

Robotique par Deep-Learning



Étudiants :
JULIE RIMBAULT
THÉO LABATAILLE
HOUSSAM LIMY
IL-HÈME YAYA
DIMITRI TIMOZ
SIMON GIRARD

Enseignant-responsable du projet :
ABDELAZIZ BENSRAIR

Date de remise du rapport : 17/06/2023

Référence du projet : STPI/P6/2023 – 02

Intitulé du projet : Robotique et Deep-Learning

Type de projet : Bibliographique

Objectifs du projet :

Apprentissage et adaptation des robots de manière autonome à leur environnement grâce à des techniques de Deep-Learning.

- Le fonctionnement d'un robot
- Comprendre le principe du Deep-Learning
- Faire un état de l'art des dernières technologies

Mots-clés du projet : intelligence artificielle, robots, deep-learning, machine-learning

Table des matières

Notations et Acronymes	3
Introduction	4
Organisation du travail	5
1 Robotique	6
1.1 Schéma global du robot	6
1.1.1 Définition du robot	6
1.1.2 Constituants du robot	6
1.2 Différents robots et leurs utilités	9
1.3 Les contraintes des robots	11
2 Machine-Learning et Deep-Learning	12
2.1 Machine - Learning	12
2.1.1 Principes généraux	12
2.1.2 Histoire	13
2.1.3 Types d'apprentissage	13
2.2 Deep - Learning	14
2.2.1 Principes généraux	14
2.2.2 Histoire	14
2.3 L'impact du Deep-Learning	14
3 Application à la robotique	16
3.1 Traitement d'images	16
3.2 Contrôle des mouvements	17
3.3 Dialogue avec un humain	18
3.4 Navigation autonome	19
3.5 Génération de contenu	19
Conclusion et perspectives	21

Notations et Acronymes

IA : Intelligence Artificielle
AMR : Robot mobile autonome
PC : Capteurs proprioceptifs
EC : Capteurs extéroceptifs

Introduction

Depuis toujours, les machines ont fasciné l'homme. Dès les premières inventions mécaniques, l'homme a cherché à créer des créatures artificielles capables d'imiter ou surpasser les capacités humaines. Ce désir incessant a conduit l'homme à l'émergence de la robotique discipline scientifique et technologique qui combine l'informatique, l'électronique et la mécanique pour concevoir des machines programmables capables de résoudre des tâches diverses et complexes.

Au fil des décennies, les progrès en robotique ont été spectaculaires, transformant radicalement de nombreux domaines tels que l'industrie, la médecine, l'exploration spatiale et bien d'autres. Cependant, malgré les avancées majeures, les robots ont longtemps été limités par leurs capacités à prendre des décisions en temps réel tout en s'adaptant à un environnement changeant. C'est à ce moment-là que le Deep learning est entré en jeu.

Le Deep Learning est une branche sous-jacente de l'intelligence artificielle qui a révolutionné la manière dont les machines apprennent et interagissent avec leur environnement. Cette technologie leur a permis de prendre d'analyser leur environnement et de prendre des décisions en temps réel.

Ce rapport bibliographique traitera du sujet du Deep Learning dans le monde de la robotique en 3 grandes parties. Tout d'abord, nous nous poserons et nous répondrons à des questions sur ce qu'est la robotique. Deuxièmement, nous verrons l'impact du Deep Learning dans la robotique tout en étudiant ses avantages et inconvénients. Et finalement, nous verrons quelques exemples concrets de robots appliquant des technologies de Deep Learning.

Organisation du travail

Il-Hème Yaya	Julie Rimbault	Dimitri Timoz
Robotique	Robotique/Conclusion	Introduction/Machine Learning
Simon Girard	Houssam Limy	Théo Labataille
Deep Learning	Applications	Applications

TABLE 1 – Récapitulatif des tâches réalisées

Durant ce projet, le groupe s’est organisé de manière très efficace et collaborative. Dès les deux premières séances, nous avons réalisé tous ensemble le plan du rapport puis nous avons discuté des objectifs, des rôles et des responsabilités de chaque membre. Nous avons établi également un calendrier clair, propre à nous avec des échéances et des jalons pour assurer une progression régulière. Il a donc été décidé à l’issue de ces deux premières séances, que le travail serait réparti par binôme. Chaque binôme était responsable d’une partie spécifique du projet, ce qui nous permettait de nous concentrer pleinement sur nos tâches assignées. A la fin de chaque étape, nous nous sommes rassemblés en tant que groupe pour fusionner nos parties respectives. Cette étape de fusion était cruciale pour assurer la cohésion du projet dans son ensemble.

Pour faciliter la communication nous avons créé un groupe de discussion en ligne où nous partageons des idées, des mises à jour et des ressources pertinentes. Chaque membre avait la liberté de s’exprimer et de contribuer activement aux discussions au sein du groupe, cela a favorisé un environnement ouvert et inclusif. Nous avons également désigné un chef de projet qui était responsable de coordonner les efforts de l’équipe et de résoudre les éventuels problèmes. Grâce à notre organisation solide en binômes et à notre engagement collectif, nous avons réussi à consolider nos différentes parties en un projet final harmonieux et complet tout en respectant les délais et en produisant un travail de qualité.

Chapitre 1

Robotique

1.1 Schéma global du robot

1.1.1 Définition du robot

Un robot est une machine qui inclut des composants mécatronique (mécanique, informatique et électronique). C'est donc un assemblage complexe alliant des pièces électromécaniques(structure) et des pièces électroniques (cerveau), le tout pouvant être piloté par une unité centrale que l'on appelle "système embarqué" : qui peut être soit un logiciel informatique, soit une intelligence artificielle, soit une simple séquence d'automatisme et cela selon le degré de complexités des tâches à accomplir par ce dernier. Toutes ces pièces travaillent ensemble pour un fonctionnement du robot. D'où on vient à se demander quelles sont les différentes pièces d'un robot et comment fonctionnent-elles réellement ?

1.1.2 Constituants du robot

Un robot est composé de capteurs, d'actionneurs, d'effecteurs, d'un système central ou de commande, d'un système d'alimentation et du châssis.

1.1.2.1 Les capteurs

Les capteurs s'occupent de la partie sensorielle du robot. Ils permettent d'acquérir au robot des informations à propos de son environnement et de ses composants internes afin de réagir en interaction avec ceux-ci. En comparaison avec l'humain, les capteurs d'un robot sont donc assimilables à des organes de perception (toucher, vision,...).Ils permettent de convertir une grandeur physique(température,luminosité,débit,présence d'objet, humidité...) en un signal électrique (courant,niveaux logiques, valeur moyenne,fréquence, amplitude, nombre binaire...) qui dépendra de celle-ci captée. Ainsi ce signal électrique est traité par les structures électroniques à des fins de mesures et/ou de commandes,d'action ou de décisions.

Comme on le voit chez l'humain, il y a deux types de perception : la perception proprioception (qui est la perception consciente ou non, lui permettant de distinguer la position des différentes parties de son corps),l'extéroception (qui comporte les sensations causées par des stimuli extérieurs). C'est ainsi ce qui permet à l'homme de se déplacer dans son environnement et d'avoir conscience de sa position. Ce type de système marche également chez le robot. On distingue donc deux grandes catégories de capteurs : les capteurs proprioceptifs et extéroceptifs.

