

APPORT DE L'IMAGERIE SATELLITE ET DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LE SUIVI DES TERRASSEMENTS DU CANAL SEINE NORD-EUROPE

CONTRIBUTION OF SATELLITE IMAGE AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE MONITORING OF EARTHWORKS OF THE SEINE-NORD EUROPE CANAL

Franck ROUSSEAU¹, Véronique BERCHE¹, Emmanuel MENGUE¹, Karine MENTION¹, Alexis NANINCK¹, Jean-François GHEERAERT¹

¹ Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE), 60200 Compiègne, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente l'utilisation des données de l'imagerie satellitaire et de l'intelligence artificielle pour le suivi du chantier de construction du Canal Seine Nord-Europe (CSNE). Les résultats obtenus permettent de valoriser les solutions de surveillance et de contrôle mises en place comme étant des éléments concourant à la maîtrise des risques.

ABSTRACT – This paper presents the use of satellite imagery data and artificial intelligence for monitoring the building site of the Seine Nord-Europe Canal (CSNE). The obtained results make it possible to promote the monitoring and control solutions put in place as elements contributing to risk management.

1. Introduction

La construction d'une voie navigable ou canal est un grand projet d'aménagement du territoire alliant performance technique, respect de l'environnement et sécurité. C'est un projet atypique qui doit être conçu en tenant compte des enjeux territoriaux, de la transition écologique et énergétique. En particulier, la gestion des déblais et des flux de matériaux issus des travaux de terrassements est un défi environnemental et sociétal majeur, et la construction du Canal Seine-Nord Europe (CSNE) va générer des volumes de terrassements très importants, de l'ordre de 70 millions de m³, et nécessiter des approvisionnements en matériaux extérieurs (chaux, liants, granulats, aciers) de quelques millions de tonnes. A cet effet, la Société du Canal Seine Nord-Europe (SCSNE) dans le cadre de sa politique d'innovation et de prévention souhaite créer un observatoire de la gestion des déblais et des flux de matériaux, basé sur les données issues du « chantier connecté » et notamment de suivre l'avancement des travaux et de leurs impacts.

La technologie d'imagerie par satellite fournit de précieuses informations qui, une fois recoupées, retraitées, analysées, deviennent une réelle intelligence pour de nombreux acteurs (scientifiques, politiques, décideurs économiques, entrepreneurs, développeurs, etc.) (Perkins et Dodge, 2009). Ainsi, l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour surveiller l'impact et l'avancement des projets de génie civil devient de plus en plus pertinent dans l'industrie de la construction. Cette approche de haute technologie offre une vue complète du projet et offre le potentiel d'augmenter l'efficacité et la précision.

L'acquisition d'images satellites de Très Haute Résolution Spatiale (THRS) est en plein développement grâce à la miniaturisation des technologies embarquées, la réduction des coûts et l'arrivée des acteurs privés dans les missions de lancement spatial (Fournier, 2012). Il devient aujourd'hui possible de commander des images avec une résolution jusqu'à 30 cm.

Ce développement ouvre une nouvelle ère à de nombreuses applications : surveillance et observations du territoire, de la végétation, du littoral, des cours d'eau, des cultures, des atteintes à l'environnement, etc. (Wickramasinghe et al., 2018).

Dans ce contexte, le SCSNE a validé le principe du suivi de chantier CSNE en recourant à la programmation et à la demande d'images satellites de THRS via le service DINAMIS (Dispositif institutionnel national d'approvisionnement mutualisé en imagerie satellitaire regroupant le CNES, le CNRS, l'IGN, l'INRAE, l'IRD et le CIRAD), ainsi qu'au développement de l'exploitation des images collectées avec l'aide de l'intelligence artificielle (IA).

Le suivi régulier, complet et automatisé du chantier de construction du CSNE et de ses impacts sur le territoire par l'exploitation d'images satellites de THRS sera une innovation de rupture avec les suivis habituels des chantiers de construction. Cet article présente les potentialités qu'offrent l'IA et l'imagerie satellite pour la surveillance et le suivi de l'avancement des travaux de construction du CSNE et notamment les travaux de rescindement de l'Oise sur le secteur 1 à Montmacq, entre Noyon et Compiègne afin d'optimiser le passage du futur CSNE.

2. Le projet du Canal Seine Nord-Europe

2.1. Présentation du Canal Seine Nord-Europe

Le projet du CSNE est l'un des plus grands chantiers d'aménagement du territoire européen de ces dernières décennies. Le projet CSNE repose sur la création d'un canal à grand gabarit de 107 kilomètres de long et de 54 mètres de large, qui connectera le réseau français aux 20 000 km de voies européennes. Le CSNE pourra accueillir des péniches mesurant jusqu'à 185 mètres de long et 11,40 mètres de large. Il bénéficiera d'équipements de pointe. Il sera ainsi équipé de 6 écluses dont 2 avec une hauteur de chute de plus de 25 mètres, d'un Pont-Canal long de plus de 1,3 km, de 62 ponts routiers et ferroviaires permettant son franchissement en de nombreux points du parcours tout en garantissant une mobilité aisée au sein du territoire, et une retenue d'eau à hauteur d'Allaines qui permettra de subvenir aux besoins en eau du Canal. La Figure 1 donne un aperçu global du CSNE.

