

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales  
Département Construction Aéronautique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Avionique

THEME

*Téledétection basée sur les drones à énergie solaire  
pour l'industrie pétrolière et gazière et la  
surveillance de l'environnement.*

Proposé et dirigé par :

*Dr. Dilmi smain*

*Dr. Krim mohamed*

Réalisé par :

Mlle. Ould Amar amel

Mlle. Mourghad chaima

Mlle. Ouali fatma

*Soutenue devant le jure composer de :*

*Dr. Cheggaga Nawel*

*MCA*

*Président*

*Dr. Khelifa yamina*

*MAA*

*Examineur*

*Promotion : 2022 / 2023*

## **Remerciement**

*Avant tout, nous adressons nos remerciements à Allah qui nous a donné la patience et le courage pour compléter ce travail.*

*Tout travail de recherche n'est jamais totalement l'œuvre d'une seule personne, à cet effet, nous tenons à exprimer nos sincères reconnaissances et nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Tout d'abord à Monsieur Dilmi smain, promoteur de ce mémoire, et à Monsieur Krim mohamed, Co-promoteur de ce mémoire pour l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et que nous ne nous remercierons jamais assez pour leur soutien et leur patience. Qu'ils trouvent en ces lignes l'expression de nos gratitude.*

*Ensuite à Mesdames les membres du jury :Mme.Cheggaga Nawal et Mme.Khelifa yamina, qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce travail. Qu'elles trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos chères familles et tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à mes chers  
Parents pour leur patience*

*A ma mère, la lumière de ma vie, qui m'a soutenu et  
encouragé durant ces années d'études*

*A mon très cher père, ma Gratitude ne suffit pas à exprimer  
ce qu'il mérite pour tous les sacrifices depuis ma  
naissance, pendant mon enfance et même à l'âge adulte*

*À ma chère sœur Nesrine*

*À tous mes professeurs et à tous ceux qui se sont engagés  
dans ces modestes travaux*

*À tout ma famille*

*Merci d'être toujours là pour moi*

*Amel*

## *Dédicace*

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre  
À cette source de tendresse, de patience et de générosité  
À ma mère Loubna !*

*Pour tous ses sacrifices, son amour, sa tendresse, son  
soutien et ses prières tout au long de mes études*

*A mes chères sœurs Hadil et Israa pour leurs  
encouragements permanents, et leur soutien moral*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant  
allégués, et le fruit de votre soutien infailible*

*A mon binôme Amel*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Chaimaa*

## Résumé

Ce projet se concentre sur le développement d'une solution de télédétection basée sur les drones à énergie solaire pour l'industrie pétrolière et gazière en Algérie. L'objectif principal est de concevoir un drone solaire à voilure fixe équipé de capteurs avancés, tels qu'une caméra thermique infrarouge, et de mettre en œuvre des techniques d'intelligence artificielle basées sur les réseaux de neurones convolutifs. Cette solution vise à détecter en temps réel les fuites et les fissures des pipelines de gaz et de pétrole, permettant ainsi une surveillance efficace et une intervention précoce pour prévenir les incidents majeurs. L'utilisation de drones solaires offre une approche économique et respectueuse de l'environnement, contribuant à améliorer la sécurité des infrastructures pétrolières et gazières en Algérie.

**Les mots clés :** Télédétection, industrie, pétrole, gaz, IA, UAV, CNN, fuite, fissure.

## Abstract

This project focuses on the development of a solar-powered drone-based remote sensing solution for the petroleum and gas industry in Algeria. The main objective is to design a fixed-wing solar drone equipped with advanced sensors, such as an infrared thermal camera, and implement artificial intelligent techniques based on convolutional neural networks. This solution aims to detect leaks and cracks in gas and oil pipelines in real-time, enabling efficient monitoring and early intervention to prevent major incidents. The use of solar drones offers an economical and environmentally friendly approach, contributing to the improvement of safety in Algeria's oil and gas infrastructure.

**Key words:** Remote-sensing, industry, petrol, gas, AI, UAV, CNN, leak, crack.

## ملخص

يتركز هذا المشروع البحثي على تطوير حل للكشف عن بعد يعتمد على الطائرات المسيرة بدون طيار التي تعمل بالطاقة الشمسية موجه للمجال الصناعي للنفط والغاز الطبيعي في الجزائر.

الهدف الرئيسي هو تصميم طائرة بدون طيار تعمل بالطاقة الشمسية، ثابتة الجناحين، مجهزة بأجهزة استشعار عن بعد متطورة مثل الكاميرا الحرارية بالأشعة تحت الحمراء ومزودة بتقنيات الذكاء الاصطناعي القائمة على الشبكات العصبية التلافيفية.

يهدف هذا الحل إلى اكتشاف التسربات والشقوق في أنابيب الغاز والنفط في وقتها الحقيقي، مما يتيح المراقبة الفعالة والتدخلات المبكرة لمنع الحوادث الكبرى.

استخدام الطائرات بدون طيار يوفر نهجا اقتصاديا وصديقا للبيئة، مما يساهم في تحسين سلامة البنية التحتية لهذا المجال الصناعي.

**الكلمات المفتاحية:** الاستشعار عن بعد، الصناعة، البترول، الغاز الطبيعي، الذكاء الاصطناعي، طائرة مسيرة بدون طيار، الشبكات العصبية التلافيفية، تسرب، تشقق.

## Table des matières

<i>Remerciement</i> .....	i
Listes des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	x
Liste des abréviations .....	xi
Symboles .....	xii
Introduction générale.....	1
Contributions .....	4
Contour.....	5
Chapitre I.....	6
1. Introduction .....	7
1.1. Historique .....	7
1.2. Définition d'un UAV .....	8
1.3. Domaines d'application des UAV .....	8
1.4. Avantages et utilité de drones.....	9
1.5. Description des technologies de drones.....	9
1.6. Classification des drones .....	10
1.6.1 Selon le poids .....	10
1.6.2 Selon la cellule (la propulsion).....	11
1.6.3 Selon la taille : .....	13
1.7. L'autonomie.....	14
1.7.1 Définition .....	14
1.7.2 Drone autonome .....	15
1.7.3 Les différents niveaux de l'autonomie .....	15
1.7.4 Les caractéristiques d'un avion autonome intelligent .....	15
1.8. Choix de drone.....	16
1.8.1 Historique des aéronefs à ailes fixes .....	16
1.8.2 Définition des aéronefs à ailes fixes.....	17
1.8.3 Les tendances des ailes fixes .....	17
1.9. Modélisation des drones à voilure fixe.....	17
1.9.1 Dynamique des drones .....	17
1.9.2 Cinématique et dynamique du vol.....	26
1.9.3 Les forces et les moments externes .....	30
1.10 Les drones solaires .....	36
1.10.1 L'évolution des drones solaires .....	36

1.10.2	Les cellules solaires.....	36
1.10.3	Drones à énergie solaire .....	38
1.10.4	L'évolution des drones solaires.....	40
1.11	Conclusion .....	41
Chapitre II	.....	42
2.	Introduction .....	43
2.1	Introduction à la détection d'objets.....	43
2.1.1	Reconnaissance d'objets .....	43
2.1.2	Classification d'images .....	44
2.1.3	Localisation d'objet.....	44
2.1.4	Détection d'objets .....	44
2.1.5	Segmentation d'images .....	45
2.2	Algorithmes de détection d'objets .....	45
2.2.1	R-CNN .....	45
2.2.2	Fast R-CNN.....	46
2.2.3	Faster R-CNN.....	46
2.2.4	YOLO.....	46
2.3	Les réseaux de neurones artificiels.....	46
2.4	Les réseaux de neurones convolutionnels (CNN).....	47
2.4.1	L'architecture des CNN .....	47
2.4.2	A quoi sert la convolution ? .....	48
2.4.3	Le Max-Pooling.....	48
2.4.4	Pourquoi les CNN ?.....	49
2.5	Conclusion : .....	50
Chapitre III	.....	51
3.	Introduction .....	52
3.1.	Les drones pour l'inspection.....	52
3.2.	Les avantages.....	52
3.3.	Téledétection par drone .....	53
3.4.	Capteurs de drone .....	53
3.4.1	Capteurs passifs.....	53
3.4.2	Capteurs actifs .....	55
3.5.	Détection des fuites de pétrole et de gaz et surveillance des pipelines .....	58
3.6.	Conclusion .....	58
Chapitre IV	.....	59

4. Introduction .....	60
4.1. Stratégie de travail .....	60
4.1.1 La dynamique en boucle ouverte.....	60
4.1.2 La stabilité du système .....	62
4.1.3 La dynamique en boucle fermée .....	64
4.2. Conclusion .....	69
Conclusion générale .....	70
Annexe A.....	72
Annexe B.....	74

## Listes des figures

Figure 1-1 : exemples d'applications des drones.	9
Figure 1-2 : exemples des drones à aile fixe.	11
Figure 1-3 : les drones à aile tournante.	11
Figure 1-4: exemple d'un drone à aile fixe.	11
Figure 1-5 : VTOL.	12
Figure 1-6: exemple d'un mono rotor.	12
Figure 1-7: exemple d'un birotor.	12
Figure 1-8 : exemple d'une quadri rotor.	13
Figure 1-9 : exemples des ailes battantes.	13
Figure 1-10: exemples des HALE.	13
Figure 1-11: exemple de MALE.	14
Figure 1-12: exemple d'un mini drone.	14
Figure 1-13: micro-drone.	14
Figure 1-14: les forces agissantes sur un UAV.	19
Figure 1-15: rotation en 2D.	20
Figure 1-16: Le repère inertiel $\mathcal{F}_i$ .	21
Figure 1-17: le repère terrestre $\mathcal{F}_e$ .	22
Figure 1-18: le repère mobile $\mathcal{F}_b$ .	23
Figure 1-19: le triangle du vent.	24
Figure 1-20: les axes du mouvement.	26
Figure 1-21: les surfaces de contrôle.	31
Figure 1-22: la représentation des forces de la portance et de la traînée pour un angle d'attaque $\alpha$ positif.	33
Figure 1-23: la représentation en bloc du vecteur vitesse du vent.	35
Figure 1-24 : une cellule solaire PV.	37
Figure 1-25 : exemples de drones solaires.	40
Figure 1-26: Evolution de l'efficacité des cellules solaires et du coût par watt.	40
Figure 1-27: nombre d'articles publiés sur Web of Science au fil des années dans les domaines de recherche « UAV à énergie solaire » et « cellules solaires ».	41
Figure 2-1: classification, localisation et détection d'objet [22].	44
Figure 2-2: présentation des tâches de vision par ordinateur pour la reconnaissance d'objets.	45
Figure 2-3: un exemple d'un réseau neuronal à trois couches, composé d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie.	47
Figure 2-4: schéma représentant l'architecture d'un CNN.	48
Figure 2-5: le parcours de la fenêtre de filtre sur l'image.	48
Figure 2-6 : Le processus de Max-Pooling.	49
Figure 2-7: Exemple d'architecture d'un CNN.	49
Figure 3-1: exemple des caméras d'imagerie pour drones	54
Figure 3-2: exemples de capteurs d'imagerie thermographiques	55
Figure 3-3: un exemple d'UAV-SAR équipé d'antennes en bandes P.C et L.	57
Figure 4-1: le bloc SIMULINK de la boucle ouverte.	60
Figure 4-2 : Les résultats en boucle ouverte.	61

Figure 4-3 : le schéma bloc SIMULINK du modèle linéaire.	61
Figure 4-4 : le schéma SIMULINK avec LQR.	63
Figure 4-5 : les résultats lors de l'utilisation de LQR.	63
Figure 4-6 : les résultats de stabilité.	64
Figure 4-7 : Le schéma SIMULINK pour le maintien de cap.	65
Figure 4-8 : le résultat de maintien de cap en boucle fermée.	65
Figure 4-9 : les blocs SIMULINK de la nouvelle boucle ouverte.	66
Figure 4-10 : le schéma SIMULINK pour le maintien d'altitude en boucle fermée.	68
Figure 4-11: le résultat de maintien d'altitude.	68

## Liste des tableaux

Tableau 1-1 : classification des UAV selon leur poids. ....	10
Tableau 1-2: les variables d'état des équations du mouvement. ....	26
Tableau 3-1 : caméras infrarouges thermiques courantes pour drone.....	54
Tableau 3-2: exemples de capteurs Lidar commerciaux pour UAV.....	56
Tableau 4-1: les paramètres du drone ZAGI. ....	72
Tableau 4-2 : les coefficients aérodynamiques. ....	73

## Liste des abréviations

<b>IA</b>	Intelligence Artificielle
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>CNN</b>	Convolutional Neural Networks
<b>PIB</b>	Produit Intérieur Brut
<b>GNL</b>	Gaz Naturel Liquéfié
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>LIDAR</b>	Light Detection And Ranging
<b>VTOL</b>	Vertical Take Off & Landing
<b>HALE</b>	High Altitude Long Endurance
<b>MALE</b>	Medium Altitude Long Endurance
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>ML</b>	Machine Learning
<b>DL</b>	Deep Learning
<b>UV</b>	UltraViolet
<b>Lidar</b>	Light Detection And Ranging
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar
<b>ReLU</b>	Rectified Linear Units
<b>PID</b>	Proportional Integrator Derivative
<b>LQR</b>	Linear Quadratic Regulator

## Symboles

$L$	Lift (la portance) (N)
$D$	Drag (la trainée)
$T$	Thrust (la poussée)
$W$	Weight (le poids)
$\rho$	La densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )
$V$	La vitesse de l'air (m/s)
$S$	La surface de l'aile ( $\text{m}^2$ )
$C_L$	Le coefficient de portance
$C_D$	Le coefficient de trainée
$K$	Constante qui dépend de la forme de l'hélice
$n$	La vitesse de rotation de l'hélice (rad/s)
$D$	Diamètre de l'hélice
$m$	La masse du drone (kg)
$g$	L'accélération due à la gravité ( $\text{m/s}^2$ )
$\mathcal{F}^i$	Le repère inertiel
$\mathcal{F}^e$	Le repère terrestre
$\mathcal{F}^\ell$	Le repère de navigation
$\mathcal{F}^b$	Le repère mobile
$\mathcal{F}^w$	Le repère du vent
$\mathcal{F}^s$	Le repère de stabilité
$V_w$	La vitesse du vent par rapport au repère inertiel
$V_a$	La vitesse aérodynamique par rapport au repère inertiel
$V_g$	La vitesse du sol
$\alpha$	Angle d'attaque
$\beta$	Angle de dérapage
$\psi_w$	Angle entre le vecteur vent et $i^i$
$\chi$	Angle entre le nord vrai et la projection du $V_g$ dans le plan horizontal ( $i^b, j^b$ )
$p_n$	Position inertielle (Nord) du drone le long de $i^i$ en $\mathcal{F}^i$
$p_e$	Position inertielle (Est) du drone le long de $j^i$ en $\mathcal{F}^i$
$p_d$	Position inertielle (vers le bas) du drone le long de $k^i$ en $\mathcal{F}^i$
$u$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $i^b$ en $\mathcal{F}^b$
$v$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $j^b$ en $\mathcal{F}^b$
$w$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $k^b$ en $\mathcal{F}^b$
$\phi$	Angle de roulis
$\theta$	Angle de tangage
$\psi$	Angle de lacet
$p$	Vitesse de roulis mesurée le long de $i^b$ en $\mathcal{F}^b$
$q$	Vitesse de tangage mesurée le long de $j^b$ en $\mathcal{F}^b$
$r$	Vitesse de lacet mesurée le long de $k^b$ en $\mathcal{F}^b$
$F_k$	k-ième force externe agissant sur la cellule
$\omega_{b/i}$	La vitesse angulaire du repère $\mathcal{F}^b$ dans le repère $\mathcal{F}^i$
$h$	Le moment angulaire
$M_k$	Le k-ième moment appliqué de l'extérieur
$J$	Le tenseur d'inertie (matrice d'inertie)
$F_g$	La force due à la gravité

$F_a$	La force due à l'aérodynamique
$F_p$	La force due à la propulsion
$F_d$	La force due aux perturbations atmosphériques
$F$	La force totale agissant sur la structure
$M_a$	Le moment dû à l'aérodynamique
$M_p$	Le moment dû à la propulsion
$M_d$	Le moment dû aux perturbations atmosphériques
$M$	Le moment total agissant sur la structure
$\delta_a$	Le débattement des ailerons (rad)
$\delta_e$	Le débattement de la gouverne de profondeur (elevator)
$\delta_r$	Le débattement de la gouverne de direction (rudder)
$\delta_t$	La commande des gaz (%)
$\mathcal{M}$	Le moment de tangage
$\mathcal{L}$	Le moment de roulis
$\mathcal{N}$	Le moment de lacet
$F_{Lift}$	La force de portance
$F_{Drag}$	La force de trainée
$C$	La corde
$q$	Le taux de tangage
$b$	L'envergure
$S_p$	La surface balayée par l'hélice
$P_{in}$	La pression avant l'hélice
$P_{out}$	La pression après l'hélice
$V_{out}$	La vitesse de l'air à la sortie de l'hélice
$C_{prop}$	Le coefficient de poussée de rotor
$V_{w,s}$	La partie constante du vent
$V_{w,d}$	La partie dynamique du vent

## **Introduction**

L'industrie pétrolière et gazière joue un rôle vital dans l'économie mondiale en fournissant une source d'énergie essentielle pour alimenter les transports, les industries et les activités quotidiennes. L'Algérie est un pays riche en ressources pétrolières et gazières, ce qui en fait un acteur majeur de l'industrie énergétique.

Cependant, cette industrie est confrontée à des défis majeurs en termes de sécurité, de prévention des incidents et de protection de l'environnement. La détection précoce des fuites et des fissures dans les pipelines de gaz et de pétrole est cruciale pour minimiser les risques associés à ces infrastructures critiques.

Dans ce contexte, la télédétection basée sur les drones à énergie solaire offre une solution prometteuse. Les drones solaires équipés de capteurs avancés et d'une intelligence artificielle embarquée peuvent fournir une surveillance en temps réel, permettant une détection précoce des anomalies et une intervention rapide pour prévenir les incidents majeurs.

## **Problématique**

Face à la nécessité de renforcer la surveillance des gazoducs et des oléoducs, la problématique de ce projet de recherche est la suivante : Comment développer une solution de télédétection basée sur les drones à énergie solaire, intégrant des techniques d'intelligence artificielle, pour détecter de manière efficace et économique les fuites et les fissures des pipelines de gaz et de pétrole en Algérie, et ainsi assurer une gestion sécurisée et durable de ces infrastructures critiques ?

## **Objectif**

L'objectif principal de ce projet est de concevoir et développer un drone solaire à voilure fixe capable de détecter en temps réel les fuites et les fissures des gazoducs et des oléoducs. Cela sera réalisé en utilisant une combinaison de capteurs avancés, tels qu'une caméra thermique infrarouge, et des techniques d'intelligence artificielle basées sur les réseaux de neurones convolutifs.

L'objectif est d'offrir une solution de surveillance efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour prévenir les incidents majeurs, réduire les risques environnementaux et économiques, et améliorer la sécurité des infrastructures pétrolières et gazières.

# **Introduction générale**

L'industrie pétrolière et gazière est un secteur crucial de l'économie mondiale qui englobe les activités liées à la découverte, à l'extraction, à la production, au transport et à la commercialisation du pétrole et du gaz naturel, elle pose des défis communs et partagés. Ces ressources fossiles sont des sources d'énergie essentielles qui alimentent nos sociétés modernes et jouent un rôle majeur dans le développement économique mondial.

Cette industrie revêt une importance cruciale en raison de son rôle essentiel dans la fourniture d'énergie utilisée dans le monde car elle représente une part importante du produit intérieur brut (PIB) de nombreux pays, elle offre aussi des opportunités d'emploi à grande échelle, tant au niveau local que mondial. Les activités pétrolières et gazières génèrent des revenus fiscaux substantiels pour les gouvernements. L'industrie pétrolière et gazière est aussi un moteur de l'innovation technologique. On peut produire, avec du pétrole et du gaz naturel, différents produits pétroliers, tels que l'essence, le diesel, le kérosène, le fioul domestique, ainsi que des produits chimiques et des lubrifiants.

Cependant, l'industrie pétrolière et gazière, bien qu'essentielle, fait également face à des défis importants et à des problèmes complexes qui nécessitent une attention particulière, notamment en ce qui concerne la surveillance des infrastructures et la détection des fuites et des fissures qui causent des incidents mortels et des catastrophes environnementales autour du monde.

Malheureusement, on prend l'Algérie comme exemple, exactement dans la wilaya d'El Oued, la nuit du jeudi 03 au vendredi 04 septembre 2020, deux (2) spectaculaires incendies se sont déclenchés suite à deux (2) fuites et un versement de pétrole dans deux (2) oléoducs de la région, exactement dans le pipeline OK1, transportant du pétrole, reliant Hassi Messaoud (Haoud El-Hamra) à Skikda et le pipeline reliant Hassi Messaoud à Bejaia. La première fuite a eu lieu à la sortie de la station de pompage SP2 dans la commune Djamaa, plus précisément au point kilométrique 200+190, et la seconde fuite a eu lieu au point kilométrique 263 dans la même wilaya, cette fois-ci dans la région de Baàdj à Oum Thiour. L'incendie s'est rapidement propagé provoquant d'importants dégâts matériels en mettant en danger la sécurité des personnes vivant à proximité.

Un autre problème a survenu en Algérie en 2004, une violente explosion survenu le lundi 19 janvier, qui a détruit le complexe de gaz naturel liquéfié (GNL) de Skikda, exactement dans la plate-forme pétrochimique qui contient six (6) importantes unités de traitement de gaz et d'hydrocarbures où travaillent quelque 12000 personnes, un incendie a été éclaté après l'explosion qui a secoué cette unité à 18h40. Cette explosion a fait au moins 23 morts et cet incendie a fait 74 blessés.

Ces deux (2) problèmes ont servi de rappel crucial quant à l'importance de la sécurité et de la prévention des incidents dans l'industrie pétrolière et gazière en Algérie, ils ont souligné l'importance de renforcer les protocoles de sécurité et de maintenance des pipelines, ainsi que la nécessité de formations régulières pour le personnel chargé de l'exploitation et de la surveillance de ces infrastructures critiques. Ils ont ainsi mis en évidence la nécessité de procédures de maintenances régulières, d'inspections approfondies des infrastructures et de mesure de sécurité efficace pour prévenir les fuites et minimiser les risques d'incendies. Des recommandations doivent être formulées pour améliorer la gestion des risques liés aux pipelines et pour garantir une réponse plus efficace en cas d'incidents similaires à l'avenir.

C'est en janvier 1956, six (6) ans avant l'indépendance, qui était la découverte des premiers gisements de pétrole et de gaz de l'Algérie, tels que Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, Ourhoud, Tin Fouyé Tabankort et In Salah. Ces découvertes ont ouvert la voie au développement de l'industrie pétrolière et gazière dans le pays.

L'Algérie est l'un des principaux producteurs et exportateurs de pétrole et de gaz naturel en Afrique et a une longue histoire dans l'exploitation de ces ressources naturelles. Donc l'industrie pétrolière et gazière joue un rôle central dans l'économie de ce pays.

L'Algérie possède d'importantes réserves de pétrole et de gaz naturel, ce qui en fait l'un des pays les plus riches en hydrocarbures. Les activités pétrolières et gazières sont principalement concentrées dans les régions du Sahara.

La société nationale Sonatrach joue un rôle prédominant dans l'industrie pétrolière et gazière en Algérie. Sonatrach est l'une des plus grandes compagnies pétrolières et gazières intégrées au monde et est responsable de l'exploration, de la production, du raffinage et de la commercialisation des hydrocarbures en Algérie.

L'industrie pétrolière et gazière en Algérie contribue de manière significative aux recettes du gouvernement, représentant une part importante des exportations et des revenus du pays. Donc, n'importe quel problème pose une menace à l'économie du pays.

Les fuites de pipelines peuvent entraîner une perte de gaz naturel précieux qui aurait pu être capturé et utilisé pour la production, elles peuvent aussi avoir des conséquences néfastes sur l'environnement local car elles peuvent causer des problèmes de pollution de l'air, du sol et de l'eau, affectant ainsi les écosystèmes naturels de la région. Ces fuites représentent également des risques pour la sécurité des travailleurs et de communautés environnantes.

Le gaz naturel est inflammable, et toute fuite importante peut augmenter le risque d'incendie, d'explosion ou d'autres accidents potentiellement dangereux.

Les fuites de pipelines nécessitent souvent des réparations urgentes pour éviter toute perturbation majeure. Les coûts associés à la localisation, à l'identification et à la réparation des fuites, peuvent être significatifs et peuvent entraîner des dépenses supplémentaires pour l'exploitant du champ gazier ou pétrolier.

Les entreprises cherchent constamment des moyens nouveaux et novateurs d'améliorer les inspections et d'atténuer les risques. Elles veulent adopter leurs méthodes de détection des fuites et leur processus de maintenance et de conformité.

Ces dernières années, les compagnies pétrolières et gazières veulent utiliser la technologie des drones pour améliorer leur efficacité opérationnelle et leur rendement, car elles pensent que les drones transforment l'industrie et fournissent des solutions pratiques et économiques pour l'ensemble de l'exploitation pétrolière et gazière et que les informations obtenues à partir des données de drones permettent aux entreprises d'économiser des millions de dollars en opérations.

L'importance de l'industrie pétrolière et gazière en Algérie ne peut être sous-estimée, tant sur le plan économique que sur le plan énergétique.

La présence d'une industrie dynamique souligne l'importance stratégique de ces secteurs pour le pays. Cependant, la survenue d'incidents tels que les fuites de pipelines rappelle les défis auxquels cette industrie est confrontée. Ces incidents peuvent avoir des conséquences environnementales néfastes, compromettant la sécurité des populations et des travailleurs, ainsi que l'intégrité des infrastructures. Cela met en évidence un besoin urgent de renforcer les techniques de détection des fuites afin de minimiser les risques et de garantir une exploitation durable des ressources pétrolières et gazières.

Malgré les efforts déployés pour améliorer la sécurité et la surveillance des pipelines en Algérie, il existe toujours des lacunes dans les capacités de détection précoce des fuites. Cela souligne la nécessité de développer des solutions innovantes pour combler ces manques. C'est dans ce contexte que ce projet prend tout son sens. En combinant l'utilisation de drones à énergie solaire, de capteurs avancés et des techniques d'intelligence artificielle basées sur les réseaux de neurones convolutifs, nous visons à concevoir un système de télédétection de pointe spécifiquement adapté à l'industrie pétrolière et gazière en Algérie.

Notre objectif principal est de détecter en temps réel les fuites et les fissures des pipelines de gaz et de pétrole, offrant ainsi une surveillance proactive et une alerte précoce des incidents potentiels. En utilisant des caméras thermiques infrarouges et d'autres capteurs avancés, le système sera capable de repérer les anomalies thermiques et les variations de pressions associées aux fuites, permettant ainsi une intervention rapide et efficace pour éviter les catastrophes majeures.

En développant cette solution technologique, nous espérons apporter une contribution significative à l'industrie pétrolière et gazière en Algérie, en renforçant sa capacité à détecter, surveiller et gérer les fuites de pipelines de manière proactive.

Ce projet vise à améliorer la sécurité des opérations, à réduire les risques environnementaux et à assurer la durabilité à long terme de l'industrie pétrolière et gazière en Algérie.

L'une des problématiques dans le domaine de la robotique aérienne est la conception d'un drone autonome qui pourra être utilisé dans des applications diverses civiles et militaires. Par exemple, on peut imaginer un drone qui permet d'explorer un immeuble ou un tunnel contaminé et de réaliser une première observation toute intervention humaine.

Dans le cadre de ce travail, nous allons utiliser ce drone dans une application de détection précoce dans l'industrie pétrolière et gazière.

Le drone est configuré pour réaliser une mission de reconnaissance de fuite du pétrole ou du gaz. Il prendra des photos et les envoie au centre de traitement. Une application implémentée au centre de traitement examinera les photos et détectera les fuites.

## **Contributions**

Les principales contributions de cette thèse résident dans l'analyse de la problématique de la télédétection des fuites de pipelines et la surveillance des infrastructures à l'aide de

drones solaires, la conception et la mise en œuvre des principaux composants du système de détection et de localisation des fuites :

- Etudier l'état de l'art comme une vision générale sur les drones, leurs applications, leurs classifications, leur modélisation, l'autonomie et le choix des cellules solaires.
- Etudier le choix des réseaux de neurones convolutifs, leurs architectures et leurs avantages.
- Une étude sur le choix des capteurs équipés sur le drone pour la télédétection des fuites.
- Conception et contrôle d'un drone à voilure fixe basé sur le régulateur de stabilité LQR et la commande PID pour le guidage et le maintien de cap et d'altitude.

### **Contour**

Le reste de la thèse est structuré comme suit :

Dans le chapitre 1, il sera donné un bref aperçu sur les drones et précisément les drones à voilure fixe, leur historique, applications, types, modélisation et l'intégration des cellules solaires.

Dans le chapitre 2, une nouvelle méthode de détection des objets est abordée. Afin d'améliorer la précision de cette dernière, différents algorithmes sont adoptés. En outre, on a choisi les CNN en montrant leur architecture et leurs avantages.

Dans le chapitre 3, formalisation de la problématique de l'observation des fuites de pétrole et de gaz en intégrant des capteurs avancés et en étudiant les caractéristiques de ces capteurs qu'on ajoute sur le drone.

Dans le chapitre 4, une étude en simulation de drone en mettant les résultats du programme MATLAB et enfin, une conclusion générale de cette thèse.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art**

### 1. Introduction

Ces dernières années, le monde a assisté à la naissance de la robotique aérienne comme un des domaines des systèmes embarqués, qui est un des domaines de recherches le plus actif.

