



Organisation mondiale
des douanes

RAPPORT DÉTAILLÉ SUR L'ADOPTION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE AU SEIN DE LA DOUANE

MARS 2025



wcoomd.org

Financé par



中國海關
CHINA CUSTOMS



Rapport détaillé sur

L'adoption de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique au sein de la douane

Mars 2025

Le contenu du présent rapport a été élaboré par un consultant dans le cadre du projet Smart Customs. Il ne reflète pas les points de vue, les opinions ou les positions officielles de l'Organisation mondiale des douanes (OMD), de ses Membres ou du Secrétariat de l'OMD.



Sommaire

1	Résumé analytique	10
2	Vue d'ensemble de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (ML)	11
2.1	IA / ML – un bref historique	12
2.2	L'essor de l'apprentissage automatique (ML)	13
2.3	L'avènement de l'IA générative (IAG)	15
2.3.1	La technologie à la base de l'IA générative	15
2.4	L'IA pour les administrations des douanes	18
3	Tendances de l'IA / ML dans le domaine des douanes et du commerce	18
3.1	Modèles d'IA avancés	18
3.2	Le rôle de l'IA générative dans les opérations douanières	19
3.3	L'approche HITL (<i>Human-in-the-Loop</i> – avec intervention humaine) dans les opérations douanières	19
3.3.1	Garantir la responsabilisation et la conformité	19
3.3.2	Renforcer la confiance et la transparence	20
3.3.3	Gérer les considérations éthiques et juridiques	20
3.3.4	S'adapter aux environnements dynamiques	20
3.3.5	Trouver un équilibre entre efficacité et expertise	20
3.4	IA basée sur le cloud dans les opérations douanières	21
3.4.1	Répondre aux préoccupations en matière de sécurité des données	21
4	Exigences légales pour l'adoption de l'IA / ML	22
4.1	Approches nationales de la réglementation de l'IA	22
4.1.1	Législation formelle	22
4.1.2	Cadres de gouvernance et directives	22
4.1.3	Approches hybrides	23
4.2	Efforts internationaux pour réglementer l'IA	23
4.3	Implications pour les administrations des douanes	24
4.4	Chiffrement des données, anonymisation et gestion du consentement	25
4.5	Respect de l'utilisation des données et des droits de propriété intellectuelle (DPI)	26
4.6	Réglementation en matière de cybersécurité	27
5	Dispositions politiques pour l'adoption de l'IA / ML	28
5.1	Politiques internes	28
5.2	Cadres et directives éthiques	30
5.3	Atténuation des biais dans les modèles d'IA / ML	30
6	Engagement des parties prenantes et communication	33
6.1	Mécanismes de rétroaction et intégration dans la planification et l'exécution	34
6.2	Transparence et communication	35
7	Principales considérations pour les administrations des douanes qui se lancent dans des projets d'IA / ML	36
7.1.1	Définition du problème et alignement	36
7.1.2	Disponibilité et qualité des données	37
7.1.3	Faisabilité technique	37
7.1.4	Défis liés aux résultats générés par l'IA	38
7.1.5	Analyse coûts-avantages	39
7.1.6	Projets pilotes	39
8	Gestion des données	41
8.1	Types de données utilisées pour les projets d'IA / ML	41
8.2	Qualité et intégrité des données	42
8.3	Préparation des données	42

9	Cadre technique évolutif pour la mise en œuvre / l'intégration de l'IA / ML	44
9.1	Environnement de développement de l'IA / ML	44
9.1.1	Frameworks d'IA / ML	44
9.1.2	Environnement de développement intégré (IDE)	45
9.1.3	Gestion des versions	46
9.2	Outils et frameworks pour l'automatisation	46
9.2.1	Outils d'orchestration	46
9.2.2	Pipelines d'intégration continue et de déploiement continu (IC / DC)	46
9.2.3	Bibliothèque de modèles	46
9.2.4	Gestion de configuration	47
9.3	Gestion et gouvernance des données	47
9.3.1	Lac de données	47
9.3.2	Cadre de gouvernance des données	47
9.3.3	Outils de qualité des données	48
9.4	Développement et entraînement des modèles	48
9.4.1	Outils d'expérimentation	48
9.4.2	Réglage des hyperparamètres	48
9.4.3	Entraînement distribué	48
9.5	Architecture et infrastructure de plateforme	49
9.5.1	Options de déploiement	49
9.5.2	Déploiement sur site	49
9.5.3	Déploiement dans le cloud	49
9.5.4	Architecture cloud hybride	50
9.5.5	Conteneurisation	50
9.5.6	Orchestration de conteneurs – Cluster Kubernetes	50
9.5.7	Équilibreurs de charge	51
9.5.8	Sécurité	51
9.6	Exigences en matière de ressources de calcul	51
9.6.1	Unités centrales de traitement (CPU)	51
9.6.2	Mémoire	52
9.6.3	Unités de traitement graphique (GPU)	52
9.6.4	Mémoire et stockage	53
9.6.5	Stockage en réseau (NAS) / système de fichiers en réseau (NFS)	53
9.6.6	Stockage cloud	53
9.7	Mise en réseau	54
9.7.1	Bande passante du réseau	54
9.7.2	Ressources de calcul cloud	55
9.8	Opérations d'apprentissage automatique (MLOps)	55
9.8.1	Renforcement des capacités MLOps au sein d'une administration des douanes	55
9.8.2	Étapes de la mise en place d'une capacité MLOps	56
9.9	Outils d'intégration de données pour l'intégration de l'IA / ML	57
9.9.1	Apache Spark	57
9.9.2	Apache NiFi	58
9.10	Intégration des données avec des systèmes spécifiques	58
9.10.1	Systèmes de gestion douanière et plateformes de guichet unique	58
9.10.2	Systèmes de suivi électronique du fret (ECTS)	59
9.10.3	Systèmes de gestion intégrée (ERP) et de ressources humaines (RH)	59
9.10.4	Sécurité et conformité	59
10	Coûts	60
10.1	Frameworks d'IA / ML	60
10.2	Environnement de développement intégré (IDE)	61
10.3	Gestion des versions	61
10.4	Automatisation, gestion et gouvernance des données	62

10.5	Développement et entraînement des modèles	63
10.6	Architecture de plateforme	63
10.7	Exigences en matière de ressources de calcul	64
10.8	Mise en réseau.....	65
10.9	Stratégies d'adoption de l'IA / ML rentables pour les administrations des douanes	65
11	Compétences et formation	67
11.1	Développer la maîtrise des données dans l'ensemble de l'organisation.....	67
11.1.1	Programmes de sensibilisation à la maîtrise des données.....	67
11.1.2	Ateliers sur l'interprétation des données	68
11.1.3	Tableaux de bord de données interactifs.....	68
11.2	Stratégies de développement de la formation et du renforcement des capacités en matière d'IA / ML	68
11.2.1	Évaluer les niveaux de compétences actuels et recenser les lacunes	68
11.2.2	Renforcement des capacités grâce à la collaboration interservices.....	68
11.3	Bâtir une expertise technique.....	69
11.3.1	Partenariats avec des établissements universitaires	69
11.3.2	Formation pratique, cours en ligne et certifications	69
11.3.3	Ateliers et camps d'entraînement	70
11.3.4	Hackathons ou défis de données	70
11.4	Établir de nouveaux profils professionnels pour l'IA / ML	70
11.4.1	Spécialiste IA / ML.....	71
11.4.2	Expert en science des données (opérations douanières)	72
12	Évaluation, exemples de réussite et enseignements tirés.....	75
12.1	Évaluation	75
12.1.1	Définition des objectifs du projet.....	75
12.1.2	Définition des mesures de performance pour les modèles d'IA / ML.....	75
12.1.3	Impact sur la performance organisationnelle et l'alignement stratégique	76
12.1.4	Mesure du succès des projets d'IA / ML	76
12.1.5	Adoption et satisfaction des utilisateurs.....	77
12.1.6	Analyse coûts-avantages.....	77
12.2	Enseignements tirés	77
13	Conclusion : l'IA / ML, catalyseur de la transformation des administrations des douanes	79

Figures

Figure 1 – Qu'est-ce que l'IA / ML?.....	12
Figure 2 – Terminologie de l'IA, du ML et de la science des données.....	13
Figure 3 – Algorithmes de ML courants	31
Figure 4 – Capacités essentielles des technologies d'IA / ML	36
Figure 5 – Étapes du développement et du déploiement d'un système pilote d'IA.....	40
Figure 6 – Données structurées, semi-structurées et non structurées dans les opérations douanières..	42
Figure 7 – Étapes de la préparation des données	43

Tableaux

Tableau 1 – Différences entre l'IA, le ML, l'apprentissage profond et l'IA générative.....	16
Tableau 2 – Biais, hallucinations et inexactitudes les plus courants dans les modèles d'IA / ML	38
Tableau 3 – Fourchette de coûts pour les frameworks d'IA / ML.....	61
Tableau 4 – Fourchette de coûts pour l'environnement de développement intégré (IDE)	61
Tableau 5 – Fourchette de coût pour la gestion des versions	61
Tableau 6 – Fourchette de coûts pour les outils et le cadre d'automatisation, de gestion et de gouvernance des données	62
Tableau 7 – Fourchette de coûts pour le développement et l'entraînement de modèle.....	63
Tableau 8 – Fourchette de coûts pour l'architecture de plateforme.....	63
Tableau 9 – Fourchette de coûts pour les besoins en ressources de calcul	64
Tableau 10 – Fourchette de coûts pour les exigences de mise en réseau	65

Abréviations

AGDC	Administration générale des douanes de la Chine
CABR	Contrôle d'accès basé sur les rôles
CPU	Unité centrale de traitement
DPI	Droits de propriété intellectuelle
GPU	Unité de traitement graphique
GVD	Gestion des versions des données
HITL	Human-in-the-Loop (<i>avec intervention humaine</i>)
IA	Intelligence artificielle
IaC	Infrastructure en tant que code
IDE	Environnement de développement intégré (<i>Integrated Development Environment</i>)
KCS	Service des douanes de Corée
LLM	Grand modèle de langage (<i>Large Language Model</i>)
ML	Apprentissage automatique (<i>Machine Learning</i>)
MLOps	Opérations d'apprentissage automatique
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OCR	Reconnaissance optique de caractères (<i>Optical character recognition</i>)
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMD	Organisation mondiale des douanes
RAM	Mémoire vive (<i>Random Access Memory</i>)
RGPD	Règlement général sur la protection des données
RNG	Réseau neuronal graphique
RNP	Réseau neuronal profond
SH	Système harmonisé
TALN	Traitement automatique du langage naturel (<i>Natural Language Processing</i>)

1 Résumé analytique

Les technologies d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (ML) révolutionnent les opérations dans le monde entier, offrant des possibilités sans précédent pour renforcer l'efficacité, améliorer la prise de décision et relever des défis complexes dans le domaine du commerce mondial et de la sécurité des frontières. Ces technologies permettent aux administrations des douanes d'automatiser les processus de routine, de renforcer les capacités d'évaluation des risques et de détection des fraudes, d'optimiser l'affectation des ressources et de faciliter les échanges en rationalisant les procédures de dédouanement. Les principaux domaines d'application de l'IA / ML sont l'efficacité opérationnelle et la facilitation des échanges, la gestion des risques, le renseignement et la surveillance, l'analyse prédictive et le traitement en temps réel, ainsi que la gestion des ressources humaines et le renforcement des capacités.

Pour mettre en œuvre avec succès les initiatives en matière d'IA / ML, les administrations des douanes doivent tenir compte de plusieurs facteurs essentiels. Les cadres juridiques et éthiques régissant l'utilisation de l'IA doivent être soigneusement explorés pour garantir le respect des lois et un déploiement responsable. La disponibilité, la qualité et la gestion des données sont essentielles à la réussite des projets d'IA / ML et nécessitent des investissements importants dans la préparation et la gouvernance des données. Les exigences en matière d'infrastructure technique et d'expertise doivent être satisfaites, ce qui nécessite des investissements tant en matériel qu'en logiciels, ainsi qu'un personnel qualifié. Une analyse coûts-avantages approfondie doit être effectuée pour justifier les investissements en IA / ML et la réalisation de projets pilotes est recommandée pour tester la faisabilité et l'efficacité avant une mise en œuvre à grande échelle.

Le présent rapport permettra aux administrations des douanes d'avoir une compréhension globale des spécifications techniques minimales, des coûts, des tendances, des cas d'utilisation, des processus opérationnels, des politiques et des exigences légales associés à l'adoption de l'IA et de l'apprentissage automatique (ML). L'objectif est de fournir aux Membres de l'OMD les connaissances nécessaires pour prendre des décisions éclairées concernant la mise en œuvre des technologies d'IA / ML et leur intégration dans leurs opérations. En offrant un aperçu pratique de ces technologies, le rapport cherche à réduire la fracture numérique entre les Membres de l'OMD, en permettant un accès plus équitable aux outils d'IA / ML et en aidant les administrations des douanes à relever les défis inhérents à un environnement commercial mondial de plus en plus complexe.

Le rapport décrit un cadre technique évolutif pour la mise en œuvre et l'intégration de l'IA / ML, couvrant les environnements de développement de l'IA / ML, les outils de gestion et de gouvernance des données, les plateformes de développement de modèles et d'entraînement et les options de déploiement. Ce cadre garantit que les administrations des douanes disposent d'une base technologique flexible pour soutenir efficacement les initiatives en matière d'IA / ML, permettant une adoption progressive et une mise à l'échelle en fonction des besoins et des ressources de chacun. Le renforcement des capacités en matière d'opérations d'apprentissage automatique (MLOps) est crucial pour accélérer le développement et le déploiement de l'IA, améliorer les performances et la reproductibilité des modèles et réduire les risques associés aux projets d'IA.

Pour se préparer à l'adoption de l'IA / ML, les administrations des douanes devraient investir dans des programmes de formation complets afin de mettre en place une expertise interne dans différents domaines, notamment la science des données, l'ingénierie logicielle et les connaissances spécifiques par domaine. Il est essentiel de favoriser une culture de la maîtrise des données dans l'ensemble de l'organisation pour que le personnel technique et non technique puisse contribuer efficacement aux initiatives en matière d'IA / ML et en tirer profit. La collaboration avec des experts externes et des établissements universitaires peut fournir des informations précieuses et permettre aux administrations des douanes de rester à la pointe des avancées technologiques.

La mise en œuvre d'outils d'intégration de données robustes est cruciale pour une interopérabilité transparente des systèmes, permettant aux modèles d'IA / ML d'accéder à des informations exploitables en temps réel à travers différents systèmes, de les traiter et de les mettre à disposition. Les considérations de sécurité et de respect des lois sont primordiales dans l'adoption de l'IA / ML. Des mesures exhaustives de cybersécurité doivent être mises en œuvre pour protéger les données sensibles et commerciales, notamment le chiffrement des données, le contrôle d'accès et la conformité avec les réglementations en matière de protection des données. Des audits et un suivi réguliers des systèmes d'IA / ML sont nécessaires pour garantir le respect continu des lois et détecter les biais ou les inexactitudes potentiels dans les résultats des modèles.

On ne saurait trop insister sur les implications éthiques de l'IA / ML dans les opérations. Les administrations des douanes doivent établir des directives claires pour l'utilisation responsable de l'IA, en abordant des questions telles que l'équité, la transparence et la responsabilisation. Il est essentiel de procéder à des évaluations régulières des systèmes d'IA pour détecter les biais potentiels et les conséquences imprévues afin de maintenir la confiance du public et de garantir un traitement équitable de toutes les parties prenantes de l'écosystème commercial.

En adoptant les technologies d'IA / ML, les administrations des douanes peuvent se positionner à l'avant-garde de la facilitation des échanges et de la sécurité des frontières. Ces outils avancés permettent des opérations de commerce international plus efficaces, plus transparentes et plus sûres dans un environnement mondial de plus en plus complexe. Toutefois, une mise en œuvre réussie nécessite une approche holistique tenant compte des considérations techniques, organisationnelles et éthiques. Par une planification rigoureuse, en investissant dans les infrastructures et les compétences et en s'engageant à adopter des pratiques responsables en matière d'IA, les administrations des douanes peuvent tirer parti de ces technologies pour améliorer considérablement leurs capacités, ce qui, en fin de compte, profitera au commerce mondial et à la croissance économique.

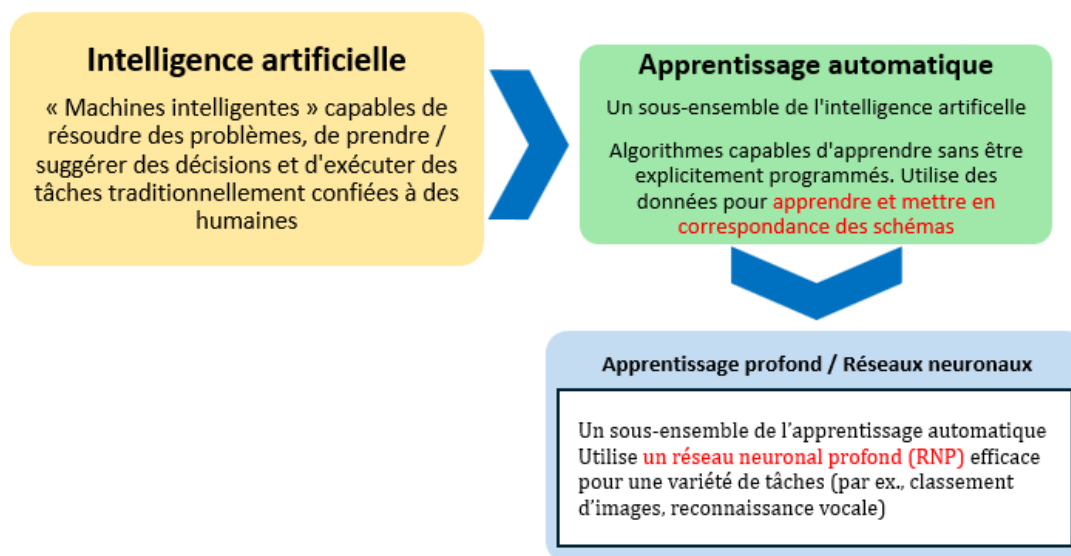
2 Vue d'ensemble de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (ML)

L'intelligence artificielle (IA) est un terme général qui englobe les technologies permettant aux machines d'effectuer des tâches nécessitant traditionnellement l'intelligence humaine. Ces tâches comprennent la résolution de problèmes, la prise de décision et l'apprentissage par l'expérience. L'IA n'est pas une technologie unique, mais un ensemble de techniques diverses.

L'apprentissage automatique (ML, de l'anglais *Machine Learning*) est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle. Il s'agit d'entraîner des algorithmes sur des données afin de reconnaître des schémas et de faire des prédictions ou de prendre des décisions sans programmation proprement dite. Par exemple, un modèle de ML peut apprendre à différencier les chats, les chiens et les humains sur la base d'images, ou à comprendre le contenu d'un texte.

Les figures ci-dessous donnent un aperçu de la relation entre l'IA, le ML et l'apprentissage profond, en mettant en évidence leurs définitions et leurs concepts clés, et en expliquant les terminologies courantes utilisées dans l'IA et le ML.

Figure 1 – Qu'est-ce que l'IA / ML¹?



2.1 IA / ML – un bref historique

L'IA a connu une évolution dynamique et multiforme, marquée par des cycles d'avancées révolutionnaires et des périodes de scepticisme dues à des obstacles scientifiques et à des attentes démesurées.

Dans les années fondatrices de l'IA (1956-1974), l'objectif principal était de créer des machines intelligentes grâce à des stratégies de recherche générales capables de résoudre des problèmes généraux. Les scientifiques pensaient que s'ils représentaient les tâches à l'aide de symboles (comme des mots ou des nombres), les machines pourraient utiliser ces symboles pour raisonner et résoudre divers problèmes. Cependant, ils n'ont pas tardé à réaliser que ces méthodes générales et universelles n'étaient pas suffisamment efficaces pour atteindre le niveau d'intelligence ou de performance souhaité dans les machines.

Dans les années 1980, on est passé d'un paradigme basé sur la recherche à un paradigme basé sur la connaissance, ce qui a conduit à intégrer une connaissance approfondie du domaine dans des systèmes d'IA experts hautement spécialisés, principalement conçus pour émuler les capacités de prise de décision d'experts humains dans des « domaines » spécifiques. Par exemple, l'Internal Revenue Service (IRS) des États-Unis a expérimenté des systèmes experts pour faciliter les contrôles fiscaux et la détection des fraudes². Ces systèmes visaient à reproduire les capacités de prise de décision de contrôleurs expérimentés en encodant les lois et règlements fiscaux dans une base de connaissances³. Cependant, la complexité des codes fiscaux et les nuances des cas individuels ont souvent conduit à des évaluations inexactes. Les contrôleurs humains devaient intervenir pour interpréter les résultats et procéder à des arbitrages, ce qui a mis en évidence les limites des systèmes. Si les systèmes experts étaient prometteurs, ils étaient intrinsèquement fragiles, ne fonctionnaient bien que dans leur champ d'application étroit et dépendaient fortement des experts humains pour combler le fossé entre les intentions des concepteurs et les applications du monde réel.

¹ Blank, S. (2022). « Artificial Intelligence and Machine Learning Explained » (*L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique expliqués*). steveblank.com.

² McCoy, K. F. (1989). « The Use of Expert Systems in the IRS » (*L'utilisation des systèmes experts au sein de l'IRS*). Dans « Proceedings of the Annual Conference on Taxation » (*Compte rendu de la conférence annuelle sur la fiscalité*) (pp. 147-154). National Tax Association.

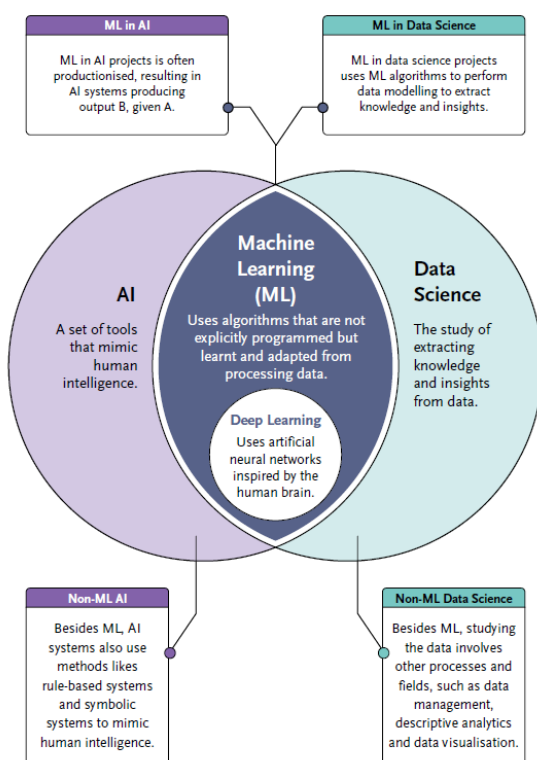
³ Une « base de connaissances » est un référentiel d'informations qui permet le partage des connaissances et la résolution de problèmes plutôt que le simple stockage de données, comme dans une « base de données ».

Entre les années 1990 et 2010, des approches alternatives telles que les systèmes multi-agents et le Web sémantique ont été explorées, mais n'ont connu qu'un succès limité. Le Web sémantique vise à rendre le contenu du Web plus accessible aux machines en structurant les données dans un format normalisé. Des initiatives du secteur public telles que Data.gov aux États-Unis et Data.gov.uk au Royaume-Uni ont cherché à tirer parti de cette technologie pour améliorer le partage des données entre les services gouvernementaux et avec le public. Des projets ont été lancés pour promouvoir les normes de données ouvertes. Cependant, ces systèmes ont été confrontés à des défis lorsqu'ils ont été mis à l'échelle de la complexité du monde réel, notamment l'imprévisibilité du comportement humain et des facteurs environnementaux, et l'absence d'adoption généralisée des technologies du Web sémantique et les problèmes d'interopérabilité ont limité leur efficacité⁴.

2.2 L'essor de l'apprentissage automatique (ML)

Alors que l'IA englobe les technologies qui permettent aux machines d'imiter l'intelligence humaine, l'apprentissage automatique ou ML, qui est un sous-ensemble de l'IA, implique des algorithmes qui apprennent à partir de données pour améliorer les prédictions. La science des données intègre des méthodes statistiques et des techniques informatiques pour analyser et extraire des informations utiles à partir de sources de données structurées et non structurées. La figure ci-dessous illustre la terminologie clé de l'IA, du ML et de la science des données.

Figure 2 – Terminologie de l'IA, du ML et de la science des données⁵



⁴ Heitmann, B., et al. (2009). « Implementing Semantic Web applications: reference architecture and challenges » (*Mise en œuvre d'applications Web sémantiques : architecture de référence et défis*). Compte rendu du 5^e Atelier international sur l'ingénierie logicielle basée sur le Web sémantique.

⁵ Agence gouvernementale de Singapour pour la technologie (2019), « Public Sector AI Playbook » (*Guide de l'IA pour le secteur public*).

Les systèmes experts des années 1980 étaient des systèmes d'IA basés sur des règles, conçus pour simuler la prise de décision humaine à l'aide de règles de type « si-alors » et de bases de connaissances. Bien qu'ils aient représenté les premiers progrès de l'IA, ils souffraient de plusieurs limites que le ML a corrigées par la suite. L'apprentissage automatique est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle. Il se concentre sur la création d'algorithmes qui permettent aux ordinateurs d'apprendre à partir de données et de faire des prédictions ou de prendre des décisions sans programmation proprement dite. L'une des formes les plus avancées de ML est l'apprentissage profond, qui s'appuie sur des réseaux neuronaux pour repérer des schémas dans de grands ensembles de données.

L'apprentissage profond englobe diverses architectures de réseaux neuronaux, notamment les réseaux neuronaux profonds (RNP) et les réseaux neuronaux graphiques (RNG). Ces architectures s'inspirent du cerveau humain et se composent de couches de nœuds (neurones) connectés les uns aux autres. Chaque nœud traite des informations, prend des décisions et transmet ces informations et décisions à la couche suivante, ce qui permet au réseau d'apprendre à partir des schémas et des relations complexes dans les données.

Les réseaux neuronaux profonds (RNP) sont apparus comme une solution puissante pour remplacer les systèmes experts antérieurs, tirant parti de l'apprentissage fondé sur les données pour surmonter des difficultés telles que la collecte manuelle de connaissances d'experts et le raisonnement de bon sens. Les RNP excellent dans le traitement de données structurées dans l'espace euclidien, telles que des images ou des séquences de texte. L'essor des RNP a marqué un tournant dans l'IA, permettant des percées telles que des performances surhumaines dans la classification des images, les jeux, et des avancées majeures dans la reconnaissance vocale et la traduction des langues.

Les réseaux neuronaux graphiques (RNG), dont le développement est plus récent, sont conçus pour traiter des données structurées par des graphes, ce qui permet de remédier aux limites des réseaux neuronaux traditionnels dans le traitement des données non euclidiennes. Les RNG peuvent modéliser des relations complexes dans des données représentées sous forme de graphes, comme les réseaux sociaux ou les structures moléculaires, en faisant passer des messages entre les nœuds afin de capturer à la fois les caractéristiques des nœuds et la structure du graphe. Dans les administrations des douanes, les RNP et les RNG jouent un rôle crucial. Les RNP sont souvent utilisés pour l'évaluation des risques et l'inspection du fret, en analysant les données historiques des envois afin de repérer des schémas et de détecter des anomalies susceptibles de révéler des faits de contrebande, de fraude ou de fausse déclaration. Les RNG peuvent être utilisés pour analyser des réseaux commerciaux complexes, en repérant des schémas suspects dans les relations entre les entités impliquées dans le commerce international.

Si ces approches d'apprentissage profond ont permis des avancées impressionnantes dans le domaine de l'IA, elles ne vont pas sans leur lot de défis à relever. Elles nécessitent généralement de grandes quantités de données étiquetées, ce qui peut créer des goulots d'étranglement dans le développement. En outre, leur structure complexe avec des millions de paramètres les fait souvent fonctionner comme des « boîtes noires », ce qui rend difficile la compréhension de la manière dont ces systèmes parviennent à prendre des décisions.

Malgré ces défis, les RNP et RNG continuent de repousser les limites de l'IA grâce à leurs performances élevées et à leur capacité à s'attaquer à des tâches complexes. Les RNP excellent dans le traitement des données de type grille, tandis que les RNG ouvrent de nouvelles possibilités dans le traitement des données relationnelles. Ce mélange de haute performance et de complexité continue à façonner l'évolution de l'IA, repoussant les limites de ce que les machines peuvent apprendre et réaliser dans divers domaines, y compris les opérations douanières.

2.3 L'avènement de l'IA générative (IAg)

L'IA générative (IAg) représente l'une des formes les plus avancées de l'IA, capable de produire un contenu nouveau et original en repérant des schémas et des structures dans les données existantes. Son émergence a remodelé le paysage de l'IA, repoussant les limites de la créativité, de l'automatisation et de la résolution de problèmes dans tous les secteurs.

Contrairement aux modèles d'IA traditionnels qui reposent sur des règles prédéfinies et des résultats structurés, l'IA générative apprend à créer des résultats uniques qui ressemblent aux données sur lesquelles elle a été formée. Cette capacité en a fait un outil puissant pour des applications telles que la génération de textes, la création d'images, la synthèse vidéo et la composition musicale, transformant des domaines allant du divertissement au marketing en passant par l'éducation.

2.3.1 La technologie à la base de l'IA générative

De nombreux modèles d'IA générative reposent sur des réseaux neuronaux, en particulier les RNP et les RNG. Ces approches basées sur les réseaux neuronaux ont largement contribué à la croissance rapide et à la diversité des capacités de l'IA générative.

Dans un premier temps, les réseaux neuronaux profonds (RNP) ont jeté les bases de la reconnaissance de formes et du traitement de données complexes, permettant aux premiers modèles génératifs de créer des résultats basiques dans des domaines tels que la génération d'images et de textes. C'est sur cette base que sont apparus les réseaux neuronaux graphiques (RNG), qui excellent dans le traitement des données structurées en graphe et facilitent les tâches impliquant des informations relationnelles, telles que la génération de molécules pour la découverte de médicaments, l'analyse des réseaux sociaux et les systèmes de recommandation.