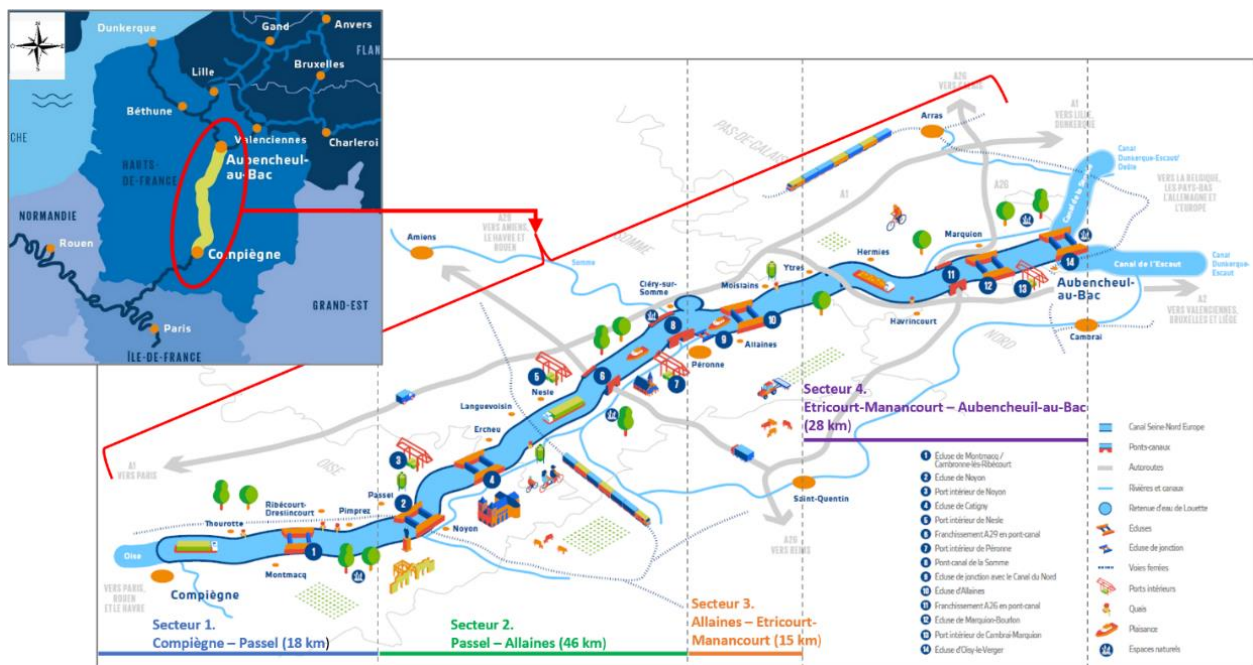


Figure 1. Carte générale du Canal Seine-Nord Europe.

Le creusement du CSNE sur les 107 km de voies navigables entre Compiègne et Aubencheuil-en-Bac va générer d'énormes mouvements de terres, avec 70 millions de m³

de terres excavées environ, des talus issus de déblais ou de remblais avec des profondeurs et/ou hauteurs allant jusqu'à 40 m. Les déblais et remblais sont ciblés par la mise en œuvre de systèmes de suivi et de contrôle par imagerie satellite et intelligence artificielle.

Le tracé du CSNE a été divisé en 6 secteurs techniques (Figure 1). Le Secteur 1, entre Compiègne et Passel est celui qui fait l'objet de cette communication.

2.2. Travaux réalisés et en cours sur le secteur 1

Le Secteur 1 est un réseau 18 km de voies navigables entre Compiègne et Passel (Figure 2). Les travaux de construction du Canal sur ce Secteur vont consister en différentes opérations : du sud au nord le lit de l'Oise Canalisée va être réaménagé entre Compiègne et Janville, puis une nouvelle section de Canal à grand Gabarit va être créée entre Choisy-au-bac et Ribécourt avec un rescindement de l'Oise et enfin, c'est le Canal Latéral à l'Oise qui sera élargi et approfondi entre Cambronne et Passel.

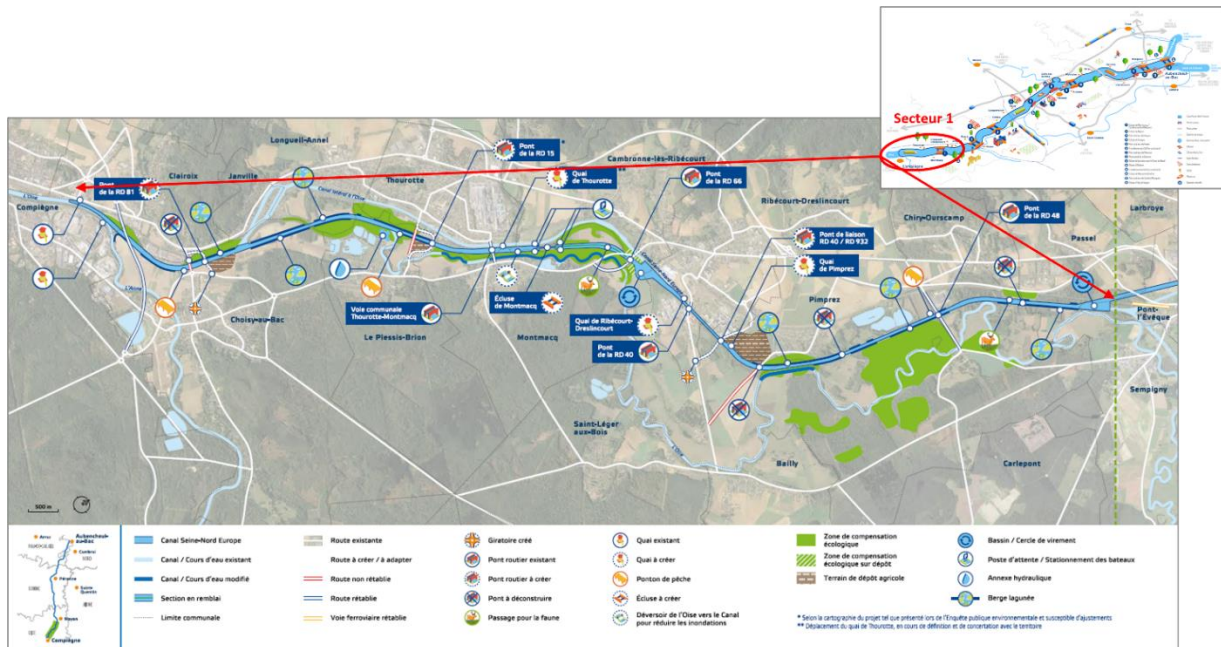


Figure 2. Carte générale du tracé du Canal Seine-Nord Europe - Secteur 1.

