, Lean et Technologie : le modèle CALT

Selon les auteurs, le modèle CALT a pour objectif de dessiner un chemin de performance, respectueux des hommes et de leur travail. Le travail en autonomie des personnes représente le socle fondateur sur lequel éclot, dès le départ, un Lean qui fait place à une participation active des opérateurs. Lorsque ces deux strates sont réunis, cela débloque à la fois une acceptation et une appropriation plus efficaces des nouvelles technologies par ceux qui vont les mettre en œuvre. Toute cette démarche vient alors construire de la confiance à toutes les étapes et celle-ci renforce à son tour chacune des briques mises en place.

C'est sur ce type de modèle, selon François Pellerin et Marie-Laure Cahier, que l'industrie doit composer un nouvel environnement viable sur le long terme, associant productivité et rendement avec sensibilité humaine et philosophie.



ADRIEN POINSSOT
Directeur Commercial
Universal Robots France

Les opérateurs peuvent-ils être formés rapidement pour utiliser un cobot UR ?

Nous proposons deux types de formations : une en ligne qui est gratuite et accessible à tous, elle permet de comprendre ce qu'est un cobot, comment l'utiliser et l'exploiter au mieux. Puis une formation en présentiel pour les techniciens, chargés de maintenance destinée à donner les bonnes pratiques pour pouvoir architecturer le programme du cobot et l'intégrer concrètement dans un atelier. Nous livrons aussi, à travers notre politique de communication externe, notre vision et nos bonnes pratiques au monde de l'industrie. Les industriels sur notre territoire ont besoin d'outils comme les cobots et il est urgent qu'ils soient accessibles au plus grand nombre.

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Vos portiques, de par leurs tailles imposantes, ne sont-ils pas source de défiance vis-à-vis des opérateurs ?

Cette défiance nous inquiétait au moment de démarcher les entreprises mais les opérateurs sont plutôt preneurs de cette nouvelle technologie. Par ailleurs, ce sont eux qui nous aident de plus en plus à améliorer notre solution, ils sont force de proposition. L'opérateur pourra être amené à monter en compétences, comme pour choisir les opérations à effectuer sur le véhicule après analyse, décider du prix etc.

Nous proposons aussi une formation d'une demi-journée pour prendre en main notre Proovstation Gate. Elle est cependant vouée à être réduite grâce à l'implémentation sur notre plateforme d'interfaces UX toujours plus adaptées et compréhensibles.



NICOLAS BABEL
CEO d'Ewattch

Proposez-vous des formations pour maîtriser ces nouveaux outils 4.0 ?

Nos kits préconfigurés permettent de gagner du temps mais cela n'empêche pas de former des équipes au 4.0. Nous allons lancer la « Ewattch Academy » pour que des employés chargés de la maintenance soient formés à la mise en place de solutions IoT industrielles. Notre but est que nos clients sachent décider par eux-mêmes de quelles solutions IIoT ils ont besoin.

**LAURENT LAPORTE**

PDG de Braincube

Comment aidez-vous les PME à se lancer à leur tour dans des projets industrie 4.0 ?

Nous avons créé le consortium d'entreprises « Go To Smart Factory », aux côtés de Siemens, l'école des Mines de Saint-Étienne, Zebra ou encore Chamatex, pour adresser le marché de la transformation digitale des PME. Des formations, labellisées par le Campus du numérique de la région Auvergne-Rhône-Alpes, sont possibles sur prise de rendez-vous à Lyon. Une PME peut discuter de son projet et les sociétés les plus à même de lui répondre seront présentes. En plus de cette aide, la PME va pouvoir faire des prototypes locaux, créer des événements pour discuter avec ses pairs etc.

**ÉRIC MORAND**

Chef du service calcul, ingénierie
logicielle et valorisation
des données au CNES

© CNES/LECARPENTIER Lydie, 2018

Soutenir l'innovation de projets spatiaux 4.0, auprès des startups et PME, que ce soit à travers la création de l'incubateur Tech The Moon ou encore des formations, est une démarche qui vous tient à cœur ?

Oui, c'est une démarche importante portée par la Direction de l'Innovation, des Applications et de la Science (DIA). Notre ambition est de mettre à disposition les technologies que nous développons dans le domaine spatial dans les mains de sociétés françaises et européennes. On aimerait qu'elles innovent, développent leurs idées grâce à nos technologies.

Nous proposons effectivement pour les PME des formations à l'utilisation des données provenant des technologies spatiales. On met également en place des formations en intelligence artificielle, en fonction des besoins, pour des partenaires et des laboratoires qui n'œuvrent pas forcément dans le domaine spatial.

Chapitre 2

Le passage à l'industrie 4.0 va-t-il alourdir le bilan carbone d'un secteur déjà très polluant ?

L'industrie française, qui ne figure pas parmi les secteurs les plus écologiques à cause de ses émissions importantes de gaz à effet de serre, voit avec le développement soutenu de l'IIoT et de l'IA une autre forme de pollution s'accroître par la profusion de data centers.

L'industrie manufacturière : 4^{ème} secteur le plus pollueur en France

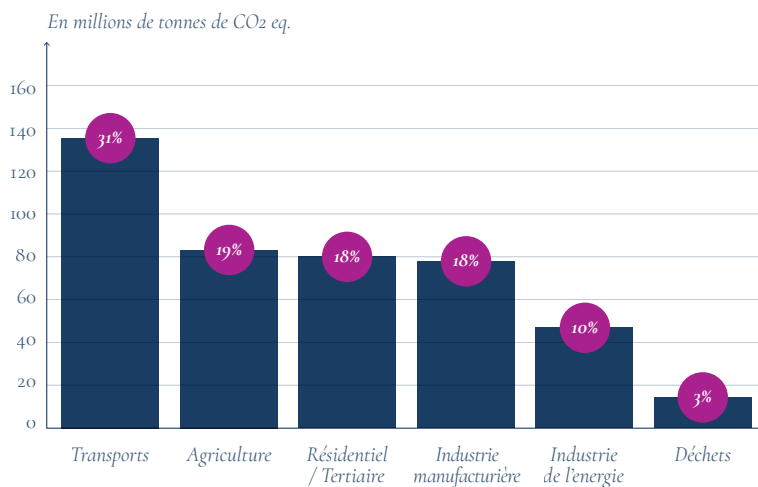
En 2019, l'industrie manufacturière était à l'origine de 78 Mt (millions de tonnes) de CO₂ eq.⁵⁴, soit la quatrième plus grosse source d'émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le territoire national français (18 % de l'inventaire national). L'industrie chimique, la fabrication de matériaux de construction (ciment, verre, chaux, tuiles, etc.), la métallurgie et l'industrie agroalimentaire sont les principales activités émettrices de GES. Les activités liées à la production d'énergie (raffinage, centrale de production d'électricité, extraction de combustible), qui représentaient 10 % des émissions en 2019, ne sont pas retenues dans le secteur de l'industrie manufacturière.