Le domaine de la robotique aérienne est vaste et interdisciplinaire. Les drones ont connu une progression rapide dans le domaine de la technologie, offrant des opportunités sans précédent dans des secteurs tels que l'industrie, l'agriculture, la surveillance, l'inspection à la détection des fuites et des anomalies et bien d'autres encore. Leur agilité, leur portabilité et leur capacité à accéder à des zones difficilement accessibles font des drones des solutions attrayantes pour des tâches complexes et diverses.

Dans ce chapitre, nous présenterons un bref historique et examinerons en détails les différentes facettes des drones, leur classification, leurs avantages et utilité suivi des domaines d'application, d'une description des technologies des drones, de la modélisation du drone à aile fixe et une étude des cellules solaires équipées sur les drones.

#### 1.1. Historique

L'histoire de l'aviation remonte aux temps anciens, lorsque les hommes ont observé les oiseaux voler et ont rêvé de voler eux-mêmes.

Abbas Ibn Firnas était le premier inventeur qui a pensé à voler en 875, il a construit une machine volante qu'il a utilisée pour effectuer un vol plané depuis une colline près de Cordoue, en Espagne. Elle était composée d'un cadre en bois recouvert de plumes d'aigle pour créer une forme d'aile. Il portait une sorte de combinaison en toile qui lui permettait de contrôler sa trajectoire de vol en bougeant son corps. Son vol a duré environ dix (10) minutes et a été un succès relatif, car il a réussi à planer sur une distance d'environ 300 mètres avant de se poser en toute sécurité. Cependant, il a été gravement blessé lors de son atterrissage car il n'avait pas prévu de système de freinage pour sa machine volante.

Les premiers essais de vol humain ont eu lieu dans les années 1700 et 1800, avec des ballons à air chaud et des planeurs. Cependant, le premier vol réussi d'un avion motorisé n'a eu lieu qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle, avec les frères Wright, Orville et Wilbur, qui sont souvent crédités d'avoir réalisé le premier vol motorisé réussi en 1903. Ils ont conçu et construit un avion qui utilisait un moteur à essence pour propulser une hélice, ce qui leur a permis de voler sur une distance de 120 pieds (36 mètres) à une hauteur de 10 pieds (3 mètres) au-dessus du sol. D'autres inventeurs, tels que Samuel Langley et Alberto Santos Dumont, ont également travaillé sur des avions motorisés à cette époque.

Après le vol des frères Wright, l'aviation a rapidement évolué, et les avions ont été utilisés pour la reconnaissance et le combat, et surtout pour larguer des bombes sur des cibles ennemies pendant la Première et la Seconde Guerre Mondiale.

Dans les années 1920 et 1930, les avions ont commencé à être utilisés pour le transport des passagers et de fret. Des compagnies aériennes, comme Pan Am, ont été créées pour fournir des services de transport aérien à travers le monde. Et dans les années 1950 et 1960,

les avions ont commencé à être équipés de technologies avancées, telles que les systèmes de contrôle de vol automatisés et les systèmes de navigation par satellite, et ils ont commencé à être utilisés pour la recherche scientifique, telle que l'étude de la météorologie et de la géologie.

Dans les années 1970 et 1980, les avions ont continué à évoluer, avec l'introduction de nouveaux modèles tels que le Concorde, qui pouvait voler à des vitesses supersoniques.

Aujourd'hui, l'aviation est un élément essentiel de la vie moderne, avec des avions qui transportent des millions de personnes et de tonnes de fret chaque jour, et qui peuvent être utilisés pour la guerre, la recherche scientifique, et même pour les loisirs et la défense nationale.

### 1.2. Définition d'un UAV

Un aéronef qui peut voler sans pilote ni passager à bord (contrôlé à distance) est considéré comme un véhicule aérien sans pilote (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ou parfois appelé drone[1]. Il est capable d'effectuer des missions sans présence humaine à bord. Les drones sont devenus une base puissante et fiable pour l'acquisition de données professionnelles grâce aux développements récents de la technologie des capteurs et des systèmes de navigation.

### 1.3. Domaines d'application des UAV

Les UAV offrent un grand potentiel pour aider et même voir remplacer l'être humain dans divers domaines d'applications [1] :

- La cartographie et la topographie.
- La prise de vue aérienne.
- Audiovisuel et photographie.
- La transmission vidéo.
- Les applications militaires.
- L'agriculture moderne de précision.
- La livraison des colis et logistique.
- La modélisation des sols et les bâtiments en 3D.
- Applications scientifiques et de recherche et sauvetage.
- Sécurité : surveillance, communication, inspection des pipelines.
- La surveillance des conditions météorologiques.
- La détection des feux de forêts.

-L'inspection des structures.



Figure 1-1 : exemples d'applications des drones [1].

### 1.4. Avantages et utilité de drones

Les drones offrent une grande flexibilité et accessibilité en termes de mobilité et de temps de réponse, qui permet de réduire le coût des missions par rapport aux avions pilotés, et permet de fournir des informations précises dans un délai qui n'était pas possible auparavant, en réduisant les risques humains et l'impact environnemental avec une productivité accrue et une surveillance en temps réel.

### 1.5. Description des technologies de drones

Les drones utilisent une combinaison de technologies avancées pour assurer leur fonctionnement efficace et autonome. Ces technologies comprennent [2]:

- 1) Systèmes de navigation : les drones sont équipés de systèmes de navigation précis tels que le GPS qui leur permettent de déterminer leur position exacte dans l'espace.
- 2) Contrôle de vol : les drones utilisent des systèmes de contrôle de vol pour maintenir leur stabilité et leur position en vol.
- 3) Communication sans fil : les drones sont généralement équipés de systèmes de communication sans fil, tels que le Wi-Fi, le Bluetooth ou la technologie radio, pour permettre la transmission de données entre le drone et le pilote ou les systèmes de contrôle au sol.

4) Capteurs et caméras : les drones sont souvent équipés de capteurs spécialisés et de caméras qui leur permettent de collecter des données spécifiques en fonction de leur application.

5) Batteries et systèmes d'alimentation : les drones utilisent généralement des batteries rechargeables pour leur alimentation en énergie. Les progrès technologiques dans les batteries lithium-ion ont permis une autonomie de vol accrue pour les drones, prolongeant ainsi leur temps de vol et leur capacité opérationnelle.

6) Logiciels et algorithmes : les drones sont contrôlés par des logiciels et des algorithmes qui gèrent leur vol, leur navigation, leur collecte de données et leurs capacités d'analyse. Ces logiciels permettent de planifier des trajectoires de vol, de stabiliser le drone, de traiter les données collectées et de réaliser des tâches spécifiques.

La combinaison de ces technologies permet aux drones de réaliser des tâches variées avec précision, efficacité et autonomie. La continue évolution de ces technologies ouvre de nouvelles perspectives pour les applications des drones dans de nombreux domaines.

### 1.6. Classification des drones

Les drones sont de toutes formes et de toutes tailles, des modèles à longue portée et à haute endurance aux très petits modèles. On peut les classer selon des caractéristiques de performance telles que la hauteur et portée de vol, la taille, la vitesse, l'endurance, le mécanisme d'atterrissage et le poids [1].

#### 1.6.1 Selon le poids

Il existe trois (3) classes des drones selon leur poids et la 1<sup>ère</sup> classe est subdivisée en quatre (4) catégories.

Tableau 1-1 : classification des UAV selon leur poids [1].

Classe		Type	Poids
1	A	Nano-drones	$P \leq 200 \text{ g}$
	B	Micro-drones	$200 \text{ g} < P \leq 2 \text{ kg}$
	C	Mini-drones	$2 \text{ kg} < P \leq 20 \text{ kg}$
	D	Petits drones	$20 \text{ kg} < P \leq 150 \text{ kg}$
2		Drones tactiques	$150 \text{ kg} < P \leq 600 \text{ kg}$
3		Drones de frappe	$P > 600 \text{ kg}$

### 1.6.2 Selon la cellule (la propulsion)

Les drones sont classés en trois (3) types selon la cellule : les UAV à voilure fixe (figure 1.2), les UAV à voilure tournante (figure 1.3) et les UAV à aile battante (figure 1.9).



Figure 1-2 : exemples des drones à aile fixe [28].



Figure 1-3 : les drones à aile tournante [28].

**1) Drones à voilure fixe :** ce sont des drones qui utilisent les ailes fixes pour leur déplacement. Ils sont soit type d'avion plus lourd que l'air ou type de dirigeable plus léger que l'air.



Figure 1-4: exemple d'un drone à aile fixe.

Certaines cellules à voilure fixe peuvent effectuer des décollages et des atterrissages verticaux (VTOL).



Figure 1-5 : VTOL.

**2) Drones à voilure tournante :** ce sont des drones qui ont des hélices qui tournent pour générer de la portance et du mouvement. Ils sont caractérisés par le décollage et l'atterrissage vertical, et capables de faire des vols stationnaires à basse vitesse et à faible altitude.

Ce type de drone utilise un ou plusieurs rotors, donc il englobe plusieurs catégories :

**a) Mono rotor :** il a un seul rotor principal pour la sustentation et la propulsion et une barre stabilisatrice. Le rotor principal est situé verticalement et tourne pour générer la poussée nécessaire au vol.



Figure 1-6: exemple d'un mono rotor.

**b) Birotors :** il a deux (2) rotors principaux pour la sustentation et la propulsion. Les deux (2) rotors sont situés sur le même plan horizontal et tournent en sens inverse l'un de l'autre.



Figure 1-7: exemple d'un birotor.

c) **Quadri rotors** : il utilise quatre (4) rotors pour la propulsion, chaque rotor est situé à un côté du drone, formant une configuration carrée. Ils sont plus stables, plus manœuvrables et plus autonomes que les autres.



Figure 1-8 : exemple d'une quadri rotor.

3) **Drones à aile battante** : également appelés « **drones ornithoptères** », ce sont des drones qui utilisent des ailes battantes en créant une forme compatible à celle des oiseaux et des insectes. Ils sont capables de changer leur angle de battement pendant le vol.

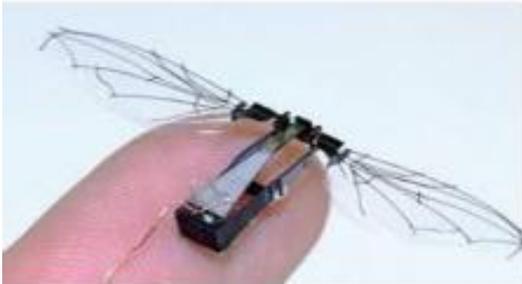


Figure 1-9 : exemples des ailes battantes.

### 1.6.3 Selon la taille :

On peut classer les drones selon leur taille en quatre (4) types : HALE, MALE, Micro et Mini drones [1].

1) **HALE** : « **High Altitude Long Endurance** », ce sont des drones à voilure fixe et de grande taille, capable de voler à très haute altitude pendant une longue période.



Figure 1-10: exemples des HALE.

2) **MALE** : « **Medium Altitude Long Endurance** », ce sont des drones similaires au HALE mais ils sont capables de voler à une altitude plus basse (altitude moyenne) avec une grande autonomie.



Figure 1-11: exemple de MALE.

3) **Mini drone** : ce sont des drones de petite taille avec une faible autonomie. Ils sont souvent utilisés dans des environnements intérieurs où les grands drones ne peuvent pas voler.



Figure 1-12: exemple d'un mini drone.

4) **Micro drone** : ce sont des drones de très petite taille, qui ont une grande maniabilité et une grande agilité. Ils sont utilisés dans des environnements intérieurs difficiles à l'accès.



Figure 1-13: micro-drone.

## 1.7. L'autonomie

### 1.7.1 Définition

L'autonomie est définie comme la capacité d'un système à détecter, communiquer, planifier, prendre des décisions et agir sans intervention humaine [2].

L'autonomie est caractérisée par des facteurs tels que la complexité de la mission, la difficulté de l'environnement et le niveau d'interaction homme-machine pour accomplir la mission. Son objectif est de rendre les machines intelligentes.

### 1.7.2 Drone autonome

Le mot « drone autonome » signifie un drone qui effectuerait sa mission sans la moindre interaction avec l'homme [3]. Ce serait un appareil qui, grâce à son intelligence artificielle, pourrait effectuer des missions de reconnaissance en repérant tout seul les éléments intéressants, ou encore serait capable de délivrer une munition ou de se jeter, pour les « drones suicides », sur une cible qu'il aurait lui-même détectée, classifiée et identifiée.

### 1.7.3 Les différents niveaux de l'autonomie [3]

- 1- L'homme prend toutes les décisions.
- 2- L'ordinateur calcule un ensemble complet d'alternatives.
- 3- L'ordinateur choisit un ensemble d'alternatives.
- 4- L'ordinateur propose une alternative.
- 5- L'ordinateur exécute la suggestion avec approbation.
- 6- L'homme peut mettre sans veto à la décision de l'ordinateur dans un délai donné.
- 7- L'ordinateur exécute puis rend compte à l'homme.
- 8- L'ordinateur ne fait un rapport que si on lui demande.
- 9- L'ordinateur ne rend compte que s'il le souhaite.
- 10- L'ordinateur ignore l'homme.

### 1.7.4 Les caractéristiques d'un avion autonome intelligent

Un drone peut être identifié en étant [2] :

- 1- Plus petit, plus léger, plus rapide, plus maniable et maintenable qu'un avion.
- 2- Fonctionnalité indépendante de planification des chemins.
- 3- Par l'amélioration des technologies de guidage.
- 4- La rapidité d'évolution des informations de capteurs multiples.
- 5- L'amélioration de rendement.

6- L'utilisation des technologies aéroportées avancées de détection et d'évitement des obstacles.

### 1.8. Choix de drone

Il existe plusieurs facteurs pour la sélection d'un certain drone tels que : la couverture de la zone, la distance de la base, la durée de vol, le type de capteur à bord, les conditions du terrain, les législations et enfin l'objectif de la mission et le type d'informations requises.

Pour notre projet, les UAV à voilure fixe est le choix idéal car ils sont plus stables et peuvent voler plus longtemps à des vitesses plus élevées, cela aide à couvrir de grandes zones en une seule mission.

#### 1.8.1 Historique des aéronefs à ailes fixes

Les ailes fixes, également connues sous le nom d'ailes rigides, sont un élément clé des avions modernes. Ils ont une longue histoire qui remonte à l'Antiquité. Les premiers exemples de machines volantes à ailes fixes ont été créés par les Grecs anciens, qui ont conçu des jouets volants en formes d'oiseaux.

Au moyen âge, les inventeurs ont commencé à concevoir des machines volantes plus sophistiquées, telles que les ailes battantes et les planeurs. Cependant, il n'a pas été possible de construire un avion capable de voler avec un pilote à bord avant le début du XXe siècle, lorsque les frères Wright ont construit et piloté le premier avion motorisé, qui était capable de voler avec un pilote à bord en 1903. Leur avion, le « Wright Flyer », était un biplan en bois et toile équipé, avait des ailes fixes en formes de trapèze et était équipé d'un moteur à essence.

Au cours des décennies suivantes, les avions ont évolué pour devenir plus grands, plus rapides et plus avancés sur le plan technologique. Les ailes fixes ont été modifiées pour améliorer les performances de l'avion, notamment en termes de portance, de traînée et de stabilité.

Dans les années 1930, les ailes à profil épais ont été développées pour améliorer la portance à basse vitesse et c'était pendant la Seconde Guerre Mondiale que les avions militaires ont vu l'introduction d'ailes à profil mince pour améliorer la vitesse et l'efficacité.

Depuis lors, les ailes fixes ont continué à évoluer pour s'adapter aux demandes de l'aviation commerciale et militaire, telles que les ailes à géométrie variable, qui peuvent changer de forme en vol, qui ont été développées pour permettre aux avions de voler à des vitesses supersoniques, et les ailes composites, fabriquées à partir de matériaux légers tels que la fibre en carbone, ont été développées pour réduire le poids de l'avion et améliorer l'efficacité.

Aujourd'hui, les ailes fixes sont un élément essentiel de tous les avions, des petits avions privés aux avions de ligne commerciaux et aux avions militaires sophistiqués.

### 1.8.2 Définition des aéronefs à ailes fixes

Les aéronefs à ailes fixes sont un type d'aéronef qui utilise des ailes fixes pour générer la portance nécessaire pour voler. Ils peuvent être conçus pour une variété de missions, allant du transport de passagers et de fret, aux missions militaires et à la recherche scientifique.

Les UAV à voilure fixe sont des aéronefs sans pilote (drones) qui sont capables de voler en utilisant des ailes fixes, similaires à celles d'un avion. Ces drones sont conçus pour voler à haute altitude et peuvent être utilisés pour une variété de tâches.

### 1.8.3 Les tendances des ailes fixes

L'évolution des ailes fixes comprend un certain nombre de technologies et de tendances qui sont utilisées pour améliorer les performances et la sécurité des aéronefs. Voici quelques-unes des tendances les plus courantes [12]:

- **Ailes composites** : Elles sont de plus en plus courantes dans les avions modernes. Elles permettent de réduire le poids de l'aéronef et d'améliorer l'efficacité énergétique grâce aux matériaux composites qui les contiennent, tels que la fibre de carbone et le Kevlar, qui sont plus légers et plus résistants que les matériaux traditionnels comme l'aluminium.

- **Ailes à incidence variable** : Elles permettent de modifier l'angle d'attaque de l'aile en vol pour améliorer la portance et la stabilité de l'aéronef. Elles sont souvent utilisées dans les avions militaires et les avions de transport.

- **Ailes à géométrie variable** : Elles sont caractérisées par leur capacité de changer de forme en vol pour s'adapter aux différentes conditions de vol. Elles sont souvent utilisées dans les avions supersoniques et les avions de chasse.

- **Ailes intelligentes** : Elles sont dotées de capteurs et d'actuateurs qui leur permettent de s'adapter aux différentes conditions de vol. Les capteurs peuvent détecter les turbulences et les changements de vent, tandis que les actuateurs peuvent ajuster la forme de l'aile en temps réel pour maintenir la stabilité de l'aéronef.

## 1.9. Modélisation des drones à voilure fixe

### 1.9.1 Dynamique des drones

Les drones peuvent être pilotés à distance ou être autonomes grâce à un pilote automatique. Ils peuvent opérer à des altitudes supérieures à 70 000 pieds, ils ont une manœuvrabilité élevée et une grande endurance, et ils peuvent être équipés par des capteurs optiques et des radars. Cependant, ils ont besoin d'une large bande pour la communication [10].

Les drones pourraient également être équipés de commandes semblables à celles d'un avion : gouvernes de profondeur, ailerons, gouvernails (gouvernes de direction), volets, extensions d'ailes et trains d'atterrissage.

Les UAV sont plus légers que les avions pilotés donc ils ont des fréquences naturelles plus élevées.

Les drones ont les caractéristiques suivantes pour leur modèle dynamique [5]:

- 1- Les drones sont des corps rigides et les effets de flexibilité ne sont pas pris en compte.
- 2- Ils ont une configuration conventionnelle (c.à.d. une queue arrière).
- 3- La symétrie par rapport au plan XZ est supposée.
- 4- L'effet de la poussée sur le mouvement latérale est négligé.

### 1.9.1.1. Les forces agissantes sur un UAV à aile fixe

Les UAV sont soumis à différentes forces aérodynamiques qui influencent leur vol et leur maniabilité. La compréhension de ces forces est essentielle pour comprendre comment les drones volent et comment ils peuvent être contrôlés en toute sécurité.

On distingue quatre (4) forces [17]:

**1) La portance (Lift) :** la portance « L » est la force qui permet de maintenir le drone dans l'air, et est générée par les ailes du drone. Elle est produite grâce à la différence de pression entre l'extrados et l'intrados des ailes. Cette force s'oppose à la force de gravité.

Elle est définie par [17]:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad (1.1)$$

**2) La traînée (Drag) :** la traînée « D » est la force résistante à l'avancement du drone et qui s'oppose à son mouvement dans l'air. Elle est causée par la friction de l'air sur la structure. On peut la réduire en minimisant les surfaces de frottement tels que : les volets, les ailerons et les spoilers.

Elle est définie par [17]:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_D \quad (1.2)$$

**3) La poussée (Thrust) :** la poussée « T » est la force qui propulse le drone vers l'avant en agissant dans la direction de son mouvement. Elle est générée par les moteurs et les hélices.

Elle est définie par [17]:

$$T = K \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4 \quad (1.3)$$

**4) Le poids (Weight) :** le poids « W » est la force de gravité qui tire le drone vers le bas, causée par son masse. La portance doit être supérieure ou égale à la force de gravité pour maintenir le drone en l'air.

Elle est définie par [17]:

$$W = m \cdot g \quad (1.4)$$

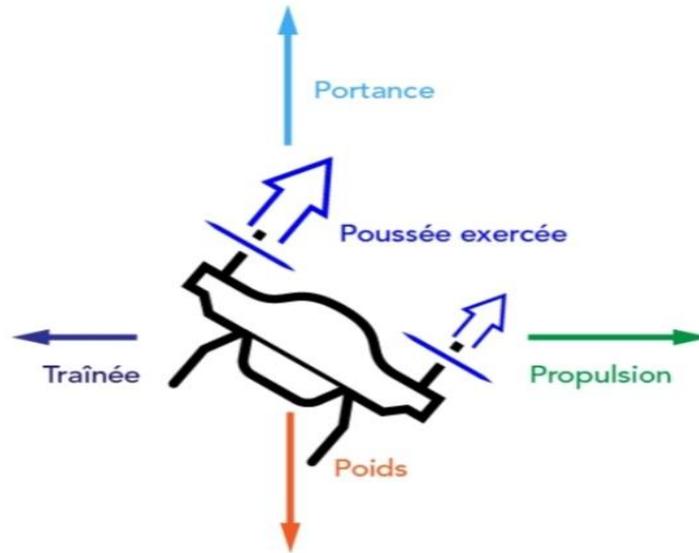


Figure 1-14: les forces agissantes sur un UAV [17].

#### 1.9.1.2. Les formules de rotation :

En considérant les cadres de coordonnées décrits dans la figure 1.15.

On a un vecteur  $p$  qui peut être exprimé à la fois dans le cadre  $\mathcal{F}^0$  (spécifié par  $[i^0, j^0, k^0]$ ) et dans le cadre  $\mathcal{F}^1$  (spécifié par  $[i^1, j^1, k^1]$ ). Les ensembles de vecteurs  $[i^0, j^0, k^0]$  et  $[i^1, j^1, k^1]$  sont chacun des ensembles orthogonaux de vecteurs de base unitaires [19].

La matrice de rotation du système de coordonnées  $\mathcal{F}^0$  à  $\mathcal{F}^1$  est désignée par  $\mathcal{R}_0^1$ .

Dans le système  $\mathcal{F}^1$ , un vecteur générique  $p^0$  peut être résolu à l'aide de l'opération matricielle suivante [19]:

$$p^1 = \mathcal{R}_0^1 p^0 \quad (1.5)$$

Par exemple, la rotation à droite autour de l'axe  $k^0$  d'un angle  $\theta$  est définie comme suit, en utilisant la géométrie de la figure 1.15 :

$$\mathcal{R}_0^1 \triangleq \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

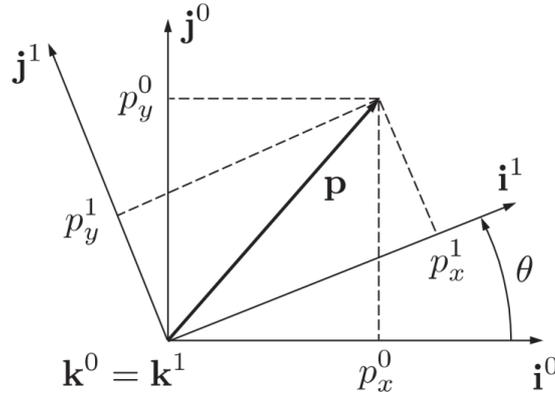


Figure 1-15: rotation en 2D [19].

De la même manière, la rotation à droite autour de l'axe  $j^0$  aurait donné par [19]:

$$\mathcal{R}_0^1 \triangleq \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Donc, une rotation autour de l'axe  $i^0$  serait [19]:

$$\mathcal{R}_0^1 \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

La matrice orthonormée de rotation  $\mathcal{R}_0^1$  présente les propriétés suivantes [19]:

- 1)  $(\mathcal{R}_0^1)^{-1} = (\mathcal{R}_0^1)^T = \mathcal{R}_1^0$
- 2)  $\mathcal{R}_1^2 \mathcal{R}_0^1 = \mathcal{R}_0^2$
- 3)  $\det(\mathcal{R}_0^1) = 1$

### 1.9.1.3. Les repères de coordonnées

Pour mieux comprendre la dynamique des UAV, de nombreux repères de coordonnées sont nécessaires pour ces raisons [18]:

-Les équations du mouvement de Newton sont dérivées à un repère de référence inertiel, mais il est plus facile de décrire le mouvement dans un repère fixé au corps (le repère mobile).

-Il est plus facile de décrire les forces et les moments aérodynamiques qui agissent sur le corps de l'UAV en utilisant un repère de référence fixé au corps.

-Les capteurs embarqués, comme les accéléromètres et les gyroscopes, mesurent les informations par rapport au repère mobile. En revanche, le GPS mesure la position, la vitesse au sol et la trajectoire par rapport au repère inertiel.

-Les exigences de la mission, y compris les points d'attente et les trajectoires de vol, sont spécifiées dans le repère inertiel.

Il existe une variété de repères de coordonnées selon des besoins spécifiques du système et des applications visées, mais pour la modélisation d'un UAV on s'intéresse aux repères suivants :

### 1.9.1.3.1. Le repère inertiel $\mathcal{F}^i$

Le repère  $\mathcal{F}^i$ , également connu sous le nom de repère inertiel (galiléen), est un système de coordonnées fixé à la terre, dont l'emplacement de son origine peut être n'importe quel point qui n'est absolument pas accéléré (inertiel). On note  $i$ ,  $j$  et  $k$  les vecteurs unitaires correspondant aux axes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  respectivement. Le vecteur unitaire  $i^i$  pointe vers le Nord,  $j^i$  pointe vers l'Est et  $k^i$  pointe vers le centre de la terre, c.à.d. vers le bas [18].

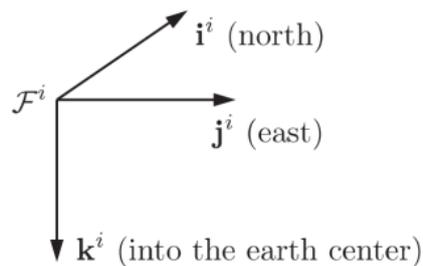


Figure 1-16: Le repère inertiel  $\mathcal{F}^i$  [18].

### 1.9.1.3.2. Le repère terrestre $\mathcal{F}^e$

Le repère  $\mathcal{F}^e$ , également connu sous le nom de repère terrestre fixé à la surface de la terre. Son origine est liée à la surface de la terre [18].

L'axe  $X^e$  est aligné vers l'Est.

L'axe  $Y^e$  est aligné vers le Nord.

L'axe  $Z^e$  est aligné vers le Haut (la direction verticale).

Il est utilisé pour décrire la position et les mouvements d'un UAV à l'aide des coordonnées géographiques qui sont la latitude, la longitude et l'altitude, et pour la navigation, le suivi de trajectoire et la planification de mission.

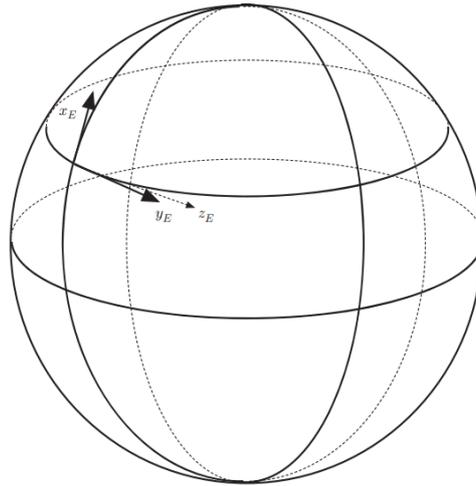


Figure 1-17: le repère terrestre  $\mathcal{F}^e$  [18].

### 1.9.1.3.3. Le repère de navigation $\mathcal{F}^\ell$

Le repère  $\mathcal{F}^\ell$ , également connu sous le nom de repère de navigation. Son origine est fixée à un point arbitraire qui peut être libre de se déplacer par rapport à la terre [18].

L'axe  $X^\ell$  est aligné sur la direction du Nord.

L'axe  $Y^\ell$  est aligné sur la direction de l'Est.

L'axe  $Z^\ell$  est aligné sur la direction de la verticale locale vers le Bas (NED).

Où :

L'axe  $X^\ell$  est aligné sur la direction de l'Est.

L'axe  $Y^\ell$  est aligné sur la direction du Nord.

L'axe  $Z^\ell$  est aligné sur la direction de la verticale locale vers le Haut (ENU).

Il est utilisé pour décrire les mouvements de l'UAV par rapport à sa trajectoire, pour le guidage et la navigation inertielle.

### 1.9.1.3.4. Le repère mobile $\mathcal{F}^b$

Le repère  $\mathcal{F}^b$ , également connu sous le nom de repère mobile ou corps, est un système de coordonnées qui est lié au corps de l'UAV lui-même. Son origine est le centre de gravité de l'UAV [18].

L'axe  $X^b$  est généralement aligné avec l'axe longitudinal de l'UAV, allant de la queue à l'avant de l'UAV.

L'axe  $Y^b$  est généralement aligné avec l'axe transversal, allant de l'aile gauche à l'aile droite de l'UAV.

L'axe  $Z^b$  est généralement aligné avec l'axe vertical, pointé vers le bas.

