

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

APPLIQUÉE AUX INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES
ET À LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE

PERSPECTIVES ET BESOINS DE R&D



L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

APPLIQUÉE AUX INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES
ET À LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE

PERSPECTIVES ET BESOINS DE R&D

Rédacteurs :

Fabien PALHOL

*Directeur de la recherche et du développement
Cerema Infrastructures de transport et matériaux*

Bruno DAUNAY

*Data Lead
Leonard, groupe Vinci*

Quentin PANISSOD

*AI Lead
Leonard, groupe Vinci*



JUIN 2020

Sommaire

Avant-propos	7
Introduction	8
[Chapitre 1.] Intelligence artificielle, les fondamentaux	10
1 ••• Définir l'intelligence artificielle	11
3 types d'intelligence	11
Faire de l'IA : symbolique ou connexionnisme ?	13
De la reconnaissance de forme à l'IA	14
2 ••• Les réseaux de neurones	15
3 ••• Utilisations	16
Apprentissage supervisé : apprendre à prédire	16
Apprentissage non supervisé : apprendre à résumer	16
L'IA dans notre quotidien	17
[Chapitre 2.] Data et Big data	18
1 ••• Quelques caractéristiques du Big data	18
Volume	20
Vitesse	20
Variété	20
Variabilité	20
Véracité	21
Validité	21
Vulnérabilité	21
Volatilité	22
Visualisation	22
Valeur	23
[Chapitre 3.] Exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle	24
1 ••• La route de 5 ^e génération	25
2 ••• Optimisation de la conception	26
3 ••• Des inventaires routiers géolocalisés	28
[Chapitre 4.] L'IA dans le domaine des réseaux routiers	30
1 ••• Les éléments de la route	31
2 ••• La sémantisation	32
3 ••• Conception	34

4 ●●●	Construction / Réalisation	35
5 ●●●	Gestion courante	36
6 ●●●	Exploitation	36
7 ●●●	Maintenance courante et entretien	36
	Maintenance courante de l'infrastructure	37
	Maintenance courante des équipements	37
	Viabilité hivernale, sécurité	37
	Gros entretien et renouvellement	38
	Exemples de technologies associées à la maintenance	39
8 ●●●	Applications « commerciales » dans les domaines de l'ingénierie et de la construction	40
	Contrôle qualité, gestion des risques	41
	Ressources humaines	41
	Marchés et contrats	41
9 ●●●	IA, transport et mobilité	42
	Le positionnement optimal des ressources	42
	L'assurance d'être livré à temps	42
	L'optimisation de la flotte de moyens de transports	43
	L'orchestration des livraisons	43
	Le camion autonome	43
[Chapitre 5.]	IA et maintenance des infrastructures routières	44
1 ●●●	Quelques opportunités	46
2 ●●●	Des observables aux indicateurs	46
3 ●●●	Des indicateurs aux décisions de maintenance	47
[Chapitre 6.]	Les perspectives de R&D	48
	Production de données / capteurs	49
	Qualité des données	49
	Traitement des données	50
	Indicateurs	50
	Algorithmique IA	51
	Décision en temps réel	51
	Besoins généraux et interdisciplinarité	52
	Quelques enjeux politiques et sociétaux	54
	L'intérêt des plateformes de données	55
	Conclusion	56
	Sources	57
	Remerciements	58
	Annexe	59

Avant-propos

« Fantasmée par certains, décriée par d'autres, l'« intelligence artificielle » (IA) s'invite aujourd'hui sur le devant de la scène humaine et interroge les liens que notre espèce construit, intentionnellement ou non, avec le « monde virtuel » – celui qui revêt, dans ses développements récents, les prémices d'une « extension » de la réalité humaine.

Objet d'investissements parfois considérables de la part d'entreprises comme d'États, la recherche-développement en IA irrigue déjà de ses applications des secteurs importants de notre économie : la santé, la sécurité des biens et des personnes, les transports, les industries manufacturières, le commerce en ligne... De la maîtrise de ces savoirs et techniques en IA, tous secteurs confondus, dépendra probablement demain une part essentielle de notre compétitivité – et de notre souveraineté.

La filière des « Travaux publics » (TP) n'est qu'au début de sa révolution numérique. Si l'IA y occupe une place marginale, elle promet d'avoir, dans les prochaines décennies, des répercussions majeures sur les connaissances et pratiques du secteur, à toutes les étapes du cycle de vie des infrastructures.

C'est pour éclairer ces « promesses » que la présente étude a été conduite. Impulsée par le comité d'orientation pour la recherche appliquée en génie civil et soutenue par le

service de la recherche et de l'innovation du ministère de la Transition écologique, cette étude apporte un début de réponse aux multiples questions que peuvent se poser les non-initiés à l'IA du secteur. Que recouvre-t-elle ? Quel en est le potentiel, quelles en sont les limites ? Quelles sont les premières velléités de la filière TP en matière de recherche et d'innovation et intégrant ces approches ? Quelles pistes de développement en IA privilégier, à court et moyen termes, pour accompagner sa transition écologique et numérique ?

Le lecteur l'aura compris : ce rapport ouvre un certain nombre de perspectives générales sur la recherche-développement de la filière TP. Il apporte aussi un éclairage sur un sujet pressant pour la maîtrise d'ouvrage publique : la maintenance des réseaux. Il n'est pas (encore) une feuille de route pour le secteur.

Il importe enfin de rappeler que les ambitions déclinées ci-après ne porteront de fruits sur le long terme que si elles répondent à une exigence : celle de la sobriété en matière environnementale. Parce que cette future « extension » de la réalité humaine ne doit pas être « distorsion ». Parce qu'elle doit servir l'intérêt de l'Homme et de la planète.

Thibault Prévost

Service de la recherche et de l'innovation
Ministère de la Transition écologique

Introduction

L'intelligence artificielle est une branche de l'informatique qui vise à créer des machines reproduisant ce que l'homme fait en mobilisant son intelligence.

« **L'IA se définit traditionnellement comme la capacité des ordinateurs à effectuer des tâches cognitives habituellement associées au cerveau humain, telles que la perception, le raisonnement, l'apprentissage, l'interaction avec l'environnement, la résolution de problèmes et même la pratique créative.** [Mc Kinsey 2018, *An Executive's Guide to AI*]

Elle est aujourd'hui devenue un élément essentiel de l'industrie technologique, et la recherche associée à l'intelligence artificielle (IA) est hautement technique et spécialisée. La problématique de base de l'IA correspond à la programmation d'ordinateurs pour certains traits tels que : la connaissance, le raisonnement, la résolution de problèmes, la perception, l'apprentissage, la planification ou encore la capacité de manipuler et de déplacer des objets. L'ingénierie des connaissances est aujourd'hui au cœur de la recherche sur l'IA.

Les machines ne peuvent souvent agir et réagir comme les humains que si elles disposent d'une abondance d'informations relatives à leur environnement. L'intelligence artificielle doit avoir accès aux objets, aux catégories, aux propriétés et aux relations entre eux pour mettre en œuvre une ingénierie du savoir.

Dans le domaine des infrastructures de transport, l'IA accélère l'arrivée des nouvelles formes de mobilité. Prenons par exemple le cas d'Uber : l'entreprise américaine s'en sert pour optimiser l'affectation des chauffeurs et la tarification des trajets, mais a également lancé des programmes de R&D sur la captation de données, le pilotage de flottes, le véhicule autonome. L'émergence des algorithmes optimisant le pilotage de la mobilité conduit à l'adoption de nouvelles solutions, par exemple Uber Pool qui mutualise des trajets entre différents passagers et propose des trajets de quartier à quartier.

D'autres initiatives se servent plus ou moins intensément du progrès technologique de l'IA pour arriver à relever des défis d'innovation, comme concurrencer le rail (Hyperloop) ou la livraison du dernier mètre (robots mobiles, drones).

Enfin, l'arrivée de l'IA encourage des initiatives environnementales en analysant les données de pollution (HAL24K utilise de l'IA pour massifier la collecte de données de pollution à Londres) dans le but final d'un pilotage global de mobilité visant la moindre pollution (pollution, congestion et multimodalité étant fortement corrélées).

Les applications de l'intelligence artificielle (IA) dans le domaine de la route peuvent s'envisager dans toutes les étapes du cycle de vie. L'IA apportera à la fois des analyses plus complexes des données disponibles, mais surtout permettra l'analyse des données massives. Celles-ci peuvent se répartir en trois types :

- les données liées à l'instrumentation (des routes, des ouvrages ou des voies ferroviaires) ; on observe aujourd'hui une automatisation du recueil de ces données qui permet de surveiller (au sens du Structural Health Monitoring) le comportement local de l'ouvrage ;*
- les données liées à l'auscultation d'un réseau ; actuellement se développent d'une part des outils métrologiquement plus performants pour l'auscultation des grands réseaux, et d'autre part des outils « bas-coûts » pour la surveillance des réseaux secondaires non suivis jusqu'à présent. Pour ces derniers, des systèmes de recueil automatisés des données ont déjà été développés et produisent des bases de données conséquentes ;*
- les données externes à l'ouvrage comme par exemple les données de l'INSEE qui doivent permettre d'intégrer des critères socio-économiques et de mobilité dans les décisions d'aménagement.*

L'analyse par l'IA des données d'instrumentation vise à mieux connaître les mécanismes de dégradations et les lois d'évolution. À partir de ces connaissances, les méthodes de dimensionnement, diagnostic, réparation/renforcement pourront être revues, sur la base de nouveaux indicateurs de suivi. L'intégration de l'IA dans les systèmes de gestion des réseaux doit permettre d'améliorer la prévision budgétaire des besoins d'entretien à plus long terme mais aussi intégrer des critères sociaux, économiques ou de mobilité.

De plus, l'IA peut apporter une certaine robotisation des tâches, notamment en milieu difficile. Ceci pourrait s'appliquer tant à l'inspection d'ouvrages que pour la réalisation des travaux de maintenance.

En ce qui concerne l'organisation de la maintenance, de nombreux outils existent en lien avec la maintenance individuelle. Pour un réseau dans sa globalité, l'enjeu est de regrouper les différentes tâches de maintenance en essayant de favoriser une maintenance conditionnelle anticipée au profit d'une maintenance corrective et qui puisse intégrer les données progressivement acquises pour actualiser la durée de vie résiduelle des infrastructures. L'IA peut alors apporter une valeur ajoutée dans le processus d'apprentissage de modèles de dégradation et de classification. L'idée est par ailleurs de pouvoir faire une gestion basée sur la notion bénéfiques/coûts en prenant en compte des données externes en plus de celles venant de l'infrastructure.

Ce rapport aborde tout d'abord les bases de l'intelligence artificielle. Il décrit ensuite quelques cas d'usage de l'IA dans les domaines de la route, avec un focus sur un des enjeux majeurs actuels, celui de la maintenance prédictive des infrastructures de transport. Il met enfin en avant des orientations de recherche souhaitables pour la filière routière.



[Chapitre 1.]

Intelligence artificielle, les fondamentaux

Les travaux sur l'intelligence artificielle démarrent dans les années 1950, notamment grâce à Alan Turing. Le terme « **intelligence artificielle** » apparaît pour la première fois en 1956 lors du *Dartmouth summer research project on artificial intelligence*, aux États-Unis, à l'initiative des pionniers de ce domaine : John McCarthy (Dartmouth college), Marvin Minsky (MIT), Nathanaël Rochester (IBM) ou encore Claude Shannon (Bell laboratories). Ce colloque est considéré aujourd'hui comme l'acte fondateur de l'IA en tant que champ disciplinaire. Ces recherches sont basées sur l'hypothèse que tout aspect de l'apprentissage ou toute autre caractéristique de l'intelligence peut en principe être décrit avec une telle précision qu'une machine peut être fabriquée pour le simuler.

Marvin Minsky, un des créateurs du groupe IA du MIT, définit l'intelligence artificielle comme « **la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique** ». En d'autres termes, créer des algorithmes permettant de simuler l'intelligence humaine.

« *La construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique.* [**Marvin Minsky**]

Le champ est si vaste qu'il est impossible de restreindre l'IA à un domaine de recherche spécifique ; c'est plutôt un programme multidisciplinaire alliant informatique, mathématiques (logique, analyse, probabilités, algèbre linéaire...), sciences cognitives mais également l'ensemble des connaissances spécialisées des domaines auxquels on souhaite l'appliquer.

On peut considérer qu'il existe deux types d'intelligence artificielle : l'IA forte et l'IA faible. Dans le premier cas, les machines mettent en œuvre des raisonnements semblables aux raisonnements humains, mais ont également une réelle conscience d'elles-mêmes. Pour l'IA faible, les machines ne font que simuler l'intelligence humaine sur la base des données et règles qui leur ont été fournies. **Dans la suite de ce rapport, seule l'IA faible sera considérée.**

1 ... Définir l'intelligence artificielle

{ 3 types d'intelligence

Définir l'IA nécessite de se pencher d'abord sur l'intelligence. Les spécialistes de l'IA en ont défini trois types que l'on peut comparer avec certaines capacités du cerveau humain. Nous avons choisi de les clarifier à partir d'un cas concret illustré par la photographie ci-après devenue virale sur internet ces dernières années.



Illustration 1 : up or down ? (Source : internet... Cette illustration est utilisée dans ce contexte plusieurs milliers de fois depuis 2013, sans donnée précise sur son origine).

L'intelligence spécifique

Il s'agit de l'utilisation des capacités cognitives pour apporter une réponse simple à une question simple. Dans notre exemple, « **qu'y a-t-il sur l'illustration 1 ?** », ou encore « **est-ce un chat ?** ».

Dans le domaine de l'intelligence artificielle, cela correspond à des fonctions complexes mais au périmètre parfaitement connu et défini. Leurs utilisations sont maintenant répandues, et vont de la reconnaissance faciale aux assistants vocaux, en passant par exemple par les systèmes d'aide à la conduite en embouteillage.

L'intelligence générale

Il s'agit cette fois de mobiliser différents concepts et de les associer pour répondre par exemple à la question « **Pourquoi est-ce un chat ?** ». C'est quelque chose que le cerveau humain fait relativement facilement et de plus en plus rapidement à force d'expérience.

Cette question appliquée à l'IA revient à combiner différents systèmes associant des prises de décision sur des critères différents pour définir une action qui sera la plus adaptée au regard des paramètres utilisés pour la programmation. C'est le cas des premiers véhicules autonomes qui gèrent de nombreuses situations sur la route mais nécessitent une reprise de contrôle par un opérateur humain en cas d'évènement complexe.

En 2016 encore, on considérait l'intelligence artificielle générale comme étant hors de portée avant le début des années 2020. Pourtant, depuis 2018, on voit apparaître de nombreux exemples comme le service de taxis autonomes de la société Waymo aux États-Unis.

La « super intelligence »

Dans le cas de l'[illustration 1](#), le concept de super intelligence est lié à la mobilisation de détails plus ou moins subtils qui permettent non seulement de décrire, mais aussi de contextualiser ou de donner du sens à un ensemble. Il s'agira par exemple de répondre à la question « [Est-ce que le chat monte, ou est-ce qu'il descend ?](#) ».

Transposée à l'IA, cette intelligence correspondrait à l'analyse d'évolutions accessibles dans un futur plus ou moins lointain. Pour le moment, ce type d'intelligence est considéré comme étant strictement humaine. Dans de nombreux cas, elle fait appel à des relations émotionnelles ou culturelles qui pour le moment encore différencient l'homme de la machine.

[Faire de l'IA : symbolique ou connexionnisme ?

Depuis les premières années de développement de l'intelligence artificielle, deux approches souvent opposées ont été utilisées, l'IA symbolique et l'IA connexionniste.

L'IA symbolique désigne les approches intégrant des productions de raisonnements ou des résolutions de problèmes basées sur une logique formelle, des faits et des règles connues, démontrables et automatisables. Ces approches sont à l'origine des systèmes experts (cause/conséquence ; logiciels d'aide à la maintenance ou au diagnostic médical par exemple), ou encore des premiers traducteurs automatiques.

À partir des années 80, l'IA connexionniste a connu un essor qui se poursuit encore de nos jours. Elle utilise des méthodes plus empiriques basées essentiellement sur l'observation et sur des méthodes statistiques. L'objectif est de modéliser des processus cognitifs à partir d'expériences passées en s'appuyant sur une phase d'apprentissage. Le principe repose sur la décomposition de problèmes en sous-éléments connectés entre eux : en cela, l'approche connexionniste mime le fonctionnement empirique et expérimental du cerveau humain dans sa méthode d'apprentissage.