Les capteurs proprioceptifs notés PC sont des capteurs internes qui donnent au robot une impression de soi. Ils sont essentiels pour le contrôle de la position et du mouvement du robot, ainsi que pour l'interaction avec l'environnement. Ils sont utilisés pour la détection de la pression, de la force des actionneurs, de l'orientation des articulations, pour également le calcul des valeurs internes au systèmes du robot telles que le niveau de batterie, l'orientation des roues et bien plus encore.On peut regrouper les capteurs proprioceptifs en deux familles : les capteurs de déplacement et les capteurs d'attitude.

— Les capteurs de déplacement :

Ces capteurs mesurent les déplacements élémentaires, les variations de vitesse ou l'accélération sur des

trajectoires rectilignes ou curvilignes. Ils comprennent les radars Doppler, les odomètres, les accéléromètres, les mesures optiques.

— Les capteurs d'attitude :

Ces types de capteurs mesurent d'une part les angles de roulis et de tangage et d'autre part les angles de cap. Ce sont principalement les gyroscopes, les gyromètres, les inclinomètres, les magnétomètres et les capteurs inertiels composites. Ces capteurs sont en majorité de type inertiels.

Les capteurs extéroceptifs notés EC permettent au robot de percevoir son environnement extérieur. Ce sont généralement des capteurs sensoriels qui fournissent au robot des connaissances sur l'état externe, c'est-à-dire les observations de son environnement et de ses objets. Ils sont utilisés pour la détection d'obstacles, de couleurs, la reconnaissance vocale et des objets et bien plus encore. Ces capteurs extéroceptifs sont essentiels pour la navigation du robot dans son environnement, la mesure des interactions entre le robot et son environnement, mais aussi la prévention et la sécurité.

Comme les capteurs proprioceptifs, les capteurs extéroceptifs peuvent être regroupés en deux familles : les capteurs télémétriques et les systèmes de vision.

— Les capteurs télémétriques

Ils regroupent eux même les capteurs ultrasons et les capteurs lasers.

Les capteurs ultrasonores font partie des capteurs de distance à portée moyenne. Ils ont pour rôle principal la détection des obstacles. Leur principe de fonctionnement est comme suit : Un faisceau émis est réfléchi par un obstacle et capté par le capteur. La durée séparant l'émission et la réception est mesurée, ce qui donne la distance.

Les capteurs à lasers sont utilisés principalement pour des mesures de distances, d'angle mais aussi pour des modélisations 3D de l'environnement (dans ce cas ils seront toujours associés à une caméra). Leur principe à eux est basé sur l'émission d'une onde électromagnétique structurée. Ces capteurs permettent donc d'obtenir un faisceau d'ondes très concentré, contrairement aux capteurs ultrasonores.

— Les systèmes de vision

Ils reposent sur l'utilisation d'une caméra CCD (Charge Coupled Device). Ils servent à la capture des images et des vidéos de l'environnement. Les systèmes de vision sont très performants en termes de portée, de précision et de quantité d'informations exploitables. Ils sont de plus les seuls capables de restituer une image sensorielle de l'environnement la plus proche de celle perçue par l'être humain. En ce qui concerne l'obtention des informations 3D, plusieurs techniques sont utilisées à partir de ce capteur liées généralement à l'adjonction d'un autre capteur. Comme techniques des systèmes de visions, nous pouvons citer : la stéréovision, les capteurs à triangulaire active et la vision omnidirectionnelle.

1.1.2.2 Les actionneurs

Les actionneurs sont des organes du robot responsables des mouvements ou des actions spécifiques du robot. Ils convertissent les signaux électriques ou pneumatiques en mouvement mécanique, permettant ainsi au robot d'interagir avec son environnement. Les actionneurs sont commandés par le système de commande en fonction des données fournies par les capteurs. Ce sont des constituants d'un système mécanique (exemple : bras, patte, roue motrice...) réalisant une action motrice suivant un degré de liberté. Ils peuvent également modifier le comportement physique du robot ou d'un des éléments extérieurs (se déplacer, manipuler des objets, émettre du son ou de la lumière, afficher des informations à un utilisateur). Les actionneurs les plus couramment utilisés dans les robots sont :

— Les moteurs électriques rotatifs permettant à des éléments mobiles de bouger suivant un ou plusieurs degrés de liberté c'est-à-dire de générer des mouvements de rotation, de translation ou de combinaison des deux, en fonction de leur conception et de leur contrôle. Elles sont ainsi des constituants appartenant au domaine de la télémanipulation et sont fréquemment associés à des réducteurs mécaniques à engrenages. Ces moteurs peuvent être de différents types, tels que les moteurs à courant continu (DC), les moteurs pas à pas et les moteurs à courant alternatif (AC).

— Les vérins hydrauliques et pneumatiques assurant la génération des mouvements linéaires ou rotatifs en utilisant la pression des fluides. Ils sont généralement reliés par une tuyauterie à des pompes fournissant des pressions élevées. Les vérins hydrauliques utilisent un fluide hydraulique, tandis que les vérins pneumatiques utilisent de l'air comprimé. Ces actionneurs sont souvent utilisés dans les robots industriels pour des tâches nécessitant une force importante.

1.1.2.3 Les effecteurs

Les effecteurs sont les parties des robots responsables de l'interaction directe avec l'environnement. Ils permettent au robot d'effectuer des actions physiques spécifiques, telles que la manipulation d'objets, le déplacement, la communication ou la génération de signaux. Comme exemple d'effecteurs, nous avons : les effecteurs de préhension (pinces, ventouses ou doigts articulés), les effecteurs de locomotion (roues, chenilles, jambes), les effecteurs de communication (écrans, hauts-parleurs, afficheurs lumineux, signaux sonores), les effecteurs d'actionnement et les effecteurs d'émission de signaux.

1.1.2.4 Le système central

Le système central ou de commande est le cerveau du robot. Il est chargé de contrôler toutes les fonctions du robot et de piloter le robot en lui-même. Il est responsable de la coordination de toutes les parties du robot, en analysant les données fournies par les capteurs et en transmettant des instructions aux actionneurs et aux effecteurs. Le système de commande peut être un ordinateur ou un microcontrôleur programmé pour exécuter des tâches spécifiques. Un microcontrôleur est un circuit intégré et compact, conçu pour régir une opération spécifique et dans un système intégré. Il est composé d'un processeur, d'une mémoire et des périphériques d'entrée et de sortie sur une seule carte ou une seule puce. Ils disposent également d'un système d'exploitation qui facilite la gestion des tâches à effectuer. Ainsi plusieurs programmes peuvent être exécutés simultanément. Allant des systèmes embarqués aux systèmes centralisés ou distribués, on distingue différents types de systèmes de commande mais également l'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique apporte une dimension adaptative et autonome aux systèmes de commande des robots.

1.1.2.5 Le système d'alimentation

Afin de fonctionner, les robots ont besoin d'une source d'énergie. Ainsi l'alimentation d'un robot a pour rôle de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de ses différents composants (les actionneurs, les capteurs, les systèmes de commande et les circuits électroniques). En fonction des besoins spécifiques du robot (autonomie, puissance, durée de fonctionnement et contraintes environnementales), le choix d'une alimentation adéquate est important pour garantir un fonctionnement fiable et efficace du robot. En termes de système d'alimentation utilisés dans les robots, on a : les batteries, l'alimentation externe, les cellules solaires, les piles à combustible ou l'énergie mécanique.