L'introduction des modèles basés sur des « transformeurs » (ou modèles auto-attentionnels) – des systèmes d'IA qui comprennent et génèrent du langage en se concentrant sur la manière dont les mots sont liés les uns aux autres dans une phrase –, constitue une avancée majeure dans le développement de l'IA générative. Ces modèles ont transformé le domaine en utilisant des mécanismes d'auto-attention qui leur permettent d'évaluer et de hiérarchiser les relations entre les mots indépendamment de leur position dans la phrase. Cette innovation a considérablement amélioré la capacité des modèles à gérer et à interpréter des ensembles massifs de données, ce qui a conduit à la création de grands modèles de langage (LLM) tels que le GPT-3, le GPT-4 et le LLaMA. Ces LLM ont fait preuve d'une compétence sans précédent dans la compréhension et la génération de textes cohérents et fidèles au contexte, établissant ainsi de nouvelles références en matière de traitement automatique du langage naturel.

Parallèlement aux progrès des LLM basés sur des transformeurs, le domaine de l'IA générative a vu l'émergence de modèles de diffusion. Les modèles de diffusion créent des images en ajoutant d'abord un bruit aléatoire aux données, puis en apprenant à l'IA à supprimer ce bruit étape par étape. Cette approche permet aux modèles de générer des images photoréalistes de haute qualité. En conséquence, les modèles de diffusion ont considérablement amélioré la clarté et la variété des images produites par l'IA générative, améliorant à la fois leur fidélité et leur polyvalence.

Les modèles génératifs ont donc continué à progresser, en prenant en charge les applications multimodales et en étendant leurs capacités au-delà du texte pour englober la génération du texte à l'image et du texte à la vidéo. Ces systèmes d'IA générative multimodale exploitent des milliards de paramètres pour produire un contenu cohérent et pertinent sur le plan contextuel dans différents formats, élargissant ainsi la portée et le champ d'application de l'IA générative dans les domaines de la création et de l'analyse.

L'expansion de l'IA générative au-delà du texte a eu de profondes répercussions sur de nombreux secteurs. Dans les domaines de l'art, du design et du marketing, les modèles avancés de conversion de texte en

image permettent de créer des images photoréalistes de haute qualité à partir de descriptions textuelles, ce qui favorise des niveaux de créativité et d'efficacité sans précédent. De même, la génération de vidéo pilotée par l'IA permet de produire un contenu visuel dynamique à partir d'entrées textuelles ou d'images fixes, ce qui révolutionne les processus de création de contenu et de production de médias.

Malgré ces avancées, l'IA générative s'accompagne de défis importants. La complexité de ces modèles nécessite du matériel spécialisé, tel que les unités de traitement graphique (GPU)⁶, pour effectuer les calculs de manière efficace. Les ressources de calcul considérables nécessaires pour l'entraînement et le déploiement de ces modèles soulèvent des préoccupations quant à la durabilité environnementale et à l'accès équitable à la technologie de l'IA. En outre, les demandes intensives en matière de ressources contribuent à la centralisation des capacités d'IA, ce qui risque de limiter la démocratisation et les avantages sociétaux au sens large.

Les considérations éthiques sont primordiales dans le déploiement de l'IA générative. Ces modèles peuvent, par inadvertance, reproduire ou amplifier les biais présents dans leurs données d'apprentissage, ce qui se traduit par des résultats discriminatoires ou inappropriés. En outre, l'utilisation potentiellement abusive de l'IA générative pour créer des « deepfakes » (ou hypertrucages) ou diffuser des informations erronées présente des risques sociétaux importants. Il est essentiel de relever ces défis éthiques pour garantir le développement et l'application responsables des technologies d'IA générative.

Pour l'avenir, l'IA générative représente une étape importante dans l'évolution de l'intelligence artificielle, caractérisée par des architectures neuronales sophistiquées et des applications polyvalentes dans divers domaines. L'avenir de l'IA générative passe par l'intégration de diverses architectures de réseaux neuronaux, y compris les RNP et les RNG, avec des systèmes basés sur des règles et l'expertise humaine. Cette approche hybride vise à améliorer la flexibilité et la fiabilité des systèmes d'IA, en leur permettant de gérer plus efficacement les situations inattendues. En outre, les recherches en cours se concentrent sur l'amélioration de l'interprétabilité des modèles d'IA et sur la nécessité de garantir des opérations éthiques et d'améliorer la durabilité en réduisant l'impact environnemental des calculs de l'IA.

Le Tableau 1 présente la relation hiérarchique entre l'IA, le ML, l'apprentissage profond et l'IA générative, en mettant en évidence leurs définitions, leurs domaines d'intérêt, leurs techniques, leurs applications, leurs avantages et leurs dépendances à l'égard des données, afin de clarifier leurs différences et leurs interconnexions.

Tableau 1 – Différences entre l'IA, le ML, l'apprentissage profond et l'IA générative

Catégorie	Intelligence artificielle (IA)	Apprentissage automatique (ML)	Apprentissage profond	IA générative
Définition	Un vaste domaine de l'informatique axé sur la création de systèmes qui simulent l'intelligence humaine, englobant le raisonnement, l'apprentissage et la résolution de problèmes.	Sous-ensemble de l'IA visant à permettre aux systèmes d'apprendre à partir de données et d'améliorer leurs performances au fil du temps sans être explicitement programmés.	Un sous-ensemble de l'apprentissage automatique qui utilise des réseaux neuronaux avec de nombreuses couches (réseaux neuronaux profonds, RNP) pour modéliser des schémas complexes dans de grandes quantités de données.	Un sous-ensemble de l'IA et de l'apprentissage profond conçu pour créer de nouveaux contenus, tels que du texte, des images, de l'audio et de la vidéo, en apprenant des schémas à partir de données existantes.

⁶ Les unités de traitement graphique (GPU) gèrent des tâches parallèles, cruciales pour le rendu des images et l'entraînement des modèles d'apprentissage automatique.

Objectif principal	Simuler l'intelligence humaine par le raisonnement, l'apprentissage et la prise de décision afin d'effectuer des tâches qui requièrent généralement la cognition humaine.	Améliorer les performances des systèmes grâce à l'apprentissage fondé sur les données, en faisant des prédictions et en repérant des schémas sur la base de données historiques.	Traiter de grands volumes de données structurées et non structurées pour reconnaître des modèles et des représentations complexes, permettant des tâches telles que la reconnaissance d'images et de la parole.	Générer de nouveaux résultats créatifs en comprenant et en reproduisant les modèles et les styles sous-jacents présents dans les données d'entraînement, encourageant l'innovation et la création de contenu.
Techniques utilisées	Systèmes à base de règles, arbres de décision, systèmes experts, algorithmes de recherche, réseaux neuronaux, traitement automatique du langage naturel (TALN), vision par ordinateur.	Algorithmes tels que la régression linéaire, la régression logistique, les arbres de décision, les machines à vecteurs de support, le partitionnement et l'apprentissage par renforcement.	Réseaux neuronaux profonds (RNP), réseaux neuronaux convolutifs (RNC), réseaux neuronaux récurrents (RNR), réseaux neuronaux graphiques (RNG), transformeurs.	Auto-encodeurs variationnels (AEV), réseaux antagonistes génératifs (RAG), modèles basés sur des transformeurs (par exemple BERT, T5), modèles de diffusion, modèles autorégressifs.
Exemples d'applications	Véhicules autonomes, assistants personnels virtuels (par exemple Siri, Alexa), appareils domestiques intelligents, robotique, jeux (par exemple AlphaGo).	Filtrage des spams, détection des fraudes, systèmes de recommandation (par exemple les recommandations de Netflix), maintenance prédictive, segmentation de la clientèle, analyse des marchés boursiers.	Reconnaissance d'images et de la parole (par exemple Google Photos, Siri), traduction de langues (par exemple Google Translate), systèmes de conduite autonome, analyse d'images médicales.	Génération de texte (par exemple ChatGPT, Jasper), création d'images (par exemple Midjourney, DALL-E), composition musicale (par exemple AIVA), création de médias synthétiques, génération de vidéos (par exemple Synthesia).
Avantage principal	Permet l'automatisation et la prise de décision intelligente dans un large éventail d'applications, améliorant ainsi l'efficacité dans divers domaines.	Permet aux systèmes d'apprendre et de s'améliorer à partir des données, ce qui les rend adaptables et capables de gérer des tâches complexes sans programmation proprement dite.	Très efficace pour le traitement et l'extraction d'informations significatives à partir d'ensembles de données volumineux et non structurés, ce qui permet d'obtenir des performances supérieures dans des tâches telles que la reconnaissance d'images et de la parole.	Excelle dans la création de résultats très réalistes et inédits, encourageant la créativité, l'innovation et l'automatisation dans la génération de contenu à travers de multiples types de médias.
Dépendance à l'égard des données	Peut nécessiter ou non de grands ensembles de données ; dépend des techniques et applications d'IA spécifiques utilisées.	Nécessite des données structurées et souvent étiquetées pour l'entraînement afin de permettre un apprentissage et des prédictions précis.	Nécessite de grandes quantités de données étiquetées ou non étiquetées pour entraîner efficacement les réseaux neuronaux profonds, en tirant parti d'ensembles de données à grande échelle pour des performances optimales.	Nécessite des ensembles massifs de données pour apprendre des schémas et des styles complexes, ce qui permet de générer un contenu diversifié et de haute qualité qui imite les données du monde réel.

2.4 L'IA pour les administrations des douanes

L'IA / ML transforme de plus en plus les opérations douanières. En adoptant l'IA / ML, les administrations des douanes peuvent exploiter toute la valeur de leurs données, qu'elles soient structurées, semi-structurées ou non structurées. Ces technologies permettent aux administrations des douanes d'analyser de grandes quantités de données et d'améliorer la prise de décision dans des domaines tels que la gestion des risques, la détection des fraudes, l'inspection du fret et l'affectation des ressources, augmentant ainsi l'efficacité globale. L'IA / ML permet également aux administrations des douanes de relever des défis mondiaux tels que la contrebande transfrontalière, la non-conformité et l'augmentation des volumes du commerce électronique et de mieux s'adapter au paysage dynamique du commerce mondial et aux défis en matière de sûreté.

Cependant, la fracture numérique se creuse entre les administrations des douanes du monde entier, de nombreux Membres de l'OMD n'ayant pas les capacités techniques ou l'infrastructure nécessaires pour tirer pleinement parti des technologies d'IA / ML. Il est essentiel de résorber cette fracture numérique pour que toutes les administrations des douanes, quelles que soient leurs capacités technologiques actuelles, puissent adopter ces outils puissants afin de moderniser leurs opérations et de relever efficacement les nouveaux défis mondiaux.

3 Tendances de l'IA / ML dans le domaine des douanes et du commerce

3.1 Modèles d'IA avancés

Les modèles d'IA avancés transforment l'administration des douanes en améliorant l'évaluation des risques, la détection des fraudes et les inspections du fret grâce à l'apprentissage et à la reconnaissance de schémas fondés sur les données. Il s'agit notamment de modèles tels que les réseaux antagonistes génératifs (RAG) et les auto-encodeurs variationnels (AEV)⁷ pour analyser des schémas et générer des données réalistes, permettant ainsi la vérification de documents, la détection d'anomalies et l'analyse prédictive.

Les grands modèles de langage (LLM), tels que GPT-4 et LLaMA, s'appuient sur des architectures de transformeurs pour traiter le langage naturel, ce qui les rend idéaux pour la classification automatisée des documents, le traitement des déclarations en douane et la réponse aux demandes de renseignements. Ces modèles permettent d'extraire des informations à partir de données non structurées, de contribuer à l'établissement de profils de risque et de rationaliser les contrôles de conformité. En outre, les systèmes de reconnaissance d'image basés sur l'IA, qui s'appuient sur l'apprentissage profond, améliorent le scannage du fret en identifiant les objets dissimulés et en détectant les anomalies dans les données de radiographie et de scanographie.

Les administrations des douanes bénéficient d'une réduction des délais de traitement, d'une amélioration de la conformité et d'une meilleure détection des activités illicites. L'utilisation de l'apprentissage profond

⁷ Réseaux antagonistes génératifs (RAG) : modèles d'IA comportant deux parties : l'une crée des données et l'autre vérifie si elles ont l'air réelles. Les deux travaillent ensemble pour produire des résultats réalistes tels que des images, des vidéos ou du texte. Auto-encodeurs variationnels (EAV) : modèles d'IA qui apprennent des schémas dans les données et créent de nouveaux exemples similaires sur la base de ces schémas. Ils peuvent générer de nouveaux échantillons de données qui sont similaires aux données d'origine en échantillonnant à partir de modèles appris.

et de l'apprentissage par renforcement⁸ au sein des douanes accélère non seulement les flux de travail opérationnels, mais pourrait également fournir une base fondée sur les données pour l'élaboration des politiques, permettant aux administrations des douanes de s'adapter plus efficacement à l'évolution de la dynamique commerciale et aux menaces émergentes.

À mesure que les modèles d'IA continuent d'évoluer, ils devraient s'intégrer à un large éventail de technologies, notamment les capteurs de l'Internet des objets (IdO), les registres commerciaux basés sur la chaîne de blocs, l'automatisation des processus robotiques (APR), la réalité augmentée (RA) et la réalité virtuelle (RV), ce qui doit favoriser des opérations douanières plus robustes, plus transparentes et plus efficaces.

3.2 Le rôle de l'IA générative dans les opérations douanières

L'apparition de l'IA générative en 2022 a introduit des capacités de transformation dans les opérations douanières. En s'appuyant sur les vastes ensembles de données des systèmes de gestion douanière et des plateformes de guichet unique, les administrations des douanes peuvent établir leur propre LLM de base en adaptant des LLM à code source ouvert, tels que LLaMA⁹, et les entraîner avec des données douanières, notamment les données issues des réglementations commerciales, des codes tarifaires, des formulaires de déclaration et des historiques de conformité. En exploitant la puissance du traitement automatique du langage naturel et de l'apprentissage contextuel, ces LLM de base, entraînés sur des données douanières massives peuvent prendre en charge des tâches complexes, telles que la classification des documents, l'établissement de profils de risque, la détection des fraudes et l'application des politiques. Ils peuvent également analyser des données non structurées, repérer des schémas et produire des mises en perspective afin d'améliorer les stratégies de ciblage et les mesures de sûreté aux frontières. En outre, les capacités génératives permettent aux LLM d'interpréter les réglementations commerciales et de contribuer à la planification de scénarios, d'améliorer la planification stratégique et d'accroître l'efficacité globale. En exploitant efficacement leurs propres données parallèlement à des modèles LLM ouverts, les administrations des douanes peuvent exploiter tout le potentiel de l'IA générative.

3.3 L'approche HITL (*Human-in-the-Loop* – avec intervention humaine) dans les opérations douanières

Si les modèles avancés d'IA / ML et l'IA générative offrent des avantages significatifs pour les opérations douanières, une autre tendance importante concerne l'adoption de l'approche « Human-in-the-Loop » (HITL), c'est-à-dire avec intervention humaine. Cette approche garantit que les systèmes d'IA assistent, mais ne remplacent pas la prise de décision humaine. L'approche HITL implique une supervision humaine dans le processus décisionnel de l'IA, permettant aux agents des douanes d'examiner et de valider les recommandations de l'IA, assurant ainsi un équilibre entre l'automatisation et l'expertise humaine.

3.3.1 Garantir la responsabilisation et la conformité

Validation des résultats de l'IA : les agents des douanes peuvent examiner les informations générées par l'IA pour s'assurer que les décisions sont conformes aux normes légales et réglementaires. Pour que la validation humaine contribue à maintenir la conformité, elle doit être soutenue par une politique d'intégrité solide afin d'atténuer les risques de biais ou de corruption et d'assurer la transparence des opérations douanières.

⁸ L'apprentissage par renforcement consiste à apprendre par essais et erreurs, en maximisant les enseignements tirés grâce au retour d'information.

⁹ LLaMA (Large Language Model Meta AI) – LLM open-source développé par Meta, conçu à des fins de recherche.

Compréhension du contexte : les humains fournissent un contexte que les modèles d'IA peuvent ne pas saisir pleinement, comme les facteurs géopolitiques, les nuances culturelles ou les circonstances exceptionnelles affectant les pratiques commerciales. Cela permet de s'assurer que les décisions sont appropriées et tiennent compte de tous les facteurs pertinents.

3.3.2 Renforcer la confiance et la transparence

Renforcer la confiance dans les systèmes d'IA : le fait de faire intervenir des êtres humains renforce la confiance parmi les parties prenantes, car les décisions ne sont pas uniquement prises par des systèmes automatisés, ce qui confère un certain degré d'assurance à l'égard des processus qui font appel au jugement humain. Toutefois, des garanties d'intégrité et de transparence doivent être mises en place pour assurer des décisions équitables et non biaisées.

Transparence dans la prise de décision : les décisions fondées uniquement sur l'IA peuvent manquer de transparence, car les modèles complexes tels que les réseaux neuronaux fonctionnent comme des « boîtes noires », ce qui rend difficile de déterminer comment les données d'entrée conduisent aux données de sortie. Sans explications claires, il devient difficile de justifier les décisions, en particulier dans les contextes juridiques et de conformité où l'obligation de rendre des comptes s'impose. L'approche HITL permet d'expliquer comment les décisions sont prises, ce qui est essentiel pour la transparence et la responsabilisation. Les agents des douanes peuvent justifier les mesures prises, ce qui est essentiel dans les contextes juridiques et de conformité.

3.3.3 Gérer les considérations éthiques et juridiques

Prévenir les biais et la discrimination : la surveillance humaine permet de repérer et d'atténuer les biais éventuels dans les modèles d'IA, garantissant ainsi un traitement équitable de tous les opérateurs et le respect des lois antidiscrimination. Cela est particulièrement important lorsque les modèles d'IA sont entraînés sur des données historiques qui peuvent contenir des biais.

Responsabilité légale : les systèmes d'IA fonctionnent comme des outils de conseil pour soutenir la prise de décision. La responsabilité de la prise de décision incombe toujours aux agents humains, qui doivent rendre des comptes en vertu de la loi. Toutefois, la question de la responsabilité dans les décisions prises par l'IA reste ouverte, ce qui souligne la nécessité de disposer de cadres juridiques clairs pour traiter la question de la responsabilisation alors que les systèmes d'IA ne cessent d'évoluer.

3.3.4 S'adapter aux environnements dynamiques

Gérer des scénarios imprévisibles : les humains sont mieux équipés pour gérer les événements imprévus ou les anomalies auxquels les modèles d'IA n'ont peut-être pas été entraînés. En cas d'événements mondiaux inattendus affectant le commerce, le jugement humain est crucial.

Amélioration continue : les retours d'information des agents des douanes peuvent être utilisés pour ré-entraîner et améliorer les modèles d'intelligence artificielle. Ce processus itératif améliore les performances des systèmes d'IA au fil du temps, les rendant plus efficaces et plus fiables.

3.3.5 Trouver un équilibre entre efficacité et expertise

Optimiser les flux de travail : l'approche HITL permet aux systèmes d'IA de gérer les tâches de routine, libérant ainsi les agents des douanes pour qu'ils se concentrent sur les cas complexes qui nécessitent un jugement humain. Cela permet d'optimiser l'utilisation des ressources humaines et d'améliorer l'efficacité globale.

Tirer parti de l'expérience : les agents expérimentés peuvent mettre à profit leur expertise pour interpréter les données générées par l'IA, ce qui permet de prendre des décisions plus nuancées et plus efficaces. Leurs observations peuvent également guider le développement de modèles d'IA améliorés.

3.4 IA basée sur le cloud dans les opérations douanières

L'IA basée sur le cloud, qui fournit des services hébergés via Internet sur des serveurs distants, offre une puissance de traitement et un stockage de données évolutifs pour les applications d'IA. Elle s'est imposée comme une tendance généralisée, un nombre croissant d'organisations adoptant des plateformes cloud pour développer, déployer et mettre à l'échelle des solutions d'IA. Cette évolution est motivée par la rentabilité, car le modèle de tarification « pay-as-you-go » (prépayé) élimine la nécessité de réaliser des investissements initiaux importants dans le matériel et la maintenance, ce qui réduit les coûts opérationnels globaux. Les plateformes d'IA basées sur le cloud permettent un déploiement rapide des projets d'IA, une mise à l'échelle efficace des opérations d'IA / ML et le traitement de vastes ensembles de données sans nécessiter d'infrastructure étendue sur site.

En fonction de la sensibilité des données et des exigences en matière de sécurité, les administrations des douanes peuvent opter pour des modèles de *cloud privé* pour un contrôle et une sécurité accrus ou des modèles de *cloud hybride*¹⁰ pour équilibrer l'évolutivité et la protection des données. Ces options flexibles garantissent des solutions accessibles, évolutives et rentables, tout en répondant aux préoccupations en matière de sécurité des données et de conformité.

3.4.1 Répondre aux préoccupations en matière de sécurité des données

Les fournisseurs de services de cloud utilisent des mesures de protection robustes pour répondre aux besoins des administrations des douanes en matière de sécurité des données. La *résidence des données* est un concept important qui permet aux organisations de décider où (dans quel pays ou quelle région) leurs données sont physiquement stockées. Cela leur permet de se conformer aux règles en matière de *souveraineté des données*, c'est-à-dire les lois qui s'appliquent aux données en fonction du pays où elles sont stockées.

Les administrations des douanes peuvent opter pour un cloud privé ou un cloud hybride afin de mieux contrôler les informations sensibles. Ces choix leur permettent de décider où et comment leurs données sont stockées et traitées, et donc de se conformer aux réglementations locales et d'assurer la sécurité des données.

Les principales plateformes de cloud respectent également des normes de sécurité internationales strictes¹¹. Elles utilisent des méthodes avancées telles que le chiffrement, l'authentification à plusieurs facteurs et les contrôles d'accès basés sur les rôles pour s'assurer que les données restent sécurisées et que seuls les utilisateurs autorisés peuvent y accéder.

¹⁰ Un cloud privé est un environnement de cloud réservé à une seule organisation, hébergé sur site ou par un fournisseur tiers et qui n'est pas partagé avec d'autres clients. Un cloud hybride combine des ressources cloud privées et publiques, ce qui permet aux entreprises de conserver leurs données dans un environnement privé sécurisé tout en tirant parti de l'évolutivité et de la flexibilité du cloud public pour les flux de travail moins sensibles.

¹¹ Parmi celles-ci : la norme ISO/IEC 27017, qui fournit des directives pour les contrôles de sécurité de l'information applicables aux services cloud ; et SOC (Service Organization Control) 2, une norme américaine qui détaille la manière dont les fournisseurs de services doivent gérer les données de leurs clients en toute sécurité, souvent adoptée au niveau international également.

4 Exigences légales pour l'adoption de l'IA / ML

4.1 Approches nationales de la réglementation de l'IA

Les gouvernements du monde entier adoptent des stratégies diverses pour réglementer l'IA, reflétant les différences de traditions juridiques, de priorités politiques et de niveaux d'avancement technologique. Ces approches peuvent être classées en trois grandes catégories : la législation formelle, les cadres de gouvernance et les directives, et les modèles hybrides qui combinent des éléments de ces deux types de législation.

4.1.1 Législation formelle

Certains pays adoptent des lois spécifiques pour réglementer l'IA, créant des obligations juridiquement contraignantes pour les développeurs, les utilisateurs et les autres parties prenantes. L'Union européenne (UE) illustre cette voie législative avec son règlement sur l'intelligence artificielle (règlement sur l'IA) qui est entré en vigueur le 1^{er} août 2024¹². Ce cadre juridique complet vise à classer les systèmes d'IA en fonction de leur niveau de risque – inacceptable, élevé, limité et minimal – et prévoit des obligations spécifiques pour chaque catégorie. Par exemple, les applications d'IA à haut risque, qui pourraient inclure des systèmes douaniers d'évaluation des risques ou de détection des fraudes, seraient soumises à des exigences strictes telles que des évaluations de conformité, des obligations de transparence et des dispositions relatives à la surveillance humaine. L'objectif est de garantir que les systèmes d'IA sont sûrs, qu'ils respectent les droits fondamentaux et qu'ils favorisent la confiance entre les États membres de l'UE.

De même, la Chine a établi un cadre réglementaire à plusieurs niveaux pour l'IA qui comprend à la fois des lois et des règlements contraignants, tels que ses Mesures administratives provisoires pour les services d'intelligence artificielle générative, entrées en vigueur le 15 août 2023¹³ et les Dispositions administratives relatives aux algorithmes de recommandation dans les services d'information basés sur Internet (2021)¹⁴. L'approche de la Chine vise à maîtriser le développement de l'IA en fonction des intérêts et des préoccupations en matière de sécurité, ainsi qu'à parvenir à un équilibre entre l'innovation, d'une part, et la sécurité nationale, les préoccupations éthiques et les valeurs sociétales, d'autre part.

4.1.2 Cadres de gouvernance et directives

D'autres pays préfèrent des directives ou des cadres non contraignants pour orienter le développement de l'IA de manière responsable sans imposer de contraintes juridiques strictes. Les États-Unis, par exemple, utilisent une approche sectorielle flexible qui met l'accent sur l'innovation. En 2020, la Maison-Blanche a publié des principes de régulation de l'IA, axés sur la confiance du public, la transparence et l'équité¹⁵. Le National Institute of Standards and Technology (NIST) fournit des orientations volontaires pour promouvoir une IA digne de confiance. L'objectif est de favoriser l'innovation en matière d'IA tout en tenant compte des risques, sans entraver le progrès technologique par des réglementations trop lourdes.

Le Japon a publié des directives éthiques plutôt que des lois formelles, afin d'encourager l'innovation tout en garantissant un développement et un déploiement responsables de l'IA. Le gouvernement japonais a publié, dans ses « Principes sociaux de l'IA centrée sur l'humain », un ensemble de directives éthiques pour

¹² Commission européenne (2024). Cadre réglementaire pour l'IA. Façonner l'avenir numérique de l'Europe.

¹³ Administration du cyberspace de la Chine. (2023). Mesures pour la gestion des services d'intelligence artificielle générative.

¹⁴ Administration du cyberspace de la Chine. (2022). Dispositions administratives relatives à la recommandation algorithmique pour les services d'information sur Internet (Ordonnance n° 9).

¹⁵ Maison-Blanche – Bureau de la gestion et du budget (2020). Orientations pour la réglementation des applications de l'IA.

l'IA qui fournissent des principes pour le développement et l'utilisation responsables de l'IA¹⁶. Ces directives couvrent différents aspects, notamment l'équité, la transparence, la responsabilisation et la protection de la vie privée. Le gouvernement a également publié des directives interministérielles sur l'IA, qui décrivent les rôles et les responsabilités des différents ministères et agences dans la promotion du développement de l'IA et la gestion des risques potentiels.

Singapour a adopté une approche proactive et mesurée de la gouvernance et de la réglementation de l'IA, en introduisant le Modèle de cadre de gouvernance de l'IA¹⁷. Ce cadre fournit des directives volontaires que les organisations peuvent adopter lorsqu'elles développent et déploient des systèmes d'IA, qui fournit des conseils pratiques sur la gouvernance interne, la gestion des risques et la communication avec les parties prenantes. Un Conseil consultatif sur l'éthique de l'IA a également été créé afin de fournir des conseils permanents et de promouvoir une IA éthique. L'objectif est de renforcer la confiance du public et d'encourager l'innovation responsable en matière d'IA.

L'Australie a publié le « Cadre éthique de l'IA », articulé autour de huit principes, dont la protection de la vie privée, la fiabilité, la transparence et la responsabilisation¹⁸. Ce cadre fournit des conseils aux entreprises pour mettre en œuvre l'IA de manière éthique, en veillant à ce que les technologies soient développées de manière responsable et conformes aux valeurs sociétales.

4.1.3 Approches hybrides

Certains pays combinent des éléments de législation formelle avec des directives flexibles, adaptant ainsi la réglementation à des contextes spécifiques. L'approche du Canada en matière de gouvernance de l'IA est hybride, utilisant un mélange de politiques contraignantes et de cadres volontaires. La Loi sur l'IA et les données (LIAD)¹⁹ fournit un cadre juridique pour réglementer les systèmes d'IA, tandis que les directives éthiques et les cadres volontaires, tels que l'Outil d'évaluation de l'incidence algorithmique, fournissent des conseils aux organisations pour développer et utiliser l'IA de manière responsable. Cette approche hybride permet au Canada de concilier le besoin de sécurité juridique et la flexibilité nécessaire pour s'adapter à l'évolution rapide du domaine de l'IA.

Le Royaume-Uni utilise une réglementation hybride sectorielle spécifique, complétée par des directives générales²⁰. Elle se concentre sur des principes tels que la sécurité, la transparence et l'équité, mis en œuvre par les régulateurs existants, plutôt que sur une nouvelle législation. Le gouvernement britannique a publié une Stratégie nationale en matière d'IA, qui expose sa vision du développement de l'IA et définit les principes d'une IA responsable, ainsi que le Cadre éthique de l'IA, qui fournit des orientations sur les considérations éthiques relatives au développement et à l'utilisation de l'IA.

4.2 Efforts internationaux pour réglementer l'IA

La collaboration internationale s'est intensifiée, les Nations Unies et l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ayant annoncé un renforcement de leur collaboration en matière

¹⁶ Gouvernement du Japon. (2019). Principes sociaux de l'IA centrée sur l'humain.

¹⁷ AI Verify Foundation (AIVF) et Infocomm Media Development Authority (IMDA) (2024). « *Model AI Governance Framework for Generative AI* » (Modèle de cadre de gouvernance de l'IA pour l'IA générative).

¹⁸ Gouvernement australien, ministère de l'Industrie, des Sciences, de l'Énergie et des Ressources. (2019). « *Australia's AI Ethics Framework* » (Cadre éthique de l'IA en Australie).

¹⁹ Gouvernement canadien (2022). *Loi sur l'IA et les données* (« LIAD »).

²⁰ Gouvernement britannique, ministère du Numérique, de la Culture, des Médias et du Sport (2022). « *Establishing a pro-innovation approach to regulating AI: An overview of the UK's emerging approach* » (Établir une approche favorable à l'innovation pour réglementer l'IA : vue d'ensemble de l'approche émergente du Royaume-Uni).

de gouvernance de l'IA. L'OCDE a adopté les Principes de l'IA en 2019 (mis à jour en 2024)²¹, un ensemble de directives visant à promouvoir le développement et l'utilisation d'une IA digne de confiance et responsable. Le G7 et le G20 ont également adopté des recommandations clés pour guider le développement et le déploiement responsables de l'IA. Les recommandations du G7 en matière d'IA comprennent 11 principes directeurs pour la sécurité et la fiabilité, ainsi qu'un code de conduite volontaire visant à promouvoir un développement éthique et responsable de l'IA²². Le G20 a en outre fourni des orientations essentielles sur la gouvernance de l'IA, en préconisant une intendance responsable de l'IA digne de confiance et en encourageant les pays membres à élaborer des stratégies nationales en matière d'IA reflétant leurs priorités et préoccupations individuelles²³.