**L'industrie
manufacturière était
à l'origine de 78 Mt
(millions de tonnes)
de CO₂ eq.**

⁵⁴ « Les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'industrie manufacturière - L'environnement en France, rapport sur l'état de l'environnement », 2021 : <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement-climatique/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-de-l-industrie-manufacturiere>

*Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre
en France en 2019*



Note : hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (Utcyf) ; estimation préliminaire des émissions pour l'année 2019.

Champ : France métropolitaine et Outre-mer de l'UE.

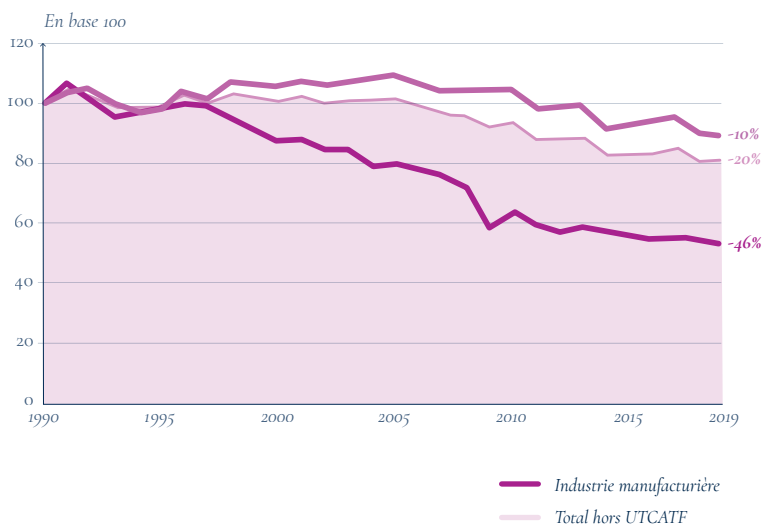
Source : CITEPA, rapport Secten 2020.

Traitement : SDES, 2021.

De plus, 91 % des émissions de GES de l'industrie manufacturière sont du CO₂. Les trois quarts des émissions de CO₂ (soit environ 51 Mt) proviennent de procédés énergétiques, spécifiques ou non à la production de ces industries, et de la consommation de carburants des engins de chantiers et des machines mobiles des usines. La chimie, l'agroalimentaire, l'industrie des minéraux non-métallique, la sidérurgie (production de fonte dans les hauts-fourneaux) et l'industrie du papier sont les activités les plus consommatrices d'énergie.

L'industrie manufacturière est néanmoins le secteur ayant le plus réduit ses émissions de GES entre 1990 et 2019 (- 46 %). Celles-ci diminuent en moyenne de 2,7 % par an jusqu'en 2008, puis chutent de 17 % entre 2008 et 2009 suite à la crise économique et à la baisse de la production, avant de baisser à nouveau progressivement de 0,9 % par an en moyenne entre 2009 et 2019. La baisse des GES dans l'industrie manufacturière représente 62 % de la réduction totale des émissions de GES de la France entre 1990 et 2019. Une baisse qui s'explique notamment par les économies d'énergie et une meilleure efficacité des chaudières industrielles imposées par des réglementations élaborées en 1998.

Évolution des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie manufacturière



Note : hors utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (Utcats) ; estimation préliminaire des émissions pour l'année 2019.

Champ : France métropolitaine et Outre-mer de l'UE.

Source : CITEPA, rapport Secten 2020.

Traitement : SDES, 2021.

L'industrie 4.0, responsable d'une pollution numérique

Si l'industrie française affiche encore un bilan carbone mitigé, cela ne semble pas s'arranger avec la numérisation du secteur. Le développement de nouvelles technologies industrielles, comme l'IIoT ou l'intelligence artificielle, implique en effet des besoins importants en stockage de données et donc en data centers. Dans le cadre de la maintenance prédictive par exemple, il faut donner un sens rapidement à un très grand nombre de données en lien avec la performance des équipements. Ces informations sont générées par des capteurs, collectées sur des plateformes IIoT et vont nécessiter l'intervention du Big Data. En effet, il va falloir collecter, stocker et traiter en temps réel ces flux très importants de données de nature diverse en vue de leur appliquer toutes sortes de traitements analytiques et statistiques avancés qui relèvent de l'intelligence artificielle (machine learning, deep learning...). Pour que cela fonctionne, les industriels ont donc des besoins extrêmement énergivores en serveurs informatiques (ou data centers).

Malheureusement, ils ne rendent pas service à la planète car ces serveurs sont à l'origine d'une pollution numérique importante. Selon Françoise Berthoud, informaticienne au Gricad (Grenoble Alpes Recherche) et fondatrice en 2006 du groupement de services EcoInfo, le secteur des nouvelles technologies représente à lui seul 6 à 10 % de la consommation mondiale d'électricité, soit près de 4 % de nos émissions de gaz à effet de serre⁵⁵. Environ 30 % de cette consommation est attribuée aux équipements terminaux comme les ordinateurs, téléphones, objets connectés ; 30 % aux data centers qui hébergent nos données et enfin 40 % aux réseaux.