C'est le connexionnisme qui est à l'origine de ce que l'on connaît aujourd'hui sous les noms de [machine learning](#), [deep learning](#) ou encore réseaux convolutionnels ou réseaux de neurones. Ces solutions exploitent des volumes importants de données et cherchent à mettre en évidence, lors d'une phase d'apprentissage parfois lourde, des règles implicites contenues dans ces données. En cela, on peut qualifier ces méthodes de probabilistes : lorsqu'un résultat est donné, il est accompagné d'un pourcentage de véracité. Ce pourcentage sera acceptable lorsqu'il sera inférieur aux erreurs humaines avec un niveau de tolérance qui dépendra de l'utilisation qui doit être faite du résultat : un traducteur automatique n'aura pas la même tolérance qu'un véhicule autonome.

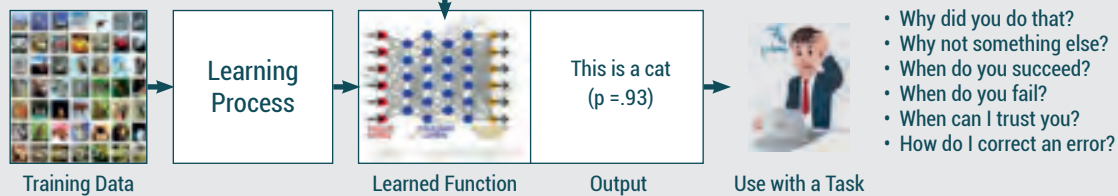
De nombreux travaux actuels visent aujourd'hui à rendre le [deep learning](#) et les réseaux de neurone explicables au moins en partie. On peut citer le projet XAI pour [Explainable Artificial Intelligence](#) financé par la DARPA aux États-Unis [[voir illustration 2](#)].



What are we trying to do?



Today



Tomorrow

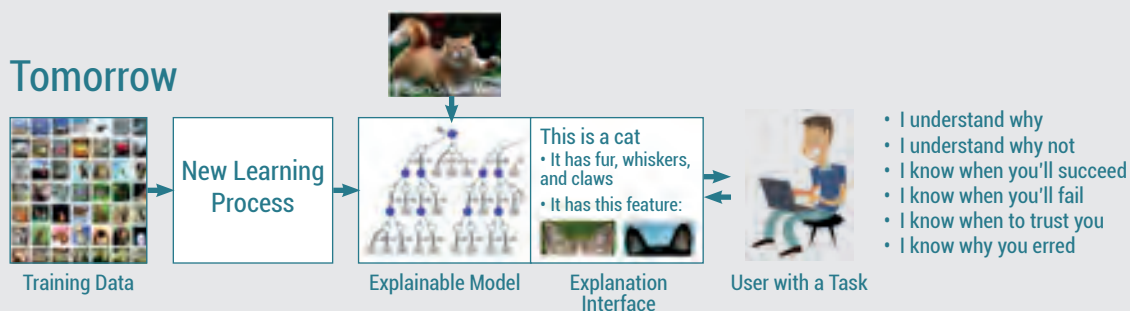


Illustration 2 : Objectifs du projet Explainable Artificial Intelligence de la DARPA. (Source : www.DARPA.mil)

[De la reconnaissance de forme à l'IA

Si l'on s'intéresse un peu plus aux approches connexionnistes qui correspondent à la grande majorité des développements actuels, on constate que l'origine repose sur la reconnaissance de formes. On entend par là un ensemble de techniques qui vont tendre à rechercher des motifs – des « formes » au sens générique dans des données afin de prendre une décision selon leur catégorie. Ces méthodes procèdent en deux phases :

- une phase préalable d'apprentissage, où l'on met en place l'automate de décision ;
- une phase de prédiction, qui correspond à la mise en œuvre de l'algorithme de décision sur les données qu'on lui présente (apprentissage statistique).

Dans ce contexte, il existe trois formes principales d'apprentissage (ou *machine learning*) : supervisé, non supervisé et par renforcement. Dans tous les cas, il s'agira d'utiliser l'IA pour traiter des données d'une façon algorithmique qui permet au système mis en place d'apprendre de ses propres erreurs.

Apprentissage supervisé

On parlera d'apprentissage supervisé lorsque les données utilisées dans le processus d'apprentissage ont été labellisées ou caractérisées en amont (via des métadonnées par exemple). Autrement dit, la valeur de sortie (ou bonne réponse) d'un échantillon est déjà connue au début de la phase d'apprentissage. L'objectif de l'intelligence artificielle sera alors de définir une fonction qui lui permette de se rapprocher le plus possible de la relation qu'on lui indique comme existant entre donnée d'entrée et valeur de sortie. Avec chaque nouvelle donnée fournie par son « guide », l'IA va tendre à diminuer l'écart entre résultat attendu et résultat obtenu en ajustant ses paramètres (par exemple les poids des neurones quand l'algorithme est un réseau de neurones). Elle sera ensuite capable de généraliser cet apprentissage à tout nouveau cas qui lui sera soumis.

Apprentissage non supervisé

À l'inverse de l'apprentissage supervisé, dans le cas de l'apprentissage non supervisé, l'IA ne dispose pas de résultats étiquetés : l'apprentissage se fait par la machine de façon complètement autonome. L'intelligence artificielle va tenter de déduire des similarités ou des tendances présentes dans l'ensemble des données pour déduire des structures communes logiques entre elles. Il pourra ainsi organiser ces données selon ces structures.

Apprentissage par renforcement

Dans le cas de l'apprentissage par renforcement, l'intelligence artificielle aura pour objectif d'ajuster les paramètres – d'un réseau de neurones par exemple – sur la base d'expériences lui permettant d'optimiser au cours du temps les récompenses qu'elle recevra. L'IA est placée dans un environnement et est amenée à prendre des décisions en fonction d'un paramétrage donné. En réaction, son environnement engendrera un renforcement positif (récompense) ou négatif. L'IA cherchera, au fil des itérations, à définir la stratégie (donc le paramétrage) qui lui permettra de maximiser ses récompenses.

2... Les réseaux de neurones

L'origine des réseaux de neurones remonte à un article de McCulloch et Pitts de 1943 qui décrit un modèle de neurone formel s'inspirant du vivant (dendrites, axones...). Cette idée aboutira quelques années plus tard au développement d'un réseau de neurones comprenant différentes couches, nommé Perceptron. Ces algorithmes connaîtront plusieurs phases d'avancées majeures, notamment dans les années 1980 et surtout 2010 avec l'essor du *deep learning*.

Concrètement, un neurone formel (ou artificiel) va recevoir différentes informations en entrée, chacune associée à un poids (par analogie au poids synaptique). Ces informations pondérées seront combinées et soumises à une fonction d'activation ou fonction de transfert qui compare leur poids à un seuil donné. Si ce seuil est atteint, le signal lié aux informations d'entrée est transmis à la couche suivante de neurones formels [voir illustration 3].

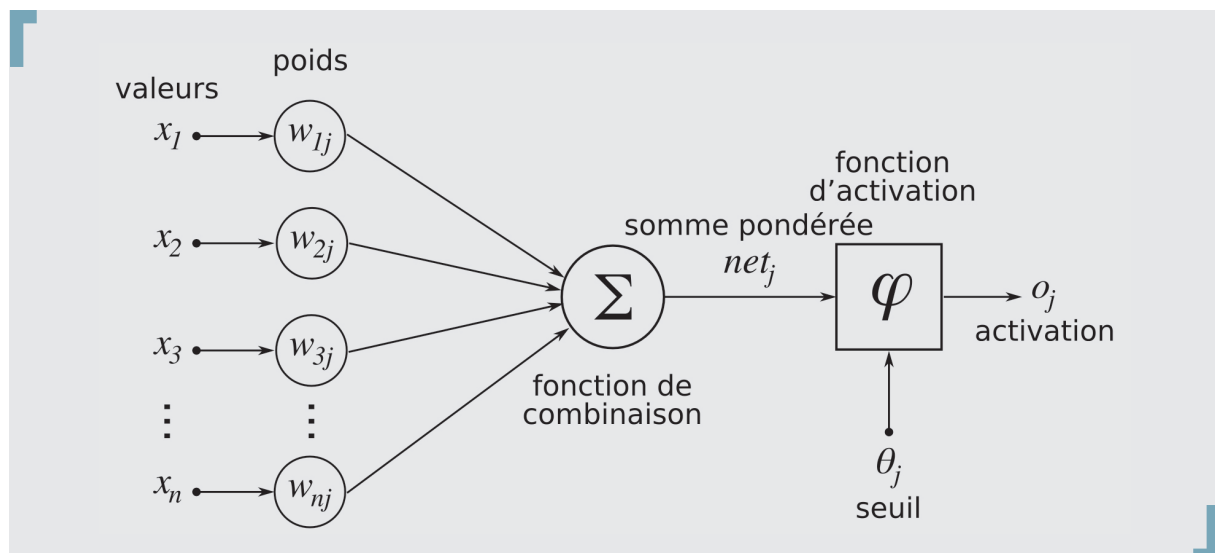


Illustration 3 : Schéma de la structure d'un neurone formel. (Source : Wikipédia)

3... Utilisations

Si ces systèmes d'apprentissage ont chacun leurs avantages et inconvénients (précision, volume de données nécessaires, temps humain...), il est essentiel de comprendre qu'ils ne sont, par nature, pas adaptés aux mêmes types de problématiques. Ainsi, l'apprentissage supervisé sera très adapté à la résolution de problèmes de type classification ou régression alors que l'apprentissage non supervisé sera, quant à lui, plus utile pour des besoins de regroupement ou de segmentation automatique (clustering) ou encore d'association (réduction de dimensions).

[Apprentissage supervisé : apprendre à prédire

Classification

Un problème de classification correspond aux cas où la variable de sortie est une catégorie : « blanc » ou « noir » ; « spam » ou « pas spam » ; « 0 », « 1 », « 2 » ...

Régression

Cette fois, la variable de sortie est une valeur numérique réelle. Cela peut être des euros ou une longueur. Dans les exemples d'application, on peut citer la prédiction de l'évolution du cours d'une action, une prévision de température...

[Apprentissage non supervisé : apprendre à résumer

Catégoriser (clustering)

L'objectif est de structurer les données ou leur distribution afin d'en apprendre plus sur la population globale et les sous-ensembles ainsi définis. Cela peut, par exemple, permettre de regrouper des clients selon leurs comportements d'achats ou leurs habitudes.

Association (réduction de données)

Il s'agit cette fois de découvrir des relations intéressantes entre les attributs des données d'un ensemble important. Cela permet par exemple de rechercher des probabilités de co-occurrence d'actions ou d'événements dans une base de données.

L'illustration 4 permet de synthétiser quelques catégories d'usage de ces méthodes d'apprentissage.

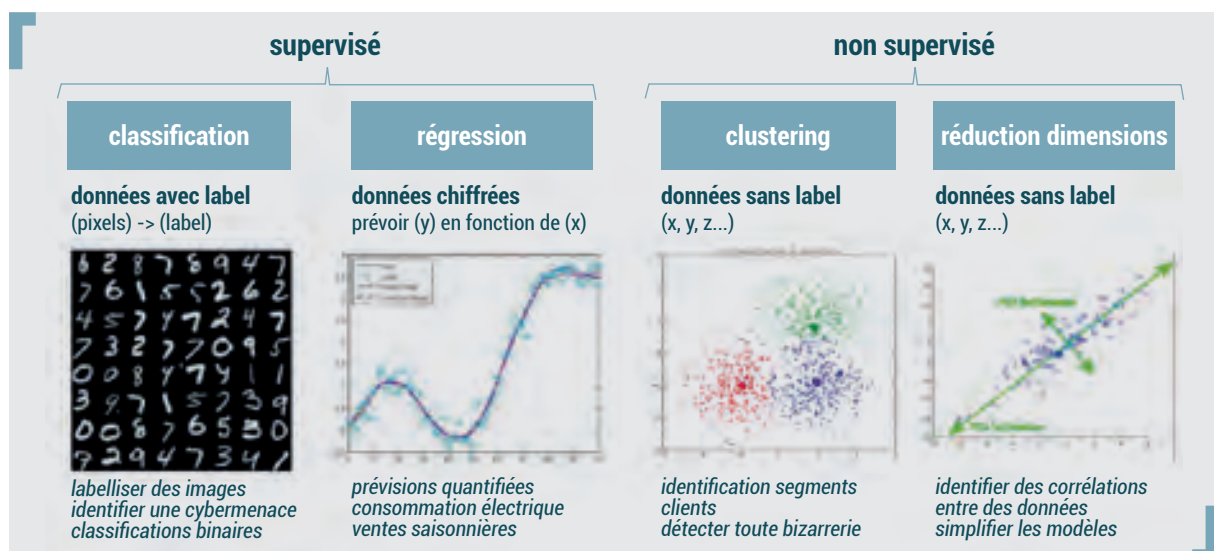


Illustration 4 : Les principales méthodes de machine learning. (Source : Olivier Ezratty)

[L'IA dans notre quotidien

À titre non exhaustif, voici quelques exemples d'intelligence artificielle au cœur de notre quotidien :

- vision par ordinateur pour des applications militaires (reconnaissance de cibles) ou du contrôle qualité en usine ;
- reconnaissance de caractères : tri postal... ;
- interfaces homme-machine : déverrouillage de smartphone par empreinte digitale, reconnaissance du geste (Kinect) ;
- analyse du signal : aide au diagnostic médical, reconnaissance vocale ou musicale, traduction simultanée ;
- indexation automatique de contenu : moteurs de recherche, personnalisation des résultats ;
- détection automatique de spams ou proposition de réponses automatiques ;
- filtre et tri des contenus présentés par les réseaux sociaux ;
- assistants virtuels, objets connectés ;
- assistance à la conduite et véhicule autonome ;
- ...

Même si ces technologies sont aujourd'hui répandues et que de nouvelles applications apparaissent chaque jour, il est important de bien comprendre qu'utiliser l'intelligence artificielle doit correspondre à un besoin qu'il faut pouvoir exprimer pour objectiver l'investissement dans cette technologie. Les mots-clés qui reviennent souvent pour décrire ces objectifs sont décrits ci-dessous.

- **Optimiser** : une méthode, des connaissances, une représentation...
- **Augmenter** : des capacités, des vitesses de traitement, la rapidité de réaction...
- **Anticiper** : une crise, des dégradations, des tendances...
- **Automatiser** : un processus, une tâche, une prise de décision...

La mise en œuvre de l'intelligence artificielle va alors reposer sur trois piliers.

- **Software** : les algorithmes et logiciels supports de cette IA.
- **Hardware** : les serveurs et l'architecture informatique supports de ces logiciels.
- **Data** : les données nécessaires pour apprendre, comme celles qui sont ensuite à traiter pour répondre aux objectifs.



[Chapitre 2.]

Data et Big data

Cela a été dit pendant plusieurs années, « **data is the new oil** » ! La donnée alimente en effet une grande partie des technologies actuelles les plus avancées. Si l'analogie à la ressource mais aussi à la valeur associée est facilement compréhensible, elle est tout de même très réductrice. Les données, surtout dans les proportions qu'elles représentent aujourd'hui, sont en fait un produit totalement nouveau dans les dimensions d'utilisation qu'elles offrent.

Les données sont devenues l'élément clé de l'innovation et de la croissance durable au sein de l'économie numérique et permettent de créer de nouveaux services et produits dans tous les secteurs d'activités qui peuvent

« *Data is the new soil, because for me, it feels like a fertile, creative medium.*
[David McCandless]

par exemple accompagner la transition énergétique, l'adaptation au changement climatique ou la prise en compte des enjeux environnementaux ou sociétaux.

C'est ce qui fait dire à David McCandless : « *Data is the new soil, because for me, it feels like a fertile, creative medium.* »

Ceci étant dit, il ne faut pas négliger les caractéristiques spécifiques de ces données, au-delà même du volume qu'elles représentent aujourd'hui au point que l'on parle désormais couramment de Big data...

[1] Quelques caractéristiques du Big data

Le terme Big data est apparu au cours des années 90 et son utilisation a augmenté de façon exponentielle au fil des années.