En mars 2024, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté une résolution intitulée « Saisir les possibilités offertes par des systèmes d'intelligence artificielle sûrs, sécurisés et dignes de confiance pour le développement durable », mettant l'accent sur les principes éthiques de l'IA et sur le respect de la législation internationale en matière de droits de l'homme²⁴. En outre, en 2021, l'UNESCO a adopté la Recommandation sur l'éthique de l'intelligence artificielle, engageant les 193 États membres des Nations Unies à respecter des principes éthiques dans le développement de l'IA²⁵.

4.3 Implications pour les administrations des douanes

Dans le monde entier, les gouvernements s'efforcent de réglementer l'IA de manière à préserver les valeurs sociétales sans entraver le progrès technologique. La législation formelle fournit des règles claires et applicables ainsi qu'une sécurité juridique, mais elle peut être rigide, risquer d'étouffer l'innovation et être lente à s'adapter aux changements technologiques. Les cadres de gouvernance offrent une certaine flexibilité, encouragent l'innovation et peuvent être rapidement mis à jour, mais leur nature non contraignante peut entraîner un manque de cohérence en matière d'adoption et de mise en œuvre. Les approches hybrides visent un équilibre entre surveillance réglementaire et flexibilité adaptée à des secteurs spécifiques, mais elles peuvent créer de la complexité en matière de conformité et un chevauchement potentiel entre les réglementations et les directives.

Alors que les lois et les cadres de gouvernance sur l'IA continuent d'évoluer, les administrations des douanes sont confrontées au défi complexe d'assurer la conformité tout en s'adaptant aux nouveaux développements. Les différentes approches mondiales en matière de réglementation de l'IA soulignent la nécessité pour les administrations des douanes de rester vigilantes et proactives dans l'adoption des technologies d'IA / ML.

Pour naviguer dans ce paysage de manière responsable et conformément aux lois et directives applicables, il est impératif que les administrations des douanes restent informées de ces diverses approches réglementaires et des changements en cours. Cela implique un suivi des lois existantes, des propositions de lois et des directives émises par les organisations nationales et internationales. En

²¹ OCDE. (2024). Façonner une approche de l'intelligence artificielle centrée sur l'humain : Principes de l'IA de l'OCDE.

²² G7. (2023). « International Guiding Principles on Artificial Intelligence and Code of Conduct for Advanced AI Systems » (*Principes directeurs internationaux sur l'intelligence artificielle et code de conduite pour les systèmes d'intelligence artificielle avancés*).

²³ G20. (2019). Principes du G20 en matière d'IA. En annexe de la Déclaration ministérielle du G20 sur le commerce et l'économie numérique.

comprenant les différents modèles réglementaires, les instances douanières peuvent mieux se préparer à l'intégration fiable et éthique de l'IA dans leurs activités.

Une approche proactive consiste à intégrer les obligations légales aux bonnes pratiques éthiques, quel que soit l'environnement réglementaire spécifique dans lequel elles opèrent. Les administrations des douanes peuvent tirer profit de l'adoption des bonnes pratiques établies dans les régions dotées d'une réglementation avancée en matière d'IA, même si leur propre pays ou territoire ne dispose pas d'une réglementation spécifique dans ce domaine. Cette stratégie leur permet d'exploiter efficacement les avantages de l'IA tout en respectant des normes juridiques et éthiques élevées. Les principaux éléments à prendre en considération sont le respect strict des lois de leur pays ou territoire, l'adoption réfléchie des bonnes pratiques internationales et la flexibilité nécessaire pour adapter les stratégies au fur et à mesure de l'apparition de nouvelles réglementations.

En adoptant les bonnes pratiques issues de divers modèles réglementaires, en veillant au respect des lois applicables et en étant préparées à modifier les stratégies en fonction de l'évolution de la réglementation, les administrations des douanes peuvent tirer efficacement parti des technologies de l'IA. Cette approche permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi de maintenir la confiance du public et de soutenir la mission de l'autorité, qui consiste à faciliter le commerce légitime tout en garantissant la sécurité et le respect des normes internationales.

4.4 Chiffrement des données, anonymisation et gestion du consentement

La protection des données personnelles et sensibles revêt une importance capitale lors de l'adoption des technologies d'IA et de ML. La mise en œuvre de mesures techniques robustes est essentielle pour atténuer les risques liés au traitement des données. Il s'agit notamment des mesures suivantes :

- Chiffrement des données – il est impératif d'utiliser des protocoles de chiffrement renforcé pour protéger les données pendant leur transmission (chiffrement en transit) et leur stockage (chiffrement au repos), empêchant ainsi tout accès non autorisé en cas d'interception ou de violation. La mise à jour régulière des méthodes de chiffrement est également essentielle pour se prémunir contre les menaces de cybersécurité en constante évolution.
- Anonymisation et pseudonymisation – il s'agit de stratégies supplémentaires visant à améliorer la confidentialité des données. L'anonymisation consiste à traiter les données de manière à ce que les personnes ne puissent pas être identifiées. Lorsque les données sont entièrement anonymisées, elles échappent souvent au champ d'application de nombreuses réglementations en matière de protection des données, ce qui permet d'alléger le fardeau de la conformité. La pseudonymisation, quant à elle, consiste à remplacer les informations d'identification par des pseudonymes, ce qui permet d'analyser les données tout en offrant une protection accrue de la vie privée. Il est important de noter que les données pseudonymisées sont toujours considérées comme des données à caractère personnel en vertu du RGPD et doivent être traitées en conséquence.
- Gestion du consentement – il s'agit d'un autre aspect essentiel de la protection des données. Pour les administrations des douanes, le traitement des données est souvent fondé sur des obligations légales plutôt que sur le consentement. Toutefois, le consentement est requis dans le cadre de programmes facultatifs tels que les programmes de voyageurs ou les programmes de divulgation volontaire. Dans ces cas, le consentement doit être donné librement, de manière spécifique, en connaissance de cause et sans ambiguïté. Les administrations des douanes devraient tenir des registres des consentements obtenus et prévoir, le cas échéant, des mécanismes de révocation simples.

- **Transparence et équité des algorithmes** – il s'agit de considérations importantes lors de la mise en œuvre de systèmes d'IA / ML. S'efforcer de rendre les décisions d'IA / ML compréhensibles renforce la confiance et respecte les exigences de transparence énoncées dans des réglementations telles que le RGPD. Si les algorithmes complexes peuvent être opaques, il est essentiel de fournir des explications sur les décisions prises. En outre, il est essentiel de veiller à ce que les modèles d'IA / ML ne perpétuent pas la discrimination. Il est nécessaire de tester et de valider régulièrement les modèles afin de détecter et de corriger les biais susceptibles d'affecter négativement les décisions concernant des individus ou des groupes.
- **Gouvernance et sécurité des données** – cet aspect doit être prioritaire pour protéger les informations sensibles. La mise en place de contrôles d'accès stricts limite l'accès aux données au personnel autorisé qui en a besoin pour remplir ses fonctions, en utilisant des mécanismes d'authentification et d'autorisation. Il est important de conserver des pistes d'audit détaillées sur les activités de traitement des données pour contrôler les accès non autorisés et faciliter les audits.

4.5 Respect de l'utilisation des données et des droits de propriété intellectuelle (DPI)

Lorsque les administrations des douanes adoptent les technologies d'IA / ML, il est essentiel de veiller au respect des réglementations relatives à l'utilisation des données et aux droits de propriété intellectuelle (DPI). Cela est particulièrement important lorsqu'il s'agit de traiter des informations commerciales sensibles fournies par les opérateurs dans le cadre de leurs obligations légales. Les éléments clés à prendre en considération pour assurer la conformité de l'utilisation des données sont les suivants :

- **base légale** : veiller à ce que l'utilisation des données commerciales pour les systèmes d'IA / ML soit conforme à la base légale en vertu de laquelle elles ont été collectées, sans dépasser la portée de la finalité initiale de leur collecte ;
- **confidentialité** : mettre en œuvre des mesures robustes pour empêcher l'accès non autorisé aux données ou la divulgation d'informations sensibles lors de l'utilisation de données commerciales pour les systèmes d'IA / ML ;
- **protection des données** : atténuer les risques pour la vie privée en anonymisant ou en agrégeant les données commerciales avant l'entraînement des systèmes d'IA / ML, en veillant à ce que des techniques efficaces soient mises en œuvre pour empêcher la réidentification ;
- **implication de tiers** : lorsque des fournisseurs externes sont impliqués, il convient de s'assurer que le partage des données est conforme aux obligations en matière de protection des données par le biais de clauses contractuelles appropriées ;
- **conformité internationale** : respecter les dispositions des conventions et accords commerciaux internationaux concernant l'utilisation et la protection des données commerciales.

En ce qui concerne le respect des DPI, les administrations des douanes ont les obligations suivantes :

- **respect des droits existants** : veiller à ce que les modèles d'IA, les algorithmes ou les logiciels utilisés dans leurs projets respectent les lois existantes en matière de droits de propriété intellectuelle ;
- **obtention des licences nécessaires** : obtenir les licences nécessaires pour les outils d'IA et veiller à ce que des technologies propriétaires ne soient pas utilisées sans autorisation ;
- **protection de leur propre propriété intellectuelle** : si une administration des douanes développe des solutions d'IA personnalisées, elle doit protéger sa propriété intellectuelle afin d'empêcher toute utilisation ou reproduction non autorisée.

En gérant soigneusement l'utilisation des données, en mettant en œuvre des mesures de sauvegarde solides et en respectant les normes juridiques et éthiques relatives aux données et aux DPI, les administrations des douanes peuvent exploiter efficacement les technologies d'IA / ML tout en conservant la confiance et la coopération de la communauté commerciale. Cette approche garantit que les informations commerciales sensibles sont traitées de manière responsable et que tous les droits de propriété intellectuelle sont respectés tout au long du processus d'adoption de l'IA / ML.

4.6 Réglementation en matière de cybersécurité

L'adoption de l'IA / ML introduit de nouvelles vulnérabilités, accroît la complexité des systèmes et expose les administrations des douanes à des cybermenaces potentielles. Ces nouvelles vulnérabilités et ces nouveaux risques doivent être gérés afin de protéger les données sensibles, de garantir l'intégrité des systèmes et de maintenir la confiance du public. Le respect des réglementations en matière de cybersécurité est essentiel pour se prémunir contre les menaces susceptibles de compromettre la sécurité nationale, de perturber les échanges commerciaux ou d'exposer des informations confidentielles.

Il est donc impératif de disposer d'un cadre de cybersécurité solide, conforme aux exigences légales. Cela inclut :

- le respect des réglementations pertinentes en matière de cybersécurité – les administrations des douanes doivent se conformer à une série de lois et de réglementations en matière de cybersécurité, au niveau tant national qu'international. Ces règlements sont conçus pour protéger les systèmes d'information, garantir la confidentialité des données et empêcher les accès non autorisés ou les cyberattaques ;
- les normes et directives internationales – l'adoption de normes de cybersécurité internationalement reconnues, telles que la norme ISO/IEC 27001, offre une approche structurée de la gestion de la sécurité de l'information. Le respect de ces normes aide les organisations à mettre en œuvre les bonnes pratiques et à démontrer leur conformité par rapport aux attentes internationales ;
- la gestion globale des risques – les administrations des douanes doivent procéder à des évaluations approfondies des risques afin d'identifier et d'évaluer les menaces potentielles pesant sur leurs systèmes d'IA / ML et sur les données qu'ils traitent. Il s'agit d'analyser la probabilité et l'impact de diverses cybermenaces, notamment les violations de données, les accès non autorisés et les cyberattaques ciblant spécifiquement les algorithmes d'IA ;
- les contrôles d'accès avancés – les mécanismes de contrôle d'accès sont essentiels pour protéger les données sensibles et les systèmes critiques d'IA / ML. Les administrations des douanes devraient renforcer la sécurité et aller au-delà des systèmes traditionnels basés sur des mots de passe, par exemple en recourant à l'authentification à plusieurs facteurs. Le contrôle d'accès basé sur les rôles (CABR) doit être utilisé pour restreindre l'accès en fonction du rôle d'une personne au sein du programme d'IA ;
- la surveillance continue et la collecte de renseignements sur les menaces – pour surveiller la nature dynamique des cybermenaces, les administrations des douanes peuvent combiner des outils de surveillance avancés avec des mesures de sécurité traditionnelles et l'expertise humaine. Les audits de sécurité réguliers, la chasse aux menaces et les examens manuels devraient compléter les systèmes de détection automatisés.

5 Dispositions politiques pour l'adoption de l'IA / ML

L'adoption des technologies d'IA / ML dans les opérations douanières nécessite des dispositions politiques soigneusement conçues qui régissent la manière dont ces technologies sont intégrées, gérées et utilisées. Ces politiques guideront non seulement l'utilisation responsable des systèmes d'IA / ML, mais soutiendront également l'alignement stratégique sur les objectifs organisationnels et assureront l'intégration dans une stratégie de numérisation institutionnelle plus large. Ces politiques doivent également tenir compte des exigences légales et des normes éthiques, et soutenir des mesures de sécurité robustes. En établissant des cadres politiques exhaustifs, les administrations des douanes peuvent exploiter tout le potentiel des technologies d'IA / ML tout en atténuant les risques associés et en garantissant une innovation responsable dans leurs opérations.

Cette section décrit les principales dispositions politiques relatives à l'adoption de l'IA / ML par les douanes, en tenant compte des exigences légales plus larges déjà abordées dans la section précédente, notamment la protection des données et de la vie privée, l'utilisation des données et les réglementations en matière de cybersécurité.

Les équipes juridiques des douanes et les conseillers en réglementation jouent un rôle essentiel dans l'élaboration de politiques qui traitent de la manière dont les systèmes d'IA / ML interagissent avec ces exigences, notamment en ce qui concerne l'utilisation des données, la transparence des algorithmes et les considérations relatives à la protection de la vie privée. Il est essentiel de veiller à ce que les systèmes d'IA / ML fonctionnent dans le respect des contraintes légales pour qu'ils puissent être mis en œuvre de manière sûre et légale dans les opérations douanières.

Ces dispositions politiques devraient inclure la gouvernance, l'utilisation éthique, la gestion des données, la conception et le déploiement des systèmes, le renforcement des capacités, l'alignement réglementaire et l'amélioration continue.

5.1 Politiques internes

Gouvernance et supervision pour l'adoption de l'IA / ML – la mise en place d'une structure de gouvernance et de supervision solide constitue l'une des étapes fondamentales de l'adoption de l'IA / ML. Les politiques de gouvernance traitent également de la répartition des rôles et des responsabilités, garantissant une responsabilisation claire en ce qui concerne l'utilisation de l'IA / ML ainsi que le traitement des erreurs, des biais ou des manquements à l'éthique. Il s'agit notamment de mettre en place des comités de surveillance ou des groupes de travail composés de hauts fonctionnaires des douanes, d'experts en science des données, de personnel informatique, de conseillers juridiques et d'experts en politique afin de superviser les projets d'IA / ML, en veillant à l'alignement stratégique sur les opérations douanières et au respect du cadre juridique plus large. Cette gouvernance doit garantir que toutes les décisions sont prises de manière transparente, que les risques sont gérés de manière proactive et que les politiques sont mises à jour en fonction des changements technologiques et opérationnels.

Politiques de gestion des données et de sécurité – les politiques de gestion des données sont essentielles à l'adoption de l'IA / ML, pour régir la collecte, la qualité, la confidentialité et la sécurité des données. Ces politiques doivent également porter sur la manière dont les données sont partagées entre les services douaniers, avec d'autres organismes gouvernementaux et avec des partenaires extérieurs afin de promouvoir l'interopérabilité et de faciliter des approches intégrées de l'adoption de l'IA / ML.

Parallèlement, les politiques de confidentialité des données sont essentielles pour protéger les données commerciales, professionnelles et personnelles sensibles. Les politiques doivent être alignées sur les réglementations relatives à la protection des données, comme la protection des données contre l'accès non autorisé aux données et l'utilisation abusive de celles-ci, la garantie du consentement pour la collecte et le traitement des données, et l'anonymisation des informations personnelles. Les politiques de sécurité

fournissent des directives pour le chiffrement des données, le stockage sécurisé et les contrôles d'accès afin d'atténuer les risques de violations de données et de cyberattaques. Ensemble, ces politiques aident les administrations des douanes à gérer de manière responsable les vastes volumes de données nécessaires aux opérations d'IA / ML, tout en respectant les réglementations existantes en matière de protection des données et de la vie privée.

Politiques de conception, de développement et de déploiement des systèmes – les administrations des douanes doivent élaborer des politiques qui encadrent la conception, le développement et le déploiement des systèmes d'IA / ML. Celles-ci devraient fixer des normes claires en matière de validation, d'exactitude et d'adéquation des modèles afin de garantir que la conception et le développement soutiennent efficacement les fonctions douanières telles que la détection de la fraude, l'établissement de profils de risque et la facilitation des échanges. Les politiques de déploiement garantissent que les systèmes d'IA / ML sont mis en œuvre de manière systématique, ce qui inclut les directives sur la gestion du changement, la formation des utilisateurs et l'intégration du système dans les flux de travail existants. Ces politiques devraient également porter sur la conformité avec les réglementations en matière de cybersécurité, en veillant à ce que les systèmes soient résistants aux menaces et aux vulnérabilités.

Capacités et compétences internes pour l'IA / ML – pour garantir une adoption réussie de l'IA / ML, les administrations des douanes doivent investir dans le développement des capacités internes et des compétences nécessaires. Les politiques devraient soutenir des programmes de formation complets pour les agents des douanes, axés sur les principes de l'IA / ML, l'analyse des données et l'utilisation des systèmes. Outre la formation, les administrations des douanes peuvent faciliter les partenariats avec les établissements universitaires, les organismes de recherche et les experts du secteur privé afin de favoriser l'échange de connaissances et l'accès aux derniers développements en matière d'IA / ML.

Alignement des politiques – les politiques internes en matière d'IA doivent être alignées sur les exigences légales et réglementaires externes pour garantir une adoption conforme et responsable. Les politiques doivent être conçues de manière à respecter les cadres juridiques existants en matière de protection des données, de respect de la vie privée, de droits de propriété intellectuelle et de cybersécurité, comme nous l'avons vu en détail précédemment. Ces politiques internes garantissent que les technologies d'IA / ML respectent les frontières juridiques, les réglementations commerciales et les exigences transfrontalières en matière de conformité.

Intégration dans les opérations – enfin, les dispositions politiques relatives à l'adoption de l'IA / ML doivent porter sur la manière dont ces technologies sont stratégiquement intégrées dans les opérations douanières. Les politiques doivent préciser comment l'IA / ML s'aligne sur les processus opérationnels des douanes, les objectifs de facilitation des échanges et les stratégies économiques nationales. L'élaboration de feuilles de route stratégiques pour l'adoption de l'IA / ML permet aux administrations des douanes de hiérarchiser les initiatives en fonction de leur impact potentiel, de leur évolutivité et de leur pertinence opérationnelle. Ces feuilles de route garantissent que les technologies d'IA / ML ne répondent pas seulement aux besoins immédiats de la douane, mais contribuent également à la modernisation à long terme, à la gestion des risques et aux objectifs du commerce mondial.

En résumé, les dispositions politiques pour l'adoption de l'IA / ML impliquent une approche globale qui couvre la gouvernance, l'utilisation éthique, la gestion des données, le développement de systèmes, le renforcement des capacités, la conformité juridique, le suivi continu et l'alignement stratégique. Ces politiques constituent l'épine dorsale d'une adoption responsable de l'IA / ML, garantissant que les administrations des douanes peuvent exploiter efficacement les avancées technologiques tout en respectant les normes éthiques, les exigences légales et les objectifs opérationnels. En élaborant et en affinant ces dispositions politiques, les administrations des douanes peuvent se positionner de manière à tirer pleinement parti des technologies d'IA / ML pour des processus opérationnels plus efficaces, transparents et sécurisés.

5.2 Cadres et directives éthiques

L'intégration des technologies d'IA / ML dans les activités douanières telles que l'évaluation des risques, le ciblage ou la détection des fraudes soulève des questions d'éthique qui doivent être abordées dans le cadre de dispositions politiques judicieuses. Les politiques doivent veiller à ce que l'utilisation de l'IA / ML soit conforme aux principes d'équité, de transparence et de responsabilité. Les administrations des douanes devraient élaborer des directives éthiques pour l'utilisation de l'IA / ML, en fixant des normes pour le déploiement de ces technologies, la prise de décision et la manière dont les biais sont atténués.

Justice et équité – l'une des principales considérations éthiques consiste à garantir l'équité dans la manière dont l'IA / ML est appliquée aux opérations douanières. Les algorithmes utilisés pour la prise de décision en matière douanière, tels que l'établissement de profils de risque ou le ciblage des envois à inspecter, sont susceptibles d'introduire des biais qui peuvent affecter de manière disproportionnée certains opérateurs, certaines régions géographiques ou certains types de produits. Les politiques doivent donc imposer la détection, l'évaluation et l'atténuation des biais au sein des systèmes d'IA / ML.

Transparence et explicabilité – la transparence est essentielle pour instaurer la confiance dans les systèmes d'IA / ML. Les politiques doivent mettre l'accent sur l'explicabilité, en veillant à ce que les processus décisionnels de l'IA / ML soient compréhensibles et interprétables. Cela est particulièrement important lorsque les outils d'IA / ML sont utilisés pour l'évaluation des risques, la détermination des envois à inspecter et la détection des problèmes de conformité potentiels. Les politiques de transparence devraient porter sur la justification des décisions en matière d'IA / ML, être documentées et communiquées clairement aux parties prenantes, et éclairer la manière dont certaines conclusions sont tirées.

Prise de décision selon l'approche « human-in-the-loop » – il est important de maintenir une surveillance humaine dans les processus de décision critiques. Les politiques qui favorisent une approche « human-in-the-loop » garantissent que les résultats de l'IA / ML sont examinés et validés par des agents des douanes qualifiés. Les politiques devraient définir des critères permettant de déterminer quand et où un examen humain est nécessaire, c'est-à-dire un processus dans lequel les agents des douanes doivent appliquer leur expertise, leur jugement et leur compréhension du contexte aux décisions, en particulier dans les scénarios complexes ou à fort enjeu où les systèmes d'IA / ML peuvent être confrontés à des limites.

Confidentialité et éthique des données – l'utilisation de l'IA / ML dans les opérations douanières implique le traitement de grandes quantités de données, y compris des informations commerciales sensibles. Pour garantir une utilisation éthique des données, les politiques doivent mettre l'accent sur la protection de la vie privée et l'éthique des données, au-delà du simple respect du cadre légal et réglementaire. Les politiques doivent garantir que seules les données pertinentes sont utilisées à des fins d'IA / ML, en respectant les principes de minimisation des données et de limitation des finalités. En outre, les politiques devraient promouvoir la transparence concernant l'utilisation des données, en informant les parties prenantes à propos des données collectées, de la manière dont elles sont utilisées et des protections mises en place pour préserver leurs informations.

5.3 Atténuation des biais dans les modèles d'IA / ML

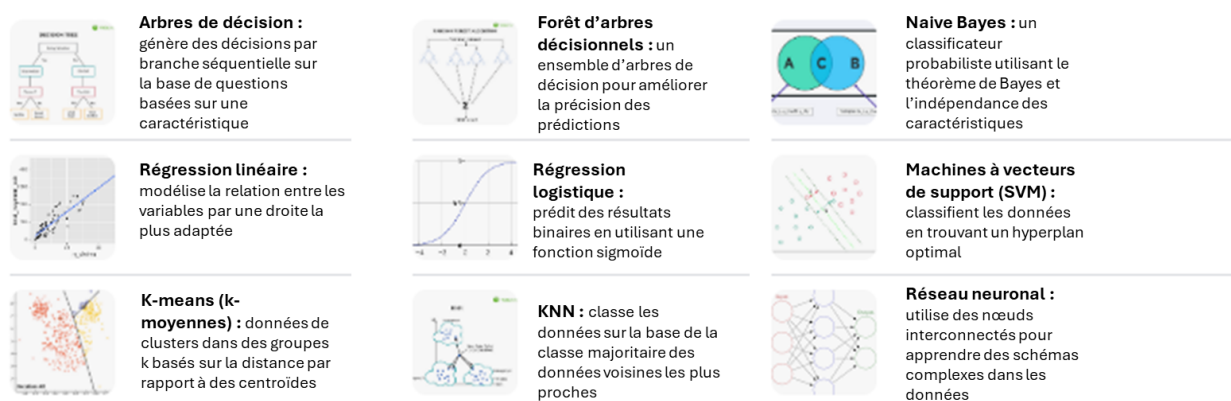
Les biais dans les modèles d'IA / ML constituent une préoccupation majeure pour les administrations des douanes, car ils peuvent avoir des conséquences involontaires qui compromettent l'équité, l'exactitude et la confiance dans les opérations douanières. Dans les opérations douanières, des modèles d'IA / ML biaisés peuvent signaler de manière disproportionnée certains opérateurs, certains pays ou certaines marchandises comme présentant un risque élevé, ce qui se traduit par un traitement inéquitable, des barrières commerciales et une perte potentielle de crédibilité pour l'administration des douanes. L'atténuation des biais est donc essentielle pour une utilisation éthique et efficace de l'IA / ML et nécessite

des mesures politiques ciblées pour repérer, traiter et surveiller les biais potentiels tout au long du cycle de vie du modèle.

Comprendre les sources de biais – pour atténuer efficacement les biais, il est important de comprendre les différentes sources dont ils peuvent provenir. Les biais dans les modèles d'IA / ML peuvent provenir de problèmes liés aux données, tels que des déséquilibres historiques dans les données utilisées pour l'entraînement du modèle, un étiquetage incorrect ou incomplet des données et un échantillonnage non représentatif qui ne permet pas de saisir les divers scénarios des opérations douanières. Par exemple, si un modèle d'IA / ML est entraîné principalement sur des données provenant de marchés d'exportation ou de types de produits spécifiques, il peut développer des schémas biaisés qui évaluent mal les niveaux de risque. Un biais algorithmique peut également apparaître si la conception du modèle et la sélection des caractéristiques favorisent intrinsèquement certains résultats ou renforcent des préjugés existants. C'est le cas, par exemple, des modèles qui accordent trop d'importance au pays d'origine dans l'évaluation des risques, signalant injustement certaines nations, ou lorsque la sélection des caractéristiques donne la priorité à des modèles de données historiques qui reflètent des préjugés obsolètes dans les relations commerciales. Les politiques d'atténuation des biais doivent tenir compte de ces sources de manière globale, en veillant à ce que les processus de données et de conception des algorithmes soient soigneusement examinés.

Qualité et représentativité des données – l'une des principales stratégies d'atténuation des biais consiste à améliorer la qualité des données et à garantir la représentativité des modèles d'IA / ML. Les politiques devraient mettre en œuvre des protocoles de collecte de données qui permettent d'obtenir des ensembles de données diversifiés et équilibrés représentant tous les segments des opérations douanières, y compris les différents types de marchandises, d'itinéraires commerciaux, d'opérateurs et de comportements en matière de conformité. Cette diversité permet d'éviter que les modèles ne développent des perspectives unilatérales susceptibles d'avoir un impact disproportionné sur certains groupes ou certaines activités. Les politiques devraient également mettre l'accent sur le nettoyage et la validation des données afin d'éliminer les erreurs, les incohérences et les valeurs aberrantes susceptibles de fausser l'entraînement du modèle et de conduire à des prédictions biaisées. En outre, les directives devraient exiger que les données soient périodiquement rafraîchies et mises à jour afin de refléter les modèles et comportements commerciaux actuels, réduisant ainsi le risque de biais dus à des informations obsolètes.

Figure 3 – Algorithmes de ML courants



Conception des algorithmes et politiques d'équité – pour lutter contre les biais algorithmiques, il faut examiner attentivement la manière dont les modèles d'IA / ML sont conçus, entraînés et validés. Les politiques devraient imposer des contraintes d'équité lors de l'élaboration des modèles, afin de garantir que l'algorithme ne favorise pas un groupe, une région ou un type de commerce par rapport à d'autres sans raison opérationnelle justifiée. Il peut s'agir d'appliquer des techniques d'entraînement équitable,

telles que la pondération équilibrée des caractéristiques, le rééchantillonnage des données d'apprentissage et l'intégration de mesures d'équité dans les critères d'évaluation des modèles. Par exemple, les administrations des douanes peuvent établir des politiques exigeant que les modèles d'IA / ML atteignent une précision équilibrée entre les différents profils d'opérateurs ou couloirs commerciaux, afin d'éviter le signalement ou l'examen disproportionné d'entités spécifiques. Les politiques devraient également décrire les processus de test des algorithmes en fonction de plusieurs scénarios afin de détecter et de rectifier tout biais avant le déploiement.

Surveillance régulière des biais – l'atténuation des biais n'est pas un effort ponctuel, mais un processus continu qui nécessite un contrôle et une évaluation permanents. Les politiques doivent établir des cadres pour des audits réguliers des modèles d'IA / ML, en se concentrant sur l'identification des signes de biais et des disparités involontaires dans les résultats des modèles. Ces audits peuvent être menés par des équipes internes ou des experts externes indépendants afin d'évaluer objectivement si les prévisions en matière d'IA / ML sont conformes aux principes d'équité et aux objectifs opérationnels. Les politiques de suivi devraient inclure des contrôles de routine des résultats des modèles afin de détecter tout schéma systématique de prise de décision biaisée et prévoir des mesures correctives en temps utile lorsque de tels biais sont repérés. Ces mesures correctives pourraient consister à réentraîner le modèle avec des données plus représentatives, à ajuster les algorithmes pour mieux équilibrer les résultats ou à réviser les processus opérationnels pour garantir une utilisation plus équitable des décisions des modèles d'IA / ML.