Depuis 2021, les travaux ont débuté sur le Secteur 1 pour préparer la construction du Canal. Ces travaux, déployés au nord de Compiègne, ont engendré des opérations de terrassement, creusement et de construction de divers ouvrages de génie civil. On note par exemple la construction des quais de Ribécourt et Pimprez sur le canal latéral à l'Oise et les travaux d'archéologie préventive et de libération des emprises autour de Clairoux, Choisy-au-bac, Thourotte et Montmacq s'achèvent. Les chantiers du rescindement de l'Oise et de la construction de quatre ponts en cours sur le secteur de Montmacq, Cambronne-lès-Ribécourt et Pimprez font l'objet d'un suivi par l'analyse IA d'images satellites.

3. Données satellitaires et méthodes

3.1. Acquisition d'images satellites

Les capteurs embarqués sur satellite enregistrent de l'information sur la surface terrestre, les océans et l'atmosphère dans différentes bandes spectrales pouvant aller, sur le spectre électromagnétique des longueurs d'onde, du domaine du visible jusqu'aux micro-ondes. La résolution spatiale, qui correspond à la taille du pixel, peut aller de quelques centimètres à

plusieurs kilomètres, et la fréquence de revisite au-dessus d'un même point peut aller de quinze minutes à plusieurs semaines (Plant et al., 2018). Pour la cartographie de la couverture et de l'occupation du sol dans les zones urbaines et périurbaines, il existe une série de capteurs satellitaires à haute résolution, comme QuickBird, Pléiades, SPOT, Sentinel-2 et Landsat. Ces capteurs permettent de faire des cartographies détaillées des états de surface.

A l'heure actuelle, il existe une constellation de satellites Airbus qui offre aux utilisateurs un accès unique à des capteurs optiques et radar multi-sources et multi-résolutions dont les images sont facilement accessibles dans le monde et sur le territoire français principalement. Avec un accès aux satellites Airbus Pléiades Neo, Pléiades, SPOT et Vision-1 ainsi qu'à la constellation radar (composée de TerraSAR-X, TanDEM-X, PAZ et NovaSAR), toute la chaîne de valeur de la géo-information est quasiment couverte. Le Tableau 1 présente la constellation de satellites Airbus ainsi que leurs caractéristiques

Tableau 1. constellation de satellites Airbus

Constellation Satellite/Capteur	Caractéristiques	Applications
Pléiades Neo	<ul style="list-style-type: none"> - 2 satellites identiques à THRS (Pléiades Neo 3 en avril et celui de Pléiades Neo 4) à 30 cm de résolution (mode panchromatique) et à 120 cm de résolution (mode multispectral) - Revisite quotidienne n'importe où - Capacité d'acquisition simultanée de 1 000 000 km²/jour - Précision de localisation : 3,5 m CE90 	<ul style="list-style-type: none"> - Défense : renseignement géospatial, planification mission - Surveillance maritime - Suivi agriculture - Classification de l'occupation du sol urbaine ; détection d'éléments urbains, cartographie de la végétation en ville, etc.
Pléiades	<ul style="list-style-type: none"> - Satellites jumeaux multispectraux à THRS (50 cm) - Revisite quotidienne n'importe où - Agilité avancée comprenant 5 scénarios de collecte (surveillance de cibles, de bandes, tri-stéréo, de corridors et persistante) - Capacité d'acquisition simultanée de 700 000 km²/jour 	<ul style="list-style-type: none"> - Défense : renseignement géospatial, planification mission - Administration foncière : urbanisme, logement, transports, cartographie, utilisation des sols, surveillance infrastructures - Occupation du sol - Suivi agriculture, forêt et environnement, etc.
SPOT (5, 6, 7)	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution d'images de 1,5 m, idéal pour les applications exigeantes à l'échelle nationale (la cartographie topographique) - Capacité stéréo et tri-stéréo - Revisite quotidienne n'importe où - Traçage stéréo 2D et 3D, précision géométrique jusqu'à 6 à 10 m CE90 - Capacité d'acquisition simultanée de 3 000 000 km²/jour et par satellite 	<ul style="list-style-type: none"> - Suivi agriculture, forêt et environnement, etc. - Surveillance maritime - Cartographie nationale
Vision-1	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution d'images à 1,5 m - Bandes multispectrales de 3,5 m (NIR, RVB) - Agilité avancée et capacité disponible - Revisite à 8 jours, partout selon l'altitude et les satellites partenaires - Capacité d'acquisition simultanée de 20 000 km²/jour 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptées aux applications de défense, de sécurité, maritimes et agricoles. - Vision-1 est en orbite avec NovaSAR, ouvrant des opportunités significatives pour les applications Opti-SAR.
Constellation radar (TerraSAR-X/TanDEM-X, PAZ et NovaSAR)	<ul style="list-style-type: none"> - Résolution spatiale flexible (de 25 cm à 40 m) et une couverture de zone (empreinte) - Grande agilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Défense : renseignement géospatial, planification mission - Surveillance maritime - Analyse interférométrique (InSAR) du mouvement de la

