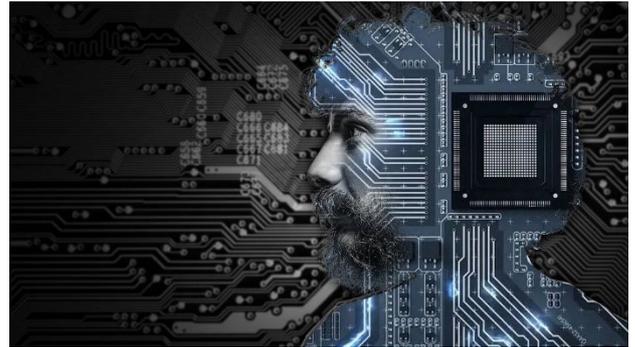


Application du principe de subsidiarité à l'intelligence artificielle ou Edge AI (Artificial Intelligence at the network's Edge)

Par le Capitaine Hugues LAMY, stagiaire à l'EMSST,
en formation Mastère Spécialisé Ingénierie des Systèmes Informatiques Ouverts
à CentraleSupélec

Avec la multiplication des capteurs vidéo déployés sur le terrain, la chimère de la vision omnisciente et globale de la situation tactique en temps réel semble accessible. Cependant, le traitement centralisé de l'ensemble de ces flux dépasse aujourd'hui les capacités tant des moyens de transmission que des moyens de calcul déployés dans les centres des opérations proches des lignes de contact ; le simple renforcement des moyens déployés ne permet pas de répondre aux contraintes d'autonomie, de discrétion et de légèreté nécessaires pour conserver l'indispensable mobilité de la force.



L'analyse des images reste ainsi une science appliquée au niveau opératif ou stratégique, ne délivrant des conclusions tactiques qu'*a posteriori*. De solides plus-values pourraient pourtant être tirées du traitement rapide de ces images, capturées au plus près de l'action, issues de caméras pouvant parfois acquérir dans leur champ de vision des détails capables de révéler un mouvement de l'adversaire ou un changement dans l'environnement.

Une solution pourrait résider dans l'application du principe de subsidiarité au traitement de ces images, en intégrant de l'intelligence artificielle dans les engins de combat, au plus près des capteurs, puis en en répartissant tout au long des échelons de commandement. Cette approche répond aux difficultés de transmission, distribue les capacités de calculs, et offre un accès naturel, pour chaque niveau opérationnel, aux informations issues de ces traitements.

L'intelligence artificielle au contact (*Edge AI*)¹ permettrait en effet d'extraire directement des sources vidéo les informations utiles et capables d'élargir la vision tactique du chef au contact. Elle est une évolution naturelle de technologies aujourd'hui maîtrisées, avec des gains et limitations qui devront être pris en compte dès la planification et intégrés dans la formation des cadres tactiques et techniques.

¹ L'*Edge AI* (*Artificial Intelligence at the network's Edge*) désigne le déport des calculs d'intelligence artificielle au plus proche des capteurs, en opposition avec les méthodes plus classiques de centralisation de ceux-ci sur des serveurs de grande puissance. Ses objectifs sont d'accélérer le traitement des données issues des capteurs et de limiter l'information transférée sur l'Internet des objets.

- **L'IA au service de l'aide à la décision au plus près du contact**

Avec le développement des circuits électroniques d'extrémité, à la puissance de calcul toujours plus grande et à la consommation électrique de plus en plus maîtrisée, il devient possible de mettre en œuvre des algorithmes dits d'intelligence artificielle au plus proche des dispositifs de capture vidéo².

Si les techniques actuelles ne permettent pas, en temps contraint, d'extraire l'ensemble des informations d'une image ou d'un flux vidéo, elles peuvent en tirer des données tactiques précises, pour peu que l'algorithme ait précédemment suivi une phase d'apprentissage. Il est alors possible de déterminer la présence d'une arme, d'un combattant, d'un véhicule ou d'une cible à haute valeur ajoutée. Au contact, un algorithme bien entraîné à la reconnaissance de véhicule peut ainsi extraire d'une image le modèle probable d'un blindé inconnu. Dans un convoi, une caméra augmentée d'un algorithme optimisé au repérage de drone peut permettre de détecter puis localiser celui-ci rapidement, en complément de l'emploi de radars certes efficaces mais coûteux et difficiles d'emploi et qui ne peuvent couvrir l'ensemble de l'aire d'opération. En première plus-value remarquable, les données ainsi extraites sont légères. Elles peuvent être facilement stockées, transportées et centralisées sur les réseaux tactiques actuels, pour non seulement répondre aux besoins immédiats de la mission en cours mais aussi compléter la vision opérative du chef.