McKinsley, un des acteurs majeurs du domaine du Big data, le définit ainsi :

« *Le Big data désigne des ensembles de données dont la taille dépasse la capacité des logiciels de base de données typiques à saisir, stocker, gérer et analyser. Cette définition est intentionnellement subjective et incorpore une définition mobile de la taille d'un ensemble de données nécessaire pour être considéré comme Big data - c'est-à-dire que nous ne définissons pas les grandes données comme étant plus grandes qu'un certain nombre de téraoctets. Nous supposons qu'à mesure que la technologie évolue, la taille des ensembles de données qui se qualifient comme grandes données augmentera également.* »

Nous proposons ici de mettre en lumière dix grandes caractéristiques du Big data (parmi beaucoup d'autres sûrement), qui correspondent en fait à dix grands défis autour de l'utilisation de ces données.

{ Volume

Il s'agit là de la caractéristique la plus évidente, mais les chiffres peuvent être très étonnants. Ainsi, on estime à 33 zettaoctets (33 milliards de téraoctets, $33 \cdot 10^{21}$ octets) la quantité de données numériques créées dans le monde en 2018 (source : *Statistica Digital Economy Compass, 2019*). Et ce chiffre pourrait dépasser les 600 zettaoctets par an d'ici seulement 10 ans... et les 2000 zettaoctets d'ici 15 ans.

Si l'on s'en tient uniquement à Facebook par exemple, cela représente 10 milliards de message échangés chaque jour et un volume annuel de près de 190 000 000 Go (Source : *Facebook, 2019*).

Actuellement, les spécialistes estiment que seuls 5 % de toutes les données produites sont réellement utilisés, ce qui laisse une marge de développement énorme pour les technologies du Big data et de l'IA.

La problématique du volume concerne non seulement les nouvelles données produites chaque jour, mais également la capacité de stockage des supports informatiques dans une tendance d'accroissement qui, pour le moment, tend vers l'infini.

{ Vitesse

Ce point représente le temps nécessaire pour que les données soient produites, collectées, traitées, mises en œuvre mais aussi remises à jour.

Chaque seconde, Google gère 40 000 recherches sur son moteur de recherche. Sur une minute, nous échangeons dans le monde 350 000 tweets, 15 millions de SMS, 200 millions de courriels. Chaque minute également, ce sont 400 heures de vidéo qui sont uploadées sur YouTube.

Le monde digital est désormais bien plus rapide que le monde réel...

{ Variété

Une approche Big data implique d'avoir à traiter à la fois des données structurées (celles entreposées dans des bases de données relationnelles par exemple) mais surtout et principalement, des données non structurées. Cette variété de structuration est complétée de la variété des formats que l'on peut trouver : texte, image, audio, vidéo, mais aussi toutes les données de capteurs...

{ Variabilité

Dans de nombreux domaines d'application, la variabilité va faire référence au nombre potentiellement très important d'incohérences dans les données. Un travail important de détection des anomalies ou de valeurs aberrantes devra alors être mené pour que des analyses pertinentes puissent être envisagées.

Une autre source de variabilité est liée à la multitude de dimensions résultant des types multiples de données (cf. variété) et des origines à la fois très nombreuses et changeantes dans le temps.

On citera aussi ici les variabilités intrinsèques liées à la classe d'un objet observé (il n'existe pas qu'un seul type de voiture...) et aux conditions d'observation (angle de vue, luminosité...). Ces notions sont essentielles en reconnaissance de formes, domaine dans lequel les algorithmes utilisés doivent être capables de prendre en compte ces variabilités (approche probabiliste) et le bruit éventuel lié aux données elles-mêmes.

{ Véracité

La qualité et la fiabilité des données sont clairement des paramètres essentiels. Mais si l'un des paramètres précédents augmente, la véracité va avoir tendance à systématiquement diminuer. C'est d'autant plus vrai que les sources de données sont désormais majoritairement hors du périmètre de contrôle des organisations.

Le concept de véracité traduit donc le besoin stratégique de disposer de données de qualité. La véracité renvoie directement à la provenance ou à la fiabilité de la source de donnée et à son contexte : d'où viennent les données, qui les a créées, quelle a été la méthodologie de collecte, sont-elles exhaustives pour une période ou un sujet donné, ont-elles été modifiées... ?

{ Validité

En plus de tout ce qui a été soulevé comme questions au sujet de la véracité, il faut également traiter le problème de la validité des jeux de données. Cela fait référence à l'exactitude et à la pertinence des données pour l'usage que l'on souhaite en faire. Les résultats d'analyses utilisant le Big data ne seront bons qu'à hauteur de la qualité des données sous-jacentes (données + métadonnées) : il est essentiel d'adopter de bonnes pratiques de gouvernance des données pour garantir : des données cohérentes ; des définitions partagées ; des métadonnées de qualité.

D'après une étude de Gil Press (Forbes, mars 2016), 60 % du temps d'un data scientist est consacré au nettoyage et à l'organisation de ses données avant de pouvoir faire une analyse [voir [illustration 5](#)].

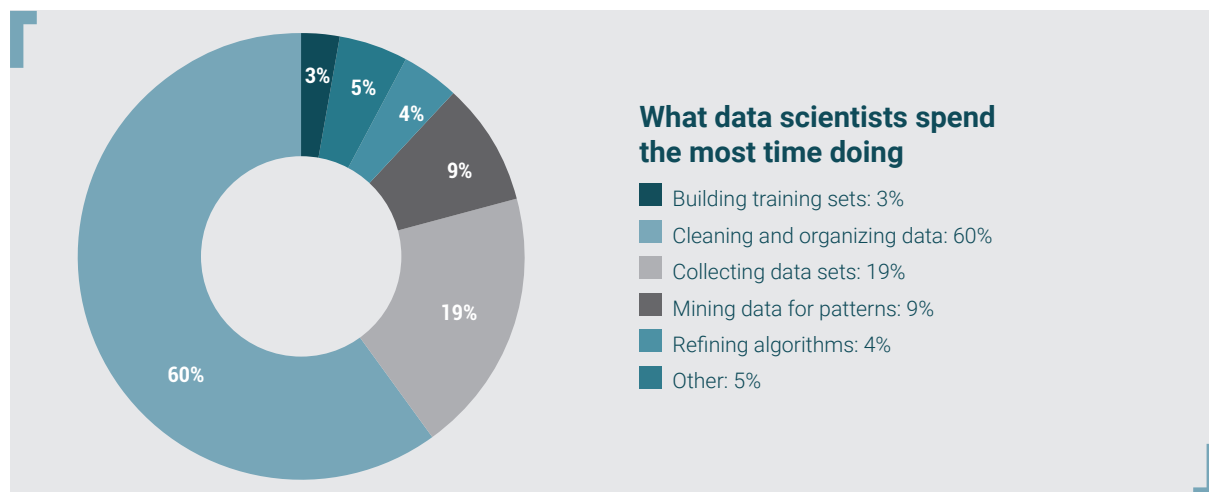


Illustration 5 : La majeure partie de l'activité d'un data scientist correspond au nettoyage et à l'organisation des données. (Source : Gil Press, Forbes, 2016)

{ Vulnérabilité

La multiplication des données et le nombre croissant d'applications génèrent de nouveaux problèmes de sécurité, via le besoin de protéger des données stratégiques ou personnelles. Plus la base de données concernée par une brèche de sécurité sera grande, plus les conséquences seront potentiellement importantes.

{ Volatilité

Combien de temps mes données restent-elles pertinentes ? Combien de temps faut-il les conserver au-delà de cette période ? On parle ici du cycle de vie des données : pertinentes – non pertinentes mais utiles pour des comparaisons – historiques – inutiles.

De nos jours, les données d'une organisation ne peuvent plus être stockées sans engendrer des coûts de plus en plus importants et potentiellement des baisses de performance des systèmes informatiques. Il est alors essentiel d'établir des règles concernant : leur disponibilité ; leur mise à jour ; leur récupération en cas de besoin (stockage froid).

{ Visualisation

On imagine aisément qu'une des grandes difficultés du Big data est la représentation des données. Les méthodes classiques montrent vite leurs limites lorsqu'il s'agit de représenter graphiquement plusieurs milliards de points. Et pourtant, les données ne servent à rien si elles ne sont pas visibles de manière synthétique par ceux qui en ont besoin.

Si l'on ajoute à cela la complexité des dimensions à représenter et la vitesse de changement de certaines de ces données, il est évident que de nouveaux modes de visualisation mais aussi de catégorisation (*clustering*) doivent être utilisés. On trouvera dans l'**illustration 6** quelques exemples de ces nouvelles méthodes : *treemaps*, *sunbursts* ou encore *circular network diagrams*.

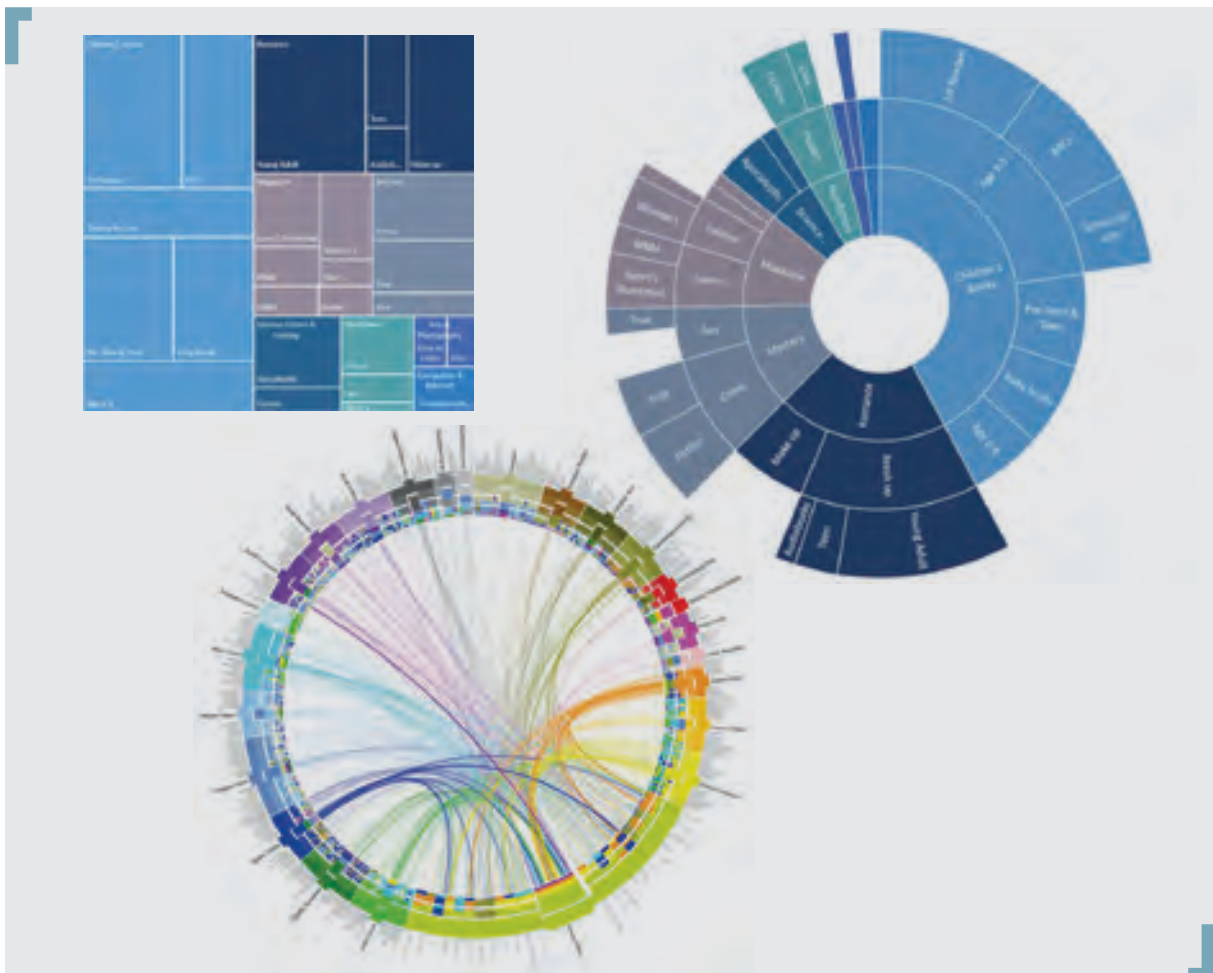


Illustration 6 : Quelques exemples de méthodes de visualisation de jeux de données volumineux : Treemap, Sunburst, Circular network diagram. (Sources : microsoft.com et circos.ca)

[Valeur

La dernière caractéristique présentée ici est sûrement la plus importante. En effet, toutes les considérations mises en avant dans les caractéristiques précédentes ne servent à rien si un bénéfice, qu'il soit commercial ou pour la société ne peut pas être induit par l'analyse des données.

Il faut donc définir quelle valeur peut être accordée ou affectée à un jeu de données, et faire porter les efforts d'analyse vers le développement de cette valeur. Sans forcément parler d'avantage commercial, cela peut être lié à l'optimisation de la gestion des ressources naturelles, à l'analyse des pratiques environnementales, des habitudes de consommation, à l'amélioration des prévisions d'évolution du climat ou à l'efficacité énergétique...



Chapitre 3.

Exemples d'utilisation de l'intelligence artificielle

Dans une étude de 2018, PwC identifie cinq enjeux principaux pour l'intelligence artificielle dans les domaines du BTP :

- **Sécurité** : analyse des risques en temps réel et prévention, réalisation des tâches manuelles les plus dangereuses, communication avec les véhicules des usagers...
- **Productivité** : facilitation de l'usage du BIM (*Building Information Modeling*), gestion automatisée du projet, management auprès de tous les acteurs, prédiction des coûts et délais, gestion des processus (administration, devis...).
- **Expérience utilisateur** : optimisation de l'intermédiation entre l'offre et la demande,

meilleure gestion des stocks et des engins BTP, personnalisation du produit et/ou du service...

- **Développement durable** : prédiction de l'impact écologique du bâtiment, gestion automatisée de la consommation énergétique, scénarios de la résilience du bâtiment, optimisation de l'écoconception...

- **Ville du futur** : échanges en temps réels avec les éléments de la ville connectée, maintenance prédictive et intervention automatisée, allocation évolutive de l'espace...

De nombreux exemples d'applications existent déjà dans le domaine des infrastructures de transport.

[1] La route de 5^e génération

Les gestionnaires des réseaux routiers doivent répondre à la demande des usagers de pouvoir circuler sans restriction sur un réseau routier sûr, incluant un nombre croissant de services. Pour cela, les infrastructures doivent être entretenues sans gêne pour la circulation et supporter avec résilience les événements climatiques violents.

Elles nécessitent également de répondre à la demande sociétale d'une réduction des nuisances et des impacts environnementaux négatifs, ces derniers étant directement liés au transport routier ainsi qu'à l'augmentation de l'offre de transport.

Pour relever ces défis majeurs, l'Isttar a lancé la démarche **Route de 5^e génération** (R5G ©), en lien étroit avec le programme européen **Forever Open Road** initié et piloté par le FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories).

Ce projet a pour objectif de proposer des solutions à même d'être déployées à grande échelle : communication et échange d'énergie entre l'infrastructure, le véhicule et le gestionnaire du réseau ; matériaux recyclables capables de s'auto-diagnostiquer et de s'auto-réparer ; état de surface optimal en permanence malgré les variations climatiques, etc.

Ces approches sont résumées de manière non exhaustive dans l'**illustration 7**.