	<ul style="list-style-type: none"> - Cycle de répétition interférométrique de 4/7 jours, temps de reprise moyen global < 24 heures - Revisite Quotidienne pour les latitudes incontournables - Capacité d'acquisition simultanée jusqu'à 5400000 km²/jour (en mode large ScanSAR) 	<p>surface du sol en soutien aux entreprises OGME et de génie civil</p> <ul style="list-style-type: none"> - Occupation du sol - etc.
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Les capteurs embarqués sur satellite ne changeront jamais au cours de leur durée de vie, ce qui élimine un grand nombre de variables. De plus, les satellites fonctionnent à une altitude fixe et regardent généralement vers le sol, ce qui signifie que la distance d'échantillonnage au sol (GSD), qui est la taille d'un pixel au sol, changera rarement également. Les satellites géostationnaires surveillent même une zone fixe de la planète, ce qui signifie que la position et l'orientation ne changent jamais dans ce cas. Les satellites fonctionnant à haute altitude, les effets de perspective sont également réduits. Ces simplifications permettent à la conception et à la formation d'algorithmes sur les données satellitaires d'être en fait un peu plus faciles à certains égards que pour des applications plus générales. La Figure 3 donne un aperçu de l'acquisition d'une image à l'aide d'un capteur embarqué

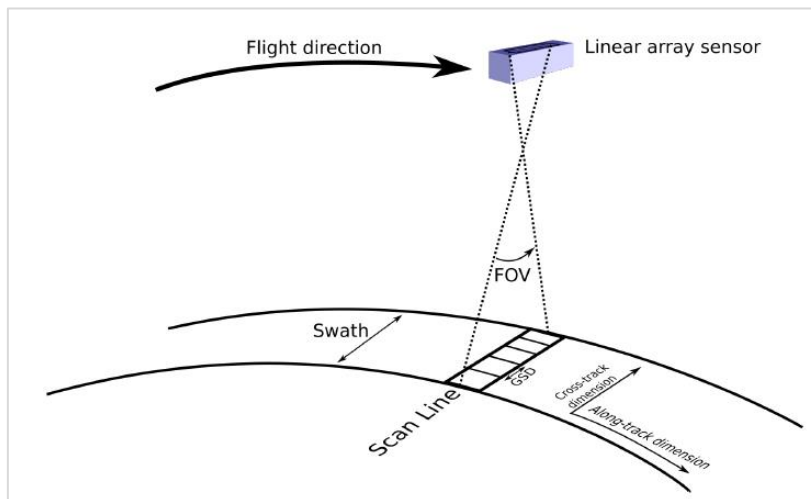


Figure 3. Acquisition d'une image à l'aide d'un capteur embarqué (Bahl, 2022)

Les images satellitaires de THRS utilisées dans le cadre de cette expérimentation proviennent des capteurs Pléiades d'Airbus Defence and Space (1 pixel < 1 m²) à la demande, elles sont ensuite orthorectifiées par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) pour la réalisation d'une cartographie de précision et intelligence approfondie. Elles sont acquises via le portail DINAMIS pour l'accès aux données spatiales, développé par les CNRS, CNES, IFREMER, IGN, IRD, INRAE, Météo France pour faciliter l'accès et le traitement de données pour observer, comprendre et prévoir l'évolution du système Terre et soutenu par le Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation.

Les images satellitaires de THRS reçues (Figure 4) font apparaître les différentes évolutions des travaux à différents temps de prise de vue sur le secteur 1. Sur l'image prise le 29/07/2022 (Figure 4a), aucune activité n'est observée sur le site des travaux (chantiers du rescindement de l'Oise et de la construction de quatre ponts). Huit mois après, l'image satellite prise le 02/03/2023 (Figure 4b) montre que le vaste chantier de rescindement de l'Oise prend forme, au milieu des terres agricoles et de vastes étendues arborées. Comme le présente cette image satellite, les premiers terrassements de la future Oise jusqu'au

niveau de la nappe sont progressivement apparus, on peut également observer la mise en place de stockage provisoire d'enrochement, le stockage de terres végétales et des terres excavées en ressuyage. L'image du 06/06/2023 (Figure 4c) quant à elle, fait apparaître clairement la déviation provisoire de l'Oise nécessitant de creuser sous la nappe.



Figure 4. Images satellites issues du dispositif DINAMIS : (a) image sans activités, (b) Images chantier de rescindement et (c) Images suite chantier de rescindement

Les travaux sont aujourd'hui loin d'être terminés ; le rescindement est en effet complété par la création de deux ouvrages hydrauliques, dont un déversoir (ou évacuateur de crue) entre le nouveau bras de l'Oise et le futur Canal. L'opération s'accompagne en outre de la construction de plusieurs ouvrages d'art, dont trois ponts.

Grâce à la superposition des images satellites et du plan des emprises du chantier, on peut constater qu'aucun dépassement n'est avéré (Figure 5). Les emprises déclarées lors du dépôt du dossier d'autorisation environnementale sont respectées et les compensations correspondent aux estimations.

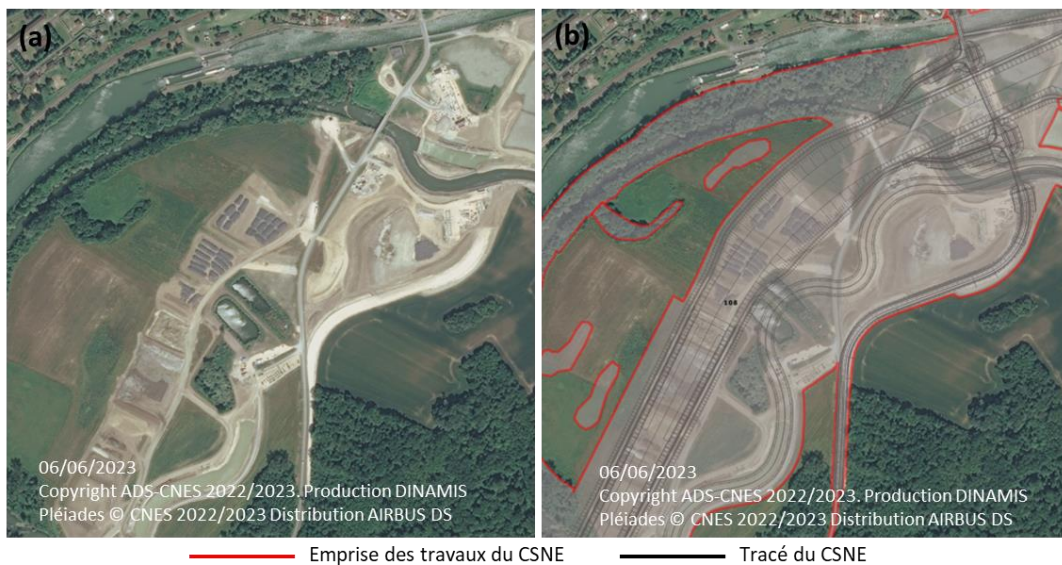


Figure 5. Comparaison : (a) Image sans emprises du chantier et (b) Image avec emprises