1.1.2.6 Le châssis

Le châssis ou le corps du robot est la structure mécanique qui abrite toutes les parties et permet au robot de se déplacer ou de rester immobile. Il se comporte comme l'ossature du robot en fournissant un support structurel pour les autres composants et en protégeant les circuits internes. Le corps peut être constitué de différents matériaux tels que le métal, le plastique ou la fibre de carbone. Ainsi le choix du châssis dépend des besoins spécifiques du robot, tels que la taille, la charge utile, l'environnement d'utilisation et les tâches à accomplir. Comme exemples de châssis généralement utilisés dans les robots, nous pouvons citer : le châssis à roues, à chenilles, bipède, quadrupède ou encore robotique modulaire.

Voici ci-dessus un schéma résumant le fonctionnement collective entre toutes ces différentes parties du robot :

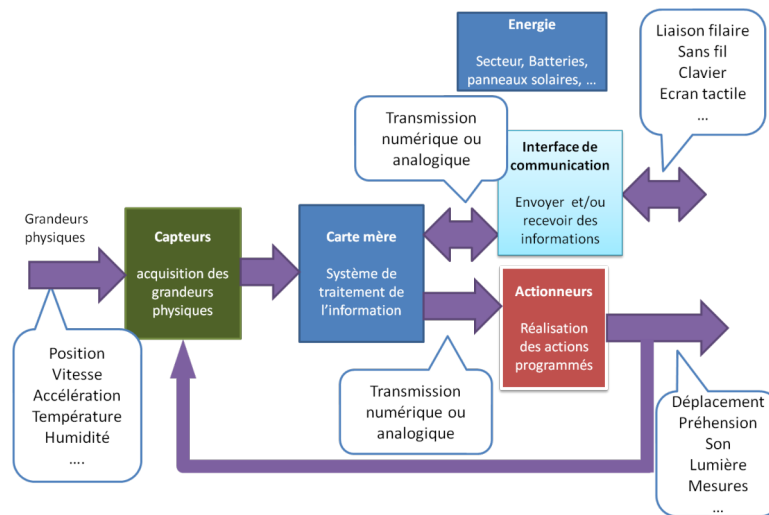


FIGURE 1.1 – Illustration du fonctionnement collective des différentes parties du robot

1.2 Différents robots et leurs utilités

Les domaines d'utilisation de la robotique étant chaque jour plus vastes et plus variés, il est difficile de définir avec précision ce qu'est un « robot ». Chacun possède en effet sa propre forme, ses propres capacités et fonctionnalités. Afin de mieux appréhender leur fonctionnement et leur utilité, nous allons passer en revue les différentes catégories de robots les plus utilisées aujourd'hui depuis les robots industriels jusqu'aux versions actuellement les plus abouties que sont les humanoïdes.

Tout d'abord le secteur qui regroupe la plus grande variété de robots est celui de l'Industrie. En effet, les tâches réalisées dans ce domaine demandent une grande précision et de la rapidité. Les robots, capables de réaliser des tâches ardues et de longues durées, sont de véritables atouts pour les entreprises dont l'activité s'appuie sur les robots suivants :

Le robot mobile autonome (AMR)

Autonome dans ses déplacements grâce à l'intelligence artificielle et à l'emploi de caméras et capteurs, l'AMR est adapté pour le transport de marchandises dans les centres de production. Ses caractéristiques lui permettent de garantir une meilleure efficacité et sécurité.

Le bras robotique

Ce bras articulé pré-programmé possède la capacité de reproduire la fonction d'un bras humain. Ces robots sont souvent utilisés pour placer des marchandises sur des palettes, stocker les matériaux, souder des pièces et inspecter leur qualité. Ils réalisent également des tâches plus surprenantes, telles que tourner les pages d'un livre pour pouvoir le scanner ou encore trier les fruits ou légumes mûrs dans certains secteurs agricoles.

Le cobot

Plus évolué, le cobot agit en coopération avec les humains. Il peut réaliser des tâches variées comme l'inspection de qualité, le moulage par injection, la distribution, le collage et l'assemblage. Le modèle le plus significatif est l'exosquelette qui amplifie la capacité physique d'un être humain tout en diminuant la sensation d'effort et les risques de séquelles corporelles.



FIGURE 1.2 – Exemple d'un exosquelette

Cependant, les robots ne sont pas seulement présents dans le domaine de l'industrie. Leur utilisation s'étend désormais aux secteurs de la médecine, du paramédicale, de la défense, de l'accueil et autres encore. Dans ces domaines se développent notamment les robots humanoïdes.

L' humanoïde

Probablement le plus connu et le plus surprenant, le robot humanoïde présente des caractéristiques comparables à celles d'un être humain. Grâce à son apparence dite 'réconfortante', ce robot a pour vocation à interagir avec l'homme. Toujours en phase de développement, sa ressemblance avec l'être humain est chaque jour plus visible avec des visages plus réalistes et des réactions plus naturelles. Certains modèles sont même aujourd'hui en mesure de tenir des conversations et d'imiter le comportement humain en exprimant des semblants d'émotions. Conçus pour aider l'être humain, ces robots 'sociaux' sont utilisés dans de nombreux domaines depuis les hôpitaux et les maisons de retraite jusqu'au secteur militaire. D'ici quelques années, ils combattront en toute autonomie grâce à des systèmes d'armes automatiques.



FIGURE 1.3 – Exemple de futurs robots humanoïdes militaires

Les robots humanoïdes relèvent du même domaine que les AMR. Ils doivent être capables de détecter, planifier et agir. Pour ce faire, leurs créateurs les dotent de nombreuses connaissances à l'aide de machine-learning et de deep-learning. RIBA II est un exemple très connu de robot humanoïde. Conçu au Japon, il y est essentiellement employé dans le secteur de la santé pour pallier le manque de personnel. Son allure d'ours lui donne un aspect attendrissant qui plaît et rassure les personnes âgées.



FIGURE 1.4 – Le robot RIBA II

Les robots sont en plein essor et chaque jour en phase de développement. Au-delà des robots industriels que nous venons d'évoquer, ils apparaissent désormais dans chaque pan de la vie quotidienne et peuvent être utilisés par des particuliers. Vous avez sans doute tous sûrement observé dans votre quotidien la multiplication des robots domestiques tels que la tondeuse et l'aspirateur autonomes ou des robots de divertissement (jouets interactifs). Ces exemples nous prouvent que les robots seront de plus en plus présents dans nos vies, au restaurant, dans les hôtels, même dans nos maisons. N'oublions pas qu'ils nous permettent aussi d'avancer dans la recherche spatiale. En effet, certains robots sont conçus pour explorer de nouveaux territoires tel que le robot Persévérance qui a atterri sur mars en février 2021.

1.3 Les contraintes des robots

Le domaine de la robotique étant très vaste, il peut être confondu avec d'autres technologies telles que l'Intelligence Artificielle. En effet, ces deux technologies sont totalement différentes même si l'IA peut être appliquée à certains robots.

La robotique est une branche technologique axée sur les robots physiques. Nous pouvons prendre l'exemple des cobots et des bras articulés, ils sont autonomes mais réalisent la même action en boucle. Ils ne possèdent donc pas d'intelligence artificielle.

L'IA est une branche de l'informatique, elle permet de "reproduire des comportements liés aux humains tels que le raisonnement, la planification et la créativité", d'après le CNIL. L'intelligence artificielle n'est pas seulement présente dans la robotique, elle est utilisée dans de nombreux moteurs de recommandation pour des sites tels que Netflix ou Amazone par exemple.

Cependant, certains robots utilisent l'intelligence artificielle, en particulier le Machine-Learning et le Deep-Learning. Ces robots deviennent de plus en plus fréquents. En effet, ils réalisent des tâches plus complexes et permettent à certains robots pré-programmés, tels que le bras articulé, d'obtenir de nouvelles fonctionnalités. En général, les robots à intelligence artificielle utilisent cette technique pour une fonctionnalité en particulier, par exemple la détection d'objets.