Mécanismes de transparence et de responsabilisation – la transparence des opérations d'IA / ML est essentielle pour atténuer les biais, comprendre le fonctionnement des modèles et déterminer les domaines de préoccupation potentiels. Les politiques devraient exiger des administrations des douanes qu'elles documentent et communiquent les processus de conception, de développement et de déploiement des modèles d'IA / ML, y compris les mesures prises pour repérer et atténuer les biais. Cette transparence permet aux parties prenantes, qu'il s'agisse du personnel interne, des opérateurs ou des partenaires extérieurs, de fournir un retour d'information et d'affirmer la responsabilité de l'administration des douanes concernant le caractère équitable des résultats produits par les modèles d'IA / ML.

En résumé, l'atténuation des biais dans les modèles d'IA / ML est un effort à multiples facettes qui nécessite des politiques portant sur la qualité des données, la conception des algorithmes, la transparence et la surveillance continue. En mettant en œuvre ces politiques, les administrations des douanes peuvent s'assurer que leurs systèmes d'IA / ML favorisent une prise de décision équitable, améliorent l'efficacité opérationnelle et préservent la confiance des parties prenantes. L'atténuation des biais permet non seulement de respecter les normes éthiques, mais aussi de s'assurer que les technologies d'IA / ML sont conformes aux principes d'équité, d'égalité et de responsabilité dans les opérations douanières.

6 Engagement des parties prenantes et communication

Il est essentiel pour une administration des douanes d'impliquer efficacement les parties prenantes dans les initiatives d'IA / ML afin de garantir l'adoption de ces technologies et de répondre aux besoins et aux préoccupations de toutes les parties concernées. L'engagement des parties prenantes doit être étendu et inclusif, impliquant le personnel interne, les partenaires externes, les autres services gouvernementaux, les associations sectorielles, le monde universitaire et le grand public. Le processus d'engagement vise à favoriser la collaboration, à obtenir un retour d'information et à garantir l'alignement sur les objectifs généraux, en améliorant l'efficacité, la transparence et la réactivité des opérations douanières.

Engagement du personnel interne – pour les parties prenantes internes telles que les agents des douanes, les équipes informatiques et la direction, l'engagement commence par des initiatives de renforcement des capacités et des programmes de sensibilisation. Les administrations des douanes peuvent organiser des sessions de formation et des ateliers pour sensibiliser le personnel interne au potentiel des technologies d'IA / ML et à la manière dont elles peuvent rationaliser les procédures douanières. Des réunions ouvertes régulières dans toute l'administration et des forums interservices permettent un dialogue ouvert sur les préoccupations, les suggestions et les considérations pratiques relatives à la mise en œuvre de l'IA / ML. L'implication du personnel dès le début du processus favorise l'appropriation et garantit l'intégration des perspectives opérationnelles dans les solutions d'IA / ML. Un groupe consultatif interne composé de membres de la direction, d'agents des douanes et d'informaticiens peut fournir un retour d'information continu sur le développement et le déploiement des initiatives en matière d'IA / ML, ce qui favorise un environnement dans lequel le personnel a le sentiment d'être un contributeur plutôt qu'un simple utilisateur final.

Engagement des partenaires externes – l'engagement des partenaires externes est crucial pour la réussite de la mise en œuvre de l'IA / ML dans les opérations douanières. Les administrations des douanes peuvent créer des forums et des groupes de travail pour réunir les parties prenantes telles que les importateurs, les exportateurs et les entreprises de logistique afin de discuter de la manière dont les outils d'IA / ML peuvent améliorer les processus commerciaux. Les tables rondes et les groupes de discussion avec les parties prenantes permettent aux partenaires d'exprimer leurs difficultés opérationnelles, ce qui garantit que leurs besoins sont pris en considération lors de la conception du projet. Des mises à jour et des consultations régulières garantissent la transparence et offrent des possibilités de rétroaction.

La participation des associations sectorielles permet de faire entendre la voix collective des entreprises concernées par les opérations douanières. Des ateliers de collaboration et des programmes pilotes avec la participation du secteur privé peuvent déboucher sur des solutions d'IA / ML plus efficaces et adaptées à des besoins spécifiques. Cette approche facilite la mise en œuvre grâce à l'adhésion préalable des entreprises membres. En favorisant un dialogue ouvert et la collaboration, les administrations des douanes peuvent élaborer des solutions efficaces, relever les défis de manière proactive et obtenir un soutien plus large pour leurs efforts de transformation numérique.

Engagement avec d'autres organismes gouvernementaux – la collaboration avec d'autres organismes gouvernementaux tels que les organismes chargés de la sécurité des frontières, de la lutte contre la fraude et les autorités réglementaires est essentielle pour l'alignement des initiatives d'IA / ML dans toutes les fonctions gouvernementales. Les administrations des douanes peuvent mettre en place des groupes de travail interagences pour discuter des objectifs communs et déterminer les synergies possibles entre les programmes d'IA / ML des différents organismes. Ces groupes d'action servent de plateformes de coordination pour éviter la duplication des efforts et assurer un partage transparent des données, favorisant ainsi l'efficacité des processus interagences. Un protocole d'accord entre les organismes peut définir des mécanismes de collaboration, des rôles et des responsabilités spécifiques pour l'élaboration et

la mise en œuvre d'initiatives en matière d'IA / ML qui soutiennent des objectifs gouvernementaux plus larges tels que la sûreté nationale et la conformité réglementaire.

Engagement avec le monde universitaire – l'implication du monde universitaire, y compris des universités et des instituts de recherche, est précieuse pour intégrer la recherche de pointe et les avancées technologiques dans les projets d'IA / ML. Les administrations des douanes peuvent collaborer avec des établissements universitaires dans le cadre de partenariats, de bourses de recherche ou de projets communs afin de tirer parti de l'expertise en matière d'IA / ML pour des applications douanières telles que l'analyse prédictive, l'évaluation des risques et l'analyse des données. En faisant appel à des experts universitaires, les administrations des douanes peuvent se tenir informées des tendances et des bonnes pratiques émergentes en matière d'IA / ML et intégrer des approches innovantes pour résoudre les problèmes. Des symposiums universitaires réguliers ou des tables rondes peuvent assurer un dialogue permanent, permettant aux universitaires de fournir un retour d'information constructif sur l'efficacité et les considérations éthiques des outils d'IA / ML dans les opérations douanières.

Engagement du public – pour le public, la transparence et l'ouverture sont essentielles. Les administrations des douanes peuvent s'appuyer sur des consultations publiques, des séances d'information et des plateformes en ligne pour informer le public sur les initiatives en matière d'IA / ML, solliciter des commentaires et retours d'information et répondre aux préoccupations concernant la confidentialité et la sécurité des données et l'impact global. Les enquêtes et les questionnaires diffusés par voie numérique permettent de recueillir efficacement l'avis du public et de s'assurer que la mise en œuvre des initiatives en matière d'IA / ML est conforme aux attentes de la société et aux normes réglementaires. Des dialogues ouverts, tels que des réunions ouvertes dans l'ensemble de l'administration des douanes ou des forums de discussion en ligne permettent au public d'exprimer ses opinions et d'obtenir des éclaircissements sur la manière dont l'IA / ML améliorera les processus douaniers tout en sauvegardant les intérêts du public.

6.1 Mécanismes de rétroaction et intégration dans la planification et l'exécution

Afin de recueillir et d'analyser efficacement les contributions des parties prenantes, les administrations des douanes doivent mettre en place de solides mécanismes de rétroaction, tels que des enquêtes, des discussions de groupe, des comités consultatifs et des systèmes de suivi continu. Des enquêtes régulières ciblant différents groupes de parties prenantes (par exemple, le personnel interne, les partenaires externes et le public) permettent d'évaluer la sensibilisation, les perceptions et la satisfaction à l'égard des initiatives d'IA / ML. Les consultations publiques offrent une enceinte de discussion pour un retour d'information ouvert, tandis que les comités consultatifs composés de représentants de chaque groupe de parties prenantes veillent à ce que les contributions soient recueillies de manière structurée. Ces mécanismes de rétroaction permettent aux administrations des douanes de comprendre les divers besoins et préoccupations de toutes les parties prenantes, ce qui permet de prendre des décisions éclairées.

Les informations recueillies grâce à ces mécanismes de rétroaction doivent être soigneusement prises en considération dans la planification et l'exécution des projets, afin de garantir qu'elles influencent la conception, le déploiement et l'optimisation du projet. Ce processus implique l'analyse des retours d'information, la hiérarchisation des suggestions en fonction de leur impact et de leur faisabilité, et la communication aux parties prenantes de la manière dont leur contribution est intégrée. Des mises à jour régulières et des rapports transparents sur les projets d'IA / ML renforcent la confiance et montrent que les préoccupations des parties prenantes sont prises au sérieux. En alignant ces mécanismes de retour d'information sur les stratégies d'engagement des parties prenantes, les administrations des douanes peuvent susciter l'adhésion de ces dernières, faciliter l'adoption sans heurts et améliorer l'efficacité des initiatives en matière d'IA / ML. Ce cycle continu d'engagement et de rétroaction garantit non seulement

la réussite du projet, mais favorise également la collaboration à long terme entre les parties prenantes et le soutien aux futures avancées technologiques.

6.2 Transparence et communication

Pour garantir la transparence et maintenir une communication ouverte, il est essentiel de communiquer efficacement les résultats et les exemples de réussite des projets d'IA / ML aux parties prenantes et au public. Cette communication permet d'instaurer la confiance, d'encourager l'engagement et de mettre en évidence la valeur que ces technologies apportent aux opérations douanières et aux processus commerciaux. Diverses stratégies peuvent être employées pour atteindre différents publics tout en soulignant les avantages et les réussites des initiatives en matière d'IA / ML.

Exemples de réussite et études de cas – la publication d'exemples de réussite et d'études de cas détaillés permet de démontrer efficacement les avantages tangibles des projets d'IA / ML. Ces études de cas doivent mettre en évidence les difficultés spécifiques rencontrées, la manière dont les solutions d'IA / ML ont été mises en œuvre et les améliorations mesurables obtenues, telles que la réduction des délais de dédouanement, l'amélioration de la précision du profilage des risques ou l'amélioration de la facilitation des échanges.

Événements et ateliers pour les parties prenantes – les événements organisés régulièrement à l'intention des parties prenantes, tels que des ateliers, des forums et des réunions d'information, sont autant de plateformes importantes pour présenter les résultats des projets d'IA / ML directement à des publics ciblés, y compris le personnel interne, les partenaires du secteur privé et d'autres organismes gouvernementaux. Ces événements facilitent une communication à double sens qui permet non seulement de partager les succès, mais aussi d'en discuter ouvertement, ce qui offre l'occasion aux parties prenantes de poser des questions et de fournir un retour d'information. Les démonstrations d'outils d'IA / ML en action lors de ces événements sont une occasion de présenter directement leur fonctionnalité et leur impact.

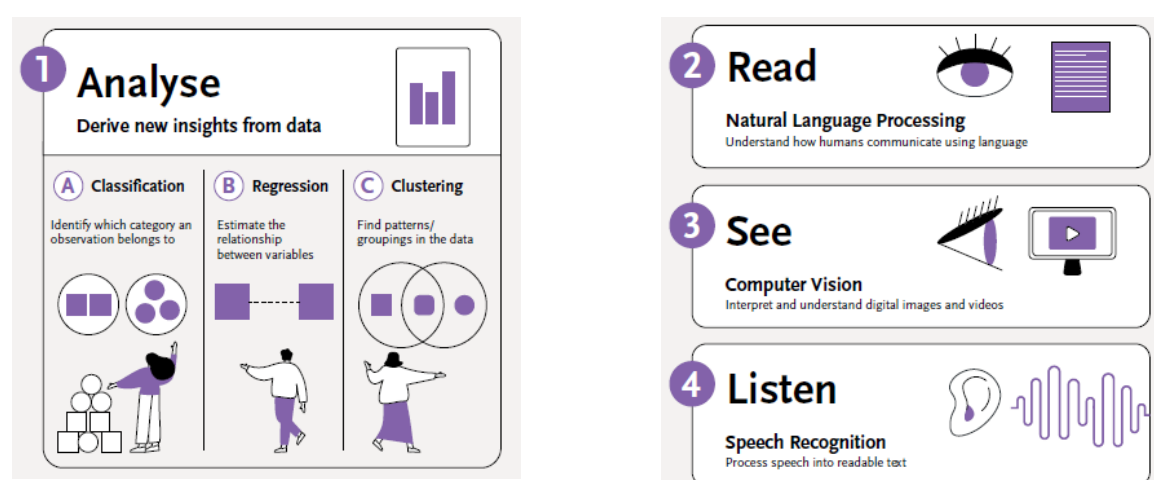
Campagnes d'information du public et sur les médias sociaux – le lancement de campagnes d'information du public et de programmes de sensibilisation adaptés au public peut renforcer la transparence et contribuer à démystifier les technologies d'IA / ML utilisées par la douane. L'utilisation des médias traditionnels (communiqués de presse, interviews télévisées) et des plateformes de médias sociaux (LinkedIn, Twitter et YouTube) permet de diffuser largement les réalisations des projets. Cela permet d'atteindre un large public et de le sensibiliser. Les campagnes de médias sociaux utilisant des messages, des infographies et des vidéos peuvent communiquer des résultats complexes en matière d'IA / ML d'une manière simple et attrayante et encourager l'interaction avec le public.

Conférences et publications universitaires – la participation à des conférences internationales, à des manifestations sectorielles et à des forums universitaires permet de partager les bonnes pratiques, les enseignements tirés et les résultats des projets d'IA / ML avec un public plus large, notamment avec d'autres administrations des douanes, des décideurs politiques et des chercheurs. La publication de livres blancs, d'articles de recherche et de documents techniques dans des revues universitaires ou des publications sectorielles peut contribuer à affirmer la position de la douane en tant que leader dans l'adoption des technologies d'IA / ML et fournir une plateforme pour un engagement plus poussé avec la communauté universitaire et de la recherche.

7 Principales considérations pour les administrations des douanes qui se lancent dans des projets d'IA / ML

La figure ci-dessous illustre certaines capacités essentielles des technologies d'IA / ML. Tous les défis ne se prêtent pas à des solutions d'IA / ML. Par exemple, les questions très nuancées impliquant l'interprétation de réglementations commerciales complexes peuvent encore nécessiter une supervision humaine. Si l'IA / ML offre un immense potentiel d'amélioration des opérations douanières, une approche réfléchie et stratégique est nécessaire pour se lancer dans de tels projets.

Figure 4 – Capacités essentielles des technologies d'IA / ML²⁶



Compte tenu des considérations juridiques, éthiques et de gouvernance évoquées dans les sections précédentes, la présente section se concentre sur les facteurs pratiques que les administrations des douanes doivent évaluer lorsqu'elles mettent en œuvre des initiatives en matière d'IA / ML. La prise en compte des considérations suivantes garantit la réussite de la mise en œuvre et l'intégration durable des technologies d'IA / ML dans les opérations douanières :

7.1.1 Définition du problème et alignement

La définition du problème est une première étape cruciale pour s'assurer que le projet cible la bonne question et tirer le meilleur parti des avantages potentiels des solutions d'IA / ML.

Les administrations des douanes devraient commencer par déterminer les faiblesses spécifiques de leurs processus, tels que les délais de dédouanement trop longs, les inspections inefficaces ou les difficultés à détecter les activités non conformes. Les technologies d'IA / ML se prêtent particulièrement bien aux domaines pour lesquels de grands volumes de données doivent être traités, ou lorsque des tâches répétitives basées sur des règles telles que le traitement de documents et les évaluations des risques peuvent être automatisées pour améliorer l'efficacité.

²⁶ Agence gouvernementale de Singapour pour la technologie (2019), « Public Sector AI Playbook » (Guide de l'IA pour le secteur public).

Un problème bien défini, fondé sur la compréhension des forces et des limites de l'IA / ML, est essentiel pour mettre en œuvre avec succès des projets d'IA / ML qui produisent des résultats tangibles et significatifs pour les opérations douanières.

En veillant à ce que le problème repéré corresponde aux domaines dans lesquels l'IA / ML peut offrir une valeur significative, les administrations des douanes peuvent éviter d'investir dans des technologies complexes pour des problèmes qui pourraient être résolus plus efficacement par une automatisation plus simple ou des systèmes fondés sur des règles.

7.1.2 Disponibilité et qualité des données

La disponibilité et la qualité des données sont des considérations essentielles pour les administrations des douanes qui se lancent dans des projets d'IA / ML. Dans le cadre de leur mandat réglementaire, les administrations des douanes collectent d'énormes quantités de données, atteignant souvent plusieurs téraoctets par an. Il s'agit d'informations structurées, telles que les déclarations d'importation et d'exportation, les registres de transactions et les classements tarifaires, ainsi que de données non structurées, telles que des documents scannés, des journaux de communication et des fichiers multimédias issus des inspections. En outre, une grande partie de ces données sont historiques et archivées, fournissant une mine d'informations accumulées au fil des années, voire des décennies.

Si les modèles d'IA / ML nécessitent de grands volumes de données pour l'entraînement et la validation, le succès de ces initiatives ne dépend pas seulement du volume, mais aussi de la qualité et de la pertinence des données. Par exemple, le développement d'un modèle d'IA pour la détection des fraudes nécessiterait des données commerciales historiques détaillées, des registres de transactions et des schémas connus d'activités frauduleuses. Ces données devraient contenir un large éventail de variables, telles que le classement des produits, les valeurs déclarées, les itinéraires commerciaux et les entités concernées, ce qui permettrait aux modèles d'IA / ML d'apprendre des schémas complexes et de produire des prédictions précises.

Cependant, il ne suffit pas de disposer d'un grand volume de données ; celles-ci doivent également être de haute qualité et pertinentes pour les opérations actuelles afin de garantir que les modèles d'IA / ML produisent des résultats utiles et exploitables. La mauvaise qualité des données, caractérisée par des inexactitudes, des enregistrements incomplets, des incohérences ou des informations obsolètes, peut avoir un impact important sur la performance des modèles, conduisant à des prédictions erronées. Des données de qualité doivent être exactes, complètes, cohérentes, opportunes et pertinentes. Atteindre ce niveau de qualité est un défi pour les administrations des douanes, notamment parce que la plupart des données proviennent de systèmes existants ou sont archivées et peuvent contenir des erreurs dues à la saisie manuelle, à des incohérences dans les classements ou à une documentation incomplète. En outre, l'évolution des formats de données au fil du temps peut créer des incohérences supplémentaires dans la manière dont les informations sont enregistrées, ce qui rend difficile l'uniformité entre les différents ensembles de données.

Pour atténuer ces problèmes, les administrations des douanes doivent investir du temps et des ressources dans le nettoyage et la préparation des données. Ce processus impliquera de corriger les erreurs, normaliser les formats et s'assurer que les données sont complètes et à jour, ce qui améliorera en fin de compte la fiabilité des résultats des modèles d'IA / ML. La section 9 du présent rapport, consacrée à la gestion des données, décrit les étapes essentielles de la gestion des données au sein de la douane, qui constitue une condition préalable au lancement de projets d'IA / ML.

7.1.3 Faisabilité technique

Lorsqu'elles se lancent dans des projets d'IA / ML, les administrations des douanes doivent notamment tenir compte de la faisabilité technique. Il s'agit d'évaluer si l'infrastructure, l'expertise et les ressources nécessaires sont disponibles pour soutenir la mise en œuvre et la réussite des initiatives en matière d'IA /

ML. La première étape de cette évaluation consiste à évaluer l'expertise technique existante au sein de l'administration des douanes.

Les projets d'IA / ML nécessitent des compétences spécialisées en science des données, en ML et en ingénierie des données, ainsi que la maîtrise des outils matériels et logiciels nécessaires. Si ces compétences font défaut, les administrations des douanes peuvent être amenées à investir dans la formation du personnel ou à rechercher des compétences externes par le biais de partenariats avec des fournisseurs de technologies, des consultants ou des établissements universitaires.

Outre l'expertise, la disponibilité du matériel nécessaire, tel que des systèmes informatiques haute performance capables de traiter de grands ensembles de données, et des logiciels, y compris des cadres d'IA / ML, est cruciale. Les administrations des douanes doivent s'assurer que leur infrastructure est capable de prendre en charge le stockage, le traitement et l'analyse de grandes quantités de données, ainsi que la nature itérative du développement de modèles d'IA / ML.

La section 10 du présent rapport décrit ensuite les spécifications techniques minimales et les ressources humaines nécessaires à la mise en œuvre et à l'intégration de l'IA / ML. Les administrations des douanes peuvent utiliser ces directives pour évaluer la faisabilité technique de leurs projets et leur capacité organisationnelle à soutenir les initiatives d'IA / ML. Il s'agit notamment d'évaluer si elles disposent de l'infrastructure, de l'expertise et des ressources nécessaires pour mettre en œuvre efficacement des solutions d'IA / ML. En se référant à ces spécifications, les administrations des douanes peuvent déterminer si leurs capacités actuelles correspondent aux exigences des projets d'IA / ML ou si des investissements en matière de formation, de technologie ou de partenariats externes sont nécessaires.

7.1.4 Défis liés aux résultats générés par l'IA

L'exactitude des résultats générés par l'IA est primordiale pour les administrations des douanes. Les modèles d'IA / ML ne sont pas neutres en soi ; ils sont façonnés par les données sur lesquelles ils sont entraînés et par les méthodes utilisées pour les développer. Le risque de **biais** dans les données, comme nous l'avons vu plus haut, constitue une préoccupation majeure.

Une autre question essentielle concerne l'apparition d'**hallucinations** et d'**inexactitudes** dans les modèles d'IA / ML. Les systèmes d'IA / ML génèrent parfois des résultats sur la base de données incomplètes ou ambiguës, ce qui conduit à des « hallucinations », lorsque le modèle fournit des prédictions inexactes ou trompeuses. Dans le contexte douanier, cela pourrait se traduire par un signalement incorrect des envois à inspecter ou par une mauvaise évaluation des risques. Il est essentiel de garantir l'exactitude des modèles d'IA et de vérifier leurs prédictions par rapport aux résultats du monde réel pour maintenir l'équité et la confiance dans les décisions basées sur l'IA / ML. Le tableau ci-dessous donne des exemples de biais, d'hallucinations et d'inexactitudes fréquemment rencontrés dans les modèles d'IA / ML.

Tableau 2 – Biais, hallucinations et inexactitudes les plus courants dans les modèles d'IA / ML

	Type de problème	Description	Exemple dans les opérations douanières
1	Biais de sélection	Se produit lorsque les données d'apprentissage ne sont pas représentatives de l'ensemble des scénarios douaniers, ce qui conduit à des modèles favorisant des cas spécifiques.	Un modèle d'IA entraîné principalement sur des données de fret de grande valeur pourrait négliger les risques associés aux envois de faible valeur.
2	Biais historiques	Reflète les schémas et les biais des données historiques, ce qui peut renforcer des tendances et des préjugés obsolètes.	Un modèle peut signaler de manière disproportionnée les envois en provenance de certains pays sur la base de données de risque obsolètes.

3	Biais algorithmique	Résulte d'une conception de modèle dans laquelle certaines caractéristiques sont surévaluées, ce qui conduit à des prédictions faussées.	Un modèle peut surestimer la valeur des biens, ce qui entraîne une inspection fréquente des seuls articles de grande valeur.
4	Faux positifs dans la détection des risques	Lorsque le modèle signale à tort des envois comme présentant un risque élevé, ce qui entraîne des inspections inutiles.	Un envoi inoffensif peut être signalé comme contenant des produits interdits, ce qui entraîne des retards dans les flux commerciaux.
5	Faux négatifs dans la détection des risques	Lorsque le modèle ne détecte pas les envois à haut risque, ce qui leur permet de passer inaperçus.	Un envoi de marchandises illégales peut être étiqueté comme « à faible risque » et ne pas faire l'objet d'inspections appropriées.
6	Biais de surajustement	Se produit lorsque le modèle est trop entraîné sur des schémas spécifiques et qu'il ne parvient pas à s'adapter efficacement aux nouvelles données.	Un modèle axé sur des données saisonnières spécifiques pourrait ne pas permettre d'évaluer avec précision les envois en dehors de ce contexte.
7	Hallucination des facteurs de risque	Lorsque l'IA fabrique ou surestime des facteurs de risque sans base factuelle, ce qui conduit à des évaluations incorrectes.	Un modèle peut signaler des envois inoffensifs comme présentant un risque élevé sur la base de corrélations ou d'hypothèses non fondées.
8	Dérive des données / mauvaise interprétation	Lorsque des changements dans les données d'entrée ne sont pas reconnus, ce qui conduit à des prévisions inexactes ou à des profils de risque obsolètes.	Un modèle d'IA entraîné sur des données antérieures à la pandémie peut ne pas s'adapter aux schémas commerciaux postérieurs à la pandémie.

7.1.5 Analyse coûts-avantages

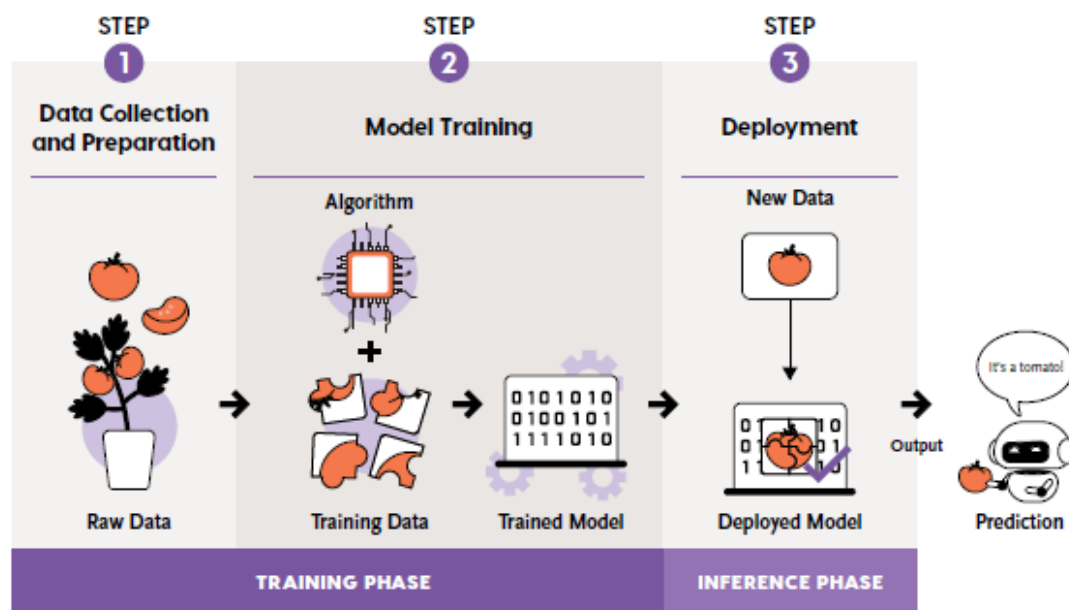
Lorsqu'elles se lancent dans des initiatives d'IA / ML, les administrations des douanes doivent procéder à une analyse coûts-avantages approfondie afin de prendre des décisions éclairées qui concilient les considérations financières immédiates et les objectifs stratégiques à long terme. Cette évaluation doit tenir compte de la valeur stratégique à long terme de l'adoption de l'IA, notamment de son potentiel de transformation des paradigmes opérationnels et d'amélioration des capacités de prise de décision. Les administrations des douanes devraient évaluer les coûts cachés liés à la gouvernance des données, à la mise à niveau de l'infrastructure et à la maintenance continue des systèmes d'IA.

L'analyse devrait également tenir compte du potentiel de l'IA à débloquent de nouveaux flux de recettes grâce à une meilleure détection des fraudes et à une affectation plus efficace des ressources. Les avantages intangibles, tels que le renforcement de la confiance des parties prenantes et l'amélioration de la facilitation des échanges, doivent être quantifiés dans la mesure du possible. La douane devrait évaluer les coûts d'opportunité liés à la non-adoption de l'IA, notamment à la lumière de l'évolution de la dynamique du commerce mondial et des nouvelles menaces en matière de sécurité. Le cadre coûts-avantages doit être suffisamment souple pour tenir compte du rythme rapide des progrès technologiques et permettre des ajustements itératifs au fur et à mesure de l'évolution des capacités de l'IA.

7.1.6 Projets pilotes

Lorsqu'elles lancent des projets d'IA / ML, les administrations des douanes doivent envisager de lancer un projet pilote afin de tester la faisabilité et l'efficacité des solutions d'IA / ML dans un environnement contrôlé. Un projet pilote permet aux douanes d'évaluer les performances des modèles d'IA / ML, de recueillir des informations en retour et de procéder à des ajustements avant une mise en œuvre à grande échelle. En suivant une approche structurée en trois étapes, les administrations des douanes peuvent évaluer les avantages et les limites pratiques de ces technologies tout en réduisant au minimum les risques.

Figure 5 – Étapes du développement et du déploiement d'un système pilote d'IA²⁷



La première étape de cette approche est la **collecte et la préparation des données**. Les administrations des douanes devraient commencer par rassembler les données d'entraînement pertinentes, qui pourraient inclure les déclarations douanières historiques, les registres de transactions ou les données d'inspection. Ces données doivent faire l'objet d'un traitement minutieux, tel que la suppression des doublons, la normalisation des formats et le traitement des valeurs manquantes. En outre, de nombreux projets d'IA / ML nécessitent des données étiquetées, en particulier pour l'apprentissage supervisé, pour lequel le résultat souhaité doit être clairement défini. L'étiquetage peut prendre du temps, mais il est essentiel pour garantir que le modèle apprend à partir d'exemples précis et pertinents. Une fois les données préparées, elles sont généralement divisées en trois ensembles : un ensemble de données d'entraînement pour créer le modèle, un ensemble de données de validation pour l'affiner et un ensemble de données d'évaluation pour tester les performances finales. De plus amples détails sur la préparation des données sont donnés dans la section suivante sur la gestion des données.

La deuxième étape concerne l'**entraînement du modèle**, qui se compose de plusieurs phases clés. D'abord, les administrations des douanes doivent choisir l'algorithme le plus approprié à leur problème. Cette décision est guidée par la nature des données et la tâche spécifique pour laquelle le modèle est conçu, par exemple le classement, la prédiction ou la détection d'anomalies. Une fois l'algorithme choisi, le processus d'entraînement commence : le modèle apprend à effectuer une tâche en analysant les données d'entraînement. Au cours de cette phase, le modèle est régulièrement validé à l'aide de l'ensemble de données de validation afin d'ajuster les paramètres et d'améliorer la précision. Enfin, le modèle est évalué à l'aide de l'ensemble de données d'évaluation afin de s'assurer qu'il fonctionne bien sur des données inédites, simulant les conditions du monde réel. Ce processus rigoureux garantit que le modèle est fiable et prêt pour l'étape suivante.