3.2. Technique d'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est une discipline scientifique recherchant des méthodes de solution de problèmes à forte complexité logique ou algorithmique. Comprendre les dernières avancées dans ce domaine revient à étudier deux concepts très populaires tels

que l'apprentissage automatique ou Machine Learning (ML) et l'apprentissage profond ou Deep Learning (DL). Ainsi, l'utilisation de l'analyse d'images basée sur l'IA pour la technologie d'imagerie par satellite est en train de révolutionner la façon de surveiller et analyser la surface de la terre.

Pour cet article, nous nous intéressons uniquement au traitement des images par Deep Learning. Le DL est un domaine de recherche du ML (Figure 6), basé sur l'idée des réseaux de neurones artificiels et taillé pour gérer de larges quantités de données en ajoutant des couches au réseau.

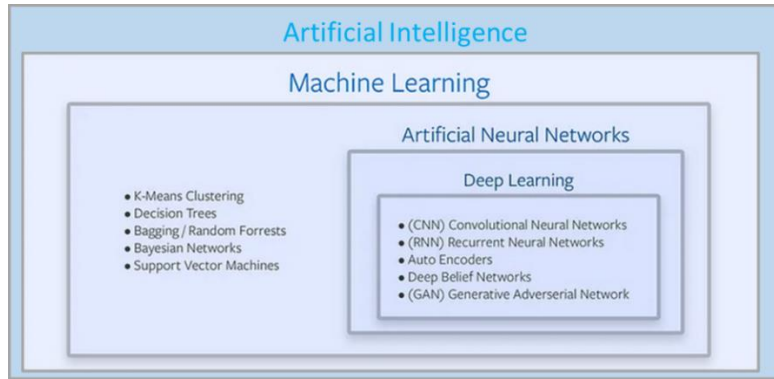


Figure 6. Relations entre IA, ML et DL

D'une manière simple, c'est le ML à l'aide de réseaux de neurones profonds. D'après Lin et al. (2014) ; la classification d'images, la localisation d'objets, la segmentation sémantique et la segmentation d'instance sont les quatre formes d'utilisation du DL qui existent pour caractériser et traiter les images (Figure 7).

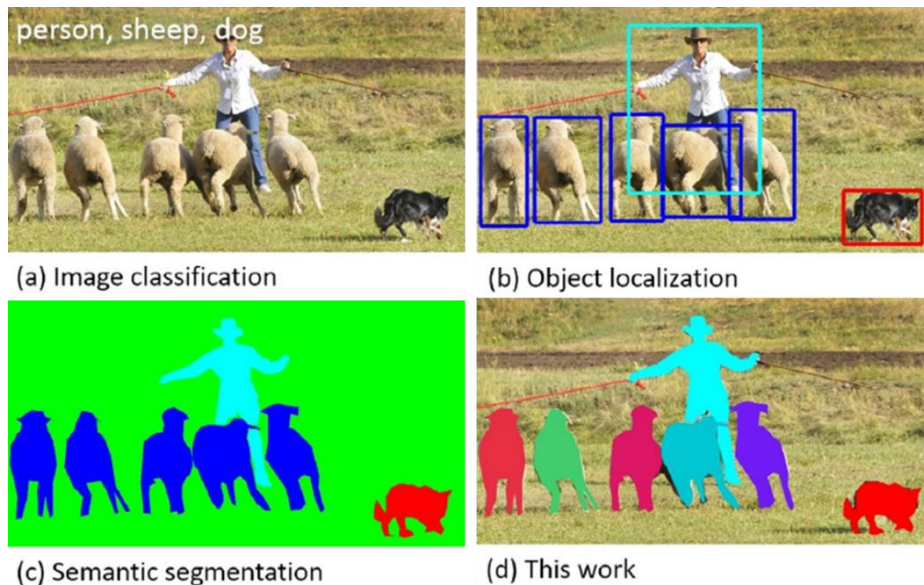


Figure 7 : Quatre façons d'utiliser le DL : (a) Classification d'images, (b) Localisation d'objets, (c) Segmentation sémantique et (d) Segmentation d'instance (Lin et al.,2014).

Selon la forme d'utilisation souhaitée, différents algorithmes de DL, ou plutôt différentes architectures de réseaux de neurones profonds sont disponibles. Cependant, les réseaux de neurones convolutifs (CNNs : Convolutional Neural Networks) sont à ce jour les modèles les plus performants pour l'analyse et la caractérisation des images. Inspirés de la vision humaine, les CNNs permettent la prise en compte des (auto) corrélations spatiales (contexte, voisinages structures et textures). L'archichantre des CNNs se présente en

général sous la forme illustrée sur la Figure 8 ci-dessous. Une architecture atypique d'un réseau convolutif se compose de 4 types de couches différentes à savoir : la couche de convolution, la couche de correction ReLU, la couche de pooling et la couche entièrement connectée.