Il permet de décrire les mouvements de roulis, de tangage et de lacet de l'UAV ainsi que les forces aérodynamiques qui agissent sur lui. Il est utilisé pour la modélisation du comportement de l'UAV, la conception du système de contrôle de vol et l'analyse des performances aérodynamiques.

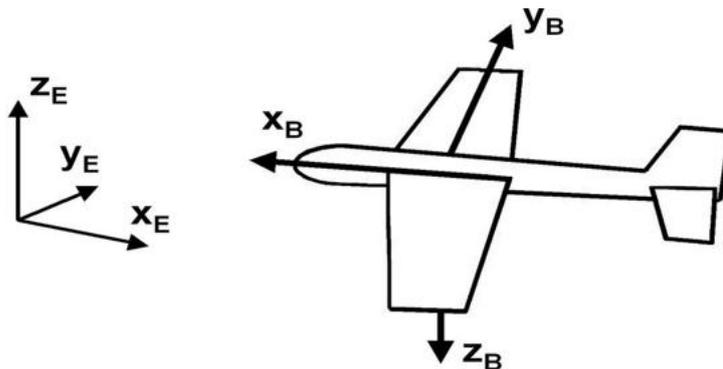


Figure 1-18: le repère mobile  $\mathcal{F}^b$  [18].

### 1.9.1.3.5. Le repère du vent $\mathcal{F}^w$ (aérodynamique)

Le repère  $\mathcal{F}^w$ , également connu sous le nom de repère du vent ou le repère aérodynamique, est un système de coordonnées porté par le corps. Son origine est confondue avec le centre de gravité de l'UAV [18].

L'axe  $X^w$  est aligné avec la direction du vent relatif, c.à.d. parallèle au vecteur vitesse.

L'axe  $Y^w$  est perpendiculaire à l'axe  $X^w$  dans le plan horizontal et pointé vers le côté droit de l'UAV.

L'axe  $Z^w$  est aligné avec la direction verticale, pointant vers le haut.

Il est utilisé pour décrire les mouvements et les forces aérodynamiques relatives à l'air environnant, pour la modélisation des performances aérodynamiques, le calcul des trajectoires de vol, l'analyse des dérives dues au vent et la conception des systèmes de contrôle de vol.

### 1.9.1.3.6. Le repère de stabilité $\mathcal{F}^s$ (avion)

Le repère  $\mathcal{F}^s$ , également connu sous le nom de repère de stabilité ou le repère avion. Son origine est fixée au centre de gravité de l'UAV [18].

L'axe  $X^S$  est aligné avec l'axe de symétrie longitudinal de l'UAV allant de l'avant à l'arrière.

L'axe  $Y^S$  est aligné avec l'axe transversal de l'UAV, perpendiculaire à l'axe  $X^S$ , pointant vers la droite de l'aile.

L'axe  $Z^S$  est aligné avec l'axe vertical, pointant vers le bas.

Il est utilisé pour étudier et décrire le comportement et la stabilité d'un UAV, analyser les mouvements de l'UAV telles que les mouvements de roulis, de tangage et de lacet, et pour évaluer la stabilité et le contrôle de l'UAV.

#### 1.9.1.4. Le triangle du vent

Lorsqu'il s'agit de drones, le vent a un impact important sur la mécanique du vol puisqu'il peut représenter 20 à 50 % de la vitesse de la cellule, et les forces aérodynamiques sont également influencées par la vitesse relative par rapport à l'air environnant. Donc, le vent doit être pris en compte lors de la modélisation [17].

L'objectif est d'obtenir les dérivées des expressions essentielles pour créer les équations du mouvement d'un UAV. A partir de maintenant, on appelle la vitesse du vent par rapport au repère inertiel  $V_w$ , de la même manière,  $V_a$  représente la vitesse aérodynamique par rapport au même repère. La vitesse du sol est définie comme  $V_g$ , la vitesse du drone est calculée par rapport au repère inertiel pour comprendre comment le vent intervient dans l'équation.

Les vecteurs : vitesse aérodynamique, vitesse du sol et vitesse du vent sont reliés par l'équation (1.9) [17]:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_g - \vec{V}_w \quad (1.9)$$

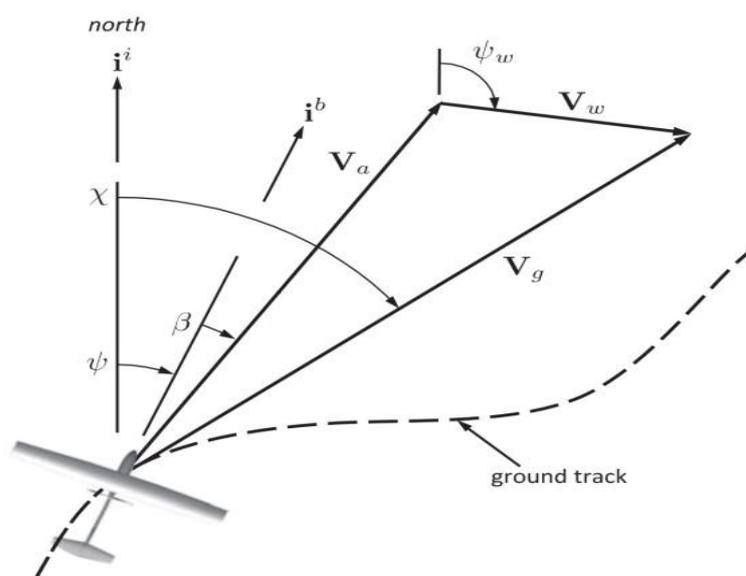


Figure 1-19: le triangle du vent [17].

La vitesse du sol peut être exprimée dans le repère mobile en termes de composantes le long des axes  $(i^b, j^b, k^b)$  comme suit [17]:

$$V_g^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

De même, les composantes du vent dans le repère mobile peuvent être exprimées comme suit [17]:

$$V_w^b = \begin{bmatrix} u_w \\ v_w \\ w_w \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

On note  $V_a$  la vitesse aérodynamique comme la vitesse du drone dans le repère du vent.

On sait que [17]:

$$V_a^w = \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Pour obtenir la vitesse aérodynamique avec les composantes du repère mobile, et en appliquant l'équation (1.9), une rotation du repère du vent vers le repère mobile  $\mathcal{R}_w^b$  est effectuée [17]:

$$V_a^b = \begin{bmatrix} u - u_w \\ v - v_w \\ w - w_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ w_r \end{bmatrix} = \mathcal{R}_w^b \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = V_a \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Résoudre (1.13) pour  $v_a, \alpha$  et  $\beta$  :

$$V_a = \sqrt{u_r^2 + v_r^2 + w_r^2} \quad (1.14)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{w_r}{u_r} \right) \quad (1.15)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{v_r}{\sqrt{u_r^2 + v_r^2 + w_r^2}} \right) \quad (1.16)$$

On est besoin des équations de mouvements de l'UAV.

Pour compléter l'image, le triangle du vent est présenté à la figure 1.19. L'angle entre le vecteur vent et  $i^i$  est noté  $\psi_w$ .

Un nouvel angle  $\chi$  représente l'angle entre le nord vrai et la projection du  $V_g$  dans le plan horizontal  $(i^b, j^b)$ .

### 1.9.2 Cinématique et dynamique du vol

Lors de l'élaboration du mouvement du drone, douze (12) variables d'état seront introduites [6].

#### 1.9.2.1 Cinématique

En tenant compte de la définition des états données dans le tableau 1.2,  $u$ ,  $v$  et  $w$  sont les composantes de la vitesse inertielle projetée sur le repère mobile [6].

Tableau 1-2: les variables d'état des équations du mouvement [6].

Name	Description
$p_n$	Position inertielle (Nord) du drone le long de $i^i$ en $\mathcal{F}^i$ .
$p_e$	Position inertielle (Est) du drone le long de $j^i$ en $\mathcal{F}^i$ .
$p_d$	Position inertielle (vers le bas) du drone le long de $k^i$ en $\mathcal{F}^i$ .
$u$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $i^b$ en $\mathcal{F}^b$ .
$v$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $j^b$ en $\mathcal{F}^b$ .
$w$	Vitesse du drone dans le repère mobile le long de $k^b$ en $\mathcal{F}^b$ .
$\phi$	Angle de roulis.
$\theta$	Angle de tangage.
$\psi$	Angle de lacet.
$p$	Vitesse de roulis mesurée le long de $i^b$ en $\mathcal{F}^b$ .
$q$	Vitesse de tangage mesurée le long de $j^b$ en $\mathcal{F}^b$ .
$r$	Vitesse de lacet mesurée le long de $k^b$ en $\mathcal{F}^b$ .

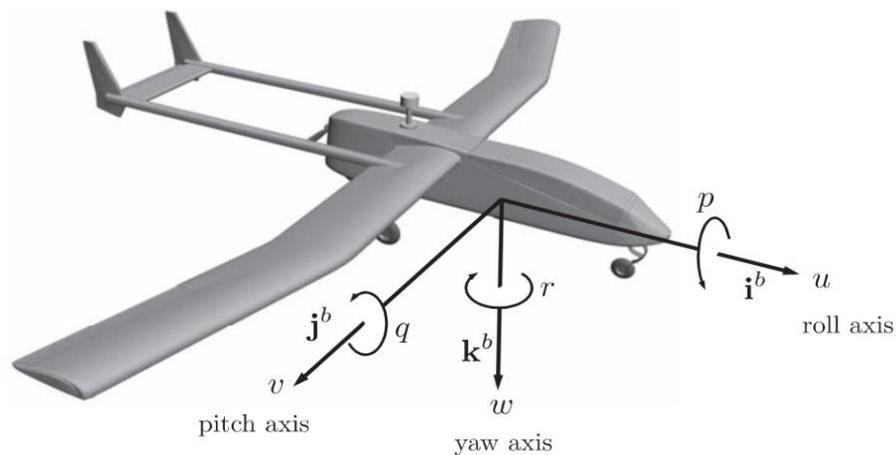


Figure 1-20: les axes du mouvement [6].

On a [6]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

L'inversion de cette expression donne [6]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

L'équation (1.18) montre que lorsque  $\theta = \pm 90$  degrés, lorsque l'angle de lacet n'est pas déterminé, la représentation de l'attitude par les angles d'Euler présente une singularité mathématique.

Cette situation est appelée « gimbal lock » (verrouillage du cadran).

Comme l'angle de tangage est souvent minime dans les conditions de vol normales, ce phénomène est rare pour les drones à voilure fixe.

### 1.9.2.2 Dynamique des corps rigides [7]

On doit appliquer la deuxième loi de Newton pour dériver les équations dynamiques du mouvement.

Les forces et les moments doivent être exprimés dans le repère inertiel, toutefois, ces quantités peuvent également être exprimées à l'aide de composantes associées à d'autres repères, tels que le repère mobile.

Le modèle de la terre plate, qui convient aux petits drones, est utilisé.

#### 1.9.2.2.1 Mouvement de translation

Concernant le mouvement de translation, on considère que [7]:

$$m \left( \frac{dv_g}{dt} \right)^i = \sum_k F_k \quad (1.19)$$

L'exposant  $i$  indique que la dérivée temporelle est utilisée dans le repère inertiel.

On sait que la dérivée  $\left( \frac{dv_g}{dt} \right)^i$  peut être décrite en termes de dérivée dans le repère mobile. Donc, l'équation (1.19) devient [7]:

$$m \left[ \left( \frac{dV_g}{dt} \right)^b + \omega_{b/i} \times V_g \right] = \sum_k F_k \quad (1.20)$$

Où :

$\omega_{b/i}$  : est la vitesse angulaire du repère  $\mathcal{F}^b$  dans le repère  $\mathcal{F}^i$ .

En exprimant l'équation (1.20) en termes de composantes du repère mobile, on obtient [7]:

$$m \left[ \left( \frac{dV_g^b}{dt} \right)^b + \omega_{b/i}^b \times V_g^b \right] = \sum_k F_k \quad (1.21)$$

On sait que [7]:

$$V_g^b = [u \quad v \quad w]^T \text{ et } \omega_{b/i}^b = [p \quad q \quad r]^T \text{ et } \sum_k F_k = [f_x \quad f_y \quad f_z]^T$$

On obtient finalement [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Il s'agit de trois (03) équations dynamiques de translation qui font partie de douze (12) équations d'état utilisées pour modéliser les drones.

### 1.9.2.2.2 Mouvement de rotation

La loi de Newton pour le mouvement de rotation indique que [7]:

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)^i = \sum_k M_k \quad (1.23)$$

Où :

$h$  : Le moment angulaire sous forme de vecteur.

$M_k$  : Le  $k$ -ième moment appliqué de l'extérieur.

En suivant la même procédure que pour les équations dynamiques de translation, l'équation (1.23) devient [7]:

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)^i = \left( \frac{dh}{dt} \right)^b + \omega_{b/i} \times h = \left( \frac{dh^b}{dt} \right)^b + \omega_{b/i}^b \times h^b = \sum_k M_k \quad (1.24)$$

Pour un corps rigide, le moment angulaire est défini comme :  $h^b = J \omega_{b/i}^b$

Où :  $J$  : est le tenseur d'inertie (matrice d'inertie).

$$J \triangleq \begin{bmatrix} J_x & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -J_{xz} & -J_{yz} & J_z \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Où :

$$J_x = \int (y^2 + z^2) dm$$

$$J_y = \int (x^2 + z^2) dm$$

$$J_z = \int (x^2 + y^2) dm$$

$$J_{xy} = \int (xy) dm$$

$$J_{xz} = \int (xz) dm$$

$$J_{yz} = \int (yz) dm$$

Les termes diagonaux de  $J$  sont appelés moments d'inertie, tandis que les termes hors diagonales sont appelés produit d'inertie.

$J_{xy} = J_{yz} = 0$  Parce que les drones sont symétriques par rapport au plan traversé par  $i^b$  et  $k^b$ .

La dérivée de  $J$  dans le même repère est  $\left(\frac{dJ}{dt}\right)^b = 0$ .

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & -J_{xz} \\ 0 & J_y & 0 \\ -J_{xz} & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

L'équation (1.24) devient [7]:

$$J \left(\frac{\omega_{b/i}^b}{dt}\right)^b + \omega_{b/i}^b \times (J \omega_{b/i}^b) = \sum_k M_k \quad (1.27)$$

Et en multipliant à gauche par  $J$ , on obtient [7]:

$$\left(\frac{\omega_{b/i}^b}{dt}\right)^b = \dot{\omega}_{b/i}^b = J^{-1} [-\omega_{b/i}^b \times (J \omega_{b/i}^b) + \sum_k M_k] \quad (1.28)$$

Rappelons que  $p, q$  et  $r$  sont les vitesses angulaires dans le repère mobile.

$$\omega_{b/i}^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \Rightarrow \dot{\omega}_{b/i}^b = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

On a  $\sum_k M_k = [\mathcal{L} \quad \mathcal{M} \quad \mathcal{N}]^T$ , les équations de la dynamique de rotation sont finalement dérivées [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 pq - \Gamma_2 qr \\ \Gamma_5 pr - \Gamma_6 (p^2 - r^2) \\ \Gamma_7 pq - \Gamma_1 qr \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_3 \mathcal{L} - \Gamma_4 \mathcal{N} \\ \frac{1}{J_y} \mathcal{M} \\ \Gamma_4 \mathcal{L} - \Gamma_8 \mathcal{N} \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Où :

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{J_{xz}(J_x - J_y + J_z)}{\Gamma} & \Gamma_2 &= \frac{J_z(J_z - J_y) + J_{xz}^2}{\Gamma} & \Gamma_3 &= \frac{J_z}{\Gamma} \\ \Gamma_4 &= \frac{J_{xz}}{\Gamma} & \Gamma_5 &= \frac{J_z - J_x}{J_y} & \Gamma_6 &= \frac{J_{xy}}{J_y} \\ \Gamma_7 &= \frac{(J_x - J_y)J_x + J_{xy}^2}{\Gamma} & \Gamma_8 &= \frac{J_x}{\Gamma} \end{aligned}$$

Avec :  $\Gamma = J_x J_z - J_{xz}^2$

En conclusion, le modèle à six (06) degrés de liberté et douze (12) états pour la cinématique et la dynamique du drone est résumé par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 pq - \Gamma_2 qr \\ \Gamma_5 pr - \Gamma_6 (p^2 - r^2) \\ \Gamma_7 pq - \Gamma_1 qr \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_3 \mathcal{L} - \Gamma_4 \mathcal{N} \\ \frac{1}{J_y} \mathcal{M} \\ \Gamma_4 \mathcal{L} - \Gamma_8 \mathcal{N} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \psi \sin \theta \sin \psi - \sin \psi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

### 1.9.3 Les forces et les moments externes

L'objectif est de décrire les forces et les moments qui agissent sur le drone.

Suivant [7], on suppose que les forces et les moments sont principalement dus à quatre (4) sources ; la gravité, l'aérodynamique, la propulsion et les perturbations atmosphériques.

Soit  $F_g$  la force due à la gravité,  $(F_a; M_a)$  la force et le moment dus à l'aérodynamique,  $(F_p; M_p)$  la force et le moment dus à la propulsion, et  $(F_d; M)$  les effets des perturbations atmosphériques.

On a [7]:

$$F = F_g + F_a + F_p + F_d \quad (1.31)$$

$$M = M_a + M_p + M_d \quad (1.32)$$

Où,  $f_x, f_y$  et  $f_z$  sont les composantes de la force totale  $F$  appliquée sur le drone.

### 1.9.3.1 La force gravitationnelle

L'effet du champ gravitationnel est décrit comme une force agissant dans la direction de  $k^v$  au centre de masse de l'UAV. Il ne produit donc aucun moment.

$$F_g^b = \begin{bmatrix} -\sin \theta m_g \\ \sin \phi \cos \theta m_g \\ \cos \phi \cos \theta m_g \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

### 1.9.3.2 Les forces et les moments aérodynamiques

La présentation des surfaces de contrôle est nécessaire avant de donner les expressions des forces et des moments agissant sur un UAV.

Le débattement des ailerons est exprimé par [7]:

$$\delta_a = \frac{1}{2} (\delta_{a_{left}} - \delta_{a_{right}}) \quad (1.34)$$

Où :  $|\delta_{a_{left}}| = |\delta_{a_{right}}|$

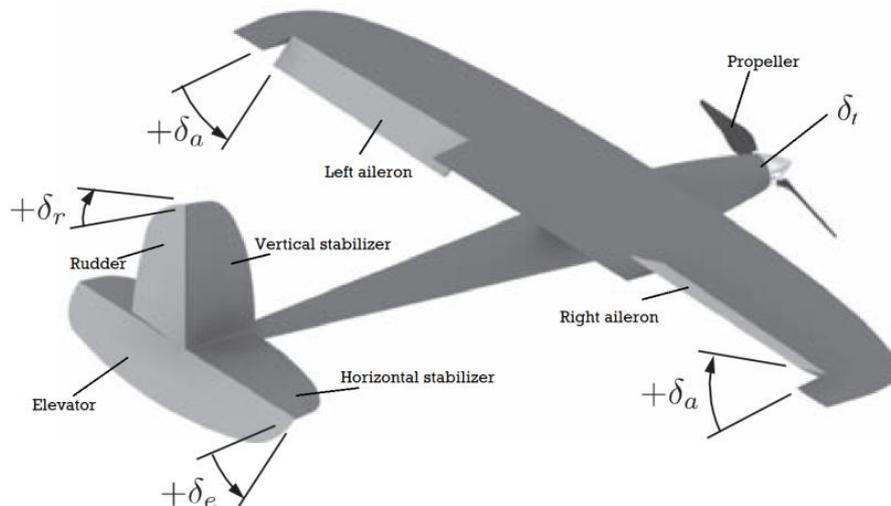


Figure 1-21: les surfaces de contrôle.

Puisqu'il y a trois (3) forces et trois (3) moments à définir, il faut d'abord analyser l'aérodynamique longitudinale, puis l'aérodynamique latérale pour les regrouper.

### 1.9.3.2.1 L'aérodynamique longitudinale

Le mouvement d'un corps dans le plan  $(i^b, k^b)$  est provoqué par plusieurs forces et moments qui sont : la force de portance, la force de traînée et le moment de tangage.

On peut les définir comme suit [7]:

$$F_{lift} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot C_L(\alpha, q, \delta_e) \quad (1.35)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot C_D(\alpha, q, \delta_e) \quad (1.36)$$

$$\mathcal{M} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot C \cdot C_m(\alpha, q, \delta_e) \quad (1.37)$$

$C_L, C_m, C_D$  : Des coefficients aérodynamiques non dimensionnels qui dépendent de l'angle d'attaque  $\alpha$ , du taux de tangage  $q$  et du braquage  $\delta_e$ .

On peut exprimer cette relation selon la série de Taylor du premier (1<sup>er</sup>) ordre [7]:

$$C_L(\alpha, q, \delta_e) = \left[ C_{L0} + \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \alpha + \frac{\partial C_L}{\partial q} q + \frac{\partial C_L}{\partial \delta_e} \delta_e \right] \quad (1.38)$$

$$C_L(\alpha, q, \delta_e) = \left[ C_{L0} + C_{L\alpha} \alpha + C_{Lq} \frac{c}{2V_a} q + C_{L\delta_e} \delta_e \right] \quad (1.39)$$

Où :  $C_{L\alpha} \triangleq \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ ,  $C_{Lq} \triangleq \frac{\partial C_L}{\partial \frac{qc}{2V_a}}$ ,  $C_{L\delta_e} \triangleq \frac{\partial C_L}{\partial \delta_e}$

$$C_D(\alpha, q, \delta_e) = \left[ C_{D0} + C_{D\alpha} \alpha + C_{Dq} \frac{c}{2V_a} q + C_{D\delta_e} \delta_e \right] \quad (1.40)$$

$$C_m(\alpha, q, \delta_e) = \left[ C_{m0} + C_{m\alpha} \alpha + C_{mq} \frac{c}{2V_a} q + C_{m\delta_e} \delta_e \right] \quad (1.41)$$

Pour le passage du repère de stabilité vers le repère mobile, la force de la portance et la force de traînée sont exprimées par [7]:

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -F_{drag} \\ -F_{lift} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

Le signe négatif est pour respecter la convention « NED » du repère mobile.

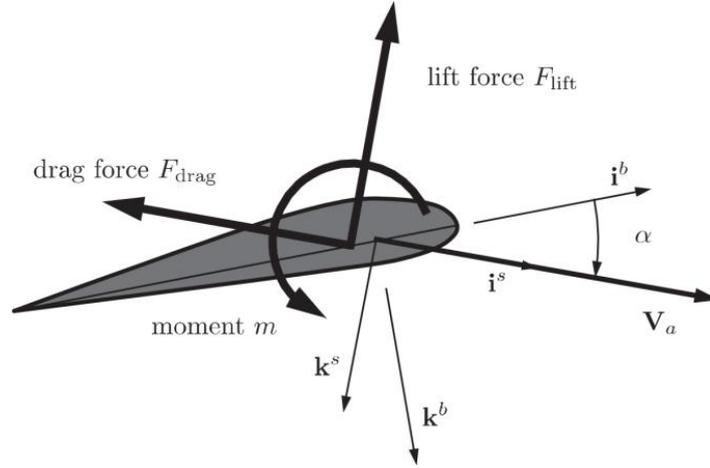


Figure 1-22: la représentation des forces de la portance et de la traînée pour un angle d'attaque  $\alpha$  positif.

### 1.9.3.2.2 L'aérodynamique latérale

La direction latérale le long de  $j^b$  et les moments de roulis et de lacet ont été influencés par l'aérodynamique latérale, par l'angle  $\beta$ .

Comme montre les équations suivantes [7]:

$$f_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot C_y(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) \quad (1.43)$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot b \cdot C_l(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) \quad (1.44)$$

$$\mathcal{N} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot S \cdot b \cdot C_n(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) \quad (1.45)$$

$C_y, C_l, C_n$ : Des coefficients aérodynamiques non dimensionnels qui dépend de  $\beta, p, r, \delta_a, \delta_r$ .

La série de Taylor du premier (1<sup>er</sup>) ordre des coefficients  $C_y, C_l$  et  $C_n$  qui devienne [7]:

$$C_y(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) = \left[ C_{Y_0} + C_{Y\beta} \beta + C_{Yp} \frac{b}{2.V_a} p + C_{Yr} \frac{b}{2.V_a} r + C_{Y\delta_a} \delta_a + C_{Y\delta_r} \delta_r \right] \quad (1.46)$$

$$C_l(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) = \left[ C_{l_0} + C_{l\beta} \beta + C_{lp} \frac{b}{2.V_a} p + C_{lr} \frac{b}{2.V_a} r + C_{l\delta_a} \delta_a + C_{l\delta_r} \delta_r \right] \quad (1.47)$$

$$C_n(\beta, p, r, \delta_a, \delta_r) = \left[ C_{n_0} + C_{n\beta} \beta + C_{np} \frac{b}{2.V_a} p + C_{nr} \frac{b}{2.V_a} r + C_{n\delta_a} \delta_a + C_{n\delta_r} \delta_r \right] \quad (1.48)$$

On peut conclure que :

-Les coefficients  $C_{Y_0}, C_{l_0}$  et  $C_{n_0}$  sont nuls pour les UAV symétriques par rapport à  $(i^b, k^b)$ .

Les coefficients  $\alpha, \beta, p, q$  et  $r$  sont des dérivées de stabilité, tandis que ceux liés à  $\delta_a, \delta_e$  et  $\delta_r$  sont des dérivées de contrôle.

### 1.9.3.3 La force de propulsion

De nombreux modèles d'hélices peuvent être intégrés aux drones.

Pour la modélisation des drones, on peut développer un modèle à l'aide de principe de Bernoulli pour calculer la poussée de l'hélice.

On a [7]:

$$F_p = S_p \Delta P \quad (1.49)$$

$$\text{Où} \quad \Delta P = P_{out} - P_{in} \quad (1.50)$$

$P_{in}$  : La pression avant l'hélice.

$P_{out}$  : La pression après l'hélice.

En appliquant le principe de Bernoulli, on peut exprimer la pression d'entrée et la pression de sortie :

$$P_{in} = P_0 + 1/2 \cdot \rho \cdot V_a^2 \quad (1.51)$$

$$P_{out} = P_0 + 1/2 \cdot \rho \cdot V_{out}^2 \quad (1.52)$$

Où  $V_{out}$  : Vitesse de l'air à la sortie de l'hélice.

Selon [8-9];  $V_{out}$  peut être approximée par :

$$V_{out} = k_{motor} \delta_t \quad (1.53)$$

Donc :

$$\begin{aligned} F_{p,x} &= S_{prop} C_{prop} (P_{out} - P_{in}) \\ &= 1/2 \rho S_{prop} C_{prop} [(k_{motor} \delta_t)^2 - V_a^2] \end{aligned} \quad (1.54)$$

Finalement :

$$F_p = 1/2 \cdot \rho \cdot S_{prop} \cdot C_{prop} \begin{bmatrix} (k_{motor} \delta_t)^2 - V_a^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

L'équation finale devienne :

$$F_p = \begin{bmatrix} F_{p,x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

$F_{p,x}$  est la composante projetées de  $F_p$  sur  $i^b$ .

### 1.9.3.4 Perturbations atmosphériques

Pour définir la dynamique d'un UAV, le vent joue un rôle très important.

Le vent peut être modélisé comme la composition d'une partie constante, le vent ambiant en régime permanent,  $V_{w,s}$  et d'une partie dynamique  $V_{w,d}$ .

On définit [7]:

$$V_w = V_{w,s} + V_{w,d} \quad (1.57)$$

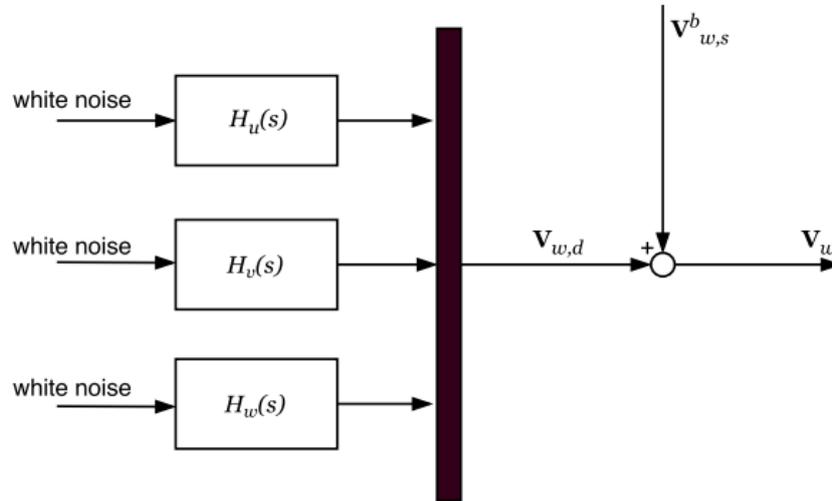


Figure 1-23: la représentation en bloc du vecteur vitesse du vent.

Le vecteur  $V_{w,s}$  est décrit dans le repère inertiel, mais selon l'équation (1.29), il est nécessaire de l'exprimer dans le repère mobile par la formule suivante [7]:

$$V_{w,s} = \mathcal{R}_i^b(\varphi, \theta, \psi) V_{w,s}^i \quad (1.58)$$

Une représentation spectrale de Dryden a été utilisée par le modèle de la turbulence du vent de ce dernier pour ajouter de la turbulence au modèle aérospatial en passant un bruit blanc à bande limitée à travers des filtres de formation appropriés selon la forme suivante [7]:

$$H_u(s) = \sigma_u \sqrt{\frac{2.V_a}{L_u}} \frac{1}{s + \frac{V_a}{L_u}} \quad (1.59)$$

$$H_v(s) = \sigma_v \sqrt{\frac{3.V_a}{L_v}} \frac{s + \frac{V_a}{\sqrt{3.L_v}}}{\left(s + \frac{V_a}{L_v}\right)^2} \quad (1.60)$$

$$H_w(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{3.V_a}{L_w}} \frac{s + \frac{V_a}{\sqrt{3.L_w}}}{\left(s + \frac{V_a}{L_w}\right)^2} \quad (1.61)$$

$\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  et  $\sigma_w$  sont les intensités de la turbulence le long des axes de châssis.