Nous pouvons prendre l'exemple de Pepper, fabriqué par Softbank Robotics. Pepper est le premier robot humanoïde social. Présent dans environ 2000 entreprises, Pepper est capable de tenir une conversation, grâce à l'intelligence artificielle.

Ces robots à IA possèdent de nombreux avantages tels que leur rapidité et leur précision. Ils sont capables de travailler dans divers environnements et permettent la création de nombreux postes dans le domaine de la robotique. Malheureusement, ils causent également la disparition de métiers et sont coûteux à la fabrication.

Le déploiement de l'intelligence artificielle pour les robots reste difficile en raison des règles de sécurité exigeantes des usines. Ces robots restent pour le moment très présents dans les centres de recherche.

Chapitre 2

Machine-Learning et Deep-Learning

L'Intelligence Artificielle (IA) est un domaine en plein essor qui regroupe plusieurs sous-domaines, dont le machine learning et le deep learning. Ces deux approches ont connu un développement et une organisation significatifs au cours des dernières décennies, permettant des avancées remarquables dans de nombreux domaines. Dans cette partie, nous explorerons brièvement le machine learning et le deep learning, en mettant en évidence leur importance et leur impact dans le domaine de l'IA.

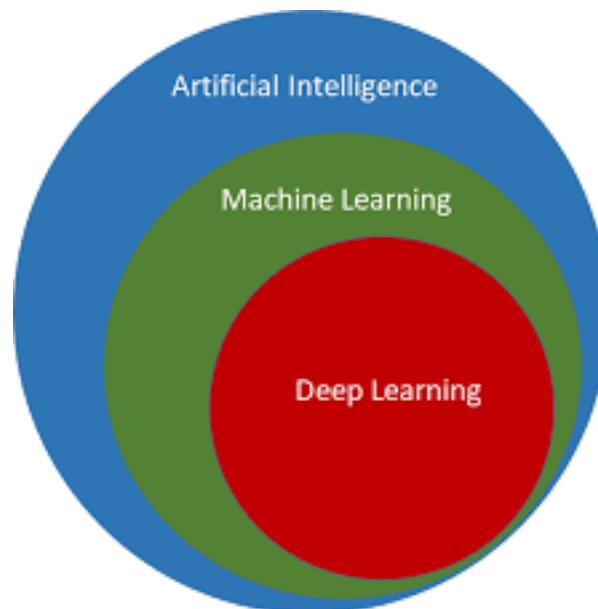


FIGURE 2.1 – Lien entre l'IA, le Machine-Learning et le Deep-Learning

2.1 Machine - Learning

2.1.1 Principes généraux

Le machine learning est la discipline qui vise à doter les machines de capacités de raisonnement logique simple ou complexe. Le machine learning regroupe ainsi différentes techniques et algorithmes permettant de faire de la classification, régression et de la prise de décision. Partie intégrante de la science des données, le machine learning exploite souvent ces données pour adapter les modèles à la tâche demandée, c'est la notion d'apprentissage.

Lorsque nous définissons un modèle, nous utilisons des "hyper-paramètres". Ces hyper-paramètres ont pour objectif d'indiquer au modèle quel type de stratégie il doit appliquer. Par exemple, un hyperparamètre pourrait être une récompense. Si nous augmentons la récompense quand le modèle prend des décisions sans danger, dans ce cas le modèle adoptera une stratégie sécuritaire. Le machine learning fait l'utilisation intensive de statistiques pour, entre autres, repérer les motifs dans les données afin de mieux généraliser le raisonnement. Les données

d'apprentissage apportent une certaine expérience au système, qui lui permettra plus tard de gérer des données qu'il n'avait pas rencontrées auparavant.

2.1.2 Histoire

Dès ses débuts, le machine learning permettait déjà aux robots de détecter des obstacles avec les premiers algorithmes : arbres décisionnels, régressions, voisin le plus proche ou les séparateurs à vaste marge. Bien que ces modèles étaient efficaces dans leur domaine, ils ne permettaient pas la résolution de problèmes complexes. La détection de formes n'était pas encore perfectionnée.

Dans les années 50, Arthur Samuel développe un programme capable de jouer aux échecs. C'est lui qui introduit quelques années plus tard le terme "Machine Learning". Le machine learning est alors introduit comme la catégorie d'intelligence artificielle qui ne nécessite pas qu'on lui décrit explicitement ce qu'il doit faire dans telle ou telle situation. Des algorithmes comme minimax sont alors utilisés permettant de calculer le score pour chaque action possible. Ce genre de modèle a des limitations. En effet, il utilise des stratégies bien souvent dites de "brute-force" (force brute) calculant plusieurs simulations du jeu en temps réel.

Depuis la naissance de ce domaine des sciences dans les années 50, le Machine Learning ne cesse de croître et devient de plus en plus présent dans la vie quotidienne. Ces derniers mois, au moment où nous écrivons ce rapport, l'évolution de ce domaine devient tellement importante que certains experts du domaine ont signé une tribune demandant à certains laboratoires de recherches dans le domaine sont amenés à ralentir leur recherches le temps de définir de nouvelles régulations et ainsi éviter toutes dérives.

2.1.3 Types d'apprentissage

Les méthodes d'apprentissage peuvent être classifiées en trois catégories, aussi bien quand elles concernent le machine learning que le deep learning.

Le plus commun est l'apprentissage supervisé. Cela désigne tout type d'apprentissage qui se base sur des données annotées. C'est-à-dire une liste d'éléments dont on connaît à la fois les informations de base, mais aussi les informations que l'on voudrait que le modèle soit capable de déduire. Ce sont des exemples sur lesquels le modèle peut s'entraîner. En comparant les prédictions du modèle avec les valeurs attendues, on peut déterminer l'efficacité du modèle. On peut également ajuster le modèle pour corriger ses erreurs.

Nous avons ensuite, par opposition, l'apprentissage non supervisé. Il est utile quand nous avons à disposition des données, mais sur lesquelles nous n'avons pas d'informations supplémentaires. Sans ces informations, il n'est pas possible de montrer d'exemple au modèle, il n'est pas possible de le diriger, de le superviser dans l'atteinte d'un objectif connu. Ce qu'il est possible de faire néanmoins, c'est l'analyse des données, par exemple dans l'objectif de trouver des similarités entre différentes entrées, ou d'en faire de la génération.

Le dernier type d'apprentissage est l'apprentissage par renforcement. Celui-ci se base sur l'expérience du modèle. En effet, on fournit au modèle une description de l'environnement dans lequel il évolue. L'objectif de celui-ci est d'en fonction de cet environnement de prendre la meilleure décision. Pour cela, le modèle est récompensé. Quand la décision prise permet d'arriver dans un environnement de meilleure qualité on lui donne un bonus et quand celui-ci est de moindre qualité, on lui donne un malus.[18]

L'apprentissage par renforcement peut s'amener à être très performant dans le domaine de la robotique, il est bien souvent difficile à entraîner. En effet, pour son entraînement l'agent a besoin d'être mis à l'épreuve, et donc d'évoluer dans son environnement. Le point de départ de l'entraînement consistant en des actions aléatoires, cela peut causer problème. Par exemple, dans le cas d'un drone qui apprend à voler, nous ne pouvons pas nous permettre de laisser le drone voler de manière imprévisible.

C'est pour répondre à ces contraintes de l'apprentissage par renforcement qu'il est la plupart du temps nécessaire de réaliser un simulateur du robot et de son environnement pour réaliser une première phase d'apprentissage en toute sécurité dans un monde virtuel. Lorsque cette première phase d'apprentissage est réalisée, nous pouvons espérer que le modèle soit prêt pour le monde réel, mais les imperfections de la simulation peuvent rendre la transition difficile voire impossible.

2.2 Deep - Learning

2.2.1 Principes généraux

Le deep learning fait partie intégrante du machine learning. Partageant les mêmes objectifs et applications, le deep learning se démarque par la technique d'apprentissage utilisée. Le deep learning se base sur des réseaux de neurones à plusieurs couches. C'est la multitude de couches, la profondeur du réseau, qui donne son nom au deep learning.

Bien qu'inspirés des neurones biologiques, les neurones artificiels utilisés dans le deep learning sont grandement simplifiés. Biologiquement, les neurones sont liés par des synapses, qui permettent la propagation de signaux électriques. Quand les signaux électriques reçus par le neurone dépassent un seuil d'excitation spécifique au neurone, cela déclenche la génération d'un nouveau signal électrique. Il se propage le long de l'axone du neurone et peut ensuite transmettre l'information à d'autres neurones via les synapses.

La structure retenue pour l'utilisation de deep learning par des machines est bien plus simple. Déjà, les neurones sont organisés en couches, et les couches sont liées par des connexions de manière linéaire. L'information évolue donc à sens unique, depuis la couche d'entrée vers la couche de sortie. Ensuite, plutôt que d'être transmise par des signaux électriques, l'information est entièrement encodée par des valeurs numériques. Le seuil d'excitation des neurones biologiques est simulé par un poids, à savoir un coefficient multiplicateur appliqué à l'information d'entrée pour déterminer l'information de sortie.

Dans le deep learning, la structure des réseaux de neurones est fixée par son concepteur. Elle est imposée, et ne participe donc pas au processus d'apprentissage. L'apprentissage en deep learning consiste exclusivement à la modification des poids associés à chaque neurone. L'apprentissage est un processus itératif, et on peut observer au fil des itérations le réseau devenir meilleur, alors que les valeurs de ses poids convergent vers une solution idéale.

2.2.2 Histoire

Les premiers travaux de recherche sur l'utilisation de neurones artificiels remontent aux années 1920. D'abord concentrées sur des systèmes à neurone unique, ils ont plus tard été connectés et mis en réseau. C'est dans son livre en 1962 que Rosenblatt décrit un système à plusieurs couches (MLP, Multi-Layer perceptron), composé d'une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Si l'apprentissage décrit par Rosenblatt, ancêtre du deep learning, restait toutefois très limité, c'est sur cette structure qu'ont été basés les futurs modèles d'apprentissage profond. Ainsi, dès 1967, la méthode du gradient stochastique fut utilisée pour l'entraînement de MLP par Shun'ichi Amari. Le succès de ces nouvelles techniques généra un fort engouement pour le domaine, qui retomba dans les années 70, période d'important ralentissement de la recherche.

Au début des années 2000, grâce à la recherche et au développement des capacités de calcul, les premières applications d'apprentissage sur plusieurs couches deviennent possibles dans les premiers systèmes embarqués. En effet, pour réaliser des tâches assez complexes, les modèles développés à l'aide de technologies de Deep Learning deviennent largement plus performants. Un réseau de neurones permet d'approximer une fonction $f(X)$ permettant la prédiction d'une ou plusieurs valeurs en fonction d'un état X . Plus la fonction à approcher est complexe et s'éloigne d'une fonction linéaire, plus on ajoutera de couche au réseau.

Ces techniques ont permis des progrès importants et rapides dans les domaines de l'analyse du signal sonore ou visuel et notamment de la reconnaissance faciale, de la reconnaissance vocale, de la vision par ordinateur, du traitement automatisé du langage.

2.3 L'impact du Deep-Learning

L'un des plus gros problèmes de l'application du Deep Learning dans le domaine de la robotique est que les capacités du robot sont bien souvent limitées. En effet, le robot est limité par ses capacités de calcul. Il est difficile d'embarquer les dernières cartes graphiques dans un drone. En plus des limitations liées aux capacités de calcul, nous avons des limitations énergétiques. Ces considérations, qui revêtent une grande importance dans le domaine de la robotique, deviennent de plus en plus prépondérantes dans les discussions sur le Deep Learning dans son ensemble. En effet, de part son émergence de plus en plus présente dans la société, les modèles de Deep Learning ont un impact considérable sur le réchauffement climatique. C'est alors que nous avons introduit le terme "IA Verte" faisant référence aux modèles à faible impact énergétique et respectueux de l'environnement.

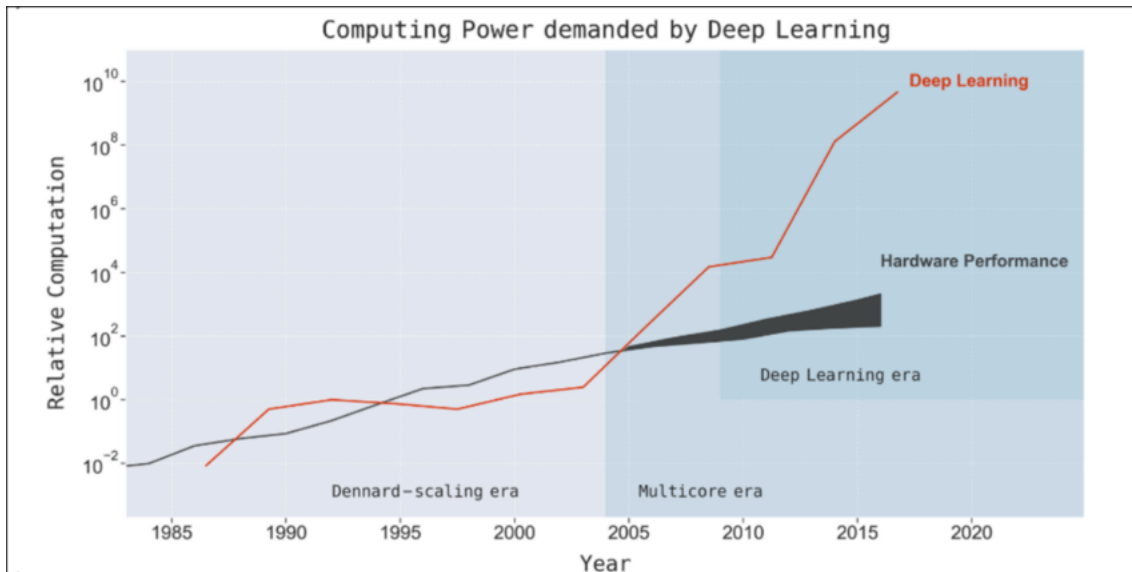


FIGURE 2.2 – Évolution des capacités de calcul requises par les modèles de Deep Learning comparé à l'évolution des capacités de calcul des ordinateurs

Ce graphique montre que l'évolution de la taille des modèles est devenue plus importante que l'évolution des capacités de calcul des ordinateurs. En effet, ces dernières années, face aux promesses que nous fournit le monde du Deep Learning, nous essayons de plus en plus de repousser les limites. Récemment, pour prendre un des exemples les plus parlant, la société OpenAI a lancé une nouvelle tendance. La sortie des modèles GPT (Generative Pre-trained Transformer) et ChatGPT a été des plus impressionnantes pour le grand public. Bien que les technologies existaient déjà depuis 2017, c'est la première fois qu'une entreprise l'implémente d'une aussi bonne manière. Pour ce faire, Open AI a dû réaliser un modèle pesant plus de 800 Go, à titre de comparaison, pour charger le modèle, il faudrait une centaine d'ordinateurs classiques. Sachant que le site voit passer environ 1,8 millions d'utilisateur par mois,[19] il est assez facile de comprendre que le coût énergétique pour faire fonctionner le service est colossal. C'est pour cela que tous les concurrents essayent de réaliser un modèle aussi performant avec une taille moindre.