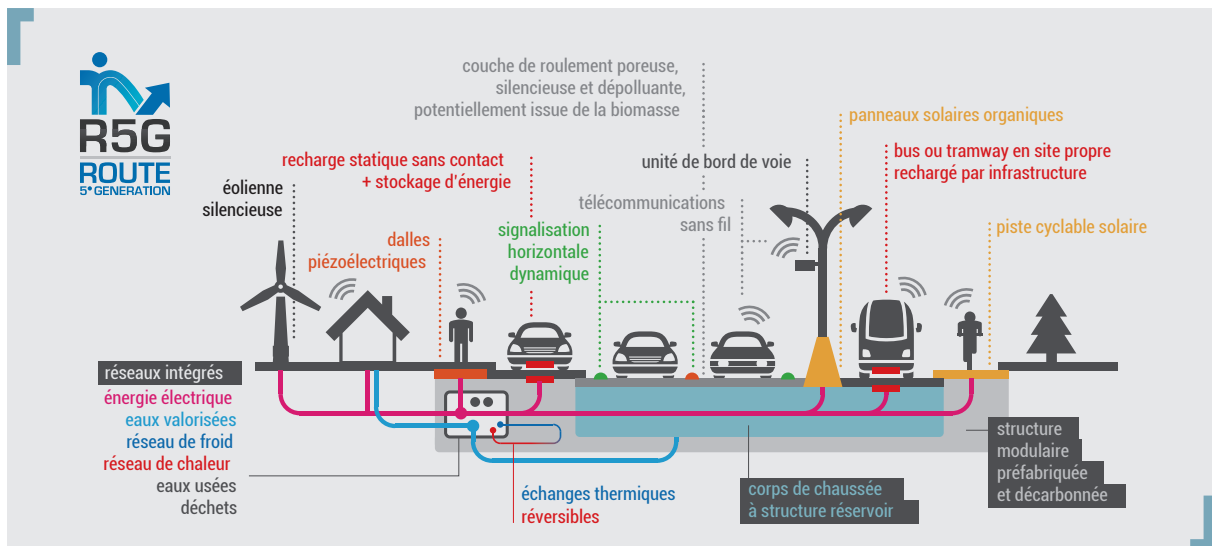


Illustration 7 : exemples de technologies mises en œuvre dans la route de 5^e génération. (Source : Ifsttar)

Toutes ces solutions peuvent être le support d'innovations technologiques liées au développement de l'intelligence artificielle. Les chapitres suivants présentent quelques solutions basées sur l'IA dans les domaines de la conception, de l'exploitation ou de la gestion des infrastructures de transport.

2... Optimisation de la conception

En utilisant l'intelligence artificielle, il est possible, via des systèmes d'apprentissage supervisé, de se servir des données environnementales ou constructives pour identifier la meilleure façon de construire une infrastructure. Un système d'IA peut ainsi recommander pour un secteur ou une région donnée, les matériaux à utiliser (disponibilité, adéquation au projet...), les règles de dimensionnement, et ainsi définir au mieux les coûts globaux d'un projet.

Comme cela commence à se développer dans le bâtiment, on peut imaginer dans un futur relativement proche que des programmes basés sur l'intelligence artificielle puissent définir les meilleurs paramètres de construction pour des infrastructures de transport. En architecture, les travaux de Stanislas Chaillou (Harvard Graduate School of Design), montrent les avancées réalisées en *generative design* pour optimiser la conception des bâtiments, à toutes les étapes :

- emprise au sol pertinente selon la parcelle ;
- type et nombre de pièces ;
- orientation et ouvertures ;
- connectivité entre les pièces ;
- optimisation du plan de circulation ;
- ameublement.

L'illustration 8 montre un exemple de bâtiment optimisé par un programme d'intelligence artificielle capable de prendre en compte (après apprentissage) aussi bien des dimensions quantitatives (surfaces, nombre de pièces...) que des propriétés plus qualitatives telles que la luminosité, facilité de circulation d'une pièce à l'autre...

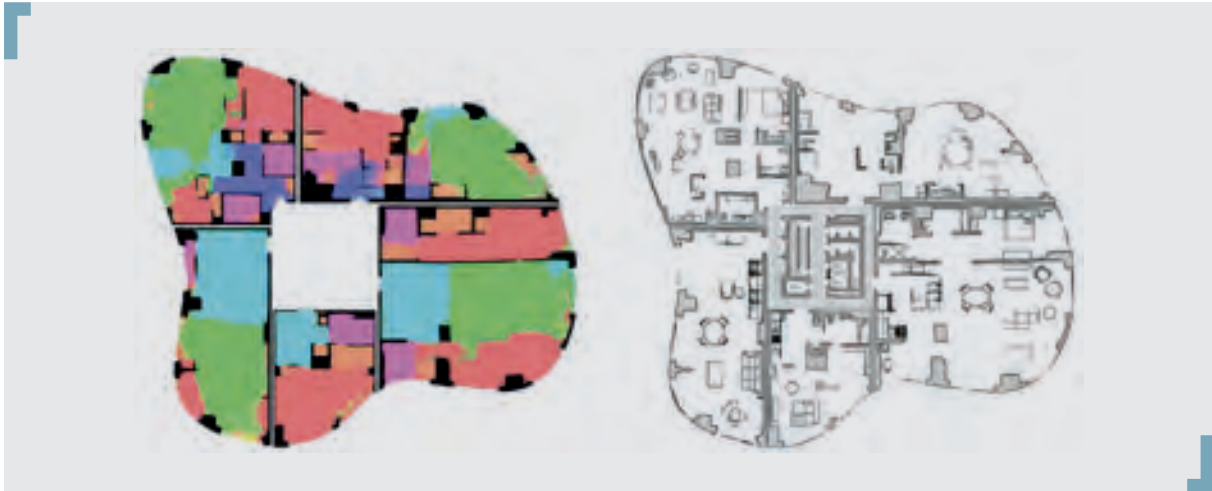


Illustration 8 : Exemple de bâtiment généré par réseaux neuronaux Antagonistes génératifs (GANs). (Source : Stanislas Chaillou)

Selon un article de Road traffic technology (*UAE to use artificial intelligence in road construction projects, 10 avril 2018*), le ministère du développement des infrastructures des Émirats arabes unis a commencé à utiliser l'intelligence artificielle dans les projets de construction de routes. Les estimations de gains peuvent aller jusqu'à 54 % pour la durée d'un projet, et sont également non négligeables sur la consommation de carburant en phase de construction, sur la gestion de la main d'œuvre et des équipements.

3 ••• Des inventaires routiers géolocalisés

RoadAI de Vaisala (www.vaisala.com) propose une solution basée sur l'intelligence artificielle pour l'obtention de données routières. Les fonctions de vision par ordinateur mises en œuvre par ce système traitent les données vidéo routières pour fournir une évaluation automatique des dégradations présentes sur la chaussée [voir **illustration 9**], ainsi que des inventaires des équipements. L'utilisation de telles données permet de faciliter la planification et la maintenance des réseaux routiers, ainsi que d'évaluer et de coordonner la maintenance préventive des défauts des chaussées et de leurs équipements.



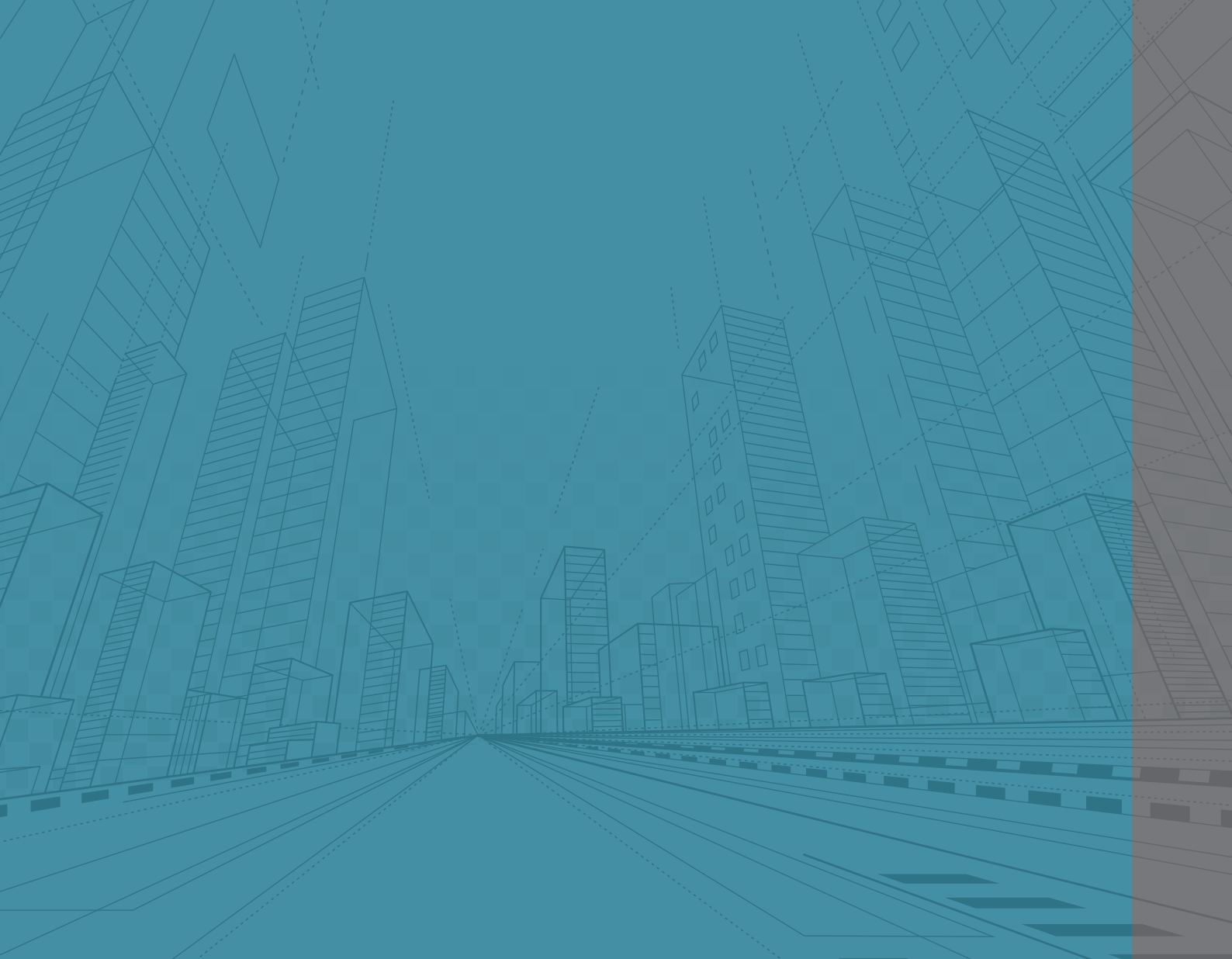
Illustration 9 : Détection automatique de fissures par IA. (Source : Vaisala)

« APOGEE, une intelligence artificielle au cœur du dispatching, qui permet d'optimiser la gestion des flux d'électricité circulant sur le réseau »

RTE (entreprise de service qui gère le réseau public de transport d'électricité haute tension en France) équipe les lignes de capteurs, reliés aux salles de dispatching grâce à un réseau de fibres optiques. Les capteurs envoient en temps réel des données sur la température, sur des pannes éventuelles ainsi que sur des risques de congestion des lignes. RTE connaît mieux les capacités réelles de transport de chaque ligne au moment même de la production. Il peut y faire passer plus d'électricité lorsque c'est possible, sans compromettre la sécurité. Cependant, la multiplication des capteurs, signifie aussi la multiplication des données. À partir d'un certain seuil, le réseau remonte une telle quantité d'informations aux salles de dispatching qu'il devient difficile de les traiter et d'optimiser la distribution d'électricité. Demain, avec ces nouvelles technologies, un million de données pourront être traitées en temps réel.

C'est là qu'intervient APOGEE, un système d'intelligence artificielle que RTE teste actuellement. Il s'agit d'une intelligence artificielle qui va absorber les données issues des capteurs, les analyser grâce à son algorithme et les utiliser de la même façon que le ferait le pilote automatique d'un avion. APOGEE va effectuer toutes les opérations de routine chronophages, détecter les anomalies, et s'il rencontre un problème trop complexe pour lui, il alertera l'opérateur.

Source : Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations économiques



[Chapitre 4.]

L'IA dans le domaine des réseaux routiers

Une étude récente de PwC (“Innovation et BTP : la transformation du secteur est en marche”, 2018) illustre les solutions innovantes qui pourraient découler de l’usage de l’intelligence artificielle dans le domaine de la construction. Grâce aux données fournies par le Big data, ces nouveaux programmes vont percevoir l’environnement qu’on leur soumet, l’interpréter et permettre d’agir sur celui-ci pour atteindre un objectif défini. En ce sens, l’IA peut s’appliquer à toute la chaîne de valeur des métiers de la route, des bureaux de conception à la maintenance, en passant évidemment par le chantier.

L’étude met en avant quatre catégories d’usage de l’IA :

- **l’intelligence automatisée** pour les tâches manuelles et certaines fonctions essentiellement routinières comme la reconnaissance et le tri de déchets sur les chantiers ;
- **l’intelligence assistée** pour accompagner les opérateurs dans leurs prises de décision ou dans leurs actions. C’est le cas par

exemple des exosquelettes ou des casques connectés ;

→ **l’intelligence augmentée** pour les systèmes d’IA qui augmentent les processus de décision humains et qui apprennent également en permanence grâce à leurs interactions avec leur environnement. C’est le cas des systèmes de planification et de re-planification en continu pour les chantiers qui s’adaptent en permanence aux imprévus ;

→ **l’intelligence autonome** pour les systèmes d’IA qui sont désormais capables de s’adapter à différentes situations et d’agir sans assistance, en toute autonomie sur les chantiers, comme certains robots de transport de matériaux.

L’apport de l’IA aux évolutions du domaine routier passe par le traitement d’un volume de données extrêmement important. Ces données ne seront pas toutes qualifiées et il est essentiel de pouvoir les structurer et de leur donner du sens avant toute utilisation par un système expert ou dans le cadre d’un apprentissage.

[1..... Les éléments de la route

Comme dans de nombreux domaines, on trouve déjà des applications à l’intelligence artificielle dans celui des réseaux routiers, et ce à tous les stades, de la conception à la maintenance, en passant par la construction et l’exploitation. Le croisement des données de la route avec les approches IA nécessite avant tout de définir un référentiel commun : c’est notamment un des objectifs du projet national MINnD pour Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables. Une partie des informations de cette partie est basée sur les travaux de ce projet, notamment ceux de l’UC5-7 sur la structuration des données BIM.

Lorsque l’on parle de routes, cela peut représenter, selon les gestionnaires et les typologies de réseaux, un grand nombre de sous-systèmes, eux-mêmes divisibles à nouveau en éléments plus détaillés.

À grande maille, on pourra considérer les sous-systèmes suivants :

- chaussée ;
- ouvrages d'art ;
- assainissement et ouvrages hydrauliques ;
- bâtiments ;
- équipements de la route (signalisation verticale et horizontale, clôtures, glissières ...) ;
- équipements ;
- espaces verts ;
- remblais et sols.

En termes de structuration, la route pourra également être représentée par une succession d'attributs tels que :

- pour la structuration longitudinale :
 - ... le tronçon (entre deux intersections, deux échangeurs...),
 - ... le segment (sous-découpage du tronçon) ;
- pour la structuration transversale :
 - ... la chaussée,
 - ... la voie,
 - ... les couches.

Ce découpage en sous-systèmes et en éléments structurels est nécessaire pour organiser toute l'information relative à l'infrastructure, ses éléments de conception, les données d'exploitation ou encore de maintenance. Celui présenté ici n'est qu'un exemple de ce que cela pourrait représenter. Il appartient à la communauté routière, via la normalisation en cours dans la démarche BIM, de définir précisément les éléments descriptifs des réseaux routiers et les liens fonctionnels existant entre eux pour former un référentiel commun.

[2 La sémantisation

Avec la multiplication des données accessibles de nos jours, un des enjeux majeurs va être de leur donner du sens, et de faire en sorte que ce processus de classification se fasse de la manière la plus automatisée possible.

Les outils d'auscultation ou de prise d'image génèrent des millions de points qui permettent de recréer des jumeaux numériques des infrastructures de transport. Pour permettre une utilisation très large de ces données, des solutions de sémantisation automatique de plus en plus efficaces sont aujourd'hui disponibles. **L'illustration 10** montre un exemple du résultat de l'analyse automatique d'une infrastructure ferroviaire.