La troisième étape est le **déploiement**, au cours duquel le modèle entraîné est introduit dans les processus opérationnels de l'administration des douanes. À ce stade, le modèle commence à prédire de nouvelles données d'entrée sur la base de ce qu'il a appris au cours du processus d'entraînement. Comme il s'agit

²⁷ Agence gouvernementale de Singapour pour la technologie (2019), « Public Sector AI Playbook » (Guide de l'IA pour le secteur public).

d'un projet pilote, le déploiement est suivi de près et les performances du modèle sont évaluées en permanence. Cela permet aux administrations des douanes de déterminer les améliorations ou les ajustements potentiels et de résoudre les problèmes éventuels avant une mise en œuvre à plus grande échelle. Le suivi du modèle dans un environnement réel permet de s'assurer qu'il continue de fournir des perspectives et des prévisions précieuses, même si les données ou l'environnement changent.

8 Gestion des données

Les administrations des douanes collectent de manière systématique de grandes quantités de données sous diverses formes – structurées, semi-structurées et non structurées – dans le cadre de leurs activités quotidiennes. Selon un article paru dans le magazine OMD Actu en 2018, le Service des douanes coréen (KCS) accumulait déjà 45 Go de données structurées et 30 Go de données non structurées par jour²⁸, soit plus de 25 To par an, un chiffre qui est probablement beaucoup plus élevé aujourd'hui. Ces données allaient des déclarations en douane et manifestes de fret structurés à des données semi-structurées, par exemple des messages d'échange de données informatisé (EDI) provenant de dispositifs de l'Internet des objets (IdO), et des formats non structurés tels que des documents numérisés, des images radiographiques et des images de surveillance. Malgré l'abondance et la richesse de ces données, de nombreuses administrations des douanes n'exploitent pas encore pleinement leur potentiel pour améliorer leurs fonctions essentielles, telles que le recouvrement et la protection des recettes, la facilitation des échanges et la sécurité des frontières.

Le défi actuel consiste à intégrer et à analyser efficacement ces diverses données afin d'en tirer des informations exploitables. Les méthodes traditionnelles de traitement des données sont souvent insuffisantes pour traiter le volume, la variété et la complexité des données, ce qui se traduit par une sous-utilisation d'informations précieuses. C'est là que les technologies d'IA / ML fournissent aux administrations des douanes les outils permettant d'exploiter et de maximiser l'utilisation des données collectées. L'IA / ML peut automatiser l'analyse de données structurées et semi-structurées, extraire des informations à partir de données non structurées grâce à des techniques telles que le traitement automatique du langage naturel (TALN) et la vision par ordinateur, et permettre l'analyse prédictive afin d'anticiper les risques et de rationaliser les processus.

La gestion des données est la pierre angulaire des projets d'IA / ML dans les administrations des douanes, car elle garantit que les données collectées et traitées sont à la fois fiables et adaptées à l'analyse. La gestion des données pour les applications d'IA / ML dans les administrations des douanes nécessite de traiter divers types de données structurées et non structurées, d'en vérifier la qualité et l'intégrité et de les protéger contre les atteintes à la vie privée et à la sécurité. Appliquée aux administrations des douanes, la gestion des données consiste à transformer les données commerciales brutes en formats prêts pour le développement et le traitement de modèles d'IA.

En mettant en œuvre des stratégies de gestion des données robustes, les administrations des douanes peuvent exploiter la puissance de l'IA / ML pour améliorer l'efficacité opérationnelle, renforcer la gestion des risques et garantir la conformité réglementaire. Ces stratégies devraient intégrer des cadres complets de gouvernance des données et tirer parti d'outils avancés de qualité des données.

8.1 Types de données utilisées pour les projets d'IA / ML

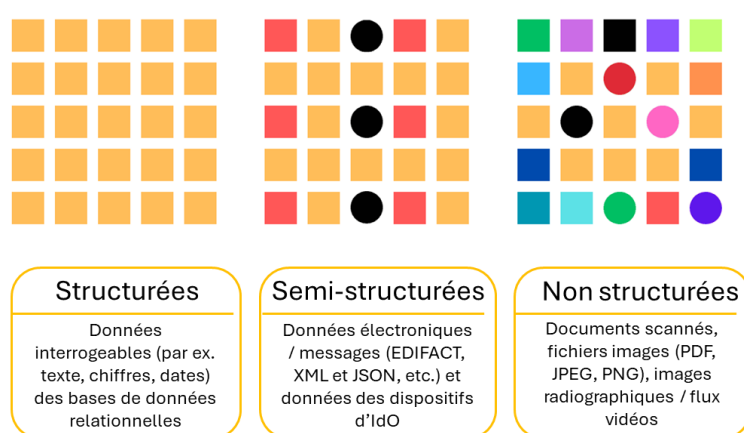
Les données structurées comprennent généralement les déclarations d'importation et d'exportation, les classements tarifaires, les registres de transactions et les données d'évaluation. Ces ensembles de

²⁸ OMD Actu n° 86 (Juin 2018) Panorama : « Dédouanement du fret express et des envois postaux : la Corée teste de nouveaux outils d'analyse pour éradiquer la fraude ».

données s'intègrent parfaitement dans des bases de données, ce qui les rend idéaux pour le traitement algorithmique. En revanche, les données non structurées, telles que les documents scannés, les images, les courriers électroniques et les rapports de renseignement, nécessitent des techniques de traitement plus avancées, notamment l'exploration de texte et la reconnaissance d'images, pour en extraire des informations utiles.

Pour aller plus loin, les administrations des douanes utilisent également des données en temps réel, provenant de capteurs, de systèmes de suivi et de dispositifs IdO, parallèlement à des données historiques issues de transactions et d'inspections antérieures. Ces ensembles de données servent de base à l'entraînement des modèles d'IA qui prédisent les risques, optimisent la logistique et détectent les fraudes.

Figure 6 – Données structurées, semi-structurées et non structurées dans les opérations douanières



8.2 Qualité et intégrité des données

La qualité et l'intégrité des données sont essentielles pour l'efficacité des modèles d'IA / ML. Pour les administrations des douanes, il est primordial de veiller à ce que les données soient exactes, complètes, cohérentes et à jour. Des données de qualité permettent aux modèles de générer des prédictions et des décisions fiables, telles que la détection d'envois potentiellement frauduleux ou la détermination de programmes d'inspection optimaux.

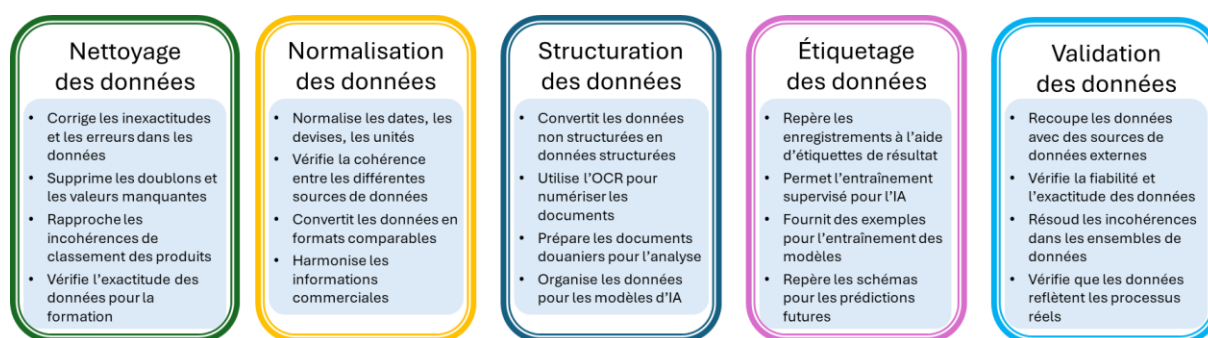
Les données douanières doivent faire l'objet d'un prétraitement rigoureux, comprenant le nettoyage, la validation et l'augmentation, afin d'améliorer la qualité des données. Il peut s'agir de détecter et de corriger des erreurs, en veillant à ce que les données saisies soient exemptes d'incohérences et de lacunes. Les techniques d'augmentation des données telles que le recadrage, la mise à l'échelle et l'ajustement du contraste permettent d'accroître le volume et la diversité des données d'entraînement, ce qui est particulièrement utile dans les environnements douaniers où la variabilité est élevée.

8.3 Préparation des données

La préparation des données est une phase cruciale pour les administrations des douanes qui se lancent dans des projets d'IA / ML, notamment en raison des grandes quantités de données qu'elles gèrent. Pour générer des résultats de haute qualité, les modèles d'IA / ML doivent travailler sur des données bien préparées et les administrations des douanes doivent investir dans un nettoyage complet et une préparation exhaustive des données pour garantir la réussite de leurs projets. Le diagramme suivant

présente les étapes essentielles de la préparation des données qui transforment les données douanières brutes en une forme adaptée à l'analyse IA / ML.

Figure 7 – Étapes de la préparation des données



Nettoyage des données – la première étape est le nettoyage des données, qui consiste à repérer et à corriger les inexactitudes, les erreurs et les incohérences dans les données. Les administrations des douanes traitent fréquemment d'importants volumes de données historiques qui peuvent contenir des marchandises mal classées, des unités de mesure incohérentes, des valeurs manquantes ou des entrées en double. Par exemple, les variations au niveau des codes du Système harmonisé (SH) utilisés pour classer les produits au fil du temps peuvent entraîner des divergences. Le rapprochement de ces incohérences est essentiel pour garantir un classement cohérent des produits, ce qui constitue une exigence fondamentale pour tout modèle d'IA / ML qui cherche à évaluer la conformité commerciale, à détecter la fraude ou à optimiser les processus d'inspection.

Normalisation des données – après le nettoyage des données, la normalisation des données garantit que les informations provenant de diverses sources sont cohérentes et comparables. Les données douanières proviennent souvent de différents systèmes, régions ou départements, ce qui entraîne des différences de formats, d'unités de mesure et de valeurs monétaires. La normalisation des dates, des valeurs monétaires et des unités de mesure, comme la conversion de tous les poids en tonnes métriques ou la normalisation des taux de change est essentielle pour créer des ensembles de données uniformes. La normalisation améliore la précision de l'analyse et permet aux modèles d'IA / ML de traiter des données provenant de sources multiples sans introduire de biais dus à des variations de format.

Structuration des données – ensuite, étant donné que les administrations des douanes traitent un large éventail de types de données, notamment des données semi-structurées (par exemple des données aux formats XML / JSON) et des données non structurées (par exemple des documents scannés), la structuration des données est nécessaire pour convertir les données dans un format structuré adapté à l'analyse IA / ML. Des techniques telles que l'analyse syntaxique XML / JSON peuvent être utilisées pour les données semi-structurées, tandis que la reconnaissance optique de caractères (OCR) peut transformer des documents numérisés en texte lisible par une machine.

Étiquetage des données – il s'agit d'une étape essentielle, en particulier pour le ML supervisé, qui exige que les enregistrements historiques soient étiquetés avec précision en fonction de résultats prédéfinis. Dans le cadre des opérations douanières, il peut s'agir d'étiqueter les données historiques pour indiquer si certains envois étaient conformes ou s'ils ont été signalés pour fraude ou irrégularité. Ces étiquettes permettent aux modèles d'IA / ML d'apprendre à partir de schémas antérieurs et de faire des prédictions sur la base de nouvelles données. Par exemple, un modèle d'évaluation des risques peut être entraîné à prédire si un envoi particulier est susceptible d'impliquer une non-conformité sur la base de données antérieures étiquetées comme « fraude détectée » ou « conforme ». Ce processus demande beaucoup de ressources, mais il est essentiel pour créer des modèles susceptibles de fournir des informations précieuses et d'améliorer les opérations douanières.

Validation des données – enfin, la validation des données est essentielle pour garantir que les données reflètent fidèlement la réalité sous-jacente. Les administrations des douanes doivent recouper leurs données avec des sources externes, telles que des bases de données commerciales, des rapports sectoriels et des fournisseurs de données tiers de confiance, afin de vérifier l'exactitude et la fiabilité de ces données. Par exemple, les administrations des douanes peuvent valider les volumes d'échanges et les descriptions de produits par rapport à des bases de données commerciales mondiales ou consulter des rapports sectoriels pour s'assurer que les données utilisées dans les modèles d'IA / ML sont à la fois actuelles et crédibles. La validation des données permet d'éviter les risques liés à des informations incorrectes ou obsolètes, qui pourraient conduire à des prédictions ou à des prises de décision erronées.

En outre, la gestion des versions des ensembles de données est essentielle pour gérer le cycle de vie des ensembles de données utilisés dans l'entraînement des modèles. Les administrations des douanes doivent être en mesure de suivre et de gérer les différentes versions de leurs ensembles de données, afin de s'assurer que les données les plus récentes et les plus pertinentes sont utilisées pour le développement de modèles d'IA / ML.

Grâce à ces étapes soigneusement exécutées – nettoyage, normalisation, structuration, étiquetage et validation des données – les administrations des douanes peuvent s'assurer que leurs modèles d'IA / ML reposent sur une base solide de données de haute qualité.

9 Cadre technique évolutif pour la mise en œuvre / l'intégration de l'IA / ML

Le « cadre technique évolutif » recommandé dans cette section sert de schéma directeur fondamental pour les administrations des douanes qui souhaitent intégrer l'IA / ML dans leurs flux de travail opérationnels. Il englobe des aspects essentiels tels que le développement, l'automatisation, la gestion des données, l'entraînement du modèle, l'architecture et l'infrastructure de la plateforme, les exigences en matière de matériel et de réseau, les opérations d'apprentissage automatique (MLOps) et les outils d'intégration des données. Il offre une approche flexible que les administrations des douanes peuvent utiliser pour mettre en place un environnement IA / ML qui peut être étendu au fil du temps, en s'alignant sur des stratégies d'adoption rentables plutôt qu'en imposant un ensemble fixe d'exigences initiales potentiellement écrasantes ou coûteuses.

Ces spécifications techniques prennent en charge un large éventail d'applications et de cas d'utilisation de l'IA / ML et facilitent le développement de modèles rationalisés, du prototypage à la production. Elles intègrent également les pratiques de MLOps pour une gestion systématique de l'ensemble du cycle de vie de l'apprentissage automatique.

9.1 Environnement de développement de l'IA / ML

9.1.1 Frameworks d'IA / ML

Les frameworks d'IA / ML fournissent les bibliothèques et les outils de base pour la construction, l'entraînement et le déploiement de modèles de ML. La prise en charge de frameworks populaires tels que TensorFlow, PyTorch et R garantit la polyvalence, permettant le développement d'un large éventail de tâches de ML, des réseaux neuronaux aux modèles statistiques.

TensorFlow, PyTorch et R sont des frameworks ML open source. Cela signifie qu'ils sont disponibles librement et qu'ils peuvent être modifiés et distribués par n'importe qui. Cette ouverture a contribué à leur large adoption et à leur popularité dans la communauté du ML. Ils sont les mieux adaptés à des projets

allant de l'analyse de données de base à des applications avancées d'apprentissage profond, telles que l'évaluation des risques douaniers, l'analyse prédictive et la reconnaissance d'images pour l'inspection du fret.

Spécifications :

- prise en charge de TensorFlow (v2.x+), PyTorch (v1.7+) et R (v4.x+), et compatibilité avec Kubernetes pour le déploiement ;
- bibliothèques préinstallées pour les tâches courantes de ML (par exemple scikit-learn, Keras).

La prise en charge de TensorFlow et PyTorch est souvent une exigence pour les plateformes d'IA / ML, car ils offrent les fonctionnalités suivantes :

- communauté et écosystème : les deux frameworks disposent de communautés importantes et actives, ce qui signifie que les développeurs ont accès à des ressources, des tutoriels et du soutien en abondance ;
- flexibilité et polyvalence : TensorFlow et PyTorch sont des frameworks très flexibles et polyvalents qui peuvent être utilisés pour un large éventail de tâches de ML, de la simple régression linéaire aux modèles complexes d'apprentissage profond ;
- intégration avec d'autres outils : les deux frameworks s'intègrent bien avec d'autres outils et bibliothèques de ML populaires, ce qui facilite la création et le déploiement d'applications d'IA.

TensorFlow et PyTorch sont deux des frameworks les plus populaires, mais d'autres options sont disponibles, notamment :

- Keras : une API de haut niveau qui peut être utilisée au-dessus de TensorFlow ou Theano ;
- scikit-learn : une bibliothèque Python pour le ML qui comprend une variété d'algorithmes et d'outils ;
- JAX : une bibliothèque Python pour accélérer la recherche en ML, combinant la flexibilité de NumPy avec la puissance de la différenciation automatique.

Outre les frameworks open source, des plateformes de ML propriétaires sont également disponibles. Voici quelques exemples de plateformes propriétaires :

- Amazon SageMaker : une plateforme entièrement gérée par Amazon Web Services ;
- Azure Machine Learning : une plateforme de Microsoft basée sur le cloud ; et
- Google Cloud AI Platform : une plateforme de Google pour la création et le déploiement d'applications d'IA.

9.1.2 Environnement de développement intégré (IDE)

Un IDE peut s'avérer précieux pour écrire, déboguer et visualiser efficacement le code dans de nombreux scénarios de développement d'IA / ML. Des outils tels que Jupyter Notebook, PyCharm ou Visual Studio Code offrent souvent un environnement interactif et convivial pour le développement de modèles d'IA / ML, permettant une expérimentation et un prototypage rapides. Ils sont bien adaptés aux projets nécessitant un développement itératif, tels que le prototypage de modèles, l'analyse et la visualisation de données dans des configuration de recherche et de développement. Les IDE ne sont pas toujours indispensables et leur nécessité dépend des exigences spécifiques du projet, des préférences du développeur et des ressources disponibles. Dans certains cas, des solutions IDE plus simples ou basées sur le cloud peuvent être plus appropriées, en particulier pour les scripts rapides, les environnements à ressources limitées, ou lorsque l'on travaille avec des systèmes existants.

Spécifications :

- IDE : Jupyter Notebook, PyCharm Professional ou Visual Studio Code avec des extensions IA / ML ;
- IDE plus simple : Thonny, Geany ;
- solutions basées sur le cloud : Google Colab, Replit ;
- intégration avec la gestion des versions et le stockage cloud pour la collaboration.

9.1.3 Gestion des versions

Les projets collaboratifs d'IA / ML dans lesquels plusieurs membres de l'équipe travaillent sur des bases de code, tels que le développement et la maintenance de systèmes d'analyse douanière ou les projets de recherche collaborative, nécessitent des systèmes de gestion des versions. Cela permet un développement collaboratif, le suivi des modifications du code et le maintien de l'intégrité entre les différentes versions. L'intégration avec des IDE permet une gestion transparente du code et une collaboration entre plusieurs développeurs.

Spécifications :

- prise en charge de Git avec intégration dans l'IDE ;
- référentiels centralisés (par exemple GitHub, GitLab, Bitbucket) pour la collaboration au sein de l'équipe.

9.2 Outils et frameworks pour l'automatisation

9.2.1 Outils d'orchestration

Les outils d'orchestration comme Apache Airflow, Prefect ou Luigi automatisent le flux de travail des pipelines de ML, garantissant une gestion efficace des tâches telles que le prétraitement des données, l'entraînement et l'évaluation des modèles. Ils sont nécessaires pour les projets qui impliquent des pipelines complexes à plusieurs étapes, tels que l'automatisation des pipelines de données pour le traitement des données douanières ou les systèmes automatisés de réentraînement des modèles.

Spécifications :

- prise en charge d'Apache Airflow (v2.x+), de Prefect ou de Luigi ;
- intégration avec des sources de données dans le cloud et sur site.

9.2.2 Pipelines d'intégration continue et de déploiement continu (IC / DC)

Les projets d'IA / ML nécessitant des mises à jour et des déploiements fréquents, tels que l'amélioration continue des modèles prédictifs pour la gestion des risques douaniers, requièrent des outils d'IC / DC qui permettent d'automatiser les tests, le déploiement et la surveillance des modèles de ML. Cela garantit des mises à jour rapides et fiables des modèles dans les environnements de production.

Spécifications :

- intégration IC / DC avec Jenkins, GitHub Actions ou GitLab CI ;
- frameworks de test automatisés (par exemple pytest, TensorFlow Model Analysis) ;
- modèles et configurations prédéfinis.

9.2.3 Bibliothèque de modèles

Les projets visant à accélérer le développement de l'IA / ML pour des tâches telles que l'analyse de données commerciales ou la classification de documents peuvent bénéficier de manière significative de modèles prédéfinis – qui sont essentiellement une bibliothèque de code réutilisable pour des tâches communes d'IA / ML, ce qui contribue à réduire le temps de développement. Ces modèles peuvent couvrir le prétraitement des données, l'ingénierie des caractéristiques, l'entraînement et l'évaluation des modèles.

Spécifications :

- couvrent un large éventail de tâches d'IA / ML, notamment la classification (par exemple, la classification de documents), la régression (par exemple, l'analyse de données commerciales), le traitement automatique du langage naturel, la vision par ordinateur, l'analyse de séries temporelles ;
- permettent l'intégration de l'IDE ;

- permettent de personnaliser et d'adapter rapidement les modèles aux exigences spécifiques du projet ;
- disposent d'un référentiel de modèles pour diverses tâches (par exemple, le prétraitement des données, l'entraînement des modèles).

9.2.4 Gestion de configuration

La gestion de configuration assure le provisionnement automatisé²⁹, la surveillance et la gestion des ressources de l'infrastructure, en maintenant la cohérence, la fiabilité et l'évolutivité dans différents environnements. Elle permet d'uniformiser les environnements de déploiement, par exemple en déployant des modèles d'IA / ML dans plusieurs bureaux de douane. Les administrations des douanes peuvent gérer efficacement les changements d'infrastructure, réduire les erreurs de déploiement et maintenir la conformité avec les exigences réglementaires.

Spécifications :

- prise en charge des principaux outils de gestion de configuration et des outils standard du secteur pour le déploiement automatisé et la gestion de l'infrastructure ;
- scripts préconfigurés pour la mise en place de modèles d'IA / ML, d'API, de bases de données et de réseaux dans des environnements de développement et de production ;
- prise en charge des déploiements / intégrations hybrides avec les plateformes cloud et l'infrastructure sur site ;
- compatibilité avec des outils tels que Prometheus, Grafana et ELK Stack pour le suivi des performances de l'infrastructure et la conformité de la sécurité ;
- prise en charge des environnements conteneurisés : permet l'orchestration Docker et Kubernetes pour un déploiement évolutif et efficace des modèles d'IA ;
- mécanismes d'autoréparation : mise en œuvre d'une reprise automatisée en cas de défaillance, garantissant la haute disponibilité des applications douanières critiques pilotées par l'IA.

9.3 Gestion et gouvernance des données

9.3.1 Lac de données

Les projets impliquant des analyses de données à grande échelle, tels que la modélisation prédictive des volumes commerciaux ou la détection des fraudes dans les opérations douanières, nécessitent un lac de données qui sert de référentiel centralisé pour le stockage et la gestion de diverses sources de données, facilitant l'accès et l'intégration transparents des données structurées et non structurées, essentielles pour des modèles ML complets.

Spécifications :

- infrastructure de lac de données évolutive (par exemple Hadoop, AWS S3 Data Lake) ;
- prise en charge de divers types de données (par exemple JSON, Parquet, CSV).

9.3.2 Cadre de gouvernance des données

Les projets qui traitent des données sensibles, telles que les informations personnelles contenues dans les déclarations en douane ou les données relatives à la conformité commerciale, nécessitent un cadre de gouvernance des données garantissant la sécurité et la confidentialité des données ainsi que le respect des réglementations. Il comprend des politiques et des processus visant à gérer l'intégrité des données tout au long du cycle de vie de l'IA / ML.

²⁹ Le provisionnement automatisé est l'autoconfiguration de l'infrastructure et des ressources de manière programmatique.

Spécifications :

- outils de gouvernance des données (par exemple Apache Atlas, Collibra) ;
- conformité avec les réglementations pertinentes en matière de confidentialité des données.

9.3.3 Outils de qualité des données

Les projets nécessitant des données d'entrée de haute qualité, tels que les systèmes de détection des anomalies et les modèles de ML pour l'évaluation en douane, requièrent des outils de qualité des données qui offrent des fonctionnalités de nettoyage, de validation et de normalisation des données afin de maintenir une intégrité et une précision élevées des données, ce qui est essentiel pour assurer la fiabilité des performances des modèles d'IA / ML.

Spécifications :

- outils de qualité des données (par exemple Talend, Informatica) ;
- processus automatisés de validation et de nettoyage des données.

9.4 Développement et entraînement des modèles

9.4.1 Outils d'expérimentation

Les outils interactifs facilitent l'expérimentation, le prototypage rapide et le développement itératif de modèles, permettant aux experts en science des données d'explorer rapidement différents modèles et paramètres. Ils conviennent mieux aux projets de recherche et de développement, tels que le développement de nouveaux algorithmes pour la détection de la fraude douanière ou l'optimisation des modèles existants pour de meilleures performances.

Spécifications :

- Jupyter Notebook (v6.x+), RStudio Server ;
- prise en charge de l'accélération GPU dans les ordinateurs portables.

9.4.2 Réglage des hyperparamètres

Les projets nécessitant une optimisation des modèles, tels que l'amélioration de la précision des modèles prédictifs pour l'estimation des recettes douanières, requièrent également des techniques automatisées de réglage des hyperparamètres afin d'améliorer les performances des modèles en trouvant efficacement les meilleurs paramètres pour les algorithmes de ML.

Spécifications :

- bibliothèques de réglage des hyperparamètres (par exemple Optuna, Hyperopt, GridSearchCV de Scikit-learn) ;
- intégration avec des frameworks d'entraînement distribué.

9.4.3 Entraînement distribué

Les projets impliquant des ensembles de données à grande échelle, tels que la reconnaissance d'images pour les inspections douanières ou le traitement automatique du langage naturel pour l'analyse de documents, doivent utiliser des frameworks d'entraînement distribué qui permettent la mise à l'échelle de l'entraînement du modèle sur plusieurs GPU ou clusters, réduisant ainsi considérablement le temps d'entraînement pour les ensembles de données de grande taille.

Spécifications :

- prise en charge de Horovod, la stratégie distribuée de TensorFlow ;
- capacités d'entraînement multi-GPU et multinœuds.

9.5 Architecture et infrastructure de plateforme

9.5.1 Options de déploiement

Chaque option de déploiement a son cas d'utilisation idéal en fonction de la nature du projet d'IA / ML. Le déploiement sur site est préférable pour les projets nécessitant un contrôle rigoureux des données sensibles. Le déploiement dans le cloud est adapté à l'analyse de données à grande échelle et aux projets nécessitant une mise à l'échelle flexible. Une architecture cloud hybride offre un équilibre, combinant le contrôle sur site et l'évolutivité du cloud, ce qui la rend adaptée à des projets complexes tels que la détection d'anomalies en temps réel. L'utilisation de plateformes cloud gouvernementales est cruciale lorsqu'il s'agit de se conformer aux réglementations gouvernementales en matière de sécurité et de souveraineté des données.

9.5.2 Déploiement sur site

Le déploiement sur site implique la mise en place et la gestion de toutes les ressources informatiques, du stockage et des logiciels au sein des centres de données de l'organisation. Cette option permet un contrôle total du matériel, des données et des mesures de sécurité, ce qui est crucial pour les projets impliquant des données très sensibles ou une conformité réglementaire stricte.

Le déploiement sur site est mieux adapté aux projets d'IA / ML qui impliquent le traitement de données douanières sensibles, comme la détection des fraudes, l'évaluation des menaces et le traitement de documents sensibles, lorsque la souveraineté des données et la conformité avec des réglementations de sécurité strictes sont primordiales.

Spécifications :

- centre de données spécifique avec des serveurs très performants (CPU à 16 cœurs au minimum, 256 Go de RAM, support multi-GPU) ;
- solutions de stockage local et en réseau (par exemple, disques SSD NVMe de 2 To, NAS de 10 To) ;
- réseaux à grande vitesse (par exemple Infiniband, Ethernet 10 / 40 / 100 Go/s) ;
- infrastructure de sécurité solide (par exemple, pare-feu, VPN, IAM).

9.5.3 Déploiement dans le cloud

Le déploiement dans le cloud utilise des services fournis par des plateformes cloud externes telles que AWS, Azure ou Google Cloud Platform (GCP). Cette option offre évolutivité et flexibilité, permettant à l'organisation d'ajuster rapidement les ressources informatiques en fonction de la demande. Elle est idéale pour les projets qui nécessitent un traitement de données à grande échelle, une expérimentation rapide ou une collaboration entre de multiples sites.

Le déploiement dans le cloud est le mieux adapté aux projets d'IA / ML qui impliquent une analyse de données à grande échelle, comme l'analyse prédictive ou l'entraînement de modèles ML sur de grands ensembles de données. Le déploiement dans le cloud est particulièrement avantageux pour les projets nécessitant une certaine souplesse dans la mise à l'échelle des ressources ou ceux impliquant des données non sensibles.

Spécifications :

- instances de cloud (par exemple AWS EC2, Azure VMs) avec des options optimisées de CPU (c5.4xlarge) et de GPU (p3.8xlarge, p4d.24xlarge) ;
- stockage cloud évolutif (par exemple Amazon S3, Azure Blob Storage) à partir de 10 To ;
- réseau avancé (minimum 1 Go/s) ;
- services de sécurité « cloud-native », y compris le chiffrement, les VPN et l'IAM.

9.5.4 Architecture cloud hybride

Une architecture cloud hybride combine une infrastructure sur site avec des services cloud, offrant la souplesse de pouvoir exécuter des charges de travail à la fois localement et dans le cloud. Cette approche permet une intégration transparente des données et une migration de la charge de travail, tout en équilibrant le contrôle, la sécurité et l'évolutivité.

L'architecture cloud hybride est la mieux adaptée aux projets d'IA / ML qui nécessitent un équilibre entre le maintien du contrôle des données sensibles et l'exploitation des ressources cloud pour un traitement évolutif. Cette solution est idéale pour les administrations des douanes qui travaillent sur des projets tels que la détection d'anomalies en temps réel ; les données sensibles sont traitées localement, mais l'entraînement du modèle à grande échelle et l'analyse de données peuvent bénéficier des ressources cloud.