$L_u$ ,  $L_v$  et  $L_w$  sont les longueurs d'ondes spatiales.

### 1.10 Les drones solaires

L'énergie solaire est la forme la plus abondante d'énergie propre, qui apportera peut-être la solution au défi actuel du changement climatique. Elle est utilisée comme source d'énergie depuis le début de l'histoire de l'humanité. Compte tenu de l'abondance de l'énergie solaire propre, l'efficacité de l'exploitation de cette énergie est faible mais évolutive. Les applications de l'énergie solaire se développent grâce à l'augmentation de l'efficacité et à la baisse du coût des cellules solaires. Il est donc essentiel de mener des recherches sur les applications de l'énergie solaire dans différents domaines [12].

On va se concentrer sur l'évolution des aéronefs sans pilote alimentés par l'énergie solaire et sur l'aspect économique des cellules solaires et de leur efficacité sur le développement de ces UAV.

#### 1.10.1 L'évolution des drones solaires

L'histoire du premier aéronef sans pilote remonte à la montgolfière (ballon à air chaud) lancée en 1783 par Joseph-Michel et Jacques-Etienne Montgolfier, qui fut le premier aéronef à ne pas nécessiter de pilote humain [11]. A partir de là, les drones ont été développés pour avoir une caméra à bord (1896), être radiocommandés (1898) et plus avancés dans les années à venir [12]. En 1935, le premier drone moderne a été mis au point par La Royal Air Force, sous le nom de « Queen Bee ». En 1957, le colonel H.J. Taplin, du Royaume-Uni, a effectué le premier vol radiocommandé électrique officiellement enregistré, « Radio Queen » [12]. Le premier drone solaire a suivi en 1974, sous le nom de « Sunrise 1 », en Californie. Après 2013, de grandes entreprises telles que FedEx, UPS, Amazon, Google, Uber et d'innombrables autres sociétés investissent dans des tests et des réglementations [13].

Tout au long de l'histoire de l'évolution des drones depuis 1783, les applications militaires ont entraîné leur développement rapide, notamment l'attaque de Venise par des ballons autrichiens, la Première Guerre Mondiale, la Guerre de Viet Nam et les conflits palestino-israélienne [12].

#### 1.10.2 Les cellules solaires

##### 1.10.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus propre et la plus abondante. L'homme exploite l'énergie solaire depuis l'Antiquité en utilisant diverses méthodes. L'énergie solaire est largement utilisée dans les applications spatiales car elle

constitue une source d'énergie propre et de longue durée qui ne nécessite pratiquement aucun entretien [12].

### 1.10.2.2 Cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Les cellules photovoltaïques (PV) sont composées de matériaux semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, absorbent son énergie et la transfèrent aux électrons. Ces électrons chargés circulent dans le matériau sous la forme d'un courant électrique qui peut être extrait. La quantité d'électricité produite par les cellules photovoltaïques dépend des caractéristiques de performance de la cellule ainsi que des caractéristiques de la lumière (intensité et longueur d'onde) [13]. Le silicium est très souvent utilisé comme matériau semi-conducteur dans les cellules solaires et offre un rendement élevé, un faible coût et une longue durée de vie. Le taux de conversion de la lumière solaire en énergie électrique est considéré comme l'efficacité des cellules photovoltaïques.

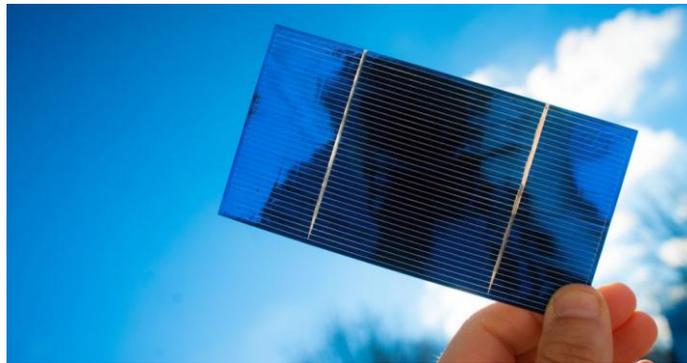


Figure 1-24 : une cellule solaire PV [13].

### 1.10.2.3 Evolution des cellules solaires et de leur efficacité

Les études sur le soleil en tant que source d'énergie ont commencé au 18<sup>e</sup> siècle. Après la découverte de l'effet photovoltaïque dans certains matériaux par Alexandre Becquerel en 1839, la première cellule solaire a été construite en 1833 par Charles Fritts. La conception de Charles était une jonction or-sélénium avec un rendement de 1%. L'article d'Einstein sur l'effet photoélectrique, publié en 1904, a constitué une percée dans la technologie des cellules solaires. En 1954, les Laboratoires Bell ont produit la cellule photovoltaïque moderne, qui avait un rendement de 4%, mais qui n'était pas encore rentable par rapport aux autres sources d'énergie disponibles. En 1959, Hoffman electronics a réussi à créer des cellules solaires d'une efficacité de 10% et, en 1960, a battu son propre record avec une efficacité de 14%. Au cours de décennies suivantes, après les années 1970, des cellules solaires plus efficaces ont été fabriquées à un coût réduit.

### 1.10.2.4 Influence du coût des cellules solaires

A l'époque de la cellule solaire de Charles Fritts, avec un rendement de 1%, le coût était de 300 dollars par watt, alors que le coût de la production d'électricité à partir de charbon était de 2 à 3 dollars à l'époque. En 1960, grâce à l'amélioration du rendement et à l'augmentation de la production due aux applications spatiales, le coût a été ramené à environ 100 dollars par watt.

Dans les années 1970, les recherches du Dr Elliot Berman visant à produire des cellules solaires moins coûteuses ont permis de ramener le prix des cellules à environ 20 dollars par watt.

Actuellement, il est possible de produire des cellules solaires au prix d'environ 0.50 dollars par watt avec un rendement d'environ 15%. Depuis les années 1980, en raison de l'attention accrue portée aux énergies propres et renouvelables, le coût des cellules solaires a baissé de 10% par an. Cette réduction du coût influence l'application commerciale des cellules solaires ainsi que la recherche dans ce domaine.

### 1.10.3 Drones à énergie solaire

Après le premier drone électrique (en 1957), qui utilisait un moteur à aimant permanent et une batterie argent-zinc, l'accent a été mis sur l'amélioration des performances des moteurs électriques et des batteries. L'énergie stockée dans la batterie étant limitée, le temps de vol du drone est limité jusqu'à ce que les batteries soient rechargées.

Le premier drone solaire connu, appelé « Sunrise 1 », a effectué son premier vol en 1974 au bord du lac asséché de Camp Irwin, en Californie, et a réussi à voler pendant 20 minutes à une altitude d'environ 100 m. Il avait une envergure de 9.76 m et un poids de 12.25 kg. La puissance de 450 W a été obtenue grâce à 4096 cellules solaires monocristallines avec un rendement de 11%. Le « Sunrise 2 », version améliorée du « Sunrise 1 », a été fabriquée en 1975. « Sunrise 2 » avait la même envergure que « Sunrise 1 » et pesait 10.21 kg. Grâce à l'efficacité de 14% des cellules solaires, une puissance améliorée de 600 W a pu être exploitée à partir de 4480 cellules solaires [14].

Et bien d'autres drones solaires dans les années suivantes. « Solaris » en 1976, « Solar Solitude » en 1996 qui a volé sur 38.84 km à 1283 m d'altitude, « Solar Excel » en 1999 qui a établi le record de 11h 34m 18s de vol à 2065 m d'altitude. Au cours des années suivantes, l'amélioration des drones de longue durée s'est concentrée sur les drones de haute altitude et de longue endurance (HALE) et les drones éternels.

Les aéronefs à énergie solaire offrent un équilibre entre la collecte de la consommation d'énergie, ce qui présente l'avantage de permettre des vols de longue durée qui pourraient dépendre uniquement de l'énergie solaire. Cependant, il faut également tenir compte du fait que la quantité d'énergie disponible et stockée sur un drone solaire dépend également de facteurs externes tels que :

- Paramètres géométriques.
- Période de l'année et période de la journée.
- Météo-humidité, nuages, température, ...
- Altitude de vol.
- Orientation du vol (inclinaison du panneau solaire).

### 1.10.3.1 Quelques exemples des drones solaires

Les drones de haute altitude et de longue endurance (HALE) et les drones éternels sont deux des applications commerciales les plus courantes des drones solaires pour plusieurs domaines tels que la surveillance, la communication et les applications militaires. Voici quelques exemples sur ces derniers :

- Le « Pathfinder Plus » est un HALE qui a été le premier drone solaire à hélice à atteindre une altitude de 80 210 pieds.

- « Helios » est un autre drone solaire HALE, conçu pour voler pendant 24h en stockant de l'énergie pour la nuit, développé par la NASA en 2001. Il a atteint l'altitude de 96 863 pieds, établissant ainsi un nouveau record d'altitude pour un vol en palier soutenu.

- Le « Pracha-35 » est un nouveau drone solaire HALE d'une altitude maximale possible de 70 000 pieds, développé par BAE Systems en collaboration avec Prismatic.

- « Solitaire », en 1994, a été construit avec des panneaux solaires réglables pour une absorption optimale du rayonnement solaire, destiné à fonctionner toute l'année à la latitude nord de l'Europe avec de l'énergie entièrement solaire.

- Le premier record éternel de vol d'un drone a été établi en 2005 par « SoLong », qui a volé pendant 24heures et 11 minutes au premier essai et 48 heures et 16 minutes à un autre essai, uniquement à l'aide de l'énergie solaire. « SoLong » était également alimenté par des cellules solaires monocristallines générant 225 W.

- « Zephyr », le drone solaire éternel qui a atteint la plus longue durée et la plus haute altitude, qui a été développé par Airbus Defense & Space [15]. en 2010, il a été développé avec du silicium amorphe avec un rendement de 19%. En 2018, il a pu rester en vol stationnaire pendant 25 jours lors de son premier vol.

Actuellement sur le marché, les drones solaires conçus pour la surveillance peuvent être achetés entre 10 000 dollars et 100 000 dollars et plus avec différentes spécifications.



Figure 1-25 : exemples de drones solaires [12].

### 1.10.4 L'évolution des drones solaires

Du premier drone solaire aux modèles actuellement développés, l'évolution des drones solaires dépend principalement de l'efficacité et du coût des cellules solaires. La figure 1.26 fournit une représentation graphique de l'évolution de l'efficacité des cellules solaires et du coût par watt au fil des années. Ces facteurs entraînent l'évolution des drones solaires en parallèle.

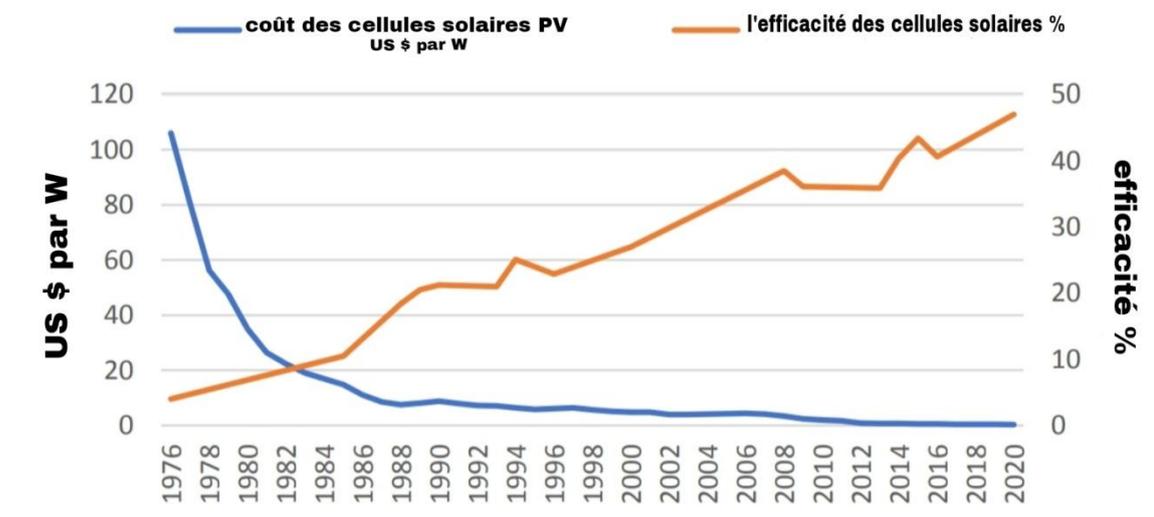


Figure 1-26: Evolution de l'efficacité des cellules solaires et du coût par watt [15].

Comme le montre la figure 1.26, bien qu'au cours de la dernière décennie, l'efficacité des cellules solaires ait augmenté avec la réduction des coûts, il n'y a pas eu un nombre considérable de recherches consacrées aux drones solaires.

Comme le montre la figure 1.27, ce n'est qu'après 2013 qu'il y a eu une augmentation des travaux publiés sur les drones solaires.

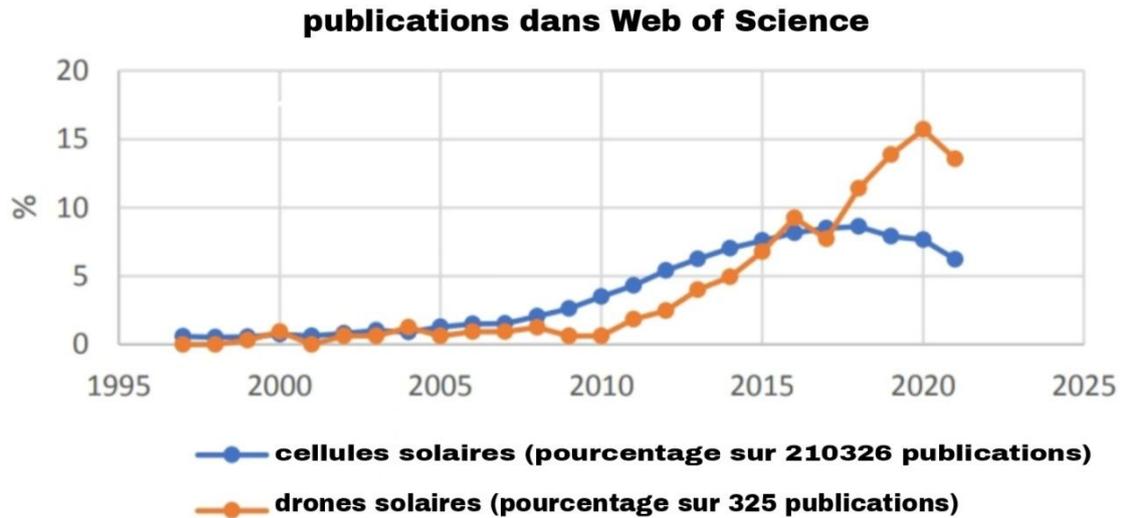


Figure 1-27: nombre d'articles publiés sur Web of Science au fil des années dans les domaines de recherche « UAV à énergie solaire » et « cellules solaires » [15].

Selon Business Insider Intelligence [16], le marché des drones atteindra 6.3 milliards de dollars d'ici à 2025. Les drones solaires modernes disponibles dans le commerce et dotés de spécifications améliorées, comme le « Zephyr » développé par Airbus, fournissent déjà des solutions retables à des marchés clés tels que la sécurité et la protection, la surveillance agricole, l'évaluation et la surveillance des catastrophes (surveillance des incendies de forêts), la surveillance de l'environnement, la protection des frontières et bien d'autres encore.

Les cellules solaires utilisées dans les UAV doivent non seulement avoir un meilleur rendement, mais aussi être plus légères, plus minces et plus flexibles. Les recherches futures visant à améliorer ces aspects devraient être étudiées.

Le choix idéal pour notre drone est d'utiliser des cellules solaires monocristallines car elles ont un rendement plus élevé et un poids plus léger par rapport aux autres types.

### 1.11 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des UAV, leur modélisation et l'intégration des cellules solaires.

# **Chapitre II**

## **Détection des objets par les CNN**

### 2. Introduction

L'Intelligence Artificielle s'appuie sur différentes techniques et méthodes, dont les réseaux de neurones artificiels, l'apprentissage automatique (Machine Learning), l'apprentissage profond (Deep Learning), la vision par ordinateur et bien d'autres.

Elle a connu une évolution rapide ces dernières années, on la voit s'infiltrer de plus en plus dans la vie quotidienne des usagers des appareils numériques, il n'y a presque plus aucun domaine où l'on ne peut pas la trouver, tels que la médecine, l'industrie, la finance, les transports, l'éducation et même les loisirs.

Dans ce chapitre, nous parlons sur la détection, la reconnaissance et la localisation d'objets, les algorithmes de détection, les réseaux de neurones artificiels et en particulier les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et leur architecture.

#### 2.1 Introduction à la détection d'objets

La détection d'objet est une branche de l'IA et de la vision par ordinateur qui vise à localiser et à identifier des objets spécifiques dans des images ou des vidéos. Son objectif principal est de permettre aux machines de reconnaître automatiquement et de manière précise la présence d'objets particuliers dans un environnement visuel.

Ces dernières années, elle trouve de nombreuses applications notamment dans la surveillance vidéo, la conduite autonome, l'analyse d'images médicales et l'analyse de scènes de drones.

Les modèles de détection d'objets sont généralement basés sur les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) qui sont capables d'apprendre à partir d'exemples annotés. Ils sont entraînés sur de vastes ensembles de données contenant des images étiquetées avec des informations sur l'emplacement des objets. Ces modèles apprennent à extraire les caractéristiques visuelles significatives d'une image et les utilisent pour prédire l'emplacement des objets recherchés dans une image.

##### 2.1.1 Reconnaissance d'objets

La reconnaissance d'objets est la technique d'identification de l'objet présent dans les images et les vidéos. C'est l'une des applications des plus importantes de l'apprentissage automatique (ML) et de l'apprentissage profond (DL). Elle est utilisée pour apprendre les machines à reconnaître le contenu d'une image comme le font l'être humain [20].

### 2.1.2 Classification d'images

La classification d'images est la tâche la plus fondamentale pour les CNN, elle permet de définir les objets dans une image. La classification d'images implique la création de modèles d'apprentissage automatique pour déterminer les différentes classes dans une image avec la probabilité que l'image appartienne à l'une de ces classes et si elle contient ou non un objet ou une anomalie [21].

### 2.1.3 Localisation d'objet

La localisation d'objet est une tâche cruciale dans le domaine de la vision par ordinateur et de l'IA. Elle fait référence à la capacité de détecter et de déterminer la position d'un objet spécifique dans une image [22].

### 2.1.4 Détection d'objets

La détection d'objets est une tâche importante d'identification et de localisation des objets spécifiques dans une image ou une séquence d'images.

L'une des approches de la détection d'objet la plus utilisée est « les CNN », qui sont des modèles d'apprentissage automatique capables d'apprendre des caractéristiques visuelles à partir des données d'entraînement et de les utiliser pour détecter et classer des objets [22].

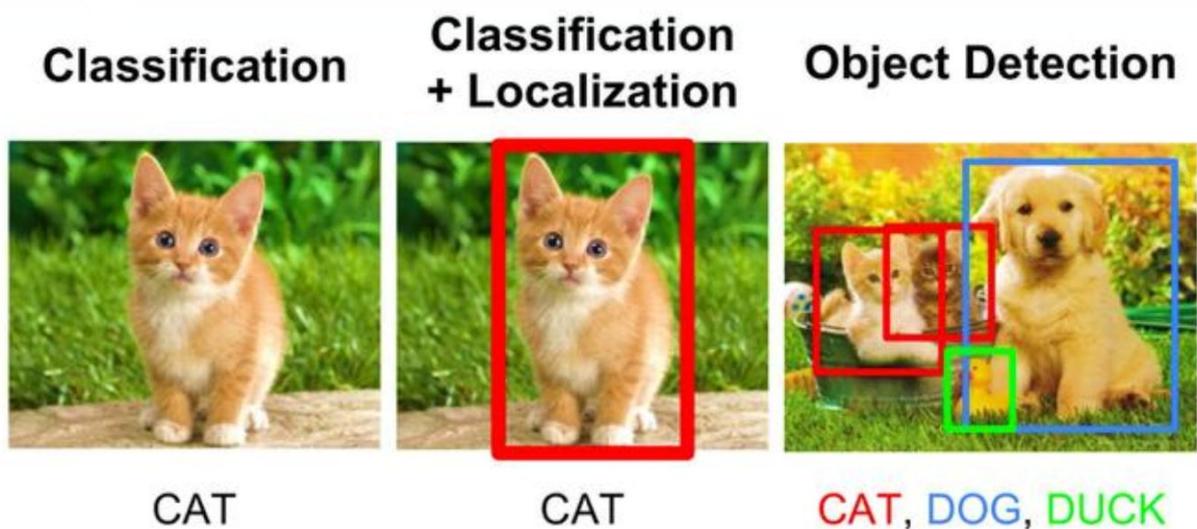


Figure 2-1: classification, localisation et détection d'objet [22].

### 2.1.5 Segmentation d'images

La segmentation d'images est une tâche de vision par ordinateur qui consiste à diviser une image en plusieurs régions où segments, dans le but de comprendre et d'analyser les différentes parties qui la composent.

Il existe différentes approches pour la segmentation d'images, notamment la segmentation basée sur la détection des contours, sur le seuillage et sur les régions [22].

Finalement, la reconnaissance d'objets fait référence à une suite de tâches de vision par ordinateur illustrés par la figure ci-dessous :

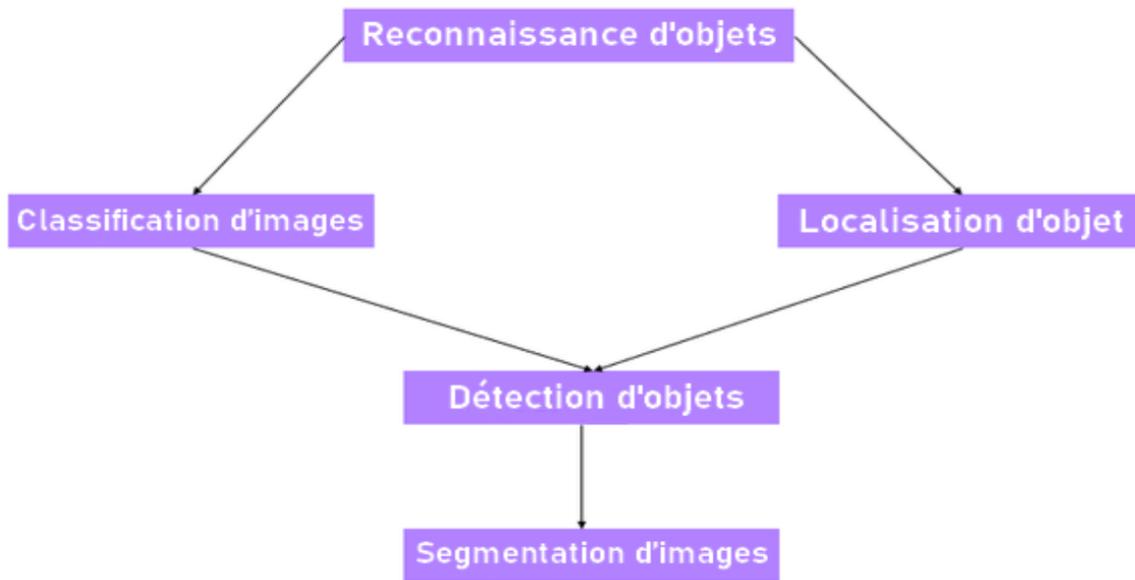


Figure 2-2: présentation des tâches de vision par ordinateur pour la reconnaissance d'objets [22].

### 2.2 Algorithmes de détection d'objets

Il existe plusieurs algorithmes de détection d'objets qui ont été développés au fil des années. Voici quelques-uns des plus populaires [23].

#### 2.2.1 R-CNN

Regions with Convolutional Neural Networks, cet algorithme utilise une approche en deux (2) étapes pour détecter les objets. D'abord, des régions d'intérêts sont générées à l'aide de techniques de recherche sélective, ensuite, ces régions sont classifiées et localisées à l'aide d'un CNN [24].

### 2.2.2 Fast R-CNN

C'est une amélioration de l'algorithme R-CNN qui combine la génération et la classification des régions d'intérêts en une seule étape. Il utilise un CNN pour extraire les caractéristiques de chaque région et effectuer la classification [25].

### 2.2.3 Faster R-CNN

C'est une évolution de l'algorithme Fast R-CNN, qui introduit un module RPN (Region Proposal Network) pour générer automatiquement les régions d'intérêts. Cela rend le processus de détection plus rapide et plus efficace [26].

### 2.2.4 YOLO

You Only Look Once, c'est un algorithme de détection d'objets en temps réel qui adopte une approche différente. Au lieu de générer des régions d'intérêts, YOLO divise l'image en une grille et prédire les boîtes englobantes et les classes des objets directement à partir de cette grille [23].

## 2.2 Les réseaux de neurones artificiels

Un réseau neuronal se compose de groupes de neurones créés artificiellement, appelés couches. Un réseau neuronal artificiel se compose d'une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et d'une couche de sortie, comme le montre la figure ci-dessous.

Chaque couche se compose d'un certain nombre de neurones artificiels, et le flux d'informations entre les neurones est indiqué par les lignes noires.

La première couche de la figure est la couche d'entrée, elle est considérée passive, car elle ne modifie pas les données, ces neurones reçoivent des valeurs sur leur canal d'entrée et transmettent ces informations à leurs connexions individuelles.

Contrairement à la couche d'entrée, les couches cachées sont des couches actives, donc elles peuvent modifier les données entrantes. Dans la figure, chaque valeur est envoyée à tous les neurones cachés (représentés par les flèches), ce qu'on appelle une structure entièrement interconnectée. Le nombre de couches cachées diffère pour chaque réseau et dépend de problème à résoudre.

Les couches cachées peuvent utiliser différents types de fonctions de transfert, telle que ReLu et Sigmoid.

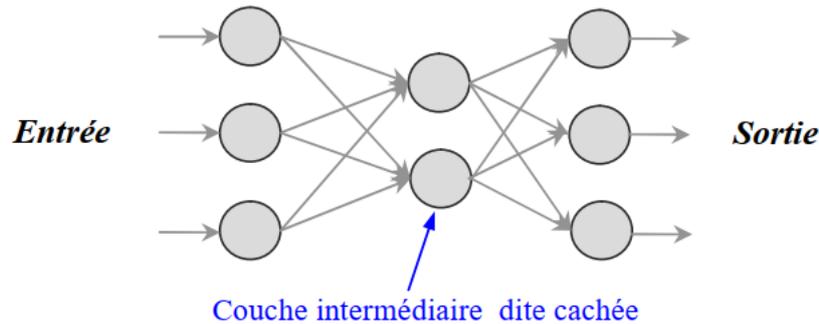


Figure 2-3: un exemple d'un réseau neuronal à trois couches, composé d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie [23].

### 2.3 Les réseaux de neurones convolutionnels (CNN)

Un réseau neuronal convolutif s'inspire de la nature, car la connectivité entre les neurones artificiels ressemble à l'organisation du cortex visuel animal. La reconnaissance d'image est l'une des principaux usages de ces réseaux, car ils apprennent plus rapidement et ont un meilleur taux d'erreurs.

#### 2.4.1 L'architecture des CNN

Les CNN représentent une subdivision spécifique des réseaux de neurones et sont considérés comme l'un des modèles de classification d'images les plus performants à ce jour. Leur mode de fonctionnement est simple : on fournit une image sous la forme d'une matrice de pixels comme entrée, cette dernière se dispose en 03 dimensions :

-2D pour une image en niveau de gris.

-Une 3ème dimension, de profondeur 3 pour représenter les couleurs fondamentales (Rouge, Vert, Bleu).

L'architecture du CNN contient une partie convolutive et une partie classification.

L'objectif de la partie convolutive est d'extraire des caractéristiques propres à chaque image en les compressant de façon à réduire leur taille initiale. Donc, l'image d'entrée passe à travers une succession de filtres, créant de nouvelles images appelées « cartes de convolution », ces dernières sont concaténées dans un vecteur de caractéristiques appelé « code CNN ».

Le code CNN obtenu en sortie est fourni en entrée dans la partie de classification, constituée de couches entièrement connectées, afin de combiner les caractéristiques du code CNN pour classer l'image.

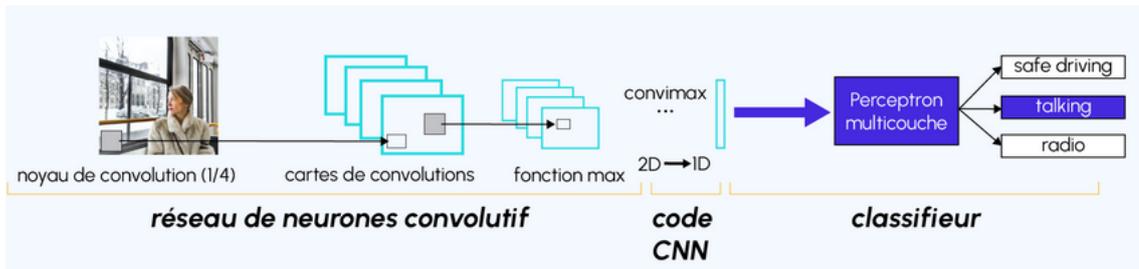


Figure 2-4: schéma représentant l'architecture d'un CNN [23].