Chapitre 3

Application à la robotique

Nous allons à présent étudier des exemples concrets dans le domaine de la robotique où le Deep Learning est utilisé. Comme vous l'avez compris, il est omniprésent, et ce, dans de nombreux domaines, de la médecine à l'exploration spatiale en passant par l'agriculture. Étudions les différentes technologies utilisées dans la robotique engendrées par le Deep Learning.

3.1 Traitement d'images

Un des principaux enjeux de la robotique est le traitement d'images. En effet, la plupart des robots prennent des milliers de photos grâce à des caméras intégrées. Le but étant d'analyser ces images afin de comprendre l'environnement du robot. C'est là que le Deep Learning intervient. Des neurones sont entraînés grâce à des bases de données à reconnaître des modèles, des patrons, des caractéristiques. Ceci permet le plus couramment de faire de la reconnaissance d'objets. Les réseaux de neurones sont capables de reconnaître et de localiser différents types d'objets dans une image.

Un des principaux exemples d'utilisation de cette technologie est le robot Curiosity. C'est un rover spécial développé par la NASA dédié à l'exploration spatiale. Il navigue à la surface de Mars à la recherche d'indices permettant aux scientifiques d'en apprendre plus sur l'origine géologique de la planète rouge. Le Deep Learning est au cœur de ce robot et lui permet de se déplacer. Le sol martien est très accidenté et comporte de nombreux obstacles, des réseaux de neurones sont entraînés à reconnaître ces caractéristiques du terrain afin d'obtenir la trajectoire optimale à emprunter.

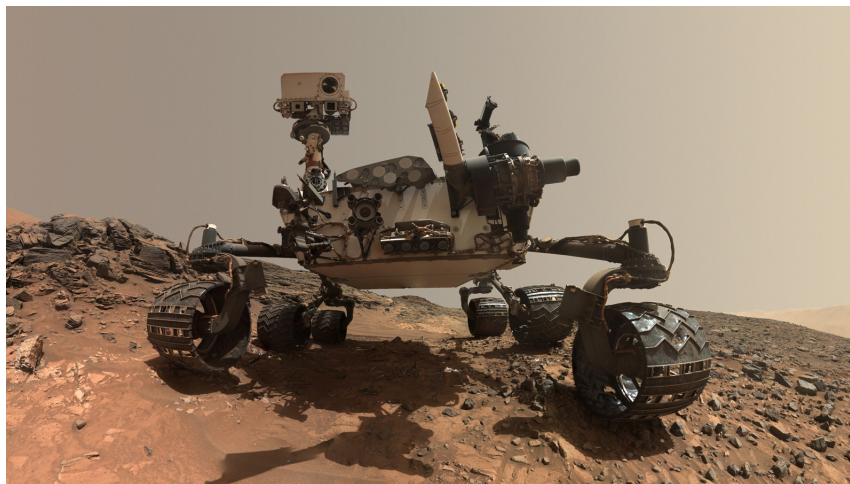


FIGURE 3.1 – Le robot Curiosity

Le traitement d'images est également crucial dans le domaine des véhicules autonomes pour les mêmes raisons. Le Deep Learning permet dans ce cas d'identifier les piétons, les panneaux, les autres voitures et bien plus encore. Cette analyse de l'environnement extérieur à la voiture permet au véhicule autonome de gérer ses trajectoires, son accélération ou encore l'activation des commandes de bord. Le géant du marché automobile Tesla utilise plusieurs caméras ainsi que le Deep Learning afin de mettre en œuvre le pilotage automatique.

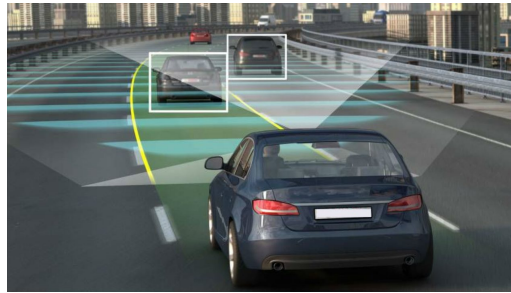


FIGURE 3.2 – Traitements d’images pour une voiture autonome

3.2 Contrôle des mouvements

Un autre aspect crucial de la robotique est le contrôle des mouvements, et dans ce domaine le Deep Learning intervient de nouveau. L’analyse de l’environnement extérieur que nous avons étudié précédemment précède très souvent le mouvement d’un robot. Des réseaux de neurones profonds permettent aux robots d’effectuer des mouvements à la fois complexes et précis tout en s’adaptant à des environnements changeants.

Le robot humanoïde Atlas développé par Boston Dynamics est basé sur la technologie de Deep Learning qui lui permet de réaliser des acrobaties impressionnantes. Il est capable de s’adapter à des environnements inédits pour lui, les analyser puis effectuer les mouvements adéquats. Ceci est possible grâce à un entraînement des réseaux de neurones profond par un apprentissage par renforcement. Un système de récompense est mis en place après chaque mouvement. Il reçoit un point positif ou négatif en fonction de la raison pour laquelle il a été codé. Atlas comprend ainsi s’il doit continuer dans cette voie ou alors changer d’approche. Tel un athlète humain, avant de réussir son premier salto, il chute de nombreuses fois.



FIGURE 3.3 – Le robot humanoïde Atlas

Des techniques de contrôle de mouvement basées sur le Deep Learning sont également utilisées dans la robotique de manipulation. La méthode utilisée ici est l’apprentissage par imitation, en observant les mouvements humains le robot est capable de les reproduire par le biais de réseaux de neurones profonds. Le robot PR2 développé par l’entreprise Willow Garage à été spécialement entraîné pour la manipulation d’objets. PR2 à été conçu pour effectuer des tâches domestiques telles que la cuisine comme vous pouvez le voir sur l’image ci-dessous, mais aussi le rangement ou encore la préparation de boissons.



FIGURE 3.4 – Le robot PR2

3.3 Dialogue avec un humain

Aujourd’hui, de plus en plus de robots sont conçus pour avoir des interactions avec les humains et ceci passe par le dialogue. Les robots sont capables d’analyser l’interaction verbale et non verbales des humains et d’y réagir. Un des enjeux principaux est de rendre ces interactions les plus naturelles possibles, et ce, en essayant de transmettre des émotions à travers le robot. Ceci passe par des expressions faciales pour les robots disposant d’une tête humanoïde, mais cela peut aussi être l’affichage d’émotions ou encore des changements de couleurs, par exemple rouge si le robot veut exprimer de la colère.

Un exemple notable est le robot Pepper développé par SoftBank Robotics qui est exclusivement conçu pour dialoguer avec les humains et répondre à leurs exigences. Nous avons eu l’opportunité de découvrir Pepper et ses fonctionnalités au laboratoire LITIS avec des explications d’un doctorant. Le Deep Learning permet à Pepper d’analyser les émotions et besoins de son interlocuteur grâce à une caméra ainsi qu’un microphone. Ensuite, des réseaux de neurones génèrent une réponse de la manière la plus « humaine » possible. Pepper est également équipé d’une tablette qui lui permet, en affichant des images, de transmettre également des émotions.

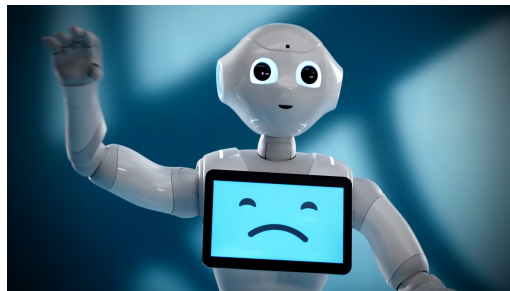


FIGURE 3.5 – Le robot Pepper

Même si ce genre de robots ne vous dit rien, il y a de grandes chances que vous ayez déjà été en contact avec des robots d’assistance utilisant le Deep Learning. En effet, de nombreux sites internet sont équipés de chatbots virtuels capables de comprendre les demandes ou problèmes des clients. Ils peuvent alors résoudre le problème ou rediriger le client vers un assistant humain si nécessaire. Les chatbots sont utilisés dans de nombreux secteurs, tels que la banque, le commerce électronique et les services de support technique.

3.4 Navigation autonome

L'une des applications importantes du Deep Learning dans la robotique est la navigation autonome. Cette technologie utilisant des algorithmes avancés basés sur le Deep Learning permet aux robots de planifier des trajectoires et de prendre des décisions en temps réel pour se déplacer en autonomie.

L'un des exemples le plus courant de navigation autonome est celui des voitures autonomes. De nombreuses entreprises telles que Waymo, Tesla ou encore Uber utilisent le Deep Learning pour leurs voitures autonomes, leur permettant de détecter les obstacles, reconnaître les panneaux de signalisation et les feux de circulation et de prendre des décisions de conduite en temps réel. Ainsi, ces véhicules sont entraînés sur d'énormes ensembles de données dont des images, des vidéos ou encore des simulations de situations réelles, ce qui leur permet d'apprendre à naviguer en toute sécurité sur les routes.

Dans le domaine de la robotique aérienne, les drones autonomes utilisent également le Deep Learning pour pouvoir naviguer. Ainsi, ces drones sont souvent équipés de caméras et de capteurs qui leur permettent de percevoir l'environnement dans lequel ils se trouvent. Les réseaux de neurones profonds permettent d'interpréter les données visuelles et ainsi planifier les trajectoires de vol tout en évitant les obstacles. Ces drones sont utiles dans plusieurs domaines tels que la surveillance, la livraison de colis, la cartographie ou encore la recherche et le sauvetage.

Un autre exemple d'utilisation de la navigation autonome est l'exploration sous-marine. Les robots utilisés pour explorer les fonds marins, comme le Bluefin-21 utilisé lors de la recherche de l'épave du vol MH370, utilisent des techniques de perception basées sur le Deep Learning pour naviguer dans des environnements sous-marins complexes et inconnus. Ces robots sont ainsi capables de cartographier les fonds marins tout en détectant les anomalies ou des objets d'intérêt, ce qui leur permet de choisir leur trajectoire en fonction des informations collectées.

3.5 Génération de contenu

La génération de contenu est une application du deep learning qui trouve de plus en plus d'applications dans le domaine de la robotique. Ainsi, certains robots utilisent des réseaux de neurones profonds pour créer automatiquement des informations ou des matériaux, tels que des descriptions textuelles, des rapports ou même des images réalistes. Le réseau est préalablement nourri avec une grande quantité de données pertinentes qui permettent aux robots, après l'apprentissage, de générer du contenu pertinent.

Prenons l'exemple de GPT-3, un modèle de deep learning puissant très connu de nos jours, qui peut être utilisé pour générer du contenu textuel de manière automatisée et naturelle. Poussons l'exemple plus loin et supposons un assistant robotique utilisé dans un hôpital pour aider les patients et le personnel médical. L'assistant robotique, qui intègre le modèle GPT-3, peut répondre aux questions des patients sur leur traitement, leur fournir des informations sur les procédures médicales ou leur expliquer les instructions post-opératoires.

On peut également citer l'exemple des nombreux chatbots très connus aujourd'hui qui génèrent des images à partir d'une description donnée par l'utilisateur. On peut ainsi retrouver des images totalement fictives comme celle-ci faite par le robot :



FIGURE 3.6 – Images générées par intelligence artificielle

La génération de contenu permet donc aux robots de fournir des informations précises et pertinentes aux utilisateurs, tout en améliorant les capacités d'interaction et de service. Cela ouvre la porte à de nombreuses applications potentielles, allant des services client automatisés à l'éducation interactive et à la création de contenus personnalisés.

Il est important de préciser que la génération de contenu nécessite un entraînement soigneux des réseaux de neurones et une qualité des données d'entraînement. De plus, il est essentiel de mettre en place des mécanismes de contrôle et de vérification pour garantir que le contenu généré est précis, fiable et respecte les normes éthiques et légales.

Conclusion et perspectives

La robotique est un domaine tant étendu que nous ne pouvons aborder tous les sujets en lien avec ce thème. Cependant, lors de ce projet, nous avons pu comprendre plus généralement ce qu'est un robot, quels sont ses composants et les bases de son fonctionnement. Nous avons également observé ses différents domaines d'application, tant dans le domaine industriel que médical et même dans les secteurs publics. Ces robots sont en pleines expansions et se développent rapidement grâce à une étonnante innovation : l'intelligence artificielle. En effet, l'IA constitué du Machine Learning et du Deep Learning est un vrai atout pour les robots qui deviennent autonomes. Finalement, nous avons étudié les différents robots à intelligence artificielle, leurs avantages et leurs nombreux domaines d'application ainsi que les risques qu'ils peuvent présenter pour la population.

Ce projet nous a permis de faire des recherches sur un domaine qui nous intéressait, voire nous passionnait. Nous avons pu prendre le temps de comprendre les fonctionnements des robots tant sur l'aspect mécanique qu'informatique, et comment une telle machine peut réaliser des tâches impressionnantes comme des sauts périlleux ou un voyage dans l'espace. Finalement, l'apport le plus intéressant de ce projet a été la possibilité de discuter les uns avec les autres de ce que nous savions ou non sur ce domaine et donc d'en apprendre plus sur de nombreux sujets en lien avec ce domaine. Ce vaste sujet, nous a permis de faire de nombreux liens entre l'informatique et la mécanique ce qui est un réel enrichissement personnel en vue de nos études.

Pour améliorer ce projet, nous aurions pu aborder plus en profondeur les risques liés au deep-learning et aux machines autonomes. En effet, nous n'avons pas traité de ce problème mais il est sûr que l'intelligence artificielle alimente de nombreux débats, certaines personnes étant en faveur du progrès technique et d'autres effrayés par ce que ces machines pourraient devenir.

Remerciements

Nous tenons à adresser nos remerciements à Monsieur Abdelaziz Bensrhair, l'enseignant responsable de notre groupe, de nous avoir guidé et accompagné tout au long de notre projet et de nous avoir permis de l'améliorer sur différents aspects. Nous aimerions aussi remercier les doctorants du LITIS qui nous ont permis de découvrir leurs projets en cours ainsi que les robots qu'ils utilisent. Finalement, nous remercions l'INSA pour nous avoir permis de réaliser ce projet.