Spécifications :

- connexion sécurisée et à haut débit entre les environnements sur site et cloud (par exemple, VPN, Direct Connect) ;
- centres de données locaux pour les données sensibles et ressources cloud pour un traitement évolutif ;
- système de gestion unifié pour l'orchestration intégrée de la charge de travail.

9.5.5 Conteneurisation

La conteneurisation consiste à regrouper les modèles / applications d'IA / ML et leurs dépendances dans un « conteneur ». Cette approche garantit la cohérence entre les différents environnements et des transitions transparentes entre le développement, les essais et le déploiement, ce qui contribue au déploiement rapide des projets d'IA / ML, en permettant une itération et des essais plus rapides des modèles.

Spécifications :

- utilisation de Docker ou de plateformes similaires pour le packaging des applications d'IA / ML ;
- compatibilité assurée entre les environnements sur site et cloud ;
- déploiement rationalisé et portabilité des conteneurs.

9.5.6 Orchestration de conteneurs – Cluster Kubernetes

L'orchestration de conteneurs, qui est le processus automatisé de déploiement, de mise à l'échelle et de gestion des applications conteneurisées, joue un rôle important dans le déploiement d'applications d'IA dans divers environnements, y compris sur site, dans le cloud, les environnements hybrides et dans des configurations cloud gouvernementales. L'orchestration permet de gérer et de coordonner les différents composants d'une application. Cette approche permet aux organisations de choisir l'option de déploiement la plus appropriée en fonction de leurs besoins spécifiques en matière d'évolutivité, de sécurité et d'optimisation des ressources.

Les opérations douanières qui représentent une charge de travail importante, impliquant des flux de travail complexes et l'ingestion de données à grande échelle, telles que le traitement des déclarations, le classement dans le SH, l'évaluation en douane et l'évaluation des risques, etc., bénéficieraient d'une orchestration efficace.

Kubernetes est une plateforme open source largement utilisée pour l'orchestration de conteneurs. Il permet une orchestration efficace des charges de travail IA / ML dans des environnements sur site, cloud ou hybrides, permettant une disponibilité élevée et une optimisation des ressources. L'utilisation de clusters Kubernetes avec prise en charge du GPU permet un traitement parallèle et optimise l'utilisation des ressources pour les tâches d'IA / ML, ce qui garantit un déploiement et une mise à l'échelle efficaces des modèles. Cela est particulièrement adapté pour les projets d'IA / ML qui nécessitent fréquemment un

déploiement, une mise à l'échelle et une gestion de charges de travail complexes et conteneurisées, comme le déploiement et la maintenance de modèles de ML pour l'automatisation des inspections douanières et les systèmes de prise de décision en temps réel.

Spécifications :

- cluster Kubernetes avec support GPU (au moins 4 GPU par nœud) ;
- outils d'orchestration (par exemple Apache Airflow, Argo) pour la gestion des flux de travail ;
- configuration de la mise à l'échelle automatique pour la gestion dynamique des ressources ;
- intégration avec des outils tels que Helm pour un déploiement rationalisé et des équilibres de charge (par exemple HAProxy, NGINX) pour la distribution du trafic.

9.5.7 Équilibreurs de charge

Les équilibreurs de charge jouent un rôle crucial dans les opérations douanières, par exemple dans la distribution des renseignements préalables concernant le fret à l'entrée et des manifestes principaux et de groupage et des déclarations, procédures qui nécessitent un traitement basé sur l'IA / ML par le biais de moteurs basés sur l'IA, afin d'éviter qu'un seul serveur ne soit submergé et ne provoque des goulots d'étranglement. En mettant en place des équilibreurs de charge, les administrations des douanes peuvent s'assurer que ces opérations critiques, qui requièrent une haute disponibilité et une tolérance aux pannes, restent efficaces et fiables, capables de traiter de grands volumes de données et de requêtes, même pendant les périodes de pointe ou en cas d'augmentation inattendue de l'activité commerciale.

Spécifications :

- équilibreurs de charge logiciels (par exemple HAProxy, NGINX) ou services natifs du cloud (par exemple AWS Elastic Load Balancing) ;
- configuration pour la distribution automatique du trafic afin de maintenir la continuité du service.

9.5.8 Sécurité

La sécurité est primordiale pour tous les systèmes douaniers, en particulier lorsqu'ils intègrent des technologies d'IA / ML. L'utilisation de l'IA / ML dans les opérations douanières introduit de nouvelles complexités et des vulnérabilités potentielles qui nécessitent des mesures de sécurité robustes. Des mesures de sécurité supplémentaires à plusieurs niveaux sont nécessaires pour protéger les données sensibles et garantir l'intégrité des systèmes d'IA.

Spécifications :

- pare-feu, VPN et IAM pour un accès sécurisé ;
- chiffrement des données (en transit et au repos) ;
- conformité avec les normes de sécurité telles que la norme ISO 27001 et avec le RGPD ;
- systèmes de détection d'intrusion pour la surveillance des menaces en temps réel.

9.6 Exigences en matière de ressources de calcul

Lorsqu'on démarre un projet d'IA / ML, une configuration bien équilibrée doit prendre en charge l'entraînement des modèles de base, l'inférence³⁰ et l'expérimentation à un coût abordable.

9.6.1 Unités centrales de traitement (CPU)

Les unités centrales de traitement (CPU) constituent l'épine dorsale des charges de travail d'IA / ML, car elles gèrent les tâches de traitement de base. Les CPU à haute performance offrent la puissance de calcul nécessaire pour les tâches complexes. Ces instances offrent une puissance de traitement évolutive et

³⁰ L'inférence en IA / ML est le processus d'utilisation d'un modèle entraîné pour faire des prédictions ou prendre des décisions sur de nouvelles données, en appliquant des schémas appris sans réentraîner le modèle.

rentable pour des opérations telles que le prétraitement des données et l'inférence de modèles, ainsi que l'algorithme ML traditionnel et l'entraînement de modèles.

Spécifications :

- type de processeur : processeurs multi-cœurs x86 ou ARM optimisés pour les tâches de calcul intensives ;
- nombre de cœurs : en général, 2 à 8 CPU virtuels pour les charges de travail de base, avec des options d'extension pour les applications plus exigeantes.

Caractéristiques supplémentaires :

- hyperthreading / multithreading simultané (SMT) : permet d'améliorer les performances des charges de travail multithreadées, courantes dans les tâches d'IA / ML ;
- taille du cache : de préférence un grand cache L3 (par exemple, 30 Mo ou plus) pour accélérer l'accès aux données pendant le traitement ;
- prise en charge des extensions vectorielles avancées (AVX) pour le traitement vectoriel, ce qui est bénéfique pour les calculs ML.

9.6.2 Mémoire

La mémoire vive (RAM) est essentielle pour le stockage temporaire des données pendant le traitement. Une configuration de mémoire vive de grande capacité, telle que 256 Go de mémoire DDR4 ou DDR5 ECC (Error-Correcting Code), permet le traitement de données à grande échelle et l'entraînement intensif de modèles sans goulet d'étranglement au niveau des performances.

Spécifications :

- capacité : au moins 256 Go de RAM (Random Access Memory) ;
- type : DDR4 ou DDR5 ;
- ECC (Error-Correcting Code) : la mémoire ECC est recommandée pour détecter et corriger la corruption des données, ce qui garantit une fiabilité et une stabilité accrues pour les charges de travail IA / ML critiques ;
- vitesse : pour la DDR4 : généralement, 2 933 MHz ou plus / pour la DDR5 : généralement, 4 800 MHz ou plus ;
- évolutivité : s'assurer que la carte mère du serveur prend en charge l'extension de la mémoire (par exemple jusqu'à 512 Go ou plus) pour répondre aux besoins futurs d'évolution des charges de travail plus exigeantes.

9.6.3 Unités de traitement graphique (GPU)

Les GPU permettent un traitement parallèle optimisé, ce qui les rend essentiels pour les tâches de ML et d'IA. Pour un projet initial d'IA / ML, le choix d'un GPU économique, mais performant est crucial pour garantir un développement, un entraînement et une inférence des modèles sans dépenses inutiles. Un GPU bien équilibré doit offrir une puissance de calcul, une bande passante mémoire et une efficacité suffisantes pour traiter des tâches d'apprentissage profond, de vision par ordinateur et de TALN basiques. Pour une configuration IA / ML adaptée aux débutants, un GPU avec au moins 8 Go de VRAM et plus de 3 500 cœurs CUDA est recommandé pour garantir un équilibre entre prix et performances, tout en prenant en charge l'entraînement, l'expérimentation et l'inférence. Au fur et à mesure que les charges de travail augmentent, des GPU haut de gamme peuvent être envisagés pour augmenter les capacités d'IA.

Spécifications :

- cœurs CUDA / cœurs Tensor³¹ : au moins 3 500+ cœurs CUDA pour un calcul parallèle efficace. Les cœurs Tensor (si disponibles) améliorent l'accélération de l'apprentissage profond ;
- VRAM (mémoire du GPU) : 8 Go à 12 Go pour traiter efficacement les lots de taille moyenne et les paramètres du modèle ;
- capacité de calcul : 7,5 ou supérieur pour une compatibilité optimale avec les frameworks IA / ML modernes ;
- largeur de bande de la mémoire : au moins 300 Go/s pour les transferts d'ensembles de données volumineux et les calculs tensoriels.

9.6.4 Mémoire et stockage

Pour un projet initial d'IA / ML, le choix d'une mémoire (RAM) et d'un espace de stockage adéquats garantit un traitement des données, un entraînement des modèles et une expérimentation sans goulets d'étranglement. Les disques SSD NVMe (Non-Volatile Memory Express Solid-State Drives) permettent des opérations de lecture / écriture à grande vitesse, qui sont cruciales pour les tâches nécessitant un accès rapide aux données, telles que l'entraînement et l'expérimentation de modèles. Ils garantissent un accès rapide à d'importants volumes de données, réduisant ainsi les délais d'entraînement.

Spécifications :

- mémoire vive (RAM) : 16 Go de RAM (minimum), 32 Go recommandés pour traiter des ensembles de données plus importants ;
- stockage : SSD NVMe de 1 To (minimum), recommandé pour un accès plus rapide aux données et le stockage de modèle.

9.6.5 Stockage en réseau (NAS) / système de fichiers en réseau (NFS)

Les projets d'IA / ML déployés dans les douanes impliquent souvent de grands ensembles de données et nécessitent un accès à haut débit pour un entraînement et une inférence efficaces des modèles. Un système de stockage en réseau (NAS) ou un système de fichiers en réseau (NFS) fournissent un stockage centralisé et évolutif accessible via un réseau. Pour absorber les charges de travail de base de l'IA / ML, une configuration NAS / NFS minimale doit prendre en charge les opérations de lecture et d'écriture simultanées sur plusieurs nœuds, afin d'assurer un partage transparent des données pour les tâches d'IA / ML.

Spécifications :

- espace de stockage évolutif d'au moins 10 To pour accueillir les ensembles de données, les points de contrôle et les journaux des modèles ;
- prise en charge de Network File System (NFS) v3 ou v4 pour permettre des opérations de lecture / écriture très performantes ;
- vitesse de lecture / écriture séquentielle : au moins 500 Mo/s pour éviter les goulets d'étranglement lors de l'entraînement du modèle ;
- stockage extensible : prise en charge de disques supplémentaires ou intégration dans le cloud pour une évolution future.

9.6.6 Stockage cloud

Il existe deux principaux types de solutions de stockage cloud, chacun adapté à des cas d'utilisation différents : le **stockage d'objets dans le cloud** et **stockage par blocs dans le cloud**.

³³ Les cœurs CUDA sont des processeurs parallèles dans les GPU qui accélèrent les tâches informatiques générales, tandis que les cœurs Tensor sont spécialisés dans les opérations matricielles, stimulant les performances d'apprentissage profond pour les modèles d'IA / ML.

Le stockage d'objets dans le cloud est une solution optimale pour le stockage de grands ensembles de données non structurées, y compris les images, les vidéos, les journaux et les artefacts de modèles d'IA / ML. Accessible via des API, il est spécialement conçu pour l'évolutivité, la durabilité et la rentabilité, ce qui le rend adapté à la gestion de divers types de données et aux besoins de stockage à grande échelle. Avec une durabilité et une disponibilité élevées, il garantit l'intégrité et l'accessibilité des données à grande échelle. L'utilisation courante consiste à stocker des ensembles de données d'entraînement, des points de contrôle de modèles, des journaux et d'autres données non structurées, ce qui le rend particulièrement adapté au traitement par lots et aux flux d'entraînement hors ligne.

Spécifications :

- avec une capacité de base à partir de 10 To, le stockage d'objets dans le cloud offre une évolutivité pratiquement illimitée, ce qui permet de prendre en charge de manière transparente des volumes de données croissants.

Le stockage par blocs dans le cloud, en revanche, offre un stockage à haute performance et à faible latence adapté aux données structurées. Il est directement relié aux machines virtuelles (VM) sous forme de disques durs virtuels, offrant un accès rapide et fréquent aux données, essentiel pour des applications telles que les bases de données, les analyses en temps réel et les systèmes transactionnels. Conçu pour la vitesse et l'efficacité, il prend en charge les opérations de lecture / écriture aléatoires et peut être dimensionné ou ajusté pour répondre aux exigences de performance.

Spécifications :

- avec une capacité initiale de 2 To par instance, le stockage par blocs dans le cloud est idéal pour les charges de travail sensibles à la latence, où même des retards minimes peuvent avoir un impact sur la performance, comme l'inférence d'IA en temps réel ou les transactions de base de données.

Le choix entre le stockage d'objets et le stockage par blocs dépend des exigences spécifiques du projet d'IA / ML, notamment des types de données, des besoins en termes de performances et des modalités d'accès.

9.7 Mise en réseau

9.7.1 Bande passante du réseau

Une bande passante suffisante est essentielle pour l'accès rapide aux données, la collaboration à distance et le déploiement de modèles, en particulier dans les environnements d'IA / ML basés sur le cloud ou distribués. Une infrastructure bien optimisée réduit la latence, les goulets d'étranglement et la dégradation des performances, en particulier pour les applications à forte intensité de données telles que l'apprentissage profond, l'analyse en temps réel et l'entraînement de modèles à grande échelle.

Spécifications :

- interconnexions à haut débit comme Infiniband ou Ethernet 10/40/100 Go/s pour le transfert rapide de données entre les serveurs et les systèmes de stockage, ainsi que l'entraînement distribué et l'inférence en temps réel ;
- exigences minimales : Bande passante réseau de 1 Go/s pour prendre en charge les transferts de données, les environnements de développement à distance et le traitement cloud ;
- faible latence : garantit une interaction fluide avec l'infrastructure IA / ML distante, notamment les lacs de données, les solutions de stockage et les dispositifs informatiques périphériques ;
- évolutivité : l'infrastructure doit prendre en charge une bande passante plus élevée (par exemple, 10 Go/s ou plus) à mesure que les charges de travail d'IA / ML augmentent, en particulier pour l'inférence en temps réel et l'ingestion de données à grande échelle.

9.7.2 Ressources de calcul cloud

La section précédente fournit les spécifications minimales pour les ressources de calcul sur site, c'est-à-dire le matériel et le stockage hébergés localement dans le centre de données d'une administration des douanes. Cette configuration garantit un contrôle total des données, de la sécurité et des ressources de calcul, mais suppose des coûts initiaux et de maintenance plus élevés.

L'autre solution consiste à utiliser des ressources de calcul cloud qui fournissent de la puissance de calcul, du stockage et des services à la demande. Le choix entre une infrastructure sur site et une infrastructure cloud dépend du coût, de l'évolutivité, de la sécurité des données et des exigences opérationnelles.

Les administrations des douanes peuvent commencer par utiliser une capacité de calcul cloud évolutive pour les projets d'IA / ML, afin de réduire au minimum les coûts initiaux. Les instances de calcul cloud sont des machines virtuelles (VM) hébergées sur des plateformes cloud (AWS, Azure, Google Cloud), offrant des configurations CPU / GPU avec une puissance de calcul flexible et évolutive pour des charges de travail IA / ML variables.

Spécifications :

- instances CPU : 8 vCPUs, 32 Go RAM ;
- instances GPU : 4 x GPU NVIDIA V100, 64 Go de mémoire GPU ;
- stockage : stockage SSD dans le cloud ;
- réseau : interconnexions cloud 10GbE+ à haut débit pour le traitement de grands ensembles de données ;
- auto-scaling (mise à l'échelle automatique) : ajuste dynamiquement le nombre d'instances de calcul en fonction de la charge de travail, garantissant une utilisation optimale des ressources et un bon rapport coût-efficacité ;
- groupes de mise à l'échelle automatique pour gérer le nombre d'instances en fonction de la demande.

Pour les administrations des douanes, une approche hybride est souvent idéale – en commençant par des ressources de calcul sur site pour les charges de travail sensibles à la sécurité, tout en exploitant les services d'IA / ML dans le cloud pour les tâches de traitement évolutif et d'apprentissage profond. Cela garantit des performances, une conformité et une rentabilité optimales, permettant aux administrations des douanes de développer et de déployer efficacement des capacités d'IA / ML.

9.8 Opérations d'apprentissage automatique (MLOps)

Les opérations d'apprentissage automatique (MLOps) désignent l'ensemble des pratiques et des outils qui permettent aux organisations de construire, de déployer et de maintenir des modèles de ML dans un environnement de production. Les MLOps comblent le fossé entre les experts en science des données et les équipes d'exploitation informatique, en veillant à ce que les modèles d'IA soient développés, déployés et gérés de manière efficace.

9.8.1 Renforcement des capacités MLOps au sein d'une administration des douanes

Pour mettre en œuvre efficacement les initiatives en matière d'IA / ML, une administration des douanes doit non seulement mettre en place l'infrastructure technique, mais aussi établir de solides capacités MLOps. Les MLOps (Machine Learning Operations) sont une pratique cruciale qui comble le fossé entre la science des données et les opérations informatiques, en veillant à ce que les modèles d'apprentissage automatique puissent être développés, déployés et gérés à la bonne échelle. Cette capacité garantit que les modèles d'IA / ML sont non seulement développés et déployés efficacement, mais aussi gérés, contrôlés et encadrés tout au long de leur cycle de vie. Les MLOps apportent l'excellence opérationnelle, l'évolutivité et la conformité aux initiatives d'IA / ML, permettant à l'administration des douanes

d'exploiter tout le potentiel des technologies d'IA / ML tout en maintenant les normes les plus élevées en matière d'exactitude, de fiabilité et de responsabilité éthique.

En mettant en œuvre les pratiques MLOps, les organisations peuvent :

- accélérer le développement et le déploiement de l'IA : les MLOps rationalisent le processus d'élaboration, de test et de déploiement des modèles d'IA, réduisant ainsi les délais de mise sur le marché ;
- améliorer les performances du modèle : les MLOps veillent à ce que les modèles soient surveillés et mis à jour en permanence, optimisant ainsi leurs performances au fil du temps ;
- améliorer la reproductibilité : les MLOps permettent d'établir des flux de travail reproductibles, ce qui facilite la reproduction et l'extension des expériences d'IA ;
- réduire les risques : les MLOps contribuent à atténuer les risques associés aux projets d'IA, tels que les problèmes de qualité des données, les biais des modèles et les vulnérabilités en matière de sécurité.

9.8.2 Étapes de la mise en place d'une capacité MLOps

Le développement d'une capacité MLOps solide nécessite une approche structurée pour rationaliser le développement, le déploiement, le suivi et la gouvernance des modèles de ML. Les étapes suivantes décrivent les aspects clés de la mise en place d'une pratique MLOps évolutive et durable :

a. Mettre en place un environnement de développement centralisé

Un environnement de développement structuré garantit une collaboration, une expérimentation et une gestion des versions efficaces.

- Déployer un environnement de développement d'IA / ML avec des outils essentiels, notamment des IDE, des systèmes de gestion des versions et des frameworks ML.
- Intégrer des outils de suivi des expériences pour gérer la performance des modèles et le réglage des hyperparamètres.
- Mettre en œuvre des politiques de contrôle d'accès pour gérer la sécurité dans les espaces de travail partagés.

b. Automatiser les pipelines de ML

L'automatisation améliore la cohérence et accélère le cycle de vie des ML.

- Mettre en œuvre des pipelines d'intégration continue / de déploiement continu (IC / DC) pour des mises à jour et des réentraînements efficaces des modèles en toute transparence.
- Automatiser les processus clés tels que le prétraitement des données, l'entraînement des modèles, l'évaluation et le déploiement.
- Intégrer des tests et une validation automatisés pour garantir la fiabilité avant le déploiement.

c. Développer des pipelines et des modèles réutilisables

Les actifs réutilisables améliorent l'efficacité et la normalisation.

- Créer des modèles de pipeline ML préconstruits pour les tâches courantes telles que la transformation des données, l'entraînement et l'inférence.
- Mettre en œuvre l'infrastructure en tant que code (IaC) pour garantir des environnements de déploiement cohérents.
- Développer des API normalisées pour l'inférence de modèles et l'intégration système.

d. Mettre en œuvre une gestion et une gouvernance robustes des données

Une gouvernance des données efficace garantit la qualité, la sécurité et la conformité des données.

- Mettre en place un référentiel de données centralisé pour gérer les données structurées et non structurées.
- Mettre en place un système de gestion des versions des données pour suivre les modifications apportées à l'ensemble de données et garantir la reproductibilité.

- Veiller à la validation des données et à la conformité réglementaire pour garantir l'alignement sur les lois relatives à la protection de la vie privée.

e. Mettre en place une capacité évolutive d'entraînement et d'expérimentation de modèle

L'infrastructure d'entraînement évolutive optimise les performances du modèle.

- Utiliser des ressources de calcul cloud ou sur site pour accélérer l'entraînement du modèle.
- Automatiser le réglage des hyperparamètres pour améliorer l'efficacité.
- Activer l'expérimentation en parallèle pour optimiser la sélection des modèles.

f. Rationaliser le déploiement et l'utilisation des modèles

Un déploiement efficace garantit l'évolutivité et la fiabilité.

- Utiliser la conteneurisation et l'orchestration pour un déploiement flexible.
- Mettre en œuvre des plateformes de maintenance des modèles pour une inférence optimisée.
- Effectuer des tests A / B et des déploiements fictifs pour valider les nouveaux modèles.

g. Contrôler et assurer la maintenance des modèles en production

Le contrôle continu garantit la performance et l'équité au fil du temps.

- Déployer des outils de surveillance des modèles pour contrôler la précision, la latence et la dérive.
- Mettre en œuvre la détection des dérives et le réentraînement automatisé pour maintenir la précision.
- Utiliser des frameworks d'IA explicable³² pour assurer la transparence de la prise de décision.

9.9 Outils d'intégration de données pour l'intégration de l'IA / ML

Pour intégrer les solutions d'IA / ML aux systèmes existants tels que les systèmes de gestion douanière, les plateformes de guichet unique, les systèmes de suivi électronique du fret, les systèmes ERP et de ressources humaines, l'administration des douanes a besoin d'outils d'intégration des données robustes pour faciliter un flux de données transparent et l'interopérabilité entre les différents systèmes, en veillant à ce que les modèles d'IA / ML puissent accéder aux données, les traiter et fournir des informations exploitables en temps réel. Ces outils d'intégration prennent en charge divers formats de données, protocoles et exigences de traitement en temps réel, fournissant l'infrastructure nécessaire pour permettre aux modèles d'IA / ML d'exploiter les données dans l'ensemble de l'écosystème douanier afin d'améliorer la prise de décision, l'automatisation et l'efficacité opérationnelle. Les spécifications techniques proposées pour les outils d'intégration des données sont présentées ci-dessous.

9.9.1 Apache Spark

Apache Spark est un puissant moteur analytique unifié open source conçu pour le traitement de données à grande échelle. Il prend en charge diverses tâches d'intégration de données, notamment l'ETL (Extract, Transform, Load – extraire, transformer, charger), le traitement de flux en temps réel et l'analyse avancée, ce qui en fait un excellent choix pour l'intégration de modèles d'IA / ML dans divers systèmes douaniers. Il est particulièrement adapté aux tâches d'intégration de données volumineuses et à faible latence, telles que le traitement de grands ensembles de données provenant des systèmes de gestion douanière, de plateformes de guichet unique, de systèmes de suivi électronique du fret, d'analyses des risques douaniers en temps réel et d'analyses prédictives.

Spécifications :

- configuration du cluster : un minimum de 4 nœuds avec des CPU à 16 cœurs, 64 Go de RAM par nœud ;

³² L'IA explicable (ou XAI) fait référence aux techniques qui rendent les décisions des modèles d'IA transparentes, interprétables et compréhensibles, ce qui renforce la confiance des utilisateurs, facilite les audits et favorise la conformité avec les exigences réglementaires en expliquant les prédictions et le comportement des modèles.

- intégration du stockage : intégration avec HDFS, S3, Azure Blob Storage ou des systèmes de fichiers locaux pour le stockage et la récupération des données ;
- frameworks de traitement des données : prise en charge de Spark SQL, Spark Streaming, MLlib (pour l'intégration ML) et GraphX (pour le traitement de graphes) ;
- sécurité et conformité : intégration avec Kerberos, chiffrement de bout en bout (SSL / TLS) et mécanismes de contrôle d'accès pour garantir la confidentialité des données et la conformité en matière de sécurité ;
- prise en charge des connecteurs : connecteurs prédéfinis pour les bases de données, les magasins de mégadonnées et les systèmes de messagerie ;
- traitement en temps réel : prise en charge du traitement en flux avec une faible latence, permettant une intégration en temps réel avec des systèmes tels que les plateformes de suivi électronique du fret et de surveillance douanière.

9.9.2 Apache NiFi

Apache NiFi (anciennement Apache Niagara Files) est un outil d'intégration de données open source conçu pour automatiser la circulation, la transformation et la gestion des données entre les systèmes. Il offre une interface conviviale pour la conception des flux de données et prend en charge l'intégration des données en temps réel, ce qui le rend idéal pour l'intégration des modèles d'IA / ML dans divers systèmes douaniers. Cet outil est particulièrement adapté aux tâches d'intégration de données en temps réel et par lots, y compris l'ingestion de données provenant de systèmes de gestion des douanes, de plateformes de guichet unique et de sources de données externes.

Spécifications :

- déploiement : CPU à 4 cœurs minimum, 16 Go de RAM par nœud pour les déploiements à petite et moyenne échelle ; possibilité d'extension vers des clusters multinœuds pour les besoins à haut rendement ;
- conception de flux de données : interface visuelle pour la conception de flux de données avec prise en charge de tâches complexes de routage, de filtrage et de transformation ;
- prise en charge des protocoles et des formats : intégration de divers protocoles de données (par exemple HTTP, FTP, MQTT) et formats (par exemple JSON, XML, CSV) pour traiter les données provenant de divers systèmes douaniers et commerciaux ;
- sécurité : chiffrement de bout en bout (SSL / TLS) pour les données en transit, contrôle d'accès basé sur les rôles et intégration avec LDAP ou Kerberos pour une authentification sécurisée ;
- évolutivité : prise en charge du clustering et de l'équilibrage de la charge pour gérer de gros volumes de données et assurer une haute disponibilité ;
- traitement en temps réel : capable d'ingérer et de traiter des données en temps réel, ce qui le rend adapté à des applications telles que le suivi du fret en temps réel et le contrôle du dédouanement.

9.10 Intégration des données avec des systèmes spécifiques

9.10.1 Systèmes de gestion douanière et plateformes de guichet unique

L'intégration des modèles d'IA / ML aux systèmes de gestion douanière (SGD) et aux plateformes de guichet unique implique un échange de données en temps réel pour faciliter l'analyse des risques, la conformité commerciale et la prise de décision automatisée.

Spécifications :

- prise en charge des connecteurs : prise en charge de l'intégration avec les SGD et les API de guichet unique (par exemple, API RESTful, SOAP) pour l'échange direct de données ;

- capacités ETL : processus ETL pour extraire les données des déclarations en douane, des manifestes de fret et d'autres documents commerciaux, les transformer pour alimenter le modèle d'IA / ML et charger les résultats dans le SGD ;
- transformation des données : capacité à traiter les différents formats de données (par exemple UN/EDIFACT, XML, JSON) utilisés dans les transactions douanières ;
- haute disponibilité : clustering et basculement pour garantir une intégration ininterrompue des données avec les systèmes douaniers critiques.

9.10.2 Systèmes de suivi électronique du fret (ECTS)

Les systèmes de suivi électronique du fret (ECTS) permettent de suivre et de contrôler en temps réel les mouvements de fret. L'intégration de ces systèmes avec des modèles d'IA / ML nécessite de traiter des flux de données à grande vitesse pour des tâches telles que l'analyse prédictive et la détection d'anomalies.

Spécifications :

- prise en charge de la diffusion de données en continu : intégration avec des flux de données en temps réel (par exemple Apache Kafka, MQTT) pour l'ingestion continue de données provenant de dispositifs de suivi du fret ;
- traitement à faible latence : capacités de traitement en temps réel avec une latence inférieure à 1 seconde pour les tâches sensibles au temps telles que l'optimisation des itinéraires et la détection des anomalies ;
- agrégation et enrichissement des données : capacité d'agréger et d'enrichir les données de suivi avec d'autres sources, telles que les informations météorologiques et les données commerciales historiques, afin d'améliorer la précision des modèles d'IA / ML.

9.10.3 Systèmes de gestion intégrée (ERP) et de ressources humaines (RH)

Les systèmes ERP et RH contiennent des données précieuses liées aux processus internes, à l'affectation du personnel et à la gestion des ressources, qui peuvent être intégrées aux modèles d'IA / ML pour l'optimisation opérationnelle.

Spécifications :

- intégration de connecteurs : connecteurs prédéfinis pour les systèmes ERP et RH courants (par exemple SAP, Oracle, Workday) afin de faciliter l'extraction et l'intégration des données ;
- confidentialité des données : traitement sécurisé des informations sensibles telles que les dossiers des employés et les données financières, y compris le chiffrement, le contrôle d'accès et le respect des réglementations en matière de confidentialité des données ;
- synchronisation programmée des données : prise en charge de la synchronisation périodique des données (par exemple, quotidienne, hebdomadaire) pour mettre à jour les modèles d'IA / ML avec les dernières données opérationnelles et RH pour des tâches telles que l'optimisation de la main-d'œuvre et l'allocation des ressources ;
- outils de test et de vérification de l'équité : outils de test des modèles d'IA, par exemple MLflow, AI Verify, AI Fairness 360 ou Fairlearn, pour évaluer l'équité, les biais, la fiabilité et garantir le respect des principales normes éthiques ;
- sécurité et conformité : mesures de cybersécurité, chiffrement des données, contrôle d'accès et conformité avec les réglementations en matière de protection des données.