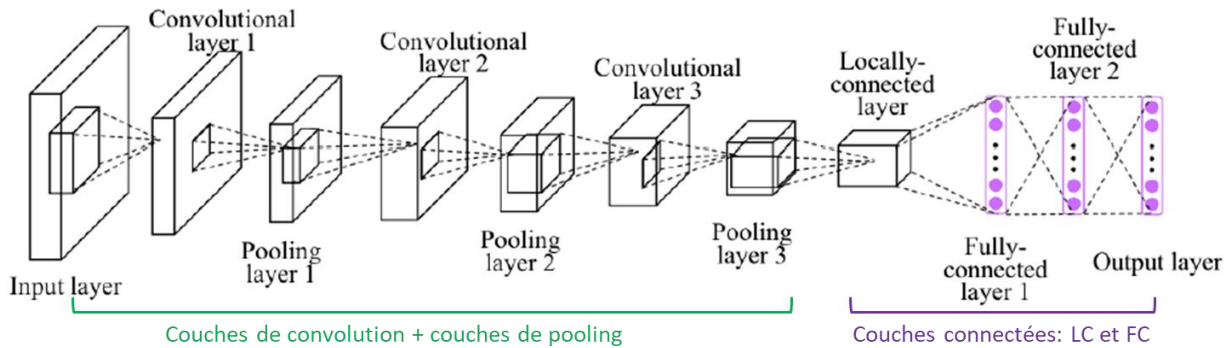


Figure 8. Architecture d'un réseau de convolution neuronale (Dahmane, 2020)

La couche de convolution consiste à appliquer un filtre de convolution à l'image pour détecter des caractéristiques de l'image. Ainsi, une image passe à travers une succession de filtres, ou noyaux de convolution, créant de nouvelles images appelées cartes de convolutions. Certains filtres intermédiaires réduisent la résolution de l'image par une opération de maximum local. Au final, les cartes de convolutions sont mises à plat et concaténées en un vecteur de caractéristiques (Figure 9a).

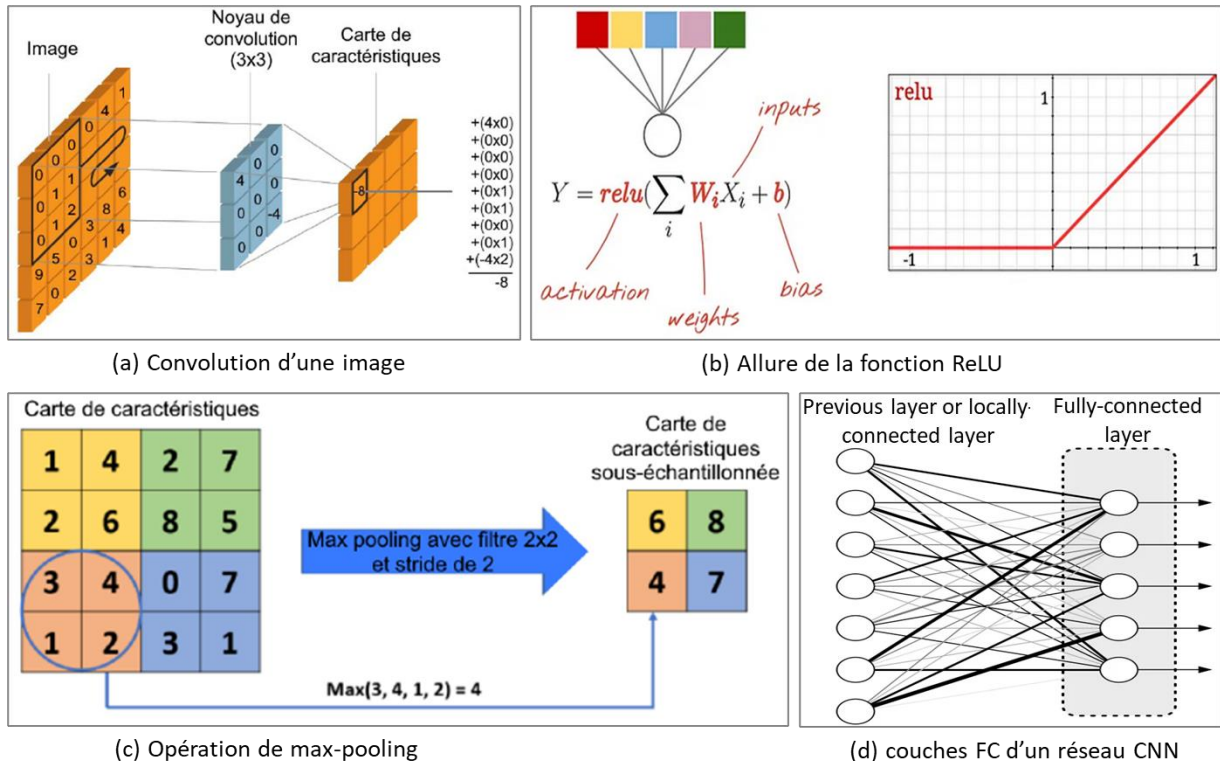


Figure 9. Couches constitutives d'une architecture de réseaux de neurones convolutifs : (a) Couche de convolution, (b) Couche de correction ReLU, (c) Couche Pooling et (d) Couche entièrement connectée

Pour la couche de correction ReLU, l'on fait passer les cartes de convolution à travers une couche d'activation non linéaire telle que Rectified Linear Unit (ReLU), qui consiste à remplacer les nombres négatifs des images filtrées par des zéros (Figure 8b).

La couche d'échantillonnage (Pooling) consiste à réduire progressivement la taille de l'image en ne gardant que les informations les plus importantes, par exemple pour chaque groupe de 4 pixels, le pixel ayant la valeur maximale (Max Pooling, le plus populaire) ou la moyenne des pixels (AVG pooling). Avec la couche pooling, la quantité de paramètres et de calcul dans le réseau sont réduits, et cela va permettre de contrôler le sur-apprentissage (Figure 9c). Après avoir extrait les caractéristiques des entrées, on attache à la fin du réseau un perceptron ou bien un MLP (Multi Layer perceptron) communément appelé Fully connected.