### 2.4.2 A quoi sert la convolution ?

La convolution est une opération mathématique simple utilisée pour le traitement et la reconnaissance d'image, elle agit comme un filtrage. On définit la taille de la fenêtre de filtre positionnée tout en haut à gauche de l'image qui va se balader à travers toute l'image est décaler d'un certain nombre de cases définit par « le pas » jusqu'à arriver au bout de l'image. Un calcul de convolution va effectuer à chaque portion d'image pour obtenir en sortie une carte d'activation.

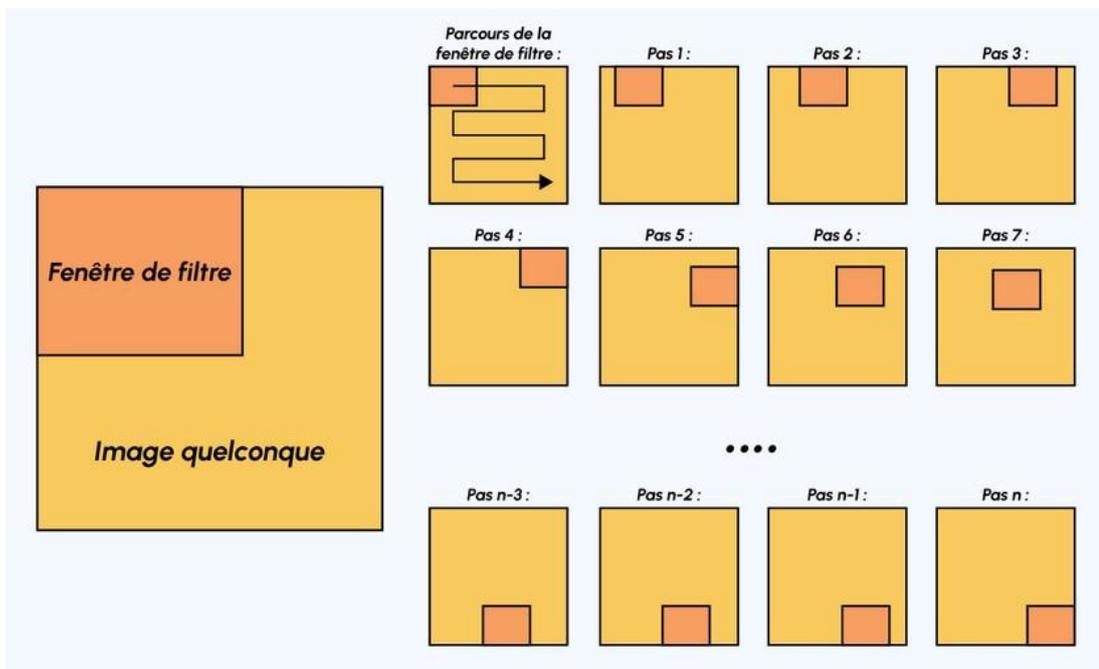


Figure 2-5: le parcours de la fenêtre de filtre sur l'image [16].

### 2.4.3 Le Max-Pooling

Le Max-Pooling est une méthode de discrétisation basée sur des échantillons. Son objectif est de réduire la dimension de l'image d'entrée et le coût de calcul, il choisit la valeur maximale de la région balayée.

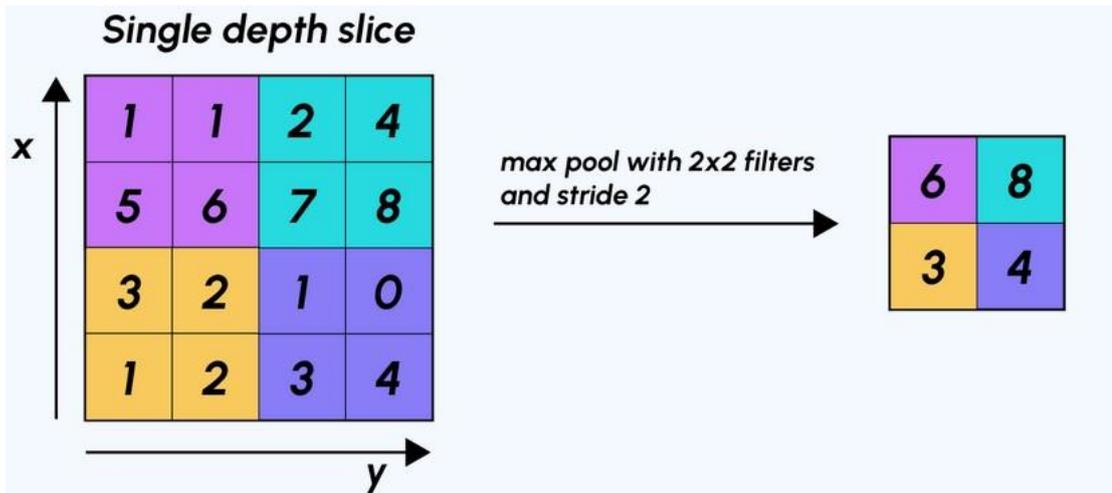


Figure 2-6 : Le processus de Max-Pooling [16].

Généralement, un CNN est formé de plusieurs couches de convolution et de pooling, suivies par une couche Fully-Connected :

- 1- **Couche de convolution (CONV)** : son rôle est d'analyser les images fournies en entrée.
- 2- **Couche de pooling (POOL)** : c'est une opération appliquée entre deux (02) couches de convolution, son rôle est de réduire la taille des images en préservant leurs caractéristiques essentielles.
- 3- **Couche Fully-Connected (FC)** : elle est placée à la fin d'architecture de CNN et elle est entièrement connectée à tous les neurones de sortie. Elle reçoit un vecteur en entrée pour classifier l'image et renvoie un nouveau vecteur en sortie de taille correspondante au nombre de classes.

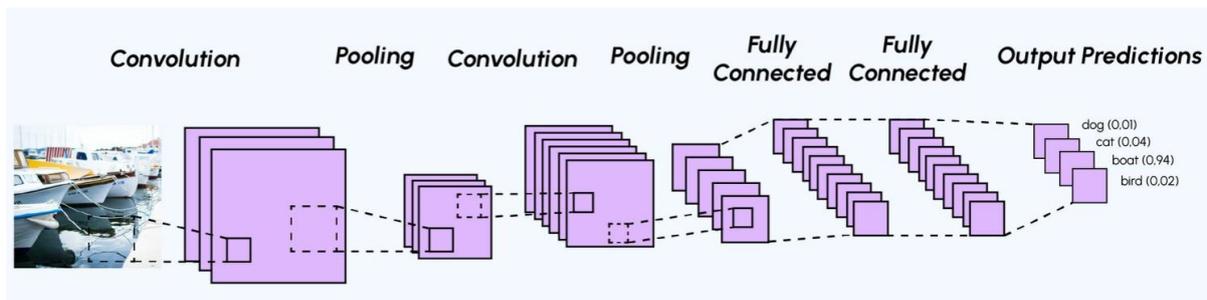


Figure 2-7: Exemple d'architecture d'un CNN [16].

#### 2.4.4 Pourquoi les CNN ?

Par rapport aux réseaux neuronaux traditionnels, les CNN offrent plusieurs avantages pour les tâches de traitement d'images, leur architecture unique permet d'extraire les caractéristiques des images, d'apprendre les relations entre les pixels et de réduire le nombre de paramètres nécessaires pour modéliser les données.

### **2.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons parlé des étapes de détection d'objets, des réseaux de neurones convolutionnels et enfin pourquoi on les a choisis.

# **Chapitre III**

## **Téledétection des fuites de pipelines**

### **3. Introduction**

Les inspecteurs sur le terrain ont l'habitude de trouver des difficultés pour détecter les problèmes des pipelines en temps réel et de les traiter rapidement.

Ces dernières années, et avec l'évolution de la technologie, les entreprises veulent intégrer cette dernière pour minimiser les incidents, assurer la sécurité de leurs travailleurs et améliorer le rendement.

Dans ce chapitre, on va parler sur les drones et leurs avantages pour l'inspection et la télédétection des fuites dans les pipelines et les types des capteurs utilisés pour ce cas.

#### **3.1. Les drones pour l'inspection**

Pour révolutionner les routines des procédures de cartographie, de contrôle, d'inspection et de surveillance de l'industrie pétrolière et gazière, la technologie des UAV offre un grand potentiel en fournissant un moyen plus rapide, plus sûr et plus rentable de collecte de données afin d'augmenter l'efficacité opérationnelle.

Les drones sont devenus la prochaine perturbation majeure à influencer l'industrie pétrolière et gazière en fournissant toutes sortes de services dont l'industrie a besoin, tels que la surveillance des pipelines et des infrastructures, la détection des fuites et des fissures et la surveillance de l'environnement environnant les oléoducs et les gazoducs.

Tous les secteurs de l'industrie pétrolière et gazière, de l'amont à l'aval, auraient besoin et devraient adopter cette technologie émergente [27].

#### **3.2. Les avantages**

Les drones offrent aux entreprises pétrolières et gazières de nombreux avantages, y compris :

- Une économie de coûts.
- Un environnement de travail plus sécurisé.
- Des données plus précises et sûres.

L'inspection avec un drone coûte beaucoup moins cher que les méthodes traditionnelles qui nécessitent un équipage au sol ou des vols.

La technologie UAV augmente l'agilité, la résolution et l'efficacité de la collecte de données. Grâce aux drones, les entreprises n'ont plus besoin d'envoyer des équipages dans des régions éloignées pour l'inspection ; peuvent maintenant résoudre les problèmes à distance.

Les UAV ne transportent pas de passagers et, par conséquent, la probabilité de blessures et de décès après un accident est considérablement réduite par rapport à celle de l'aviation générale.

### **3.3. Télédétection par drone**

Pour caractériser une cible en temps réel, de jour comme de nuit, une plateforme polyvalente et flexible qui peut être équipée de tout type de capteurs (actif ou passif) a été offert par les drones qui ne sont pas obstrués par les nuages et restent disponibles à tout moment pour la surveillance grâce à leur fonctionnement à basse altitude (c.à.d. <120m), donc sa flexibilité dans cette altitude de vol permet d'ajuster la résolution de l'imagerie sur mesure.

Une variété de capteurs portables peut être équipée sur l'UAV pour atteindre l'objectif de la mission. Ci-dessous, un bref aperçu des capteurs couramment utilisés dans la télédétection pétrolière et gazière.

### **3.4. Capteurs de drone**

Il existe un nombre impressionnant de capteurs commerciaux spécialement conçus pour les drones, allant de la photographie haute résolution et des caméras infrarouges thermiques (IR) aux systèmes d'imagerie hyper spectrale, et les détecteurs de gaz [28].

Ci-dessous, un aperçu rapide est donné sur les capteurs passifs et actifs spécialisés prêts à l'emploi qui sont actuellement disponibles pour les plateformes de drones.

#### **3.4.1 Capteurs passifs**

Les capteurs passifs mesurent le rayonnement naturel qui est réfléchi ou émis par les matériaux cibles. Les capteurs passifs les plus utilisés à bord des drones sont les caméras numériques à lumière visible.

La variété de caméras proposées pour les drones augmentera à mesure l'évolution du marché.

La sélection du bon modèle de caméra dépend de plusieurs facteurs, notamment le domaine d'application, le budget, le poids, ...etc.

Par exemple, une caméra haute résolution, avec une grande taille de capteur et une vitesse d'obturation rapide, est utilisée pour l'arpentage, alors que pour les inspections, une résolution plus élevée est nécessaire.

La taille du capteur détermine la résolution spatiale de la caméra. Les capteurs plus grands fournissent une bande d'imagerie plus large et une couverture surfacique plus large en un seul passage.

## Chapitre III. Télédétection des fuites de pipelines

Les caméras montées sur UAV doivent avoir une résolution de plus de 10 mégapixels (Mp).



Figure 3-1: exemple des caméras d'imagerie pour drones [28].

### 3.4.1.2 Caméra thermique infrarouge

Les caméras infrarouges thermiques enregistrent les rayonnements infrarouges à ondes longues (LWIR) entre 7.5 à 14  $\mu m$  et les transforment en images/vidéos à température calibrée.

Un drone équipé d'une caméra infrarouge fournit un moyen supplémentaire d'inspecter les pipelines, car cette dernière donne une imagerie thermique qui identifie la zone exacte où se trouvent les défauts et les fuites invisibles à l'œil humain.

Tableau 3-1 : caméras infrarouges thermiques courantes pour drone [28].

Fabricant	Capteur	Résolution (px)	Plage de température (°C)	Sensibilité (mK)	Poids (g)
Technologie DRS	Tamaris	640 × 480	-40-80	50	90
FLIR	Quark 640	640 × 512	-40-160	50	23
	lepton	80 × 60	-40-80	<50	0.55
	VUE Pro	640 × 512	-25-350	?	113
Optris	PI 450	382 × 288	-20-900	40	320
Polaris	Pyxis (polarimétrique)	640 × 512	0-45	<70	<140
PRLOG	CEIL-R	640 × 480	-40-75	<50	<380
Fonctionne bien	WIRIS	640 × 512	-25-150	30	390
Yuneec	CGOETUS	160 × 120	-10-180	<50	278

Un autre groupe de caméras infrarouges thermiques spécialisées, qui se composent d'un réseau de détecteurs infrarouges à moyennes ondes (MWIR) entre 3 à 5  $\mu m$  et qui fournissent une image complète de la cible scannée, mesure une bande spectrale très étroite correspondant aux caractéristiques d'absorption diagnostiques d'un composé gazeux.

Dans l'image donnée, les fuites de gaz sont visualisées par des changements dans l'intensité du rayonnement détecté.

Récemment, une nouvelle génération de caméras d'imagerie de gaz miniaturisées et avec des technologies plus avancées, est conçue pour s'intégrer aux plates-formes de drones. Ces caméras thermographiques sont capables de détecter des hydrocarbures légers à très faibles concentrations.



Figure 3-2: exemples de capteurs d'imagerie thermographiques [28].

### 3.4.2 Capteurs actifs

Les capteurs actifs sont ceux qui ont leur propre source de lumière ou d'éclairage. Ils pèsent plus lourd que les systèmes passifs car ils nécessitent une alimentation électrique pour émettre le signal. Pour cela ils ne sont pas polyvalents pour l'intégration avec les drones [28].

Les capteurs actifs actuellement disponibles pour les drones comprennent le fluorocapteur laser, les détecteurs de gaz laser, le Lidar (détection et télémétrie par imagerie laser) et le radar à synthèse d'ouverture (SAR) [29].

#### 3.4.2.1 Le Lidar

Un UAV Lidar nécessite de fixer un scanner laser, avec une lumière ultraviolette, visible ou proche infrarouge, sur un drone pour qu'il mesure les distances jusqu'à une cible en éclairant un laser pulsé et en analysant le temps de réflexion.

Pour calculer des informations tridimensionnelles sur la forme du paysage sous le véhicule, une combinaison entre les différences de temps et d'autres données enregistrées par la plateforme est utilisée.

Tableau 3-2: exemples de capteurs Lidar commerciaux pour UAV [28].

Fabricant	Capteur	Fréquence de mesure/sec ( $\times 1000$ )	Précision (cm)	Poids (g)
Géodésie	Géo-MMS	?	5	1620
Leddartech	Vu8	?	5	128
LidarEtat-Unis	Snoopy série A	700	2	2500
Phénix	Mini RANGER	100	0.15	3500
Riegl	VUX -1UAV	500	0.1	3500
Vélodyne	Rondelle	700	2	2000
	VDL -32 E	300	2	830
YellowScan	VLP-16	100	5	3000
	Arpenteur Vx	300	5	1500

### 3.4.2.2 Les détecteurs de gaz laser

Les détecteurs de gaz laser, pour détecter les traces de gaz dans l'atmosphère, ils adhèrent aux principes de la « spectroscopie d'absorption laser ».

Dans le cas du méthane, le faisceau laser est réglé pour balayer les caractéristiques de la fonction d'absorption du méthane à  $1,653 \mu m$ . Le faisceau diffusé réfléchi par la cible est ensuite reçu et l'absorptivité du faisceau est mesurée, qui est ensuite calculée en densité de colonne de méthane.

Il existe de nombreux types de systèmes de détection laser disponibles sur le marché. Les exemples sont l'absorption laser à diode accordable, le lidar à absorption différentielle et les lasers à cascade quantique, ...etc.

Les capteurs laser à cascade quantique utilisent les absorptions du méthane dans les longueurs d'onde MWIR ( $3,3 \mu m$ ) ou LWIR ( $7,7 \mu m$ ), offrant ainsi une alternative très sensible pour la télédétection du méthane (et des gaz traces).

Plusieurs caractéristiques peuvent être répertoriées pour les détecteurs de gaz laser, telles que la plage de longueurs d'onde du détecteur, les composées cibles, la limite/distance de détection (longueur du trajet optique), la fréquence (impulsion/s) et le poids.

### 3.4.2.3 Le fluorocapteur laser

L'autre capteur est le fluorocapteur laser. Ces capteurs sont basés sur le principe que les composés aromatiques du pétrole interagissent avec la lumière ultraviolette et absorbent l'énergie, puis libèrent l'énergie supplémentaire sous forme d'émission de fluorescence visible. En mesurant à la fois les spectres et le taux de décroissance de la fluorescence, le système peut non seulement détecter la présence de pétrole, mais également identifier le type de pétrole ciblé (c.à.d. léger, lourd, moyen) [29].

Ces capteurs utilisent généralement un laser UV fonctionnant entre 308 et 355 *nm* comme source d'excitation [29].

Actuellement, il n'y a qu'un petit nombre de commerces lasers aéroportés commerciaux fluorocapteurs en fonctionnement de routine parmi lesquels un seul système (c.à.d. Blue Hawk) est équipé de drones. Les limitations de puissance du laser et de la charge utile du capteur sont parmi les principaux obstacles à l'intégration de ces systèmes dans les drones. Les capteurs lidar actifs dans les gammes visible et proche infrarouge se sont également révélés prometteurs pour la détection d'hydrocarbures ; même si, à notre connaissance, de tels systèmes n'ont pas encore été intégrés dans les drones.

### 3.4.2.4 Le SAR

Le SAR est un autre capteur actif largement utilisé pour la détection des déversements d'hydrocarbures et des infiltrations au large des plates-formes satellites. La présence du pétrole sur l'eau est connue pour amortir les ondes capillaires par diffusion de Bragg, diminuant la rétrodiffusion radar. Par conséquent, les nappes de pétrole apparaissent plus sombres sur les images SAR. Aujourd'hui, des systèmes UAV-SAR existent (figure 3.4) ; cependant, ils sont généralement trop lourds pour être supportés par de petits UAV. L'application de l'UAV-SAR à la détection des déversements d'hydrocarbures n'a pas encore été démontrée dans des études en conditions réelles.

Il est nécessaire de souligner que le choix d'un capteur particulier est régi par plusieurs facteurs, notamment la composition de la cible (pétrole vs gaz), sa plage de quantité/concentration, son étendue spatiale, le milieu de fond (sol vs eau), le temps de travail (jour vs nuit), l'environnement d'exploitation (météo, température, vent, ...etc.), le scénario de mesure (ponctuel vs surfacique), et surtout, la spécificité du véhicule considéré, notamment sa capacité de charge utile.



Figure 3-3: un exemple d'UAV-SAR équipé d'antennes en bandes P.C et L [29].

### **3.5. Détection des fuites de pétrole et de gaz et surveillance des pipelines**

Les pipelines de pétrole et de gaz consistent en un réseau de plus de 3 millions de Km autour du globe. la défaillance de l'intégrité du pipeline est assez courante, causant des décès et des dommages environnementaux massifs. En Algérie, par exemple, 13.5 milliards de m<sup>3</sup> de gaz naturel sont gaspillé chaque année. Avec l'expansion continue des réseaux mondiaux, une forte demande de systèmes de surveillance continue existe pour améliorer la sécurité et l'intégrité des pipelines.

Actuellement, les drones apparaissent comme des outils très efficaces pour faire face au besoin de surveillance des pipelines grâce à la technologie avancée à bord.

### **3.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité les défis de l'industrie pétrolière et gazière et on a proposé une solution basée sur les drones équipés de plusieurs capteurs avancés dans le but de détecter les fuites et les fissures des pipelines en temps réel.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et résultats**

## 4. Introduction

Dans ce chapitre, le modèle dynamique sera commandé premièrement en boucle ouverte et ensuite en boucle fermée pour assurer la stabilité et le guidage du drone en utilisant le régulateur de stabilité LQR et la commande PID.

Pour la simulation, on a utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK afin de voir l'évolution des résultats dans plusieurs cas.

Dans notre étude, on a choisi un modèle de drone à aile fixe appelé ZAGI (Annexe A).

### 4.1. Stratégie de travail

Pour étudier la stabilité et le guidage du drone ZAGI, tout d'abord, on a défini tous les paramètres du modèle telles que la masse, la corde, l'envergure, la position du centre de gravité, etc. Puis on a passé par les étapes suivantes :

#### 4.1.1 La dynamique en boucle ouverte

On a testé le système non linéaire en absence de régulateur de stabilité. La figure suivante représente le bloc SIMULINK utilisé :

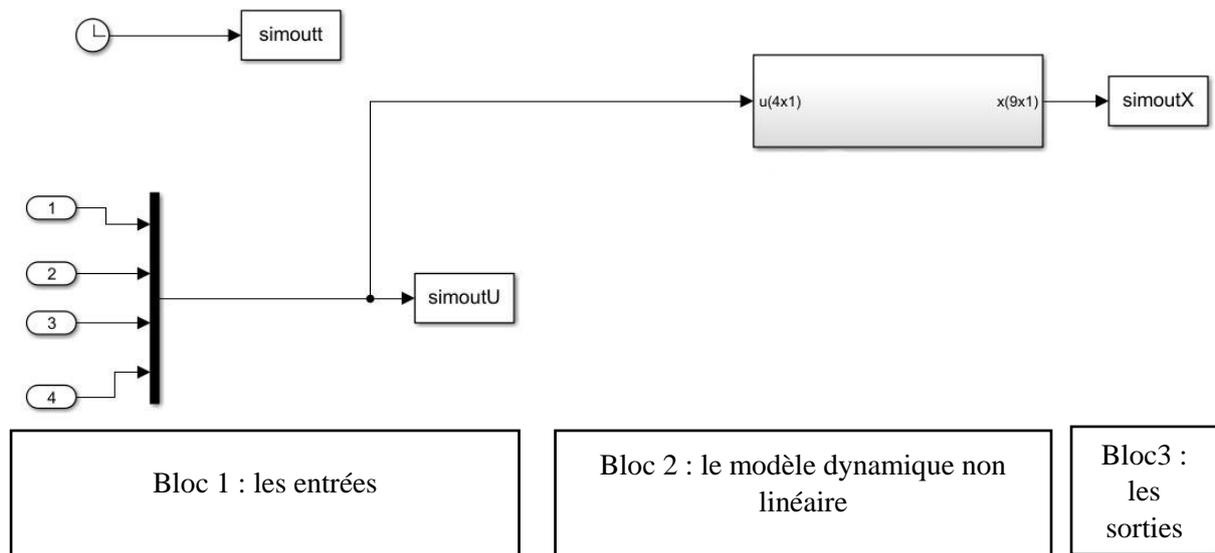


Figure 4-1: le bloc SIMULINK de la boucle ouverte.

On a donné une vitesse  $u=10\text{m/s}$ ,  $v=0\text{m/s}$ ,  $w=0\text{m/s}$  et avec un angle  $\theta=10^\circ$ , et on a obtenu les résultats suivants :

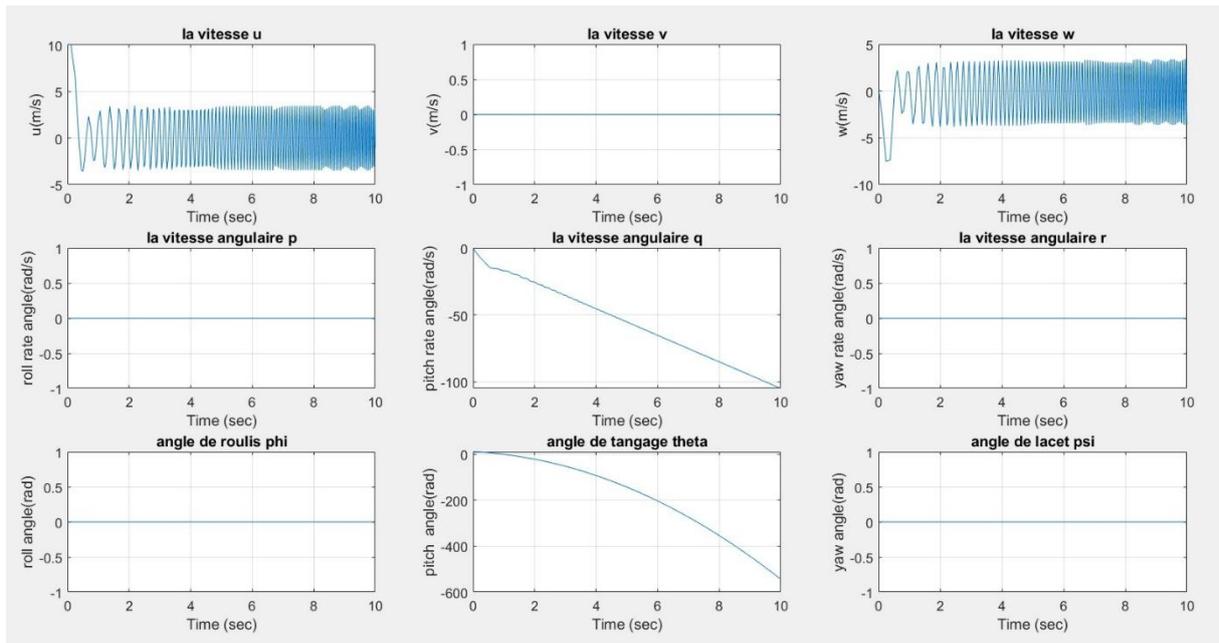


Figure 4-2 : Les résultats en boucle ouverte.

Ces résultats représentent la réaction du système en boucle ouverte, on voit la présence des oscillations (des perturbations) au niveau des graphes de vitesse et une pique vers le bas au niveau de l'angle de tangage. C'est un comportement naturel en absence des commandes qu'il faut l'attendre, car il ne va pas garder la vitesse qu'on a lui donné jusqu'à l'infinie.

Dans l'étape suivante, on va s'intéresser d'enlever toutes les vibrations pour que le système devienne stable.

Tout d'abord, on va étudier le modèle linéaire en boucle ouverte avec le schéma bloc SIMULINK suivant :

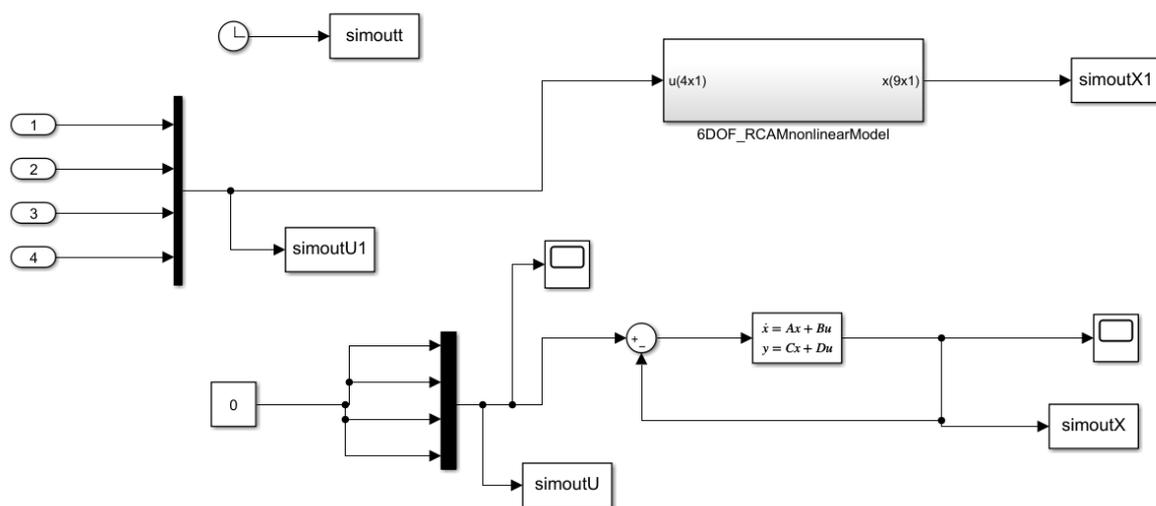


Figure 4-3 : le schéma bloc SIMULINK du modèle linéaire.

Pour le test de ce bloc, on est obligé de calculer les matrices d'état à partir du système non linéaire pour garder les mêmes caractéristiques du ZAGI et les appliquer sur ce bloc avec la fonction :

```
[A,B,C,D]=linmod('ZAGISIM',X0,u)
```

On obtient les résultats suivants :

```
A=[-0.5919      0    -0.5598      0      0      0      0      0      8.2313      0
      0    -1.6838      0      0      0    -10.0000    -8.2313      0      0
      0.0597      0    -3.7990      0    10.0000      0      0      5.3368      0
      0    -4.7579      0   -11.0201      0      5.1032      0      0      0
     -6.8881      0    -2.0747      0      0      0      0      0      0
      0      2.4287      0      1.2359      0    -7.7522      0      0      0
      0      0      0      1.0000      0      0.6484      0      0      0
      0      0      0      0      1.0000      0      0      0      0
      0      0      0      0      0    -1.1918      0      0      0];
```

```
B=[0      0      0    10.2106
      0      0      0      2.5257      0
      0      0      0      0      0
     -18.1794      0      7.5672      0
      0      0      0      0      0
      0.1593      0    -13.3895      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0
      0      0      0      0      0];
```

```
C=eye(9);
D=zeros(9,4);
```

### 4.1.2 La stabilité du système

**Le régulateur LQR :** il est utilisé pour définir un contrôleur qui ajuste les commandes du drone afin de maintenir sa stabilité et de répondre aux objectifs de vol souhaités. Pour appliquer le régulateur LQR à un drone, il est nécessaire de modéliser mathématiquement le comportement du drone et d'identifier les variables d'état applicables à contrôler. Ensuite, en utilisant la dynamique du drone et les spécifications de performances requises, on peut calculer les gains optimaux du régulateur LQR.