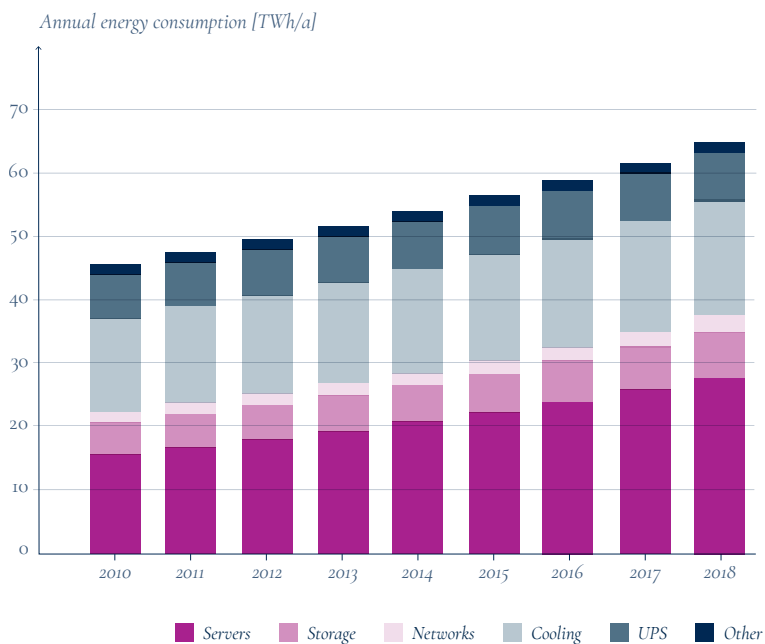
En mai 2020, un rapport de la Commission européenne indiquait qu'entre 2010 et 2018, la consommation énergétique des data centers des 28 pays européens était passée de 53,9 TWh/an (terawatt-heure) à 76,8 TWh/an, soit une hausse de 42 %.⁵⁶ Les services cloud représentaient notamment 10 % de cette consommation en 2010 pour finalement atteindre les 35 % en 2018.

⁵⁵ « Numérique : le grand gâchis énergétique », 2018 : <https://lejournalcnrs.fr/articles/numerique-le-grand-gachis-energetique>

⁵⁶ « Energy-efficient cloud computing technologies and policies for an eco-friendly cloud market - Final Study Report » : [https://cdn.nextinpact.com/data-next/file-uploads/FINALSTUDYEnglishKK-03-20-210-EN-N13072020pdf%20\(4\).pdf](https://cdn.nextinpact.com/data-next/file-uploads/FINALSTUDYEnglishKK-03-20-210-EN-N13072020pdf%20(4).pdf)

Évolution de la consommation énergétique des centres de données en Europe

© Commission européenne



Calculations by Borderstep Institute

La vraie problématique environnementale à corriger concerne la climatisation et les systèmes de refroidissement puisqu'ils représentent 40 à 50 % de la consommation énergétique globale d'un data center. Pour faire refroidir d'une manière plus écologique les serveurs, des entreprises proposent de les immerger dans de l'eau ou des liquides de refroidissement. En France, l'entreprise TotalLinux propose par exemple, à travers leur programme ITrium, un data center immergé dans un liquide de refroidissement au sein d'un bâtiment d'affaires⁵⁷. Résultats : la chaleur qu'il émet ne dépasse pas 25 degrés, au lieu de 60 à 70 degrés en temps normal, et la consommation électrique utilisée pour refroidir les serveurs diminue. Par ailleurs, la durée de vie des composants électroniques est allongée à 9 ans, contre 3 à 5 ans pour des data centers à refroidissement par air.

Au-delà de la pollution numérique, les usines 4.0 doivent aussi intégrer davantage les problématiques de recyclage dans leur développement. Beaucoup de matériaux, liés par exemple au remplacement des serveurs, finissent brûlés dans des décharges sauvages comme en Chine, en Inde et au Ghana, ce qui engendre une pollution des nappes phréatiques.

⁵⁷ <https://www.totallinux.fr/green-datacenter-hpc/>

L'industrie 4.0 sur la voie de la résilience

L'objectif annoncé au sein de l'Union européenne, depuis les accords de Paris signés en 2015, est d'atteindre une neutralité carbone à l'horizon 2050⁵⁸ en misant notamment sur l'industrie. Comme nous l'avons vu à travers les applications IIoT, des acteurs de l'industrie 4.0, tels que Braincube ou Metron, s'engagent déjà sur cette voie. Ces derniers proposent en effet leur propre plateforme combinée à de l'intelligence artificielle pour détecter des opportunités d'optimisations énergétiques et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'IA associée à l'IIoT a donc une carte à jouer pour améliorer l'état de santé de notre planète, d'autant plus si elle fonctionne dans une solution d'edge computing et non de big data afin de ne pas surcharger le cloud en données. Ce qui reviendrait par conséquent à accentuer la pollution numérique.



**L'IA associée à l'IIoT
a donc une carte à jouer
pour améliorer l'état de
santé de notre planète**

Les industriels de demain doivent également dès maintenant s'initier à d'autres pratiques responsables comme l'économie circulaire et l'éco-conception afin de réduire au maximum leur empreinte carbone.

⁵⁸ « Stratégie à long terme à l'horizon 2050 » : https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_fr

L'économie circulaire vise à changer de paradigme par rapport à l'économie dite linéaire, en limitant notamment le gaspillage des ressources, l'impact environnemental des entreprises industrielles, et en optimisant le cycle de vie d'un produit (fabrication, transport, utilisation, recyclage). Il n'est alors plus question de détruire les produits mais plutôt de les recycler en les réintégrant dans un autre processus de fabrication ou en les mettant à disposition d'autres usines. Les déchets de l'un deviennent alors les matières premières de l'autre.⁵⁹

Les industriels, en adoptant cette nouvelle démarche sont ainsi en mesure de faire face à la rarefaction des ressources et à l'envolée du prix des matières premières. Cette esprit de circularité rayonne aussi sur le plan du partage des compétences locales, afin de tirer parti au mieux de ce que l'on appelle la résilience industrielle.

Enfin, il ne faut pas oublier de s'intéresser également à l'éco-conception. C'est une démarche qui intègre systématiquement des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie.

⁵⁹ « Économie circulaire - Agence de la transition écologique » : <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>

**WAËL CHEAIB**

Directeur Général de Safecube

Comment vos solutions IoT participent à réduire l'empreinte carbone du transport maritime et aérien ?