La couche entièrement connectée (FC : Fully connected) reçoit un vecteur en entrée contenant les pixels aplatis de toutes les images filtrées, corrigées et réduites par le pooling (Figure 9d). Dans le cas d'une classification d'images, le traitement d'images à travers l'extraction des caractéristiques et la segmentation en séquence d'entrée des images RGB se fait automatiquement à travers les couches de convolution et de pooling de nos modèles. L'application de la fonction softmax aux sorties de la couche fully connection, nous donne la probabilité d'une classe ainsi que l'estimation des quantités (surface concernée, volume, altitude, etc.).

Plusieurs architectures de réseaux de neurones convolutifs ont été testés à savoir : LeNet, ResNet et DenseNet (Dahmane, 2020). Dans le cadre de ce projet, le traitement de l'imagerie satellite par IA est réalisé en collaboration avec DISAITEK, entreprise qui développe des solutions combinant observation de la terre et IA

4. Résultats obtenus et discussion

Les résultats obtenus concernent l'usage de l'intelligence artificielle (IA), notamment le Deep Learning (DL) pour l'exploitation des images satellites reçues. Comme on peut le constater sur la Figure 10, les mouvements de terres (apport et/ou décaissement) issus des travaux de terrassement, ainsi que d'autres activités sur le chantier sont facilement décelables par un code couleur. On observe à partir du code couleur, les modifications de hauteur de terrain et donc des stocks provisoires sur chantier. En rouge, les stocks ont augmenté (comme les enrochements ou les dépôts des terres en cours de ressuyage). En bleu, on distingue les zones ayant été décapées. Sur une partie de la future Oise, des stocks d'enrochements sont utilisés. On peut également noter la présence d'artefacts sur la chaussée.

Les travaux de rétablissements routiers sont également suivis, notamment les phases d'apport et/ou de décapage des matériaux (Figure 11).

La Figure 12 montre qu'à partir du traitement des images satellites par l'IA, le suivi et la gestion des flux de matériaux issus des travaux de terrassements sont possibles. On observe à cet effet que pour un stockage de matériaux quelconque (enrochement, cailloux, terre, etc.) mis en œuvre sur chaque zone de chantier, on peut obtenir automatiquement sa surface d'emprise au sol, son volume et l'altitude.

Par rapport aux suivis habituels des chantiers de construction, notamment les levés géométriques classiques, d'autres gains sont attendus des données issues de l'utilisation de l'IA et l'imagerie satellite pour le pilotage à venir du chantier tels que :

- Le suivi des mesures compensatoires tels que le suivi de la reconstitution de la biodiversité, le déboisement, les cultures, la végétation, le dépassement d'emprises, etc.
- Le contrôle et la maîtrise de la qualité du chantier en cours ou en amont à partir des plans de récolement et des rendus de fin de travaux.
- Le suivi des dépassements de seuil (hauteurs des remblais par exemple), respect des règles et des emprises, dépôts sauvages, etc.
- Mise en place d'un observatoire de la gestion des déblais et des flux de matériaux.
- Suivi de l'avancement des travaux dans le Système d'Information Géographique (SIG).