9.10.4 Sécurité et conformité

Les outils d'intégration des données doivent garantir la sécurité des échanges de données entre les systèmes, en particulier lorsqu'il s'agit de données sensibles douanières, commerciales et relatives au

personnel. Le respect des réglementations en matière de confidentialité des données et des normes d'échange de données douanières est crucial.

Spécifications :

- chiffrement des données : chiffrement de bout en bout (SSL / TLS) pour les données en transit et au repos ;
- contrôle d'accès : contrôle d'accès basé sur les rôles (CABR) et intégration avec les systèmes d'authentification existants (par exemple LDAP, Kerberos) ;
- audit et journalisation : fonctions complètes de journalisation et d'audit permettant de suivre l'accès aux données, les transformations et les transferts à des fins de conformité.

10 Coûts

Les fourchettes indicatives de coûts estimés présentées dans cette section sont le fruit d'une combinaison d'études de marché, de références sectorielles³³ et d'informations contextuelles, ainsi que de consultations avec divers acteurs du secteur³⁴.

Ces estimations sont basées sur la littérature accessible librement à ce jour. Toutefois, elles ne doivent pas être interprétées comme des coûts financiers précis ou réels, étant donné que ces coûts varieront en fonction des besoins opérationnels uniques, de l'infrastructure existante et des objectifs stratégiques de chaque administration des douanes. En outre, les frais de licence des logiciels, les contrats d'assistance et les coûts d'intégration peuvent varier de manière significative en fonction des changements de prix des fournisseurs, de la demande du marché et des résultats des négociations. Les coûts peuvent varier en fonction de la situation géographique de l'administration des douanes, y compris les variations régionales de prix, la disponibilité des fournisseurs locaux et les différences de coût de la main-d'œuvre. La taille et l'échelle de l'administration des douanes, y compris le nombre d'utilisateurs, la complexité des opérations et l'étendue des intégrations nécessaires, peuvent entraîner des variations dans les dépenses réelles.

Les fourchettes indicatives de coûts estimés sont uniquement destinées à des fins d'information et de planification.

10.1 Frameworks d'IA / ML

Les frameworks de base de l'IA / ML tels que TensorFlow, PyTorch et R sont open source et disponibles gratuitement. Toutefois, une mise en œuvre efficace nécessite des investissements dans l'infrastructure, du personnel qualifié et un soutien opérationnel permanent, ainsi qu'une intégration avec les systèmes spécifiques aux douanes. Néanmoins, des coûts supplémentaires peuvent être associés à l'utilisation de ces frameworks libres, tels que les frais de licence et de maintenance / support pour les bases de données, les outils de visualisation et les bibliothèques spécialisées pour des tâches telles que la reconnaissance d'images dans l'inspection du fret ou la détection d'anomalies dans les données commerciales.

La fourchette des coûts estimés est indiquée dans le tableau suivant.

³³ Références et sources d'études de marché telles que : IDC, « Worldwide AI and Generative AI Spending Guide » (*Guide des dépenses mondiales en IA et en IA générative*) ; Run.ai, « AI cost estimation : Understanding the financial implications » (*Estimation du coût de l'IA : comprendre les implications financières*) ; ProjStream, « The future of cost estimating: Embracing AI and machine learning » (*L'avenir de l'estimation des coûts : adopter l'IA et l'apprentissage automatique*) ; et PhoenixNAP, « HPC server price : Understanding the cost of high-performance computing » (*Prix des serveurs HPC : comprendre le coût du calcul à haute performance*).

³⁴ Les consultations avec les acteurs du secteur incluent Deloitte, Google, Huawei, Nuctech.

Tableau 3 – Fourchette de coûts pour les frameworks d'IA / ML

Catégorie de coût	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Logiciels et outils	Frameworks open source (gratuits) ³⁵ , extensions propriétaires, licences de support entreprises	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 10 000 à 100 000 USD par an
Licences et conformité	Licences pour les logiciels supplémentaires	10 000 USD – 100 000 USD par an

10.2 Environnement de développement intégré (IDE)

Comme indiqué dans la section 10 du présent rapport, un IDE est essentiel pour écrire, déboguer et visualiser le code de manière efficace. Des outils comme PyCharm nécessitent des licences annuelles par utilisateur, tandis que d'autres, comme Visual Studio Code et Jupyter Notebook, sont libres et gratuits ; toutefois, les versions entreprise ou les services basés sur le cloud peuvent être payants. Les fourchettes de coûts estimés sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 4 – Fourchette de coûts pour l'environnement de développement intégré (IDE)

Catégorie de coût	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Licences de logiciels	Licences libres – Visual Studio Code, Jupyter Notebook	Open source (édition communautaire) – gratuit
	Niveau entreprise (basé sur le cloud) – Jupyter Enterprise Gateway, Google Colab Pro	10 USD – 50 USD par utilisateur / mois
	Niveau entreprise (sous licence) – PyCharm Professional, IntelliJ IDEA Ultimate	200 USD – 700 USD par utilisateur / an

10.3 Gestion des versions

Les systèmes de gestion des versions sont essentiels pour les projets collaboratifs d'IA / ML. Les coûts sont ceux des systèmes de gestion des versions propriétaires ou des frais d'abonnement à GitHub Enterprise, GitLab Premium, etc.

Tableau 5 – Fourchette de coût pour la gestion des versions

Catégorie de coût	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Libre / open source	Des outils tels que Git, GitLab Community Edition et Bitbucket Cloud (version gratuite) offrent des fonctionnalités essentielles de gestion des versions sans frais de licence.	Open source (édition communautaire) – gratuit
SaaS / cloud entreprise	Solutions hébergées pour les entreprises (par exemple GitHub Enterprise Cloud, GitLab Premium, Bitbucket Premium) qui offrent des fonctionnalités avancées de collaboration, de sécurité et de support.	10 USD – 30 USD par utilisateur / mois

³⁵ Les versions open source / communautaires sont généralement gratuites, mais peuvent entraîner des coûts indirects pour le déploiement, la maintenance et le support. Les coûts au niveau de l'entreprise peuvent varier considérablement en fonction de facteurs tels que l'ampleur du déploiement, le nombre d'utilisateurs et le niveau de support requis.

Entreprise / solutions auto-hébergées	Solutions auto-hébergées de niveau entreprise (par exemple GitHub Enterprise Server, GitLab Self-Managed) qui peuvent nécessiter des frais de licence annuels, des coûts d'infrastructure et de maintenance.	3 000 USD – 10 000 USD par an
---------------------------------------	--	-------------------------------

10.4 Automatisation, gestion et gouvernance des données

Les outils d'automatisation ainsi que les cadres de gestion et de gouvernance des données sont essentiels pour améliorer l'efficacité opérationnelle, assurer l'intégrité des données et maintenir la conformité avec les normes réglementaires. Les coûts estimés comprennent les licences de logiciels pour les solutions propriétaires, les outils et la bibliothèque de modèles.

Tableau 6 – Fourchette de coûts pour les outils et le cadre d'automatisation, de gestion et de gouvernance des données

Composante	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Outils d'orchestration	Outils comme Apache Airflow, Prefect ou Luigi	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 10 000 à 100 000 USD par an
Pipelines IC / DC	Open source – Jenkins, GitLab CI/CD, Travis CI Niveau entreprise – GitLab Enterprise, CircleCI, Azure DevOps	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 20 USD – 200 USD par utilisateur / mois
Bibliothèque de modèles	Open source – scikit-learn, TensorFlow, PyTorch gratuit Niveau entreprise – IBM Watson, Google Cloud AI, Azure Machine Learning	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 1 000 USD – + de 10 000 USD par mois
Gestion de configuration	Open source – Ansible, Terraform, Chef Niveau entreprise – Ansible Tower (Red Hat), Terraform Enterprise, Chef Enterprise	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 5 000 USD – + de 50 000 USD par an
Outils de lacs des données	Open source – Apache Hadoop, Apache Spark Niveau entreprise – Amazon S3, Azure Data Lake Storage, Google Cloud Storage	Open source (édition communautaire) – gratuit (hors coûts d'infrastructure) Niveau entreprise – 0,02 à 0,05 USD par Go / mois pour le stockage, coûts supplémentaires pour le traitement et l'analyse des données
Outils de gouvernance des données	Open source – Apache Atlas, ODPI Egeria Niveau entreprise – IBM InfoSphere Information Governance Catalog, Collibra Data Governance, Informatica Axon Data Governance	Open source (édition communautaire) – gratuit (hors coûts de mise en œuvre et de maintenance) Niveau entreprise – 50 000 USD – + de 200 000 USD par an
Outils de qualité des données	Open source – OpenRefine, Great Expectations Niveau entreprise – Informatica Data Quality, Talend Data Quality, IBM InfoSphere Information Server for Data Quality	Open source (édition communautaire) – gratuit (hors coûts de mise en œuvre et de maintenance) Niveau entreprise – 20 000 USD – + de 200 000 USD par an

10.5 Développement et entraînement des modèles

Les composantes de développement et d'entraînement de modèles sont cruciales pour développer et maintenir des modèles de ML efficaces. Le tableau ci-dessous fournit une estimation des coûts afin de planifier et de budgétiser efficacement les outils d'expérimentation, le réglage des hyperparamètres et les cadres d'entraînement distribués.

Tableau 7 – Fourchette de coûts pour le développement et l'entraînement de modèle

Composante	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Outils d'expérimentation	Open source – Jupyter Notebook (v6.x+), RStudio Niveau entreprise – RStudio Server Pro, JupyterLab Enterprise	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 5 000 USD – + de 50 000 USD par an
Outils de réglage des hyperparamètres	Open source – Optuna, Hyperopt, Scikit-learn's GridSearchCV Niveau entreprise – SigOpt, DataRobot AutoML	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 10 000 USD – + de 100 000 USD par an
Outils d'entraînement distribués	Open source – Horovod, la stratégie distribuée de TensorFlow Niveau entreprise – solutions gérées (par exemple, AWS SageMaker, Google Cloud AI Platform)	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 500 USD – + de 5 000 USD par mois

10.6 Architecture de plateforme

Les coûts présentés ci-dessous se concentrent sur les licences de logiciels, le support continu et les coûts d'intégration / personnalisation pour l'architecture de la plateforme uniquement. Il s'agit notamment des licences pour les systèmes d'exploitation (par exemple Windows Server, distributions Linux), les plateformes de virtualisation (par exemple VMware vSphere) et les logiciels de sécurité (par exemple pare-feu, VPN, solutions IAM).

Dans le cas d'un déploiement cloud utilisant des fournisseurs de services cloud comme AWS, Azure ou Google Cloud pour héberger des charges de travail d'IA / ML, les coûts englobent les licences des logiciels pour les services cloud, le support continu des fournisseurs de services cloud et l'intégration / la personnalisation des environnements cloud.

Dans le cas de l'architecture hybride cloud, les coûts concernent les licences des outils de gestion hybride pour gérer et intégrer les environnements hybrides, y compris les outils de connexion sécurisée et les logiciels de gestion unifiée.

Pour le déploiement de Kubernetes Cluster et de la conteneurisation, les coûts comprennent les licences pour les distributions entreprise Kubernetes et les plateformes de conteneurisation comme Docker.

Tableau 8 – Fourchette de coûts pour l'architecture de plateforme

Composante	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Déploiement sur site	Licences pour les systèmes d'exploitation, les logiciels de virtualisation (par exemple VMware) et les logiciels de sécurité (par exemple pare-feu, VPN, solutions IAM)	20 000 USD – 80 000 USD par an
Déploiement dans le cloud	Frais d'abonnement pour les services cloud (par exemple AWS EC2, machines virtuelles Azure), les outils de logiciels en tant que service (SaaS) et les services cloud natifs de sécurité (par exemple, chiffrement, l'IAM)	10 000 USD – 80 000 USD par an
Architecture cloud hybride	Licences pour les outils de gestion hybride (par exemple VMware vSphere avec intégration dans le cloud), les outils	15 000 USD – 90 000 USD par an

	de connexion sécurisée (par exemple VPN, Direct Connect) et les logiciels de gestion unifiée	
Cluster Kubernetes	Open source – Vanilla Kubernetes Niveau entreprise – Red Hat OpenShift, VMware Tanzu	Open source (édition communautaire) – gratuit (hors coûts d'infrastructure) Niveau entreprise - 5 000 USD - 50 000 USD+ par an / cluster
Conteneurisation	Open source – Docker Community Edition Niveau entreprise – Docker Enterprise (qui fait maintenant partie de Mirantis)	Open source (édition communautaire) – gratuit Niveau entreprise – 15 USD – 24 USD par utilisateur / mois

10.7 Exigences en matière de ressources de calcul

Pour une administration des douanes typique, la bonne configuration des ressources de calcul garantit un traitement efficace des données, un entraînement accéléré des modèles et des opérations évolutives essentielles pour des tâches telles que la détection des fraudes, l'estimation des recettes et l'inspection du fret.

Les ressources informatiques présentées ci-dessous fournissent un aperçu détaillé des composants essentiels, y compris les serveurs de calcul à haute performance, la mémoire, les GPU et les solutions de stockage. Il est important de souligner que les fourchettes indicatives de coûts estimés présentées dépendent généralement des environnements spécifiques de développement de l'IA / ML et d'entraînement des modèles. Des facteurs tels que la complexité des tâches de ML, le volume de données, l'évolutivité souhaitée et l'intégration avec les systèmes existants influencent considérablement ces coûts.

Tableau 9 – Fourchette de coûts pour les besoins en ressources de calcul

Composante	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Serveurs de calcul à haute performance (HPC)	Serveurs haute performance équipés de CPU Intel Xeon ou AMD EPYC – Instances CPU : 8 vCPUs, 32 Go RAM Instances GPU : 4 x GPU NVIDIA V100, 64 Go de mémoire GPU	50 000 USD – 80 000 USD par serveur
Mémoire (RAM)	Mémoire vive de grande capacité – 32 Go de mémoire DDR4 ou DDR5 ECC à haut débit.	2 000 USD – 3 000 USD par serveur
Unités de traitement graphique (GPU)	GPU haut de gamme (par exemple, les GPU NVIDIA V100, mais ceux-ci pourront être dépassés d'ici 2025 et des GPU modernes équivalents seront donc nécessaires)	40 000 USD – 60 000 USD par GPU
Stockage local et en réseau	SSD NVMe à grande vitesse (minimum 2 To) et systèmes NAS / NFS évolutifs (minimum 10 To) pour un accès rapide aux données et un partage des données entre plusieurs nœuds	5 000 USD – 10 000 USD par configuration de stockage
Stockage en réseau (NAS) / système de fichiers en réseau (NFS)	Solutions de stockage centralisées et évolutives offrant un débit élevé et une faible latence, prenant en charge les opérations de lecture / écriture simultanées pour un partage transparent des données dans les tâches d'IA / ML	600 USD à plus de 2 000 USD par installation NAS/NFS
Ressources de calcul cloud	Les instances cloud (par exemple AWS EC2, machines virtuelles Azure, Google Compute Engine) offrent une puissance de calcul modulable pour gérer des charges de travail variables. Les instances CPU telles que c5.4xlarge sont adaptées aux tâches intensives, tandis que les instances GPU telles que p3.8xlarge ou p4d.24xlarge fournissent plusieurs GPU pour l'apprentissage profond et le calcul haute performance.	10 000 USD – 80 000 USD par an

Services de stockage cloud	Stockage d'objets évolutif dans le cloud (par exemple Amazon S3, Azure Blob Storage, Google Cloud Storage) à partir de 10 To, plus stockage par blocs dans le cloud (minimum 2 To par instance) pour les applications à haute performance	5 000 USD – 50 000 USD par an
Services de mise à l'échelle automatique	Les services de mise à l'échelle automatique ajustent dynamiquement le nombre d'instances de calcul en fonction de la charge de travail, garantissant ainsi une utilisation optimale des ressources et une bonne rentabilité. Les spécifications incluent des groupes de mise à l'échelle automatique pour gérer le nombre d'instances en fonction de la demande.	3 000 USD – 15 000 USD par an

10.8 Mise en réseau

Une infrastructure de réseau est essentielle pour assurer un transfert rapide des données et une communication transparente entre les serveurs et les systèmes de stockage afin de soutenir les initiatives en matière d'IA / ML. Les exigences en matière de matériel réseau dépendent généralement des environnements spécifiques de développement IA / ML et d'entraînement des modèles et, par conséquent, les fourchettes indicatives de coûts estimés pour l'infrastructure réseau doivent être configurées en fonction de chaque environnement IA / ML spécifique.

Tableau 10 – Fourchette de coûts pour les exigences de mise en réseau

Composante	Description	Fourchette indicative de coût estimé
Interconnexions à haut débit	Les interconnexions à haut débit comme Infiniband ou Ethernet 10/40/100 Go/s sont essentielles pour le transfert rapide de données entre les serveurs et les systèmes de stockage, ce qui est crucial pour l'entraînement distribué et l'inférence en temps réel.	5 000 USD – 25 000 USD par an
Bande passante du réseau	Une bande passante adéquate (minimum 1 Go/s) est nécessaire pour un transfert de données fluide et un accès à distance aux environnements de développement, réduisant ainsi au minimum la latence dans les opérations à forte intensité de données.	2 000 USD – 10 000 USD par an

10.9 Stratégies d'adoption de l'IA / ML rentables pour les administrations des douanes

Si les coûts estimés pour la mise en œuvre des spécifications techniques minimales pour la capacité IA / ML dans les administrations des douanes peuvent paraître élevés, il est important d'avoir conscience qu'il existe d'autres solutions plus économiques pour entreprendre le parcours d'adoption de l'IA / ML.

Les administrations des douanes peuvent tirer parti de diverses stratégies pour intégrer les capacités d'IA / ML dans leurs opérations sans investir immédiatement dans une infrastructure interne et des capacités de développement étendues. Ces stratégies économiques d'adoption de l'IA / ML par les administrations des douanes offrent des options de remplacement pratiques qui permettent une approche progressive et évolutive de la mise en œuvre des solutions d'IA / ML, en conciliant la nécessité d'un progrès technologique et les contraintes budgétaires.

Les administrations des douanes peuvent explorer plusieurs solutions pour réduire les coûts liés à l'intégration de l'IA / ML dans leurs opérations sans investir massivement dans des infrastructures et des capacités de développement internes :

1. Solutions basées sur le cloud
 - Utiliser des plateformes cloud qui offrent des services d'IA / ML, réduisant ainsi le besoin d'une infrastructure sur site
 - Les modèles de paiement à l'utilisation permettent une évolution à moindre coût en fonction de l'utilisation réelle
2. Outils et frameworks open source
 - Exploiter des outils gratuits et communautaires tels que TensorFlow, PyTorch et scikit-learn
 - Bénéficier d'avancées rapides et d'une résolution collaborative des problèmes sans frais de licence
3. Collaboration et partenariats
 - Mettre en place des partenariats avec des établissements universitaires ou des experts sectoriels pour le partage des connaissances
 - Participer à des collaborations transfrontalières pour partager les ressources et l'expertise
4. Services MLOps gérés
 - Opter pour des plateformes MLOps gérées qui sont des plateformes / services basés sur le cloud pour gérer les complexités techniques du déploiement de l'IA / ML
 - Réduire la nécessité d'une expertise interne spécialisée au cours des premières étapes
5. Mise en œuvre progressive
 - Commencer par de petits projets à fort impact pour en démontrer la valeur avant de passer à l'échelle supérieure
 - Mettre en œuvre les projets d'IA de manière progressive afin d'étaler les coûts dans le temps
6. Solutions d'IA préconstruites
 - Utiliser des modèles préentraînés et des services d'IA adaptés aux cas d'utilisation spécifiques de la douane
 - Adapter les solutions existantes plutôt que partir de zéro

En explorant ce qui précède, les administrations des douanes peuvent intégrer les capacités d'IA / ML dans leurs opérations de manière plus rentable, tout en bénéficiant de l'amélioration de l'efficacité et de la prise de décision qu'offrent ces technologies.

11 Compétences et formation

Pour se préparer à tirer parti des technologies d'IA / ML, les administrations des douanes devront investir dans des programmes de formation complets et des initiatives de renforcement des capacités pour doter leur personnel des compétences et des connaissances nécessaires. Il est essentiel de donner la priorité à la formation et au renforcement des capacités afin de garantir que le personnel technique et non technique dispose des connaissances et des compétences nécessaires pour un déploiement réussi et une gestion fructueuse des technologies d'IA / ML.

La formation pourrait être hiérarchisée comme suit :

- principes fondamentaux de l'IA / ML – permettre à l'ensemble du personnel d'acquérir une compréhension de base des concepts de l'IA / ML, en mettant l'accent sur les applications pratiques dans les opérations douanières ;
- science des données et analyse – former le personnel technique au prétraitement, à l'analyse et à la visualisation des données ; mettre l'accent sur le traitement et l'interprétation des données propres aux douanes ;
- gestion des risques et analyse prédictive – développer des compétences dans l'utilisation de l'IA pour l'évaluation et le ciblage des risques ; former le personnel à l'interprétation des informations générées par l'IA pour la prise de décision ;
- éthique et gouvernance de l'IA – former les agents travaillant sur les questions de politique et juridiques aux considérations éthiques dans le déploiement de l'IA ; assurer la conformité avec les réglementations relatives à la confidentialité des données et la législation douanière ;
- gestion de projets d'IA – former les cadres à la supervision de projets d'IA / ML ; se concentrer sur l'intégration de solutions d'IA dans les processus douaniers existants et acquérir une expérience pratique des outils d'IA.

Le développement d'une expertise interne est essentiel pour la viabilité à long terme des projets d'IA / ML et pour réduire autant que possible la dépendance à l'égard des consultants externes. Ce processus de développement implique une combinaison de programmes de formation structurés, de collaboration avec des experts externes et d'expérience pratique avec des outils et des techniques d'IA / ML.

11.1 Développer la maîtrise des données dans l'ensemble de l'organisation

Outre l'expertise technique, les administrations des douanes doivent favoriser une culture de la maîtrise des données dans l'ensemble de l'organisation. La maîtrise des données fait référence à la capacité de comprendre et d'interpréter les données, ce qui est essentiel pour le personnel technique et non technique travaillant sur des projets d'IA / ML. Les agents des douanes, les responsables des politiques et les décideurs devraient être formés à la manière d'interpréter les informations générées par l'IA / ML et de les appliquer dans les processus de prise de décision. La compréhension des perspectives fondées sur les données permet une meilleure supervision, garantissant que les modèles d'IA / ML sont utilisés efficacement pour améliorer les opérations douanières.

Voici quelques-unes des activités proposées pour développer la maîtrise des données :

11.1.1 Programmes de sensibilisation à la maîtrise des données

Les administrations des douanes peuvent mettre en œuvre des programmes de sensibilisation qui présentent les concepts de base en matière de données à l'ensemble du personnel, y compris les agents des douanes, les responsables des politiques et le personnel administratif. Ces programmes peuvent couvrir des concepts fondamentaux tels que la différence entre les données structurées et non structurées, le rôle des données dans les modèles d'IA / ML et la manière dont la qualité des données

affecte la prise de décision. Cela permet de développer une compréhension de base de la manière dont les données influencent les opérations.

11.1.2 Ateliers sur l'interprétation des données

Les administrations des douanes peuvent organiser des ateliers pratiques destinés à enseigner au personnel non technique comment interpréter et utiliser les données. Par exemple, ces ateliers peuvent porter sur la manière de lire les tableaux de bord, de comprendre les scores de risque et d'appliquer les évaluations de risque générées par l'IA afin de prendre des décisions éclairées lors des inspections ou des processus de dédouanement. Des scénarios pratiques impliquant des données douanières réelles peuvent être utilisés pour former le personnel à l'utilisation des données dans les opérations quotidiennes.

11.1.3 Tableaux de bord de données interactifs

La mise à disposition de tableaux de bord de données interactifs adaptés aux différents rôles au sein de l'administration des douanes peut permettre au personnel d'accéder aux données en temps réel et d'interagir avec elles. Par exemple, les agents des douanes pourraient utiliser des tableaux de bord pour suivre les envois à haut risque, tandis que les responsables de la conformité pourraient suivre les tendances en matière d'actions de lutte contre la fraude. Des sessions de formation sur la manière de naviguer dans ces tableaux de bord et d'en extraire des informations utiles permettraient d'améliorer la maîtrise des données.

11.2 Stratégies de développement de la formation et du renforcement des capacités en matière d'IA / ML

11.2.1 Évaluer les niveaux de compétences actuels et recenser les lacunes

La première étape consiste à évaluer le niveau actuel d'expertise technique au sein de l'administration des douanes. Comprendre les capacités existantes de la main-d'œuvre permettra de recenser les lacunes de compétences dans des domaines clés tels que la science des données, le ML, l'ingénierie des données et l'éthique de l'IA. Les administrations des douanes peuvent alors concevoir des programmes de formation ciblés pour combler ces lacunes, en veillant à ce que leur personnel dispose d'une base solide en matière de concepts et d'outils d'IA / ML. Il s'agit notamment d'identifier les employés susceptibles de devenir des champions internes pour les initiatives d'IA / ML et de leur offrir une formation avancée.

11.2.2 Renforcement des capacités grâce à la collaboration interservices

Les initiatives en matière d'IA / ML dans les administrations des douanes nécessitent une collaboration entre différents services, notamment les services chargés de l'informatique, de la gestion des données, des opérations et de la conformité. La mise en place d'équipes transversales travaillant ensemble sur des projets d'IA / ML peut améliorer la communication et garantir une approche holistique de la mise en œuvre. Ces équipes devraient comprendre un mélange de spécialistes par domaine (par exemple, des agents des douanes), d'experts techniques et d'experts en science des données, et veiller à ce que les solutions d'IA / ML soient alignées sur les besoins opérationnels et les exigences réglementaires.

Les programmes de formation croisée, dans le cadre desquels le personnel de différents services est initié aux concepts de l'IA / ML et à leur impact potentiel sur les opérations douanières, peuvent également favoriser une meilleure compréhension et une plus grande collaboration. Cette approche favorise l'intégration de l'IA / ML dans les processus douaniers plus larges, en réduisant les cloisonnements et en veillant à ce que les outils d'IA / ML soient intégrés dans les flux de travail quotidiens.

11.3 Bâtir une expertise technique

Afin de développer les compétences techniques nécessaires aux projets d'IA / ML, les administrations des douanes devraient mettre en œuvre un programme structuré axé sur les compétences fondamentales en matière d'IA / ML, telles que l'analyse des données, le développement de modèles et l'application de techniques algorithmiques aux opérations douanières réelles.

Cette formation peut être dispensée dans le cadre de partenariats avec des établissements universitaires, de cours en ligne ou en collaboration avec des experts en IA / ML ou avec d'autres organismes gouvernementaux.

Des ateliers et des camps d'entraînement axés sur des applications concrètes en douane, telles que la prévision de la non-conformité ou l'automatisation des processus de dédouanement, peuvent renforcer la capacité du personnel à tirer parti de l'IA / ML dans son travail quotidien.

Voici des exemples d'activités et de méthodes de formation qui peuvent contribuer à développer cette expertise :

11.3.1 Partenariats avec des établissements universitaires

Les administrations des douanes peuvent collaborer avec des universités locales ou internationales spécialisées dans la science des données et l'IA / ML. Ces partenariats pourraient proposer :

- des programmes de certification en ML ou en science des données pour le personnel des douanes, fournissant des connaissances de base sur les concepts et les algorithmes de l'IA ;
- des cours personnalisés spécialement conçus pour les douanes, axés sur les applications de l'IA telles que l'analyse des données commerciales, la détection des fraudes et l'optimisation des processus. Les sujets abordés devraient inclure l'utilisation d'algorithmes d'IA / ML tels que les arbres de décision, les forêts d'arbres décisionnels et les machines à vecteurs de support, ainsi que l'application pratique de ces modèles dans les opérations douanières pour l'évaluation des risques, la détection des fraudes et l'optimisation des processus ;
- des stages ou des collaborations de recherche permettant au personnel des douanes de travailler avec des chercheurs universitaires sur des projets d'IA / ML pertinents pour les opérations douanières, tels que l'automatisation de la classification des documents en vue d'accélérer les processus de dédouanement.

11.3.2 Formation pratique, cours en ligne et certifications

Une formation pratique et concrète aux plateformes et outils d'IA / ML (comme Python, R, TensorFlow, etc.) peut aider à se familiariser avec les systèmes nécessaires pour développer et déployer des modèles d'IA / ML. Les administrations des douanes peuvent fournir à leur personnel un accès aux plateformes et aux environnements de programmation les plus courants dans le domaine de l'IA / ML, tels que :

- Python et des bibliothèques comme TensorFlow pour construire des modèles de ML ;
- R pour le calcul statistique et l'analyse de données ;
- TensorFlow pour créer des modèles d'apprentissage profond capables d'automatiser des tâches complexes, telles que la reconnaissance d'images dans des documents scannés.

En raison de sa popularité et de la demande, il n'y a pas de pénurie de prestataires offrant des formations spécialisées en IA / ML pour maîtriser les outils et les logiciels d'IA / ML. Les administrations des douanes peuvent encourager leur personnel à suivre des formations telles que :

- des cours de ML en ligne couvrant les algorithmes clés tels que les forêts d'arbres décisionnels, les réseaux neuronaux et les machines à vecteurs de support (SVM). Ces cours comprennent souvent des défis de codage interactifs et des quiz qui aident à renforcer l'apprentissage ;
- des certifications axées sur l'IA qui combinent théorie et pratique, permettant au personnel des douanes d'acquérir des connaissances pratiques sur des outils tels que Python, R, TensorFlow,

etc. Par exemple, le personnel peut s'inscrire à un cours en ligne sur la modélisation prédictive pour les opérations douanières, en apprenant à construire des modèles qui repèrent les anomalies dans les schémas commerciaux qui indiquent des activités de contrebande potentielles.