Rapport d'étonnement

Tout au long de ce rapport, nous avons pu découvrir de nombreux avantages mais aussi des limites à la robotique embarquant du Deep Learning. En effet, la robotique peut bouleverser bien des domaines. Nous verrons dans trois domaines les impacts et risques de l'application du Deep Learning dans la robotique. Premièrement, nous verrons l'impact social. Ensuite nous pointerons du doigt les aspects environnementaux. Pour finir, nous étudierons l'impact économique de la robotique.

En Chine, de nombreux robots sont déjà présents pour accueillir les clients dans un centre commercial ou même dans des restaurants. Pour ce faire, de nombreuses entreprises développent des robots imitant les expressions faciales des humains pour leur permettre de transmettre des émotions. Dans le cas où le robot est ajouté et ne remplace pas un humain, cette pratique peut améliorer la qualité du service en offrant une plus grande assistance bien que cela puisse effrayer certaines personnes.

Par contre, si le robot est là pour remplacer un humain, cela peut devenir dangereux. En plus de supprimer un emploi, cela peut déshumaniser l'expérience. L'utilisateur perd toutes connexions et chaleurs humaines lorsqu'il interagit avec un robot, baissant ainsi la qualité de l'expérience.

Bien que les robots dotés de deep learning puissent être formés pour reconnaître et répondre à certaines expressions émotionnelles, ils peuvent encore avoir du mal à comprendre pleinement la complexité des émotions et des situations humaines. Cela peut limiter leur capacité à réagir de manière empathique et adaptée aux besoins émotionnels des individus.

Il est donc très déconseillé d'utiliser des robots pour des tâches impliquant une complexité dans la compréhension des émotions de l'interlocuteur.

Le principal danger de l'intelligence artificielle n'est pas "qu'elle se réveille et décide de se retourner contre l'humanité". En effet, les modèles d'intelligence artificielle font ce qu'on leur a appris à faire et sont capables de faire ce qu'on leur donne la possibilité de faire. Tant qu'une personne pourvue de moyens économiques et techniques ne décide pas de faire de robots tueurs aucune IA ne sera capable de le faire. Le danger ici n'est donc pas l'IA mais la personne qui la conçoit.

D'un point de vue environnemental, les robots et le Deep learning peuvent apporter beaucoup de choses. Par exemple, une IA permet de comprendre pourquoi les fermes à énergies solaires tuent des milliers d'oiseaux.[26] Voici donc un exemple d'utilisation de l'intelligence artificielle afin de faciliter la recherche dans le milieu de l'environnement.

L'IA peut souvent être critiquée pour son coût énergétique de fonctionnement. En effet, pour son entraînement et son fonctionnement se sont parfois de très gros ordinateurs qui assurent son fonctionnement. Ces ordinateurs consomment ainsi une grande quantité d'énergie augmentant la pollution de notre environnement. On pourrait s'arrêter là, mais il faut savoir qu'elle permet aussi de réduire cet impact. En effet, pour avoir des performances identiques à ces modèles, sans le Deep Learning, il faudrait encore plus de calcul avec notamment l'utilisation de méthodes dites de "force brute" essayant l'ensemble des possibilités pour en conserver la meilleure. Les modèles de Deep Learning eux peuvent en éliminer un bien grand nombre conservant ainsi les meilleures possibilités qu'il reste à tester. C'est par exemple le cas dans le milieu de la médecine où le modèle présélectionne les molécules susceptibles de fonctionner réduisant ainsi le temps de recherche, les coûts liés à ces tests, et les impacts environnementaux qu'impliquent la fabrication et l'utilisation de ces molécules.

Finalement, l'un des domaines qui sont et seront le plus bouleversés par l'application du Deep Learning dans le monde de la robotique est très probablement l'économie. En effet, la robotique est et sera responsable de la suppression d'une très grande quantité d'emplois. Nous pouvons penser que cela implique la création de nouveaux types d'emplois. Nous pouvons par exemple comparer cette révolution à celle des machines agricoles qui a permis de passer de 90% des français agriculteurs à plus que 2% des français. À cette époque les français ont su se reconverter, nous pouvons ainsi se demander s'il ne se passera pas la même chose. Ici l'évolution de la recherche dans le milieu du Deep Learning est tellement rapide que la plus grosse question est de se demander

si la reconversion des métiers se fera suffisamment rapidement pour éviter une crise économique.

Malgré ces risques liés à la perte de l'emploi, le milieu de la robotique permet de réduire le coût de production d'un produit ayant un impact direct à la baisse sur son prix de vente. Un robot est capable de travailler 24h/24 avec le même taux de précision parfois plus élevé qu'une personne. Au niveau industriel, la robotique permet donc une véritable révolution.

Pour conclure, l'application du Deep Learning dans la robotique permet et permettra de grandes évolutions dans bien des domaines. Notamment, le monde agricole, industriel et médical. Les applications du Deep Learning peuvent également permettre une grande assistance dans les domaines de la recherche. Malgré tous ces avantages, il demeure quelques inconvénients assez importants. Le marché du travail se retrouve bouleversé et les liens sociaux sont réduits.

Bibliographie

- [1] <https://eureka.uqam.ca/wp-content/uploads/sites/4/2018/05/4-Robot.pdf> 3.5
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=y8pEyMWBbGg>
- [3] https://www.youtube.com/watch?v=fc_Cynqr6jM&t=52s
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=04S3bzIi158>
- [5] http://silanus.fr/sin/formationISN/Parcours/Robotique/co/module_Robotique_9.html
- [6] <https://worldofrobot.fr/composition-dun-robot/>
- [7] <https://www.innowtech.com/2019/09/23/les-capteurs-exteroceptifs-et-proprioceptifs-pour-la-robotique/>
- [8] http://www4.ac-nancy-metz.fr/techno-truffaut-hettange/25/images/stories/3eme/ci2/capteurs/3CI2-A4_Ressources_Capteur.pdf
- [9] <https://www.techno-science.net/definition/3690.html>
- [10] <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1489525-actionneur-definition-et-fonctionnement-de-l-appareil/>
- [11] <https://reponsequestion.com/que-font-les-effecteurs-dans-un-robot/>
- [12] <https://www.techno-com.fr/quels-sont-les-differents-types-de-robots/>
- [13] <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/robotics/autonomous-mobile-robots/overview.html>
- [14] <https://www.mecalux.fr/blog/robot-agv>
- [15] <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/robotics/robotic-arm.html>
- [16] <https://intelligence-artificielle.com/androide-guide-complet/>
- [17] <https://www.lebigdata.fr/robotique-tout-savoir>
- [18] Reinforcement Learning, Richard S. Sutton & Andrew G. Barto 2.1.3
- [19] <https://explodingtopics.com/blog/chatgpt-users> 2.3
- [20] <https://www.space.com/solar-system-planetary-science-machine-learning>
- [21] <https://www.lebigdata.fr/nasa-machine-learning-vie-mars>
- [22] <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-capteurs-technologies-cles-du-vehicule-autonome-104071/>
- [23] <https://www.usinenouvelle.com/editorial/l-industrie-c-est-fou-le-robot-atlas-de-boston-dynamics-pret-a-devenir-la-star-des-chantiers.N2090476>
- [24] https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/171063/thesis_Mengge%20Hu_final.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [25] <https://www.kelrobot.fr/2012/02/18/le-robot-pr2-un-robot-a-tout-faire/>
- [26] “Une IA pour comprendre pourquoi les fermes solaires tuent des milliers d’oiseaux chaque année” de Benoît Théry, Cubic 3.5