Dans cette étape, on a utilisé le régulateur LQR pour assurer la stabilité du système linéaire utilisé dernièrement.

Pour cela, on a calculé le gain de régulateur par la commande suivante :

```
%design LQR
N=0;
Q=eye(9)*3;
R=eye(4);
[Kc,sc,ec]=lqr(A,B,Q,R,N)
```

On obtient le résultat suivant :

$$K_c = \begin{bmatrix} 0 & 0.3861 & 0 & -0.8187 & -0 & -0.4048 & -5.5175 & -0 & -2.9185 & 0 & 0.9612 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0 & 0.7365 & -0 & -0.0194 & 0 & -0.9589 & -1.6619 & 0 & -0.1491 & -0 & 0.2760 & -0 \\ 1.9781 & -0 & -0.0069 & -0 & -2.3237 & 0 & -0 & -5.7310 & -0 & -0.5746 & 0 & 0.8184 \end{bmatrix};$$

On ajoute le gain de régulateur  $K_c$  dans le schéma précédent.

Voici le bloc SIMULINK.

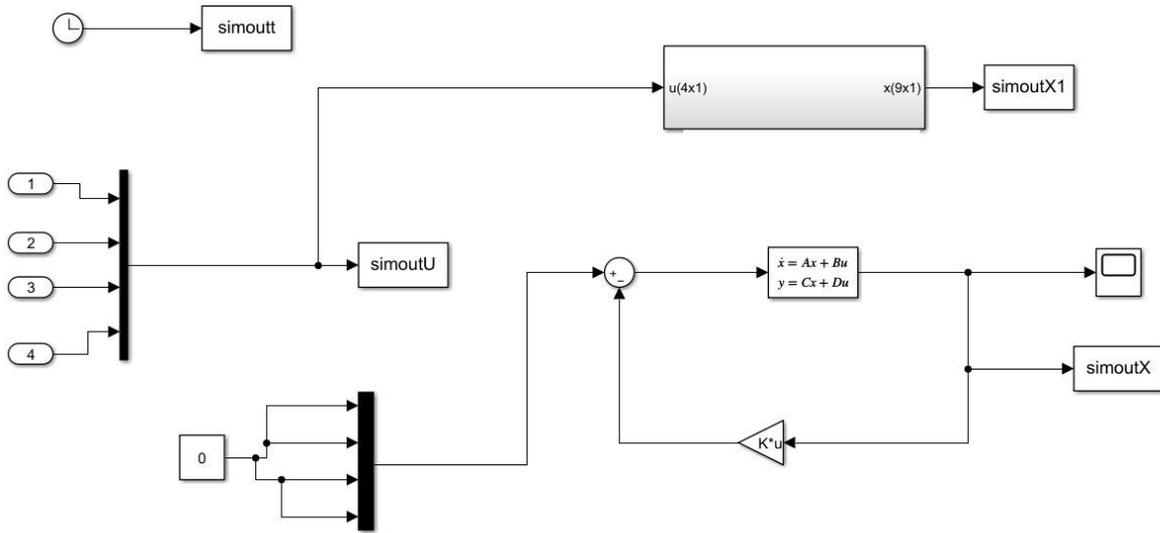


Figure 4-4 : le schéma SIMULINK avec LQR.

Lors de l'utilisation de régulateur LQR, il faut que le système soit linéaire, dans notre cas, on a calculé les matrices d'état ainsi que les gains et on a obtenu les résultats suivants :

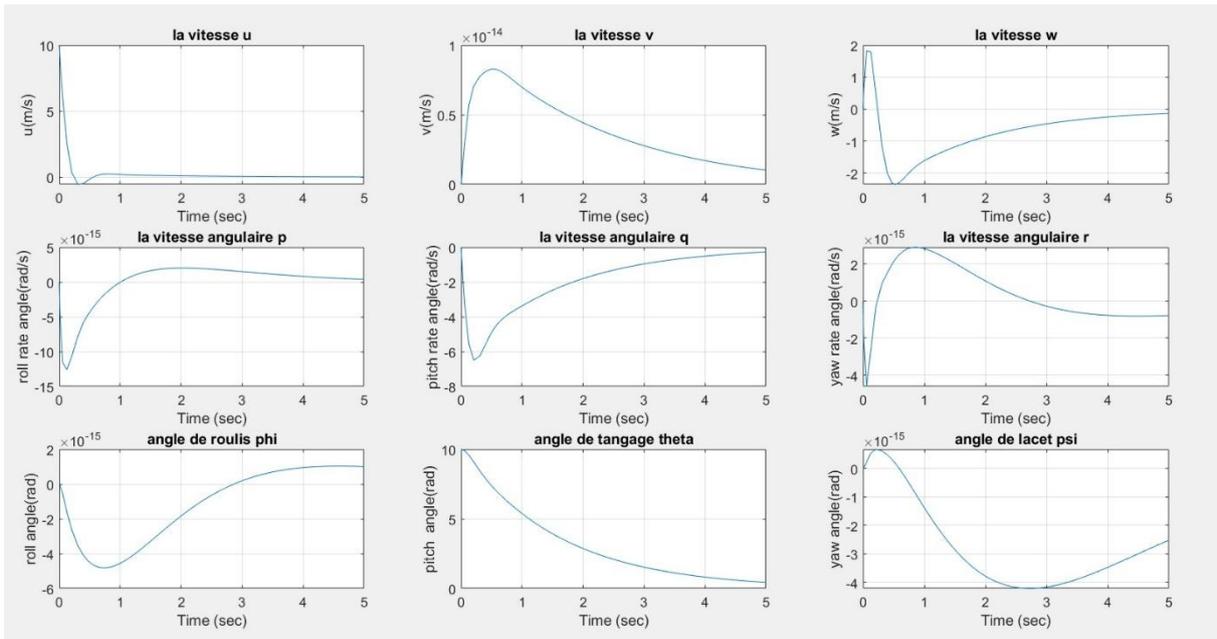


Figure 4-5 : les résultats lors de l'utilisation de LQR.

On remarque l'absence d'oscillations et que le système tend vers une valeur constante, c.à.d. que le régulateur utilisé est une solution efficace pour la stabilité. Un résultat plus précis est montré dans la figure ci-dessous :

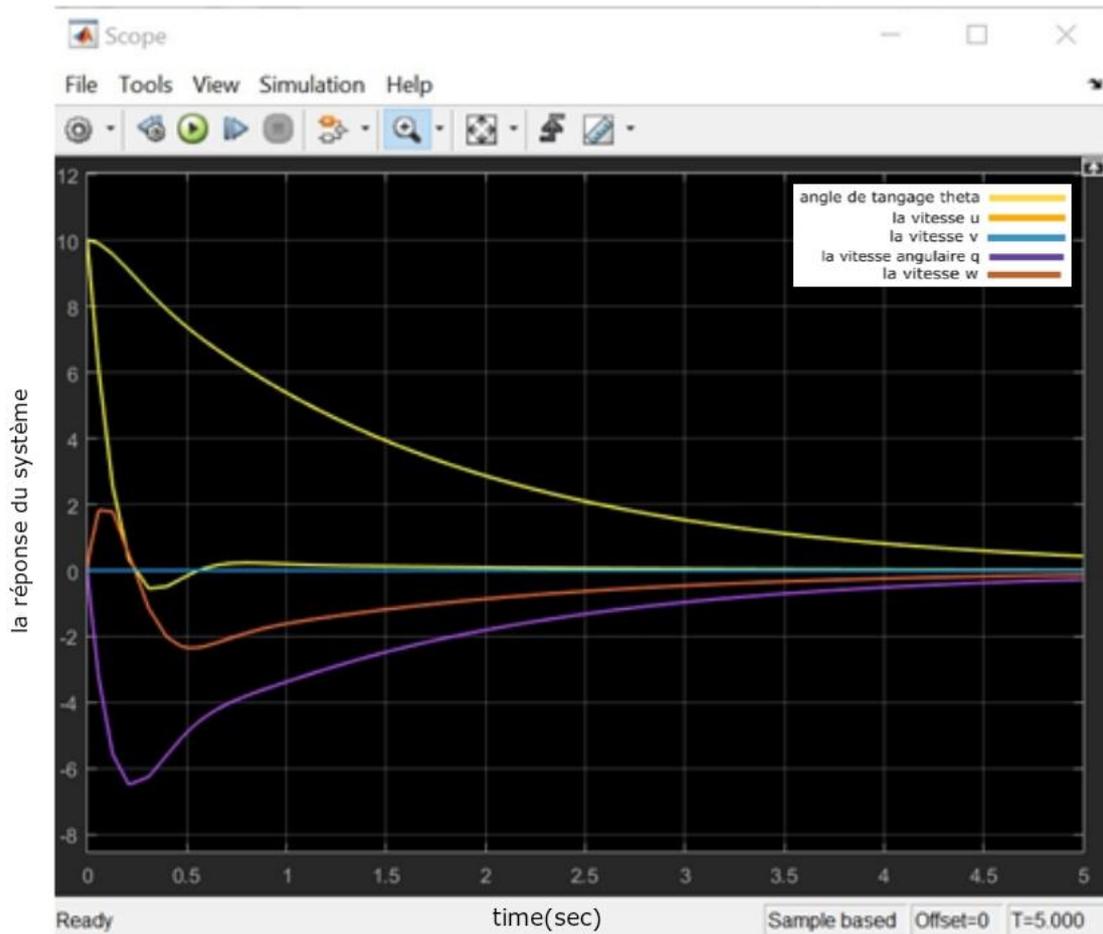


Figure 4-6 : les résultats de stabilité.

### 4.1.3 La dynamique en boucle fermée

**La commande PID :** c'est une méthode utilisée pour le guidage de drone, elle permet de réguler les mouvements du drone en ajustant en temps réel les commandes de control pour maintenir la trajectoire requise.

Dans notre cas, on va étudier le maintien de cap et d'altitude.

**1- Le maintien de cap :** c'est la capacité du drone à maintenir une direction constante, c.à.d. le drone a sa propre orientation et on lui donne une orientation désirée qui doit la suivre pour assurer le guidage vers cette direction souhaitée.

Voici le bloc SIMULINK qu'on a utilisé :

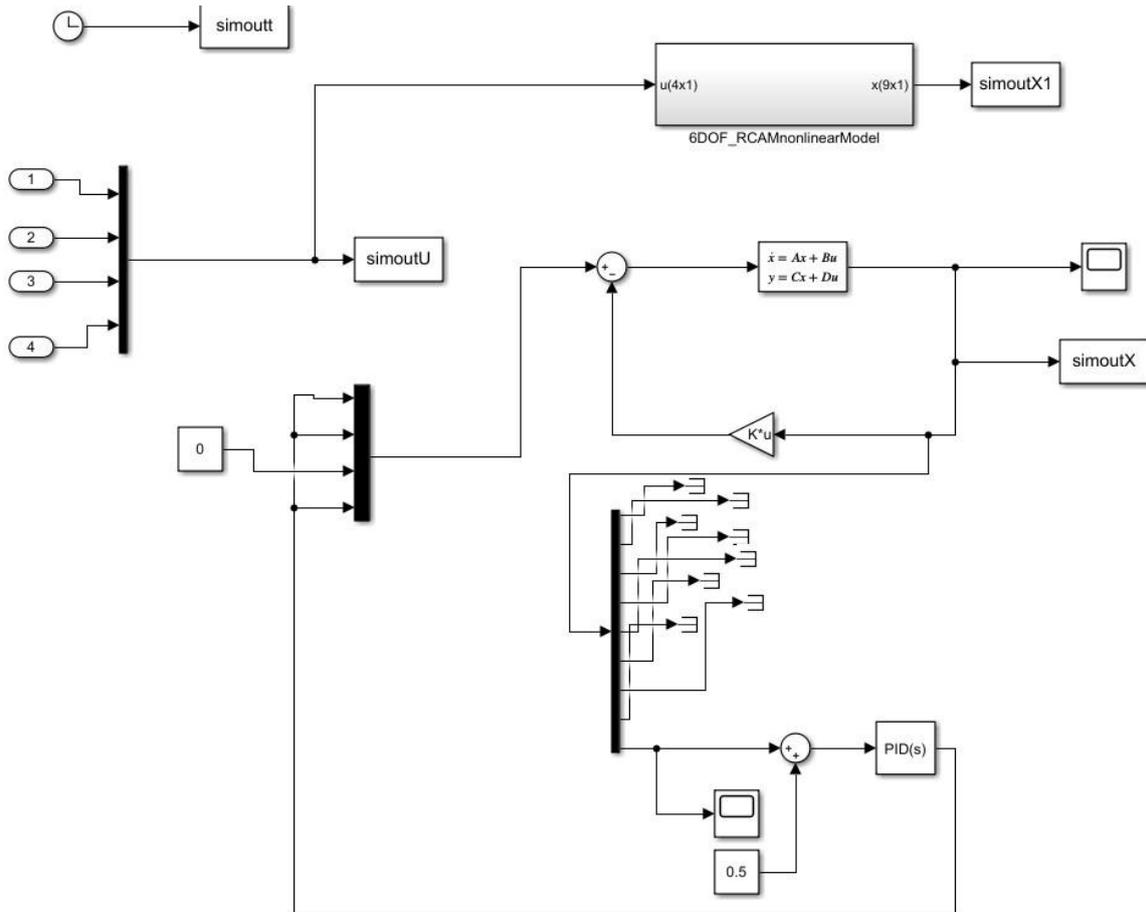


Figure 4-7 : Le schéma SIMULINK pour le maintien de cap.

D’abord, on a donné une valeur désirée de  $0.5^\circ$  pour l’orientation de cap vers la gauche, puis on l’a comparé avec la valeur actuelle, la sortie de ces dernières devienne l’entrée du PID, ensuite, on a ajouté le bloc tuning pour assurer le bon fonctionnement et la stabilité des systèmes de contrôle. Enfin, on a obtenu le résultat suivant :

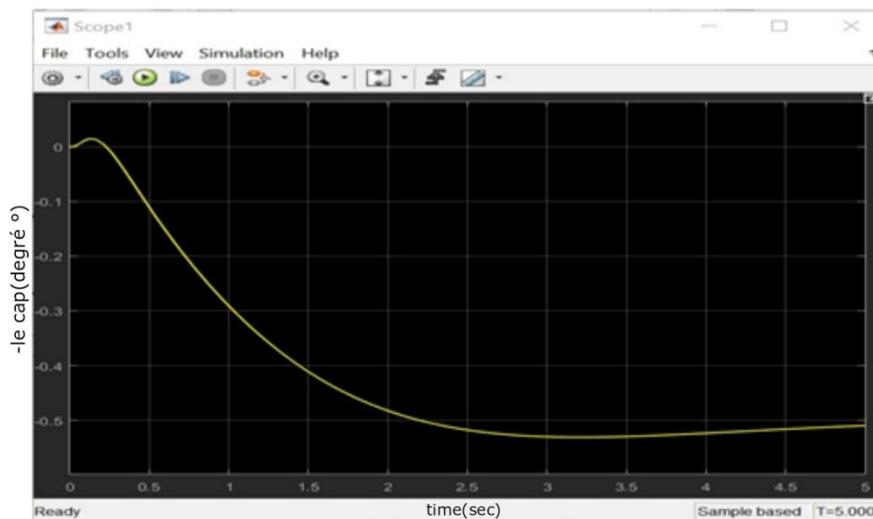


Figure 4-8 : le résultat de maintien de cap en boucle fermée.

On remarque que le système suit l'orientation souhaitée vers la gauche.

**2- Le maintien d'altitude :** c'est la capacité du drone à maintenir une hauteur constante par rapport au sol ou à une référence donnée.

Dans notre premier modèle en boucle ouverte, on a déjà neuf (9) états en sortie  $[u, v, w, p, q, r, \phi, \theta, \psi]$ , mais on n'a pas le paramètre d'altitude  $h$ , pour cela on a refait un autre schéma en boucle ouverte pour obtenir la position  $[P_N, P_E, h]$  en intégrant les vitesses  $[V_N, V_E, V_D]$  avec un passage du repère mobile vers le repère de navigation.

Le schéma suivant résume ces étapes :

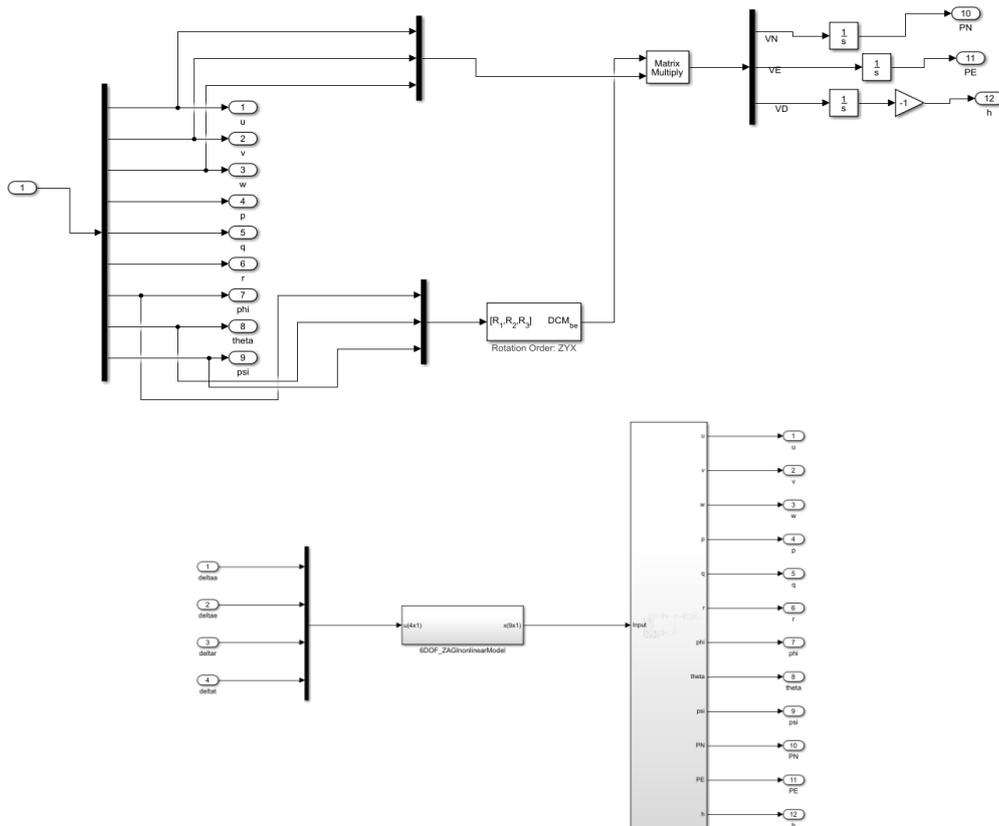


Figure 4-9 : les blocs SIMULINK de la nouvelle boucle ouverte.

On a obtenu douze états y compris l'altitude, on a recalculé les matrices d'état pour obtenir le nouveau modèle linéaire :

## Chapitre IV. Simulation et résultats

```
A=[-0.5919    0    -0.5598    0    0    0    0    0    8.2313    0    0    0    0
      0    -1.6838    0    0    0    0    -10.0000    -8.2313    0    0    0    0    0
      0.0597    0    -3.7990    0    10.0000    0    0    0    5.3368    0    0    0    0
      0    -4.7579    0    -11.0201    0    5.1032    0    0    0    0    0    0    0
     -6.8881    0    -2.0747    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    2.4287    0    1.2359    0    -7.7522    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    1.0000    0    0.6484    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    1.0000    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    -1.1918    0    0    0    0    0    0    0
     -0.8391    0    0.5440    0    0    0    0    0    5.4402    0    0    0    0
      0    1.0000    0    0    0    0    0    -10.0000    0    -5.4402    0    0    0
     -0.5440    0    -0.8391    0    0    0    0    0    -8.3907    0    0    0    0];
```

```
B=[ 0    0    0    10.2106
      0    0    2.5257    0
      0    0    0    0
     -18.1794    0    7.5672    0
      0    0    0    0
      0.1593    0    -13.3895    0
      0    0    0    0
      0    0    0    0
      0    0    0    0
      0    0    0    0
      0    0    0    0
      0    0    0    0];
```

```
C=[1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    1    0    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    1    0    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    1    0    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0    1    0    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0    0    1    0    0
      0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    1    0
      0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0    -1];
```

D=zeros(12,4);

Ensuite, on a calculé de nouveau le gain :

```
Kc=[0    0.3861    0    -0.8187    -0    -0.4048    -5.5175    -0    -2.9185    |    0    0.9612    0
      0    0    0    0    0    0    0    0    0    |    0    0    0
     -0    0.7365    -0    -0.0194    0    -0.9589    -1.6619    0    -0.1491    |    -0    0.2760    -0
     1.9781    -0    -0.0069    -0    -2.3237    0    -0    -5.7310    -0    |    -0.5746    0    0.8184];
```

Et enfin on a intégré le PID en boucle fermée pour le maintien d'altitude avec la même procédure précédente avec le schéma suivant :

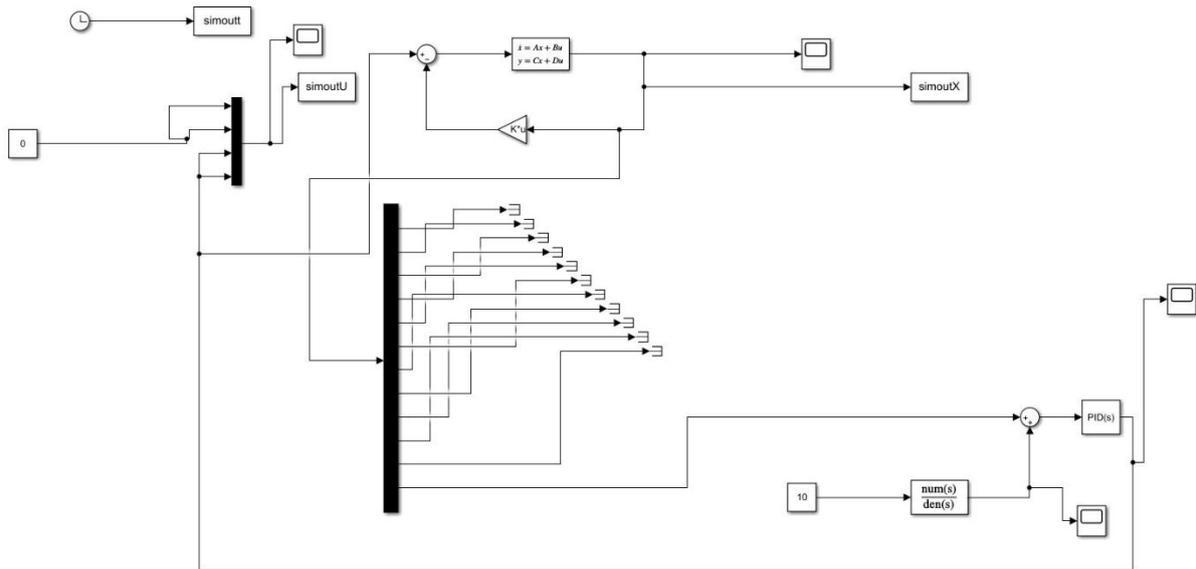


Figure 4-10 : le schéma SIMULINK pour le maintien d'altitude en boucle fermée.

On a choisi la valeur désirée  $h=10\text{m}$ , et suivant la même procédure du maintien de cap, on a obtenu le résultat suivant :

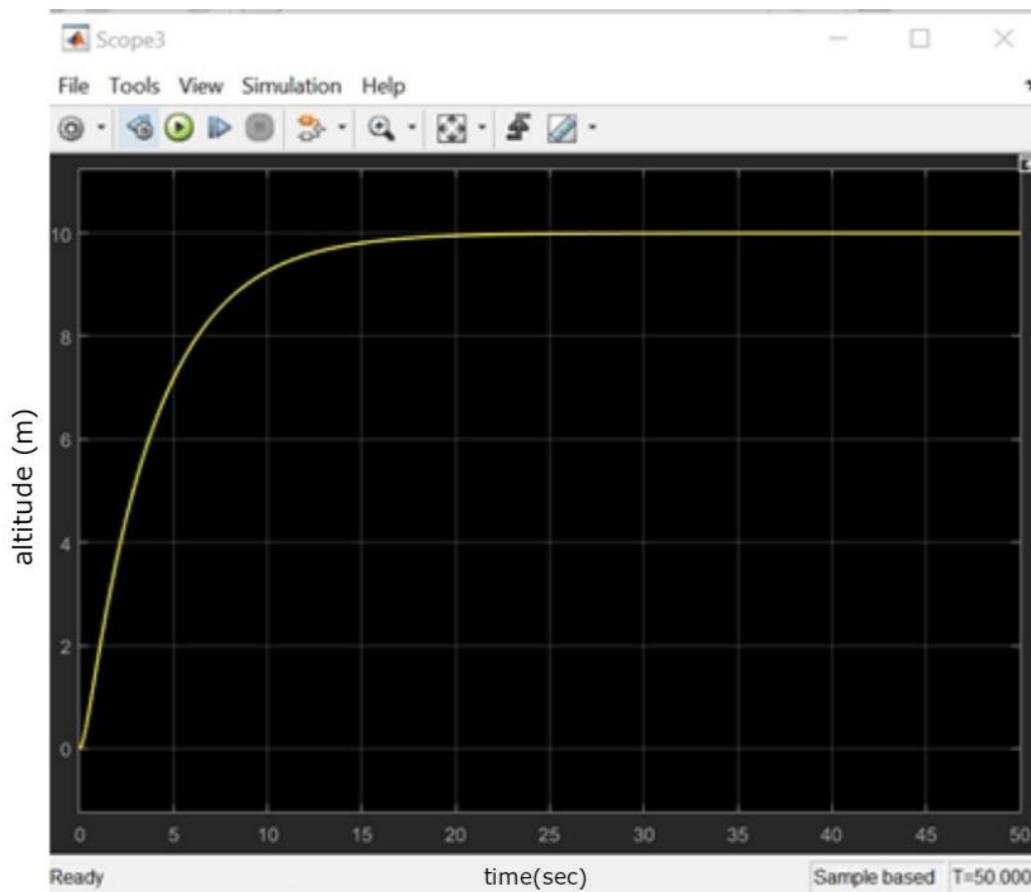


Figure 4-11: le résultat de maintien d'altitude.

On observe que le drone arrive à la valeur souhaitée 10m.

On conclure que la commande PID appliquée dans ce modèle est efficace pour le guidage du drone avec un petit temps de réponse pour rendre le système robuste et rapide.

### **4.2. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tester notre système en boucle ouverte afin de vérifier notre modèle mathématique, puis nous avons assuré la stabilité du drone avec un régulateur LQR, et enfin, nous avons intégré la commande PID pour maintenir le cap et l'altitude pour assurer le guidage de drone.

On peut dire qu'avec ces commandes notre système devient rapide et stable.

# **Conclusion générale**

L'industrie pétrolière et gazière en Algérie est confrontée à de nombreux défis, pour cela on a décidé d'intégrer la technologie des drones dans ce domaine, grâce à leur évolution rapide et leur utilisation dans presque tous les domaines, qui peut apporter des solutions innovantes à certains de ces défis.

Cela en fait, la principale cause pour ce travail de recherche.

L'objectif principal de ce travail était de concevoir un drone solaire à aile fixe basé sur l'IA pour la reconnaissance d'image destiné vers ce domaine crucial en Algérie.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une brève étude sur les drones à aile fixe et leur modélisation qu'on a besoin pour la simulation ainsi que l'intégration de l'énergie solaire dans ce dernier.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de l'utilisation des CNN pour la détection d'objets et la reconnaissance d'images afin de les utiliser pour la détection et la classification des fuites, mais, puisqu'on n'a pas assez de temps, on n'a pas pu arriver aux résultats souhaités.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la détection des fuites dans les pipelines avec plusieurs capteurs utilisés sur les drones.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation qu'on a obtenu pour le guidage et la stabilité de drone en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK par un régulateur LQR et une commande PID, et on est arrivé aux résultats voulus.

Cette thèse étudie la partie informatique d'un système de télédétection basée sur les drones solaires pour les besoins de l'industrie pétrolière et gazière en Algérie.

Elle était juste la première étape pour des recherches futures et elle va être réalisée.

### **Poursuite de travail :**

-La précision de la détection des fuites peut augmenter par la fusion des données en utilisant plusieurs caméras ou un swarm de drones solaires.

-l'amélioration d'un algorithme de localisation basé sur les CNN pourrait améliorer la précision de la recherche de la position de la fuite avec des coordonnées précises, cette méthode pourrait être utilisée pour trouver rapidement la fuite.

-on peut améliorer le programme MATLAB utilisé en ajoutant des autres sous-programmes pour améliorer la stabilité et le guidage et pour la recherche précise de la position de la fuite.

Comme perspectives, nous proposons :

- la création d'une base de données qui contient seulement les images des pipelines avec et sans fuites.

- l'utilisation du logiciel Python car il est plus simple que MATLAB et contient plus de bibliothèques.

---

## Annexe A

---



Figure 4.12: le drone ZAGI.

Tableau 4-1: les paramètres du drone ZAGI.