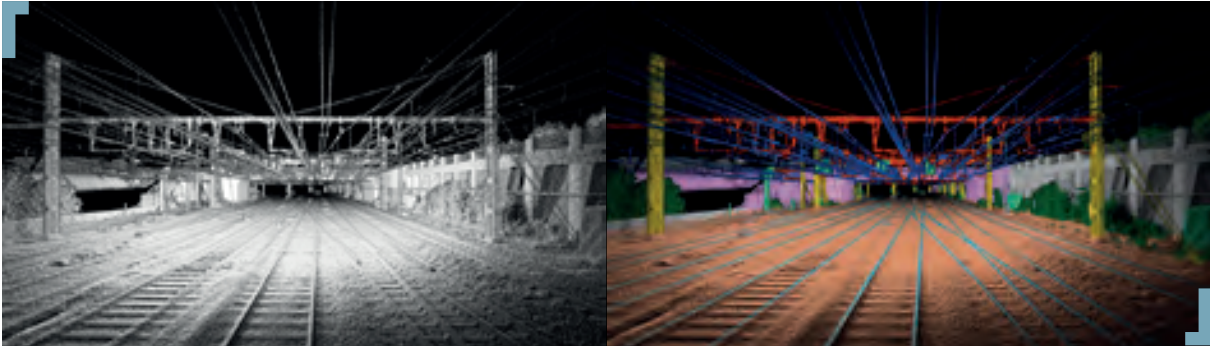


Illustration 10 : Exemple de nuage de points brut (gauche) et sémantisé (droite). (Source : Terra3D)

Une opération similaire peut permettre d'extraire automatiquement les éléments de la route comme :

- l'emprise de la chaussée ;
- le marquage horizontal ;
- la signalisation verticale ;
- les éléments de sécurité ;
- les équipements ;
- la végétation ;
- le mobilier urbain ;
- ...

L'intégration de tous ces éléments, structurés et sémantisés est une valeur ajoutée très importante lors d'une analyse par programme d'IA qui aurait pour objectif de définir des zones d'alerte, des zones de vulnérabilité, ou d'analyser des scénarios d'investissement.

Cette sémantisation est également essentielle pour le fonctionnement des véhicules autonomes. L'illustration 11 montre quelques exemples d'informations sémantisées nécessaires à la conduite autonome.



Illustration 11 : Informations sémantisées utilisables par un véhicule autonome. (Source : University of California, Berkeley - Berkeley DeepDrive)

Focus : IA et véhicule autonome

L'intelligence artificielle intervient déjà aujourd'hui dans le développement du véhicule autonome pour la capture de données et l'entraînement de pilotes autonomes (le degré d'autonomie et d'utilisation de l'IA variant selon les projets).

Dans le futur, les algorithmes d'IA (apprentissage par renforcement notamment) pourraient permettre de piloter collectivement des flottes de véhicules voire l'ensemble d'un système de mobilité pour faire profiter à l'ensemble des trajets individuels le gain global de fluidification du trafic.

Dès lors, les infrastructures routières deviennent indispensables : pour permettre le déploiement de nouveaux services ; assurer la liaison et la connectivité avec les véhicules ; déployer des dispositifs de sécurité adaptés à ces nouvelles technologies. Les business models des concessions routières et les services du futur, épaulés par l'IA, seront déterminants dans la définition des investissements nécessaires au déploiement des équipements de connectivité et de captation des données.

3 Conception

Dans le domaine du bâtiment, de nombreux projets d'utilisation du *Generative design* voient le jour. Il s'agit d'utiliser l'intelligence artificielle pour concevoir automatiquement un grand nombre de solutions répondant à un faisceau de contraintes prédéfinies puis de sélectionner la meilleure [voir [illustration 12](#)]. Cette solution optimale est argumentée avec la manière dont les différentes contraintes sont prises en compte.



Illustration 12 : Exemple de l'utilisation du *Generative design* pour un projet de centre des congrès. (Source : Autodesk)

Quelques projets dans le domaine des ouvrages d'art semblent être en développement et il pourrait être intéressant de se pencher sur l'utilisation possible de l'IA dans des applications routières (épaisseur de couches, choix de matériaux...).

On peut citer l'exemple d'un pont piéton en acier de 12,5 mètres de long à Amsterdam construit en impression 3D sur la base d'une étude permettant d'allier intégrité structurelle, fonctionnalité et esthétique [voir [illustration 13](#)].



Illustration 13 : Pont piéton imprimé en 3D et conçu par Generative design. (Source : Mx3D)

[4..... Construction / Réalisation

Pour la construction des routes, l'IA permet de déployer des engins autonomes pour les tâches répétitives ou dangereuses à moindre coût. Elle permettra, pour les chantiers d'envergure, de les doter d'outils de planification (gestion documentaire, logistique, achats, suivi des contrats par les outils d'analyse documentaire – *natural language processing* – et d'optimisation des systèmes) et de sécurité (prévention de collisions/chutes, alertes par traitement de flux vidéo de caméras). Les applications de l'IA au chantier pourront, pour beaucoup, être transférées entre les différents projets du BTP, du bâtiment à la route.

La société américaine Smartvid.io propose déjà une solution d'analyse d'image en direct permettant de jouer le rôle de « **virtual safety manager** » en alertant les équipes si la plateforme détecte l'absence d'éléments de protection individuelle pour un ouvrier, ou une situation de risque (présence d'eau, éléments instables...).

Fondée en 2016, la société Built Robotics développe des engins de chantier autonome [voir [illustration 14](#)]. Grâce à un logiciel conçu spécialement pour la construction et le terrassement, Built permet aux opérateurs de programmer les coordonnées de la zone à terrasser, puis de laisser les machines faire le reste. L'entreprise a même conçu spécialement des capteurs Lidar (*Light Detection and Ranging*) et GPS qui peuvent résister aux vibrations intenses de l'excavation.



Illustration 14 : Gamme d'engins de chantier autonomes. (Source : Built Robotics)

5 •••• Gestion courante

Les algorithmes d'optimisation (simulation, apprentissage par renforcement, simple régression...) d'intelligence artificielle permettent aussi à court terme d'améliorer la **gestion des flux et la sécurité** sur les routes. En effet, le traitement des flux vidéo de caméras permet de détecter, voire prédire en temps réel, les incidents et les qualifier automatiquement, ce qui réduira le temps d'intervention et les risques d'aggravation de la situation. C'est ce sur quoi travaillent par exemple Cyclope (VINCI Autoroutes) ou Waycare (start-up israélienne). D'autres approches, comme celle d'HAL24K, proposent de fluidifier le trafic en optimisant la gestion de feux tricolores ou de péages en prédisant les flux par des capteurs positionnés en amont. L'analyse des données de trafic permet également d'aider les décideurs, constructeurs et exploitants à optimiser les tracés, la régulation et les équipements dans des objectifs de prévention des risques et de maximisation de la fluidité du trafic. Ces solutions de collecte et analyse de données pourront également fournir des données potentiellement essentielles aux compagnies d'assurance. Enfin, l'analyse de l'ensemble des données de mobilité au niveau de hubs de mobilité (par exemple, les aéroports de grandes villes), peuvent fournir, en conjuguant trafic routier, transports en commun et flux aériens, des opportunités économiques : l'optimisation de gestion des flux de véhicules, trains, avions ; éviter le *rebooking* de clients en anticipant les retards...

6 •••• Exploitation

Dans le domaine de l'exploitation, la sécurité est un des champs de développement les plus prometteurs pour l'intelligence artificielle : sécurité des usagers, comme sécurité des agents intervenant sur les routes. Il s'agit là d'une préoccupation majeure pour les exploitants.

Avec son projet Yellow, la société Aximum (groupe Colas) a pour objectif de concevoir des dispositifs permettant d'améliorer la sécurité des zones de chantier, notamment en utilisant l'intelligence artificielle pour l'analyse complexe de scènes afin de détecter des situations à risque et de déclencher les réactions en conséquence.

7 •••• Maintenance courante et entretien

Les phases de maintenance et d'entretien correspondent à de nombreuses activités : maintenance courante de l'infrastructure, des équipements, viabilité hivernale, préservation de la sécurité, gros entretien, renouvellement... Toutes ces activités utilisent ou génèrent des données et peuvent bénéficier dès maintenant ou dans un avenir proche des avancées de l'intelligence artificielle.

Pour expliciter et illustrer, de manière non exhaustive, ces phases de la vie d'une infrastructure, nous avons choisi de reprendre pour partie la description qui en est faite par le projet national MINnD. Le détail des activités des différents processus peut être retrouvé en Annexe 1 ainsi que dans le rapport UC5-7 Structuration des données BIM en phase Exploitation & Maintenance.

[Maintenance courante de l'infrastructure

- Nettoyage
- Traitement des zones polluées
- Petites réparations
- Maintenance des bâtiments / « *facility management* »
- Maintenance des espaces verts
- Stockage des panneaux et gestion stock cônes
- Stockage du sel et autres produits pour viabilité hivernale
- Gestion des travaux en régie
- Coordination avec sous-concessionnaires

[Maintenance courante des équipements

- Tests (« Find & fix »), avec six sous-activités
- Mesures vibrations sur machines tournantes
- Maintenance
- Suivi des performances des équipements
- Suivi des performances de l'équipe de maintenance
- Gestion des stocks
- Expression besoins maintenance
- Rédaction doc sur équipements installés
- Sécurisation / criticité réseaux

[Viabilité hivernale, sécurité

- Dépannage / secours aux usagers
- Balisage sur interventions, basculement de chaussée, itinéraires de délestage
- Patrouilles
- Formation des patrouilleurs
- Géolocalisation des patrouilleurs et agents sur le réseau
- Gestion des animaux trouvés sur autoroute
- Viabilité hivernale
- Gestion du trafic
- Formation des opérateurs en salle de contrôle
- Gestion des zones de maintenance / travaux
- Surveillance saturation zones arrêt PL

- Surveillance clôtures
- Contrôle d'accès et surveillance / sécurité des bâtiments d'exploitation et zones sensibles
- Expression besoins exploitation
- Mise à disposition docs / plans

[Gros entretien et renouvellement

- Programmation des inspections & auscultations périodiques
- Réalisation et suivi des inspections périodiques
- Suivi de l'instrumentation
- Développement du plan de GER
- Design des lots de travaux
- Balisage lourd pour travaux sous circulation
- Supervision des travaux
- Remplacement / renouvellement des consommables électriques et éléments
- Traitement périodique des boues
- Renouvellement d'une chaussée
- Remplacement des éléments d'un pont
- Travaux lourds liés à l'assainissement et la géotechnique
- Reporting régulier sur l'état du patrimoine
- Reporting annuel sur les travaux réalisés par rapport au Plan de GER
- Expression contraintes trafic / entretien saisonnier pour plan GER
- Refonte plan GER selon évènements non prévus

[Exemples de technologies associées à la maintenance

Afin de limiter les efforts et la pénibilité du travail des agents de terrain en charge de travaux physiques répétitifs, l'utilisation d'exosquelettes est une piste d'amélioration des conditions de travail. Ces solutions permettent également d'accélérer les chantiers...

Dans cet objectif, le groupe Colas et la société RB3D ont développé un râteau « cobotisé » pesant moins de 10 kg pour faciliter la mise en œuvre des enrobés sur la chaussée en milieu urbain, où cela peut difficilement être mécanisé. Les agents ainsi équipés de l'ExoPush [voir [illustration 15](#)] peuvent tirer jusqu'à 50 kg en limitant les efforts fournis. Afin de bien percevoir et accompagner les manœuvres de l'agent, ses technologies robotisées font appel à des algorithmes d'intelligence artificielle.



Illustration 15 : ExoPush, exosquelette permettant de mécaniser les opérations de tirage d'enrobé en milieu urbain. (Source : Colas)

8 ... Applications « commerciales » dans les domaines de l'ingénierie et de la construction

Au-delà des applications métier mises en avant dans les chapitres précédents, on peut également citer plusieurs avantages commerciaux ou industriels liés au développement de l'intelligence artificielle. Et les avantages possibles sont très nombreux. En voici quelques exemples :

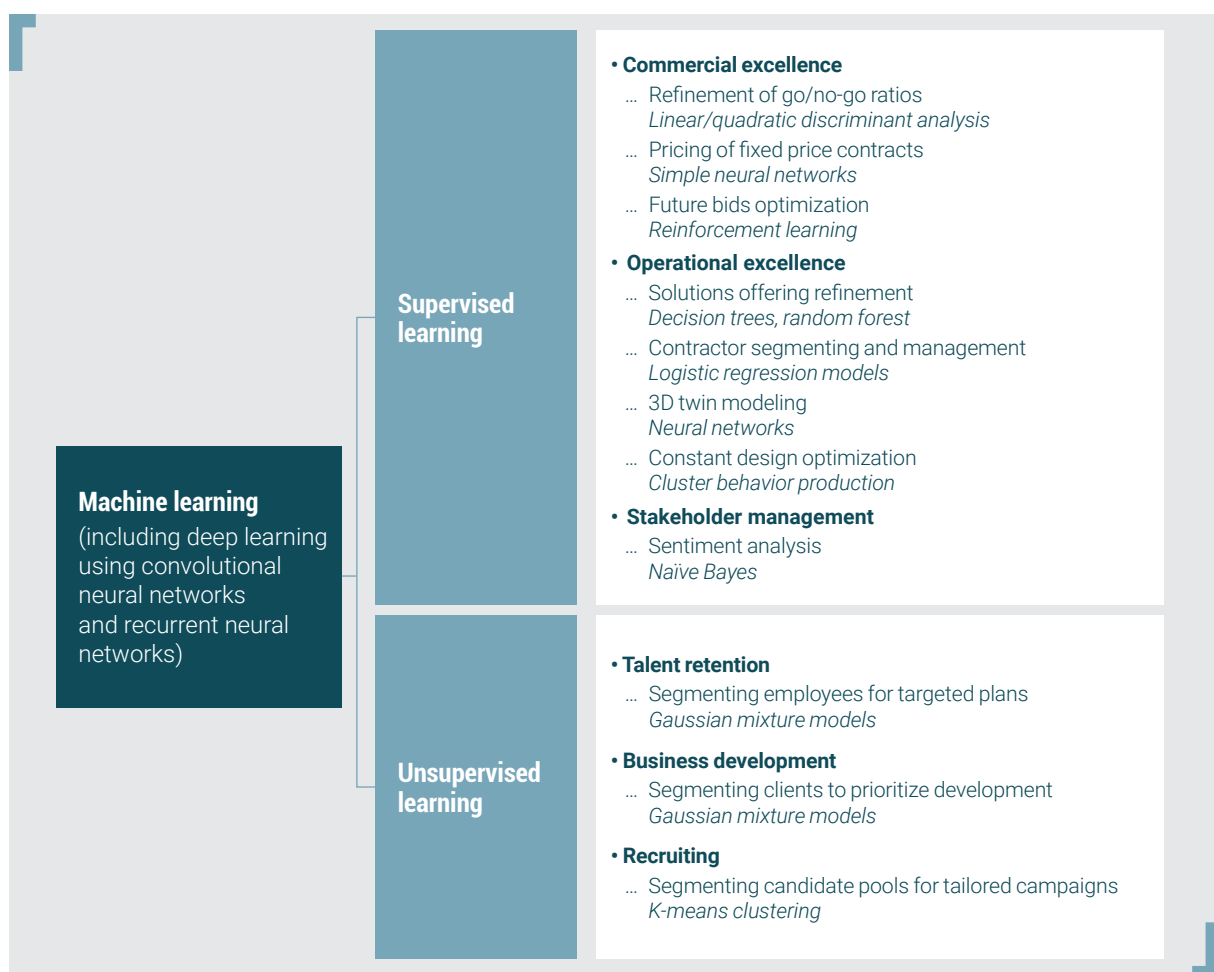


Illustration 16 : Exemples d'applications commerciales de l'intelligence artificielle. (Source : McKinsey&Company)

[Contrôle qualité, gestion des risques

Les entreprises peuvent utiliser l'intelligence artificielle pour améliorer le contrôle qualité. Les réseaux de neurones peuvent par exemple permettre l'évaluation d'images recueillies par smartphones ou par drones pour relever des défauts de construction par comparaison aux données de conception (dessins, projets BIM...).

Ces mêmes technologies permettent de réduire considérablement les circuits de décision grâce à une automatisation de la planification avec des révisions quotidiennes basées sur l'avancement réel, optimisant ainsi la gestion budgétaire et minimisant les risques.

[Ressources humaines

L'un des principaux défis des entreprises du BTP, comme de nombreuses autres, est d'attirer et de retenir les meilleurs talents. Différents modèles d'analyse d'ensembles permettent aujourd'hui de développer des stratégies de recrutement basées sur les compétences ou les répartitions géographiques, permettant ainsi de mieux gérer le *turn-over*, les pénuries de main-d'œuvre pour certains métiers et d'optimiser le déploiement des ressources et donc le déroulement des différents projets.