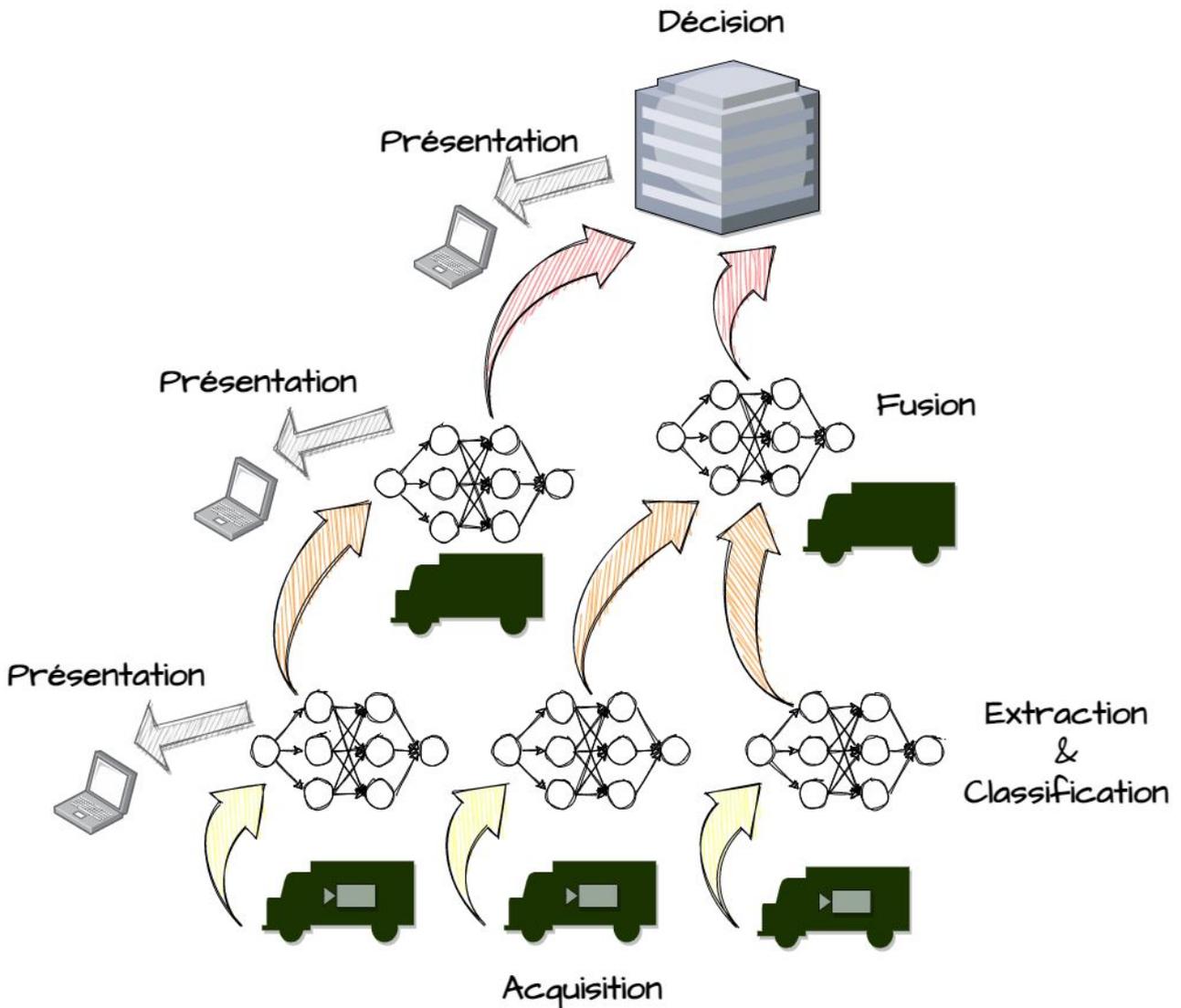
Une autre plus-value émerge ensuite : ces données ne sont déjà plus des données brutes, mais une première brique d'information. Cette information peut en elle-même avoir un réel intérêt aux niveaux de commandement proches du contact. Un chef de bord, lors d'une traversée de village, pourra ainsi obtenir une estimation du nombre de personnes présentes dans le champ de vision de chaque caméra montée sur son véhicule, et par extension, du nombre de personnes autour du véhicule. Un algorithme peut aussi indiquer si celles-ci sont visiblement armées ou si la veille, sur la même position, il y avait plus ou moins de personnes. Cette plus-value sera multipliée si ces informations élémentaires sont renforcées de l'ensemble des briques d'information extraites de chaque capteur vidéo, autrement dit, si on réalise la fusion des capteurs. La concaténation de l'ensemble des données au niveau du convoi donnera ainsi à son chef la connaissance d'un rassemblement ou de l'éloignement de la foule autour d'un véhicule en particulier, pouvant par exemple laisser penser à une action hostile. Appliquer cette fusion puis la distribution de l'information à chaque niveau de commandement augmente de façon évidente la vision tactique à court terme de l'ensemble de la force. Le principe se rapproche en cela de l'organisation du renseignement en opération, chaque échelon ayant ses unités dédiées, de la patrouille de reconnaissance du SGTIA jusqu'au commandement du renseignement à la disposition du PCIAT³, l'information étant analysée, filtrée et partagée à chaque échelon de la chaîne technique du renseignement.