Nos solutions permettent à nos clients d'obtenir des données mesurables et fiables sur leurs trajets maritimes. Cela va les encourager à réduire leur empreinte carbone en limitant les parcours inutiles pour gagner du temps jusqu'à la destination finale. Nous aidons également des industries qui se reposent historiquement sur le transport aérien à migrer une partie de leur activité sur le maritime. Suite à cette transition elles pourront drastiquement diminuer leur empreinte carbone, même sur un trajet de très longue durée.

**ÉRIC MORAND**

Chef du service calcul, ingénierie
logicielle et valorisation
des données au CNES

© CNES/LECARPENTIER Lydie, 2018

Quels sont vos projets en éco-conception pour diminuer la consommation énergétique de vos bases de données, augmenter la part de matériaux recyclés... ?

En 2019, nous avons en effet initié des travaux d'éco-conception. Dans le cadre du renouvellement de notre supercalculateur, nous projetons d'intégrer des solutions capables de moins consommer d'énergie en plus d'utiliser du matériel recyclé. Nous souhaitons par exemple mieux ordonnancer ses tâches afin d'utiliser un minimum de machines.

Nous demandons aux industriels, avec lesquels nous travaillons, de nous montrer ce qu'ils sont capables de réaliser en éco-conception. On pourra alors être en mesure d'imposer, dans nos futures consultations, un taux de recyclage à 80 ou 90 % sur des ordinateurs mais aussi une diminution de la consommation énergétique de nos systèmes de 10 à 15 %.

Nous travaillons également, avec des académiciens, des startups ou encore des PME, sur des projets d'éco-conception dans le cadre du projet Spaceship. Nous cherchons à optimiser les ressources de nos futures bases lunaires et martiennes. Par exemple, lorsque vous êtes sur Mars, il faut être capable de récupérer 98 % de l'eau.

L'usage de l'intelligence artificielle peut aussi permettre d'être à l'origine de projets en éco-conception. Le CNES n'utilise pas seulement l'IA pour de l'optimisation mais également pour éviter de multiplier les antennes, lorsqu'il s'agit de réceptionner les données d'un satellite, grâce à des algorithmes de renforcement.

Enfin, nous souhaitons que nos technologies spatiales soient aussi utilisées au service de la vie des concitoyens. Concrètement, nos capteurs développés pour la détection de grandes zones de pollution depuis l'espace pourraient être réutilisés au niveau local, sur les toits des grandes villes.

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Parvenez-vous à intégrer une dimension écologique dans le développement de Proovstation ?

Nous faisons quelques actions RSE, ce n'est pas encore le fer de lance de l'entreprise même si on a prévu que ça le devienne rapidement. Par ailleurs, nous avons déjà trouvé des méthodes pour diviser par 10 la consommation énergétique des LED sur nos portiques. Nous tentons aussi de réduire le nombre de caméras ou de changer de modèle pour diminuer nos consommations. Ce qui est intéressant, c'est de chercher à obtenir un équilibre entre économie et écologie pour ne pas avoir, d'une part, une facture énergétique qui nous desserve et continuer d'assurer, d'autre part, la qualité de nos prestations. La question du recyclage de nos portiques se pose aussi à terme. Pour le moment, leur durabilité est prévue sur 8 ans, nous les fabriquons en France et utilisons des matériaux de bonne qualité. Enfin, notre Proovstation Gate peut aussi se charger de la gestion du recyclage de certaines pièces sur des véhicules accidentés.

Chapitre 3

L'industrie 4.0 est-elle davantage menacée par les cyberattaques ?

Les cyberattaques prennent de plus en plus d'ampleur depuis l'arrivée du numérique dans l'ensemble des secteurs productifs. Un tournant a notamment eu lieu en 2020 avec une multiplication d'attaques ciblées contre les banques, les hôpitaux mais aussi les industries.

L'IoT industriel : point d'entrée aux intrusions

Le risque de sabotage des productions d'une usine est un danger bien réel. Par exemple, des « attaques orientées processus » consistent à injecter des commandes malveillantes dans les flux de communication industriels sans dépasser les spécifications protocolaires pour ne pas être détectées. L'IoT, au cœur de ces nouvelles industries, se présente comme un point d'entrée aux intrusions. Comme exemple marquant d'une cyberattaque industrielle, on peut évoquer celle liée au ver informatique Stuxnet, développé par la NSA en collaboration avec Israël. Découvert en 2010, il aurait la capacité « d'espionner » et surtout de reprogrammer les systèmes industriels.⁶⁰



La sécurité des API et des IoT peut aussi être agrémentée de VPN

Comme méthode de protection, le protocole OPC-UA, standard de communication entre les IoT et les systèmes informatiques industriels, est une solution pour prévenir une large partie des cyberattaques. La sécurité des API et des IoT peut aussi être agrémentée de VPN (Réseau Privé Virtuel) pour des échanges sûrs. Quant aux applications hébergées dans le cloud, elles doivent bénéficier d'un cadre de fonctionnement offrant une solution de sécurité de bout en bout.

⁶⁰ « Stuxnet » : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Stuxnet>

**GABRIEL TISSANDIER**

Directeur Général
de Proovstation

Vos clients ont-ils également certaines préoccupations quant à l'utilisation des données ?

Oui, quasiment tout le temps. Aujourd'hui, une entreprise qui travaille avec des données doit absolument avoir un DPO (Data Protection Officer) au sein de sa structure ainsi que des personnes maîtrisant ces données. Depuis presque trois ans, chaque réponse à un appel d'offre se solde par plus de la moitié des questions, non pas sur le produit, mais sur les datas et la data protection. « Où sont les serveurs ? Où sont hébergées les données ? Quels sont les plans d'action en cas de problèmes ? », ce sont des questions qui reviennent de plus en plus.

L'IA comme technologie à privilégier pour détecter les cyberattaques

Identifier les vulnérabilités du système industriel via l'IA pour éviter une intrusion dans ses API et outils numériques est primordial pour les acteurs de l'industrie 4.0. Des mises à jour constantes des composants des systèmes du réseau ne doivent pas faire exception afin de maintenir la santé numérique de l'usine.

L'usage de l'intelligence artificielle serait donc la solution qui permet de répondre au plus vite aux cyberattaques. Cette protection par l'IA et l'apprentissage automatique permet de prendre des décisions rapides et d'analyser des tendances en matière de menaces. En étudiant les nouveaux modes opératoires des hackers, les outils d'IA et leurs algorithmes deviendront de plus en plus performants entraînant une sécurisation accrue et rassurante pour les dirigeants industriels.

Des capteurs edge computing placés sur les machines, pour leur surveillance technique, peuvent également remplir un rôle sécuritaire suivant les importantes vibrations et informations pertinentes qu'ils remontent.

Utilisation de l'intelligence artificielle pour la détection de cyberattaques : retour d'expérience

À l'image des cyberattaques qui ont paralysé plusieurs centres hospitaliers en février 2021, l'objectif des hackers est d'obtenir des informations personnelles afin de les exploiter ou de les revendre. L'intelligence artificielle change la donne en matière de cybersécurité en analysant des quantités massives de données. Ce retour d'expérience présente une utilisation de ces méthodes capables d'analyser des millions d'événements informatiques (logs) pour détecter les intrusions dans un réseau informatique.

Contexte et objectif

Un grand groupe industriel a subi une cyberattaque qui a permis aux hackers de s'introduire sur le réseau informatique et d'installer un malware de type ransomware (Sodinokibi) sur de nombreux postes de travail. Ce logiciel chiffre des données personnelles, puis demande à leur propriétaire d'envoyer de l'argent en échange de la clé qui permettra de les déchiffrer. La société impactée a sollicité OpenStudio afin de comprendre comment les hackers ont réussi à s'infiltrer dans leur réseau informatique.

L'entreprise a fourni des millions de logs (journaux d'événements) provenant de son antivirus Kaspersky (800 000 logs) et de son pare-feu Fortigate 300 afin qu'OpenStudio

les analyse. Au total, le groupe a mis à disposition 8 fichiers d'environ un million de logs avec une centaine de variables les caractérisants. Évidemment, traiter « à la main » ces immenses volumes de données, prendrait trop de temps. Toute l'équipe des Data Scientists s'est alors mobilisée durant 3 jours sous la forme d'un Hackathon pour traiter ces millions de logs. Leur objectif : analyser ces logs post-attaque pour retrouver les points d'entrée dans le système et retracer l'attaque.

Solution apportée

N'ayant pas d'idées précises sur la forme de cette attaque au sein des logs, l'intelligence artificielle s'est révélée être un outil efficace pour détecter des événements anormaux et inhabituels. Ainsi, l'équipe d'OpenStudio a utilisé des modèles non supervisés afin de découvrir des structures sous-jacentes à des données non étiquetées. Ces méthodes ont permis de sélectionner des logs suspects qui devront être analysés par les experts du système informatique de l'entreprise. En effet, cela peut prendre la forme d'outilier ou bien de groupes de logs ayant des caractéristiques différentes de la majorité des logs.

Au sein de la littérature scientifique, de nombreuses publications prouvent l'efficacité des méthodes d'intelligence artificielle dans la détection d'intrusion malveillante au sein des systèmes informatiques. L'algorithme des K-Means est le plus populaire dans ce contexte de cyberattaques. En effet, Gerhard Münz, Sa Li et Georg Carle⁶¹ explorent des données de réseau pour détecter des anomalies basées sur l'algorithme des K-Means.

Ainsi, les données d'entraînement contenant des logs non étiquetés sont séparées en grappes de logs normaux et anormaux. De plus, cette méthode a pu être automatisée pour détecter, en temps réel, les activités intrusives sur un système informatique.⁶²

⁶¹ « Traffic anomaly detection using K-Means clustering » :
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2303041>

⁶² « Anomaly detection in network traffic using K-mean clustering » :
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7507933> & « Semi-Supervised K-Means DDoS detection method using hybrid feature selection algorithm » :
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8717648>

Détection de groupe de logs avec les K-Means

Les millions de logs ont la forme de variable textuelle et catégorielle pour la plupart. Un prétraitement a été nécessaire pour transformer et exploiter ces données aisément.

La liste des prétraitements est énoncée ici :

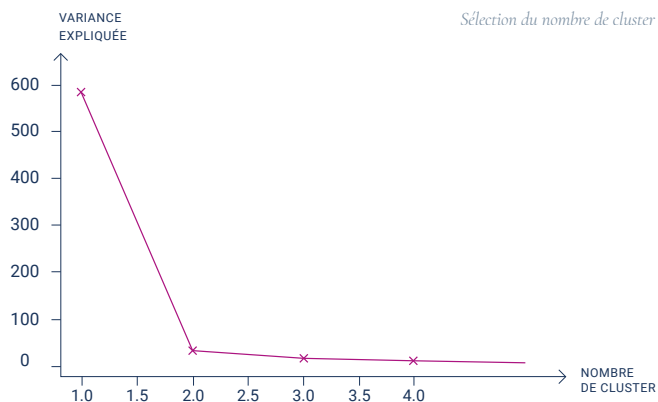
- Le remplacement des données manquantes par une valeur afin de considérer cette information comme une modalité à part entière.
- L'encodage de ces variables catégorielles en données numériques. Ainsi, chaque modalité a un nombre attribué.
- La mise à l'échelle des données permet de diminuer l'importance ou la sous-importance d'une modalité due à l'attribution d'un nombre quelconque à l'étape précédente.

L'algorithme des K-Means est une méthode de partitionnement des données permettant de diviser les logs en K groupes souvent appelés clusters. Mathématiquement, les K-Means regroupent les données en essayant de séparer les échantillons en n groupes d'égale variance, minimisant le critère de l'inertie ou somme des carrés intra-cluster définie par la fonction suivante :

$$\sum_{i=0}^n \min_{\mu_j \in C} (\|x_i - \mu_j\|^2)$$

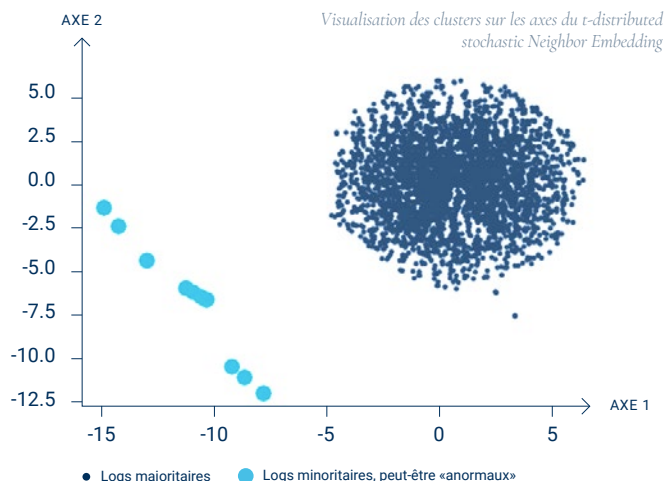
L'algorithme K-Means divise un ensemble de n échantillons x dans K clusters disjoints C , chacun décrit par la moyenne U_j des échantillons du cluster. Les moyennes sont communément appelées les centroïdes de clusters.

Pour choisir le nombre de clusters à retenir, plusieurs méthodes existent dont la plus populaire est la méthode du coude. Elle examine le pourcentage de variance expliqué en fonction du nombre de clusters. Il faut choisir un certain nombre de clusters afin que l'ajout d'un autre cluster ne donne pas une meilleure modélisation des données. Plus précisément, lorsque l'on trace le pourcentage de variance expliqué par les clusters par rapport au nombre de clusters, les premiers clusters ajoutent beaucoup d'informations (expliquent beaucoup de variances), mais à un moment donné, le gain marginal diminue, donnant un angle à la courbe. Le nombre de clusters est choisi à ce stade, d'où le « critère du coude ».



Courbe de la variance expliquée selon le nombre de cluster

Dans ce cas, l'algorithme des K-Means crée deux clusters que nous pouvons visualiser par la figure suivante :

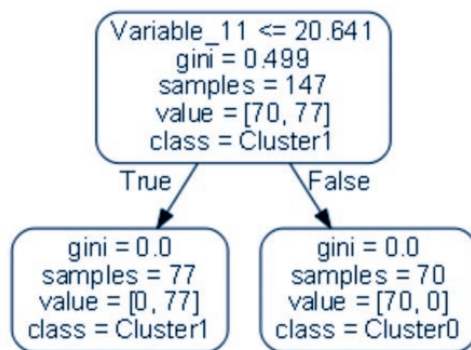


*Clusters sur les axes résultants de combinaisons non-linéaire
des variables catégorielles*

Ainsi, l'algorithme des K-Means permet de mettre en lumière des groupes de logs suspects. L'analyse des logs par des experts de la cybersécurité, ou du système d'information en question, permettrait de statuer sur leur dangerosité. L'intelligence artificielle permet ici de cibler des comportements anormaux dans le but d'alerter les personnes en charge de la sécurité informatique. Pour connaître les caractéristiques de ces deux clusters, il est possible d'utiliser la méthode d'intelligence artificielle des Random Forest.

Caractérisation des clusters avec les Random Forest

La première étape consiste à regrouper les catégories de clusters (résultats des K-Means) avec l'ensemble des variables d'entraînement du modèle. Cette nouvelle base de données étiquetée permet de réaliser un apprentissage supervisé des clusters. La méthode des forêts d'arbres décisionnels identifie les variables qui discriminent les clusters créés. En effet, les variables qui se trouvent fréquemment dans les nœuds des arbres de décisions seront les variables discriminantes. Dans la figure suivante, on retrouve un exemple d'arbre de décisions. Ici, la variable_11 qui discrimine parfaitement les deux clusters créés par des K-Means.

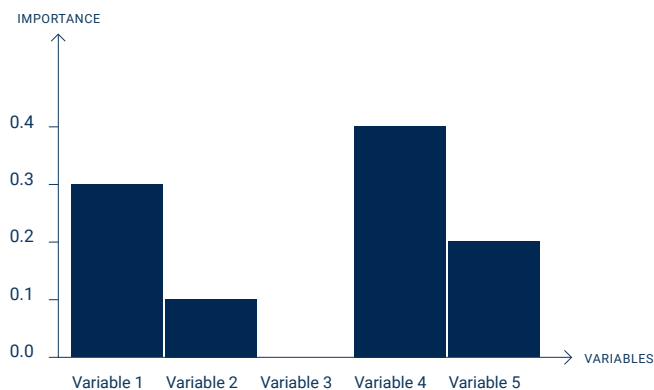


Exemple d'un arbre de décision

Dans cet exemple, la variable `Variable_11` caractérise bien chaque cluster. Pour une valeur de `Variable_11` inférieur ou égale à 20,641, alors le log appartiendra au cluster1 et inversement. La fonction de Gini mesure avec quelle fréquence un élément aléatoire de l'ensemble serait mal classé si son étiquette était choisie aléatoirement, selon la distribution des étiquettes dans le sous-ensemble.

Pour déterminer l'ensemble des variables discriminantes, l'algorithme des forêts d'arbres décisionnels effectue un apprentissage sur plusieurs arbres de décision. Ainsi, il sera possible de connaître les variables les plus discriminantes en simulant plusieurs centaines d'arbres.

`RandomForestClassifier` fournit l'importance des variables en calculant le nombre d'échantillons qui atteignent le nœud (et donc la variable en question) divisé par le nombre total d'échantillons. Cette valeur d'importance intervient pour identifier les variables exogènes les plus discriminantes.



Représentation de l'importance des variables

Ces travaux permettent d'identifier l'influence des variables 1, 4 et 5 principalement, sur la création de clusters et donc de logs atypiques. En pratique, lorsque le nombre de variables est très important, cette méthode est un bon moyen d'identifier rapidement les variables qui caractérisent chaque cluster. Ainsi, l'étude de ces variables permettra de connaître les valeurs correspondant aux clusters de logs suspects par exemple.

Conclusion et perspectives

Les modèles de type non supervisé, comme les K-Means, peuvent détecter automatiquement des logs suspects au sein de millions de données. Ainsi, un système d'intelligence artificielle peut fournir un certain nombre de logs douteux qui pourront être analysés par un expert métier. De plus, l'apprentissage supervisé de ces logs dorénavant étiquetés, permet de mieux caractériser ces clusters suspects à l'aide des valeurs de certaines variables.

Pour la détection d'attaque connue, un deuxième type de modèle est efficace. Les algorithmes supervisés peuvent reconnaître le caractère agressif ou non d'un ensemble de logs. Ces modèles nécessitent de constituer une base de données de logs étiquetés. La construction de cette base est réalisable en simulant de possibles attaques au sein d'un système informatique ou en récupérant des logs d'attaques avérées. Ce sont ces types de modèles qui sont utilisés dans la détection des fraudes.

L'automatisation de ces outils d'intelligence artificielle permettrait de surveiller en temps quasi-réel les événements pour signaler les comportements anormaux. Des outils, comme Elasticsearch, pourront récupérer automatiquement des logs et appliquer des outils d'intelligence artificielle, pour la détection d'événements suspects.

En aucun cas, une méthode d'intelligence artificielle ne pourra garantir la sécurité des systèmes. Cependant, un certain nombre d'alertes fondées sur l'intelligence artificielle peuvent améliorer drastiquement l'efficacité des services de sécurité informatique ⁶³.

⁶³ Découvrez notre présentation vidéo sur l'utilisation de l'IA pour détecter un ransomware dans les logs d'un industriel. Version française issue de la conférence ICAIIS : <https://www.youtube.com/watch?v=fTzdovyyqTk>



Conclusion

Au fil de ce livre, nous avons montré que l'intelligence artificielle occupait une place prépondérante au cœur des nouvelles technologies de l'industrie 4.0. Des robots collaboratifs pour accompagner les opérateurs sur les tâches pénibles et répétitives aux logiciels d'aide à la décision pour l'optimisation de la résilience productive en passant par les solutions IIoT pour anticiper des dysfonctionnements (entre autres), l'IA offre de nombreuses opportunités aux industriels. Les dirigeants de PME et de grandes entreprises ont désormais les clés pour effectuer une transition vers des usines agiles, performantes et responsables. Toutefois, ces derniers doivent être au fait de certaines contradictions caractérisant l'industrie 4.0 (impact environnemental, sécurité des données, ressources humaines, etc), pour trouver les moyens de les contourner.

L'edge computing doit se développer davantage

Mettre en place une plateforme IIoT, avec de l'IA, afin de détecter des opportunités d'optimisations énergétiques et de réduction des émissions de CO₂ est une très bonne idée mais cela implique souvent l'usage du big data. Or, nous avons vu que cela engendrait une pollution numérique conséquente en raison des besoins énergivores en data centers. Ce n'est donc pas la meilleure option qu'il faille choisir pour la planète.

L'edge computing, en partageant seulement des messages d'alerte de dysfonctionnement dans le cloud, plutôt qu'une quantité excessive de données de production, serait alors une solution alternative à privilégier pour être plus respectueux de l'environnement. Cela permet également de sécuriser efficacement les données car il est plus facile pour les éditeurs de crypter un message plutôt qu'un flux de données.



**Cela permet également
de sécuriser efficacement
les données**

Les opérateurs peuvent-ils devenir des leaders du changement ?

Les avancées rapides de l'IA et de l'IoT industriel mettent en exergue l'urgence à former et accompagner les employés dans ce domaine. Cette montée en compétence est indispensable pour qu'ils puissent maîtriser les nouveaux outils qu'on leur met dans les mains. Ils manquent déjà de confiance en eux par exemple lorsqu'il s'agit de lire, étudier et maîtriser les données comme le révèle l'étude du « Data Literacy Index »⁶⁴, publiée en octobre 2018. Ils seraient aussi contraints d'emmagasiner un nombre élevé de connaissances sur la robotique et l'IA en un temps record selon Kai-Fu Lee, expert en intelligence artificielle^[8].

Heureusement, nous avons montré que des solutions pouvaient être mises en place afin de combler ce manque de compétences et formations. La société Braincube a par exemple participé à la création d'un consortium d'entreprises « Go To Smart Factory »⁶⁵ pour proposer aux PME des formations 4.0 personnalisées et labellisées par le Campus du Numérique de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le modèle CALT que nous avons décrypté tend également à insuffler davantage de confiance aux opérateurs, d'une part pour qu'ils s'approprient plus facilement ces nouvelles technologies et d'autre part pour qu'ils puissent à leur tour inspirer le changement en proposant de nouvelles idées (en matière de productivité, de qualité, de réduction des délais et des coûts).

⁶⁴ « The Data Literacy Index », 2018 : <https://www.qlik.com/us/-/media/files/resource-library/global-us/register/analyst-reports/ar-the-data-literacy-index-en.pdf>

⁶⁵ <https://campusnumerique.auvergnerhonealpes.fr/innover/go-to-smart-factory-transformation-numerique-pas-a-pas/>

L'industrie 4.0 : un levier de réindustrialisation en France

Dans un contexte de crise sanitaire et économique causée par la Covid-19 qui a fragilisé la stratégie industrielle française – privilégiant l'importation⁶⁶ –, l'industrie 4.0 pourrait être un levier afin d'augmenter la résilience du système économique et industriel national et ainsi provoquer une réindustrialisation des territoires. Cela serait notamment possible grâce à la baisse des coûts de production engendrée par une production connectée et distribuée, à la hausse de la productivité ou encore à la réduction de la pénibilité. Des avancées qui permettraient par conséquent d'assurer une montée en gamme de l'appareil productif français et de ses produits. Agiles et flexibles, nos entreprises industrielles pourraient alors gérer sans peine des grands et petits volumes sur-mesure, en fonction de la demande. L'humain ne serait pas écarté de ces nouveaux processus de fabrication 4.0. Au contraire, il entretiendrait une collaboration étroite avec les cobots et robots mobiles au niveau des lignes de production et conserverait un pouvoir de décision essentiel aux côtés des outils IoT mais aussi des logiciels de production et d'aide à la décision.

⁶⁶ « Le brief éco. Le déficit commercial de la France se creuse. » : https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-brief-eco/le-brief-eco-le-deficit-commercial-de-la-france-se-creuse_4386639.html

Références

- [1] *L'Industrie du futur : une compétition mondiale*,
Thibaut Bidet-Mayer, Presses des Mines, 2016.
- [2] *L'Usine du futur. Stratégies et déploiement. Industrie 4.0, de l'IOT aux jumeaux numériques*, Nathalie Julien,
Eric Martin, Dunod, 2018.
- [3] *Industrie 4.0. Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*, Dorothee Kohler, Jean-Daniel Weisz, La documentation française, 2016.
- [4] *Auswirkungen auf die Arbeitswelt aus Sicht eines Anwenders, Präsentation anlässlich des FES-Fachgesprächs Industrie 4.0*,
Peter Stephan, 2014.
- [5] *Collaborer avec la machine : quels changements pour l'opérateur ?*,
Anne-Sophie Dubey et Caroline Granier,
Presses des Mines, 2020.
- [6] *L'IoT industriel, du POC à l'industrialisation*, Wavestone,
Livre Blanc, 2017.
- [7] *Industrie 4.0 : l'usine connectée*, Gimelec, Livre Blanc, 2013.
- [8] *I.A, la plus grande mutation de l'histoire*, Kai-Fu Lee,
Les Arènes, 2019.
- [9] *Comprendre la révolution de l'intelligence artificielle*,
Stéphane d'Ascoli, 2020.

Lexique

Cobotique

Collaboration de l'homme et d'un système robotique souvent destiné à suppléer l'humain dans des tâches difficiles.

Cobot

Le cobot est un robot collaboratif qui comporte des capteurs intégrés déterminant sa position dans l'espace et détectant le moindre obstacle, ce qui lui permet d'évoluer sans danger près de l'homme et d'assister l'opérateur dans la réalisation de tâches pénibles ou répétitives, en intervenant à sa place ou dans les environnements difficiles.

IoT

L'Internet des objets ou internet of things est l'extension d'Internet à des choses et à des lieux du monde physique. Alors qu'Internet ne se prolonge habituellement pas au-delà du monde électronique, l'Internet des objets connectés représente les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs du monde réel avec le réseau internet. La connexion de l'usine ou la communication entre plusieurs d'entre elles rend la production flexible et optimise les échanges. On peut également recueillir par ce canal des informations sur les usages des produits, les comportements des consommateurs, prévoir les ventes mais aussi les futures pannes ou dysfonctionnements via la maintenance prédictive.

IIoT

L'Industrial internet of things ou l'internet industriel des objets est la version industrielle de l'IoT. Elle se définit comme un grand nombre de systèmes industriels connectés qui communiquent et coordonnent leurs analyses et actions données pour améliorer les performances, l'efficacité et réduire ou éliminer les temps d'arrêt.

Autrement dit, l'IIoT associe capteurs et architecture informatique dans le cloud. Les IIoT sont présents sur les machines et les objets en cours de fabrication. Chaque automate, chaque moteur, chaque variateur ou chaque capteur peut ainsi informer directement les autres composants de la ligne de son état et leur fournir des données qui leur permettront de se paramétrer automatiquement, sans nécessiter de passer par un système central, réduisant considérablement les temps de réaction de l'ensemble. Les IIoT vont permettre l'optimisation de la supply chain (chaîne logistique) par la traçabilité des produits, le suivi logistique et la maîtrise des stocks mais aussi la simulation du fonctionnement de l'usine en temps réel. Ces technologies peuvent également détecter et corriger des défauts ou organiser la maintenance prédictive.

Jumeau numérique

Le jumeau numérique ou double numérique est un modèle virtuel d'un processus, d'un produit ou d'un service utilisé pour détecter des problèmes, tester et simuler des scénarios sur le modèle physique d'une unité de production.

Big Data

Ce terme désigne la capacité à collecter, stocker et traiter en temps réel des flux très importants de données de nature diverse en vue de leur appliquer toutes sortes de traitements analytiques et statistiques avancés qui relèvent de l'intelligence artificielle.

Edge computing

Le Edge Computing s'avère être une solution alternative au Big Data en remontant uniquement l'information nécessaire, la smart data ou donnée intelligente, et non une quantité importante de données. Les industriels pourraient alors se passer de besoins extrêmement énergivores en serveurs informatiques. L'edge computing, « à la frontière du réseau », intègre en effet de l'intelligence artificielle dans un capteur positionné sur une machine ou à proximité afin d'en analyser l'état de fonctionnement en temps réel sans passer par le cloud. Cette technologie permet d'envoyer sur le cloud uniquement des messages d'alerte de dysfonctionnement, ce qui permet d'éviter un partage massif de données de production et ainsi favoriser une sécurisation efficace des données. Il est aussi plus facile pour les éditeurs de crypter un message qu'un flux de données.

Remerciements

Cet ouvrage est le fruit de longs mois de recherche et de rédaction pour saisir et expliquer consciencieusement les tenants et les aboutissants de l'IA et l'industrie 4.0. Les témoignages clairs et passionnés d'une dizaine d'intervenants ont également permis d'affiner d'une manière très concrète la compréhension du livre. C'est pourquoi nous tenons à remercier Adrien Poinssot, Sotiris Manitsaris et Gérard Lelong qui ont accepté de répondre à nos questions en lien avec la cobotique et les robots mobiles autonomes. Tous nos remerciements vont également à Laurent Laporte, Nicolas Babel, Éric Morand, Gabriel Tissandier, Wael Cheaib, Anthony Gadiou et Yann Mac Garry pour leurs précieux éclairages sur le fonctionnement et l'intérêt de leurs différentes solutions IIoT dédiées à la performance industrielle. Nous remercions Céline Patissier, notre responsable éditorial, d'avoir usé de son œil aguerri pour relire et corriger ce livre. Enfin, merci à Aymeric Fournier pour son aide sur la recherche d'informations.

Dans la même collection

Intelligence Artificielle la grande mutation du e-commerce

IA et e-commerce, un duo bientôt indissociable



Intelligence Artificielle & protection de l'environnement

le paradoxe d'une technologie énergivore
au service des défis écologiques de demain



Papier issu de forêts gérées durablement

V1.5 - 14/03/2022

Open. Studio

L'Intelligence artificielle s'invite aujourd'hui au cœur de nombreux secteurs d'activité. C'est le cas avec l'industrie qui l'adopte progressivement afin d'être hyper-productive et compétitive. L'IA offre en effet de nombreuses opportunités pour faire émerger l'usine intelligente de demain que l'on désigne également par « Industrie 4.0 ». Dans cet ouvrage, vous allez découvrir les grandes applications de cette révolution industrielle et technologique illustrées par des extraits d'interviews de professionnels de l'industrie qui proposent ou expérimentent des solutions 4.0.

openstudio.fr