[Marchés et contrats

En évaluant les soumissions de projets antérieurs et en reproduisant les éléments des réussites tout en évitant les éléments des échecs, les algorithmes d'apprentissage supervisés et non supervisés peuvent augmenter le taux de réussite des projets d'une entreprise. Ces algorithmes permettent également de prédire quelle combinaison de services pourrait être la plus attrayante pour les clients, en particulier lorsque les entreprises s'orientent vers des solutions intégrées ou des approches performancielles plutôt que vers des projets ponctuels traditionnels.

9 ... IA, transport et mobilité

Une étude économique prospective sur l'intelligence artificielle réalisée par la société Atawao pour le compte du ministère de la Cohésion des territoires et du ministère de l'Économie et des finances et publiée en 2019 nous permet de faire un focus sur la mobilité. Cette partie reprend exclusivement les propos de ce rapport : « *Intelligence artificielle - État de l'art et perspectives pour la France* ».

Comme dans d'autres domaines, l'intelligence artificielle va permettre de relever le défi de la complexité (exploitation de grands volumes de données) en fournissant des indicateurs plus fiables pour optimiser capacités et demandes.

Les coûts de la main-d'œuvre dans ce secteur diminueront continuellement avec l'utilisation de l'IA. La question des longues heures de conduite et des arrêts pour une pause ne sera plus un problème avec les flottes entièrement automatisées.

Au-delà des simples coûts de main-d'œuvre, la sécurité et les accidents de la circulation seront fortement affectés par l'IA. Certains camions intelligents peuvent prédire des accidents en détectant des problèmes de santé comme une crise cardiaque des personnes dans le véhicule.

Selon les choix technologiques retenus, la mise en œuvre de véhicules autonomes pourrait nécessiter le développement d'infrastructures communicantes en temps réel (faible niveau de latence) entre véhicules (V2V) ou entre infrastructure et véhicule (V2I). Les pays peu développés feraient alors face à d'énormes défis dans l'utilisation de ces solutions, car leurs infrastructures pourraient ne pas être adaptées ou adaptables aisément.

Le secteur du transport et de la logistique est traditionnellement un utilisateur important de technologies logicielles à base de moteurs de règles pour optimiser les flux. L'apport des technologies de *machine learning* peut être considérable pour relever le défi de la complexité et pouvoir exploiter de grands volumes de données.

{ Le positionnement optimal des ressources

L'intelligence artificielle est capable d'optimiser le positionnement des ressources. L'objectif est d'apprendre, à partir de l'historique de données, à anticiper les lieux de forte probabilité de demande en fonction du jour de la semaine, de l'heure de la journée, de la météo ou de tout type d'évènement (sportif, culturel...). Ce principe de positionnement intelligent peut s'appliquer à toutes les ressources de transport.

{ L'assurance d'être livré à temps

La flexibilité est l'un des principaux facteurs de performance et d'efficacité dans la gestion du transport. Le calcul des prévisions se heurte à la complexité et aux volumes de données à prendre en compte. Pour minimiser les coûts de livraison, il est nécessaire d'anticiper les pics (par exemple en période de soldes) pour mieux dimensionner et répartir ses ressources pour absorber les livraisons.

Pour limiter les frais, l'entreprise peut, grâce à l'intelligence artificielle, orienter le consommateur sur l'option la plus avantageuse économiquement par rapport aux ressources disponibles. L'IA permet aussi d'anticiper les livraisons en fonction des délais et des points de livraison (points relais, livraison à domicile, conciergerie...). Elle peut également favoriser une meilleure planification du temps de travail des chauffeurs.

{ L'optimisation de la flotte de moyens de transports

L'IA peut permettre d'influencer un choix de moyen de transport pour se rendre du point de départ au point d'arrivée. Cette influence peut optimiser la flotte des moyens de transports en anticipant la demande pour un mode de transport par rapport à un autre.

{ L'orchestration des livraisons

La gestion des tournées de livraison est une tâche complexe et fragmentée qui fait souvent l'objet de marges d'optimisation importantes mais peu exploitées.

Les algorithmes d'intelligence artificielle permettent d'anticiper les pics de demandes et de prévoir quelles catégories de produits seront plus ou moins commandées en fonction des périodes et des facteurs exogènes. L'IA pourra par exemple conseiller d'attendre avant de lancer une tournée car elle anticipera d'autres commandes imminentes à livrer dans les mêmes zones, permettant ainsi d'optimiser à la fois le remplissage des camions et les tournées.

L'IA peut également être utilisée pour reconfigurer un réseau de manière dynamique après un évènement inattendu comme un accident.

{ Le camion autonome

En France, un chauffeur ne peut pas conduire plus de 9 heures par jour et doit respecter des temps de repos à des endroits appropriés. Selon une étude PwC de 2016, les camions autonomes permettraient de réduire les coûts des transporteurs de 30 % d'ici 2030.

WAYMO, filiale d'ALPHABET (Projet de Google), avait développé un minibus autonome pour le transport des voyageurs en utilisant des technologies d'IA. Pour faire rouler un camion autonome, la société a réutilisé la même intelligence artificielle (déjà entraînée) que celle du minibus pour bénéficier de son expérience sur des milliers de kilomètres parcourus. En octobre 2016, UBER a annoncé le lancement d'un camion autonome construit par OTTO qui a parcouru 200 kilomètres entre Fort Collins et Colorado Springs (Colorado) en empruntant l'autoroute 194. DAIMLER TRUCKS a également développé un camion semi-autonome de 18 roues avec un système de pilotage automatique. La startup suédoise EINRIDE annonce un concept de camion T-Pod autonome 100 % électrique.



[Chapitre 5.]

IA et maintenance des infrastructures routières

Les infrastructures routières, que ce soit pour les chaussées romaines ou aujourd'hui pour la route de 5^e génération, ont toujours nécessité des opérations de maintenance. Au fil du temps, les techniques ainsi que les méthodologies et processus de prise de décision ont évolué.

On peut distinguer aujourd'hui deux grands types de processus :

- la maintenance **curative**, qui consiste essentiellement à entretenir périodiquement et à réparer en réaction à des dysfonctionnements ;
- la maintenance **préventive**, qui couple des approches curatives avec des calendriers d'action basés sur les résultats d'inspections, de capteurs, d'études et de retours d'expérience.

Ces dernières années, l'accumulation de données, l'augmentation des capacités

de stockage et de calcul, la recherche en algorithmique et en neurosciences ont permis l'avènement de nombreuses applications d'algorithmes opérant des mécanismes d'intelligence artificielle. Dans le domaine de la maintenance, le numérique n'a pas attendu ces nouvelles possibilités et a connecté les machines et infrastructures : pour en visualiser le statut en temps réel et améliorer la réactivité, pour avoir une vision globale sur un grand nombre de machines ou encore pour mesurer de nouveaux indicateurs.

L'arrivée de ces nouvelles solutions dites « apprenantes », capables d'optimiser un très grand nombre de paramètres pour construire un modèle très performant spécialisé sur un problème donné, permet deux axes de développement autour de la qualité et la maintenance : améliorer la qualité des productions et optimiser la santé des infrastructures et équipements.

L'intelligence artificielle ouvre ainsi de nouveaux champs pour la maintenance.

- Dans un premier temps, la maintenance **prédictive** : elle conjugue l'analyse d'historiques de données avec les données en temps réel pour prédire les dysfonctionnements de manière précise.
- Ensuite, l'IA permet de développer la maintenance **prescriptive** : à partir d'expériences et d'incidents déjà traités par les opérateurs, l'IA peut joindre à sa prédiction des propositions de solutions.
- Enfin, le champ de la maintenance **autonome** est ouvert sur un plus long terme. En alliant les précédentes solutions à un haut niveau d'abstraction et des performances fiables, l'IA permettra de plus en plus d'opérations de maintenance autonome, questionnant la notion même de maintenance. En effet, dans ce cas de figure, soit on considère que la machine ou l'infrastructure transite par un mauvais état avant de s'appliquer elle-même l'entretien nécessaire, soit on considère que, la machine ayant la capacité de se maintenir dans un bon état, elle ne transite pas par un état dégradé, auquel cas ce n'est plus de la maintenance.

Si la maintenance curative et la maintenance préventive sont très répandues, les exigences budgétaires et environnementales, ainsi que les évolutions de pratiques et d'usages des réseaux de mobilité, poussent au développement des approches prédictives et prescriptives, qui pourraient être basées sur l'ensemble des données techniques, de trafic, d'usage, socio-économiques... disponibles pour chaque réseau ou gestionnaire. Dans ce type d'approche, l'intelligence artificielle a toute sa place pour permettre de définir de nouvelles règles d'investissement.

Les cas d'application concrets mettant en œuvre de nouvelles formes de maintenance avec IA sont nombreux. On peut les ranger dans deux catégories d'approches. Une approche **temporelle** qui permet d'optimiser la qualité des productions auprès de machines et la prédiction de

dysfonctionnements, en tirant des conclusions de l'analyse temporelle d'un historique de données : ainsi, on peut changer des pièces, retirer la machine, alerter les collaborateurs, optimiser le carnet de commandes, l'achat de pièces ou matières premières, optimiser les variables extérieures que l'on maîtrise (température, alimentation...), etc. Mais l'IA permet également, grâce notamment aux technologies de *natural language processing* (NLP, capacité à extraire de l'information du langage) et *computer vision* (vision par ordinateur, capacité à extraire de l'information de flux vidéo), **d'extraire de nouvelles informations** permettant d'améliorer la rapidité ou la précision des opérations de maintenance. Par exemple, Vinci Energies inspecte des pylônes avec des drones qui y reconnaissent les taches de rouille, permettant une inspection moins périlleuse et plus précise.

Cependant, pour exploiter au mieux ces données, quelques développements préalables s'avèrent nécessaires.

1 ... Quelques opportunités

Dans son rapport sur la structuration des données BIM, le projet MINnD pointe un certain nombre d'enjeux et d'opportunités liés à l'utilisation massive des données. L'IA peut apporter des solutions innovantes à un grand nombre d'entre eux, ou les utiliser pour permettre de développer de nouvelles approches, et ce dans l'objectif d'un gain en productivité ou en efficacité des processus de maintenance.

- Analyse de l'historique des défauts.
- Capitalisation et interprétation de l'historique des désordres.
- Sélection des données d'exploitation nécessaires à une ingénierie de maintenance.
- Anticipation des contraintes de fonctionnement.
- Construction d'un reporting détaillé (sous-système, localisation, historique, données techniques, trafic, météo, performance...).
- Simulation de comportements (de la chaussée, mais aussi des usagers, des animaux...).

2 ... Des observables aux indicateurs

Les méthodes d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour déterminer le lien (fonction, boîte noire) entre des observables mesurés (entrées de la méthode IA) et des indicateurs de durabilité (sorties de la méthode IA).

Il peut s'agir d'observables CND (contrôle non destructif) :

- signaux électromagnétiques ;
- ultra-sons ;
- images ;
- données 3D + image ;
- ...

Pour utiliser ces données, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de traitement de signal et de l'image pour la mise en place et/ou en forme des données. Sur ces domaines, on peut citer quelques exemples de recherche du Cerema et de l'Université Gustave Eiffel (anciennement Ifsttar) dans le domaine du signal radar :

- méthodes IA pour détecter les décollements d'interfaces de chaussées et plus spécifiquement décollement fin de l'interface entre les deux premières couches de chaussée ;
- méthode IA pour estimer les épaisseurs fines de couche de chaussée ;
- méthode IA pour détecter des défauts des chapes d'étanchéité (chaussées/OA).

En complément de ces données, afin de les synthétiser et d'en tirer les informations nécessaires à une action de maintenance, il est nécessaire de développer les indicateurs associés.

Il peut s'agir d'indicateurs simples utilisant un ou deux types de données (taux de désordre en surface, classe géométrique, teneur en eau volumique...), ou d'indicateurs que l'on qualifiera d'indicateurs agrégés qui couplent plusieurs données aux dimensions parfois très éloignées (état de l'ouvrage, âge et durée de vie estimée, matériaux de conception...). Cela peut correspondre, par exemple, à des indicateurs d'état, d'usage ou encore de dépréciation. Ils découlent souvent de systèmes de régression, de classification ou d'arbres de décision dont les règles et les paramétrages peuvent résulter à la fois d'une expertise technique et d'une analyse IA.

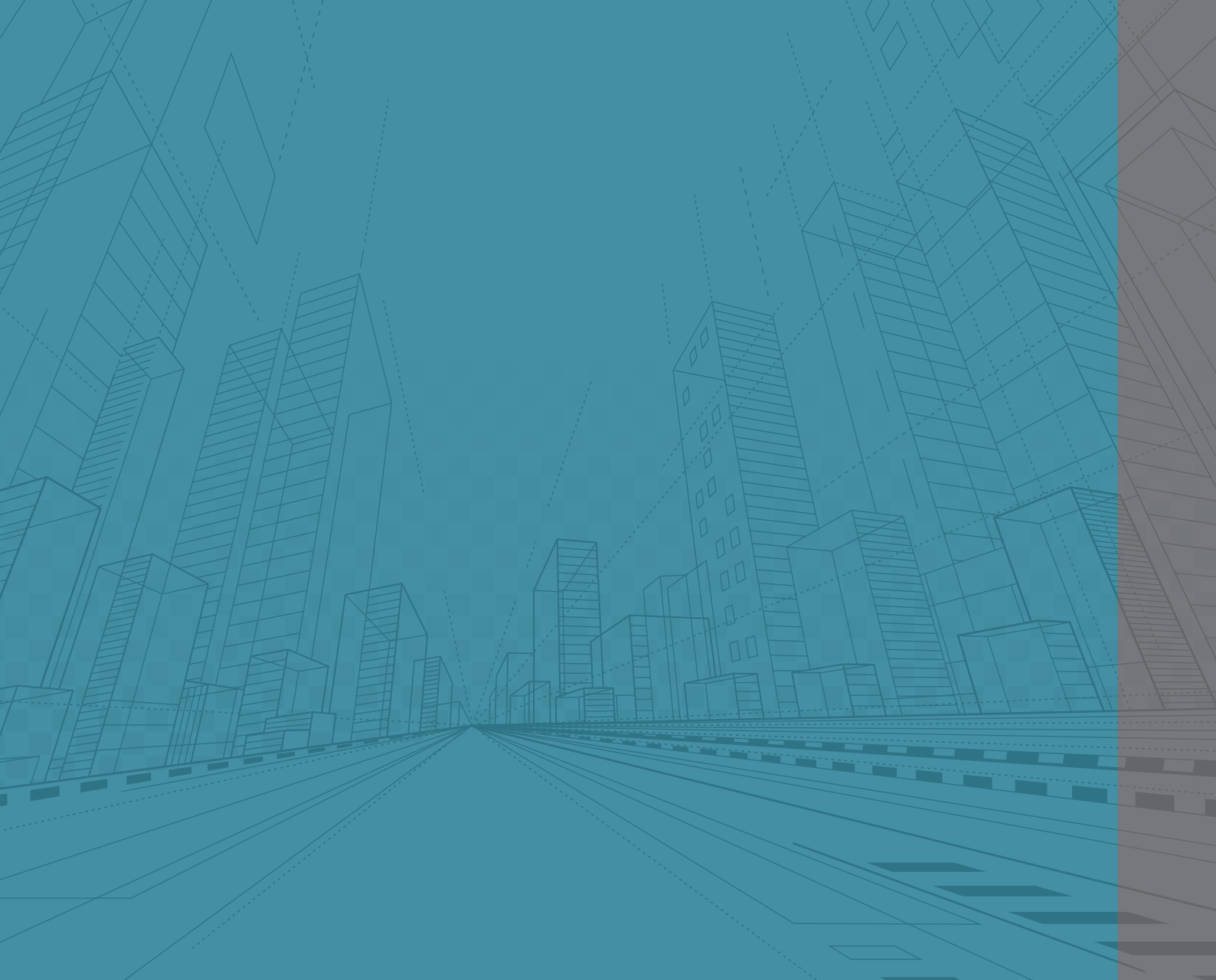
[3] Des indicateurs aux décisions de maintenance

Une fois ces indicateurs définis, les méthodes d'intelligence artificielle peuvent à nouveau être utilisées pour trier et structurer l'ensemble des informations disponibles et ainsi développer des systèmes experts d'aide à la décision basés à la fois sur les connaissances métiers (approche symbolique) et sur l'apprentissage par renforcement (approche connexionniste). Ces systèmes experts auront pour objectif d'aider à hiérarchiser et à orienter la prise de décision (maintenance prescriptive), voire à définir les opérations de maintenance à réaliser (maintenance autonome).