11.3.3 Ateliers et camps d'entraînement

Des ateliers ou des camps d'entraînement internes sur l'IA / ML peuvent fournir une expérience intensive et pratique. Ces activités pourraient être animées par des experts en IA / ML ou des fournisseurs de technologies et se concentrer sur des cas d'utilisation réels de la douane :

- camps d'entraînement à l'analyse des données pour former les agents des douanes à l'utilisation de Python ou de R pour analyser les données douanières, par exemple pour cerner les tendances dans les déclarations en douane ou repérer les irrégularités dans les volumes commerciaux ;
- ateliers de développement de modèles de ML pour apprendre au personnel à concevoir, entraîner et valider des modèles d'IA à l'aide de données douanières historiques. Par exemple, les agents pourraient apprendre à développer et à valider des modèles permettant de prédire la probabilité d'une non-conformité ou d'une fraude aux droits de douane.

Ces sessions pratiques offrent la possibilité d'appliquer les techniques d'IA / ML directement aux ensembles de données avec lesquels les agents des douanes travaillent, garantissant ainsi un apprentissage pratique et pertinent.

11.3.4 Hackathons ou défis de données

Les administrations des douanes peuvent organiser des hackathons d'IA / ML ou des défis de données lors desquels des équipes de personnel douanier s'affrontent pour résoudre des problèmes spécifiques à l'aide de l'apprentissage automatique. Voici quelques exemples de thématiques pour ces défis :

- modèles de détection des fraudes : les équipes pourraient être chargées d'élaborer des modèles permettant de détecter des schémas commerciaux inhabituels susceptibles d'indiquer des déclarations frauduleuses ou des marchandises mal classées ;
- optimisation des délais de dédouanement : les participants pourraient travailler sur l'automatisation du processus de dédouanement à l'aide d'algorithmes prédictifs qui donnent la priorité aux envois à faible risque pour un traitement accéléré.

Les hackathons encouragent la collaboration et l'innovation tout en permettant au personnel d'acquérir une expérience pratique des outils et techniques d'IA / ML.

11.4 Établir de nouveaux profils professionnels pour l'IA / ML

L'intégration de l'IA / ML dans les opérations douanières nécessite une expertise dans des domaines tels que l'apprentissage automatique, l'analyse des données et l'automatisation, qui sont différents des rôles traditionnels au sein de la douane. Le service des ressources humaines (RH) des administrations des douanes devrait établir de nouveaux profils et descriptions de postes pour l'IA / ML afin d'attirer, de fidéliser et d'utiliser efficacement le personnel nouvellement formé dans ce domaine spécialisé.

En créant des profils de poste clairs et actualisés qui décrivent les compétences spécifiques, les responsabilités et les aptitudes techniques requises pour les postes en IA / ML, les RH peuvent mieux cibler, recruter et former les talents dont la douane a besoin. En outre, des rôles bien définis permettent d'offrir des possibilités d'évolution de carrière, en veillant à ce que le personnel nouvellement formé se sente valorisé et dispose d'une voie d'évolution claire au sein de l'organisation, ce qui est essentiel pour la fidélisation et le succès à long terme des initiatives d'IA / ML dans les opérations douanières.

Voici quelques exemples de nouveaux profils RH et descriptions de poste :

11.4.1 Spécialiste IA / ML

Aperçu du rôle :

Le spécialiste IA / ML devrait idéalement être employé au sein du service informatique de l'administration des douanes, afin de se concentrer sur le développement technique et le déploiement de modèles d'IA / ML dans les différents domaines des opérations douanières.

Les spécialistes IA / ML sont chargés de concevoir, de développer et de mettre en œuvre des modèles d'IA / ML pour optimiser diverses opérations douanières, notamment l'évaluation des risques, la détection des fraudes et la conformité commerciale. Ce rôle se concentre sur l'exploitation de l'analyse avancée des données et des techniques de ML pour soutenir la prise de décision et améliorer l'efficacité dans l'ensemble de l'administration des douanes. Les spécialistes IA / ML travailleront en étroite collaboration avec les ingénieurs de données, les agents des douanes et les professionnels de l'informatique pour s'assurer que les applications d'IA / ML sont alignées sur les objectifs stratégiques de l'organisation.

Principales responsabilités :

1. Développement de modèles d'IA / ML :
 - développer, entraîner et déployer des modèles de ML à utiliser dans les opérations douanières (par exemple, classement des envois, détection des fraudes, évaluation des risques) ;
 - expérimenter différents algorithmes, tels que les arbres de décision, les forêts d'arbres décisionnels et les réseaux neuronaux pour résoudre les problèmes propres aux douanes ;
 - affiner les modèles pour optimiser les performances, en garantissant une précision élevée et leur pertinence par rapport aux besoins opérationnels.
2. Préparation et analyse des données :
 - collaborer avec l'équipe d'ingénierie des données du service informatique pour préparer, nettoyer et normaliser les données pour les projets d'IA / ML ;
 - analyser de grands ensembles de données provenant des systèmes douaniers afin de cerner les tendances, détecter les anomalies et déterminer les domaines potentiels d'application de l'IA / ML ;
 - travailler avec des données structurées et non structurées, y compris des données commerciales, des rapports d'inspection et des registres de transactions.
3. Déploiement et maintenance :
 - superviser le déploiement des modèles d'IA / ML dans les systèmes de production, en veillant à ce qu'ils s'intègrent harmonieusement dans les opérations quotidiennes de la douane ;
 - contrôler en permanence la performance et la précision des modèles, en les mettant à jour et en les réentraînant si nécessaire pour tenir compte des nouvelles données ou des changements opérationnels.
4. Collaboration interservices :
 - assurer la liaison avec les agents des douanes, les équipes de gestion des risques et le personnel chargé de la conformité pour veiller à ce que les modèles d'IA / ML correspondent aux besoins pratiques et aux exigences réglementaires ;
 - fournir des formations et des conseils aux équipes non techniques sur la manière d'utiliser efficacement les informations issues de l'IA / ML dans les processus de prise de décision.
5. Documentation et rapports :
 - documenter les processus de développement des modèles, les hypothèses et les résultats à des fins de rapports internes et d'audit ;

- préparer et présenter des rapports de performance et des perspectives fondées sur des données à la direction générale, en formulant des recommandations pour l'amélioration des processus.
- 6. Innovation et recherche :
 - être au fait des dernières avancées en matière de technologies d'IA / ML et appliquer des techniques innovantes pour relever les défis liés à la douane ;
 - expérimenter de nouveaux modèles et outils pour explorer les nouvelles applications potentielles de l'IA / ML dans les opérations douanières.

Qualifications clés :

- Formation :
 - bachelier ou master en science des données, informatique, IA, ML, ou dans un domaine connexe ;
 - des certifications professionnelles en IA / ML, en science des données ou dans des domaines connexes constituent un avantage.
- Expérience :
 - 3 à 5 ans d'expérience de travail avec les modèles d'IA / ML, de préférence dans le secteur public ou dans un environnement réglementaire ;
 - expérience confirmée dans le développement et le déploiement d'algorithmes de ML tels que les machines à vecteurs de support (SVM), les forêts d'arbres décisionnels, les réseaux neuronaux, etc. ;
 - expérience de travail avec des plateformes d'IA / ML telles que TensorFlow, Scikit-learn ou des outils similaires.
- Compétences techniques :
 - maîtrise des langages de programmation tels que Python, R ou Java ;
 - maîtrise des outils et techniques d'analyse des données ;
 - une expérience des plateformes d'IA basées sur le cloud (AWS, Google Cloud, Azure) est un plus ;
 - une bonne connaissance des opérations douanières, des réglementations commerciales ou des cadres d'évaluation des risques est souhaitable.

Compétences essentielles :

- esprit analytique : capacité à analyser de grands ensembles de données, à tirer des conclusions significatives et à élaborer des modèles d'IA / ML exploitables ;
- résolution de problèmes : capacité à aborder les défis liés à la douane avec des solutions fondées sur des données et des idées novatrices ;
- compétences en matière de communication : capacité à communiquer des concepts techniques d'IA / ML à des intervenants non-techniciens ;
- collaboration : capacité à travailler avec plusieurs services, notamment avec les agents des douanes, les équipes informatiques et les responsables de la conformité, afin de s'assurer que les modèles d'IA / ML répondent aux besoins opérationnels ;
- capacité d'adaptation : volonté d'apprendre et d'appliquer en permanence de nouvelles techniques et technologies dans le domaine de l'IA / ML.

11.4.2 Expert en science des données (opérations douanières)

L'expert en science des données devrait idéalement être affecté au sein de l'unité Innovation et recherche, ou de l'unité Planification stratégique, en se concentrant sur la prise de décision basée sur les données.

Le rôle de l'expert en science des données met l'accent sur l'exploration, l'analyse et l'interprétation des données, qui soutiennent la planification à long terme, la gestion des risques et les améliorations opérationnelles. Il travaille en étroite collaboration avec les services qui s'appuient fortement sur les

données pour prendre des décisions, telles que les équipes chargées de la conformité, des politiques et de l'inspection, en veillant à ce que les décisions soient fondées sur une analyse solide des données.

L'expert en science des données se concentrera sur l'exploration, l'analyse et l'interprétation de grands ensembles de données afin d'en extraire des informations exploitables susceptibles d'améliorer les opérations douanières. Contrairement au spécialiste IA / ML, qui est principalement responsable du développement et du déploiement de modèles de ML, le rôle de l'expert en science des données consiste à générer des perspectives basées sur les données qui éclairent la prise de décision et à tirer parti de techniques d'analyse avancées pour optimiser les processus.

Principales responsabilités :

1. Exploration et analyse des données :
 - réaliser des analyses approfondies de vastes ensembles de données, y compris les déclarations en douane, les volumes d'échanges et les résultats des inspections, afin de cerner les tendances, de détecter les anomalies et de déterminer des indicateurs clés de performance ;
 - utiliser des méthodes statistiques pour évaluer les processus douaniers, par exemple les délais moyens de dédouanement pour différents types d'envois, ou pour repérer des schémas liés au respect des règles commerciales ou à la fraude.
2. Analyse prédictive et modélisation statistique :
 - élaborer des modèles statistiques pour prévoir les flux commerciaux, les volumes d'expédition ou les niveaux de risque potentiels pour les marchandises à l'entrée ;
 - utiliser l'analyse prédictive pour anticiper les goulets d'étranglement douaniers, ce qui permet à l'organisation d'affecter des ressources de manière efficace pendant les périodes de pic d'activité ;
 - créer des modèles pour prévoir les modifications des comportements commerciaux dus à des changements de réglementation, aux tarifs douaniers ou à des tendances du marché mondial.
3. Visualisation des données et rapports :
 - créer des tableaux de bord interactifs et des visualisations qui aident les parties prenantes à comprendre rapidement les perspectives basées sur les données, telles que les scores d'évaluation des risques, les tendances en matière de détection des fraudes et l'amélioration des délais de dédouanement, et à agir en conséquence ;
 - produire des rapports détaillés qui fournissent des informations sur les schémas commerciaux, les taux de conformité et l'efficacité des inspections, afin d'éclairer l'élaboration des politiques et la planification stratégique ;
 - collaborer avec la direction générale et les agents des douanes pour interpréter ces informations et élaborer des recommandations exploitables.
4. Qualité et gouvernance des données :
 - travailler en étroite collaboration avec les ingénieurs de données pour s'assurer que les pipelines et bases de données sont optimisés pour l'utilisation analytique, en garantissant la qualité et l'intégrité des données ;
 - mettre en œuvre des techniques de validation des données pour garantir l'exactitude, l'exhaustivité et la fiabilité des données commerciales avant qu'elles ne soient utilisées pour l'analyse ou la prise de décision ;
 - définir et contrôler les indicateurs de qualité des données, en veillant à ce que les opérations douanières s'appuient sur des données précises et fiables.
5. Collaboration et soutien interservices :
 - collaborer avec les équipes de gestion des risques, les responsables de la conformité et les unités d'inspection de la douane afin de fournir des perspectives fondées sur des données qui soutiennent leurs objectifs opérationnels ;

- travailler avec les équipes informatiques et d'ingénierie des données pour garantir l'accessibilité des données et concevoir des systèmes permettant aux agents des douanes de suivre les données en temps réel ;
 - fournir un soutien analytique ad hoc aux différents services, leur permettant d'utiliser des perspectives fondées sur les données dans leurs processus de prise de décision quotidiens.
6. Analyse des tendances et des politiques :
- analyser l'impact des nouveaux accords commerciaux, des tarifs douaniers ou des réglementations sur les opérations douanières et les volumes d'échanges, en donnant des indications sur la manière dont les administrations des douanes peuvent s'adapter à ces changements ;
 - suivre les tendances du commerce mondial et les facteurs géopolitiques, en déterminant les risques ou les possibilités potentiels pour les opérations douanières, tels que les changements d'itinéraires commerciaux ou les marchés émergents.
7. Innovation et recherche :
- être au fait des derniers développements en matière de science des données et de technologies d'analyse, y compris les techniques statistiques avancées et les plateformes de mégadonnées ;
 - explorer des moyens innovants d'appliquer l'analyse des données aux nouveaux défis des douanes, tels que l'automatisation des contrôles de conformité ou l'amélioration de la précision des évaluations des risques grâce à des approches fondées sur les données.

Qualifications clés :

- Formation :
 - bachelier ou master en science des données, statistiques, informatique, mathématiques, économie ou dans un domaine connexe ;
 - des certifications professionnelles en analyse de données, statistiques ou mégadonnées sont un plus.
- Expérience :
 - 3 à 5 ans d'expérience dans l'analyse de données, la modélisation statistique ou la science des données, de préférence dans le secteur public ou dans un contexte lié au commerce ;
 - solides connaissances en matière d'analyse exploratoire des données, de détermination des tendances et de techniques statistiques ;
 - expérience du travail avec de grands ensembles de données complexes et de la conception de visualisations de données pour des intervenants non-techniciens.
- Compétences techniques :
 - maîtrise d'outils statistiques tels que R, Python ou SAS ;
 - expertise dans l'utilisation d'outils de visualisation de données tels que Tableau, Power BI ou D3.js pour élaborer des tableaux de bord et des rapports ;
 - connaissance de SQL et d'autres systèmes de gestion de bases de données pour l'interrogation de grands ensembles de données ;
 - la connaissance des plateformes de données basées sur le cloud (par exemple AWS, Google Cloud) et des technologies de mégadonnées (par exemple Hadoop, Spark) est un avantage ;
 - expérience des techniques de modélisation statistique telles que l'analyse de régression, le clustering et l'analyse des séries chronologiques.

Compétences essentielles :

- esprit analytique : capacité à analyser des ensembles de données complexes, à découvrir des schémas et à formuler des recommandations fondées sur des données ;
- résolution de problèmes : capacité à appliquer des techniques statistiques et de science des données pour résoudre des problèmes concrets dans le cadre des opérations douanières ;

- communication : capacité à expliquer clairement les perspectives fondées sur les données et les concepts techniques à des intervenants non-techniciens ;
- collaboration : solides aptitudes au travail en équipe et capacité à travailler avec d'autres services pour soutenir la prise de décision fondée sur des données ;
- souci du détail : haut niveau de précision dans l'analyse des données, garantissant que toutes les perspectives sont fondées sur des données fiables.

12 Évaluation, exemples de réussite et enseignements tirés

Alors que les administrations des douanes se lancent dans des projets d'IA / ML, il est essentiel d'établir des cadres d'évaluation clairs et des indicateurs de réussite afin de s'assurer que ces initiatives apportent une valeur ajoutée et atteignent les résultats escomptés. L'évaluation des projets d'IA / ML implique des analyses quantitatives et qualitatives, axées sur la performance des modèles, les améliorations opérationnelles et l'alignement sur les objectifs stratégiques.

Le succès est déterminé en fonction de la mesure dans laquelle les projets d'IA / ML atteignent les objectifs prédéfinis et contribuent aux objectifs stratégiques à long terme de l'organisation. Les indicateurs de mesure devraient inclure les améliorations en termes d'efficacité, la réduction des coûts et les avantages tangibles pour les opérations douanières, qui devraient faire l'objet d'un suivi au moyen d'indicateurs clés de performance (KPI) appropriés dans le système de gestion des performances de l'organisation.

En contrôlant en permanence les performances et en procédant à des adaptations sur la base des retours d'information, les administrations des douanes peuvent s'assurer que les initiatives en matière d'IA / ML apportent une valeur durable et conduisent à des améliorations significatives de leurs opérations.

12.1 Évaluation

Les étapes de l'évaluation d'un projet d'IA / ML sont les suivantes :

12.1.1 Définition des objectifs du projet

La première étape de l'évaluation des projets d'IA / ML consiste à définir clairement les objectifs et les résultats attendus. Les administrations des douanes doivent définir les objectifs spécifiques que l'initiative d'IA / ML doit permettre d'atteindre, par exemple :

- améliorer la précision de la détection des fraudes ;
- réduire le délai de dédouanement ;
- augmenter les recettes grâce à une meilleure application des règles de conformité.

Ces objectifs servent de base à l'évaluation de la performance et de la réussite du projet.

12.1.2 Définition des mesures de performance pour les modèles d'IA / ML

La viabilité à long terme des modèles d'IA / ML est cruciale. Un projet réussi implique un suivi et une mise à jour continus des modèles afin de s'assurer qu'ils restent pertinents, précis et adaptables à l'évolution de la dynamique commerciale et des exigences réglementaires. Pour mesurer le succès des modèles d'IA / ML, les administrations des douanes doivent établir des mesures de performance permettant d'évaluer l'efficacité des modèles dans la réalisation de leurs objectifs. Ces mesures comprennent généralement :

- **exactitude** : le pourcentage de prédictions ou de classifications correctes effectuées par le modèle d'IA / ML, comme l'identification correcte des envois à haut risque ou des opérateurs non conformes ;
- **précision et rappel** : dans la détection des fraudes ou l'évaluation des risques, la « précision » mesure le nombre de cas signalés qui sont effectivement corrects (réduction des faux positifs), tandis que le « rappel » mesure le nombre de vrais cas positifs relevés (réduction des faux négatifs) ;
- **taux de faux positifs / faux négatifs** : ces mesures sont essentielles dans les opérations douanières, où les faux positifs peuvent entraîner des inspections et des retards inutiles, tandis que les faux négatifs peuvent faire passer à côté de risques ou d'infractions ;
- **stabilité du modèle** : la stabilité du modèle est généralement mesurée sur la base d'un indice de stabilité utilisant des techniques telles que le bootstrapping (méthode de rééchantillonnage) ou la validation croisée (test de plusieurs ensembles de données d'entraînement avec de légères variations, et mesure de la dispersion des performances et des anomalies entre les ensembles de données).

12.1.3 Impact sur la performance organisationnelle et l'alignement stratégique

Au-delà de la performance du modèle, les administrations des douanes devraient évaluer l'**impact opérationnel** des projets d'IA / ML. Ces projets sont considérés comme une réussite s'ils conduisent à des améliorations mesurables des processus douaniers. Les principales mesures opérationnelles sont les suivantes :

- **réduction des délais de dédouanement** : l'un des principaux objectifs des projets d'IA / ML est de rationaliser le processus de dédouanement. Le succès peut être mesuré par la réduction du temps nécessaire au dédouanement des envois grâce aux solutions d'IA / ML, en particulier pour les marchandises à faible risque ou conformes ;
- **augmentation des taux de détection de cas de non-conformité** : une initiative d'IA / ML réussie devrait améliorer la capacité de l'administration des douanes à détecter les activités frauduleuses ou non conformes, en augmentant les recettes provenant des amendes ou en évitant les pertes de recettes imputables au non-recouvrement des droits et taxes ;
- **optimisation des ressources** : les modèles d'IA / ML qui prédisent avec précision les envois ou les opérateurs à haut risque permettent aux administrations des douanes d'affecter les ressources plus efficacement, ce qui permet de réduire la nécessité de recourir à des inspections aléatoires et de concentrer les efforts de l'organisation sur les cas les plus prioritaires ;
- **économies de coûts** : le déploiement de solutions d'IA / ML devrait permettre de réaliser des économies de coûts à long terme grâce à l'automatisation des processus, en réduisant le travail manuel nécessaire pour la saisie ou l'acquisition des données, les inspections et l'évaluation des risques.

12.1.4 Mesure du succès des projets d'IA / ML

Le succès des projets d'IA / ML pour les administrations des douanes se mesure à l'aune de leur alignement sur des objectifs stratégiques plus larges, notamment l'efficacité opérationnelle, la gestion des risques, la conformité, la facilitation des échanges et la sécurité. L'évaluation des contributions de l'IA / ML à ces objectifs passe par la prise en compte des facteurs suivants :

- **efficacité opérationnelle** : l'IA / ML devrait permettre d'optimiser l'affectation des ressources, d'automatiser les processus et de réduire les délais et les coûts de traitement. Le succès se mesure en fonction de la réduction des délais de dédouanement, de l'automatisation des tâches répétitives et de l'augmentation de la productivité ;
- **facilitation des échanges** : l'IA / ML devrait créer un environnement commercial transparent en accélérant le dédouanement, en réduisant les délais et en améliorant la visibilité de la chaîne

logistique. Le succès se mesure en fonction de l'augmentation des volumes d'échanges, de l'accélération du traitement et de l'amélioration de la satisfaction des opérateurs ;

- **gestion des risques** : l'IA / ML devrait renforcer l'évaluation des risques en améliorant la précision de la détection des fraudes et des anomalies. L'efficacité est mesurée par un meilleur ciblage des envois et des passagers à haut risque, tout en réduisant les faux positifs ;
- **conformité** : l'IA / ML devrait améliorer la conformité réglementaire en favorisant l'exactitude en matière de classement, d'évaluation et dans les obligations déclaratives. Le succès se traduit par des taux de conformité plus élevés, moins de violations de la réglementation et des mesures de lutte contre la fraude plus efficaces ;
- **sécurité** : l'IA / ML devrait renforcer la sécurité aux frontières en améliorant la surveillance, en détectant les marchandises illicites et en empêchant la contrebande. L'efficacité est évaluée en fonction de l'amélioration des taux de détection, du renforcement des capacités de contrôle et de l'amélioration de la coordination avec les services de lutte contre la fraude.

En évaluant ces aspects, les administrations des douanes peuvent mesurer l'efficacité de leurs projets d'IA / ML dans la réalisation de leurs objectifs stratégiques et l'amélioration de leurs performances globales.

12.1.5 Adoption et satisfaction des utilisateurs

L'adoption et la satisfaction des utilisateurs constituent une mesure essentielle du succès. Les administrations des douanes devraient évaluer dans quelle mesure les agents des douanes et les autres parties prenantes adoptent les systèmes d'IA / ML et s'ils trouvent ces outils utiles dans leur travail quotidien. Ces aspects peuvent être évalués au travers des mesures suivantes :

- **formation et facilité d'utilisation** : mesurer le degré de formation et d'aisance des utilisateurs avec les nouveaux systèmes d'IA / ML ;
- **enquêtes de retour d'information** : obtenir un retour d'information sur la manière dont les outils d'IA / ML ont amélioré ou affecté les flux de travail des agents des douanes, des équipes chargées de la conformité et des autres utilisateurs.

12.1.6 Analyse coûts-avantages

Le retour sur investissement du projet d'IA / ML constitue une mesure importante du succès. Les administrations des douanes devraient procéder à une analyse coûts-avantages afin de déterminer si les avantages à long terme du système d'IA / ML l'emportent sur les coûts de développement, de mise en œuvre et de maintenance. Le succès peut être mesuré en fonction de la capacité du système à générer :

- **des économies à long terme grâce à la réduction du traitement manuel et à l'automatisation ;**
- **des gains en termes de recettes grâce à l'amélioration de la détection des fraudes, du recouvrement des droits et taxes et de l'application des règles de conformité ;**
- **des améliorations en termes d'efficacité qui se traduisent par des délais de dédouanement plus courts et une réduction des inspections grâce à une meilleure évaluation des risques.**

12.2 Enseignements tirés

Pour intégrer efficacement les « enseignements tirés » dans les projets d'IA / ML, les administrations des douanes peuvent adopter plusieurs approches clés :

1. **plateformes formalisées de partage des connaissances** : établir un référentiel centralisé permettant aux équipes de projet de documenter les défis, les solutions et les enseignements tirés. Des sessions régulières de partage des connaissances en interne, telles que des ateliers et des séminaires, peuvent contribuer à diffuser ces informations dans les différents services, afin que les équipes soient mieux équipées pour les futures initiatives en matière d'IA / ML ;

2. **évaluations après la mise en œuvre** : réaliser des évaluations après l'achèvement du projet pour analyser ce qui a fonctionné et ce qui n'a pas fonctionné. Ces évaluations doivent impliquer les principales parties prenantes et se concentrer sur les enseignements techniques, opérationnels et liés aux processus. L'intégration de boucles de rétroaction tout au long du cycle de vie du projet permet aux administrations des douanes d'affiner et d'adapter en permanence leurs stratégies ;
3. **programmes de formation et de développement** : utiliser les enseignements tirés pour mettre à jour les programmes de formation du personnel et créer des possibilités de mentorat, permettant aux équipes expérimentées de guider les nouveaux adoptants. Cela permet de s'assurer que le personnel applique les bonnes pratiques et évite de répéter les erreurs du passé, ce qui contribue à renforcer les connaissances institutionnelles en matière d'IA / ML ;
4. **collaboration interagences** : partager les enseignements avec d'autres administrations des douanes ou organismes concernés afin de promouvoir l'apprentissage collectif. Par le biais de forums, d'ateliers ou de conférences, les administrations des douanes peuvent échanger des idées et des bonnes pratiques, contribuant ainsi à réduire la fracture numérique entre les pays émergents et les pays avancés.

13 Conclusion : l'IA / ML, catalyseur de la transformation des administrations des douanes

L'intégration de l'IA / ML dans les opérations douanières représente un changement stratégique dans la manière dont les administrations des douanes gèrent les échanges, la conformité et la lutte contre la fraude dans un environnement mondial complexe. Ce rapport explore les implications profondes de l'adoption de l'IA / ML, sous l'angle des capacités technologiques, des cadres juridiques, des considérations politiques et des stratégies de mise en œuvre et à l'aide d'études de cas.

Les technologies d'IA / ML offrent aux administrations des douanes des points d'inflexion stratégique, permettant à la fois des améliorations évolutives et des changements révolutionnaires. Les améliorations évolutives se concentrent sur la rationalisation des opérations, l'amélioration du profilage de risques et l'automatisation des tâches répétitives. Les applications avancées, y compris l'IA générative, ouvrent la voie à des capacités révolutionnaires, telles que l'utilisation des LLM pour valider les déclarations en douane, les factures et les certificats d'origine en temps réel, ou en combinant les LLM avec les réseaux neuronaux graphiques (RNG) pour analyser, visualiser et synthétiser des modèles à partir des données d'expédition, des registres douaniers et des réseaux sociaux.

L'un des thèmes clés soulignés tout au long du présent rapport est l'importance d'une approche structurée et progressive de l'adoption de l'IA / ML. Les administrations des douanes sont encouragées à commencer par de petits projets pilotes à fort impact, axés sur des cas d'utilisation spécifiques, et à obtenir des résultats rapides avant de passer à des systèmes plus avancés et plus intégrés. L'un des exemples utilisés dans de nombreuses administrations des douanes est l'utilisation d'algorithmes basés sur l'IA pour améliorer le classement des marchandises et la précision de l'évaluation, réduisant ainsi les délais de traitement douanier et de dédouanement du fret. Cette approche progressive réduit au minimum les risques tout en démontrant des avantages tangibles dès le début du processus.

La clé d'une mise en œuvre réussie est la reconnaissance du fait que l'adoption de l'IA / ML n'est pas un effort ponctuel, mais un processus itératif. Les administrations des douanes doivent suivre en permanence les performances, mettre à jour les modèles et intégrer les enseignements tirés des projets pilotes afin d'affiner les stratégies et d'améliorer les résultats. Cela nécessite d'investir non seulement dans les infrastructures et les outils, mais aussi dans des cadres de gouvernance qui favorisent la flexibilité, l'adaptabilité et la responsabilisation. En outre, l'accent mis sur les solutions basées sur le cloud et les architectures hybrides met en évidence des stratégies de mise en œuvre évolutives et rentables, rendant l'adoption de l'IA / ML accessible aux administrations des douanes dont le niveau de préparation est variable.

On ne saurait trop insister sur l'importance des considérations éthiques, juridiques et réglementaires. Les systèmes d'IA reposant largement sur les données, les administrations des douanes doivent donner la priorité aux cadres de gouvernance des données qui garantissent la qualité, l'intégrité et la conformité par rapport aux réglementations en matière de protection de la vie privée. La mise en place de garde-fous pour atténuer les biais, la transparence de la prise de décision basée sur l'IA et la mise en œuvre de systèmes Human-in-the-Loop (avec intervention humaine) pour garantir la responsabilisation sont des éléments essentiels d'une adoption responsable de l'IA / ML. En outre, le rapport souligne la nécessité de s'aligner sur les réglementations internationales émergentes en matière d'IA, afin de promouvoir la cohérence et la conformité juridique entre les différents pays et territoires.

Le facteur humain reste au cœur du succès de l'adoption de l'IA / ML. Le renforcement des capacités organisationnelles par le biais de programmes de formation ciblés et de partenariats est essentiel pour soutenir les transformations induites par l'IA. Le développement des connaissances en matière d'IA / ML au sein du personnel technique et non technique, la création de rôles spécialisés et la promotion de pratiques collaboratives permettent aux administrations des douanes d'exploiter efficacement les

capacités de l'IA / ML. Il est tout aussi important de favoriser l'engagement des parties prenantes, d'assurer une communication ouverte et d'intégrer des mécanismes de retour d'information pour instaurer la confiance et favoriser l'adoption.

En conclusion, les technologies d'IA / ML offrent aux administrations des douanes une occasion sans précédent de devenir des organisations intelligentes, agiles et orientées sur les données. En tirant parti de l'IA / ML, les administrations des douanes peuvent renforcer leur rôle de facilitateur d'un commerce sûr et efficace tout en relevant les défis liés à la réglementation et à la lutte contre la fraude. Toutefois, cette transformation exige une approche équilibrée, qui commence par des étapes progressives, donne la priorité aux normes éthiques et investit dans le renforcement des capacités à long terme. Grâce à une vision stratégique et à une planification minutieuse, les administrations des douanes peuvent exploiter pleinement le potentiel de l'IA / ML, garantissant ainsi une modernisation durable et une compétitivité mondiale dans les années à venir.

* * *

*



Contactez-nous :

Smartcustoms@wcoomd.org

Visitez notre site Web :

wcoomd.org/SmartCustoms.aspx