Paramètre	Valeur
$m$	1.56 kg
$J_x$	0.1147 kg-m <sup>2</sup>
$J_y$	0.0576 kg-m <sup>2</sup>
$J_z$	0.1712 kg-m <sup>2</sup>
$J_{xz}$	0.0015 kg-m <sup>2</sup>
$S$	0.2589 m <sup>2</sup>
$b$	1.4224 m
$c$	0.3302 m
$S_{prop}$	0.0314 m <sup>2</sup>
$\rho$	1.2682 kg/m <sup>3</sup>
$K_{motor}$	20
$K_{Tp}$	0
$K_{\Omega}$	0

Tableau 4-2 : les coefficients aérodynamiques.

<b>Coefficients longitudinales</b>	<b>Valeur</b>	<b>Coefficients latérales</b>	<b>Valeur</b>
$C_{L0}$	0.28	$C_{Y0}$	0
$M$	50	$\alpha_0$	0.4712
$\epsilon$	0.1592	$C_{l0}$	0
$C_{D0}$	0.03	$C_{n0}$	0
$C_{m0}$	0	$C_{Y\beta}$	-0.98
$C_{L\alpha}$	3.45	$C_{l\beta}$	-0.12
$C_{D\alpha}$	0.30	$C_{n\beta}$	0.25
$C_{m\alpha}$	-0.38	$C_{Yp}$	0
$C_{Lq}$	0	$C_{lp}$	-0.26
$C_{Dq}$	0	$C_{np}$	0.022
$C_{mq}$	-3.6	$C_{Yr}$	0
$C_{L\delta e}$	-0.36	$C_{lr}$	0.14
$C_{D\delta e}$	0	$C_{nr}$	-0.35
$C_{m\delta e}$	-0.5	$C_{Y\delta a}$	0
$C_{prop}$	1	$C_{l\delta a}$	0.08
		$C_{n\delta a}$	0.06
		$C_{Y\delta r}$	-0.17
		$C_{l\delta r}$	0.105
		$C_{n\delta r}$	-0.032

---

***Annexe B***

---

**Introduction :**

L'importance de toute étude scientifique est évidente dans l'étendue de sa contribution à mettre en évidence le problème à résoudre après avoir défini ses variables avec précision. Cela permet de déterminer les dimensions de l'étude et d'évaluer sa valeur théorique et pratique.

L'industrie pétrolière et gazière en Algérie contribue de manière significative aux recettes du gouvernement, représentant une part importante des exportations et des revenus du pays. La présence d'une industrie dynamique souligne son importance stratégique pour le pays. Cependant, la survenue d'incidents tels que les fuites de pipelines rappelle les défis auxquels cette industrie est confrontée. Ces incidents peuvent avoir des conséquences environnementales néfastes, compromettant la sécurité des populations et des travailleurs, ainsi que l'intégrité des infrastructures. Cela met en évidence un besoin urgent de renforcer les techniques de détection des fuites afin de minimiser les risques et de garantir une exploitation durable des ressources pétrolières et gazières.

Malgré les efforts déployés pour améliorer la sécurité et la surveillance des pipelines en Algérie, il existe toujours des lacunes dans les capacités de détection précoce des fuites. Cela souligne la nécessité de développer des solutions innovantes pour combler ces manques. C'est dans ce contexte que ce projet prend tout son sens.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur l'importance du sujet d'étude lié à la création d'une start-up et son lien avec le secteur de la détection dans l'industrie pétrolière et gazière, en mettant en évidence son rôle essentiel dans la maximisation des bénéfices et l'emploi des ressources humaines. La création d'une start-up est un enjeu important avec un intérêt croissant de la part des chercheurs et des experts dans divers domaines.

Ce projet de Startup présenté dans le cadre de l'arrête ministériel "1275 "se concentre sur le développement d'une solution de télédétection basée sur les drones à énergie solaire pour l'industrie pétrolière et gazière.

Face à la nécessité de renforcer la surveillance des gazoducs et des oléoducs, la problématique de ce projet de recherche est la suivante : Comment développer une solution de télédétection basée sur les drones solaires, intégrant des techniques d'intelligence artificielle, pour détecter de manière efficace et économique les fuites et les fissures des pipelines de gaz et de pétrole, et ainsi assurer une gestion sécurisée et durable de ces infrastructures critiques ?

### **L'objectif d'étude :**

L'objectif principal de ce projet est de concevoir et développer un drone solaire à voilure fixe capable de détecter en temps réel les fuites et les fissures des gazoducs et des oléoducs. Cela sera réalisé en utilisant une combinaison de capteurs avancés, tels qu'une caméra thermique infrarouge, et des techniques d'intelligence artificielle basées sur les réseaux de neurones convolutifs pour offrir une solution de surveillance efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour prévenir les incidents majeurs, réduire les risques environnementaux et économiques, et améliorer la sécurité des infrastructures pétrolières et gazières.

### **Obstacles à l'étude :**

Il y a des obstacles que certains étudiants rencontrent dans la préparation du mémoire de projet startup. L'un des principaux obstacles auxquels nous sommes confrontés lors de la préparation de notre mémoire de projet startup est le manque de temps. Cela peut rendre difficile la consécration d'un temps adéquat à la recherche, à la collecte d'informations, à la rédaction du mémoire et à réaliser le travail. De plus, l'accès à l'information peut également poser un défi car certaines sources d'informations peuvent être payantes, limitées ou difficiles à trouver, ce qui peut entraver notre capacité à obtenir les ressources nécessaires pour approfondir notre recherche.

### **Approche de l'étude :**

De nombreux chercheurs considèrent que la démarche scientifique est essentielle pour atteindre des résultats objectifs et révéler des vérités dans divers domaines. Elle repose sur un ensemble de règles générales qui guident le travail du chercheur et définissent ses opérations, jusqu'à ce qu'il parvienne à un résultat connu. Le chemin suivi par le chercheur pour révéler un phénomène ou résoudre un problème est basé sur des méthodes scientifiques rigoureuses.

Et sur la base de l'objectif général de l'étude : cette étude de recherche s'inscrit dans la recherche descriptive et analytique jugée plus appropriée à cet égard, notamment en ce qui concerne les définitions de certains des concepts d'une institution émergente ou d'une petite institution qui nécessite de telles approches.

En utilisant une approche descriptive, l'étude vise à décrire les caractéristiques, les fonctionnalités et les aspects pertinents de l'institution étudiée. L'approche analytique, quant à elle, permet d'analyser les données et les informations recueillies afin de tirer des conclusions et de formuler des recommandations éclairées. Cette combinaison d'approches permet une exploration approfondie du sujet et contribue à une meilleure compréhension des concepts étudiés dans le contexte d'une institution émergente ou d'une petite institution.

### **Technique utilisée et outils de collecte de données :**

Dans cette recherche, les outils requis par le travail de développement algorithmique de détection des fuites dans les pipelines ont été utilisés, qui sont sous la forme générale le plan commercial pratique, sur lequel on s'est beaucoup appuyé dans l'étude car il aide à la collecte de données la plus élevée en tant que technique existante qui comprend un ensemble de questions limitées par le chercheur afin d'exprimer le sujet de la recherche, dans le cadre du plan objectif à présenter Répondant afin d'obtenir des réponses et des solutions qui incluent les informations et les données nécessaires pour clarifier le phénomène étudié et le définir à partir de son Aspects variés.

L'observation indispensable était invoquée dans toute étude, quelle que soit la recherche scientifique.

### **Les notions du mémoire de projet startup :**

#### **Qu'est-ce qu'une startup ?**

Une startup est une jeune entreprise innovante en phase de démarrage qui se caractérise par son fort potentiel de croissance et son ambition de perturber ou de révolutionner un marché existant. Elle se distingue par son caractère innovant, son agilité et sa recherche constante de solutions novatrices pour répondre aux besoins et aux demandes changeants du marché. Les startups sont souvent fondées par des entrepreneurs passionnés qui cherchent à résoudre des problèmes spécifiques en proposant des produits, des services ou des technologies disruptifs. Elles sont généralement axées sur la croissance rapide et l'expansion internationale, et sont souvent soutenues par des investisseurs et des incubateurs qui fournissent des ressources financières, des conseils stratégiques et un réseau d'experts pour favoriser leur développement. Les startups peuvent opérer dans divers secteurs, tels que la technologie, la santé, les services financiers, l'énergie, etc., et ont le potentiel de devenir des acteurs majeurs et influents de l'économie.

#### **Incubateur de startup :**

Un incubateur d'entreprises est une structure qui accompagne les entreprises en création, jusqu'à leur création et parfois pendant leurs premiers mois d'existence. L'incubateur permet la gestion des projets innovants et les porteurs de projet disposent ainsi d'un hébergement et d'un accompagnement personnalisé.

De nombreux incubateurs sont mis en place par les établissements d'enseignement universitaire et de la recherche scientifique dont la durée d'incubation est de deux (02) ans.

En Algérie, les incubateurs de startup sont encadrés par le Centre d'Appui à la Technologie et à l'Innovation (CATI) et l'Institut National Algérien de la Propriété Industrielle (INAPI).

### **Le Centre d'Appui à la Technologie et à l'Innovation (CATI) :**

Le CATI est une structure d'accompagnement des enseignants, des chercheurs et des étudiants en matière de propriété industrielle à travers les services suivants : accès aux bases des données de brevets ; assistance et conseil en gestion de la propriété intellectuelle (rédaction de brevets, commercialisation, ...) , assistance et conseil dans la création d'entreprises (dépôt des marques, des dessins, modèles industriels,...).

Le CATI a été créé EN 2018 dans le cadre d'une convention de partenariat signée avec l'Institut National Algérien de la Propriété industrielle INAPI.

### **L'Institut National Algérien de la Propriété Industrielle (INAPI) :**

L'Institut national algérien de la propriété industrielle, est un établissement public à caractère administratif, placé sous la tutelle du ministère algérien de l'Industrie et des Mines. Il est chargé de la propriété industrielle. L'INAPI a été créé par le décret exécutif 98-68 du 21 février 1998. En 2017, l'INAPI a délivré plus de 400 brevets d'invention.

L'INAPI a pour missions :

- De recevoir les dépôts et délivrer les titres de propriété industrielle : brevets, marques, dessins et modèles.
- De participer à l'élaboration du droit de la propriété industrielle.
- De mettre à la disposition du public toute information nécessaire pour la protection des titres de propriété industrielle.
- De former et sensibiliser tous les acteurs économiques aux questions de la propriété industrielle.
- De gérer le Bulletin officiel de la propriété industrielle (PI).

### **L'arrêté ministériel 1275 :**

L'arrêté ministériel n°1275 du 27 septembre 2022 portant sur le mécanisme -un diplôme /une startup, vise à aider et accompagner les diplômés des établissements d'enseignement supérieur ayant transformé leurs projets innovants en startups. Cette étude se penchera essentiellement sur l'impact de ce décret dans l'écosystème universitaire et la nouvelle approche du diplôme universitaire, où l'étudiant deviendra un créateur d'emploi et

l'université productrice de richesse dans l'économie du savoir, et contribuer ainsi au développement socioéconomique du pays.

### **Les caractéristiques d'une startup :**

#### **Elle est temporaire :**

Le statut de startup est évolutif. Il ne s'agit pas d'un objectif en soi. Il s'agit d'une phase particulière, visant à transformer une idée en entreprise stable.

#### **Elle présente une innovation :**

Ce genre d'entreprise consiste à apporter de la valeur à des clients à travers un produit ou un service totalement inédit. L'enjeu est de concevoir un Business Model adapté à une clientèle donnée.

#### **Elle est industrialisable / reproductible :**

Le modèle conçu doit être réalisable à grande échelle, dans d'autres lieux, une fois qu'il fonctionne.

#### **Elle dispose d'un potentiel de croissance exponentielle :**

Plus le nombre de clients augmente, plus les marges sont grandes. Ainsi, la société pourra grandir très vite et se développer assez facilement.

#### **La nouveauté :**

Il s'agit d'une entreprise, qui généralement, vient d'être créée.

#### **Le besoin de financement :**

Pour se développer rapidement et atteindre un modèle économique rentable, la start-up a un fort besoin de financement

### **Business Model Canvas (BMC) :**

Le Business Model Canvas (BMC) est un outil de gestion stratégique largement utilisé dans le domaine des startups et de l'entrepreneuriat, permettant de formaliser, en toute simplicité, le modèle d'affaires d'une entreprise.

Le BMC est constitué d'une matrice qui se compose de neuf blocs clés qui représentent les éléments essentiels d'un modèle économique :

- 1 Partenaires clés.
- 2 Ressources clés.
- 3 Activités clés.
- 4 Propositions de valeur.
- 5 Relation avec les clients.

- 6 Canaux de distribution.
- 7 Segments de clientèle.
- 8 Structure des coûts.
- 9 Sources et revenus.

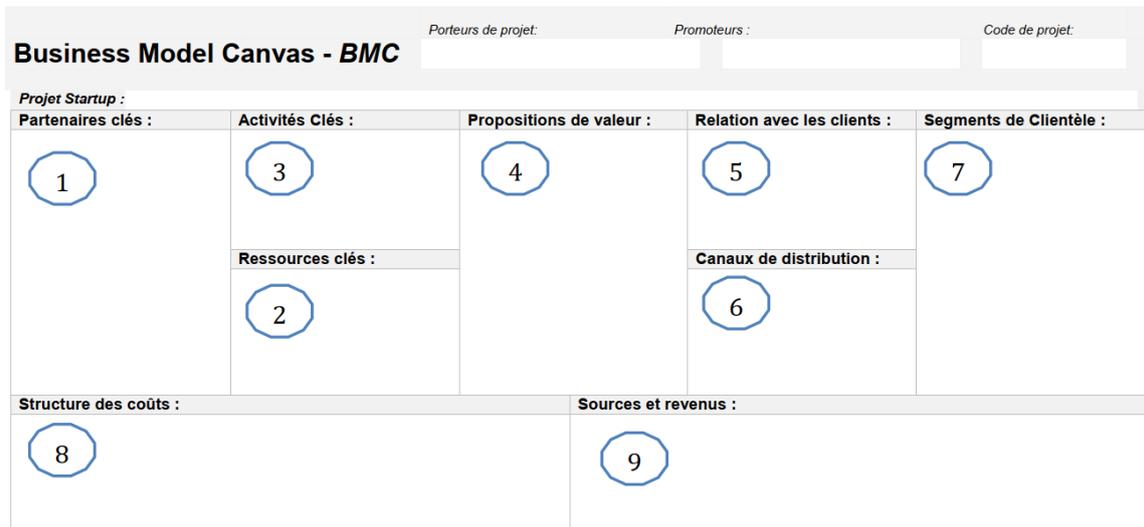


Figure: Business Model Canvas (BMC).

### 1 Les partenaires clés :

Ce sont les alliés extérieurs de l'entreprise grâce auxquels vous pourrez faire évoluer et améliorer votre offre. Il peut s'agir de fournisseurs, de sous-traitants, de coproducteurs, d'intégrateurs, d'experts, etc. Le choix des partenaires est naturellement lié à la clientèle que vous ciblez. Une bonne relation partenariale peut par ailleurs vous garantir certains avantages sur vos concurrents : contrôle des prix, exclusivité d'un savoir-faire, maîtrise du cycle de production, etc. Convaincre des partenaires de travailler avec vous, mérite autant d'attention que de convaincre des prospects de devenir vos clients.

### 2 Les ressources clés :

Il s'agit de tous les moyens matériels, immatériels, humains, et financiers que l'entreprise doit réunir pour produire une offre répondant aux attentes de ses clients. Exemples : les salariés, le fonds de commerce, le mobilier, le matériel, les véhicules, le site internet, les ressources financières, les locaux, un savoir-faire, une compétence, une expertise, un fichier qualifié de prospects, une base de données, etc.

### 3 Activités clés :

Elles traduisent concrètement ce que fait l'entreprise. Par exemple, dire que l'on vend des vêtements n'est pas suffisant. En effet, une idée, si simple soit-elle, peut exprimer différentes réalités. S'agit-il de l'achat/revente de vêtements ou de la conception, fabrication et vente de vêtements ? Ou bien au contraire une place de marché internet où marques de mode et

acheteurs se rencontrent ? Dans ce dernier cas l'activité réelle de l'entreprise consistera à gérer un site internet et un centre de logistique. Dans le cas de consultants, l'activité principale consiste à rechercher et à analyser des informations, et à préconiser des actions.

#### **4 Propositions de valeur :**

Elle va bien au-delà du produit ou du service proposé. C'est ce qui incite un client à choisir votre entreprise plutôt qu'une autre. Votre offre est-elle plus performante ? Plus esthétique ? Plus accessible ? Plus personnalisable ? Plus compétitive ? Etc. N'oubliez pas, elle doit résoudre avant tout un problème réel ou répondre à un besoin existant. Elle peut également révéler un nouveau besoin et le satisfaire : c'est le cas de l'innovation de rupture. L'offre est indissociable du client que vous ciblez, le tandem ainsi créé est le fer de lance de votre entreprise.

#### **5 Relation avec les clients :**

Elle concerne tous les moyens employés, au-delà du produit ou du service vendu, pour vous assurer la fidélité de vos clients, en acquérir de nouveaux, faciliter l'acte d'achat, voire augmenter la fréquence d'achat. Il peut s'agir de fournir une assistance personnelle dédiée, un service de retour des marchandises, une carte de fidélité, etc.

#### **6 Canaux de distribution :**

Il s'agit de tous les moyens de communication et de distribution que vous mettez en place pour toucher vos clients. Comment allez-vous faire connaître votre offre, la vendre, la distribuer et en assurer le service après-vente ? C'est une occasion de vous démarquer.

#### **7 Segments de clientèle :**

La raison d'être de votre projet, au cœur de toutes vos attentions. Vous devez déterminer qui ils sont. Dans le cas où il y aurait plusieurs types de clients, on parlera de segments dès lors qu'ils auront des besoins distincts, des sensibilités différentes aux prix et aux moyens de communication que vous pourrez employer, voire des habitudes de consommation spécifiques. Différenciez vos clients de vos utilisateurs. En effet, les clients (ceux qui payent) ne sont pas toujours les utilisateurs de vos produits ou de vos services.

#### **8 Structure des coûts :**

Il est enfin nécessaire d'évaluer l'ensemble des coûts indispensables au bon fonctionnement de l'activité décrite. Les coûts peuvent être variables, c'est-à-dire dépendre du niveau d'activité de l'entreprise ; ils augmentent au fur et à mesure que le chiffre d'affaires augmente (achat de marchandises, de matière première, etc.). Au contraire certains coûts sont fixes ; ce sont des dépenses incompressibles indépendantes du chiffre d'affaires (loyer, prime d'assurance, etc.).

### **9 Sources et revenus :**

Il s'agit de toutes les rentrées d'argent générées par votre activité. Ils peuvent être ponctuels ou récurrents, fixes ou variables. Autrement dit : comment vont payer vos clients ? Quand vont-ils payer ? Avant ou après que vous ne dépensiez ? Quel est le prix pratiqué selon vos différents segments de clientèle ? A titre d'exemple : les prix sont-ils fixés en fonction des volumes, du temps passé ? S'agira-t-il d'un prix catalogue, d'un forfait, d'un abonnement, d'une location, dépendant d'une condition, d'un objectif ? Vos prix dépendent-ils de la rareté du produit ou du service ? Sont-ils négociables ?

### **Une entreprise :**

Une entreprise est une entité économique qui se forme dans le but de fournir des biens ou des services sur le marché en vue de réaliser des profits. Elle est généralement créée par une ou plusieurs personnes, appelées entrepreneurs ou fondateurs, qui investissent des ressources financières, matérielles, humaines et intellectuelles pour développer et exploiter l'activité de l'entreprise.

L'entreprise peut prendre différentes formes juridiques, telles que la société anonyme, la société à responsabilité limitée, l'entreprise individuelle, etc., en fonction des lois et réglementations du pays dans lequel elle opère.

### **Une micro-entreprise :**

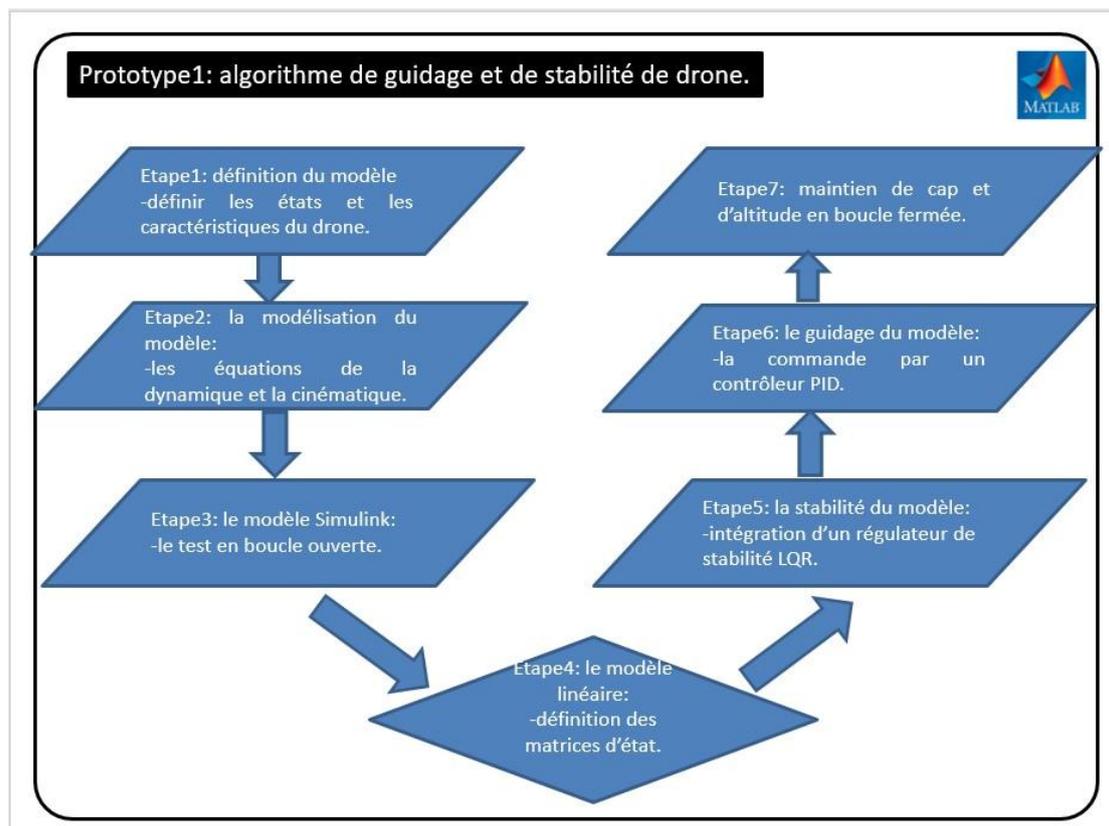
Une micro-entreprise est une petite entreprise de taille réduite qui opère avec un nombre limité de salariés et de ressources. Elle est souvent considérée comme une entreprise individuelle ou une petite structure entrepreneuriale gérée par une personne seule ou un petit groupe de personnes. Elle se distingue par sa taille modeste, sa flexibilité et son fonctionnement simplifié par rapport aux grandes entreprises.

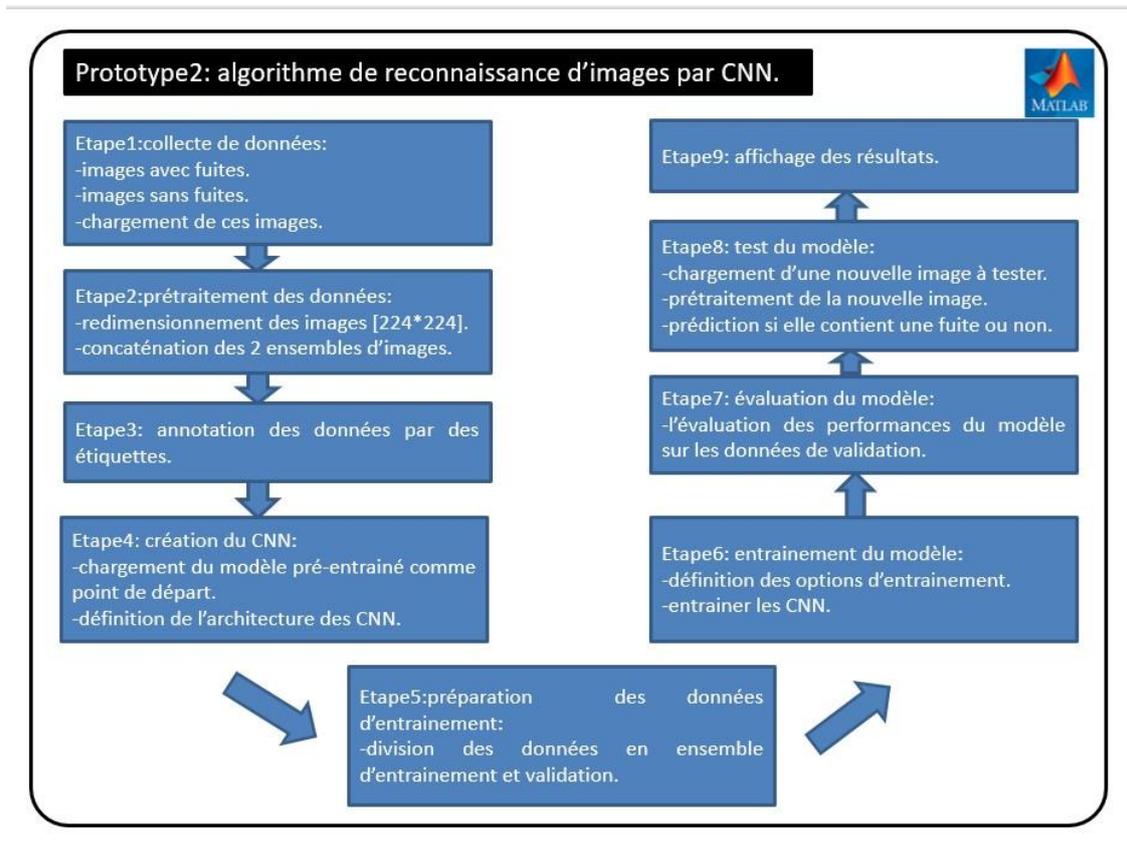
Notre entreprise donne un service de détection des fuites dans les oléoducs et les gazoducs avec un drone à voilure fixe qui utilise de l'énergie solaire, basé sur l'IA pour la reconnaissance et la localisation de ces fuites.

Logo de l'entreprise :



Le prototype de notre service est un ensemble de deux algorithmes :





```

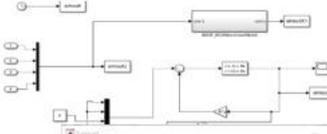
Editor - C:\Users\dell\Desktop\mémoire finale\ZAGI_model.m
ZAGI_model.m x +
121 %states derivatives
122 %inertia matrix
123 Ib=m*[0.1147 0 0.0015;
124 0 0.0576 0;
125 0.0015 0 0.1712];
126
127 % inverse of inertia matrix
128 invIb=inv(Ib);
129
130 %form the forces in the body frame and calculate (u v w)dot
131 F_b=Fg_b+FE_b+FA_b;
132 Xlto3dot=(1/m)*F_b-cross(wbe_b,V_b);
133 %Xlto3dot=Xlto3dot';
134

Editor - D:\MATLAB\R2018a\bin\préentrainementCNN.m
préentrainementCNN.m x +
1 % Étape 1 : Collecte de données
2
3 % Chemin vers le dossier contenant les images de fuites
4 chemin_fuites = 'CePc_Bureau_imagesfuites';
5
6 % Chemin vers le dossier contenant les images sans fuites
7 chemin_non_fuites = 'CePc_Bureau_imagessansfuites';
8
9 % Charger les images de fuites et les images sans fuites
10 images_fuites = imageDatastore(chemin_fuites);
11 images_non_fuites = imageDatastore(chemin_non_fuites);
12
13 % Étape 2 : Prétraitement des données
14
15 % Redimensionner les images à une taille fixe (par exemple, 224x224)
16 images_fuites = augmentedImageDatastore([224 224], images_fuites);
17 images_non_fuites = augmentedImageDatastore([224 224], images_non_fuites);
18
    
```

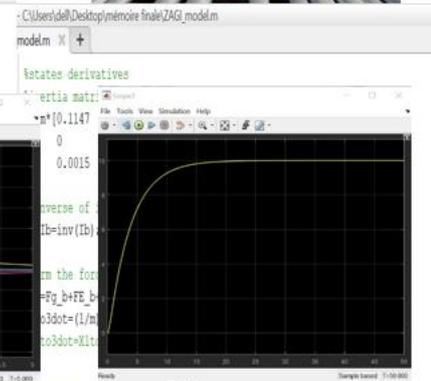
**Detection**  
Notre entreprise : **Petroleum & gas with drones.**



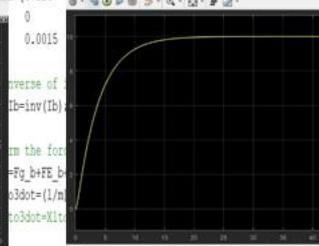
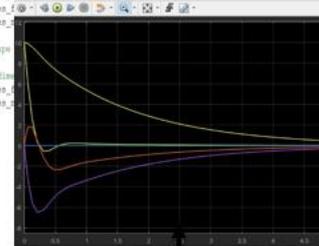
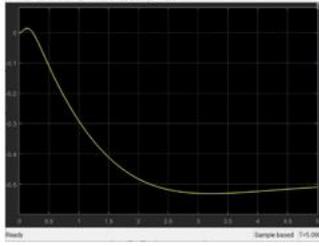
**Prototype premier**



```
Editor: D:\MATLAB\2014\bin\petroleum\petroleum.mdl
petroleum.mdl:
Stage 1 : Collecte de données
% Chemin vers le dossier contenant les images de fuites
chemin_fuites = 'C:\ch\Bureau_imagesfuites\';
% Chemin vers le dossier contenant les images sans fuites
chemin_sans_fuites = 'C:\ch\Bureau_images\';
```



```
modelm X
setstates derivatives
return matrix
m*[0.1147
0
0.0015
inverse of
Ib=inv(Ib)
in the for
=Fig_b+FE_b
s3dot=(L/m
cos3dot=3lt
```



**Exécution Prototype**

[mourghad\\_chaima@etu.univ-blida.dz](mailto:mourghad_chaima@etu.univ-blida.dz)  [ouldamar\\_amel@etu.univ-blida.dz](mailto:ouldamar_amel@etu.univ-blida.dz)



### **Conclusion :**

En conclusion, les startups jouent un rôle crucial dans l'économie mondiale en stimulant l'innovation, en favorisant la croissance économique et en créant de nouveaux emplois. Elles se distinguent par leur approche agile, leur capacité à adopter rapidement de nouvelles technologies et à s'adapter aux changements du marché.