Cette intelligence artificielle au contact ne se substitue évidemment pas à l'intelligence de situation du chef au contact, ce n'est qu'un enrichissement de la connaissance de son environnement. Mais elle permet d'assurer que les images des caméras embarquées sont

² S. Greengard, 2020, *AI on Edge* ; Cabinet Deloitte, 2020, *Bringing AI to device: Edge AI chips come into their own*.

³ SGTIA, sous-groupement tactique interarmes (niveau unité élémentaire) ; PCIAT : poste de commandement interarmées de théâtre.

en permanence exploitées, sans requérir de ressources humaines supplémentaires et à moindre coût, en extrayant des informations à partir de données que les moyens traditionnels savent difficilement valoriser en temps réel.



- **Déterminer les limites pour garantir les gains tactiques**

Il peut sembler irréaliste d'imaginer pouvoir traiter efficacement une image, *a fortiori* un flux vidéo, avec des moyens d'extrémité. La puissance des calculateurs embarqués reste en effet limitée malgré l'augmentation significative et constante des performances.

En réalité, s'il est vrai que l'apprentissage machine demande des capacités de calculs importantes, cela s'applique essentiellement à la phase d'apprentissage, phase d'optimisation « par répétition » des algorithmes. Le parallèle peut facilement être fait avec le soldat : si celui-ci doit passer un temps important à l'entraînement, à répéter ses

gestes jusqu'à ce qu'ils deviennent quasi-automatiques, la dextérité qu'il acquiert transforme chacune de ses actions. Elles deviennent alors des réflexes sur le terrain et sont exécutés en quelques fractions de seconde. Un algorithme de classification, après une longue phase d'apprentissage, devient ainsi capable de déterminer très rapidement, efficacement et économiquement si un élément particulier est présent sur une image. Il peut ainsi facilement être opéré sur des circuits économiques, peu énergivores et légers, de l'ordre de quelques dizaines d'euros, de quelques watts ou de quelques grammes. Il devient alors possible de contourner l'impératif du transfert du flux vidéo vers les échelons supérieurs : seule l'information signifiante est envoyée, enrichie de l'ensemble des métadonnées associées, telles que l'heure, la position géographique ou l'unité ayant capturé ces données. Les réseaux de transmission de données (TD) des terminaux radios tactiques savent transmettre ce type d'information de façon particulièrement efficace.

Ces technologies sont efficaces mais pas sans limites ; pour les appréhender et les déterminer, il est nécessaire d'en comprendre les grands principes de fonctionnement. Les algorithmes d'apprentissage machine et d'apprentissage profond⁴ sont des filtres, qui en entrée prennent une image, un document ou un signal numérisé et offrent en sortie l'information spécifique recherchée, telle que la localisation d'un élément dans une image. La structure de ce filtre est définie à sa création, qui peut être un arbre de décision, un algorithme de classement ou un ensemble simple de filtres élémentaires plus communément connu sous le nom de réseau de neurone. Si ces neurones sont organisés en plusieurs couches, d'une dizaine à plusieurs milliers, on parle alors d'algorithmes d'apprentissage profond.

Cette structure est définie dès la création du filtre mais les paramètres composant les parties élémentaires ne le sont pas. Ces paramètres sont initialement définis aléatoirement, et seront optimisés tout au long du processus d'apprentissage. En donnant au système une entrée dont la sortie est connue, celui-ci compare son résultat et détermine de nouveaux paramètres à partir des anciens pour s'approcher de son objectif. Après un nombre de répétitions suffisant les paramètres atteignent un état stable⁵. L'algorithme est alors entraîné, fonctionnel, et peut être mis en œuvre de façon efficace et efficiente sur des circuits aux capacités de calcul limitées⁶.

Les algorithmes d'IA peuvent ainsi classifier des images ou localiser un ou plusieurs éléments dans celles-ci. Ils ne sont en revanche pas exempts de défauts. Tout d'abord, le choix des images d'entraînement peut générer un biais dans les résultats : trop de soldats et trop peu de civils dans le jeu d'entraînement poussera par exemple un algorithme à considérer toute personne dans le champ de vision comme probablement

⁴ L'intelligence artificielle englobe l'ensemble des technologies de décisions automatiques. L'apprentissage machine ou *machine learning* en est une sous-catégorie où l'algorithme est généré après un nombre important de répétitions et d'améliorations successives. L'apprentissage profond, ou *deep learning* est le cas particulier des algorithmes d'apprentissage machine formés de réseaux de neurones.

⁵ Cette phase peut être longue : de plusieurs heures à plusieurs jours sont parfois nécessaires pour entraîner un réseau complexe capable d'ingérer en entrée des images de haute définition. Ces délais peuvent être cependant réduits avec l'utilisation de techniques de transfert d'apprentissage : un réseau pré-entraîné peut ainsi être modifié pour effectuer des tâches proches de celles initialement prévues, à l'issue d'une phase d'apprentissage réduite (pour passer par exemple de la détection d'un modèle de véhicule à un autre).

⁶ S. Murshed, C. Murphy, D. Hou, N. Khan, G. Anathanarayanan and F. Hussain, 2020, *Machine Learning at Network Edge: A Survey*.

combattante. La qualité des détections dépend aussi de la qualité des images fournies en entrée, l'algorithme ayant besoin de suffisamment de détails pour déterminer le type d'un groupe de pixels ; si les performances des IA dépassent souvent les capacités humaines en rapidité de détection, elles ne le dépassent pas toujours en termes de précision. En outre, les capacités de raisonnement logique de l'ordinateur sont limitées et restent, encore aujourd'hui du moins, l'apanage de l'humain.

- **Dépasser les limites par la planification**

Plusieurs contraintes techniques apparaissent ainsi, qui devront être prises en compte dans la planification de toute opération. Tout d'abord, une base de données d'entraînement, composée d'un échantillon représentatif de couples entrée-sortie connus et maîtrisés est indispensable ; celle-ci doit comporter plusieurs centaines voire plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'éléments. La création d'une base d'images cohérente devra en conséquence être anticipée avant tout déploiement, cette base devant être maintenue à jour grâce aux images collectées pendant l'action.

Il faudra aussi envisager, au regard de la mission et de ses objectifs, de configurer la fusion des données à chaque échelon, et surtout l'extraction des informations utiles aux cadres de contact. Limiter la visualisation offerte au strict nécessaire est primordial à la réussite de la mission ; sans cela, l'information importante sera cachée sous le bruit des données retransmises en permanence par les multiples capteurs de l'unité. Des algorithmes simples⁷ peuvent ici être envisagés pour trier cette information, mais leur choix devra être préparé en avance, pour notamment sélectionner des alertes en temps réel ciblées.

La phase d'entraînement nécessaire à la préparation des algorithmes de traitement d'image, chronophage, ne peut être réalisée que sur des machines disposant de suffisamment de puissance de calcul. C'est pourquoi aujourd'hui ce travail est effectué dans les laboratoires des industriels de défense. Le programme SCORPION en est un bon exemple, les données sont acquises par les forces terrestres et exploitées par l'industriel ; l'acquisition est donc un cycle long. Acquérir des capacités de réentraînement des algorithmes au sein des forces armées sera donc un facteur clé pour récupérer la souplesse indispensable à l'adaptation des moyens aux exigences de la mission. Cela restera en revanche un travail d'atelier, en *reachback*⁸ ou sur une base avancée équipée du matériel nécessaire, qui imposera la mise au point d'une base d'algorithmes pré-entraînés, préparés et adaptés régulièrement, s'appuyant sur un travail de planification rigoureux, pour que ceux-ci puissent être déployés à temps et en cohérence avec les objectifs de l'opération préparée. Déterminer les informations que les algorithmes devront être en mesure de détecter et de trier avant le départ en mission, afin de préparer au mieux les bases d'apprentissage et les algorithmes qui seront mis en œuvre, en sera le point central. Ce ne sera possible qu'avec des cadres de contact et des officiers d'état-major formés aux gains et aux limitations de ces nouvelles technologies, capables de jauger les compromis entre liberté d'action et gains attendus. Ils pourront ainsi choisir

⁷ Pour de telles problématiques, un algorithme d'arbre de décision peut être envisagé. Simple à mettre en œuvre, il ne répond cependant qu'à des problèmes simples et dont les paramètres sont connus.

⁸ *Reachback* : lien avec la métropole, permettant de déléguer certaines fonctions opérationnelles vers celle-ci pour alléger les postes de commandement déployés sur le théâtre.

précisément les informations qu'ils souhaitent tirer du déploiement des IA de contact. À terme et avec la multiplication des outils d'intelligence artificielle, il deviendra ainsi nécessaire de prévoir des spécialistes en IA dans les centres des opérations, probablement dans la population des officiers formés à l'analyse opérationnelle, capables de comprendre et produire le potentiel « paragraphe IA » des mesures de coordination des futurs ordres d'opération, et apte à les décliner en ordres techniques compréhensibles et cohérents.

Mettre en œuvre de trop nombreux ou trop complexes algorithmes surcharge les capacités de calcul et noie le système de données moins significatives ; ne pas en mettre suffisamment réduit la supériorité informationnelle offerte par les capteurs embarqués. Les cadres techniques devront donc eux aussi être formés, pour savoir d'abord conseiller le chef, expliquer ce qui est du domaine du possible et préciser les compromis nécessaires. Ils pourront alors choisir les jeux d'algorithmes nécessaires et suffisants à la réalisation de l'intention du chef et en adéquation avec les capacités des équipements en dotation.

Une dernière difficulté inhérente aux techniques d'intelligence artificielle réside dans la très grande difficulté, en pratique, d'interprétation des algorithmes. Si le résultat est connu et compréhensible, le chemin utilisé par la machine pour arriver à sa conclusion est caché, les réseaux de neurones sont ainsi souvent qualifiés de « boîtes noires »⁹. Cette difficulté d'interprétation ne doit pas en écarter les résultats, mais elle montre l'importance toujours centrale de l'intelligence humaine dans le processus de décision.

• Conclusion

Prise en compte au plus tôt dans les cycles de planification, la distribution des algorithmes d'intelligence artificielle au plus proche des moyens de capture d'images permettra ainsi d'augmenter l'information exploitable à tous les échelons. Les procédures de RETEX, d'analyse après action et de renseignement d'origine image n'en sont pas amoindries pour autant. En effet, traiter en continu et en temps réel ces images ne réduit en rien l'intérêt de leur exploitation *a posteriori*, car seule une petite partie de l'information est extraite en temps réel. Les données ainsi obtenues pourront venir enrichir une base de données opérative, sur laquelle des traitements plus poussés, plus gourmands en ressources tant machines qu'humaines, pourront être effectués. Intégrée à la future infrastructure du *cloud* de combat et reliée à une base de données massives, capable d'absorber l'ensemble des remontées d'information, un tel maillage de capteurs intelligents¹⁰ offrira aux chefs militaires, sur l'ensemble de la chaîne de commandement, un chemin vers la conservation de la supériorité informationnelle et opérationnelle.

⁹ Ce sujet constitue un axe de recherche très actuel. La complexité des réseaux créés ne permettant pas d'en comprendre l'intégralité du fonctionnement, l'interprétation du « pourquoi » d'un résultat est souvent faite par comparaison et analyse statistique. L. H. Gilpin, D. B, 2019, *Explaining Explanations: An Overview of Interpretability of Machine Learning*. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

¹⁰ Bordetsky, C. Glose, S. Mullins, 2019, *Machine Learning of Semi-Autonomous Intelligent Mesh Networks Operation*. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences ; Y. Sahni, J. Cao, S. Zhang, L. Yang, *Edge Mesh: A New Paradigm to Enable Distributed Intelligence in Internet of Things*, IEEE Access vol. 5.