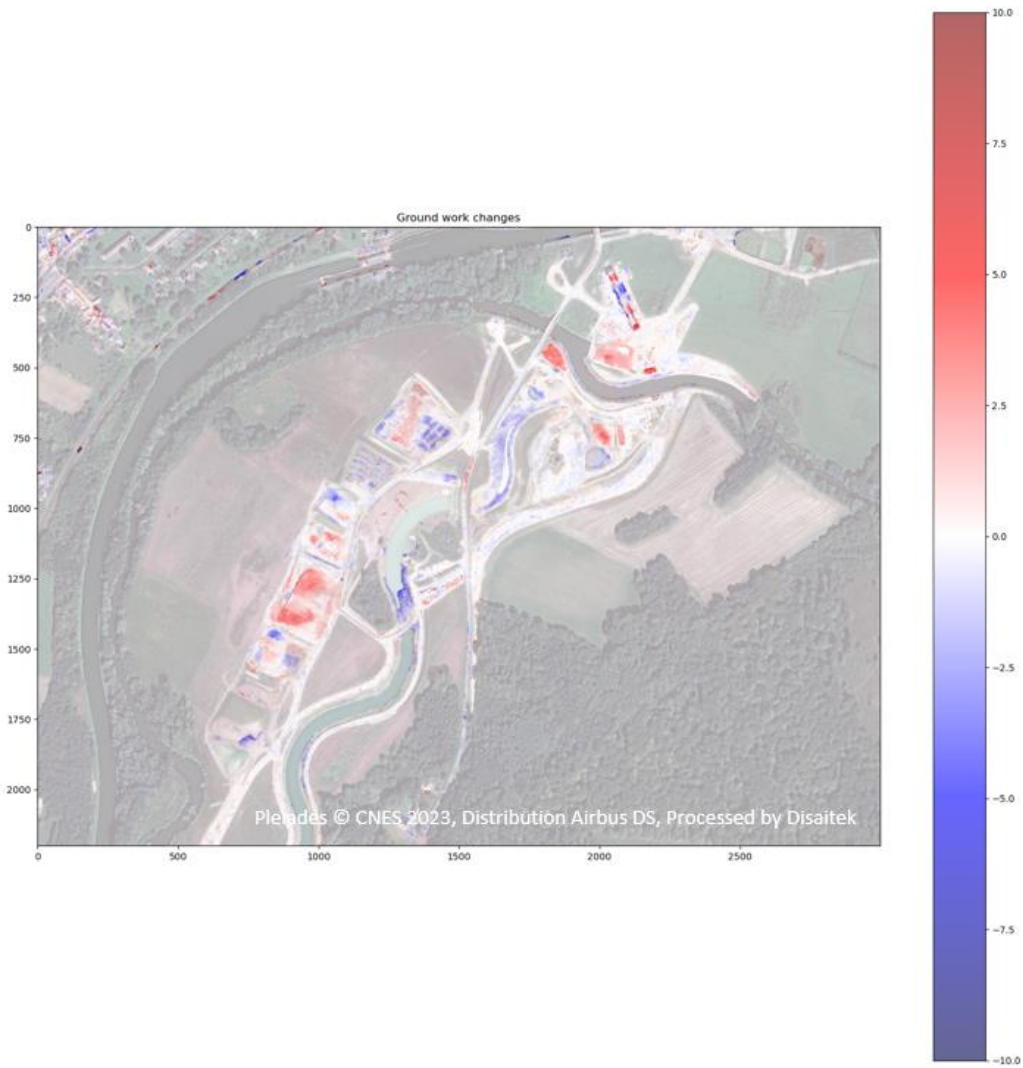


Figure 10. Suivi de l'avancement des travaux à partir de l'IA et l'imagerie satellite

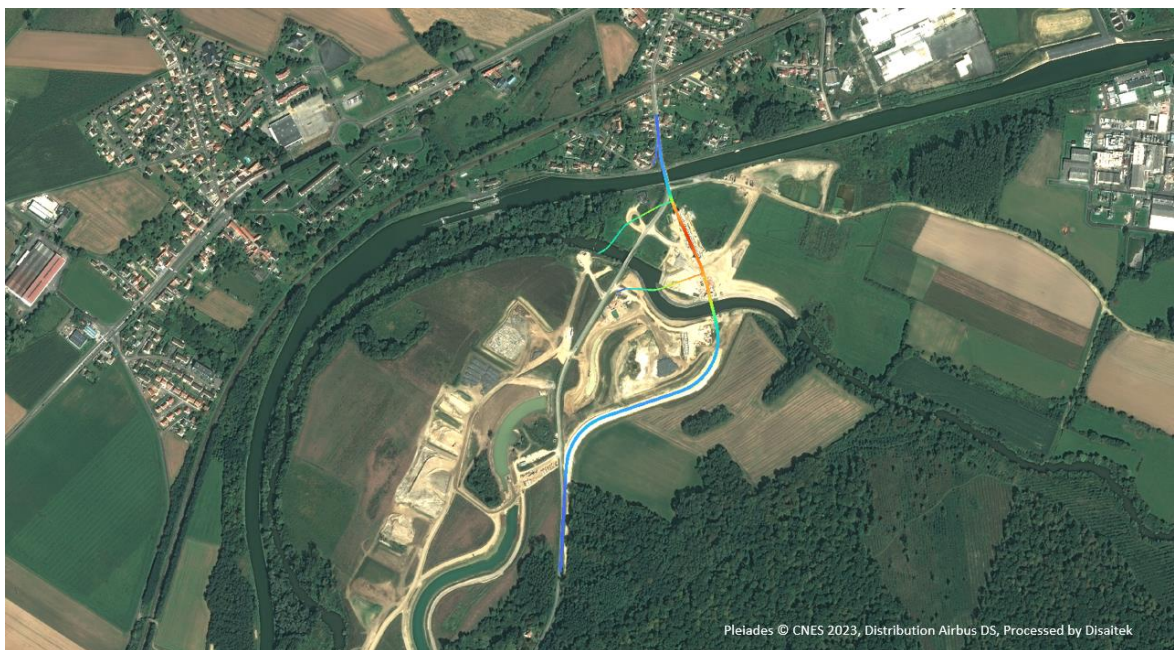


Figure 11. Suivi du rétablissement routier



Figure 12. Calcul automatique des quantités de matériaux mis en œuvre sur le chantier

5. Conclusions

L'utilisation de l'IA et l'imagerie satellite pour le suivi des travaux de construction du CSNE et notamment les travaux de rescindement de l'Oise est déterminante en termes d'efficacité et de rendu. Le traitement de l'imagerie satellite par intelligence artificielle (IA) permet par exemple de calculer de manière automatique la totalité des flux de matériaux (surface, volumes, altitude) collectées et issus des travaux de terrassements sur l'ensemble du Secteur étudié. Les performances atteintes en termes de fiabilité des traitements confirment qu'il s'agit bien là d'une innovation de rupture avec les suivis habituels des chantiers de construction. Les résultats obtenus à partir de ces premières expérimentations concourent à la création d'un observatoire de la gestion des déblais et des flux de matériaux, basé sur les données issues du « chantier connecté » et notamment de suivre l'avancement des travaux et de leurs impacts.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les collaborateurs du SCSNE qui ont participé au projet, notamment le Directoire, la Direction des Terrassements et Innovation du SCSNE, La Direction Géotechnique et Sécurité des Ouvrages Hydrauliques, la Direction QHSE et la Direction du Secteur 1

7. Références bibliographiques

- Perkins, C., & Dodge, M. (2009). Satellite imagery and the spectacle of secret spaces. *Geoforum*, 40(4), 546-560.
- Fournier, M. (2012). L'apport de l'imagerie satellitale à la surveillance maritime. Contribution géographique et géopolitique (Doctoral dissertation, Université Paul Valéry-Montpellier III).
- Wickramasinghe, D. C., Vu, T. T., & Maul, T. (2018). Satellite remote-sensing monitoring of a railway construction project. *International Journal of Remote Sensing*, 39(6), 1754-1769.
- Plant, R., Maurel, P., Barbe, É., & Brennan, J. (2018). Les terres agricoles face à l'urbanisation: De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information?. *Quae*.
- Bahl, G. (2022). Architectures deep learning pour l'analyse d'images satellite embarquée (Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur).
- Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft coco: Common objects in context. In *Computer Vision—ECCV 2014*:

13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13 (pp. 740-755). Springer International Publishing

Dahmane, K. (2020). Analyse d'images par méthode de Deep Learning appliquée au contexte routier en conditions météorologiques dégradées (Doctoral dissertation, Université Clermont Auvergne [2017-2020])