Pour définir ces grandes orientations, ces systèmes devront s'appuyer sur des lois d'évolution qui ne sont pas aujourd'hui toutes connues. L'IA peut, là aussi, jouer un rôle important en apportant un autre regard sur les données existantes et définir des tendances qui se trouvent pour l'instant dans « l'angle mort » de la vision des experts.

Le programme national DVDC (pour Durée de Vie Des Chaussées) est un des programmes de R&D qui tentent de clarifier les lois d'évolution des chaussées, lesquelles pourraient ensuite être prises en compte dans des systèmes experts. Ces approches peuvent être complétées par des approches purement algorithmiques.

Il est important d'intégrer à ces démarches des données qui ne sont pas strictement dans le champ technique des chaussées ou des ouvrages d'art. La prise en compte des données environnementales ou encore des évolutions socio-économiques par des optimisations multicritères doit permettre de mieux prendre en compte les contraintes réelles des gestionnaires, qu'elles soient financières, techniques, liées à des usages ou basées sur des échéances électorales.



[Chapitre 6.]

Les perspectives de R&D

Même si l'intelligence artificielle est surtout associée aux domaines de l'informatique et des mathématiques, les perspectives de recherche et de développement peuvent s'imaginer pour l'ensemble des éléments constitutifs d'un système d'IA.

- Les sources de données (capteurs, plateformes) qui génèrent des flux constants d'informations.
- Les données elles-mêmes, dont il faut gérer la collecte, le traitement, le stockage ou encore l'obsolescence.
- Le réseau de communication, qui doit permettre la collecte et le transport de volumes de données de plus en plus grands.
- Les infrastructures de calcul pour traiter, stocker et exploiter les données dans des délais toujours plus courts.

→ Les algorithmes d'intelligence artificielle (*machine learning*, réseaux de neurones, *deep learning*...) pour atteindre les objectifs prédéfinis : mesurer une performance, une erreur, combiner des informations, prendre une décision...

→ Une interface homme-machine pour permettre la communication avec un opérateur, que ce soit pour une aide à la décision ou pour le paramétrage d'un outil autonome.

En relation avec les deux parties précédentes sur les observables, les indicateurs et la prise de décision, on peut faire émerger les grandes lignes de besoins en recherche et développement au niveau national ou international.

{ Production de données / capteurs

L'apparition de nouvelles données correspond toujours à des nouvelles opportunités de préciser les informations pertinentes en vue d'une maintenance prédictive. Le développement des techniques associées au Big data, la miniaturisation de technologies existantes, les développements de nouvelles technologies ou encore le déploiement de l'IOT (internet des objets) permettent d'imaginer des nouvelles perspectives de renforcement des performances de capteurs existants ainsi que l'arrivée de nouvelles données complémentaires de celles dont nous pouvons déjà disposer.

Cela correspond à un besoin en nouveaux capteurs permettant d'accéder à de nouvelles dimensions de suivi des systèmes liés aux infrastructures routières, que ce soit en augmentant la précision ou encore en accédant au traitement en temps réel.

On peut citer ici le projet ANR LabCom OHMIGOD sur le développement d'une génération de capteurs hybrides autour de la technologie Neuron[®] de Morphosense et des technologies radar à sauts de fréquence 3D et patchs magnétiques développées par l'équipe de recherche ENDSUM du Cerema. Associée à des méthodes de caractérisation électromagnétique/mécanique, permettant un diagnostic à grand rendement, moins invasif que les outils actuels et n'altérant pas les milieux auscultés, cette solution constitue une réelle innovation dans le domaine du contrôle non destructif pour le génie civil.

{ Qualité des données

Les données issues de capteurs existants ou à développer doivent pouvoir être interprétées de la manière la plus pertinente possible. Si nous disposons collectivement d'un grand nombre de données, elles sont rarement homogènes ou complètes pour un réseau ou une infrastructure donnée.

Un axe important de progrès consisterait en l'amélioration des techniques d'extrapolation des données manquantes, que ce soit spatialement ou temporellement, et ce afin de reconstituer des jeux complets permettant une analyse exhaustive par un système expert.

Avec la multiplication des données, il paraît également intéressant de pouvoir développer des techniques de comparaison de données et de clustering adaptées à l'analyse des informations routières en termes de dimension et de type de données. L'objectif pourrait être le développement de méthodes de comparaison et de segmentation en zones similaires ou homogènes.

Enfin, que ce soit dans le domaine routier comme dans tous les champs du Big data, il est important de pouvoir disposer de données labellisées et sémantisées pour alimenter les programmes d'IA. Cette labellisation adaptée aux désordres structurels des plateformes, des chaussées ou encore des ouvrages d'art nécessite une technicité particulière qui, pour le moment, n'est que rarement mise en œuvre dans ce but.

{ Traitement des données

Dans le domaine de la maintenance, de nombreux algorithmes existent déjà qui permettent la détection automatique de dégradations ou de déformations, notamment sur les chaussées. Plusieurs enjeux apparaissent sur des environnements plus complexes pour une vision informatisée : les ouvrages d'art avec les différents sous-systèmes et leurs interactions, les tunnels avec de nombreux équipements pouvant perturber la perception des défauts...

Ainsi, il apparaît intéressant de se pencher sur le développement de méthodologies et algorithmes permettant de traiter les données d'auscultation afin de pouvoir les utiliser pour des diagnostics complexes.

Développer les solutions de traitement embarquées et en temps réel pourrait également permettre de démultiplier les capacités d'observation *in situ* (approche à coupler avec les besoins en indicateurs et avec les technologies de remontée d'information type 5G).

Dans la quasi-totalité des domaines d'application, de nombreuses données sont récoltées et disponibles de différentes sources ayant une organisation et une structure qui leur sont propres. L'interrogation unifiée de sources de données multiples et le liage de données hétérogènes sont des défis majeurs pour permettre un accès uniforme à des usagers (décideurs, experts, grand public) ayant des besoins d'analyse très variés. Il s'agit de développer d'une part les méthodes de synthétisation (fusion) de ces données, mais également des approches à base de connaissances qui permettent de garantir une traçabilité de ces données dans les résultats d'analyse obtenus de sorte que les sources et liens puissent être vérifiés et interrogés et ainsi rendre les résultats plus compréhensibles et donc mieux acceptés par un utilisateur non informaticien (rapport France IA, 2017).

{ Indicateurs

La production d'indicateurs innovants permettant une approche prédictive de la maintenance va nécessiter des développements d'expertise dans les domaines du comportement des matériaux et des structures.

Cela peut être des lois d'évolution des chaussées, liées par exemple au comportement viscoélastique des enrobés, ou encore des lois d'espérance de vie basées sur des approches multicritères incluant autant le type de matériaux utilisés que la période de construction et les règles de dimensionnement alors en vigueur.

Au-delà des approches correspondant à des recherches actuelles, il reste des incertitudes sur la capacité de détection d'un problème qui ne serait pas encore dans le périmètre des inspections actuelles. Cela génère automatiquement des risques imprévisibles. Un axe de recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle pourrait être de coupler la création de bases de données temporelles 3D haute précision des routes et des ouvrages d'art avec le maximum de données structurales, d'inspection, et de tenter de reproduire les désordres constatés via un programme d'IA. Cela pourrait définir de nouvelles approches d'indicateur et ouvrir de nouveaux champs de recherche dans la compréhension du comportement fin des structures.

Cela ouvre la voie également à du suivi en continu.

[Algorithmique IA

En complément des développements de capteurs, de méthodologies d'analyse adaptées à la route, et d'indicateurs innovants, il est important de pouvoir soutenir la recherche qu'on pourrait qualifier de « purement informatique » afin de pouvoir disposer de nouvelles approches ou de nouveaux algorithmes permettant par exemple :

- de détecter des défauts sur différents types de formats de données (images 2D, images 3D, données 3D en nuages de points, données radar, signaux faibles...);
- de développer des règles d'apprentissage pour systèmes experts adaptés à la route ;
- d'améliorer la prise en compte de critères multiples pour obtenir de meilleurs diagnostics.

Un des grands défis mis en avant dès 2017 par le rapport France IA est celui du raisonnement sur des données massives. Les algorithmes de raisonnement mécanisent des raisonnements à partir d'ensembles d'expressions symboliques, dans le cadre de formalisations logiques. La complexité du raisonnement dépend :

- de l'expressivité du langage dans lequel les formules sont exprimées ;
- et du nombre de formules qui, même simples, aboutit à un volume de données très importants.

Il est essentiel de développer de nouvelles formes de raisonnement donnant une plus large place aux données et passant à l'échelle du Big data. Pour cela, il est essentiel de revisiter les différentes formes de raisonnement et les formalismes de représentation de connaissances. Le développement d'approches de raisonnement décentralisé sur des données distribuées est en particulier un défi important à relever.

[Décision en temps réel

Un des champs de développement actuel dans le domaine de la maintenance est celui du contrôle continu et de la décision en temps réel par une intelligence artificielle. Cela peut être, par exemple, la prise de décision de fermeture d'un pont ou d'un tunnel en cas de doute important sur un élément structurel.

Cela implique de combiner tous les points développés plus haut :

- des capteurs pertinents, fournissant des informations en continu ;
- des données traitées, hiérarchisées et sémantisées en temps réel ;
- des lois d'évolution ou des analyses de comportement suffisamment précises ;
- des indicateurs adaptés à la gestion des risques sur une structure donnée ;
- un apprentissage en continu, notamment en cas de faux positifs ;
- des seuils et des règles de décision éprouvés permettant une automatisation de la prise de décision.

{ Besoins généraux et interdisciplinarité

En dehors des besoins de R&D classiques évoqués plus haut, il paraît important de noter le manque de disponibilité d'experts (en mathématiques notamment) pour mettre au point les futures technologies d'IA, dans les secteurs privés comme publics. L'humain doit rester au cœur du système, en particulier lorsqu'il s'agit de définir les modalités de traitement de données métier et les méthodes de gestion des réseaux. Des champs de recherche interdisciplinaires, à l'interface entre génie civil et les sciences du traitement de l'information, sont à inventer ou à développer.

Cette interdisciplinarité pose des difficultés propres et nécessite des incitations dédiées, afin de décloisonner les différents domaines. Il s'agit de faciliter d'une part les liens entre domaines de l'intelligence artificielle (étudier par exemple les liens entre approches symboliques et approches numériques, apprentissage et raisonnement, ou apprentissage et résolution de contraintes), et d'autre part ceux entre l'intelligence artificielle et d'autres disciplines (mathématiques, économie, philosophie, linguistique, droit, sciences humaines et sociales, physique, biologie, médecine...).

En 2017, le rapport FrancelA proposait déjà de cibler des cas d'usage pour faire avancer la recherche pluridisciplinaire : *« Un moteur important d'intégration est le fait de tenter de résoudre un problème particulier. Un enjeu potentiel dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir (PIA) pourrait être de favoriser cette recherche intégrative, en intégrant plusieurs grands programmes, avec le concours d'industriels amenant des besoins en applications innovantes (par le biais de challenges par exemple), afin de mobiliser une partie de la communauté sur ces collaborations entre domaines. »*

Dans le même rapport, il est recommandé de favoriser la prise de risque et de fluidifier et simplifier l'accès aux financements : *« Dans un domaine aussi concurrentiel et dynamique que l'intelligence artificielle, les lourdeurs administratives liées à l'évaluation et au financement de la recherche peuvent être un frein important. Un des enjeux cruciaux pour permettre d'accroître les performances dans le domaine serait de favoriser la prise de risque (il n'est pas possible, avec les financements actuels, de se lancer dans des recherches très prospectives, sans « livrables » et publications à court terme), ainsi que de fluidifier et de simplifier l'accès aux financements, pour qu'un chercheur avec une idée nouvelle n'ait pas à attendre typiquement un an (attendre le prochain appel à projet, puis le temps de l'évaluation) pour avoir les moyens de la mettre en œuvre. Cela semble nécessaire pour ne pas freiner l'émergence de nouveaux sujets disruptifs. »*

Se pose également le problème de souveraineté de la France face à la récupération des talents et des données par les grandes entreprises (GAFA par exemple). Les méthodologies et technologies développées en France au niveau académique, financées la plupart du temps par des fonds publics, se retrouvent bien souvent exploitées par ces entreprises avec une vision commerciale éloignée des enjeux et des préoccupations des gestionnaires de réseaux.

On pourra également citer ici les difficultés administratives qui entourent les contrats entre public et privé, notamment autour de la propriété intellectuelle, qui n'encouragent pas au développement de partenariats.

Une interdisciplinarité indispensable

En 2017, un rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques pointait déjà un besoin crucial d'interdisciplinarité au sein des domaines « classiques » de l'IA, sans compter les interactions nécessaires avec les autres champs scientifiques (biologie, physique...).

« En matière d'intelligence artificielle, l'interdisciplinarité est particulièrement requise. En effet, il s'agit à la fois d'un secteur de recherche en informatique et d'un champ de réflexion bien plus large, qui mobilise des connaissances provenant de nombreuses disciplines.

L'interdisciplinarité est donc indispensable en intelligence artificielle. Cette prise en compte du critère de l'interdisciplinarité est essentielle et souvent recherchée par les équipes de chercheurs mais, elle-même sous-domaine de l'informatique, l'intelligence artificielle demeure éclatée en une cinquantaine de sous-domaines de recherche identifiés, qui parfois s'ignorent les uns les autres ou ne coopèrent pas suffisamment.

Non seulement l'interdisciplinarité reste insuffisamment mise en œuvre mais l'intelligence artificielle elle-même souffre de ces découpages internes, qui tendent à cloisonner les recherches.

[...] les recherches en intelligence artificielle empruntent et devront, de plus en plus, emprunter à diverses autres disciplines et en agréger les démarches et les connaissances. Elles peuvent même aller jusqu'à s'inscrire dans d'autres espaces disciplinaires (mathématiques, physique, biologie...).

Issue des mathématiques, de la logique et de l'informatique, l'intelligence artificielle fait appel depuis des décennies, et de plus en plus, à la psychologie, à la linguistique, à la neurobiologie, à la neuropsychologie et au design. Dans la période plus récente, elle s'ancre encore davantage dans les sciences cognitives, et mobilise les outils de la génétique et des « Sciences de l'Homme et de la Société » (SHS), en particulier de la sociologie.

L'intelligence artificielle se nourrit de plus en plus des recherches issues des mathématiques, des statistiques, de la physique, de la biologie, en particulier pour ses méthodes de recherche et ses champs d'application. Elle doit également, et de plus en plus, s'alimenter auprès des SHS, plutôt sur les usages mais aussi sur les questionnements éthiques en matière de conception. »

[Quelques enjeux politiques et sociétaux

D'une manière générale, se pose aussi la question de l'acceptation des technologies liées à l'intelligence artificielle, que ce soit dans une sphère professionnelle ou dans les actes du quotidien. On peut citer quelques sujets ou sources de questionnement :

- le côté boîte noire de l'intelligence artificielle [voir également [illustration 2](#)] ;
- l'absence de consensus international sur certains éléments de décision d'une IA. Ainsi la réponse à la question « *quelle vie un véhicule autonome doit-il privilégier si un accident est inévitable ?* » n'est pas la même d'une culture à l'autre ;
- l'impact de l'utilisation de l'IA sur des changements de pratiques, d'organisation du travail... ;
- les liens éventuels ou possibles entre la programmation d'une intelligence artificielle (via l'apprentissage, ce qui est une bonne ou une mauvaise réponse) et un contexte politique ;
- les risques liés aux doutes possibles sur l'intégrité des résultats : les réseaux de neurones, par exemple, peuvent être « trompés » par du bruit ajouté volontairement à un signal ou une donnée d'entrée.

En lien avec ces questions d'acceptation, on observe actuellement une méfiance relative vis-à-vis de l'IA avec une tendance à préférer des modèles physiques. Il y a peut-être la crainte pour certains corps de métier de disparaître avec l'avènement de l'IA et il est nécessaire de trouver le bon niveau d'implémentation (l'expert physique qui a la connaissance métier interprète l'IA pour la prise de décision ?).

Enfin, on peut aussi s'interroger sur le risque de clivage possible dans la gestion des réseaux de transport (mais plus largement aussi dans la société) entre les pays développés profitant du déploiement de l'IA pour optimiser leur maintenance et ceux qui ne bénéficieront peut-être pas des mêmes avancées. Sur ce point, des structures internationales comme l'Association mondiale de la route peuvent être des vecteurs de diffusion très intéressants.

[L'intérêt des plateformes de données

La multiplication des centres de serveurs et des lieux d'hébergement de données suscite des controverses et peut impliquer des compromis difficiles (consommation d'énergie et de ressources *versus* amélioration de l'efficacité et services rendus à l'environnement par l'analyse des données).

Il pourrait être intéressant de s'intéresser aux gains potentiels de la mise en commun de données liées aux infrastructures routières dans un but d'optimisation des décisions de gestion. Tout en restant propriétaire de leurs données et seuls décideurs de leur mise à disposition large ou non, les gestionnaires de réseaux de transport pourraient voir un avantage certain au partage de certaines informations via une plateforme neutre d'échange.

Chaque nouveau gestionnaire et chaque nouveau projet intégrés à une telle plateforme permettraient d'aborder de nouvelles situations et environnements à l'origine de nouveaux jeux de données. Ces situations et ces données alimenteraient des programmes d'intelligence artificielle et entraîneraient des algorithmes, améliorant ainsi leur précision et leur capacité à apporter une réponse pertinente à un ensemble de situations.

La savoir-faire acquis par la plateforme, en constante amélioration, constituerait alors une compétence précieuse, attirant de nouveaux gestionnaires et de nouveaux projets et permettant d'élargir les champs d'utilisation et les services proposés.

Depuis plusieurs années, le Cerema travaille à la création d'une telle plateforme afin qu'un établissement public puisse proposer aux gestionnaires de réseaux de transport un service neutre adapté à chacun.

[Conclusion]

Nous sommes encore au début d'une ère de transformation rapide de notre société et de notre économie, liée à de nombreuses évolutions technologiques dans le domaine du numérique. Les développements récents de l'intelligence artificielle correspondent à la conjonction de plusieurs facteurs tels que l'augmentation de la puissance de calcul informatique, l'amélioration constante des algorithmes, ou encore la croissance exponentielle du volume et de la variété des données numériques.

De nombreuses applications de l'intelligence artificielle apparaissent dans notre quotidien, que ce soit au travers de la reconnaissance d'images, de la traduction automatique, de la génération automatique de plans ou encore du véhicule autonome. Ces solutions s'imposent de plus en plus dans le monde industriel et seront bientôt utilisées couramment.

Dans le domaine des réseaux routiers, on a pu voir au travers des quelques exemples repris dans cette étude que les champs d'applications sont très variés à toutes les étapes de la vie d'un projet : conception, construction, gestion et exploitation, ou encore maintenance, sans compter toutes les solutions qui existent ou se développent directement au service de l'utilisateur.

Les développements à venir vont devoir s'appuyer sur de nouveaux gisements de données. Les nouvelles technologies d'auscultation des chaussées permettent, par exemple, de générer des jumeaux numériques de la chaussée (ex. : LDTM®, Pavemetrics Inc.) grâce auxquels il est possible de détecter les dégradations de surface et les déformations des structures ; les données trafic ou liées à la sécurité routière sont au cœur de nombreuses applications et leur précision augmente en permanence ; de nouveaux capteurs en temps réel permettent le suivi en temps réel des structures des ouvrages d'art... Tous ces nouveaux gisements peuvent être exploités de façon innovante en les associant à des technologies d'intelligence artificielle pour répondre aux enjeux de la mobilité d'aujourd'hui.

Parmi les grands chantiers qui pourraient être prioritaires dans le cadre de programmes nationaux, on peut citer : le développement de la maintenance prédictive des réseaux routiers, que ce soit pour les chaussées ou pour les ouvrages d'art ; la gestion en temps réel du trafic routier à l'échelle d'un territoire à des fins de minimisation des congestions ; la détection d'incident ou de phénomènes anormaux associée à des outils d'aide à la décision voire à des décisions automatisées.

[Sources]

- Autodesk.** *Demystifying Generative Design For Architecture, Engineering, and Construction*, **9p.**
- Buchanan B. G.** *A (Very) Brief History of Artificial Intelligence.* *AI Magazine* 2015, 26(4), **p. 53-60.**
- Chaillou Stanislas.** *AI + Architecture.* *Harvard GSD thesis.* 2019, **95p.**
- Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA).** *Explainable Artificial Intelligence (XAI) - DARPA-BAA-16-53.* 2016, **52p.**
- European Commission.** *Artificial Intelligence : A European Perspective.* 2018, **140p.**
- Ezratty Olivier.** *Les usages de l'intelligence artificielle.* Edition 2019, **624p.**
- Fédération française du bâtiment.** *Intelligence artificielle et bâtiment.* 2019, **40p.**
- France Intelligence Artificielle.** *Rapport de synthèse – groupes de travail.* 2017, **350p.**
- France Stratégie.** *Intelligence artificielle et travail.* 2018, **90p.**
- Heudin Jean-Claude.** *Intelligence artificielle et intelligence humaine.* *Futuribles* 2019, n°428, **p. 93-105.**
- INRIA.** *Livre blanc Intelligence artificielle – les défis actuels et l'action d'Inria.* 2016, **82p.**
- McCulloch W. S., Pitts W.** *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity.* *Bulletin of Mathematical Biophysics.* 1943, vol. 5, n° 4, **p. 115-133.**
- McKinsey Global Institute.** *Big data, the next frontier for innovation, competition and productivity.* 2011, **156p.**
- Mc Kinsey Analytics.** *An Executive's Guide to AI.* 2018, **12p.**
- MINnD.** *Rapport de l'UC5-7 : Structuration des données BIM en phase Exploitation & Maintenance,* **90p.**
- Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.** *Pour une intelligence artificielle maîtrisée, utile et démystifiée.* 2017, **273p.**
- Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations économiques.** *Rapport Intelligence artificielle - État de l'art et perspectives pour la France.* 2018, **33p.**
- Pwc.** *Innovation et BTP : la transformation du secteur est en marche.* 2018, **63p.**

{ Remerciements }

Les rédacteurs souhaitent remercier le Comité d'orientation pour la recherche appliquée en génie civil, à l'initiative de la réalisation de ce document dont la rédaction a été confiée au Cerema et à Leonard, ainsi que le ministère de la Transition écologique pour son soutien.

Nous tenons à remercier plus particulièrement **Thibault Prevost** du service de la recherche et de l'innovation du ministère de la Transition écologique, **Marie-Thérèse Goux** de la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer et **Pierre Charbonnier**, directeur de recherche au Cerema, pour les nombreux échanges autour de ce rapport.

Nous souhaitons également remercier toutes les personnes qui ont contribué à rendre ce travail possible en répondant à nos diverses sollicitations :

- ... **Adel Abdallah** (École nationale supérieure de géologie)
- ... **Pierre Benning** (Bouygues construction)
- ... **Laurent Bouillaut** (Université Gustave Eiffel)
- ... **David Chupin** (Cerema)
- ... **Raphaël Goudard** (Leica Geosystems)
- ... **Pierre Hankach** (Université Gustave Eiffel)
- ... **Amine Ihamouten** (Cerema)
- ... **Grégory Labrousse** (Nam.r)
- ... **Cédric Le Bastard** (Cerema)
- ... **Nicolas Manzini** (Université Gustave Eiffel)
- ... **André Orcési** (Université Gustave Eiffel)
- ... **Claude Rospars** (Irex)
- ... **Franziska Schmidt** (Université Gustave Eiffel)
- ... **Jean-Michel Simonin** (Université Gustave Eiffel)
- ... **Pascal Tebibel** (Colas)

{ Annexe }

Activités du processus de maintenance courante des infrastructures

Les éléments ci-dessous sont issus du rapport UC5-7 Structuration des données BIM en phase Exploitation & Maintenance, réalisé dans le cadre du Projet National MINnD (Modélisation des Informations INteropérables pour les INfrastructures Durables).

Dans le cadre du présent document, et pour illustrer les activités qui pouvaient être prises en compte dans les phases de maintenance au sens large, nous avons sélectionné trois domaines, la maintenance courante des infrastructures, celle des équipements, la viabilité hivernale et le gros entretien.

{ Maintenance courante de l'infrastructure

Les objectifs de la maintenance courante des infrastructures sont de :

- maintenir l'infrastructure permettant de conserver l'autoroute sûre et utilisable et/ou réduire l'impact du processus de dégradation contribuant ainsi à préserver la valeur du patrimoine ;
- optimiser les périodes de renouvellement ;
- maximiser le niveau de service.

Les activités de maintenance courante retenues dans le cadre du projet MINnD sont les suivantes :

- nettoyage ;
 - ... des niches (portes, bypass, bardage),
 - ... gaines de ventilation,
 - ... piédroits des tunnels revêtus,
 - ... regards, caniveaux,
 - ... plateforme et des voies de péage,
 - ... bassins,
 - ... bermes et talus,
 - ... curage drains,
- traitement des zones polluées ;

- petites réparations ;
 - ... nids de poule,
 - ... fissures,
 - ... remplacement d'éléments isolés suite à défauts.
- maintenance des bâtiments / « *facility management* » (gares de péage, zones de maintenance...);
- maintenance des espaces verts ;
 - ... fauchage,
 - ... élagage des arbres,
 - ... traitement des zones « herbées »,
 - ... ramassage des papiers et autres détritrus.
- stockage des panneaux et Gestion stock cônes (quai à cônes) ;
- stockage du sel et autres produits pour viabilité hivernale ;
- gestion des travaux en régie ;
- coordination avec sous-concessionnaires.

[Maintenance courante des équipements

Les objectifs de la maintenance courante Equipements sont de :

- minimiser l'indisponibilité des équipements (maintenance préventive et premier niveau de maintenance corrective) ;
- optimiser les périodes de renouvellement (deuxième niveau de maintenance corrective).

Les activités de maintenance courante des équipements retenues dans le cadre du projet MINnD sont exprimées ci-dessous.

- Tests (« Find & fix »), avec six sous-activités :
 - ... inspections ;
 - › détecteurs de pollution (CO / opacité),
 - › autres détecteurs,
 - › luminaires,
 - › ventilateurs,
 - › trappes de désenfumage,
 - › système de lutte contre l'incendie (réservoir incendie/mise sous pression de la conduite/ essai des trappes de désenfumage).
 - ... changement des luminaires ;
 - ... nettoyage postes électriques / luminaires ;
 - ... entretien batteries ;
 - ... remplacement des consommables (lampes, fusibles...);
 - ... échanges des sous-ensembles en panne.
- Mesures vibrations sur machines tournantes.

- Maintenance :
 - ... sur les transformateurs : vérification des niveaux de liquide, nettoyage resserrage vérification des sécurités ;
 - ... sur les TGBT (nettoyage, resserrage, mesures...).
- Suivi des performances des équipements (KPI types : MTBF / MCBF, Indisponibilité).
- Suivi des performances de l'équipe de maintenance (ex. temps d'intervention, temps de réparation).
- Gestion des stocks :
 - ... suivi du niveau de pièces de rechange et consommables ;
 - ... achats de nouvelles pièces et consommables ;
 - ... suivi du cycle de réparation des sous-ensembles défectueux.
- Expression besoins maintenance (en projets neufs / GER).
- Rédaction doc sur équipements installés (fiches / modalités).
- Sécurisation/criticité réseaux (fibre / PAU / radio).

[Viabilité hivernale, sécurité

- Dépannage / secours aux usagers.
- Balisage sur interventions, basculement de chaussée, itinéraires de délestage.
- Patrouilles (inspections de routine) selon un circuit préétabli.
- Formation des patrouilleurs.
- Géolocalisation des patrouilleurs et agents sur le réseau.
- Gestion des animaux trouvés sur autoroute (vivants / morts).
- Viabilité hivernale :
 - ... salage ;
 - ... déneigement.
- Gestion du trafic :
 - ... collecte de données ;
 - ... traitement de données ;
 - ... information aux usagers, opérateurs et services d'urgence.
- Formation des opérateurs en salle de contrôle.
- Gestion des zones de maintenance / travaux (balisages).
- Surveillance saturation zones arrêt PL.
- Surveillance clôtures.
- Contrôle d'accès et surveillance / sécurité des bâtiments d'exploitation et zones sensibles.
- Expression besoins exploitation (en projets neufs / GER).
- Mise à disposition docs / plans.

[Gros entretien et renouvellement

- Programmation des inspections & auscultations périodiques.
- Réalisation et suivi des inspections périodiques (visuelles, détaillées).
- Suivi de l'instrumentation (grands ponts, tunnels, grands talus...).
- Développement du plan de GER : planification des travaux et budgets correspondants.
- Design des lots de travaux.
- Balisage lourd pour travaux sous circulation.
- Supervision des travaux.
- Remplacement / renouvellement des consommables électriques et éléments (Luminaires & lampes ; cellules de mesure des appareils ; batteries...), des équipements en fin de vie (ventilateurs ; éclairage ; signalisation...).
- Traitement périodique des boues.
- Renouvellement d'une chaussée :
 - ... couche de roulement ;
 - ... structure.
- Remplacement des éléments d'un pont :
 - ... joints ;
 - ... appareils d'appui ;
 - ... peinture ;
 - ... membrane d'étanchéité ;
 - ... câbles.
- Travaux lourds liés à l'assainissement et la géotechnique.
- Reporting régulier sur l'état du patrimoine (critères de performance minimum).
- Reporting annuel sur les travaux réalisés par rapport au Plan de GER.
- Expression contraintes trafic/entretien saisonnier pour plan GER.
- Refonte plan GER selon évènements non prévus (accidents, évènements climatiques...).

© 2020 - Cerema

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › **Graph'Imprim : 9-11 rue Sinclair 94000 Créteil**

Crédit photo de la couverture › © **Gerd Altmann - Pixabay**

Impression › **Jouve-Print - 733, rue Saint-Léonard - 53100 Mayenne - Tél. 02 43 11 09 00**

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Jouve-Print est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

ISBN : 978-2-37180-473-9

Gratuit

Éditions du Cerema

Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03
ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

Objet d'investissements parfois considérables de la part d'entreprises comme d'Etats, la recherche-développement en « **intelligence artificielle** » (IA) irrigue déjà de ses applications des secteurs importants de notre économie : la santé, la sécurité des biens et des personnes, les transports, les industries manufacturières, le commerce en ligne... De la maîtrise de ces savoirs et techniques en IA, tous secteurs confondus, dépendra probablement demain une part essentielle de notre compétitivité – et de notre souveraineté.

La filière des « **Travaux publics** » (TP) n'est qu'au début de sa révolution numérique. Si l'IA y occupe une place marginale, elle promet d'avoir, dans les prochaines décennies, des répercussions majeures sur les connaissances et pratiques du secteur, à toutes les étapes du cycle de vie des infrastructures.

C'est pour éclairer ces « **promesses** » que la présente étude a été conduite. Impulsée par le comité d'orientation pour la recherche appliquée en génie civil et soutenue par le service de la recherche et de l'innovation du ministère de la Transition écologique, cette étude apporte un début de réponse aux multiples questions que peuvent se poser les non-initiés à l'IA du secteur. **Que recouvre-t-elle ? Quel en est le potentiel, quelles en sont les limites ? Quelles sont les premières velléités de la filière TP en matière de recherche et d'innovation et intégrant ces approches ? Quelles pistes de développement en IA privilégier, à court et moyen termes, pour accompagner sa transition écologique et numérique ?**



Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.



together @ VINCI

Leonard est la plate-forme de prospective et d'innovation de VINCI. Essor de la mobilité, développement urbain, révolution numérique, transition écologique : nous vivons un moment unique par l'ampleur des transformations en cours. Ces transformations nous invitent à penser et à agir autrement pour inventer les services, les équipements et les infrastructures qui feront les territoires de demain.

Nous construisons des scénarios prospectifs sur l'évolution de l'ensemble de nos marchés et métiers de constructeurs et de concessionnaires d'infrastructures. Nous apportons à nos collaborateurs et partenaires les clés pour mieux appréhender les usages, les tendances et les innovations qui façonnent les territoires et transforment nos activités. Nous accélérons des projets innovants qui apportent des solutions durables aux métiers des villes et des territoires : construction, mobilités, énergies, immobilier.

Pour en savoir plus :
<https://leonard.vinci.com/twitter.com/weareleonard/>
[linkedin.com/company/weareleonard](https://leonard.vinci.com/linkedin.com/company/weareleonard/)