# **Annexe**

## **La fiche technique de projet startup 1275**



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES



**Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme « une startup » / un  
diplôme « un brevet » dans le cadre de l'arrête  
ministériel N° 1275**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Département : Construction Aéronautique**

**Spécialité : Avionique**

**Intitulé du Projet :**

**« Télédétection basée sur les drones à énergie solaires  
pour l'industrie pétrolière et gazière et la surveillance de  
l'environnement »**

**Code de projet : 05\_15\_3407**

**Projet Startup présenté dans le cadre de l'arrête ministériel "1275",  
assurée par Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES**

**Présenté par :**

- 1- Mourghad chaima
- 2- Ould Amar amel
- 3- Ouali fatma

**Encadré par :**

**Encadreur :** Dilmi smain  
**Co-encadreur :** Krim mohamed

**Formateurs :**

Lebsir abdekader  
Krim mohamed

**Année académique : 2022/202**



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Université Blida 1



Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales IAES

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme « une  
startup » / un diplôme « un brevet » dans le  
cadre de l'arrête ministériel N° 1275

Domaine : Sciences et Technologies

Département : Construction Aéronautique

Spécialité : Avionique

Intitulé du Projet :

Structuration et planification du projet de :

« Télédétection basée sur les drones à énergie solaire pour  
l'industrie pétrolière et gazière et la surveillance de  
l'environnement »

Projet de Startup présenté dans le cadre de l'arrête ministériel "1275 ", assurée par  
Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales. IAES

Devant le jury composé de :

Membres des jurys	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Signature
Président	Dr. Cheggaga nawal	MCA	Univ. Blida 1	
Encadreur	Dr. Dilmi smain	MCA	Univ. Blida 1	
Co-encadreur	Dr. Krim mohamed	MCB	Univ. Blida 1	
Examineur	Dr. Khelifa yamina	MAA	Univ. Blida 1	
Représentant incubateur/ Maison de l'entrepreneuriat			Univ. Blida 1	
Représentant du partenaire économique				
Responsable du Centre d'Appui à la Technologie et à l'Innovation			Univ. Blida 1	

Année académique : 2022/2023



# Carte d'information

A propos de l'équipe d'encadrement du groupe de travail

<b>Equipe de l'Encadrement du Groupe principale (à titre indicatif)</b>	<b>SPECIALITE</b>	<b>FACULTE</b>	<b>ETABLISMENT</b>
<b>Encadrant 01 : Dr. Dilmi smain</b>	<b>Avionique</b>	<b>IAES</b>	<b>Univ. Blida 1</b>
<b>Encadrant 02 : Dr. Krim mohamed</b>	<b>Avionique</b>	<b>IAES</b>	<b>Univ. Blida 1</b>

A propos de l'équipe du projet du groupe de travail

<b>Equipe du projet du Groupe principale (à titre indicatif)</b>	<b>SPECIALITE</b>	<b>FACULTE</b>	<b>ETABLISMENT</b>
<b>Etudiante 01 : Mourghad chaima</b>	<b>Avionique</b>	<b>IAES</b>	<b>Univ. Blida 1</b>
<b>Etudiante 02 : Ould Amar amel</b>	<b>Avionique</b>	<b>IAES</b>	<b>Univ. Blida 1</b>
<b>Etudiante03 : Ouali fatma</b>	<b>Avionique</b>	<b>IAES</b>	<b>Univ. Blida 1</b>

# **Business Model Canvas**

# Business Model Canvas - BMC

Porteurs de projet :

- 1- Mourghad chaima
- 2- Ould Amar amel
- 3- Ouali fatma

Promoteurs :

P- Dilmi smain  
CO-P- Krim smain

Code de projet :

05-15-3407

**Projet Startup :** Télédétection basée sur les drones à énergie solaire pour l'industrie pétrolière et gazière et la surveillance de l'environnement.

Partenaires clés :	Activités Clés :	Propositions de valeur :	Relation avec les clients :	Segments de Clientèle :
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les entreprises de l'industrie pétrolière et gazière pour la vente directe.</li> <li>-Les fournisseurs de drones, panneaux solaires, de caméras infrarouges thermiques et de capteurs.</li> <li>-Partenaires de fabrication, de distribution et de financement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La conception, la fabrication et la vente de drones solaires.</li> <li>-La collecte de données de surveillance des pipelines et de l'environnement.</li> <li>-L'analyse des données à l'aide d'IA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une approche innovante de la surveillance des pipelines et de l'environnement d'une manière rentable.</li> <li>-Un drone alimenté par l'énergie solaire qui est équipé d'une caméra thermique infrarouge et de capteurs.</li> <li>-L'utilisation de l'IA pour analyser les données collectées par le drone, ce qui facilite l'identification des problèmes et la prise de mesure pour les entreprises.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Nous croyons que la construction des relations solides avec nos clients est la clé de notre succès.</li> <li>-Fournir un support client de qualité pour répondre aux besoins de nos clients.</li> <li>-Fournir des formations sur l'utilisation de notre solution.</li> <li>-Offrir un soutien continu pour assurer que nos clients sont en mesure de tirer le meilleur parti de notre technologie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Les entreprises de l'industrie pétrolière et gazière qui ont besoin de surveiller leurs pipelines.</li> <li>-Les entreprises qui exploitent des pipelines pour le pétrole, le gaz et d'autres matériaux.</li> <li>-SONATRACH.</li> <li>-SONELGAZ.</li> <li>-NAFTAL.</li> </ul>
	<p><b>Ressources clés :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Les drones, les panneaux solaires, les caméras infrarouges thermiques et les capteurs.</li> <li>-Des ingénieurs spécialisés dans la conception des drones, des logiciels et d'IA.</li> <li>-Une équipe de développement de produits pour concevoir et construire des drones solaires de haute qualité.</li> <li>-des bases de données.</li> </ul>		<p><b>Canaux de distribution :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Vente directe aux entreprises de l'industrie pétrolière et gazière.</li> <li>-Des publicités.</li> <li>-Réseaux sociaux.</li> <li>-Site Web.</li> <li>-Participation aux foires et aux événements autour de l'entreprenariat.</li> <li>-livraison à domicile.</li> </ul>	
<p><b>Structure des coûts :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Les coûts de conception et de fabrication des drones solaires.</li> <li>-Les coûts de maintenance et de réparation.</li> <li>-Les coûts de développement de logiciels d'IA.</li> <li>-Commercialisation de notre solution.</li> </ul> <p>Coût : 1 000 000 000 DA</p>		<p><b>Sources et revenus :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Vente directe de notre solution.</li> <li>-La formation du personnel et le soutien continu.</li> <li>-les publicités.</li> </ul>		



---

## *La fiche technique de projet startup 1275*

---



## La fiche technique de projet

Carte d'information	
Mourghad chaima Ould Amar amel Ouali fatma	الاسم و اللقب <b>Your first and last Name</b> <b>Votre prénom et nom</b>
Drones for Petroleum & Gas  Petroleum & Gas	الاسم التجاري للمشروع <b>Intitulé de votre projet</b> <b>Title of your Project</b>
Légal en cas d'autorisation	الصفة القانونية للمشروع <b>Votre statut juridique</b> <b>Your legal status</b>
0658349696 0558330355 0793389299	رقم الهاتف <b>Votre numéro de téléphone</b> <b>Your phone number</b>
mourghadchaima@gmail.com amelouldamar@gmail.com oualiammar1966@gmail.com	البريد الالكتروني <b>Votre adresse e-mail</b> <b>Your email address</b>
Blida Oulad-Yaich	مقر مزاولة النشاط ( الولاية- البلدية) <b>Votre ville ou commune d'activité</b> <b>Your city or municipality of activity</b>

طبيعة المشروع (طبيعة الابتكار)

**La nature de projet**

Vente de services.	المنتوج ذو طابع إنتاجي أو خدماتي <b>Vente de marchandises ou de services</b> <b>Sale of goods or services</b>
--------------------	---

<p>تحديد المشكل الذي يواجهه الزبون</p> <p><b>Déterminer le problème rencontré par le client</b></p>	
<p>-La détection des fuites et des fissures et la surveillance des pipelines de gaz et de pétrole en Algérie en temps réel. -la surveillance des frontières du pays.</p>	<p>ما هي المشكلة التي تريد حلها؟</p>
<p><b>Des statistiques de problèmes existants en Algérie.</b></p>	<p>ما هي البيانات المتوفرة لديك التي تدل على وجود المشكلة المحددة؟</p>
<p><b>Il n'y'a pas d'autres études existantes.</b></p>	<p>ما هي المشاريع الأخرى التي استهدفت نفس المشكلة والتي جرى تنفيذها؟</p>
<p>- L'objectif principal de ce projet est de concevoir et développer un drone solaire à voilure fixe capable de détecter en temps réel les fuites et les fissures des gazoducs et des oléoducs, la surveillance des pipelines et des frontières du pays. Cela sera réalisé en utilisant une combinaison de capteurs avancés, tels qu'une caméra thermique infrarouge, et des techniques d'intelligence artificielle basées sur les réseaux de neurones convolutifs pour offrir une solution de surveillance efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour prévenir les incidents majeurs, réduire les risques environnementaux et économiques, et améliorer la sécurité des infrastructures pétrolières et gazières.</p>	<p>ماهي أهداف مشروعك و/أو نتائجه المتوقعة؟</p>

**Proposition de valeur ou l'offre faite**

القيمة المقترحة وفق المعايير التالية

**La valeur proposée selon les critères suivants**

القيمة المقترحة وفق المعايير التالية	
/	القيمة بالتخصيص
/	القيمة بالسعر
/	القيمة بالتصميم
/	القيمة بالأداء العالي
/	القيمة بالخدمة الشاملة
/	قيم أخرى

## محتوى مخطط العمل للمشروع

### Business Model Canvas – BMC

#### 1. الشركاء الأساسيون Key Partners

طبيعة الشراكة	معلومات حول الشركاء	الشركاء
-	/	الشريك الأول
-	/	الشريك الثاني
-	/	الشريك الثالث
-	/	الشريك الرابع
-	/	الشريك الخامس

Géographique الجغرافية	Démographique (B2C)	Démographique (B2B)	Psychographique العوامل النفسية و الشخصية	Comportemental السلوكيات
Continent عالمية	Age كبار وصغار :العمر	Secteur صناعي و اقتصادي	Classe sociale للطبقة الاجتماعية	Usage استخدام
Pays دولة:الجزائر	Sexe الجنس: إناث وذكور.	Nombre d'employés عدد العمال في القطاع	Niveau de vie المستوى المعيشي	Loyauté الوفاء
Région الجهة الوسط	Revenus annuel دينار 40 000متوسط الدخل: جزائري	Maturité de l'entreprise نضج المؤسسة	Valeurs القيم	Intérêt اهتمام
Département الولاية البلدية	Etat matrimonial عازب- متزوج :الحالة الاجتماعية	Situation financière الحالة المالية للمؤسسة	Personnalité الشخصية	Passion الهواية و شغف
Ville الدائرة أو البلدية البلدية	Niveau d'étude المستوى الدراسي: لايهم	Détention/ actionariat الملكية/المساهمة	Convictions المعتقدات	Sensibilité حساسيات
Quartier الحي اولاد يعيش	Profession المهنة: لاتهم	Valorisation/ capitalisation boursière التقييم / القيمة السوقية	Présence digitale et sur les réseaux sociaux استعمال التكنولوجيا في التواصل	Habitude de consommation عادة الاستهلاك
Climat المناخ كل المناخات	Culture الثقافة:	Business model نموذج الأعمال	Centres d'intérêts مراكز الاهتمام	Mode de paiement طرق الدفع
يمكن أن تكون دولياً.	Religion الدين: كل الديانات	Secteur servi القطاع الذي يخدمه		Connaissance المعرفة
	Langue اللغة: كل اللغات	Technologie utilisée التكنولوجيا المستعملة		Nature de la demande طبيعة الطلب
		Format du produit ou packaging شكل المنتج أو التعبئة والتغليف		Fréquence d'achat عدد مرات الطلب على السلعة

## 2. شرائح العملاء أو الزبائن Customer Segments

### 3. قنوات التوزيع Channels

قنوات التوزيع Channels	
/	المبيعات المباشرة
/	تجار الجملة
/	الموزعون
/	توزيع التجزئة

### 4. العلاقة مع العملاء Customer Relationship

<p>-Etablissez des canaux de communication solides avec les clients, tels que les publicités, le chat en direct, et nous serons disponibles pour répondre aux demandes des clients et fournir le support nécessaire.</p> <p>-Formation et sensibilisation : Nous proposerons des sessions de formation et de sensibilisation aux clients sur l'utilisation de notre drone, afin de nous assurer que nos clients comprennent comment utiliser notre service.</p> <p>-En fournissant un contenu précieux : en fournissant un contenu précieux aux clients, tels que des articles, des guides et des conseils utiles liés à l'utilisation de notre solution, cela renforcera la confiance et montrera aux clients que nous sommes des experts dans le domaine.</p> <p>-Réponse rapide : en assurant une réponse rapide à toute demande ou plainte que nous recevons, la réponse immédiate contribue à établir une relation solide et améliore la satisfaction de la clientèle.</p> <p>-Les techniques d'analyse graphique peuvent également être utilisées pour comprendre les besoins des clients et anticiper leurs tendances et leurs demandes.</p>	كيف تدير علاقاتك مع العملاء؟
---	------------------------------

-Les réseaux sociaux.  
-des conventions.  
-site Web.

ماهية أهم البرامج التي ستعتمد عليها في ادارة  
العلاقة مع الزبون

**Microsoft Dynamics**  
**Monday CRM**  
**Zoho CRM**

.....الخ

## 1. هيكل التكاليف structure Costs

En DZD	structure Costs هيكل التكاليف
50 000 دج	تكاليف التعريف بالمنتج أو المؤسسة Frais d'établissement
60 000 دج	تكاليف الحصول على العدادات ( الماء- الكهرباء .....)(Frais d'ouverture de compteurs (eaux-gaz-....))
0 دج	تكاليف (التكوين- برامج الاعلام الالي المختصة) Logiciels, formations
20 000 دينار جزائري	تكاليف براءة الاختراع و الحماية الصناعية و التجارية Dépôt marque, brevet, modèle
0 دج	تكاليف الحصول على تكنولوجيا او ترخيص استعمالهاDroits d'entrée
0 دج	شراء الأصول التجارية أو الأسهم Achat fonds de commerce ou parts
40 000×12 = 480 000 دج	الحق في الإيجار Droit au bail
0 دج	وديعة أو وديعة تأمين Caution ou dépôt de garantie
0 دج	رسوم إيداع الملفات Frais de dossier
0 دج	تكاليف الموثق-المحامي-. Frais de notaire ou d'avocat
40 000 دج	تكاليف التعريف بالعلامة و تكاليف قنوات الاتصال Enseigne et éléments de communication
0 دج	شراء العقارات Achat immobilier
300 000 دج	الأعمال والتحسينات الاماكن Travaux et aménagements
5 500 000 دج	الألات- المركبات- الاجهزة Matériel
250 000 دج	تجهيزات المكتب Matériel de bureau
0 دج	تكاليف التخزين Stock de matières et produits
0 دج	التدفق النقدي ( الصندوق) الذي تحتاجه في بداية المشروع. Trésorerie de départ.
6 700 000 دج	= GLOBAL المجموع

2. نفقاتك أو التكاليف الثابتة الخاصة بمشروعك

En milliers DZD						نفقاتك أو التكاليف الثابتة الخاصة بمشروعك
PREVISION			REALISATION			
N	N+1	N+2	N	N-1	N-2	
location 100 000 دج						التأمينات Assurances
= 36 000 دج 3000×12						الهاتف و الانترنت Téléphone, internet
0 دج						اشتراكات أخرى Autres abonnements
365 000 دج 1000×365=						الوقود و تكاليف النقل Carburant, transports
200 000 دج						تكاليف التنقل و Frais de déplacement et hébergement المبيت
40 000 دج 10 000×4=						فواتير الماء – الكهرباء- الغاز Eau, électricité, gaz
0 دج						التعاضدية الاجتماعية Mutuelle
0 دج						صيانة المعدات والملابس Entretien matériel et vêtements
50 000 دج						تنظيف المباني Nettoyage des locaux
50 000 دج						ميزانية الإعلان Budget publicité et communication والاتصالات
841 000 دج						GLOBAL المجموع =

3. مصادر الإيرادات Revenue Stream

مصادر الإيرادات Revenue Stream	
0 دج	المساهمة الشخصية أو العائلية Apport personnel ou familial
0 دج	التبرعات العينية Apports en nature (en valeur)
0 دج	قرض رقم 1 اسم البنك Prêt n°1 (nom de la banque)
0 دج	قرض رقم 2 اسم البنك Prêt n°2 (nom de la banque)
0 دج	قرض رقم 3 اسم البنك Prêt n°3 (nom de la banque)
0 دج	Subvention n°1 (libellé) منحة 1
0 دج	Subvention n°2 (libellé) منحة 2
0 دج	Autre financement (libellé) تمويل آخر
0 دج	GLOBAL المجموع =

بيع المنتج في السنة الأولى  
Votre Chiffre d'affaires de la Première Année

رقم الأعمال	سعر الخدمة	عدد الفئة المستهدفة	أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الأولى
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 1Mois (N)
1 000 000	50 000	20	28	الشهر 2Mois (N+1)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 3Mois (N+2)
1 000 000	50 000	20	30	الشهر 4Mois (N+3)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 5Mois (N+4)
1 000 000	50 000	20	30	الشهر 6Mois (N+5)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 7Mois (N+6)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 8Mois (N+7)
1 000 000	50 000	20	30	الشهر 9Mois (N+8)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 10Mois (N+9)
1 000 000	50 000	20	30	الشهر 11Mois (N+10)
1 000 000	50 000	20	31	الشهر 12Mois (N+11)
12 000 000	600 000	240	365	المجموع دج = GLOBAL
% 120 000	النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الأولى؟			

المجموع = 12.000.000 دينار جزائري.

$$. \quad 120\,000 = 100 \div 1 \times 12\,000\,000$$

النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر للسنة الأولى؟ 1%

بيع المنتج في السنة الثانية  
Votre Chiffre d'affaires de la Deuxième Année

رقم الأعمال	سعر الخدمة	عدد الفئة المستهدفة	أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الثانية
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 1Mois (N)
2 400 000	80 000	30	28	الشهر 2Mois (N+1)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 3Mois (N+2)
2 400 000	80 000	30	30	الشهر 4Mois (N+3)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 5Mois (N+4)
2 400 000	80 000	30	30	الشهر 6Mois (N+5)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 7Mois (N+6)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 8Mois (N+7)
2 400 000	80 000	30	30	الشهر 9Mois (N+8)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 10Mois (N+9)
2 400 000	80 000	30	30	الشهر 11Mois (N+10)
2 400 000	80 000	30	31	الشهر 12Mois (N+11)
28 800 000	960 000	360	365	GLOBAL المجموع دج =
% 2 880 000	النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثانية؟			

النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثانية 10 % = 2 880 000 %

$$2\ 880\ 000\ \% = 100 \div 10 \times 28\ 800\ 000$$

النسبة المئوية للزيادة في حجم الاعمال للسنة الأولى و الثانية : % 3 000 000 = 2 880 000 + 120 000

بيع المنتج في السنة الثالثة

Votre Chiffre d'affaires de la Troisième Année

رقم الأعمال	سعر الخدمة	عدد الفئة المستهدفة	أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الثانية
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N) 1Mois
4 800 000	120 000	40	28	الشهر (N+1) 2Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+2) 3Mois
4 800 000	120 000	40	30	الشهر (N+3) 4Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+4) 5Mois
4 800 000	120 000	40	30	الشهر (N+5) 6Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+6) 7Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+7) 8Mois
4 800 000	120 000	40	30	الشهر (N+8) 9Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+9) 10Mois
4 800 000	120 000	40	30	الشهر (N+10) 11Mois
4 800 000	120 000	40	31	الشهر (N+11) 12Mois
<b>57 600 000</b>	<b>1 440 000</b>	<b>480</b>	<b>365</b>	<b>المجموع دج = GLOBAL</b>
<b>% 11 520 000</b>	<b>النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثالثة؟</b>			

**المجموع 57 600 000 دينار جزائري.**

**النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثالثة؟ 20% المجموع = % 11 520 000**

## 5. تطور حجم رقم الأعمال في السنة

النسبة المئوية %	الزيادة في حجم الأعمال
10%	بين السنة 1 والسنة 2
10%	بين السنة 2 والسنة 3
20%	GLOBAL المجموع =

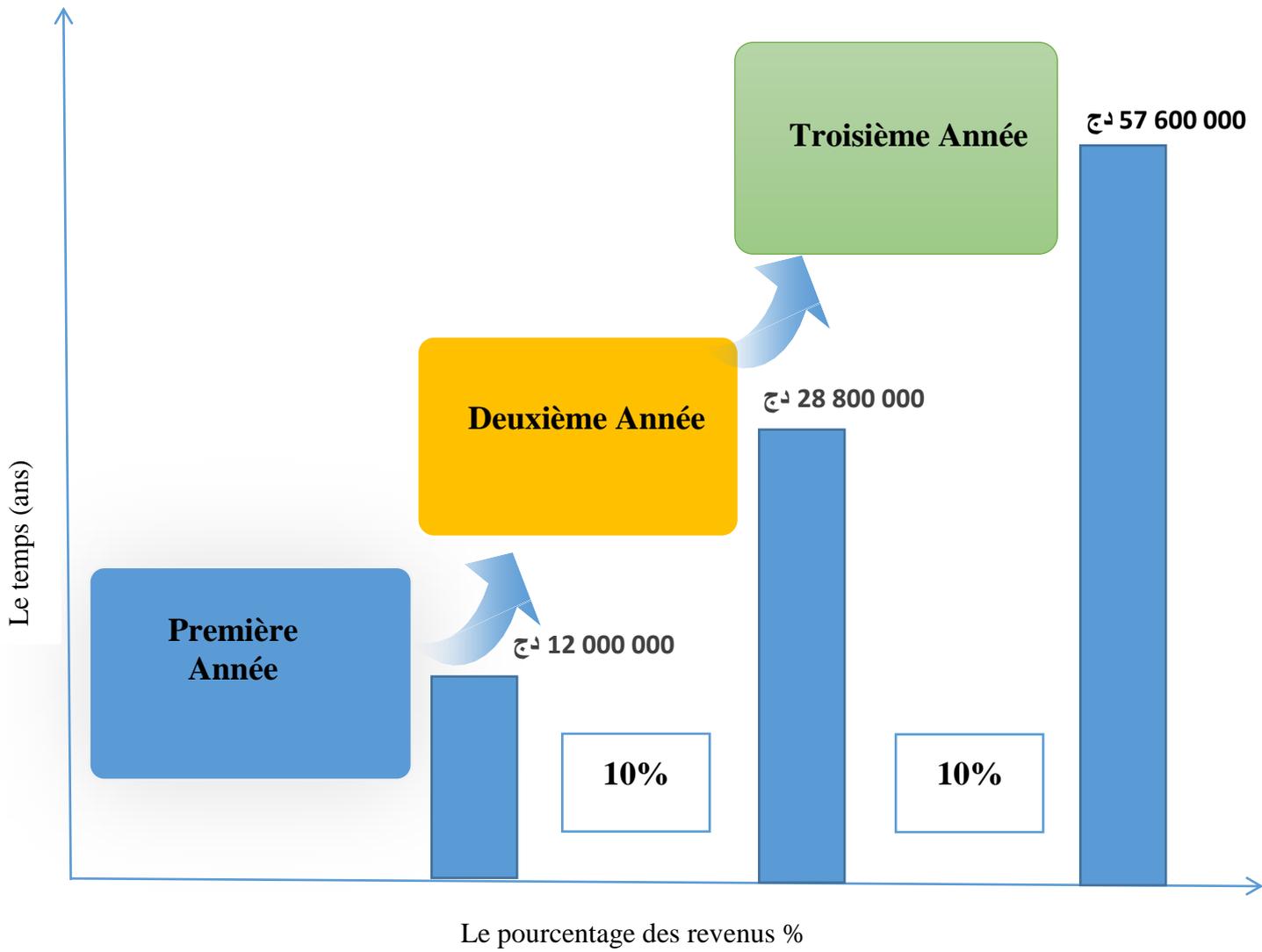
## 6. حاجتك لرأس المال العامل

الأيام les jours	متوسط مدة Durée moyenne الاعتمادات الممنوحة للعملاء بالأيام
0-ج	des crédits accordés aux clients en jours
0-ج	ديون الموردين بالأيام des dettes fournisseurs en jours
0-ج	GLOBAL المجموع =

## 7. رواتب الموظفين و مسؤولين الشركة

صافي أجور المسؤولين Rémunération nette dirigeant	رواتب الموظفين Salaires employés	رواتب الموظفين و مسؤولين الشركة
العام الأول 0 دينار، العام الثاني 45000 دينار، العام الثالث 60000 دينار.	0 ج	CHIFFRE D'AFFAIRES
105000 ج	0 ج	GLOBAL المجموع =

# تطور حجم الأعمال في السنوات الثلاث



---

## *Bibliographie*

---

- [1] Hassanalian et Abdelkefi, Classifications, applications, and design challenges of drones, progress in aerospace sciences, 2017.
- [2] Wang, Y; Liu, J. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems, Chinese science bulletin, vol.57, pp.3409-3418, 2012.
- [3] Department of defense (USA): unmanned systems integrated roadmap: FY 2013-2038, ref. number 14-S-0553, 2013.
- [4] Jitendra R. Raol, Jatinder Singh: Flight Mechanics Modeling and analysis-CRC-Press, 2008.
- [5] R. C. Nelson, Flight stability and automatic Control. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill, 2nd ed., 1998.
- [6] Durham Wayne, John Wiley & Sons: Aerospace series (Chichester England)-Aircraft flight dynamics and control, 2013.
- [7] M.V. cook, John Wiley & Sons: Flight Dynamics principles. New York, 1997.
- [8] Mattia Giurato: Design, integration and control of a multicopter UAV platform. Master's thesis, politecnico di Milano, 2015.
- [9] University of Sydney, 2006. URL <http://www.mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal-dvdonly/aero/propeller/prop1.html> (consulté le 20 mai 2023).
- [10] Robert F Stengel: Flight dynamics. Princeton university press, 2015.
- [11] Britannica, n.d. <https://www.britannica.com/Unmanned-aerial-vehicle-evolution-and-applications>, 8 novembre 2019 (consulté le 28 mai 2023).
- [12] Tesla Radio, l'évolution et l'histoire complète des drones, <https://www.propelrc.com>, 11 Mai 2023 (consulté le 13 juin 2023).

- [12] Gerald Pearson, Daryl Chapin et André Noth: l'histoire de l'aviation solaire, juillet 2008.
- [13] Frank Kreith, D. Yogi Goswami: handbook of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2007.
- [14] Bertrand Kirsch, Olivier Montagnier: maitriser la conception des drones solaires à voilure souple, Technologie et innovation, 2018.
- [15] Guinness World Records, le Zéphyr a réussi le plus long vol de l'histoire, 15 juillet 2022.
- [16] Business Insider Intelligence, <https://iltrad.gov.il>, 18 mars 2020 (consulté le 24 avril 2023).
- [17] Randal W. Beard & Timothy W. McLain : Navigation, Guidance and control of Small and Miniature Air Vehicles, 26 février 2012.
- [18] B. Etkin and L.D. Reid : Dynamics of flight : Stability and control. John Wiley & sons, 1996.
- [19] J. Roskam : Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls, Part I & II. Lawrence, Kansas : DARcorporation, 1998.
- [20] F. Chollet, Deep Learning with Python. Manning, 2017.
- [21] R. Airola et K. Hager, « Image Classification, Deep Learning and Convolutional Neural Networks », C-level thesis, Karlstad University, 2017.
- [22] « Object Recognition Vs Object Detection Vs Image Segmentation|Data Science and Machine Learning ». <https://www.kaggle.com/getting-started/169984> (consulté le 4 juin 2023).
- [23] R. Gandhi, « R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO—Object Detection Algorithms », Medium, 9 juillet 2018. <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e> (consulté le 4 juin 2023).
- [24] R. B. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, et J. Malik, « Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation », 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 580-587, 2014, doi: 10.1109/CVPR.2014.81.

- [25] R. Girshick, « Fast R-CNN », in Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2015, p. 1440-1448.
- [26] S. Ren, K. He, R. Girshick, et J. Sun, « Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks », IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, *vol.* 39, no 6, p. 1137-1149, 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [27] T.R. Wanasinghe et al: Digital Twin for the Oil and Gas Industry, 1 juin 2020.
- [28] Colomina, I. and Molina, P. Unmanned Aerial Systems for photogrammetry and remote sensing, 2014.
- [29] Fingas M, Brown CE: A Review of Oil Spill Remote Sensing, 2018.
- [30] Phil Kim, MATLAB Deep Learning, with Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence.