

# Conception des aéronefs – Drones et concepts d'avions industrialisés très économiques (partie 1/2)

Michel KIEFFER<sup>1</sup>

Édité le  
22/09/2025

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

<sup>1</sup> A partir de fin 2025 : fondateur de la société C-TECAT dédiée à la transition énergétique dans le domaine aéronautique et autres moyens de transport (société en cours de création : formations, conseils, conception d'aéronefs).

Précédemment : enseignant chercheur associé, chargé de la construction et du développement de la spécialisation aéronautique, transports et énergétique du Coursus Master Ingénierie Aéronautique, Transport et Énergétique, Université Paris Nanterre, UFR CITEC, CMI ATE, 92001 Nanterre Cedex, France.

Cofondateur et président de la société HKW-aero, conception et production d'avions légers.

Cette ressource fait partie du N° 117 de La Revue 3EI du 4<sup>ème</sup> trimestre 2025.

Cet article présente les travaux réalisés notamment par les étudiants du Coursus Master Ingénierie Aéronautique, Transports et Énergétique, Université Paris Nanterre en partenariat avec différents industriels. Ces derniers ont apporté leurs conseils et mis à disposition leurs moyens. Cet article constitue la première partie d'une étude dans laquelle le processus de conception d'un avion, son dimensionnement, sa réalisation, les essais au sol et les essais en vol sont décrits. L'accent est mis sur la réduction de la durée de conception et des coûts de production. Un second article [6] permettra de présenter les aéronefs conçus dans le cadre de cette étude.

## 1 - Introduction

Cette présentation développe la conception des aéronefs et leurs réalisations effectives. Des projets aboutis sont soumis à l'épreuve de la réalité. Ainsi, les étudiants sont familiarisés avec l'itération théorie-application propre aux projets aboutis.

Un autre aspect concerne l'industrialisation, les étudiants conçoivent leurs systèmes à l'image de tous projets industriels produits en nombre. Il s'agit donc de prendre en compte la reproductibilité dès la conception initiale, démarche qui va bien au-delà d'un unique prototype.

La « réduction des coûts par la simplification des systèmes » est au cœur de ces conceptions. Il s'agit d'imaginer des solutions très simples pour répondre à des problèmes complexes, exercice difficile et clé majeure de la compétitivité dans les applications industrielles.

## 2 - Vol vertical versus avion

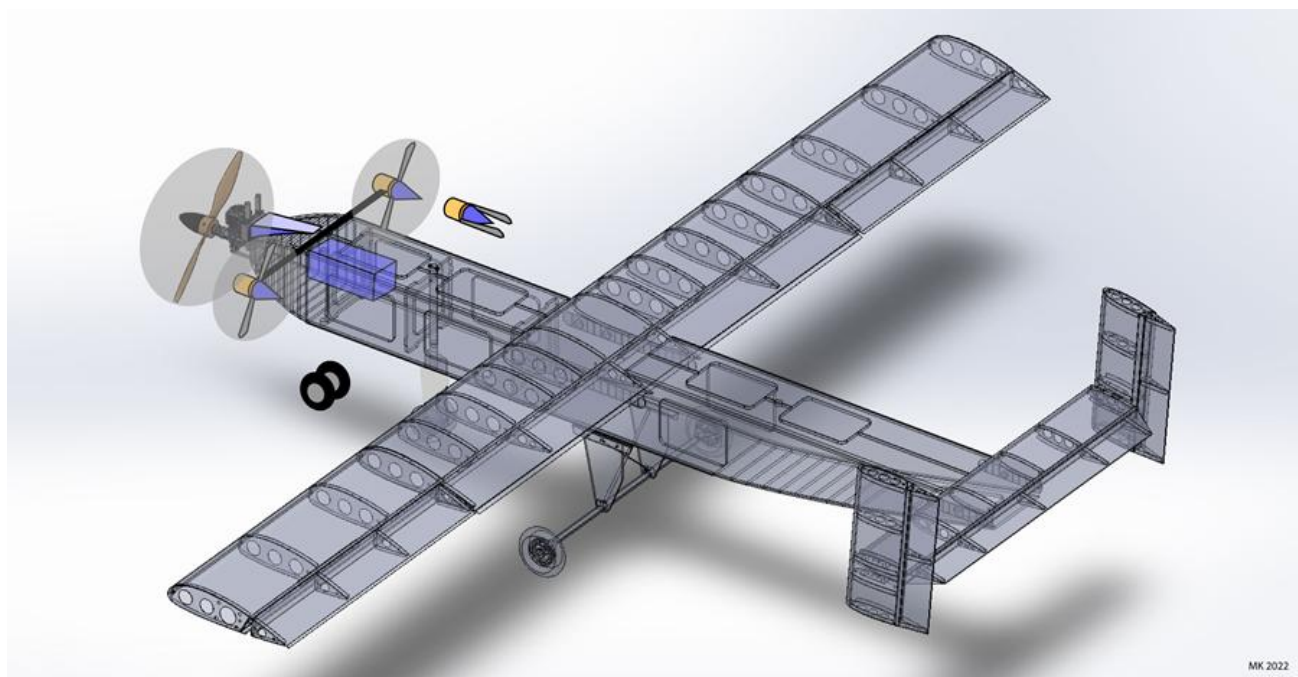
Le vol vertical présente pour avantage sa facilité de mise en œuvre. En revanche, un aéronef de configuration avion permet de voler plus vite, plus loin, embarque une masse utile supérieure, consomme moins d'énergie, et est moins coûteux à produire... Toutefois, le recours à une piste ou à un champ de planéité correcte est nécessaire. La longueur nécessaire au décollage peut être réduite avec une aile hypersustentée associée à une puissance installée élevée.

La solution imaginée, hybride à moteurs non liés (avions 4, 5 et dérivés), répond à ce besoin. Cette solution se caractérise par un « boost » électrique pour réduire les temps d'accélération donc les distances de décollage. La propulsion électrique est complétée par une propulsion thermique, optimisée pour le vol en croisière, afin d'accéder à des autonomies conséquentes. Pour que la masse des batteries ne dégrade pas le rayon d'action ou la masse utile de l'avion, leur capacité est limitée à trois minutes. Cette durée permet de décoller et d'atteindre environ mille mètres. Ainsi, ces avions hybrides à moteurs non liés décollent en moins de 50 m pour les plus légers tout en ayant des distances franchissables conséquentes. Ce principe et ses applications sont développés dans la deuxième partie de cette présentation.

**Définition :** *l'hypersustentation consiste à réaliser une aile ayant la capacité à augmenter le coefficient de portance pendant les phases de décollage et d'atterrissage. Ainsi les vitesses et les distances de décollage sont réduites grâce à l'hypersustentation.*



Figure 1 : le vol vertical



MK 2022

Figure 2 : La configuration avion : plus vite, plus loin, plus de charge embarquée. Une aile hypersustentée associée à une forte puissance donne à l'aéronef une capacité STOL (Short Take-off and Landing aircraft)

### 3 - Le processus de conception avion

Concevoir un avion est un processus complexe qui nécessite une itération permanente entre théorie et application, l'une enrichissant l'autre (figure 3). Concevoir les essais au sol, les réaliser, constater les effondrements de structures des sous-ensembles puis de la structure complète, en comprendre les causes, reconcevoir etc. est aussi complexe que la conception initiale de l'avion [3].

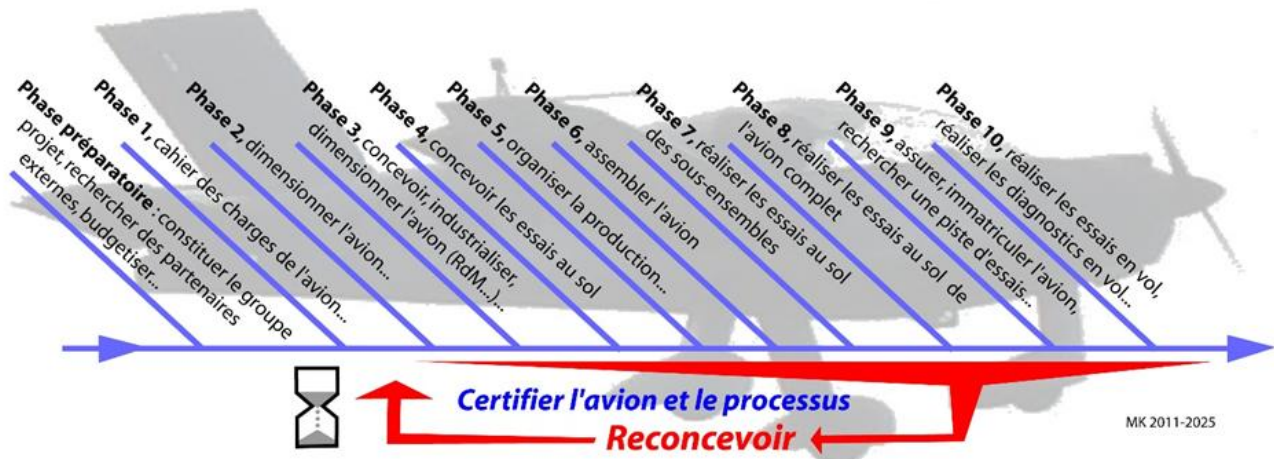


Figure 3 : Synoptique de la conception d'un avion

Précisons les différentes phases de la figure 3 :

En **phase préparatoire** (cf. paragraphe 4) il s'agit de constituer le groupe projet, rechercher des partenaires externes, budgétiser... Cette phase consiste à identifier et à réunir l'ensemble des compétences nécessaires à l'aboutissement du projet. Deux risques se présentent, soit manquer de compétences avec un groupe projet sous dimensionné, soit avoir un groupe projet sur dimensionné ce qui dégrade le coût et la durée du développement. La budgétisation et le business plan sont intimement liés à cette phase.

En **phase 1** (cf. données d'entrée du paragraphe 5) on rédige le cahier des charges fonctionnel. Il s'agit de formaliser les besoins auxquels devra répondre l'avion : charge utile, vitesse de croisière, distance franchissable, coûts objectifs etc. Ce cahier des charges fixe aussi les critères de qualité objectifs définis par comparaison avec des avions proches existant (cf. paragraphe 6). Le cahier des charges peut être remis en cause au fil du développement effectif de l'avion.

La **phase 2** (cf. résultats du dimensionnement paragraphe 5) consiste à déterminer les caractéristiques de l'avion à partir du cahier des charges et des technologies envisagées.

Lors de la **phase 3** (cf. paragraphes 8 à 12) il faut concevoir, industrialiser, dimensionner l'avion (résistance des matériaux) ... Cette phase marque le point de départ de la conception effective de l'avion. La réduction des coûts par la simplification des systèmes et la gestion du temps sont au cœur du développement.

En **phase 4** (cf. paragraphe 13) on conçoit les essais au sol.

En **phase 5** (cf. paragraphe 9) on organise la production. L'organisation de la production se doit d'être la plus proche possible de la production industrielle post prototype.

La **phase 6** consiste en l'assemblage des sous-ensembles puis de l'avion.

En **phase 7** (cf. paragraphe 13) on réalise les essais au sol des sous-ensembles et on les reconçoit selon les résultats.

En **phase 8** (cf. paragraphe 13) on réalise les essais au sol de l'avion complet et on les reconçoit selon les résultats.

En **phase 9** il s'agit d'assurer, d'immatriculer l'avion, de rechercher un pilote d'essais et une piste d'essais.

La phase 10 (cf. paragraphe 14) permet de réaliser les essais en vol, de diagnostiquer et éventuellement de reconcevoir selon les résultats.

La certification, selon la réglementation aéronautique, est menée tout au long de ce processus de conception et d'industrialisation.

## 4 - Construire des chaînes de compétences et suivre un mode de gouvernance

Il s'agit tout d'abord d'identifier les compétences nécessaires à la réalisation du projet. Ces compétences sont réunies dans un groupe projet pluridisciplinaire :

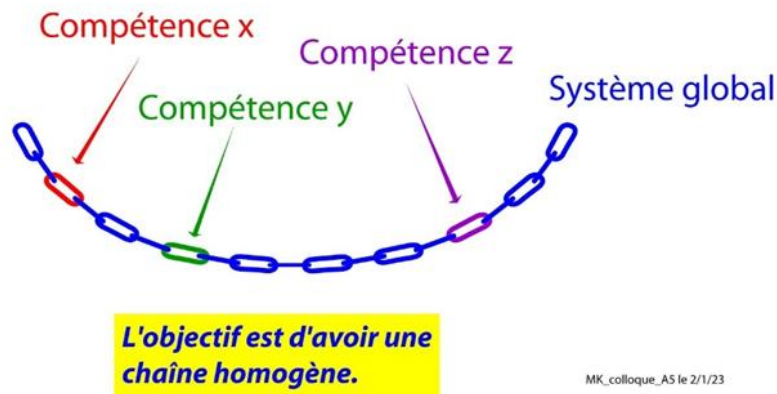
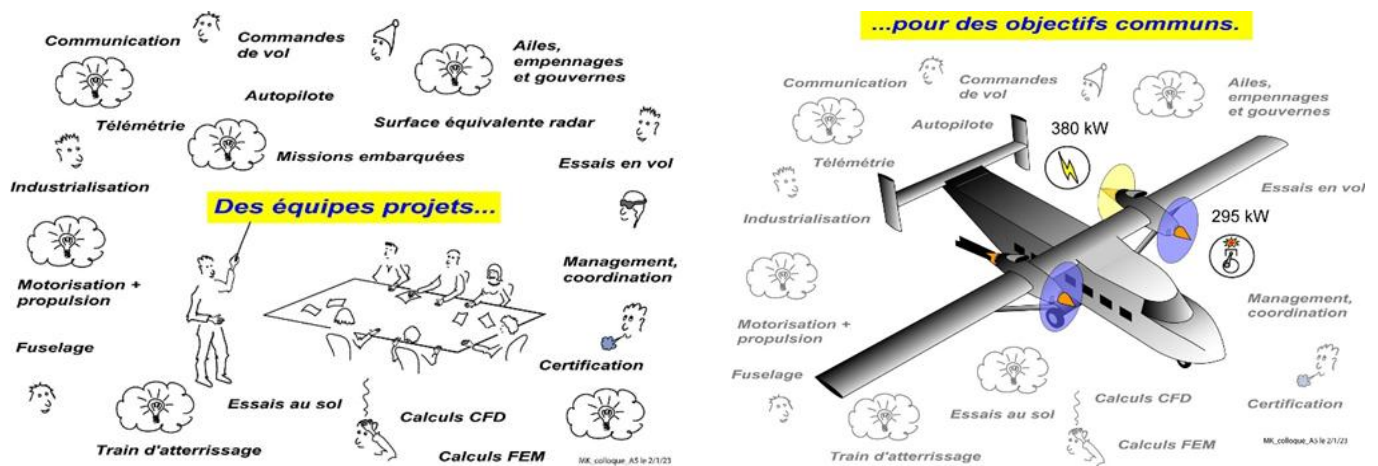


Figure 4 : Chaîne de compétence



Figures 5 : Le groupe projet

Ensuite, le mode de gouvernance consiste à mettre en œuvre des méthodes de créativité et à exploiter l'ensemble des compétences du groupe projet.

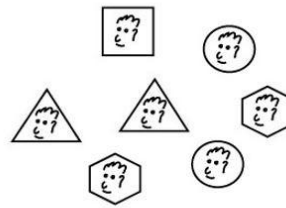
Chaque thème identifié fait l'objet de multiples solutions imaginées par le groupe. A ce stade, le groupe peut constituer un « carrefour stratégique » propre à chaque thème. Un carrefour stratégique représente différentes solutions en opposition entre elles ou, plus rarement, différentes solutions élémentaires combinables entre elles. L'objectif est d'être le plus exhaustif possible quant aux solutions imaginées pour chaque carrefour stratégique.

Ensuite, le groupe organise les carrefours stratégiques entre eux selon l'enchaînement, de carrefours stratégiques successifs, qui semble le plus opportun.

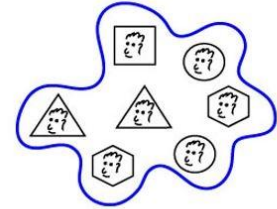
Reste à choisir les solutions pour chaque carrefour stratégique selon l'ordre défini précédemment. Dans certains cas, des carrefours stratégiques sont liés entre eux. C'est à dire qu'il s'agit de choisir simultanément des combinaisons de solutions entre carrefours stratégiques.

## Mode de gouvernance :

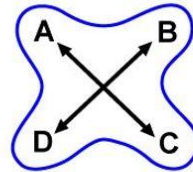
Réunir les compétences nécessaires (pluridisciplinarité) :



Mettre en oeuvre des méthodes de créativité, l'objectif est d'exploiter l'ensemble des compétences du groupe projet :



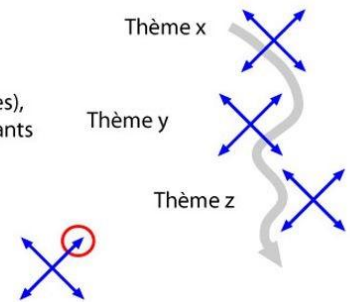
Ainsi, les solutions imaginées sont plus nombreuses, l'exhaustivité est un objectif atteignable :



Impliquer tous les membres du groupe projet pour construire les meilleures décisions.

### Processus global quel que soit le sujet :

- 1- Formuler le BESOIN (CdCF).
- 2- Imaginer le maximum de SOLUTIONS, identifier les thèmes (= carrefours stratégiques), repérer les thèmes interdépendants et l'ordre de traitement des différents thèmes.
- 3- CHOISIR les solutions pour chaque thème en impliquant l'ensemble des compétences concernées.



**La quasi exhaustivité des solutions imaginées et l'implication de tous ouvre la porte aux meilleurs choix.**

MK

Figure 6

L'objectif majeur est d'impliquer la totalité des compétences du groupe projet. Les choix sont donc construits collectivement. Procéder ainsi fiabilise grandement la pertinence de la réflexion du groupe projet.

Des fiches techniques détaillent ce processus, voir le site Cocoyane [5].

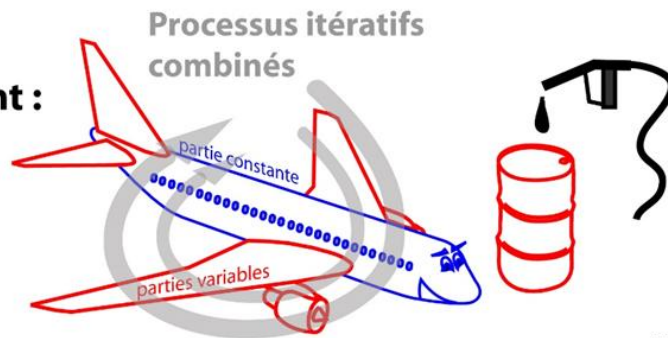
## 5 - Dimensionnement d'un avion

Le dimensionnement d'un avion est basé sur un processus combinant plusieurs itérations afin de définir les caractéristiques de l'avion (puissance installée, masse de carburant, masse au décollage ou MTOW, surface alaire...) à partir d'un cahier des charges et de technologies données. Ce processus permet aussi de reconstituer rapidement les caractéristiques manquantes de tout type d'aéronef [1].

### Données d'entrée :

QMpl : qualité massique planeur [/]	Cfe : coefficient équivalent plaque plane [/]	A : allongement [/]
Zcr : altitude de vol [km]	Vso : vitesse minimale de sustentation [km/h]	e : coefficient d'Osswald [/]
Dfr : dist. franchissable (maxi range) [km]	CZmax : coefficient de portance max [/]	Rhi : rendement hélice ou fan installé [/]
Vcr : vitesse de croisière [km/h]	SMnp : surface mouillée non portante [m <sup>2</sup> ]	Msp : masse spécifique [kg/kW]
Mu : masse utile [kg]	Sraf : surface recouvrement aile fuselage [m <sup>2</sup> ]	Csp : consommation spécifique [kg/kWh]

### Dimensionnement :



### Le dimensionnement nous donne :

QM : qualité massique $Mv/Md$ [/]	Mc : masse de carburant [kg]	Se : surface des empennages [m <sup>2</sup> ]
TdC : taux de charge des moteurs [%]	Md (MTOW) : masse au décollage [kg]	SMT : surface mouillée totale [m <sup>2</sup> ]
Mm : masse des moteurs [kg]	MV : masse à vide [kg]	Pcr : puissance en croisière [kW]
TdV : temps de vol [h]	Sa : surface alaire [m <sup>2</sup> ]	Pinst : puissance installée [kW]

Figure 7 : Données prises en compte dans le dimensionnement d'un avion

Pratiquement, cette phase peut déboucher sur une remise en cause du cahier des charges fonctionnel initial. Par exemple, si la puissance installée initialement envisagée n'est pas compatible avec les performances souhaitées. Dans ce cas, il est nécessaire de remettre en cause le cahier des charges initial ou les technologies initialement envisagées. Ceci en restant proche des limites de coûts initialement prévues et en veillant à garder les autres caractéristiques de l'avion dans des limites acceptables.

## 6 - Critères de qualité d'un aéronef

Le processus précédent prend en compte les critères de qualité d'un aéronef dont les limites sont définies par les lois de la physique.

Il s'agit alors :

- De définir les limites de ces critères de qualité ;
- D'analyser le positionnement d'un type d'aéronef donné en regard de ces différents critères ;
- De concevoir l'aéronef en se rapprochant des avions les plus efficaces.

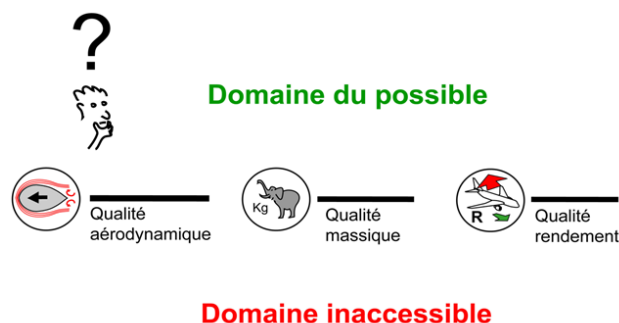


Figure 8 : Critères de qualité et limites physiques

Ces différents critères de qualité sont liés entre eux. Par exemple une amélioration du rendement de la motorisation au prix d'une augmentation de sa masse peut conduire à une augmentation du besoin en énergie de l'avion. Les modèles de dimensionnement mis en œuvre quantifient ces liens avec précision. Il est ainsi possible de trouver l'optimal en réponse à un cahier des charges donné.

## 7 - Viser d'autres énergies ?

Les problématiques du dérèglement climatique mettent en évidence les inconvénients des énergies fossiles (essence, gasoil ou kérosène). Il est alors intéressant d'évaluer le potentiel des sources d'énergies moins carbonées ainsi que leurs limites.

**Batteries électriques** : à caractéristiques, performances et masse d'énergie identiques, la distance franchissable d'un avion alimenté par des batteries est environ trente fois moins élevée que l'autonomie d'un avion doté d'un moteur thermique. Ce rapport prend en compte l'énergie contenue dans les batteries et l'excellent rendement d'une chaîne de propulsion électrique.

C'est pourquoi le design et les performances d'un avion électrique sont très différents de ceux d'un avion classique, notamment un allongement élevé (voir figure 11) et une vitesse de croisière réduite.

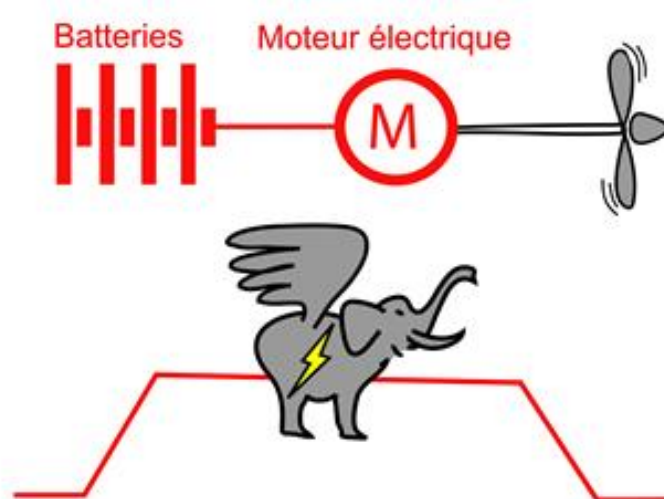


Figure 9 : Problème de l'énergie massique des batteries

**Cellules photovoltaïques** : même dans les meilleures conditions d'ensoleillement, la puissance est très insuffisante pour faire voler un aéronef classique. Toutefois, un avion solaire est envisageable avec une charge utile limitée et en concevant un avion adapté à une vitesse très réduite, c'est à dire avec une charge alaire réduite et un allongement élevé (voir figure 11). Par ailleurs, la faible masse volumique de l'air dans la stratosphère ne permet plus à des moteurs thermiques de fonctionner. Les vols stratosphériques nécessitent donc une alimentation purement photovoltaïque aux réserves près énoncées ci-dessus. Un drone électro-solaire stratosphérique a été conçu dans cet esprit (figure 10). Le démonstrateur de ce drone, testé à basse altitude, est présenté dans la deuxième partie.

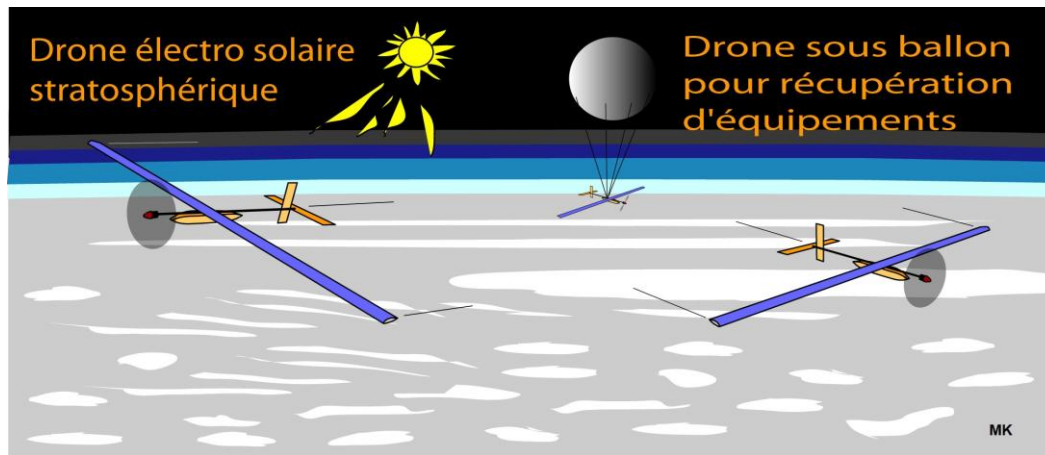


Figure 10 : Drone électro-solaire

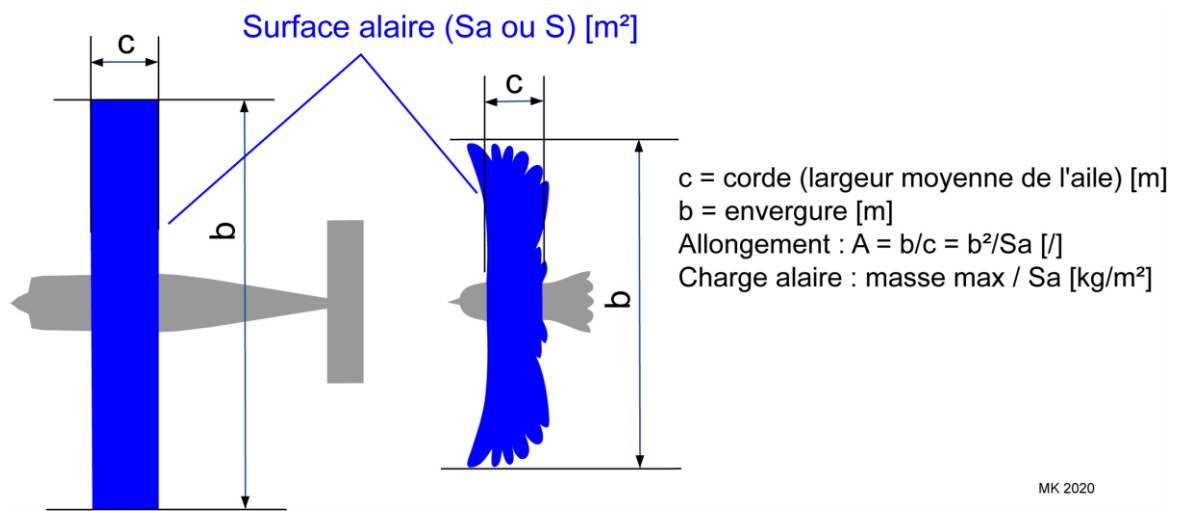


Figure 11 : Allongement, surface alaire, charge alaire

**Hydrogène** : Bien que potentiellement intéressant, le dihydrogène est difficilement stockable dans un avion du fait principalement de la complexité opérationnelle (plus particulièrement pour la solution LH2) et de la masse très élevée des réservoirs sous pression (350 ou 700 b).

En ce qui concerne la transformation de l'hydrogène en force de propulsion : l'analyse des rendements des chaînes de propulsion montre que la solution de la pile à combustible (PAC) s'avère plus intéressante qu'une solution brûlant directement l'hydrogène dans un moteur à pistons ou dans une turbomachine.

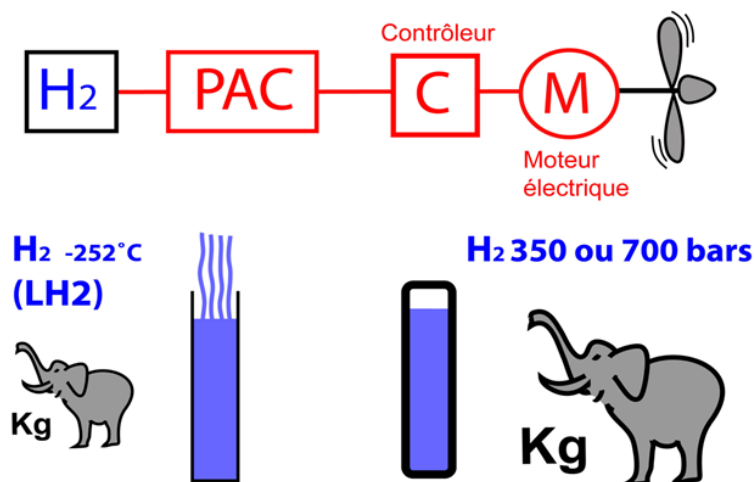


Figure 12 : Problème du stockage du dihydrogène

**Agrocarburants et plus largement les carburants d'aviation durables (SAF) :** les quantités productibles sont loin des besoins de nos avions actuels. Par exemple, un unique plein d'agrocarburant d'un avion long-courrier nécessite plus de cent hectares de cultures (rappelons que la masse de carburant d'un avion long-courrier représente plus de 40% de sa masse au décollage). Dans ce contexte, il semble préférable de réserver les rares agrocarburants à d'autres usages.

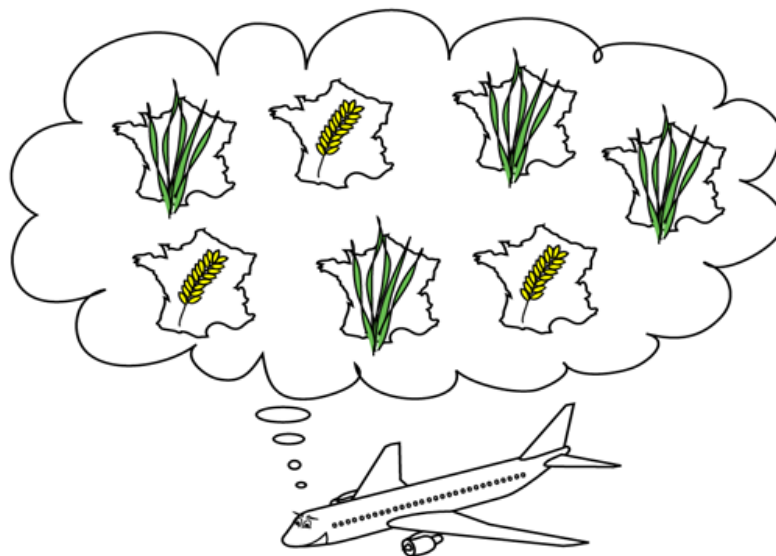


Figure 13 : La piste des agrocarburants

**En conclusion,** chaque « nouvelle énergie » présentée ci-dessus apporte son lot d'inconvénients en grande partie réhébitoraires. A contrario et quelle que soit l'énergie, la piste de loin la plus intéressante est de concevoir des aéronefs moins gourmands en énergie, à savoir avec des designs et des performances différentes (grand allongement, vitesse de croisière réduite...). Cette problématique est développée dans le lien [2] en annexe.

## 8 - Concevoir dans un esprit de réduction des coûts par la simplification des systèmes

La réduction des coûts par la simplification des systèmes est une démarche au cœur de nos conceptions. Il s'agit d'imaginer des solutions très simples pour répondre à des problèmes complexes, exercice difficile et clé majeure de la compétitivité des entreprises.

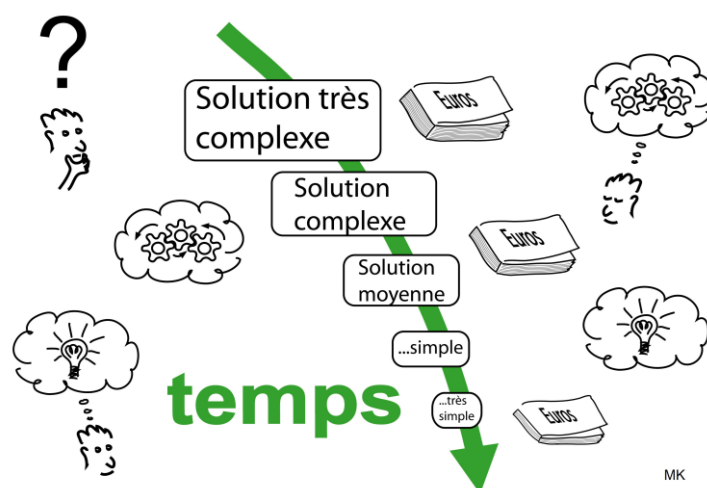


Figure 14 : Evolution vers la simplicité et la réduction des coûts

On peut prendre pour exemple la technologie imaginée pour l'aile : l'aile est continue et de section constante. De plus, les nervures de l'aile sont identiques entre la zone des ailerons et des volets (voir définitions figure 15). L'économie est donc conséquente en masse et en moyens de production : l'aile n'est pas interrompue dans la partie la plus sollicitée et nous n'avons qu'un unique outillage d'emboutissage des nervures. Cette solution permet par ailleurs d'avoir une même section pour les ailerons et pour les volets avec à nouveau un unique outillage pour réaliser les nervures.

Nos conceptions font l'objet de quantité de réflexions analogues : commandes de vols, train d'atterrissage, fuselage, verrière etc.

Les solutions imaginées sont reprises pour tous nos aéronefs constituant ainsi de réels facteurs d'économie.

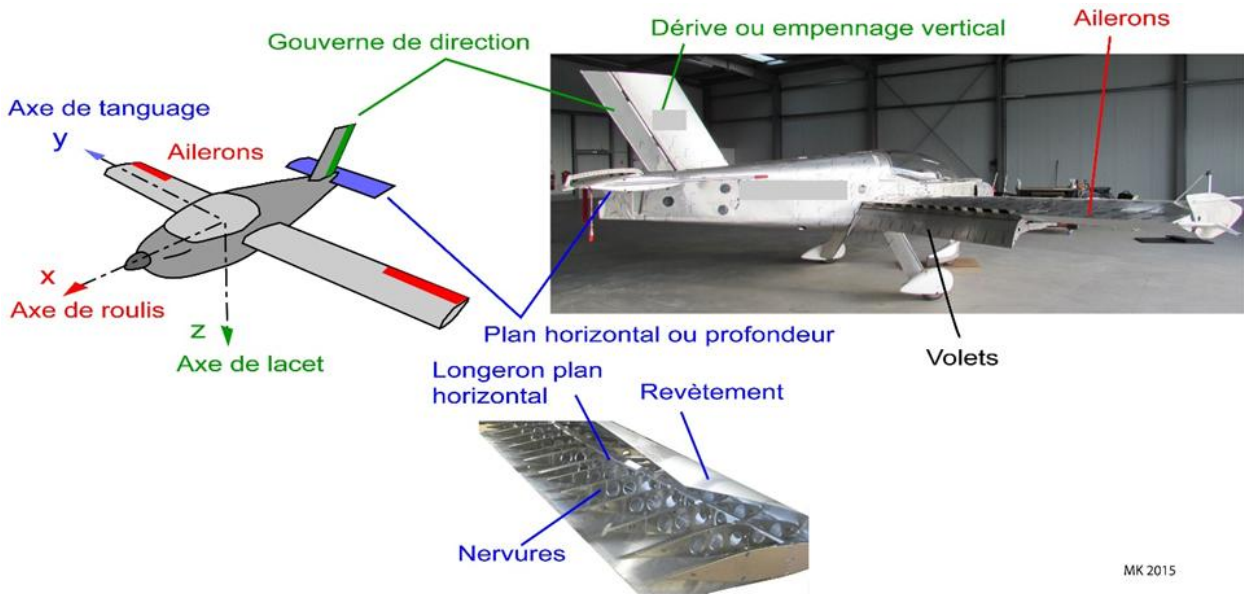


Figure 15 : Définitions

## 9 - Industrialiser dès la conception initiale

Réaliser un prototype du démonstrateur, le tester au sol et en vol puis répéter ce processus pour un prototype industrialisé revient à réaliser le travail deux fois (partie gauche de la figure 16). Ainsi, il est de loin préférable de s'affranchir d'un démonstrateur pour réaliser directement un prototype industrialisé, le gain de temps est conséquent (partie droite de la figure 16).



Figure 16 : L'industrialisation dès la conception initiale

## 10 - Gérer le temps et réduire les coûts de développement

Un projet aéronautique est par nature complexe et rencontre en permanence des imprévus. Ceci nécessite de remettre en cause en permanence les systèmes et les processus de conception. Ce côté aléatoire rend une planification initiale détaillée peu utile voire contre-productive. Cependant, il est utile de planifier sommairement le projet en se donnant des dates butoirs pour les grands sous-ensembles (aile, fuselage, commandes de vol ...).

Au-delà de la conception de la machine, il est indispensable de gérer au mieux le temps, les moyens humains et les matériels disponibles afin d'atteindre l'objectif principal. A savoir, disposer de l'aéronef dans les temps prévus avec les performances souhaitées. Ceci nécessite à tout instant de :

- S'interroger sur les ressources humaines et matérielles disponibles ;
- Repérer ce qui est de premier ordre et de second ordre.

En pratique, il est nécessaire d'imaginer en permanence des « modes dégradés » acceptables afin de pouvoir atteindre l'objectif dans des temps limités.

Ne pas procéder ainsi conduit à des dépassements conséquents des délais remettant en cause le projet. Nous sommes loin d'un plan prédéfini mais nous sommes dans une observation et une adaptation permanente. Ceci nécessite aussi d'analyser les solutions qui ont fait leurs preuves, de mettre en œuvre des méthodes de créativité et de prendre son temps... pour aller plus vite avec peu de moyens.

A titre d'exemple, l'avion 1 (figure 17) a été développé en moins de six mois alors que la durée de développement d'un avion léger industrialisé est en général de plusieurs années.



Figure 17 : Avion N°1

## 11 - Construire des gammes pour réduire les durées et les coûts de développement

Pour réduire les temps et les coûts de développement, l'idée forte est d'imaginer des technologies ré-employables pour différents types d'aéronefs. Par exemple :

- La technologie imaginée pour l'aile de nos avions est particulièrement intéressante et est reprise pour tous nos avions quelles que soient ses dimensions (surface alaire, allongement...);
- Les fuselages imaginés pour nos avions 3 à 6 sont d'une extrême simplicité et sont identiques et compatibles avec les différentes ailes et empennage développés ;
- Les systèmes de commandes et l'autopilote sont compatibles avec tous nos avions...

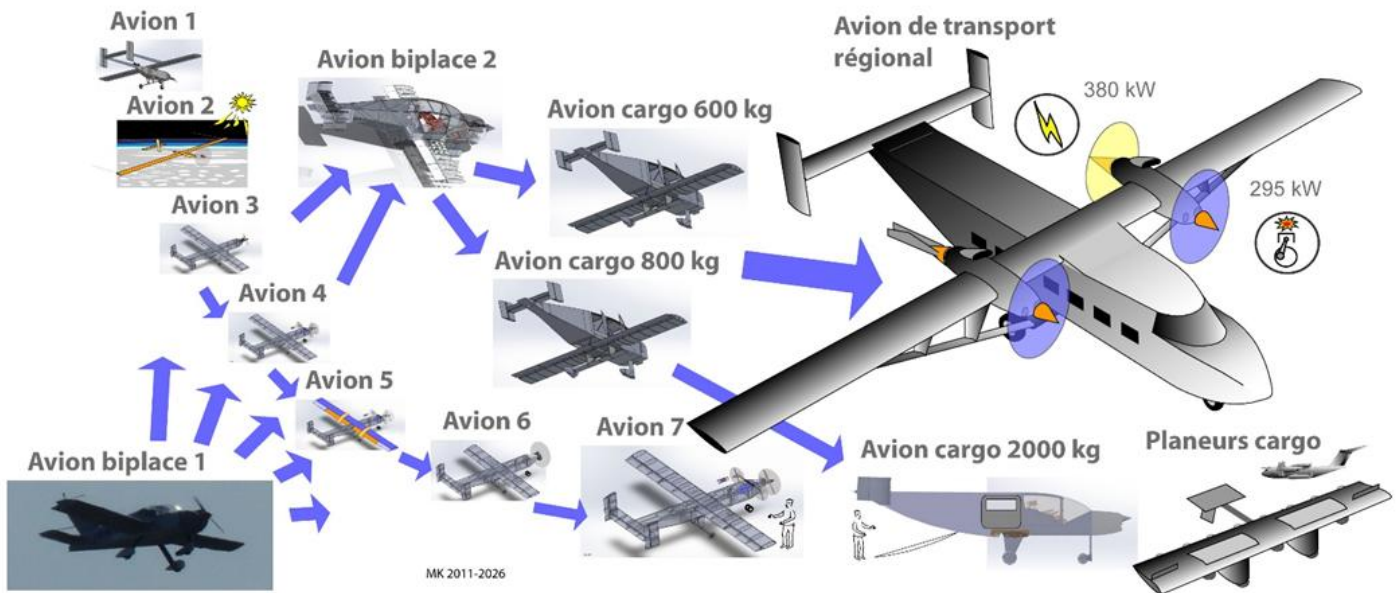


Figure 18 : Réemploi des technologies pour différents aéronefs

## 12 - Approche 100% numérique ou ...

Rien ne saurait remplacer la maîtrise de l'état de l'art et la capacité à réaliser des approximations rapides complétées si nécessaire par des approches numériques. Procéder ainsi est une clé majeure pour atteindre les objectifs rapidement et à moyens minimaux.

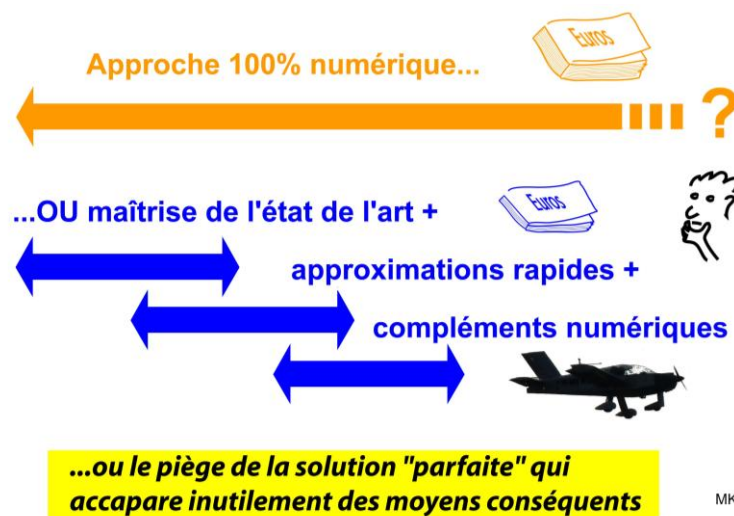


Figure 19 : Approche 100% numérique ou non ?

## 13 - Réaliser les essais au sol

Concevoir les essais au sol, les réaliser, constater les effondrements de structures des sous-ensembles puis de la structure complète, en comprendre les causes, reconcevoir etc. est aussi complexe que de concevoir l'avion [3].

Par expérience, la quasi-totalité des structures sont détruites avant d'atteindre les charges ultimes imposées par les essais au sol. Ces effondrements de structures ont pour cause dominante l'instabilité des matériaux qui sont par nature difficile à prédire par les calculs.

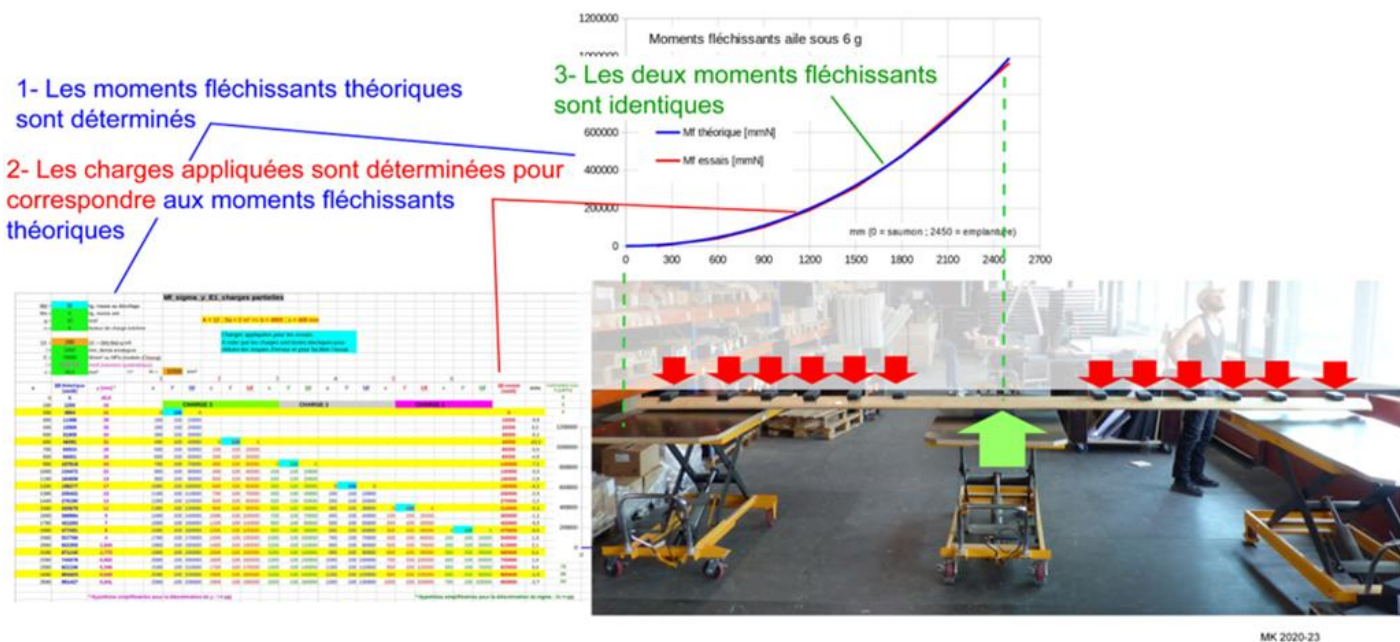


Figure 20 : Processus de dimensionnement et d'essais

Au-delà de la tenue de l'avion aux charges ultimes imposées par la réglementation aéronautique, un autre objectif est de quantifier le niveau de corrélation entre calcul et réalité (figure 20). Lorsque l'écart est raisonnable, inférieur à 10 à 20%, nous en déduisons que le calcul est réaliste. Dans le cas contraire, il est nécessaire de revoir la méthode de calcul.

Un autre aspect est de vérifier la liberté de mouvement des surfaces mobiles sous déformations maximales. Ce point est aussi pris en compte lors des dimensionnements et est un critère clé lors de la recherche de solutions pour les liaisons des surfaces mobiles.

## 14 - Réaliser les essais et les diagnostics en vol

Les essais en vol ont pour objectif de vérifier si les performances calculées correspondent à la réalité. Ceci est rarement avéré lors des premiers essais. D'où la nécessité d'en trouver la cause lors des diagnostics en vol puis d'imaginer des solutions correctives. Par exemple une traînée trop élevée ou un rendement propulsif trop faible. Nous voyons figure 21 la puissance nécessaire à l'avion pour voler à sa vitesse de finesse max :

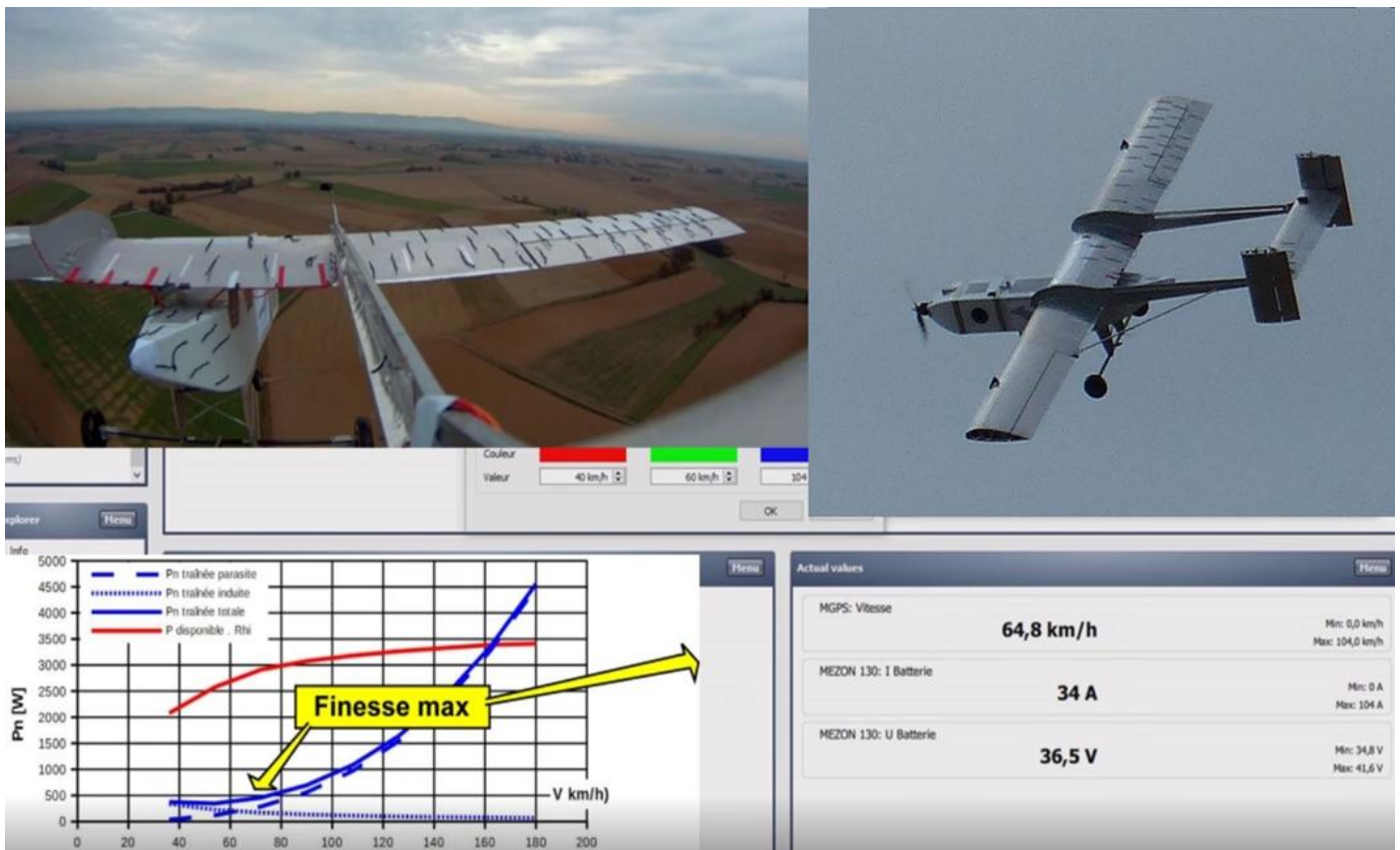


Figure 21 : Essais et diagnostics en vol

Un autre aspect consiste à vérifier si l'équilibre et la stabilité de l'avion, déterminés par calcul, sont conformes aux objectifs. Un défaut de stabilité conduit à la perte de l'avion avec une quasi-certitude. Par exemple, nous avons endommagé un avion par défaut de stabilité malgré nos calculs réalisés lors de la conception de l'avion. Ce problème a été corrigé par modification du centrage de l'avion en augmentant la longueur du fuselage. Retenons que les calculs sont incontournables mais ne sont qu'une approximation plus ou moins juste de la réalité.

Parmi les nombreuses problématiques à résoudre, le comportement de l'avion aux limites du domaine de vol est un sujet majeur.

**Définition :** le décrochage d'une aile se produit lorsque le coefficient de portance maximal est atteint. Dans ce cas, nous avons un décollement de la couche limite avec pour effet une perte plus ou moins brutale de la portance et un risque majeur de perte de contrôle de l'aéronef. Notamment, une perte de contrôle en roulis débouche sur un départ en vrille avec la perte certaine de l'aéronef lorsqu'il est à basse hauteur.

Ainsi, il est nécessaire de limiter le risque de perte de contrôle en roulis par la conception de l'aile. La figure 22 présente le fonctionnement de générateurs de tourbillons qui permettent de s'assurer d'un meilleur contrôle de l'avion en roulis en cas de décrochage.

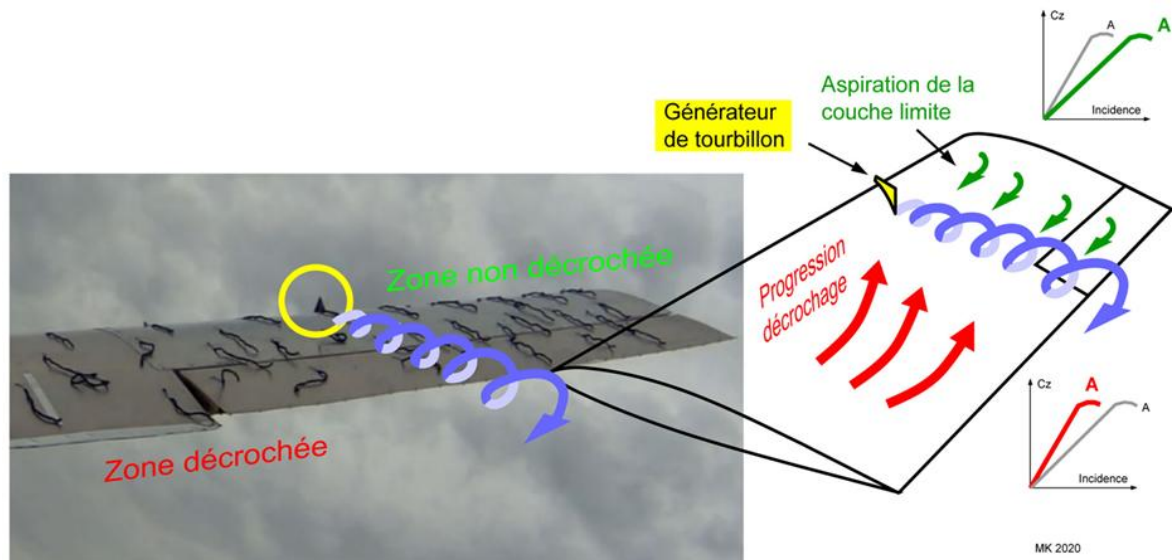


Figure 22 : Générateur de tourbillons

Les générateurs de tourbillons permettent en effet de :

- Ralentir la progression du décrochage vers les ailerons ;
- Réduire en partie l'allongement de l'extrémité de l'aile avec pour effet un décrochage à des incidences plus élevées dans la zone des ailerons

Le contrôle en roulis est aussi conditionné par le type de profil et par la forme de l'aile vue de dessus. Combiner ces différentes solutions sécurise le comportement de l'avion aux limites du domaine de vol [4].

Lors des essais en vol, de nombreuses données sont récupérées par télémétrie et par enregistrements. Ces données sont analysées en détail au terme de chaque vol d'essais (voir exemple figure 21).

## 15 - Autopilote, gestion des modes dégradés, atterrissage automatique...

Pour les avions 5, 6 et 7, les drones marins à foils, les drones cargo, le drone stratosphérique électro-solaire, le planeur cargo... nous cherchons à :

- Créer un autopilote robuste, adaptable et autonome ;
- Avoir la capacité de décollage automatique ;
- Assurer le vol de croisière stabilisé et le suivi d'une trajectoire programmée ;
- Prendre en compte des modes dégradés en cas de défaillances partielles ou totale ;
- Avoir la capacité de réaliser des atterrissages autonomes...

Le système permettra :

- Un pilotage à distance en mode téléopéré ;
- Une modification de la trajectoire en temps réel.

L'auto-pilote est en cours de développement avec un partenaire industriel.

## 16 - Solutions pour réduire la surface équivalente radar (SER)

L'avion 5.2 est précurseur d'avions à faible SER. L'aile est en composite fibre de verre et le fuselage est en bois. Les équipements internes feront l'objet d'une étude de SER en chambre anéchoïque (figure 23) :

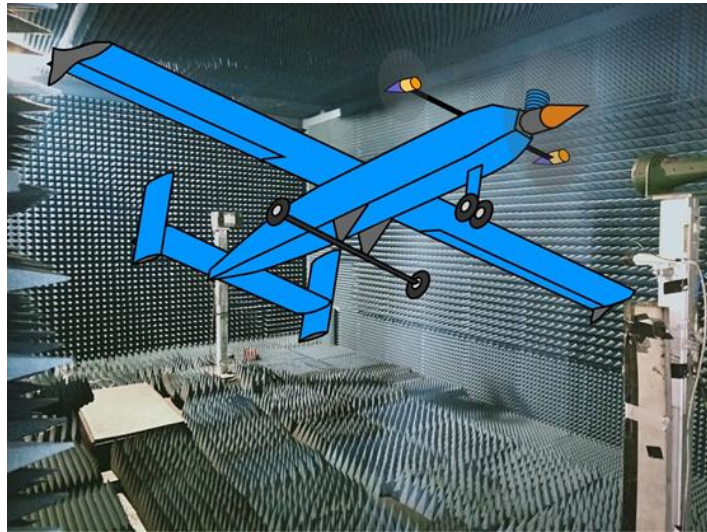


Figure 23 : Avion 5.2 représenté dans une chambre anéchoïque

## 17 - Conclusion de la première partie

Dans cette première partie, nous avons présenté les grands principes de la démarche enseignée aux étudiants pour concevoir, produire et tester des aéronefs industrialisés.

Dans la seconde partie nous présenterons les différents avions réalisés, les projets en gestation et différents concepts d'avions de transport.

### Références et documents complémentaires :

[1]: Lien vers la modélisation et la reconstitution des données manquantes d'aéronefs quels qu'ils soient, l'étude de cas concerne le B777-200 avec une digression vers des aéronefs atypiques : [https://www.hkw-aero.fr/MK\\_reconstitution\\_caracteristiques\\_aeronefs\\_2.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_reconstitution_caracteristiques_aeronefs_2.mp4)

[2]: [https://www.hkw-aero.fr/MK\\_3AF\\_conference\\_parties\\_1\\_et\\_2\\_2024.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_3AF_conference_parties_1_et_2_2024.mp4)

[3]: [https://www.hkw-aero.fr/pdf/MK\\_conference\\_materiaux\\_.pdf](https://www.hkw-aero.fr/pdf/MK_conference_materiaux_.pdf)

[4]: Lien vers des diagnostics en vol, voire plus particulièrement la recherche de la puissance à la vitesse de finesse max et l'analyse du comportement au décrochage de l'avion :

[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_diagnostics\\_en\\_vol\\_avion\\_1.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_diagnostics_en_vol_avion_1.mp4)

[5]: Lien vers les fiches techniques du mode de management de projet :

<https://www.cocyane.fr/index.html>

[6]: Conception des aéronefs - Drones et concepts d'avions industrialisés très économiques (partie 2/2), M. Kieffer, Septembre 2025,

[https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/conception-des-aeronefs-industrialises-economiques-partie2](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conception-des-aeronefs-industrialises-economiques-partie2)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay>

# Conception des aéronefs - Drones et concepts d'avions industrialisés très économiques (partie 2/2)

Michel KIEFFER<sup>1</sup>

Édité le  
29/09/2025

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

<sup>1</sup> A partir de fin 2025 : fondateur de la société C-TECAT dédiée à la transition énergétique dans le domaine aéronautique et autres moyens de transport (société en cours de création : formations, conseils, conception d'aéronefs).

Précédemment : enseignant chercheur associé, chargé de la construction et du développement de la spécialisation aéronautique, transports et énergétique du Coursus Master Ingénierie Aéronautique, Transport et Énergétique, Université Paris Nanterre, UFR CITEC, CMI ATE, 92001 Nanterre Cedex, France.

Cofondateur et président de la société HKW-aero, conception et production d'avions légers.

Cette ressource fait partie du N° 117 de La Revue 3EI du 4<sup>ème</sup> trimestre 2025.

Cet article présente les travaux réalisés notamment par les étudiants du Coursus Master Ingénierie Aéronautique, Transports et Énergétique, Université Paris Nanterre en partenariat avec différents industriels. Dans la première partie [9] le processus de conception, de dimensionnement, de réalisation et les essais au sol et en vol ont été décrits. Ce second article présente l'ensemble des aéronefs conçus et réalisés dans ce cadre. Il permettra de décrire concrètement les résultats de cette approche pédagogique motivante et formatrice pour les étudiants.

## 1 - Introduction

Cette présentation développe la conception des aéronefs et leurs réalisations pratiques. Lors de ces projets, la question de l'industrialisation est importante. Les étudiants doivent concevoir des systèmes à l'image de tous projets industriels produits en nombre. Il s'agit donc de prendre en compte la reproductibilité dès la conception initiale, démarche qui va bien au-delà d'un unique prototype. Les étudiants doivent imaginer des solutions très simples pour répondre à des problèmes complexes, exercice difficile et clé majeure de la compétitivité.

Du point de vue pédagogique, ces projets permettent d'identifier les domaines que ne maîtrisent pas les étudiants. Ces lacunes sont comblées au fil de l'eau avec des cours dédiés à des thèmes précis. Le retour des étudiants indique que cette approche est plébiscitée et jugée très motivante.

Les avions présentés dans cet article sont pilotés à distance pour d'évidentes questions de responsabilité lors de la mise en vol d'aéronefs pilotés. Toutefois, à des fins de formations, ces avions sont conçus à l'identique d'avions pilotés et respectent les points clés de la réglementation aéronautique CS23, il ne s'agit pas de simples modèles réduits.

Ces développements font l'objet de milliers de documents : recherche de solutions, notes de calculs, définition des moyens et des processus d'essais, analyses d'essais au sol et en vol, reconceptions, références produits, etc.

Les domaines de connaissances et compétences nécessaires au développement de ces avions sont principalement les suivants :

- Résistance des matériaux,
- Aérodynamique,
- Autopilotage,
- Télémétrie,
- Enregistrement de données en vol,
- Management de projets,
- Reproductibilité,
- Industrialisation,
- Maintenabilité,
- Ergonomie,
- Essais au sol,
- Essais et diagnostics en vol...

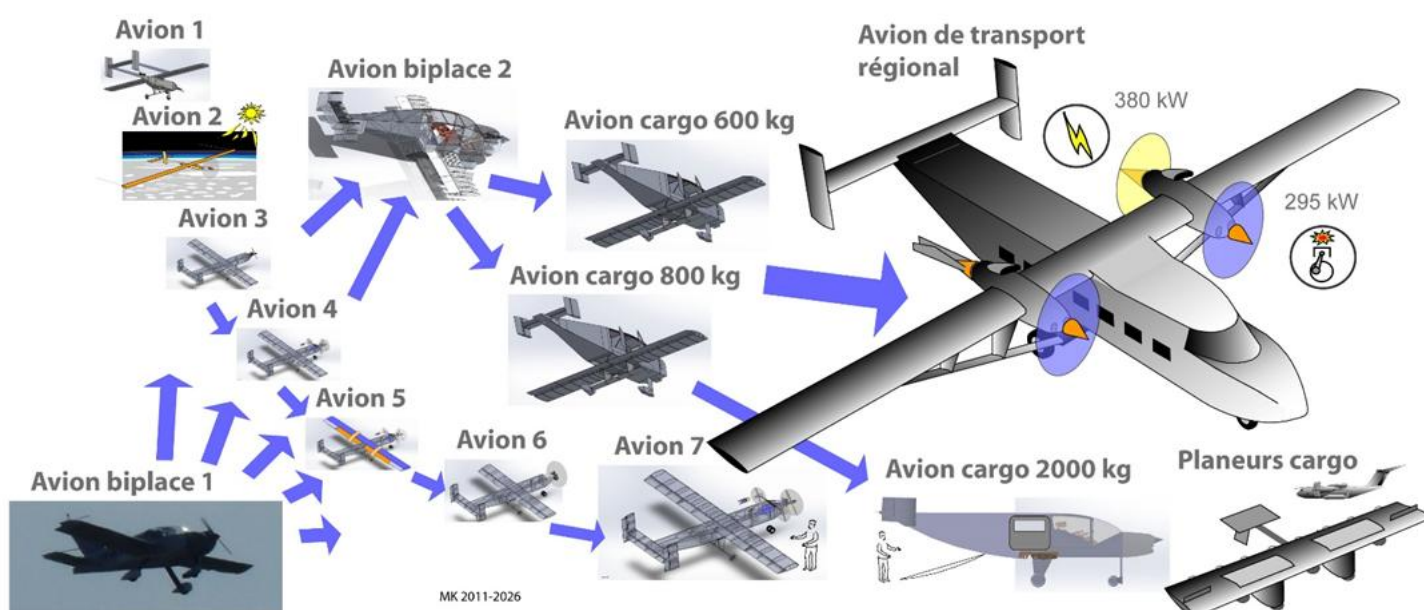


Figure 1 : Synoptique des avions réalisés et en projet

Ces avions et les moyens associés sont financés pour l'essentiel par nos partenaires industriels, acteurs clé de ces projets. Par leurs nombreux conseils, nos partenaires industriels sont totalement impliqués dans la conception de ces avions, nous les en remercions grandement.

## 2 - Avion 3

L'avion 3 a réalisé son premier vol en juin 2021. Cet avion est purement électrique, son temps de vol est de l'ordre de 0,6 heures. Ce projet a permis d'imaginer et de mettre au point les technologies, les moyens d'essais au sol et les processus d'essais en vol. Ainsi l'avion 3, et son prédécesseur l'avion 1, ont ouvert la porte aux avions développés ultérieurement.

Les principales caractéristiques et performances de l'avion 3 sont représentées dans le tableau ci-dessous (figure 2). Ce tableau générique permet de voir l'évolution des caractéristiques et des performances des avions 1 à 7.

HKW-aero_prédim_modèle_1b_K9_avion_D8											
	Avion 3	Avion 4	Avion 5.1	Avion 5.2	Avion 5.3	Avion 6	Avion 7				
Années premiers vols :	2022	2023	2024	2024	2024	En préparation	Projet en cours				
<b>Avion 3</b>	avion référence	électrique					v	v	v		
	v	avion hybride 1 (H1)					Drone lourd, avion 7			v	
	v	v	avion hybride 1 (H1) A12				v	Drone lourd à Dfr max			
	v	v	v	avion hybride 1 (H1) A12 hypersustenté			v	v	Drone lourd Dfr max et Mu 50kg		
	v	v	v	v	avion hybride 1 (H1) A12 hypersustenté Mu 3 kg			v	v		
	v	v	v	v	11hp aile composite A5,8			v	v		
Temps de vol [h]	0,60	3,5	7,1	7,1	15,0	1,3	8,5	14,8	26,3	Temps de vol [h]	
Distance franchissable (maxi range)	40	220	400	400	850	241	1892	2352	4175	Distance franchissable (maxi range) [km]	
Vitesse croisière [km/h]	67	62	57	57	57	192	222	159	159	Vitesse croisière [km/h]	
Masse au décollage (MTOW) [kg]	29,85	30,2	30,0	30,0	30,0	30,0	649	650	650	Masse au décollage (MTOW) [kg]	
Masse utile (Payload) [kg]	6,0	8,6	8,6	8,6	5,6	6,0	150	150	50	Masse utile (Payload) [kg]	
Envergure [m]	3,9	3,9	4,8	4,8	4,8	2,32	7,7	7,7	7,7	Envergure [m]	
Temps de déploiement [h]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Temps de déploiement [h]	
Décollage, technologie	électrique	électrique	hybride	hybride	hybride	thermique	thermique	thermique	thermique	Décollage, technologie	
Distance roulage au décollage [m]	60	60	60	40	40	40	140	140	140	Distance roulage au décollage [m]	
Atterrissage, dimension piste [m]	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	300 x 30	300 x 30	300 x 30	Atterrissage, dimension piste [m]	
<b>Dfr surcharge 5 kg [km]</b>	<b>89</b>	<b>852</b>	<b>1168</b>	<b>1167</b>	<b>1609</b>	<b>500</b>					
		Comprend 2,6 kg d'hybridation batteries 3' comprises									MK

Figure 2 : Caractéristiques de l'avion 3

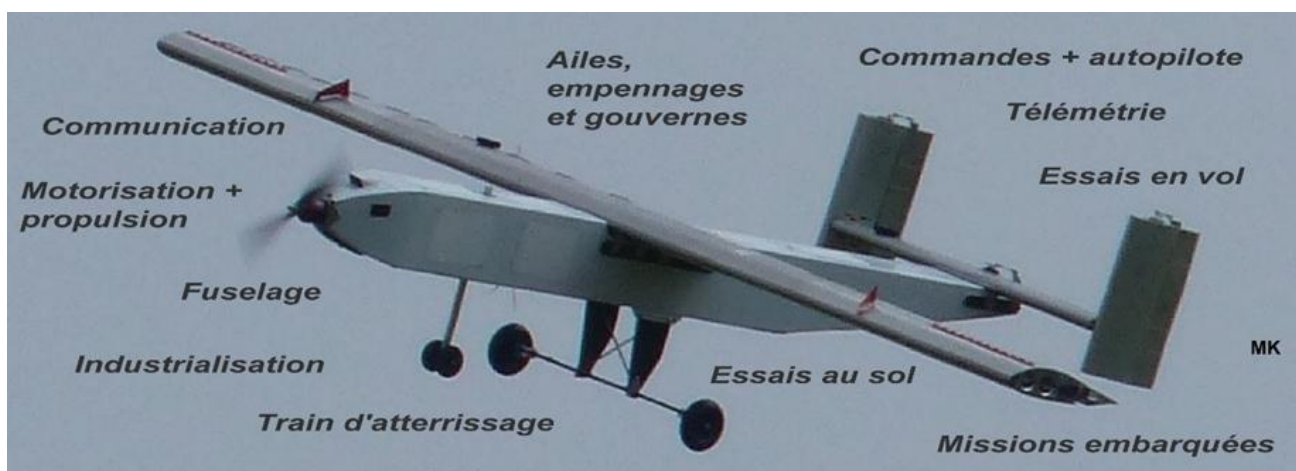


Figure 3 : Fonctionnalités de l'avion 3



Figure 4 : L'avion 3 exposé temporairement au Musée de l'Air et de l'Espace du Bourget

### 3 - Avions 4 et 5 hybrides à moteurs non liés

Les premiers vols de l'avion 4 ont été réalisés en juin 2022. Ce concept hybride permet une réduction conséquente des consommations d'énergie tout en ouvrant la porte à des autonomies

inaccessibles à des avions purement électriques. Ceci sans être pénalisé par l'hybridation série qui dégrade le rendement global<sup>11</sup>. Le moteur thermique est dimensionné pour assurer la croisière à la vitesse de finesse maximale (vitesse de plus grande autonomie) et un « boost » électrique permet de décoller et de réaliser la montée initiale. Ainsi la solution hybride à moteurs non liés permet d'obtenir un rapport "Masse au décollage / Puissance installée" conséquent tout en pouvant voler en croisière à la vitesse de finesse maximale ( $V_{f_{max}}$ ) donc à puissance réduite avec un moteur thermique fonctionnant sur son meilleur point de rendement.

HKW-aero_prédim_modèle_1b_K9_avion_D8											
	Avion 3	Avion 4	Avion 5.1	Avion 5.2	Avion 5.3	Avion 6	Avion 7				
Années premiers vols :	2022	2023	2024	2024	2024	En préparation	Projet en cours				
<b>Avions 4 et 5</b>	avion référence	avion électrique	avion hybride 1 (H1)	avion hybride 1 (H1) A12	avion hybride 1 (H1) A12	hypersustenté	v	v	v		
		v	v	v	v	11hp aile composite A5,8	Drone lourd, avion 7	v	v		
		v	v	v	v		Drone lourd à Dfr max	v	v		
		v	v	v	v		Drone lourd Dfr max et Mu 50kg	v	v		
		v	v	v	v		Mu 3 kg	v	v		
		v	v	v	v			v	v		
		v	v	v	v			v	v		
Temps de vol [h]	0,60	3,5	7,1	7,1	15,0	1,3	8,5	14,8	26,3	Temps de vol [h]	
Distance franchissable (maxi range)	40	220	400	400	850	241	1892	2352	4175	Distance franchissable (maxi range) [km]	
Vitesse croisière [km/h]	67	62	57	57	57	192	222	159	159	Vitesse croisière [km/h]	
Masse au décollage (MTOW) [kg]	29,85	30,2	30,0	30,0	30,0	30,0	649	650	650	Masse au décollage (MTOW) [kg]	
Masse utile (Payload) [kg]	6,0	8,6	8,6	8,6	5,6	6,0	150	150	50	Masse utile (Payload) [kg]	
Envergure [m]	3,9	3,9	4,8	4,8	4,8	2,32	7,7	7,7	7,7	Envergure [m]	
Temps de déploiement [h]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Temps de déploiement [h]	
Décollage, technologie	électrique	électrique	hybride	hybride	hybride	thermique	thermique	thermique	thermique	Décollage, technologie	
Distance roulage au décollage [m]	60	60	60	40	40	40	140	140	140	Distance roulage au décollage [m]	
Atterrissage, dimension piste [m]	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	300 x 30	300 x 30	300 x 30	Atterrissage, dimension piste [m]	
<b>Dfr surcharge 5 kg [km]</b>	<b>89</b>	<b>852</b>	<b>1168</b>	<b>1167</b>	<b>1609</b>	<b>500</b>					
		Comprend 2,6 kg d'hybridation batteries 3' comprises									MK

Figure 5 : Caractéristiques des avions 4 et 5

La durée maximale du boost électrique est de trois minutes afin de limiter l'impact négatif de la masse des batteries sur la qualité massique de l'avion. Bien entendu, l'avion est conçu pour avoir une  $V_{f_{max}}$  réduite ce qui nécessite un allongement suffisant et une charge alaire optimale. Le principe "hybride à moteurs non liés" est applicable aux avions légers et aux avions de transport régional développés plus loin.

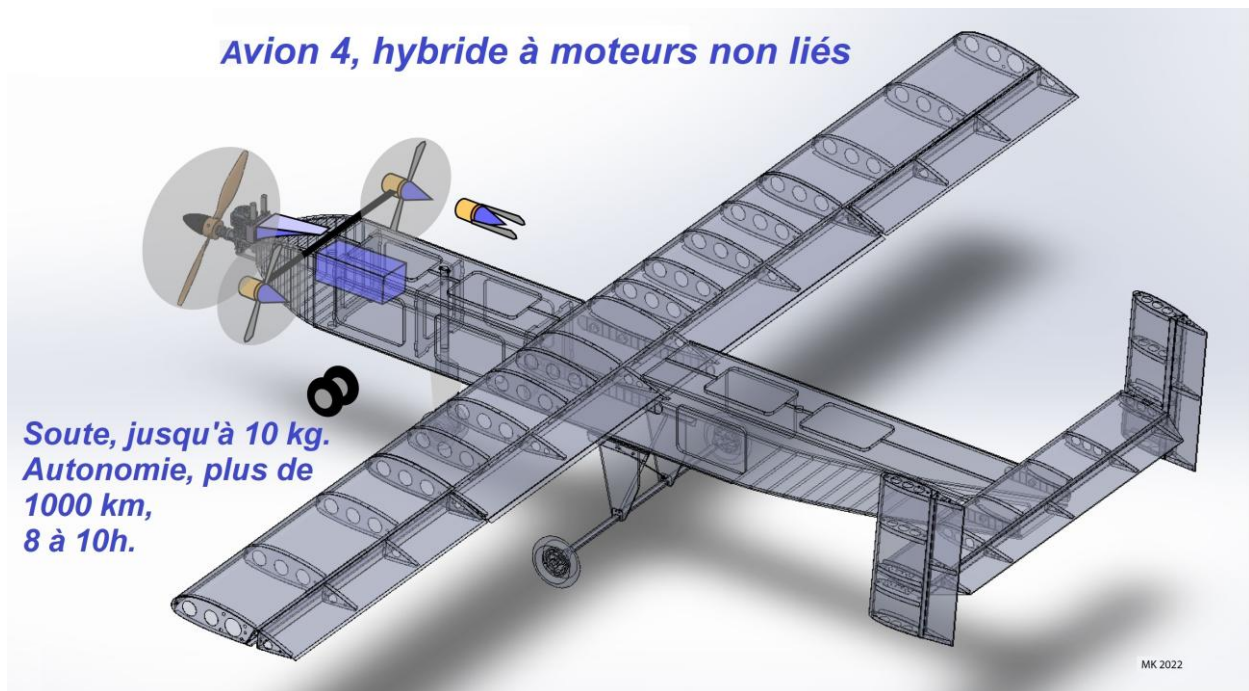


Figure 6 : Avion 4 : hybride à moteurs non liés

<sup>1</sup> Le rendement global correspond au produit des rendements des sous-ensembles de la chaîne de propulsion.

<sup>2</sup>  $V_{f_{max}}$  : il s'agit de la vitesse permettant de réaliser la plus grande distance avec une quantité d'énergie donnée.

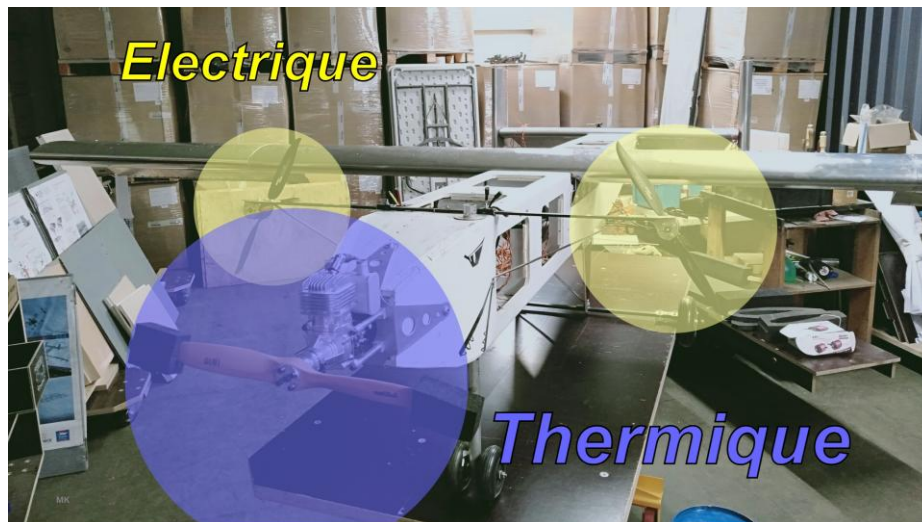


Figure 7 : Avion 4, hybride à moteurs non liés : disposition des motorisations

### Avion 4, hybride à moteurs non liés

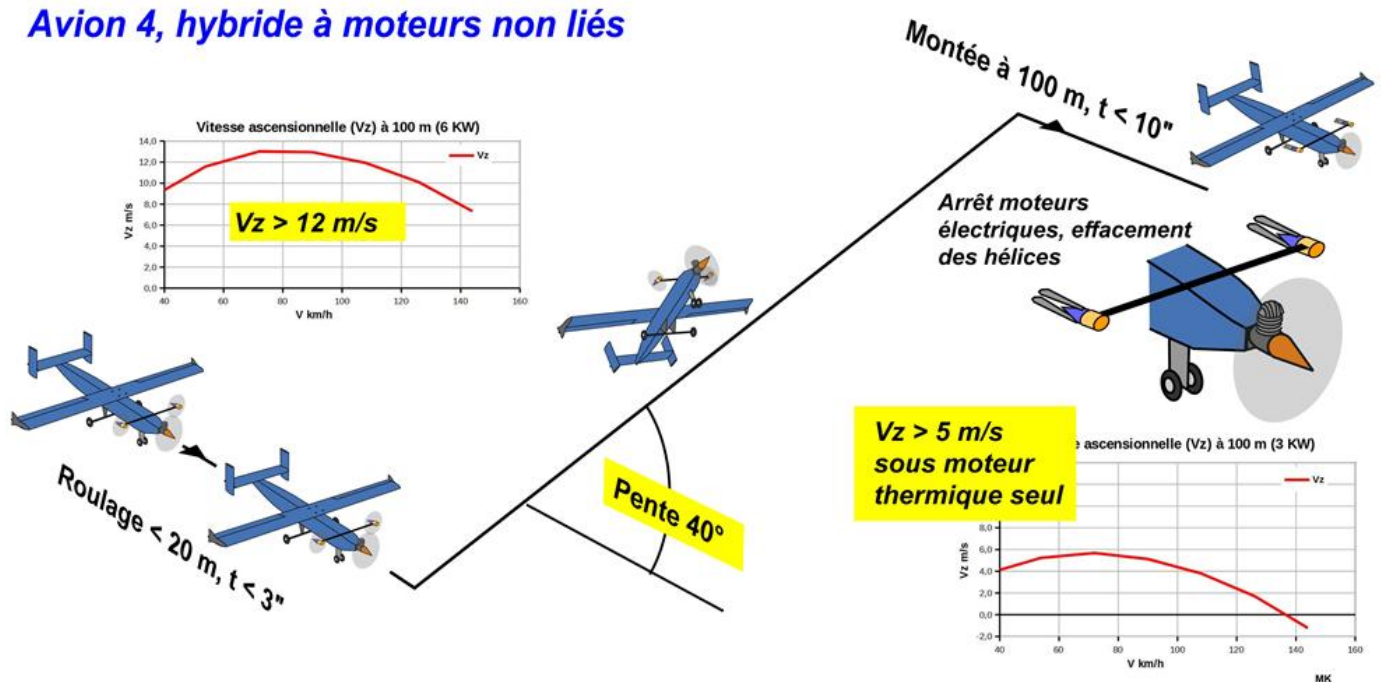


Figure 8 : Avion 4, hybride à moteurs non liés : performances et principe de fonctionnement  
 $V_z$  : correspond à la vitesse verticale de l'avion.

L'avion 5 est une évolution significative de l'avion 4 : l'aile et les empennages en aluminium sont remplacés par une voilure en composite qui ouvre la porte à des avions à faible surface équivalente radar (SER). A cette fin, un nouveau fuselage entièrement réalisé en bois est en préparation. L'allongement de l'aile est passé de 8 (avions 3 et 4) à 12 pour l'avion 5. Cette augmentation de l'allongement diminue significativement la traînée induite par la portance et la vitesse de vitesse max avec pour effet une augmentation du temps de vol (voir figure 5). Attention toutefois à l'impact négatif d'une augmentation de l'allongement sur la masse de l'aile, l'optimal a été recherché. Cette aile est aussi hypersustentée afin de réduire les vitesses minimales de vol donc les distances de décollage.

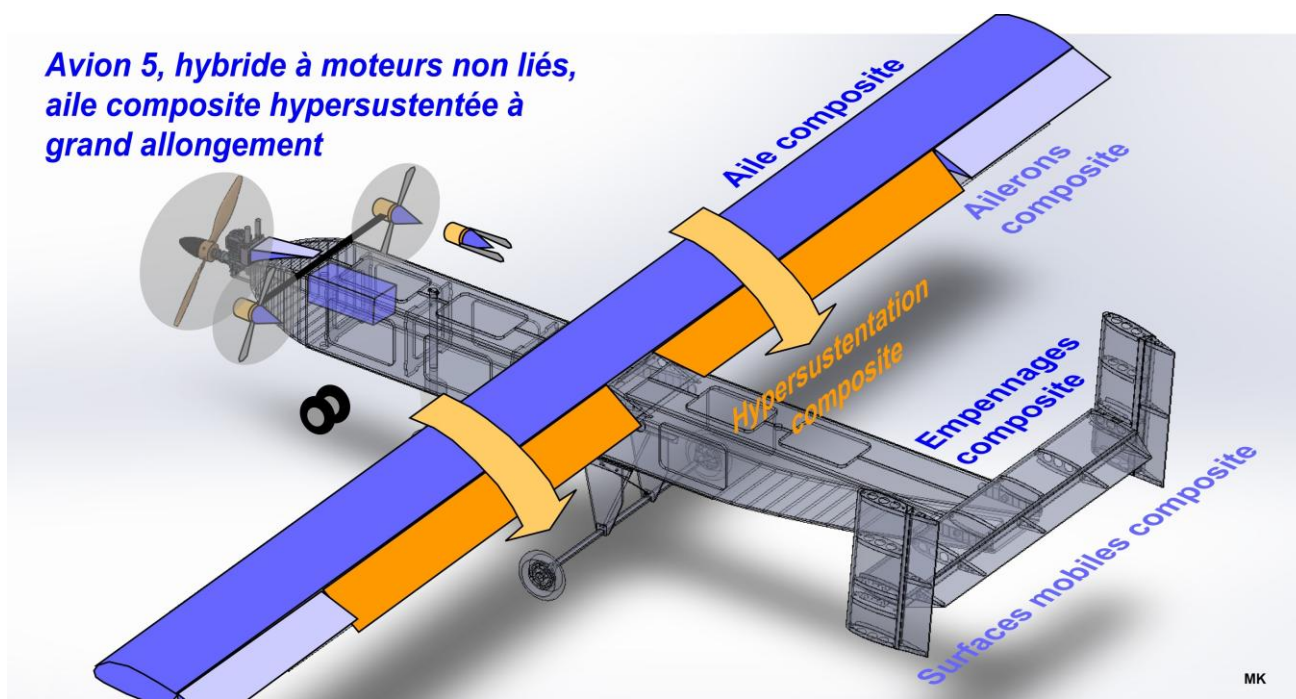
Compte-tenu de ces évolutions, l'avion 5 a fait l'objet de la quasi-totalité des essais au sol réalisés pour l'avion précédent.



**Avion 5**

MK

Figure 9 : Avion 5, dérivé à aile composite hypersustentée à grand allongement (envergure 5 m), temps de vol de 15 à 30 heures selon la charge embarquée



**Avion 5, hybride à moteurs non liés, aile composite hypersustentée à grand allongement**

MK

Figure 10 : Avion 5, détails des matériaux utilisés



MK

Figure 11 : L'avion 5 est aussi un démonstrateur pour l'avion de transport régional hybride à moteurs non liés

## 4 - Avion 6, drone rapide

L'avion 6 répond à un cahier des charges totalement différent. Il s'agit ici de privilégier la vitesse au détriment de la distance franchissable. La puissance installée est plus élevée et totalement thermique ce qui est optimal pour ce cahier des charges. L'aile est différente mais le fuselage et les empennages restent identiques aux avions précédents. La vitesse de croisière est de l'ordre de 200 km/h.

HKW-aero_predim_model_1b_K9_avion_D8										
	Avion 3	Avion 4	Avion 5.1	Avion 5.2	Avion 5.3	Avion 6	Avion 7			
Années premiers vols :	2022	2023	2024	2024	2024	En préparation	Projet en cours			
	avion référence	électrique					v	v	v	
	v	avion hybride 1 (H1)						Drone lourd, avion 7	v	
		v	avion hybride					v	Drone lourd à Dfr max	
		v	v					v	Drone lourd Dfr max et Mu 50kg	
		v	v					v		
		v	v					ypersustenté Mu 3 kg	v	
		v	v					11hp aile composite A5,8	v	
		v	v					v	v	
Temps de vol [h]	0,60	3,5	7,1	7,1	15,0	1,3	8,5	14,8	26,3	Temps de vol [h]
Distance franchissable (maxi range)	40	220	400	400	850	241	1892	2352	4175	Distance franchissable (maxi range) [km]
Vitesse croisière [km/h]	67	62	57	57	57	192	222	159	159	Vitesse croisière [km/h]
Masse au décollage (MTOW) [kg]	29,85	30,2	30,0	30,0	30,0	30,0	649	650	650	Masse au décollage (MTOW) [kg]
Masse utile (Payload) [kg]	6,0	8,6	8,6	8,6	5,6	6,0	150	150	50	Masse utile (Payload) [kg]
Envergure [m]	3,9	3,9	4,8	4,8	4,8	2,32	7,7	7,7	7,7	Envergure [m]
Temps de déploiement [h]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Temps de déploiement [h]
Décollage, technologie	électrique	électrique	hybride	hybride	hybride	thermique	thermique	thermique	thermique	Décollage, technologie
Distance roulage au décollage [m]	60	60	60	40	40	40	140	140	140	Distance roulage au décollage [m]
Atterrissage, dimension piste [m]	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	300 x 30	300 x 30	300 x 30	Atterrissage, dimension piste [m]
<b>Dfr surcharge 5 kg [km]</b>	<b>89</b>	<b>852</b>	<b>1168</b>	<b>1167</b>	<b>1609</b>	<b>500</b>				
		Comprend 2,6 kg d'hybridation batteries 3' comprises								MK

Figure 12 : Caractéristiques de l'avion 6

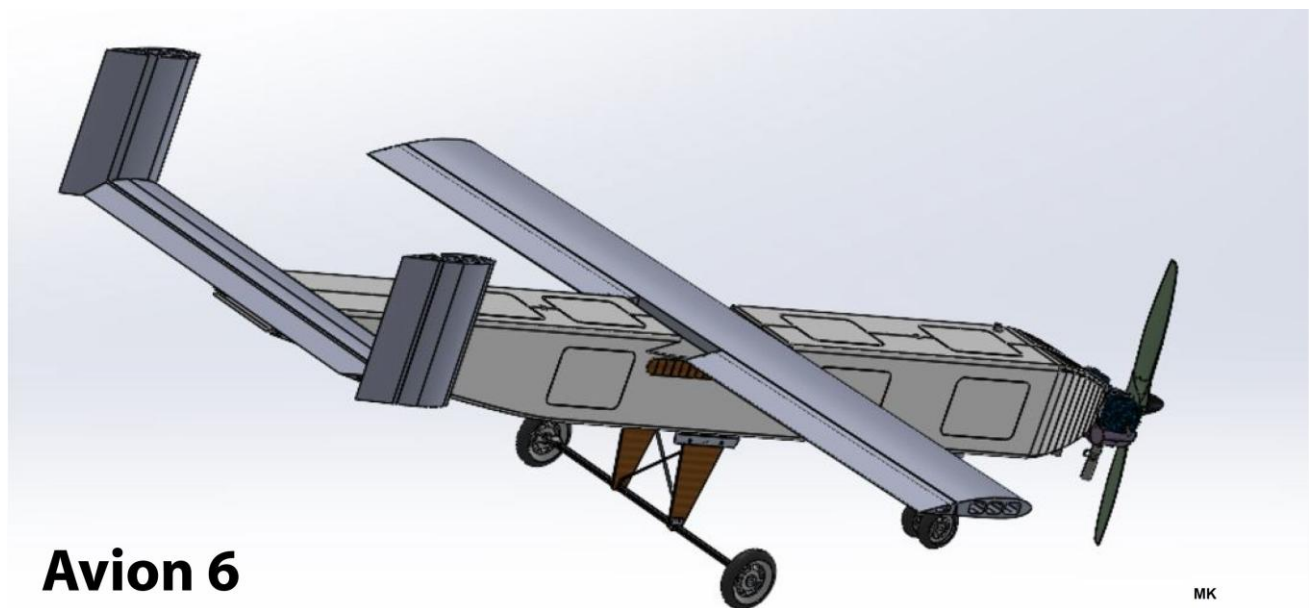


Figure 13 : Avion 6

## 5 - Avion 7, drone lourd à grande autonomie

L'avion 7 reprend le cahier des charges d'une machine référence connue en reprenant les technologies particulièrement économiques des avions précédents. Il s'agit d'un drone lourd à grande distance franchissable. La charge utile est de 150 kg. Selon la mission, la vitesse de croisière varie entre 159 et 222 km/h. A noter les distances franchissables comprises entre 1900 et 4200 km selon la charge embarquée et la vitesse de vol.

HKW-aero_prédim_modèle_1b_K9_avion_D8	Avion 3	Avion 4	Avion 5.1	Avion 5.2	Avion 5.3	Avion 6	Avion 7	Avion 7	
Années premiers vols :	2022	2023	2024	2024	2024	En préparation	Projet en cours	<b>Avion 7</b>	
avion référence électrique	v	avion hybride 1 (H1)	v	avion hybride 1 (H1) A12	v	avion hybride 1 (H1) A12 hypersustenté	Drone lourd, avion 7		
	v	v	v	v	v	11hp aile composite A5,8	Drone lourd à Dfr max		
	v	v	v	v	v		Drone lourd	Dfr max et Mu 50kg	
	v	v	v	v	v		Mu 3 kg		
	v	v	v	v	v				
Temps de vol [h]	0,60	3,5	7,1	7,1	15,0	1,3	8,5	14,8	26,3
Distance franchissable (maxi range) [km]	40	220	400	400	850	241	1892	2352	4175
Vitesse croisière [km/h]	67	62	57	57	57	192	222	159	159
Masse au décollage (MTOW) [kg]	29,85	30,2	30,0	30,0	30,0	30,0	649	650	650
Masse utile (Payload) [kg]	6,0	8,6	8,6	8,6	5,6	6,0	150	150	50
Envergure [m]	3,9	3,9	4,8	4,8	4,8	2,32	7,7	7,7	7,7
Temps de déploiement [h]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Décollage, technologie	électrique	électrique	hybride	hybride	hybride	thermique	thermique	thermique	thermique
Distance roulage au décollage [m]	60	60	60	40	40	40	140	140	140
Atterrissage, dimension piste [m]	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	140 x 30	300 x 30	300 x 30	300 x 30
Dfr surcharge 5 kg [km]	89	852	1168	1167	1609	500			
		Comprend 2,6 kg d'hybridation batteries 3' comprises							

Figure 14 : Caractéristiques de l'avion 7

## Avion 7, drone 650 kg

Temps de vol,  
distances franchissables et  
vitesses de croisière :  
8,5 heures, 1900 km à 222 km/h  
15 heures, 2300 km à 159 km/h  
26 heures, 4200 km à 159 km/h et payload réduite

**Avion compact et très économique par conception**

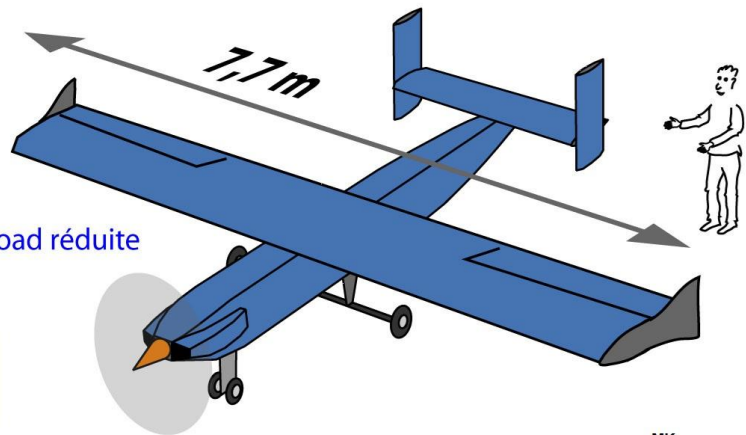


Figure 15 : Avion 7

## 6 - Drone planeur cargo

Nous avons imaginé différents concepts de planeurs cargo largables à partir de l'avion de transport A400M.

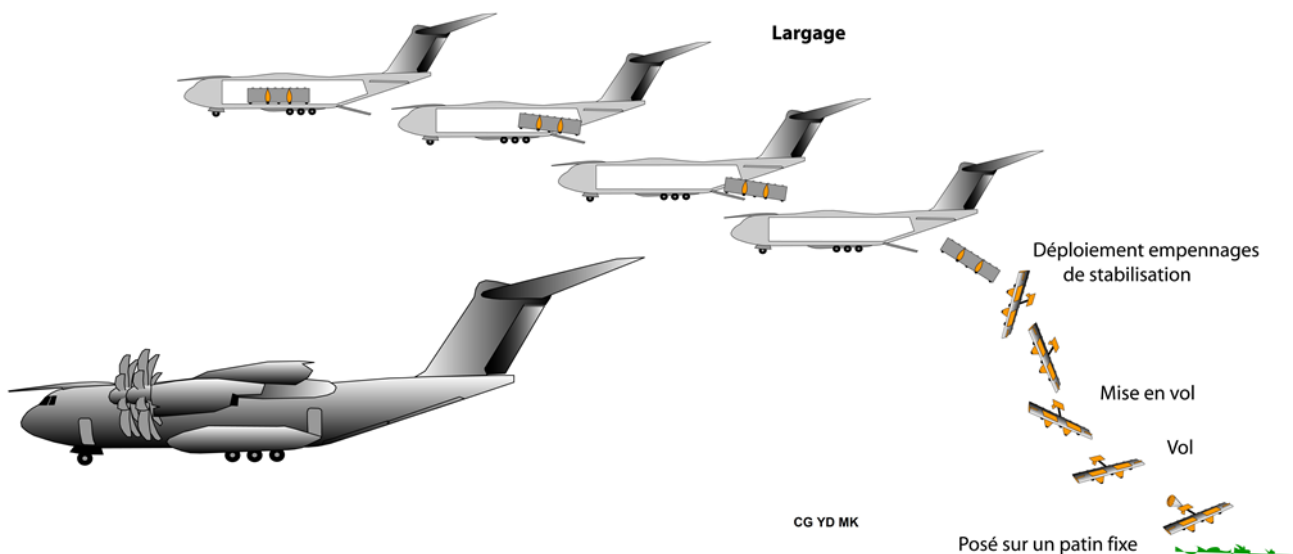


Figure 16 : largage du drone planeur cargo

Une difficulté est la compatibilité entre la soute et la grande aile imposée par la finesse requise (finesse  $[\ ] = \text{distance de vol plané} / \text{hauteur de largage}$ ).

Une autre difficulté concerne la prise de contrôle du planeur après le largage, ceci nécessitant un dispositif de stabilisation juste après le largage pour permettre à l'autopilote de prendre le contrôle. Il y a bien entendu d'autres sujets à résoudre.

Différents concepts ont été imaginés. Le concept F (figure 16) est particulièrement intéressant pour sa simplicité, ses dimensions réduites et ses performances.

## Concept F

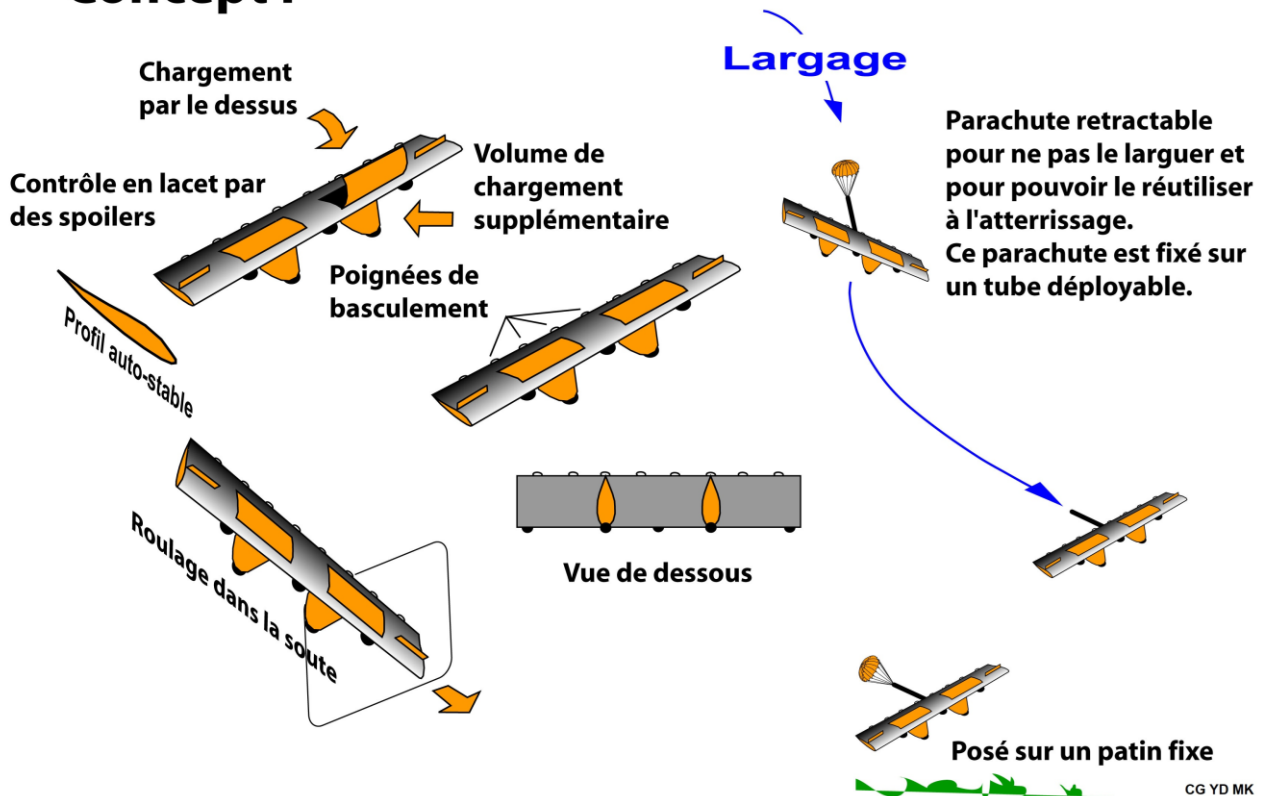


Figure 17 : Concept du drone planeur cargo

Le concept de drone cargo a toutefois pour inconvénient de mobiliser un A400M pour délivrer un peu plus d'une tonne avec deux planeurs, les planeurs étant potentiellement perdus en fin de mission. Ceci débouche sur un coût très élevé par kilo délivré.

Dans ce contexte, nous avons imaginé de transformer nos avions cargo en avions sans pilotes. Contrairement à un planeur mobilisant un gros avion de transport (A400M), un drone cargo motorisé peut être conçu pour délivrer la même masse utile de manière autonome. De plus, un tel drone cargo a la capacité de revenir de manière autonome à son point de départ. Il est donc réemployable contrairement à un planeur cargo potentiellement perdu après sa mission. Ces deux aspects permettent d'obtenir un coût du kilogramme délivré bien inférieur à la solution planeur cargo.

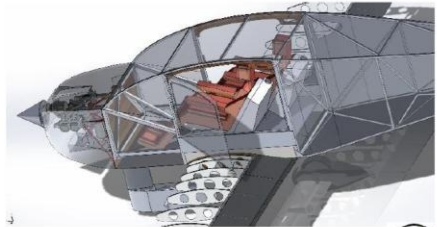
## 7 - Avion biplace et dérivés cargo 600, 800 et 2000 kg (pilotés ou autonomes)

L'avion biplace et ses dérivés cargo se caractérisent par une extrême simplicité de réalisation. Ceci a nécessité une démarche de « réduction des coûts par une simplicité des systèmes » particulièrement poussée.

La section des volets et ailerons est rigoureusement identique



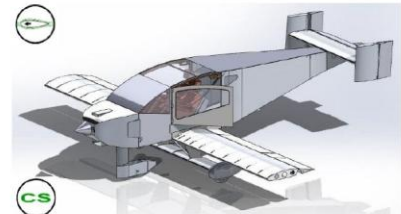
Allongement réduit (6,5) afin de pouvoir réaliser une aile légère



Une structure tubulaire a été choisie pour sa légèreté.

L'aile d'un tenant afin de ne pas avoir d'interruption de sa structure dans la partie la plus sollicitée.

Le design « carré » n'a pas d'impact significatif sur la trainée.



De plus l'accès à bord par des portes permet l'évacuation de l'avion.

- = qualité massique favorable
- = qualité coût favorable
- = qualité aérodynamique favorable
- = qualité réglementation et/ou qualité sécurité favorable

MK

Figure 18 : L'avion biplace industrialisé en cours de conception se caractérise par les points suivants : performances élevées, coût très réduit, sécurité élevée, ergonomie travaillée...

Caractéristiques	Avion biplace	Avion-cargo 600kg	Avion-cargo 800kg
Masse à vide (Mv)	316 kg	347 kg	431 kg
Masse au décollage (MTOW)	525 kg	600kg	800 kg
Masse utile (Mu)	172 kg	206 kg	319 kg
Qualité massique (Qm)	0.603	0.579	0.539
Distance franchissable	600 km	620 km	620 km
Cz max	1.8	1.8	1.8
Vso	83.2	83.2	83.2
Allongement (A)	6.5	5.7	7.5

Figure 19 : Extrait des caractéristiques de l'avion biplace et des dérivés cargo 600 et 800 kg

## Gammes drones cargo

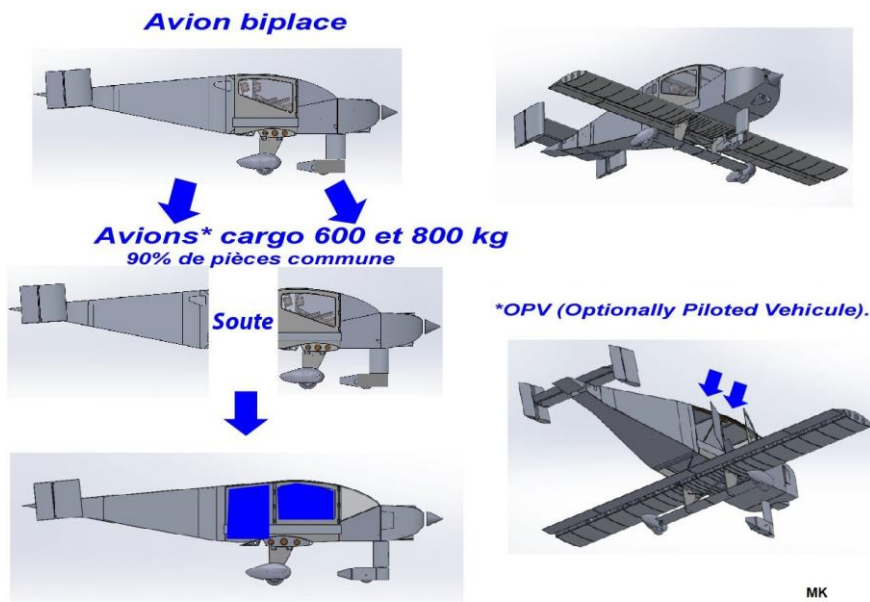


Figure 20 : Similarités avion biplace et avions cargo, l'effet de gamme est à nouveau recherché

## 8 - Avion de transport régional hybride à moteurs non liés

Cet avion est issu des démonstrateurs présentés précédemment (avions 4 et 5). Ce concept hybride permet une réduction conséquente des consommations d'énergie tout en ouvrant la porte à des autonomies inaccessibles à des avions purement électriques. Ceci sans être pénalisé par l'hybridation série qui dégrade le rendement global du fait des sous-ensembles de la chaîne de propulsion. Les moteurs thermiques sont dimensionnés pour assurer la croisière à la vitesse de finesse max (vitesse de plus grande autonomie), un « boost » électrique permet de décoller et de réaliser la montée initiale. Ainsi, la solution hybride à moteurs non liés permet d'avoir un rapport "Masse au décollage / Puissance installée" conséquent tout en pouvant voler en croisière à la vitesse de finesse maximale donc à vitesse et à puissance réduite avec un moteur thermique fonctionnant sur son meilleur point de rendement. La durée maximale du boost électrique est de trois minutes afin de limiter l'impact négatif de la masse des batteries sur la qualité massique de l'avion. L'avion est conçu pour avoir une  $V_{f_{max}}$  réduite ce qui nécessite un allongement important et une charge alaire optimale. La voilure optimisée à grand allongement a fait l'objet d'une étude poussée du haubanage avec pour effet une diminution de la masse au décollage de l'avion d'environ 10%. Cette diminution de masse contribue à la diminution du besoin en énergie de l'avion.

Nous avons repris le cahier des charges d'un avion référence pour concevoir l'avion hybride en partant d'une page blanche. L'avion de référence est à gauche (empennage en rouge), l'avion développé est à droite (empennage en bleu).

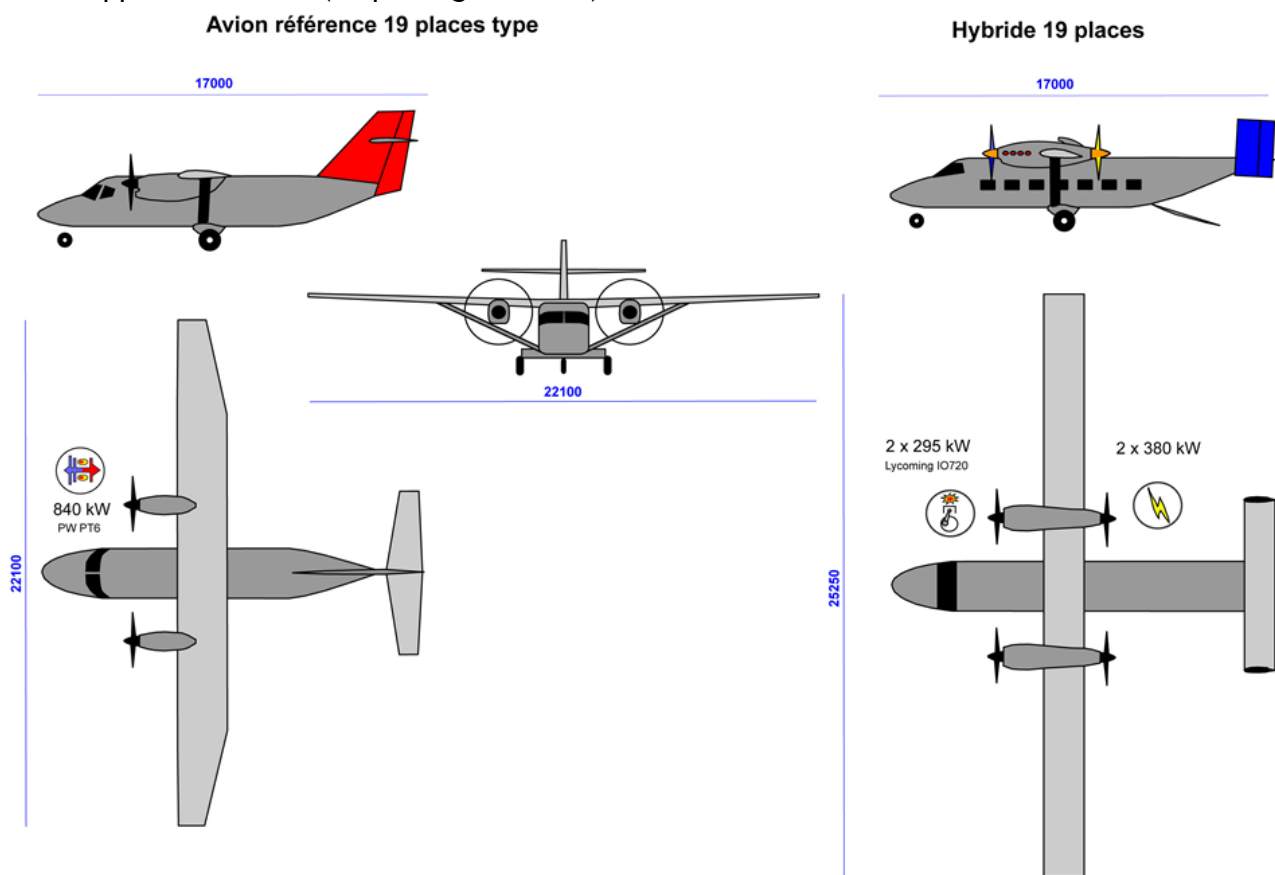


Figure 21 : Comparaison entre l'avion de référence et l'avion hybride de 19 places

A noter les formes totalement développables de la cellule de l'avion, ceci contribue de manière significative à la réduction de son coût de production. Ces formes simples n'ont pas d'impact sur la traînée parasite mais l'avion ne peut pas être pressurisé. En effet, un fuselage de section carrée ne supporterait pas la pression liée à une pressurisation sauf à devoir renforcer considérablement le fuselage avec pour effet une augmentation conséquente de la masse de l'aéronef. La pressurisation d'un fuselage est obligatoire à partir d'une altitude de vol de dix mille pieds, soit

La Revue 3EI n°117 4<sup>ème</sup> trimestre 2025

3000 m. Une alternative est de distribuer de l'oxygène aux occupants de l'avion, solution toutefois peu compatible avec des vols commerciaux. La solution est de recourir à un fuselage cylindrique, forme qui peut être pressurisée sans dégrader la masse de l'avion. Cette étude sera à réaliser tout en conservant la même voilure et la même motorisation. Il sera aussi nécessaire de prendre en compte la perte de puissance en altitude des moteurs et donc un surdimensionnement de ceux-ci.

Au prix d'une diminution 33 % de la vitesse de croisière, notre concept d'avion hybride à moteurs non liés autorise une diminution de la consommation de 64 % par rapport à l'avion référence.

**Avion de transport hybride à moteurs non liés, haubannage optimisé, vitesse de croisière réduite de 33% = -64% sur la consommation**

1- Motorisations thermiques et électriques non liées pour ne pas dégrader le rendement global par le produit des rendements des sous-ensembles de la chaîne de propulsion

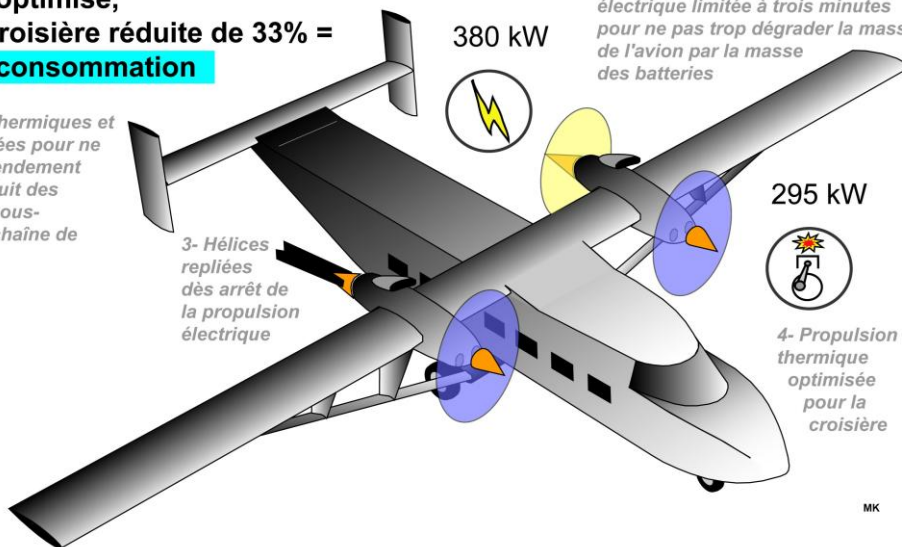
2- Alimentation de la motorisation électrique limitée à trois minutes pour ne pas trop dégrader la masse de l'avion par la masse des batteries

3- Hélices repliées dès arrêt de la propulsion électrique

295 kW

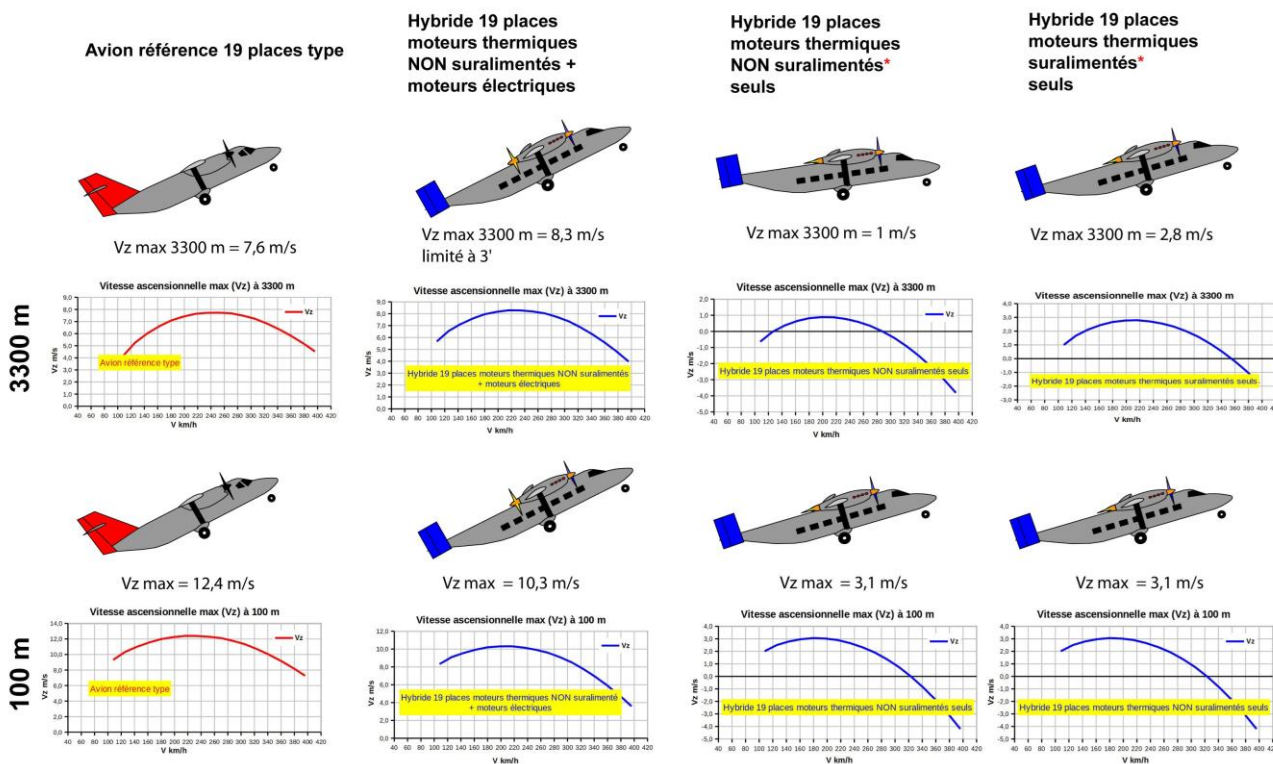


4- Propulsion thermique optimisée pour la croisière



MK

Figure 22 : L'avion de transport régional



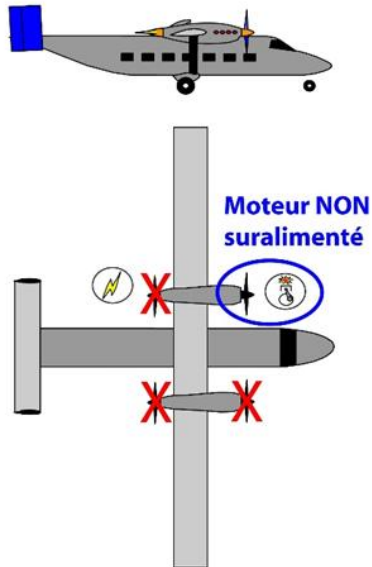
MK

\* voir scénarios de pannes moteurs

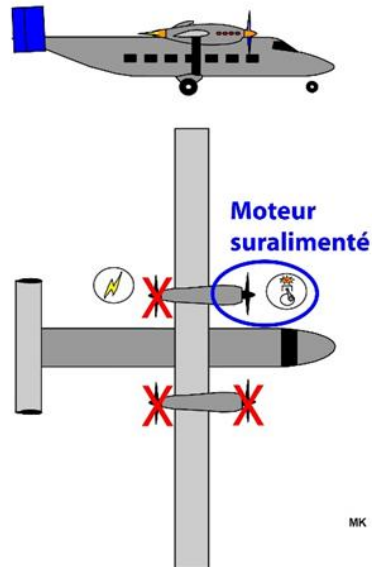
Figure 23 : Performances en montée

Quelques scénarios de pannes moteurs :

Vz max = 0 m/s à 500 m

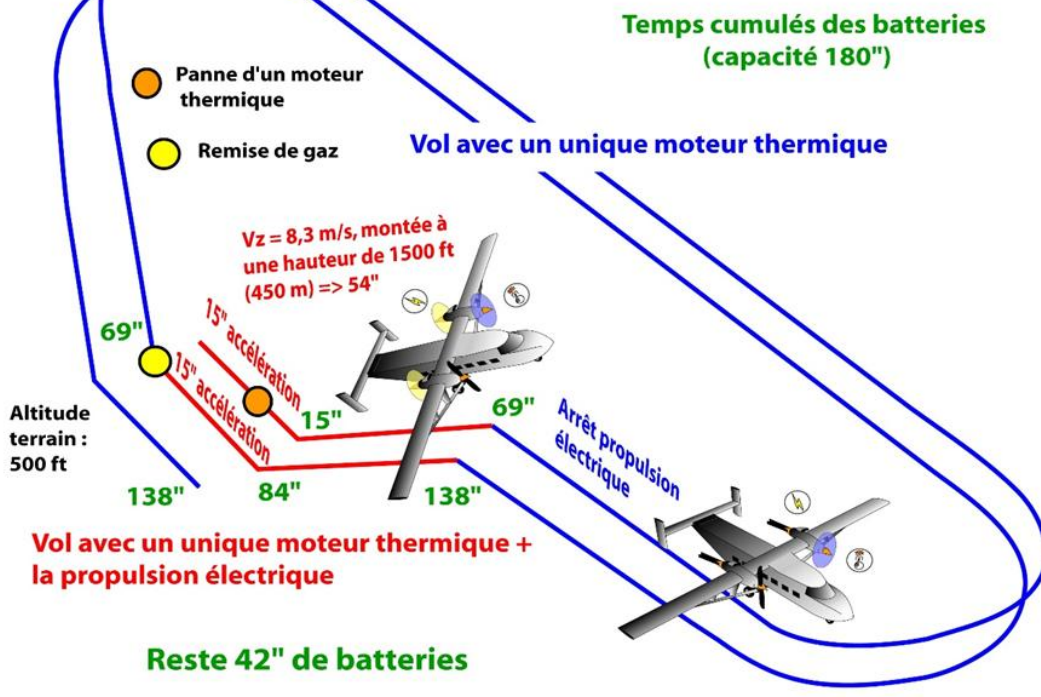


Vz max = 0 m/s à 3000 m



MK

Scénario de panne moteur au décollage suivi d'une remise de gaz avant l'atterrissage



MK

Figure 24 : Scénarios de pannes moteurs

## 9 - Drone électro-solaire stratosphérique

Notre objectif est de concevoir un drone stratosphérique, ayant une capacité de vol à plus de 25.000 m d'altitude, adapté à deux missions différentes :

- 1- Décollage et montée de manière autonome ;
- 2- Récupération d'équipements sous ballons sondes afin de ramener ces équipements au point de départ avant l'éclatement du ballon. La distance à parcourir peut atteindre 400 km.

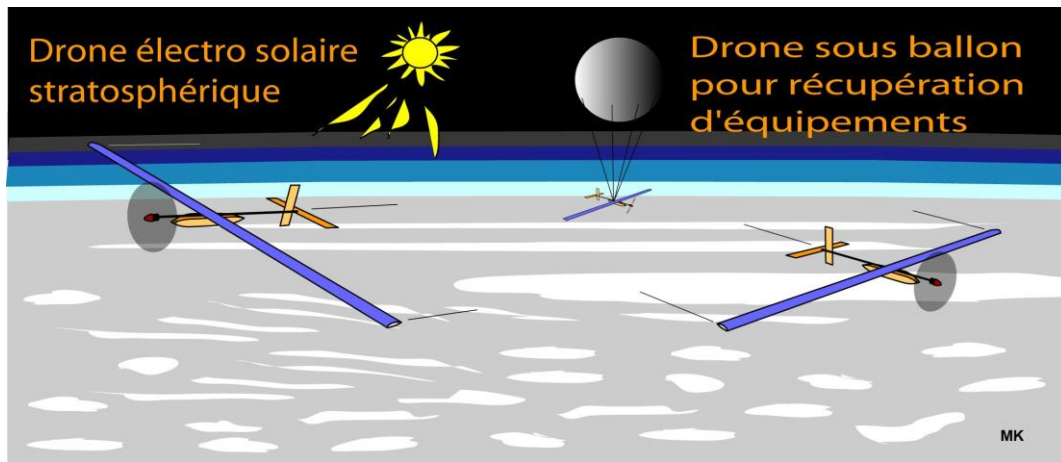


Figure 25 : Drone électro-solaire

Nos études ont débouché sur un avion aux caractéristiques suivantes : 2,8 kg, 4,6 m d'envergure, 21 d'allongement, moins de 100W... dont l'alimentation en énergie est 100% solaire.



Figure 26 : Drone électro-solaire présenté par les étudiants

Nous avons constaté qu'une solution propulsée par moteur thermique ou par pile à combustible ne convient pas du fait d'une part, du manque d'oxygène à très haute altitude et d'autre part, de l'excès de masse.

De même, alimenter le drone par des batteries ne permet pas d'atteindre 25.000 m quelle que soit la technologie des batteries.

Nous avons un précurseur, l'Helios développé par la NASA, mais dont les dimensions sont largement supérieures à celle de notre drone : envergure 75 m, masse 1000 kg... L'Helios a approché les 30.000 m d'altitude

Nous nous sommes concentrés sur les verrous technologiques suivants : réduction des masses, modélisations des missions, vol dans une atmosphère tenue (la masse volumique de l'air représente à 30.000 m 1,5% de celle au niveau de la mer), cellules photovoltaïques souples très légères, autopilote, dilatation thermique à moins 70°C, protection des composants électroniques du froid, calcul et essais au sol de l'aile, définition d'une technologie de construction de l'aile, définition des équipements embarqués (transpondeur, GPS...).

Le démonstrateur a donné entière satisfaction lors d'essais réalisés à basse altitude. L'objectif était d'évaluer le comportement de l'avion en atmosphère turbulente (faible charge alaire donc grande sensibilité aux turbulences, impact des déformations de l'aile sur le comportement de l'avion...).



Figure 27 : Démonstrateur du drone électro-solaire

On peut noter que ce drone aurait la capacité théorique de voler dans l'atmosphère ténue de Mars :

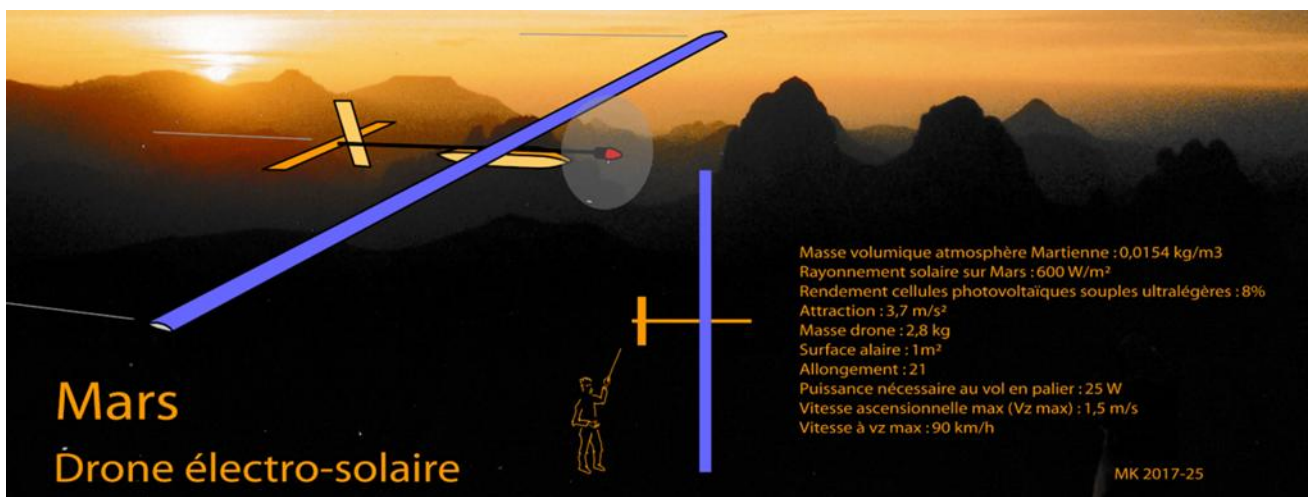


Figure 28 : Drone électro-solaire sur Mars ?

Il nous reste à poursuivre l'étude de l'autopilote et à installer les cellules photovoltaïques.

## 10 - Conclusion

De tels développements sont une excellente occasion de transmettre les savoirs et de familiariser les étudiants avec la démarche de projet et particulièrement la nécessité de devoir se remettre en cause régulièrement en mettant en œuvre une démarche itérative d'aller-retours entre théorie et application. Un autre intérêt est de détecter les manques dans les enseignements académiques. Ces projets s'accompagnent ainsi de quantité de cours délivrés au fil des besoins.

Enfin, une autre force de cette pédagogie concerne le travail en réseau avec d'autres groupes d'étudiants et des partenaires externes (industriels, experts, autres écoles...).

En conclusion, cette approche pédagogique est particulièrement motivante et formatrice pour les étudiants.

## Références :

[1]: [https://www.hkw-aero.fr/MK\\_3AF\\_presentation\\_avions\\_CMI\\_short.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_3AF_presentation_avions_CMI_short.mp4)

[2]: Réflexions sur les avions du futur et sur la transition énergétique :  
[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_3AF\\_conference\\_parties\\_1\\_et\\_2\\_2024.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_3AF_conference_parties_1_et_2_2024.mp4)

[3]: Autres exemples de projets réalisés ou en gestation :  
[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_projets\\_CMI-ATE.pdf](https://www.hkw-aero.fr/MK_projets_CMI-ATE.pdf)

[4]: Modélisation et reconstitution des données manquantes d'aéronefs quels qu'ils soient, l'étude de cas concerne le B777-200 :  
[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_reconstitution\\_caracteristiques\\_aeronefs\\_2.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_reconstitution_caracteristiques_aeronefs_2.mp4)

[5]: Diagnostics en vol, voir plus particulièrement la recherche de la puissance à la vitesse de finesse max et l'analyse du comportement au décrochage de l'avion :  
[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_diagnostics\\_en\\_vol\\_avion\\_1.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_diagnostics_en_vol_avion_1.mp4)

[6]: Les inévitables difficultés, bien formatrices à des fins pédagogiques, inhérentes au développement d'aéronefs : [https://www.hkw-aero.fr/MK\\_aleas\\_des\\_essais\\_en\\_vol.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_aleas_des_essais_en_vol.mp4)

### Biomimétisme :

[7]: Le vol des oiseaux, cette vidéo développe des méthodes de dimensionnement inspirées des méthodes propres aux avions :  
[https://www.hkw-aero.fr/MK\\_biomimetisme\\_chouette.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_biomimetisme_chouette.mp4)

[8]: Reconstitution du Quetzalcoatus, le lien est établi entre les premiers animaux volants et la genèse des premiers vols humains : [https://www.hkw-aero.fr/MK\\_biomimetisme\\_pterosaure.mp4](https://www.hkw-aero.fr/MK_biomimetisme_pterosaure.mp4)

[9]: Conception des aéronefs - Drones et concepts d'avions industrialisés très économiques (partie 1/2), M. Kieffer, Septembre 2025,  
[https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/conception-des-aeronefs-industrialises-economiques-partie1](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conception-des-aeronefs-industrialises-economiques-partie1)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay>

# Robots-chiens : Présentation de quelques modèles et applications pédagogiques

Hervé DISCOURS<sup>1</sup>

Édité le  
06/10/2025

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris-saclay \_\_\_\_\_

<sup>1</sup> IUT de Cachan, 9 Av. de la Division Leclerc, 94230 Cachan

*Cette ressource fait partie du N° 117 de La Revue 3EI du 4<sup>ème</sup> trimestre 2025.*

Cet article passe tout d'abord en revue les principaux robots-chiens actuellement développés, du haut de gamme comme Spot de Boston Dynamics, en passant par les solutions accessibles pour l'éducation et la recherche, ou encore les projets DIY open-source.

Un modèle sera étudié plus en détail, le Go1 de Unitree. Ses différents moyens de contrôle/commande seront analysés, aussi bien à bas niveau (SDK), que haut niveau (MQTT).

Pour terminer, différentes applications pédagogiques seront proposées sous forme de TP pour découvrir les moyens de commande par MQTT, avec Node-RED ou simplement Mosquitto. Quelques idées de projet seront détaillées, soit avec une vision « Automatisation Industrielle » en utilisant un automate programmable (Siemens S7), ou soit avec une vision « Système Embarqué » en utilisant le SDK du constructeur (Langage C/C++, Python).

## 1- Introduction

Les robots quadrupèdes, communément appelés « robots-chiens », constituent aujourd'hui un domaine très dynamique de la recherche en robotique mobile. Inspirés à la fois de la morphologie et de la locomotion animale, ces systèmes cherchent à reproduire la stabilité, la souplesse et l'adaptabilité propres aux mammifères quadrupèdes. L'appellation « robot-chien » tient à leur ressemblance visuelle et fonctionnelle avec les canidés, mais elle recouvre en réalité une variété de plateformes robotiques conçues pour des usages divers, allant de l'exploration industrielle à l'assistance humaine.

C'est au cours de la dernière décennie que des avancées majeures ont été réalisées grâce à la miniaturisation des composants et à l'amélioration des systèmes de contrôle dynamique. Des entreprises pionnières comme Boston Dynamics, ou encore la société chinoise Unitree Robotics, ont contribué à démocratiser ces plateformes, autrefois confinées aux laboratoires de recherche.

Au-delà de la prouesse technologique, l'intérêt pour les robots-chiens réside dans leur capacité à évoluer dans des environnements complexes où les robots à roues ou à chenilles peinent à se déplacer. Qu'il s'agisse de franchir des obstacles, de maintenir l'équilibre sur des terrains accidentés ou d'interagir avec des opérateurs humains, ces robots se distinguent par leur polyvalence et leur robustesse. Ils sont aujourd'hui étudiés et déployés dans des contextes variés : sécurité, exploration de zones sinistrées, logistique industrielle ou encore interaction sociale.

## 2 - Quelques modèles du marché

### 2.1 - SPOT de Boston Dynamics

Pionnier dans le domaine, Boston Dynamics est une entreprise américaine active depuis 1992. De nombreuses réalisations ont rendu célèbre la marque, au travers de vidéos futuristes publiées sur les réseaux sociaux [Vidéo 1]. SPOT est la série quadrupède des robots développés par la marque (Figure 1).

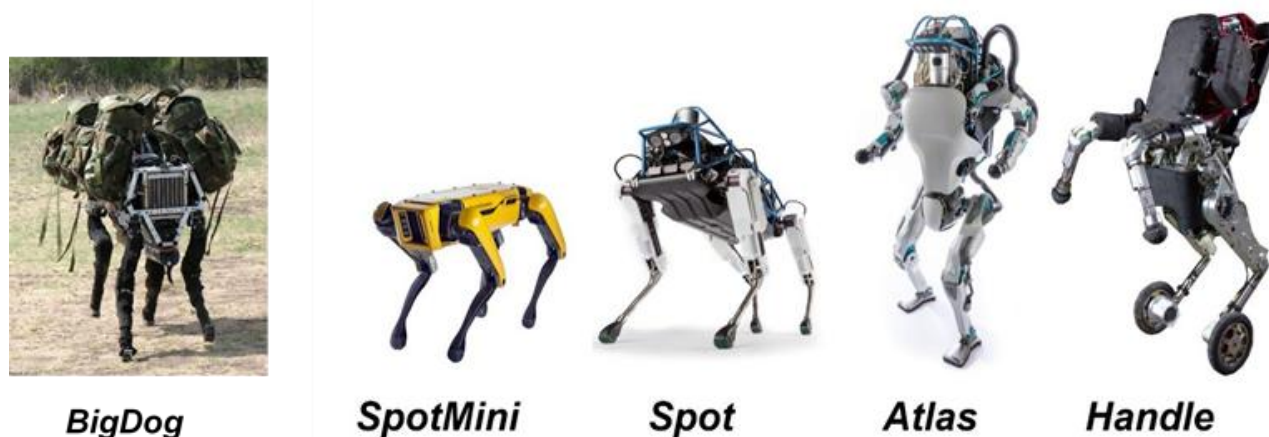


Figure 1 : Quelques robots célèbres de Boston Dynamics

SpotMini, initialement dévoilé en 2016, il a été commercialisé à partir de 2019. Malgré son prix élevé, à partir de 75 000 \$, ses caractéristiques de mobilité, de charge utile, de stabilité et de capacités d'interaction avec l'environnement, ont fait de lui un succès commercial. Avec son « pelage », jaune et noir, SpotMini mesure plus d'un mètre de long, il peut porter jusqu'à 14 kg sur son dos, avec une vitesse de 5,7 km/h et une autonomie de 1H30 (Figure 2).

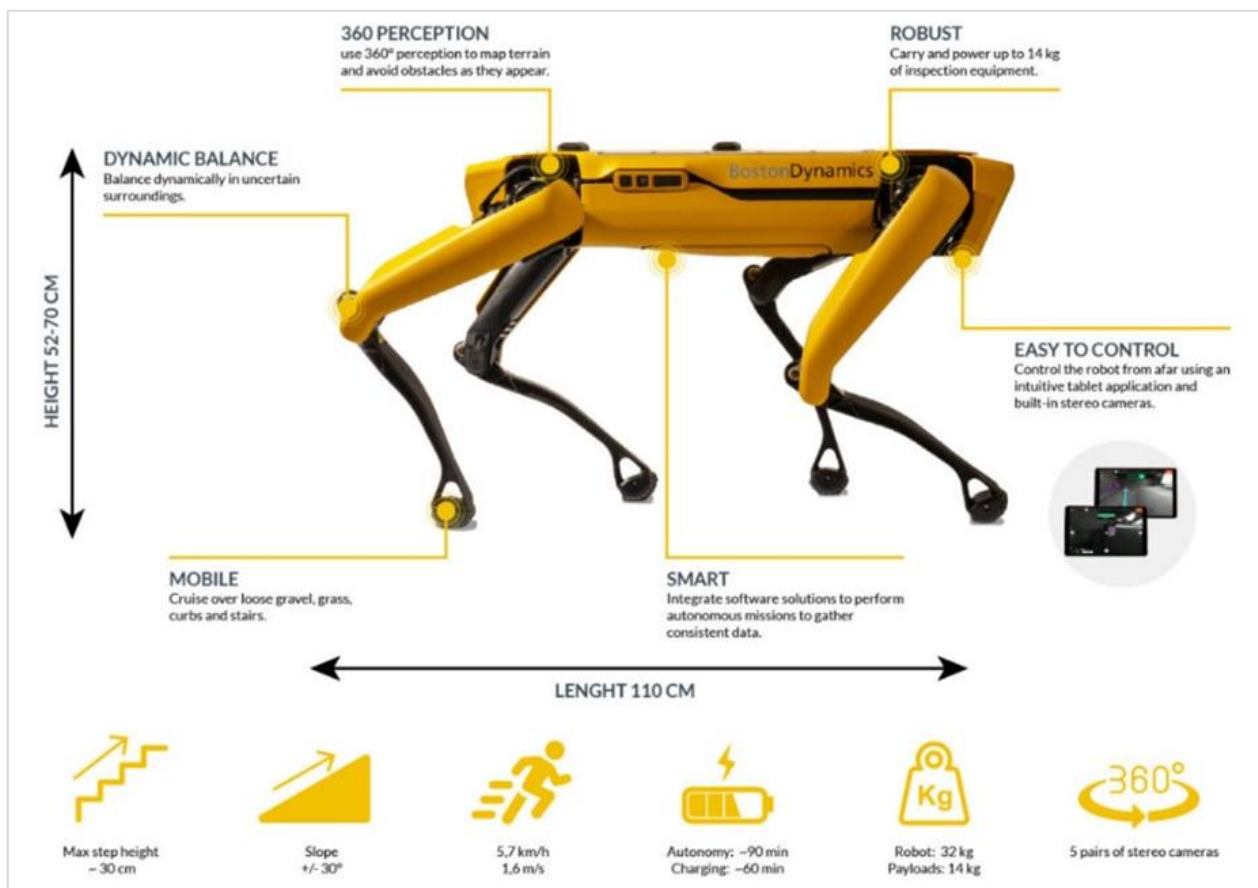


Figure 2 : Présentation de SpotMini

Au niveau contrôle/commande, comme beaucoup de ses concurrents, SpotMini peut fonctionner de trois façons.

### Pilotage manuel

Télécommande / tablette (Figure 3) : Le robot peut être contrôlé à distance via une télécommande ou une interface sur tablette.

Contrôle précis : On peut lui demander de marcher, tourner, monter des escaliers ou manipuler des objets avec son bras robotisé (accessoire à acheter en plus de la version de base)

Situations adaptées : Idéal lorsque l'opérateur veut avoir un contrôle complet dans des environnements complexes ou inhabituels.

### Navigation autonome

Planification de trajectoire (Figure 3) : Grâce à ses capteurs (caméras stéréo, LIDAR, IMU), SpotMini peut cartographier son environnement et se déplacer de manière autonome.

Évitement d'obstacles : Il peut contourner les obstacles, monter et descendre des escaliers ou traverser des terrains irréguliers sans intervention humaine.

Mission préprogrammée : On peut définir un parcours ou des tâches spécifiques, et le robot s'exécute tout seul.

### Fonctionnement coopératif

Dans certaines conditions, SpotMini peut fonctionner de façon coopérative avec d'autres robots, travaillant conjointement pour accomplir une tâche comme ouvrir une porte : l'un scanne ou analyse la scène, puis l'autre intervient avec un bras [Vidéo 2].

Néanmoins, Spot peut coopérer avec d'autres robots dans des scénarios planifiés ou de démonstration, ou via des plateformes logicielles qui permettent la coordination de flotte. Mais ce n'est pas encore un "mode coopératif universel" qui fonctionne dans tous les environnements sans configuration préalable, contrairement à des drones aériens qui réalisent des spectacles (type shows de lumières avec des centaines/milliers de drones) et sont conçus dès le départ pour coopérer de manière extrêmement synchronisée et autonome.

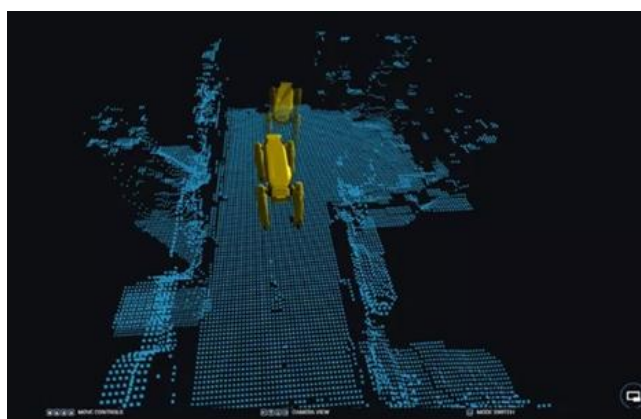


Figure 3 : Pilotage manuel ou Navigation autonome de SpotMini

Comme tous les robots chiens actuels, SpotMini peut être utilisé pour des missions dans des environnements dangereux (Figure 4). A titre d'exemple, il a été utilisé dans le cadre de la pandémie de Covid-19, ou lors d'inspections sur des plateformes pétrolières en mer du Nord, ou encore pour cartographier la distribution de la radioactivité à l'intérieur du New Safe Confinement (NSC), la structure en béton recouvrant le réacteur 4, site de la catastrophe nucléaire de 1986 à Tchernobyl.



Figure 4 : Un robot-chien n'a peur de rien

Différentes versions de Spot ont aussi été testés dans des contextes militaires ou de surveillance. Aux États-Unis, mais aussi en France (depuis 2021 à Saint-Cyr Coëtquidan), plusieurs armées ont expérimenté Spot dans des exercices d'observation, transport de charges, détection de mines et coordination avec drones aériens et systèmes de commandement [Vidéo 3]. On peut également citer l'utilisation en patrouille de surveillance de la résidence de Donald Trump à Mar-a-Lago. (Figure 5).



Figure 5 : Missions de défense et surveillance

Permettant de réduire l'exposition des soldats dans des zones hostiles ou inconnues, un robot-chien peut franchir des terrains accidentés, ce qui peut compléter le rôle des véhicules terrestres ou drones. Pour des considérations éthiques et réglementaires, Boston Dynamics a publiquement refusé d'armer Spot, ou de lui faire utiliser des armes létales. Ce n'est pas le cas de nombreux concurrents, comme le SPUR de Ghost Robotics, qui est équipé d'un fusil semi-automatique, de précision et de gros calibre (Figure 6). Et sans parler de toutes les transformations faites « maison » (Figure 7), ou mêmes des adaptations vendues dans le commerce, comme le « Thermonator » développé par la société THROWFLAME et équipé d'un lance-flammes longue distance [Vidéo 5].



Figure 6 : SPUR (Special Purpose Unmanned Rifle)



Figure 7 : UniTree Go1 with a Gun

## 2.2 - Unitree Robotics

Après le succès de l'américain SPOT, d'autres acteurs se sont imposés sur le marché, comme la société chinoise Unitree Robotics, qui a proposé des modèles plus accessibles financièrement, à partir de 3000 \$, tels que le Go1 ou le Go2, destinés autant à la recherche académique qu'à des usages commerciaux. Depuis 2018, la gamme des produits Unitree se distingue par sa diversité, allant des modèles grand public, aux plateformes professionnelles destinées à des applications industrielles avancées (Figure 8).

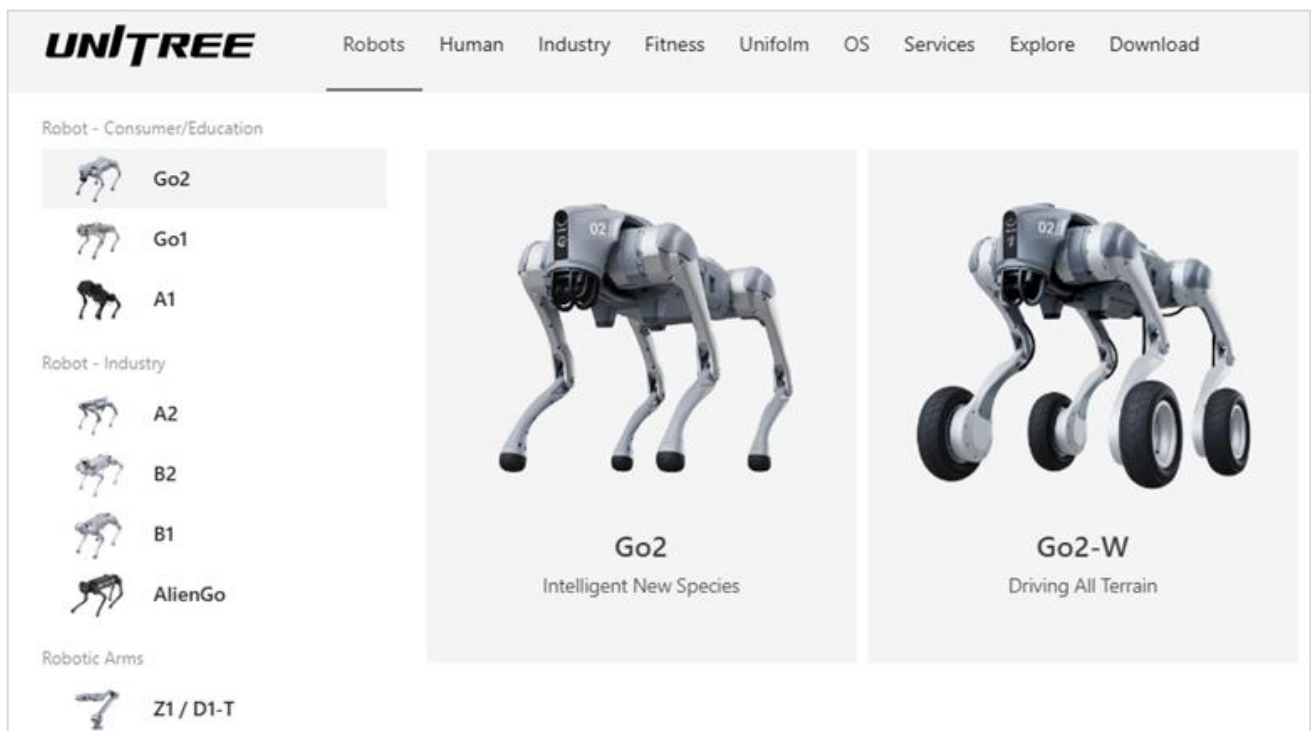


Figure 8 : Robots chiens Unitree en 2025

Les modèles Go1 et Go2 sont bien adaptés pour les établissements de formation, offrant des plateformes accessibles pour l'apprentissage de la robotique et le développement de projets innovants. Ils sont chacun proposés en plusieurs versions (AIR, PRO, X, EDU...) avec des équipements basiques, jusqu'à très complet, pour des prix allant de 1600 \$ à plus de 15000 \$.

	Go1 [AIR]	Go1 [PRO]	A1	Go2 [AIR]	Go2 [PRO]
Longueur (cm)	59	59	62	70	70
Vitesse (km/h)	9	12,6	11,8	9	12,6
Poids (kg)	12	12	12	15	15
Charge utile (kg)	3	3	5	7	8
Autonomie	~1 H	~1 H	1~2,5 H	1~2 H	1~2 H
Prix HT (\$)	2700	3500	10 000	1600	2800

## 2.3 - DEEP Robotics

Plus récemment apparue sur le marché (2018~2020), l'entreprise chinoise DEEP Robotics propose plusieurs robots-chiens ayant de très bons rapports qualité/prix : X20, X30 et Lite3.

Avec des performances très proche du Go2 de Unitree, le Lite3 est proposé en plusieurs versions, avec là aussi différents niveaux d'accessoires (Figure 9). Comme son concurrent, le code source est « ouvert » et disponible : <https://github.com/DeepRoboticsLab>.

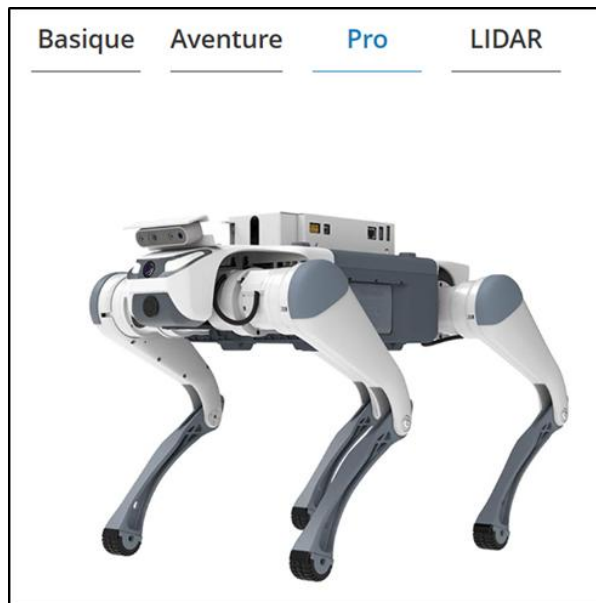


Figure 9 : DEEP Robotics Lite3 Pro

Le Lite3 est fourni avec une intégration ROS prête à l'emploi, ce qui permet :

- De piloter le robot directement via les nœuds ROS.
- De récupérer en temps réel les données des capteurs (caméras, IMU, LiDAR, ultrason, etc.).
- De développer des algorithmes de navigation, de planification de trajectoire ou de perception en utilisant des bibliothèques ROS existantes (SLAM, MoveIt, Nav2, etc.).

Le robot est livré avec un SDK (Software Development Kit) qui expose ses principales fonctions via une API, ce qui permet d'accéder directement :

- Aux commandes de locomotion (vitesse, orientation, allures prédéfinies comme : trot, pas, saut, etc.).
- Aux capteurs embarqués (caméras, IMU, LiDAR selon la version).
- Aux diagnostics (batterie, température, état des articulations).

Le SDK est compatible avec plusieurs langages, typiquement Python et C++, ce qui permet aussi bien un prototypage rapide qu'un développement robuste. On peut l'intégrer avec des frameworks d'IA (TensorFlow, PyTorch) pour entraîner des comportements basés sur l'apprentissage machine, comme la reconnaissance d'objets ou le suivi de personnes.

DEEP Robotics fournit un modèle URDF complet du Lite3. [Unified Robot Description Format] est un format de description des robots utilisé dans ROS et dans des simulateurs comme Gazebo, Webots ou Isaac Sim. Ce modèle permet de :

- Simuler le robot dans un environnement virtuel (avant même de l'avoir physiquement).
- Tester des algorithmes de locomotion, de navigation, de SLAM ou d'évitement d'obstacles en conditions simulées.
- Former des modèles d'apprentissage par renforcement (reinforcement learning) dans un environnement simulé, puis transférer ces comportements dans le robot réel (méthode appelée sim-to-real).

## 2.4 - Petoï avec « Bittle » et « Nybble »

Fondée en 2017, et basée aux États-Unis et en Chine, Petoï est une petite start-up dont l'objectif est de rendre accessibles des robots quadrupèdes à un large public, pour un usage éducatif. Les

produits principaux sont Nybble (un mini robot-chat en structure bois) et Bittle (un mini robot-chien), tous deux pesant moins de 300 grammes (Figure 10).

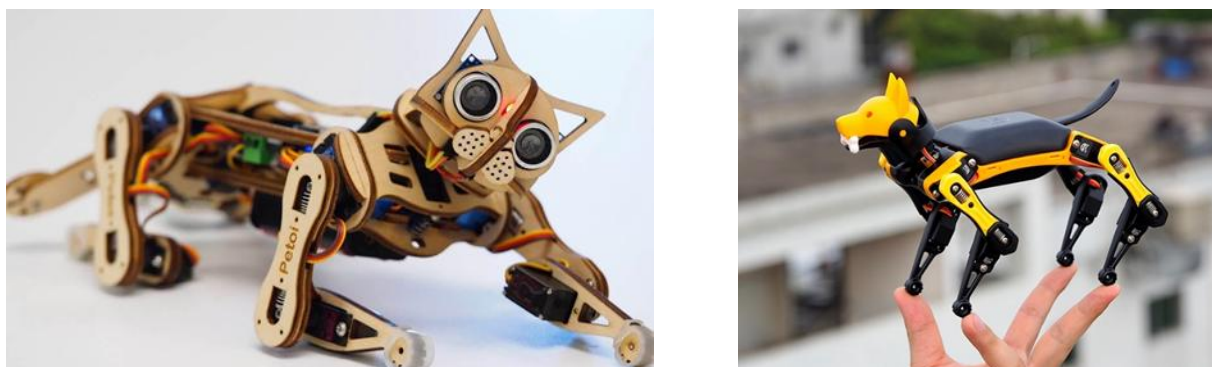


Figure 10 : Nybble et Bittle de PETOI

Pour le contrôle/commande, les deux mini robots, utilisent des cartes de développement « grand public », basés sur ESP32 ou ATmega328 (Arduino) (Figure 11). Le fait que matériel et logiciel soient ouverts, rend accessible leur utilisation pour des lycéens, étudiants, amateurs, clubs de robotique. Ils ne cherchent pas à rivaliser sur les performances extrêmes, mais sur l'accessibilité, la modularité, et la communauté. Une version puzzle 3D est également disponible sur les deux modèles (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

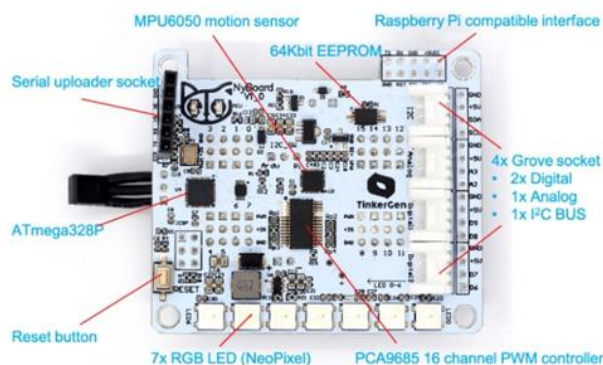


Figure 11 : Architecture avec ATmega



Figure 12 : Kit complet de Bittle

## 2.5 - Les modèles DIY

Avec la démocratisation des moyens de prototypage (logiciels de modélisation 3D, imprimantes 3D, cartes de développement open source...), de nombreux amateurs se lancent dans la fabrication de robots quadrupèdes « faits maison ».

Voici quelques projets qui ont rencontré un franc succès sur YouTube ou ailleurs. Ce qui les rend notables ou populaires est lié à :

### Originalité mécanique ou conceptuelle

- Par exemple, éviter les engrenages / poulies classiques, articulations ingénieuses....
- Ou des versions modifiées de robots célèbres (Spot, etc.) conçues par des amateurs.

### Travail visuel / démonstration

- Voir le robot marcher, danser, faire quelque chose de reconnaissable. Pas juste de la théorie ou du code.
- Explications détaillées et pédagogiques.
- Les vidéos “full build” + résultats finaux (marche, allures, équilibre...).

## Accessibilité & documentation

- Fichiers CAD partagés, liste de pièces, tutoriels étape par étape, ce qui permet à d'autres de le reproduire.
- Codes réalisés sur des kits grand public (Arduino, ESP32, Raspberry...) et disponibles en open source sur Github.

### Le « TOPS » de Aaed Musa

Conçu par Aaed Musa, un créateur passionné de robotique, TOPS est un robot quadrupède à 12 degrés de liberté (DOF), entièrement imprimé en 3D et open-source (Figure 13). Son nom est un jeu de mots sur le célèbre robot Spot de Boston Dynamics, en inversant les lettres de "SPOT". Ce robot est contrôlé via un système basé une carte Teensy 4.1, avec des bibliothèques spécifiques fournies sur GitHub, compatibles avec le framework Arduino. Les 12 actionneurs QDD (Quasi-Direct Drive) sont « faits maison » avec moteur Brushless et réducteur planétaire imprimé en 3D [Vidéo 6].

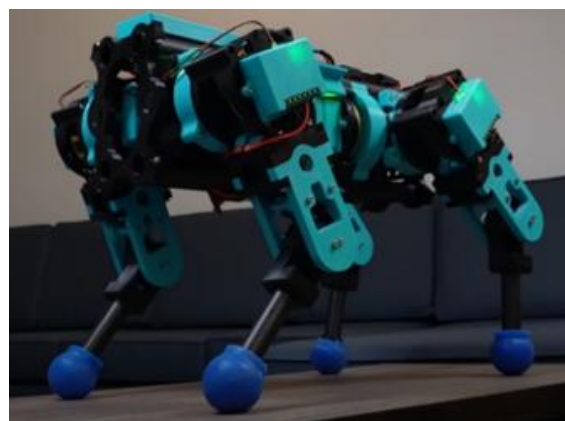
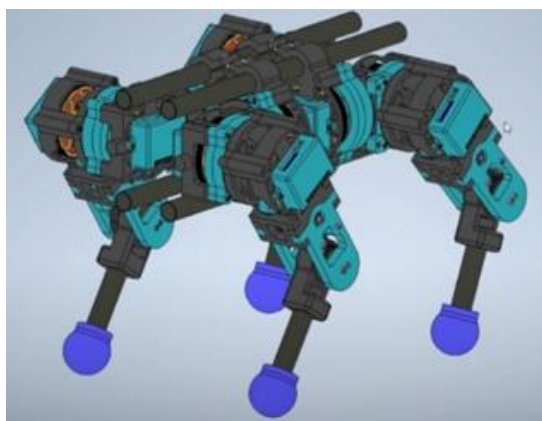


Figure 13 : Le « TOPS » de Aaed Musa

### Le « openDog » de James Bruton

Le robot quadrupède développé par James Bruton (Figure 14) en est à sa version « openDog V3 ». La structure est composée de pièces imprimées en 3D, renforcée avec des pieds en TPU. Les moteurs sont de type Brushless, avec contrôleurs ODrive, le tout commandé par une carte Teensy 4.1 (Processeur ARM Cortex-M7 à 600 MHz).

Le projet est conçu pour être compatible avec le système ROS (Robot Operating System), facilitant l'intégration de fonctionnalités avancées telles que la reconnaissance gestuelle, la navigation autonome et l'interaction avec l'environnement [Vidéo 7].

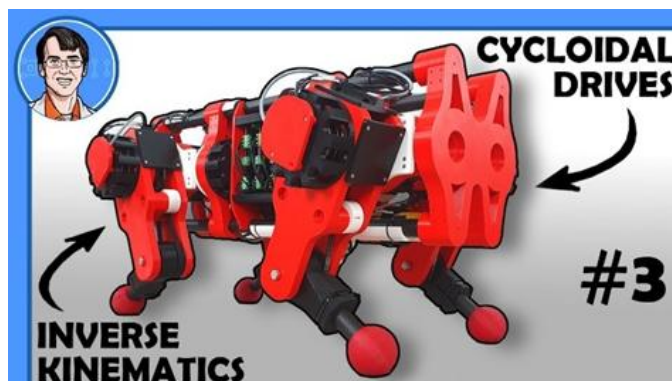


Figure 14 : Le « openDog » de James Bruton

### Le « spotMicro » de [Advanced Hoppy Lab] et [SpotMicroAI]

SpotMicro est une version revisitée du robot quadrupède open-source initialement conçu par Deokyeon Kim, qui se veut être visuellement, une copie miniature du robot de Boston Dynamics (Figure 15) [Vidéo 8]. La partie commande est réalisée avec un Raspberry Pi, et une programmation en Python avec intégration de ROS pour des fonctionnalités avancées.



Figure 15 : Le « spotMicro » de [Advanced Hoppy Lab]

### Le « robot dog » de [Maker 101]

Le robot-chien de Maker 101 est conçu pour être un projet d'introduction à la robotique, combinant mécanique, électronique et programmation simple. Il est basé sur une structure imprimée en 3D, contrôlée par un microcontrôleur Arduino Nano et équipée de servomoteurs standards pour les mouvements (Figure 16).

Un tutoriel détaillé est disponible sur YouTube [Vidéo 9], expliquant étape par étape la construction et le contrôle du robot-chien. Ce projet est destiné aux débutants qui souhaitent se lancer dans la robotique sans investissements majeurs, tout en apprenant les bases de la mécanique, de l'électronique et de la programmation.

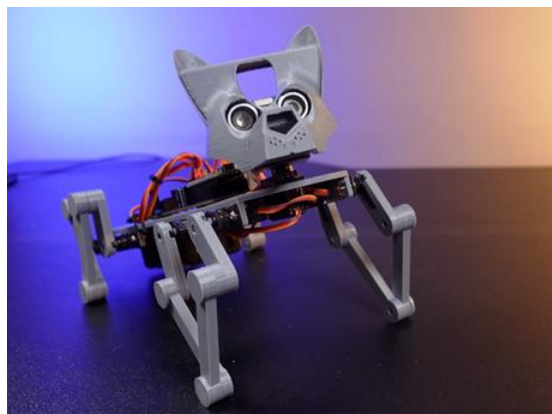


Figure 16 : Le robot dog de [Maker 101]

### Le « mjbots quad » de Josh Pieper

C'est l'un des projets DIY / open source les plus aboutis à ce jour, mêlant des parties mécaniques, électroniques avancées et logiciel de contrôle dynamique. L'objectif du projet était de construire un robot quadrupède dynamique, performant, inspiré de robots comme le Mini-Cheetah, mais entièrement open source [Vidéo 10].

Le Mini Cheetah est un robot quadrupède développé par le MIT Biomimetic Robotics Lab. (Figure 18). C'est un robot de recherche qui a marqué les esprits car il était à la fois petit, agile, robuste

et relativement “abordable” comparé aux robots quadrupèdes commerciaux comme ceux de Boston Dynamics. Présenté en 2019, il apparaît dans des vidéos où il réalise des backflips, court dans l’herbe, ou résiste aux coups de pied [Vidéo 11]. Il a servi de base pour tester de nouveaux algorithmes de Machine Learning pour la locomotion quadrupède.

La version A1 du « mjbots quad » (Figure 17) utilise des servos brushless avec des contrôleurs personnalisés. La structure est composée de pièces métalliques usinées spécialement pour le projet. Le robot utilise un Raspberry Pi 3B+ comme unité centrale pour le contrôle global. Le logiciel de contrôle dynamique est très performant, alliant contrôle de couple et position, avec gestion des gaits (allures), du séquençement et de la dynamique de marche.



Figure 17 : Le « mjbots quad » A1



Figure 18 : Backflip de Mini Cheetah

### Le projet « Antartic » de [Gonzalo Espinoza]

Gonzalo Espinoza Graham est à l’origine du projet « Antartic », nom donné car son objectif initial était de construire un robot, de l’envoyer en Antarctique et de diffuser sa survie en direct. Gonzalo adopte une approche “open-source” totale, partageant chaque aspect du projet, y compris les erreurs et les leçons apprises. Les vidéos durent plusieurs heures chacune et montrent chaque étape de la CAO, de l’impression 3D, de l’assemblage, de la programmation du firmware, des modèles d’entraînement... (Figure 19) [Vidéo 12]. Le projet a débuté le 8 septembre 2024 et est toujours en cours.

Le robot est programmé par apprentissage automatique (ML) et inspiré des travaux de Disney sur les personnages robotiques bipèdes {Disney’s Bipedal Robotic Character paper}. Le prototypage initial a commencé avec un Arduino Uno classique, pour tester les servomoteurs, la cinématique des pattes, et la lecture des capteurs (IMU, etc.).

Le robot (géométrie, masses, moteurs, contraintes) est tout d’abord modélisé dans un moteur de simulation (PyBullet ou MuJoCo, les deux très populaires pour l’entraînement de robots quadrupèdes). Le robot est donc simulé via son modèle URDF, ce qui permet de tester rapidement des milliers de combinaisons de mouvements.

Le modèle (réseau de neurones) assurant la commande de mobilité est entraîné en Python sur PC, avec algorithmes intégrés dans des frameworks Python comme Stable Baselines3 ou RLlib.

Framework logiciel :

- Côté ML pur : PyTorch ou TensorFlow.
- Côté interface avec la simulation : Gymnasium (anciennement OpenAI Gym) pour définir les environnements.

L'apprentissage est réalisé par renforcement (Reinforcement Learning, RL). Le robot apprend en maximisant une récompense : avancer sans tomber, garder l'équilibre, économiser de l'énergie. Les algorithmes typiques dans ce cadre, sont :

- PPO (Proximal Policy Optimization),
- DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient),
- SAC (Soft Actor-Critic).

Une fois entraîné, le réseau est compressé (quantization, pruning) et exporté dans un format léger : TensorFlow Lite ou onnx. Sur le robot, le microcontrôleur (Arduino) ne fait pas l'entraînement, il fait seulement l'inférence : lire les capteurs (IMU, positions servos), puis appliquer le modèle ML, afin de générer les consignes moteur.



Figure 19 : Tutorial complet de Gonzalo Espinoza

### Et tous les autres qui ont moins de visibilité

Il convient de préciser qu'il demeure impossible d'être exhaustif dans le recensement des différents modèles de robots quadrupèdes actuellement disponibles ou en développement. Le domaine est en effet marqué par une très forte dynamique d'innovation, où de grands industriels, des start-ups, des laboratoires de recherche et même des communautés de makers indépendants proposent régulièrement de nouvelles plateformes, souvent sous forme de prototypes, de concepts ou de séries limitées. De plus, de nombreux projets restent confidentiels, non publiés ou abandonnés avant commercialisation, tandis que d'autres ne sont documentés qu'à travers des canaux informels (vidéos en ligne, dépôts GitHub, forums spécialisés). Dans ces conditions, tout état de l'art à un instant « t » ne peut offrir qu'une vision partielle et nécessairement sélective de l'écosystème, en privilégiant les contributions les plus représentatives ou les mieux documentées.

## 2.6 - Kawasaki CORLEO

Au départ, on aurait pu penser à une « fake news », mais Kawasaki a bien présenté sur son site officiel, un « véhicule de mobilité personnelle tout-terrain à quatre pattes », nommé CORLEO (Core Logic Enhanced Organism). Il a été présenté à la presse à l'exposition 2025 de Osaka-Kansai. Il est encore à l'état de concept, montré sous forme d'une maquette ou de simulations pour l'exposition d'Osaka, avec vidéos d'animation [Vidéo 13]. Certains articles parlent d'un horizon très lointain (2050) comme éventuelle date de mise sur le marché.

Kawasaki propose donc un concept révolutionnaire de moto trail qui troque les roues pour 4 pattes robotisées, inspirées des mouvements félins. Pensé pour explorer les terrains les plus hostiles, ce véhicule futuriste fonctionne à l'hydrogène et promet une expérience de pilotage ultra-immersive (Figure 20).



Figure 20 : Le Kawasaki CORLEO

Ce robot, que certains présentent comme un cheval mécanique, est propulsé par un moteur à hydrogène de 150 cc pour générer l'électricité nécessaire aux unités motrices des quatre pattes. On lit des estimations non confirmées de 8 à 12 heures d'usage, avec une puissance de 20 CV pour l'ensemble de la propulsion, à savoir quatre jambes motorisées, chacune indépendante, avec sabots en caoutchouc antidérapants, "divisés" gauche/droite pour une meilleure adhérence (Figure 21).

Au niveau du contrôle, notons la présence de systèmes d'IA pour le contrôle de l'équilibre, adaptation de la démarche (gait adjustment), la reconnaissance d'obstacles, l'adaptation de l'itinéraire.

Il y a également la détection du déplacement du centre de gravité du pilote, via des capteurs, pour ajuster la posture du pilote et pour rester ergonomique même en montée ou sur terrain accidenté. Ajoutons un affichage tête haute (HUD) présentant toutes les données comme niveau d'hydrogène, stabilité, informations de navigation et la projection au sol de repères lumineux la nuit, pour guider le pilote.

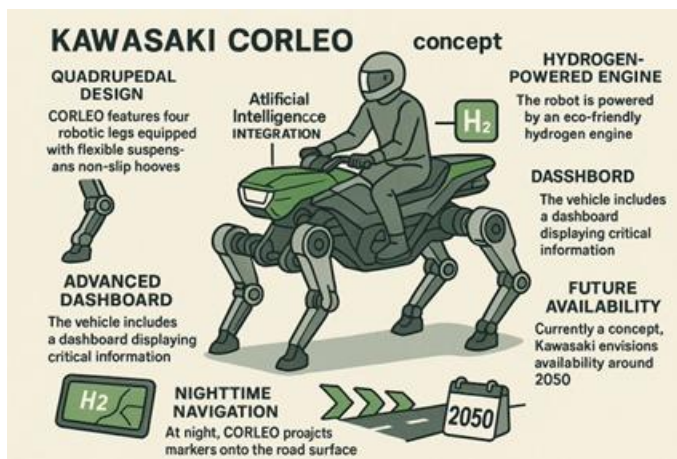


Figure 21 : Constitution du CORLEO

### 3 - Robot-chien Go1 et applications pédagogiques

#### 3.1 - Présentation du robot

Premier grand succès commercial pour Unitree, Go1 est commercialisé depuis 2021, avec plus de 20000 unités vendues en 2023. Depuis 2025 la gamme s'est étoffée avec la venue de Go2, qui en fait le successeur potentiel de Go1. Mais le Go1 reste pertinent pour un usage plus simple, pour des applications industrielles moins intensives. De plus les deux robots sont chacun disponibles en plusieurs versions pour couvrir de nombreux cas d'usage.

Pour la suite de cet article, c'est le modèle Go1 EDU qui sera étudié. Mesurant 70 cm, il pèse environ 12 kg avec batterie, et sa charge utile est de 5 kg. La batterie Li-ion de 6000 mAh assure une autonomie comprise entre 1 et 2 heures suivant le mode d'utilisation [Vidéo 14].

La partie mécanique comporte 12 servomoteurs. Donc 3 par patte (Figure 22). Il s'agit de moteurs synchrones, à aimants, avec réducteur mécanique 1/6.33, et contrôleur électronique intégré. Les consignes (Angle, couple, vitesse) sont transmises via une liaison, série, RS485, à 4 Mégabits, par seconde (Figure 23).



Figure 22 : Articulations de Go1

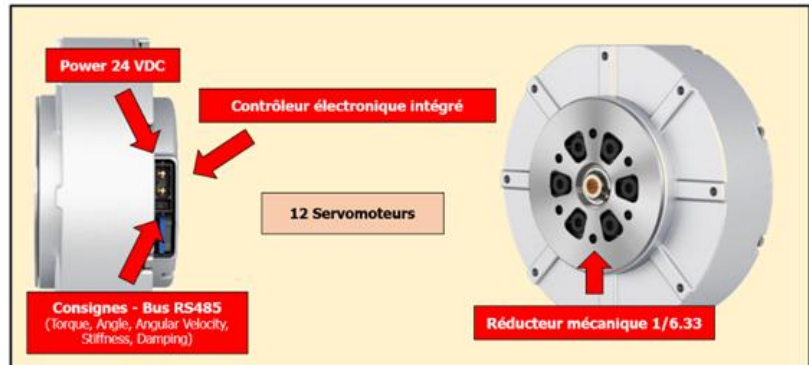


Figure 23 : Servomoteurs de Go1

Les servomoteurs sont commandés à partir d'une carte de contrôle, avec microcontrôleur STM-32, intégrant une centrale inertielle pour la mesure des vitesses, des accélérations et de l'orientation sur les 3 axes. Une liaison radio permet d'effectuer, avec une télécommande spéciale, un arrêt d'urgence.

Toujours dans Go1, trois cartes Jetson Nvidia, pour le traitement des images issues des 5 caméras. Et tout ce beau monde, communique en Ethernet, via un switch. Ce réseau est accessible à partir d'un port lié au connecteur RJ45, sur le dos du chien.

Mais l'élément essentiel est la Raspberry, qui centralise tout. Elle communique aussi avec un module WiFi qui permet une liaison sans fil depuis un ordinateur ou un smartphone équipé de l'application proposée par le fabricant (Figure 24).

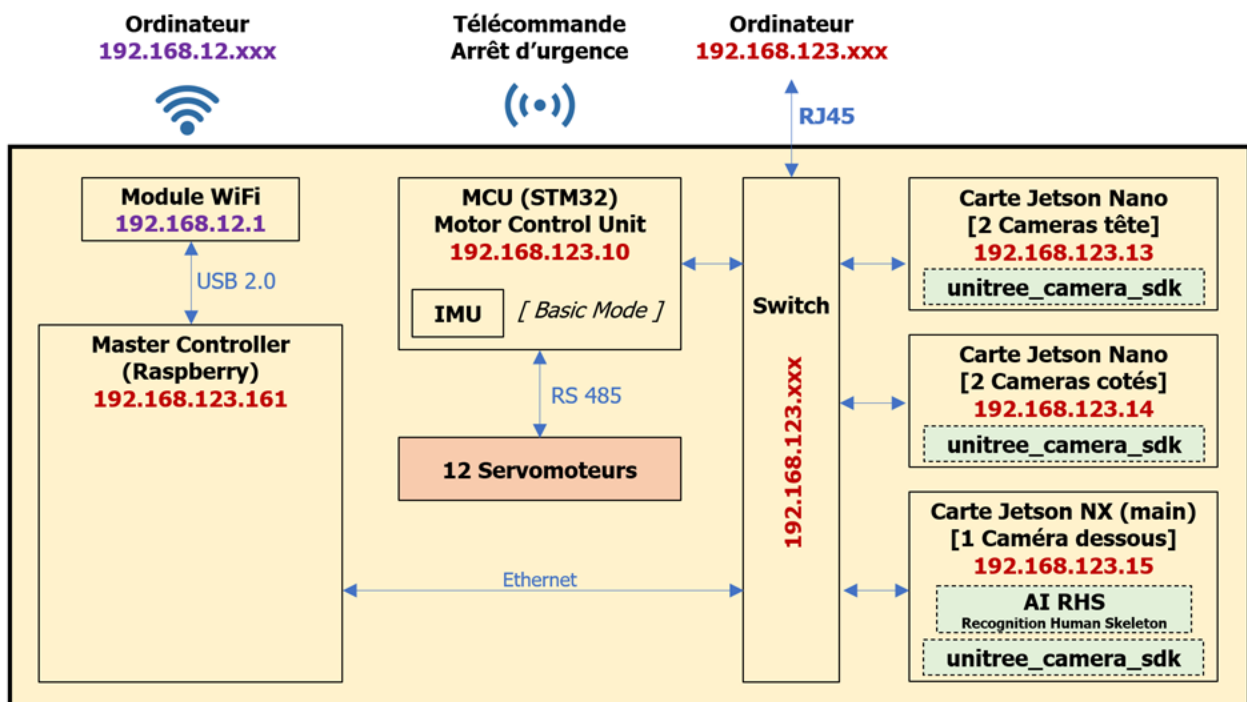


Figure 24 : Architecture interne de Go1 EDU

## Serveur Web de Go1

Au niveau logiciel, dans la Raspberry, on trouve un serveur web embarqué qui permet de commander le robot via un simple navigateur web. Il faut juste entrer l'adresse de la Raspberry :

- 192.168.123.161. en filaire,
- 192.168.12.1. en WiFi (Figure 25).

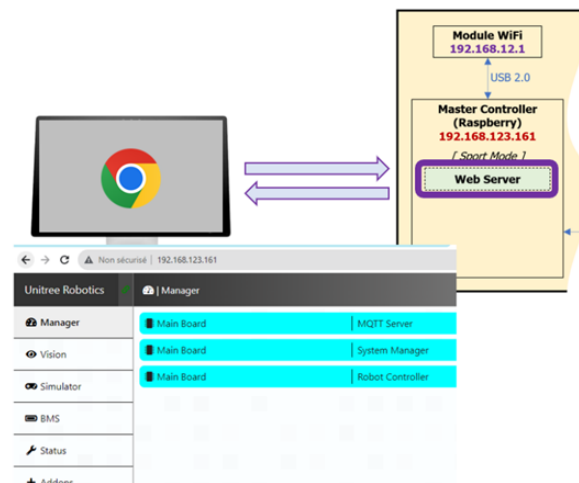


Figure 25 : Commande de Go1 par son serveur Web

## Le SDK de Unitree

Autre avantage avec le robot Unitree, un SDK (Software Development Kit) est fourni par le constructeur. Le programme est compilé et exécuté en local dans le Raspberry. L'ordinateur, quant à lui, nous permet de choisir quel programme ou fonction il faut compiler et exécuter. Les ordres envoyés sont des commandes sous Linux, car c'est le système d'exploitation du Raspberry. Les programmes sont ceux fournis dans le SDK, donc la mémoire du Raspberry. Il y a de nombreux exemples d'applications, mais on peut bien sûr chercher sur Internet/GitHub d'autres fichiers sources pour les exécuter. Ils sont généralement disponibles en C++, JavaScript ou Python (Figure 26).

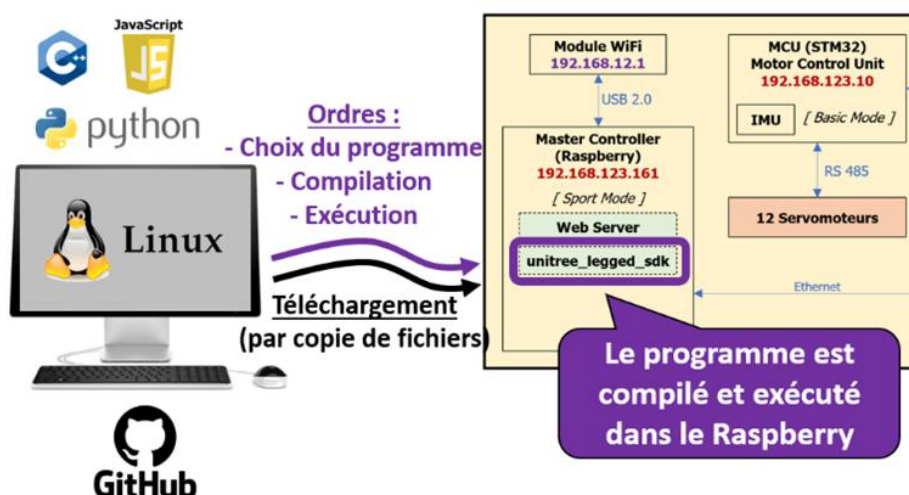


Figure 26 : Utilisation du sdk Unitree

## Go1 est compatible ROS

Le Go1 est conçu pour être contrôlé via ROS (Robot Operating System) ce qui permet d'écrire des programmes de navigation, de suivi, ou d'actions complexes.

Pour faire simple :

- ROS tourne dans le robot Go1 sur son ordinateur embarqué (Raspberry).
- ROS crée et gère tous les topics et nœuds du système :
  - Communication entre les différents composants du robot (capteurs, moteurs, caméras).
  - Les topics : Flux d'informations (ex. /imu pour les données d'accéléromètre, /cmd\_vel pour la vitesse).
  - Les services et actions : Commandes ponctuelles ou actions longues (ex. démarrer une séquence de mouvement).

Python ou C++ sert ensuite à écrire des programmes ou scripts qui pilotent le robot via ROS (Figure 27) (Figure 28). Il devient possible :

- De souscrire aux topics ROS pour lire les données des capteurs.
- De publier des commandes sur les topics ROS pour déplacer le robot.
- D'implémenter de la logique : suivi d'objet, navigation autonome, séquences de mouvements, analyse caméra...

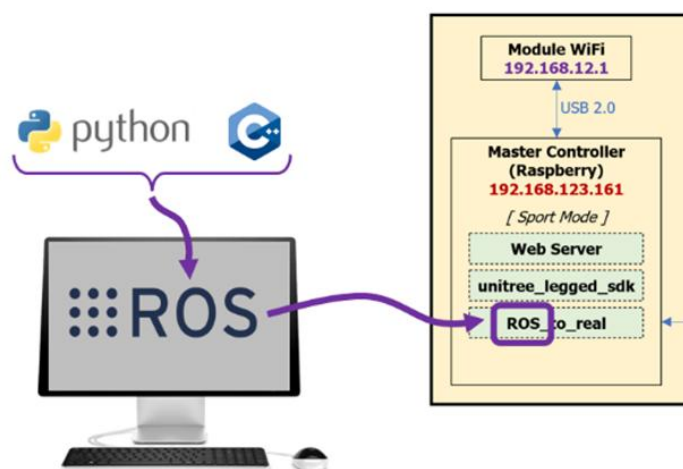


Figure 27 : Go1 est compatible ROS

```
#include "ros/ros.h"
#include "geometry_msgs/Twist.h"
```

```
int main(int argc, char **argv) {
  ros::init(argc, argv, "go1_controller_cpp");
  ros::NodeHandle nh;

  ros::Publisher cmd_pub = nh.advertise<geometry_msgs::Twist>("/cmd_vel", 10);
  ros::Rate loop_rate(10);

  while (ros::ok()) {
    geometry_msgs::Twist msg;
    msg.linear.x = 0.5; // avancer
    msg.angular.z = 0.0;
    cmd_pub.publish(msg);
    ros::spinOnce();
    loop_rate.sleep();
  }
  return 0;
}
```

```
import rospy
from geometry_msgs.msg import Twist

rospy.init_node("go1_controller")
pub = rospy.Publisher("/cmd_vel", Twist, queue_size=10)

# Déplacer le robot en avant
msg = Twist()
msg.linear.x = 0.5
msg.angular.z = 0.0
pub.publish(msg)
```

Figure 28 : Exemple de programmes (C++ à gauche), (Python à droite)

### Go intègre un broker MQTT

Enfin, une autre possibilité d'interagir avec le robot consiste à utiliser le protocole MQTT nativement présent dans la Raspberry de Go1. Pour rappel, le protocole MQTT (Message Queuing

Telemetry Transport) est un protocole léger de messagerie publish/subscribe utilisé principalement pour l'Internet des objets (IoT). Il permet à des appareils (capteurs, objets connectés, serveurs) d'échanger des messages via un broker central, avec un minimum de bande passante et de ressources [Vidéo 15].

Dans notre cas, le broker est déjà installé dans la Raspberry. Il suffit d'un client MQTT, par exemple implanté dans un ordinateur, pour souscrire à une information, par exemple pour connaître quel est l'état de charge de la batterie. Le client peut également publier des données, par exemple pour réaliser une action (faire avancer le robot...).

Il existe de nombreux logiciels et bibliothèques qui permettent de créer des clients MQTT. Par exemple « Node-RED » avec interface graphique, « Mosquitto » en C/C++, ou encore « paho » en python (Figure 29). L'implémentation peut se faire sur des systèmes IoT (et grand public comme Arduino, ESP32, Raspberry...), ou sur des systèmes d'automatismes industriels professionnel (CPU S7 de Siemens, comme étudié dans cet article).

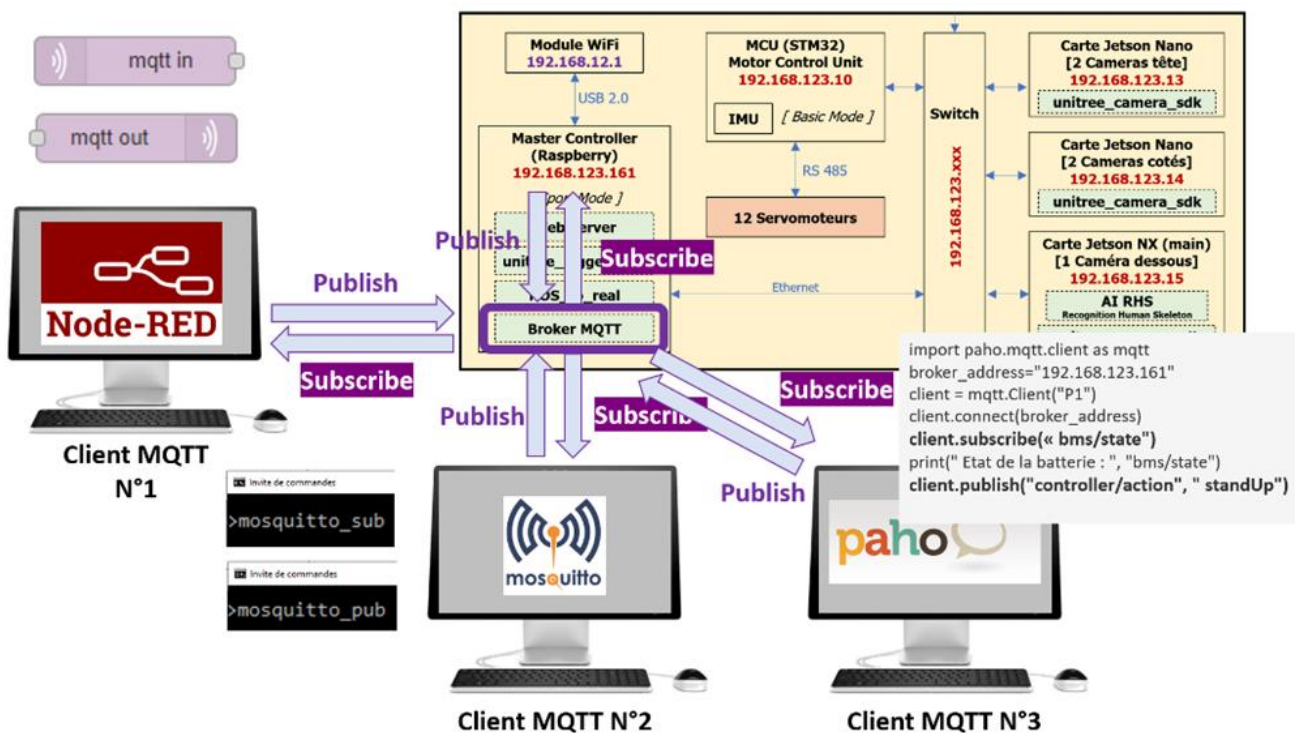


Figure 29 : Différents clients MQTT, pour le broker de Go1

### 3.2 - Commande du robot avec MQTT et Automate (Siemens)

Les CPU de la gamme S7-1200 et S7-1500 ne disposent pas directement d'un client MQTT intégré dans le firmware, mais il est possible d'inclure facilement des bibliothèques TIA Portal qui comportent des blocs fonctionnels MQTT. Dès la version V15, il est possible d'implémenter des clients MQTT dans des CPU 1200 (Figure 30). Dans les versions suivantes, les bibliothèques n'ont cessé de s'enrichir.

**Use the SIMATIC controller as an MQTT client**

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) is a simple protocol on TCP/IP level. It is suitable for messaging functionality and for transmission via unreliable networks. With the LMQTT library, the MQTT protocol is implemented on 1200/1500 Controllers.

**Lean and fast: MQTT**  
MQTT is a simply structured binary Publish/Subscribe protocol on TCP/IP level. It is suitable for messaging between devices and for transmission via unreliable networks with low bandwidth and high latency. With these characteristics, MQTT plays a communication.

**Application-related implementation**  
The LMQTT library provides you with one function block for S7-1500 and S7-1200 CPUs. The "LMQTT\_Client" function block function and allows you to transmit MQTT messages to a broker (publisher role) and to create subscriptions (subscriber role) via a TLS connection. You can reach the broker with a static IP address or a qualified domain name. The following picture shows the secure mqtt-messaging with a SIMATIC S7-1500.

**Criteria of MQTT**  
The MQTT protocol stands out with the following characteristics:

- Lightweight protocol with low transport overhead
- Minimal need for network bandwidth through push mechanism
- Function for re-connecting after disconnection
- Re-sending messages after disconnection
- Mechanism for notifying interested parties after an unpredicted disconnection of a client
- Simple use and implementation thanks to a small set of commands
- Quality of Service (QoS level) with different reliability levels for the message delivery
- Optional encryption of messages via SSL/TLS
- Authentication of publishers and subscribers with username and password

**Documentation and project example for an secure messaging (S7-1500, S7-1200)**

- Documentation (1,9 MB)
- Project for STEP 7 V16 (10,4 MB)

**Last Changes**

- Integrated LMQTT library into the Libraries for Communication
- Updated this application example to LMQTT V3.0

**Archive**  
In the archive you find the old "LMqtt\_Publisher" function blocks for TIA Portal V15 with unencrypt S7-300 CPUs.

- Archiv.zip (21,8 MB)

Figure 30 : MQTT Client Siemens TIA V15

Un automate [sur cet exemple Siemens, mais c'est aussi valable pour Schneider (Modicon M262, M241...), Beckhoff (TwinCAT 3), B&R Automation, Omron NX/NJ, ou encore Wago via Codesys], pouvant implémenter un client MQTT. Ce client peut assurer le contrôle du robot-chien Go1 (Figure 31) via le broker intégré dans la Raspberry, et prêt à l'emploi.

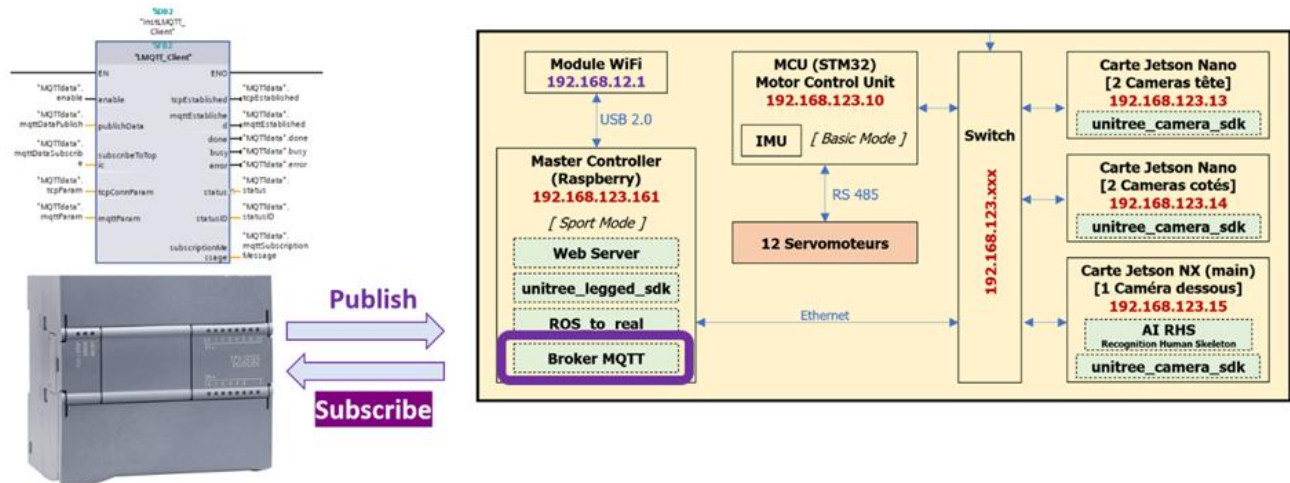


Figure 31 : Contrôle de Go1 avec un automate Siemens, via MQTT

### 3.3 - Exemples d'utilisation de Go1 en SAE de BUT2 ou BUT3

En IUT (Institut Universitaire de Technologie), une SAE signifie Situation d'Apprentissage et d'Évaluation. C'est un dispositif pédagogique nouveau dans la réforme des BUT (Bachelor Universitaire de Technologie), mis en place depuis 2021. Une SAE est généralement construite sous

forme de projet, d'étude de cas ou de problème à résoudre. Les étudiants mobilisent plusieurs ressources (cours théoriques, TD, TP) pour réussir la tâche demandée.

### Travail préparatoire (activité de TP classique) :

#### TP1 : Identification des topics utiles pour commander le robot.

Le premier est appelé 'controller' avec un sous-topic 'action'. Il permet de commander, différents modes de fonctionnement. La syntaxe des différentes commandes (Debout, couché, marche, etc.) est détaillée dans différents fichiers source (Figure 32).

```
1 import { EventEmitter } from "events";
2 import { GoIMQTT } from "../mqtt/gol-mqtt";
3 import { GoIState, getGoIStateCopy } from "../mqtt/gol-state";
4 import { IClientOptions } from "mqtt";
5
6 export enum GoIMode {
7   dance1 = "dance1",
8   dance2 = "dance2",
9   straightHand1 = "straightHand1",
10  damping = "damping",
11  standUp = "standUp",
12  standDown = "standDown",
13  recoverStand = "recoverStand",
14  stand = "stand",
15  walk = "walk",
16  run = "run",
17  climb = "climb",
18 }
19
20 export class GoI extends EventEmitter {
21   mqtt: GoIMQTT;
22   goIState: GoIState;
23 }
```

Figure 32 : Le topic 'controller/action'

Autre topic indispensable, le 'contrôleur/stick' (comprendre Joystick). Il doit contenir 4 valeurs de type float : Lx, Rx, Ry et Ly correspondant respectivement aux 4 mouvements possibles sur la manette.

- Lx, correspond au joystick gauche sur l'axe X. Sa valeur est :
  - 0 en position milieu (sans rien toucher).
  - +1 en position extrême à droite.
  - -1 en position extrême à gauche (Figure 33).

Sur le robot cette commande permet le décalage gauche/droite.

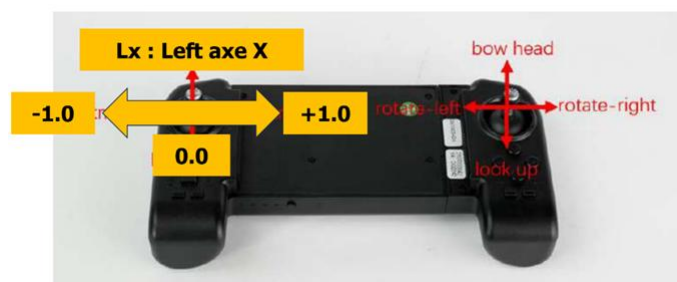


Figure 33 : Commande joystick Lx

- Rx, correspond au joystick droit sur l'axe horizontal. Les valeurs sont à nouveau (en float) comprises entre -1 et +1. Cette commande permet la rotation gauche/droite du robot-chien.
- Ry correspond au joystick droit sur l'axe vertical. Les valeurs sont elles aussi comprises entre -1 et +1.
- Ly, correspond au joystick gauche sur axe vertical avec des valeurs entre -1 et +1. Il permet de faire avancer ou reculer le robot.

Le topic 'face\_light/color' qui va commander la led multicolore dans la tête du robot n'est pas indispensable mais agréable à utiliser. On lui envoie 3 valeurs en Uint (0 à 255) correspondant à l'intensité de couleur codée en RGB.

Le topic en lecture 'bms/state' permet de connaître l'état du Battery Manager Système (pourcentage de charge de la batterie, valeur du courant consommé...).

### TP2 : Commande du robot avec un client léger.

Suivant le niveau de connaissances des étudiants, il est possible d'utiliser Node-RED, ou simplement des lignes de commande avec Mosquitto (Figure 34) [Vidéo 16].

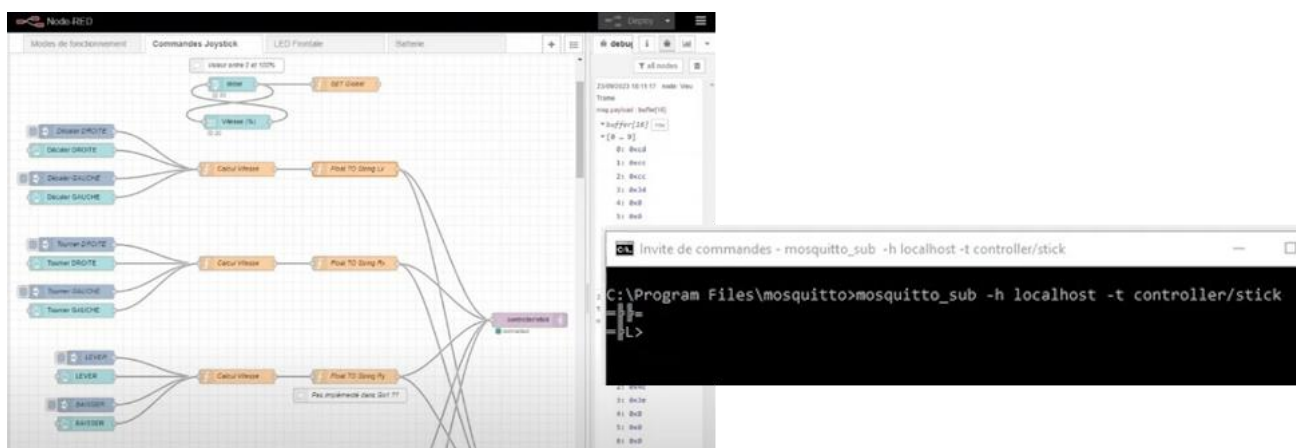


Figure 34 : Commandes MQTT avec Node-RED ou Mosquitto

### TP3 : Commande du robot avec un automate

L'envoi et la réception des topics est maintenant réalisé par un client MQTT à implémenter dans un automate. Avec Siemens et une petite CPU S7-1200, il est possible d'utiliser un bloc fonction « LMqtt\_Publisher » (Figure 35) [Vidéo 16].

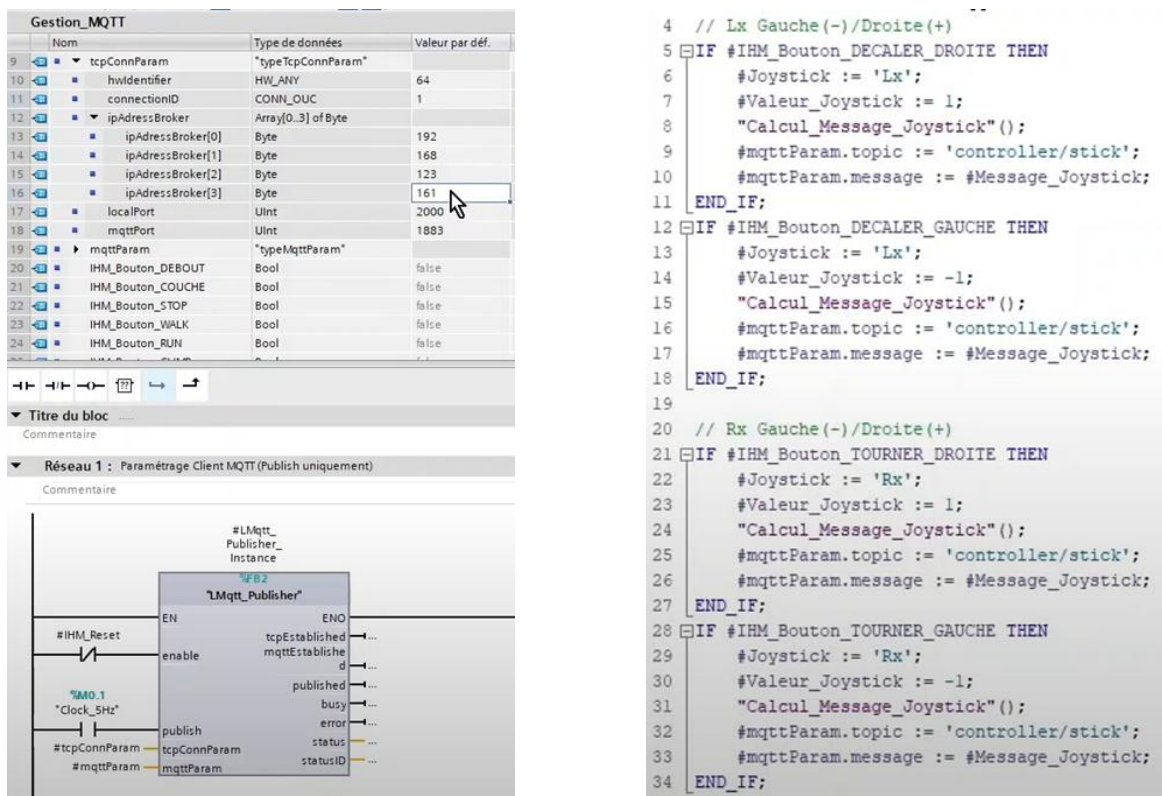


Figure 35 : Exemple de code pour CPU Siemens « LMqtt\_Publisher »

## Exemples de projets complets (SAE) :

### 1. Le robot-chien guide d'aveugle (Parcours All)

Sans pouvoir remplacer complètement l'interaction émotionnelle et intuitive d'un animal vivant, un robot-chien pourrait compléter certains aspects fonctionnels d'un chien guide pour personnes ayant une déficience visuelle : navigation, détection d'obstacles, sécurité...

L'objectif du projet est donc la modification du robot Go1 pour assurer cette fonction de guide. Les différents éléments composant le projet sont (Figure 36) :

- Une caméra « intelligente » (Cognex) pour détecter des particularités dans l'environnement (obstacles, panneaux de signalisation, feu tricolore...)
- Le robot-chien équipé d'une poignée haute pour guider le non-voyant.
- Une carte sonore pour informer de dangers ou situations particulières.
- L'automate monté sur une platine et fixée sur le dos du chien.
- Une télécommande sans fils pour que l'utilisateur puisse interagir avec le robot (Marche/arrêt, pause, changement de mode de fonctionnement...)

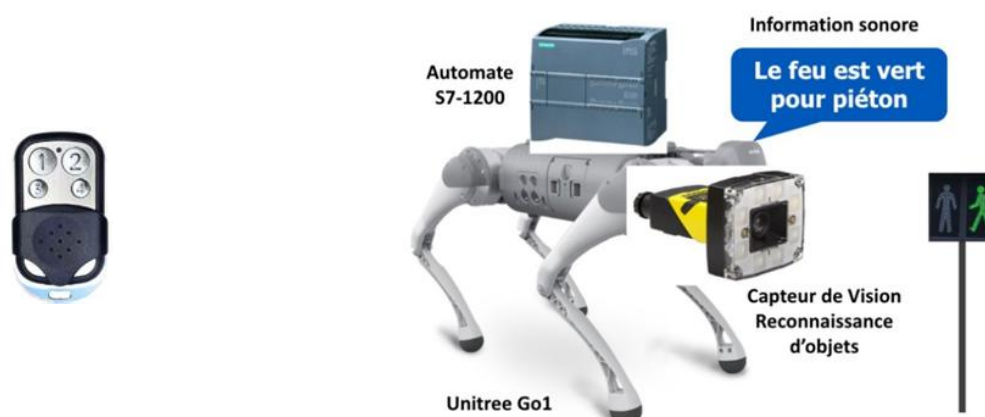


Figure 36 : Le robot-chien pour guide d'aveugle

### 2. Le robot-chien vigile (Parcours All)

Un robot-chien vigile peut améliorer la sécurité d'un espace en patrouillant, détectant des intrusions et en réduisant les risques pour les humains. Il peut patrouiller sans pause, sans fatigue, ni distractions. Équipé de capteurs adéquats, il peut identifier rapidement des intrus ou des comportements suspects (cf chapitre en début d'article avec la surveillance de la résidence de D. Trump).

L'objectif du projet est donc la modification du robot Go1 pour assurer cette fonction de surveillance. Les différents éléments composant le projet sont :

- Un lecteur de QR-codes (Cognex) pour scanner les badges et vérifier l'identité des personnes interceptées.
- Des capteurs ultrasons pour détecter une présence anormale dans l'environnement.
- Le robot-chien programmé pour réaliser un parcours en autonomie.
- Une carte sonore avec haut-parleur pour demander des informations (Arrêtez-vous, Scannez votre badge...)
- L'automate monté sur une platine et fixée sur le dos du chien.
- Un gyrophare et une alarme sonore pour signaler un danger, ou une tentative de vol du chien.

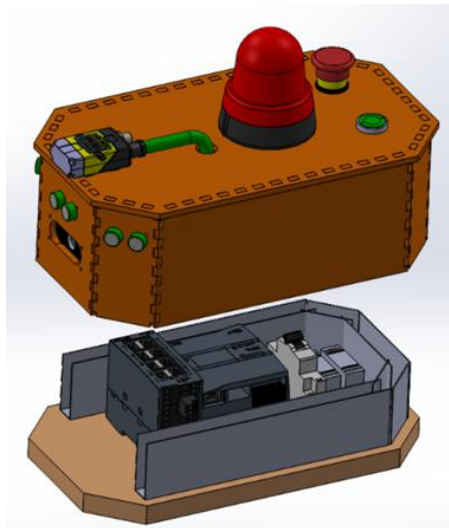


Figure 37 : La platine montée sur le dos du robot-chien vigile

### 3. Amélioration du robot d'origine (Parcours ESE)

Avec le SDK et/ou ROS sur Go1, il est possible d'aller bien plus loin que l'utilisation « standard » avec la télécommande ou l'application. Cela permet « d'ouvrir » le robot et de programmer ses comportements, ses capteurs et son contrôle. Voici quelles possibilités :

#### A. Contrôle bas niveau (SDK)

- Envoi directement de commandes aux moteurs (torque, vitesse, position).
- Modification des gains de contrôle ( $K_p$ ,  $K_d$ ) pour ajuster la rigidité ou la souplesse des mouvements.
- Lire les états en temps réel : positions articulaires, vitesses, courants moteurs, IMU, batterie...et les transmettre à une application « perso »
- Créer ses propres modes de locomotion : trot, pas, saut, montée/descente d'escaliers... avec des paramètres différents de ceux par défaut.

#### Exemples :

- Programmer un nouveau mode « sprint » en augmentant la fréquence de pas et la puissance ou couple des moteurs. Faire des mesures de vitesses et établir de nouveaux records (Figure 38).



Figure 38 : Qui sera le plus rapide ?

- Programmer un nouveau mode « climb » en modifiant les angles des articulations et séquençage des consignes pour franchir un parcours très accidenté. Faire un concours du robot qui réussira le mieux le parcours, à l'image des compétitions officielles (Figure 39) [Vidéo 17].

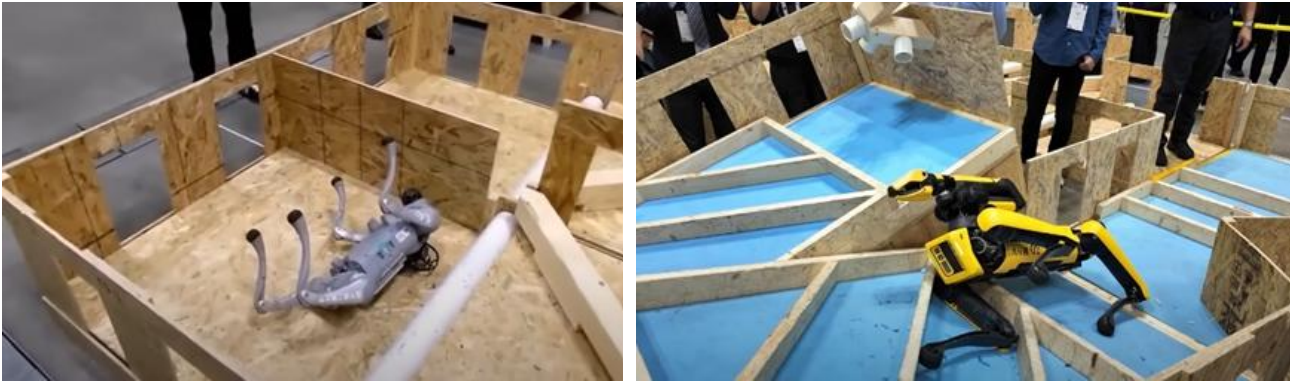


Figure 39 : IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)

## B. Contrôle haut niveau (ROS / middleware)

- Envoi de commandes de déplacement globales : avance, tourne, va à tel point...
- Planification de trajectoire : définir une trajectoire que le robot doit suivre.
- Navigation autonome (SLAM) : utiliser ROS pour intégrer un LiDAR/caméra et permettre au robot de se localiser et d'éviter les obstacles.
- Perception avancée : reconnaissance d'objets/personnes, suivi de cibles, interaction avec l'environnement.

On notera que les nouvelles versions de Unitree Go2, n'intègre plus directement des commandes via MQTT (sauf pour la mise à jour du firmware par OTA). L'accès au système se fait désormais via ROS2 ou DDS (Figure 40). Le Data Distribution Service (DDS) est un middleware de communication temps réel. C'est un système standardisé (défini par l'OMG - Object Management Group) utilisé en robotique et dans l'industrie pour permettre à plusieurs programmes, capteurs et robots de communiquer efficacement entre eux sans avoir besoin de gérer les connexions directement.

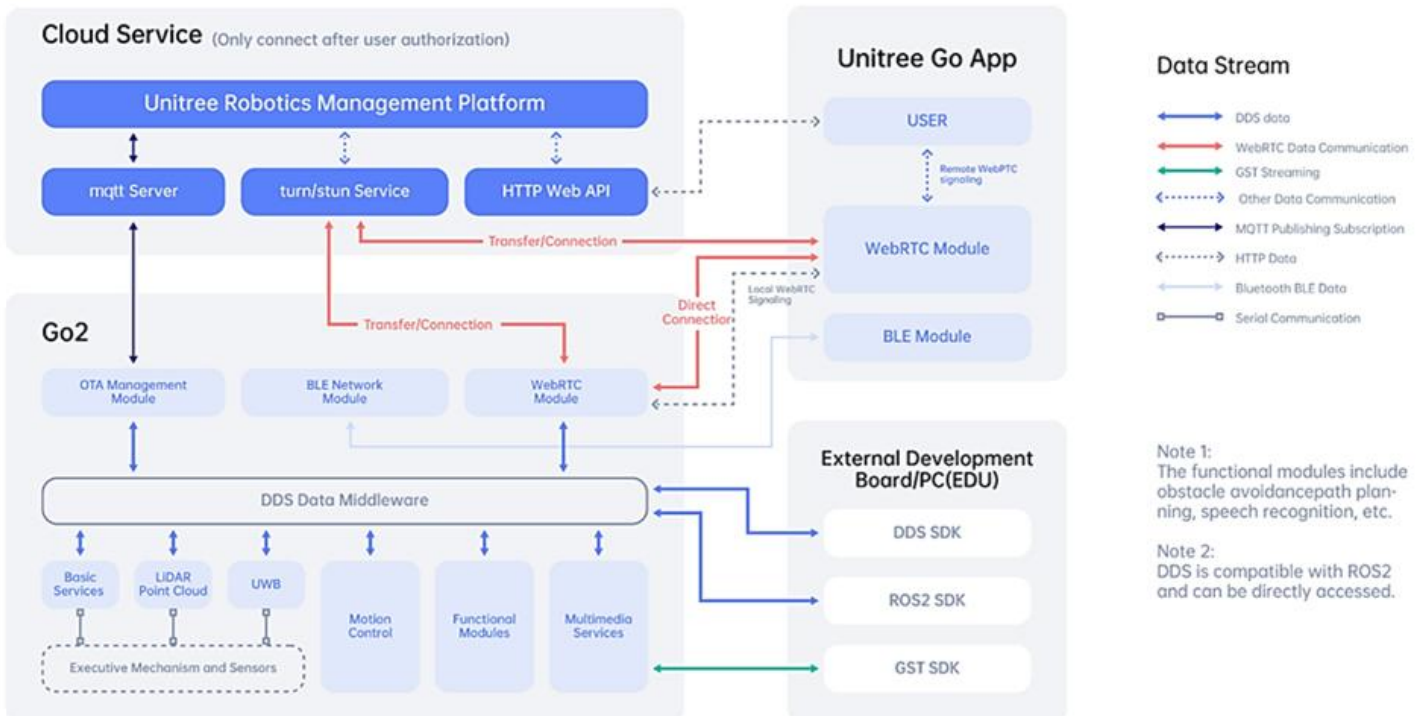


Figure 40 : Architecture de Unitree Go2

## 4 - Conclusion

Les robots quadrupèdes représentent aujourd'hui un domaine en pleine expansion, combinant avancées mécaniques, électroniques et informatiques pour offrir des machines capables de naviguer dans des environnements complexes, de coopérer avec des humains et d'exécuter des tâches variées. Du haut de gamme comme Spot de Boston Dynamics, en passant par les solutions accessibles pour l'éducation et la recherche, ou les projets DIY open-source, l'écosystème est à la fois riche et dynamique.

Sortis de la niche (jeu de mots) des systèmes techniques gadgets ou sans aucune utilité, les robots quadrupèdes sont désormais là et il serait malvenu de les ignorer. Véritables concentrés de technologie, ils dénotent cependant des systèmes généralement étudiés dans les établissements scolaires. D'ailleurs en IUT, sont-ils spécifiques aux enseignements du parcours ESE (Systèmes Embarqués) ou All (Automatisme) ? Le débat est lancé... Et j'entends les EME (Energie) au fond de la salle : La gestion de l'énergie, l'autonomie du chien, la batterie, ce n'est pas un sujet ? Il mange des croquettes ?

A l'heure où nos étudiants doivent choisir une « spécialité » de plus en plus tôt, la réalité nous rappelle que notre environnement technologique est plus que jamais multidisciplinaire. Et bon nombre de nos étudiants, nous disent « Mais pourquoi je dois choisir un parcours ? Ils sont tous intéressants, j'ai envie de tous les faire ! ».

C'est peut-être là la plus grande leçon que nous donnent ces robots : ils ne sont pas uniquement mécaniques, électroniques, informatiques ou énergétiques, mais bien tout cela à la fois. Leur étude nous rappelle qu'au-delà des spécialités et des parcours, c'est la capacité à relier les disciplines qui permettra aux ingénieurs et techniciens de demain de comprendre, d'innover et d'imaginer les usages futurs de ces nouvelles technologies.

## Références

[Vidéo 1] {Boston Dynamics} Do You Love Me?

<https://www.youtube.com/watch?v=fn3KWM1kuAw>

[Vidéo 2] {Boston Dynamics} Hey Buddy, Can You Give Me a Hand?

<https://www.youtube.com/watch?v=fUyU3lKzoio>

[Vidéo 3] {Cheddar} How Boston Dynamics' Spot enhances military safety and operations

<https://www.youtube.com/watch?v=APSurJVFvCQ>

[Vidéo 4] {Axle Foley} UniTree Go1 with a Gun HD quality

<https://www.youtube.com/watch?v=fH-awDeKl9Q>

[Vidéo 5] {Throwflame} The Robot Dog With A Flamethrower | Thermonator

<https://www.youtube.com/watch?v=rj9JSkSpRlM>

[Vidéo 6] {Aaed Musa} I Built a Robot Dog and Made it Dance

<https://www.youtube.com/watch?v=VhUvoV5XyRg>

[Vidéo 7] {James Bruton} Playlist openDog V3

[https://www.youtube.com/playlist?list=PLpwJJoq86vov8uTgd8\\_WNgBHFpDYemO-OJ](https://www.youtube.com/playlist?list=PLpwJJoq86vov8uTgd8_WNgBHFpDYemO-OJ)

[Vidéo 8] {Advanced Hobby Lab} Full build of SpotMicro

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLAPTbzQ9K5TCaQBTw4c2F2jYY1ZrWi0pl>

[Vidéo 9] {Maker 101} Build a simple 3D dog robot and control it  
<https://www.youtube.com/watch?v=NIUgbXlzpAw>

[Vidéo 10] {Josh Pieper} One year of building a robot dog  
<https://www.youtube.com/watch?v=ePdGshbKR-Q>

[Vidéo 11] {Massachusetts Institute of Technology (MIT)} Backflipping MIT Mini Cheetah  
<https://www.youtube.com/watch?v=xNeZWP5Mx9s>

[Vidéo 12] {Gonzalo Espinoza Graham} Building a Robot Dog in my cave  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PL55VZ7oDEoRnXKSYTiGINazkJCWyt8zJR>

[Vidéo 13] {Kawasaki Group Channel} が提案する未来のパーソナルモビリティ「CORLEO」  
<https://www.youtube.com/watch?v=vQDhzbTz-9k>

[Vidéo 14] {Hervé Discours} Unitree Go1 Essai Comparatif  
<https://www.youtube.com/watch?v=y18JpFnG5qQ>

[Vidéo 15] {Hervé Discours} MQTT Initiation - Broker Mosquitto  
<https://www.youtube.com/watch?v=xpsZa3N3Ogo>

[Vidéo 16] {Hervé Discours} Unitree Go1 Commande MQTT Node-Red / TIA Portal LMqtt Client PLC S7-1200 Siemens  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_3fwFAqhA84](https://www.youtube.com/watch?v=_3fwFAqhA84)

[Vidéo 17] {IEEE Spectrum} Robot Dog Obstacle Course  
<https://www.youtube.com/watch?v=Zv0VkkfIKaU>  
<https://www.youtube.com/watch?v=WUkW-RRm7Yw>

[Vidéo 18] {iFixit} Démontage de l'Unitree Go2 : l'analyse approfondie d'un expert en robotique  
<https://www.youtube.com/watch?v=YjVbW6Fc11Y>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay>

# Réalisation d'un dirigeable autonome

Salma BAIRAT<sup>1</sup> - Ibrahim EL KASSIMI<sup>1</sup>  
Antoine HUET<sup>2</sup> - Anthony JUTON<sup>3</sup>

Édité le  
10/11/2025

<sup>1</sup> Élève en M1 au DER Sciences de l'ingénierie électrique et numérique (SIEN), ENS Paris-Saclay

<sup>2</sup> Élève en M1 Mécanique des matériaux et structures au DER Génie mécanique (GM), ENS Paris-Saclay

<sup>3</sup> Professeur agrégé de physique appliquée au DER des Sciences de l'ingénierie électrique et numérique (SIEN), ENS Paris-Saclay

Cette ressource fait partie du N° 117 de La Revue 3EI du 4<sup>ème</sup> trimestre 2025.

Cette ressource présente les solutions techniques retenues lors de la conception et la réalisation, dans le cadre du projet CoBRA de la L3 Saphire de l'ENS Paris Saclay, d'un dirigeable autonome pédagogique se déplaçant en intérieur, transportant et déchargeant un colis dans une cible. Elle traite ainsi de la cinématique de vol, de la localisation en intérieur, de l'informatique embarquée et de l'asservissement du dirigeable.

## 1 - Introduction

Porté par le succès médiatique des dirigeables de transport de la société Flying Whales (200 m, 60 tonnes de charge utile), le dirigeable est un dispositif volant original, impressionnant par sa taille et peu bruyant, bien adapté à l'enseignement. L'objectif du projet CoBRA (Course de Ballons Réactifs Autonomes) est de rendre autonome un dirigeable (2,4 m de long et 1,3 m diamètre) pour le dépôt de colis. Il est alors nécessaire de pourvoir le dirigeable d'un système de propulsion, d'un système de localisation dans son environnement ainsi que d'un asservissement. Ce projet aborde alors différents domaines des sciences et techniques de l'ingénieur rendant le projet pluridisciplinaire.



Figure 1 : Vue d'ensemble du dirigeable

## 2 - Propulsion et préhension

Cette partie s'intéresse à la solution de propulsion permettant de mouvoir le dirigeable dans l'espace 3D et au dispositif de livraison que constitue le treuil.

### 2.1 - Propulsion

La solution technique de propulsion doit permettre le déplacement jusqu'à la cible mais aussi la stabilisation du dirigeable au-dessus de celle-ci durant le temps de livraison. La solution de propulsion retenue permet deux natures de déplacement dans l'espace 2D parallèle au sol. Dans un premier temps l'objectif est de permettre au dirigeable de se déplacer à l'aide d'une rotation sur lui-même et d'un mouvement rectiligne de direction confondue avec l'axe du dirigeable (figure 2).

Nous proposons donc une première solution de propulsion composée de deux propulseurs latéraux permettant à la fois une avance rectiligne selon l'axe du dirigeable et un mouvement de rotation autour de l'axe vertical (figure 3).

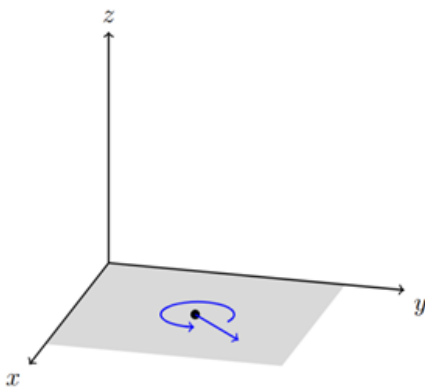


Figure 2 : Repère des premiers mouvements du dirigeable

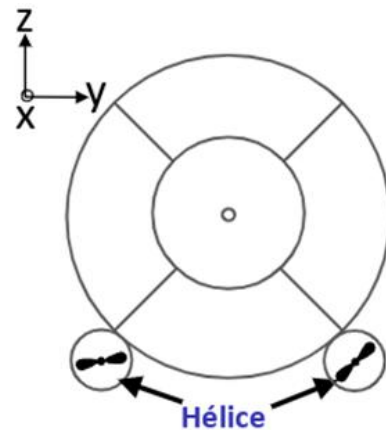


Figure 3 : Emplacements des deux premiers propulseurs - Vue de face

Dans un deuxième temps l'objectif est de stabiliser le dirigeable au-dessus de la cible, celui-ci restant immobile, en position et en rotation (figure 4). Pour ce faire, on souhaite en plus du mouvement rectiligne selon l'axe du dirigeable ajouter un mouvement de translation orthogonal à cette première translation. On ajoute alors deux propulseurs latéraux (figure 5).

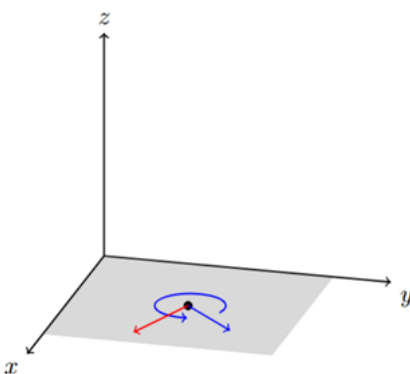


Figure 4 : Nouvelle direction de translation

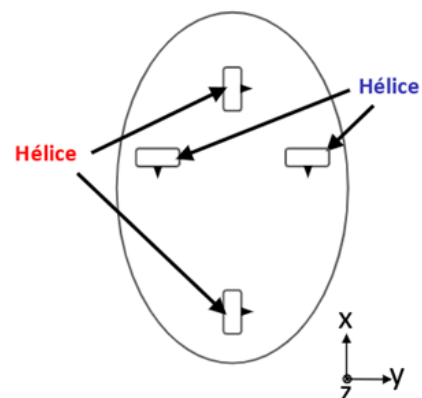


Figure 5 : Emplacements des deux propulseurs suivants - vue du dessous

Ces différentes positions de propulseurs sur le dirigeable permettent à celui-ci de se mouvoir dans un espace 2D selon deux méthodes différentes réalisant deux fonctions distinctes : l'approche et

la stabilisation au-dessus de la cible. On remarque cependant que l'on dispose maintenant de 4 propulseurs qui constituent une contrainte de masse plus importante.

Un dernier moteur de direction de poussée verticale permet de faire varier l'altitude du dirigeable (figure 6). De plus, le dirigeable est lesté afin de perdre en altitude lorsque son propulseur vertical est inactif, de sorte de redescendre naturellement en cas de batterie vide.

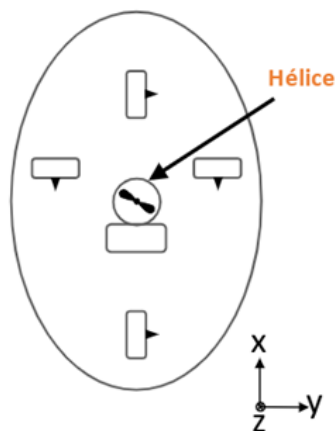


Figure 6 : Emplacement du propulseur vertical - vue du dessous

La principale contrainte dans la réalisation du dirigeable est la limite de masse embarquée. En effet, le dirigeable de 2300 L environ peut embarquer, compte-tenu de la masse de son enveloppe, seulement 650 g.

Notre solution de propulsion gourmande en nombre de propulseurs impose d'autant plus de contraintes sur la réalisation de ces derniers. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser des propulseurs latéraux miniatures et de diminuer dans un premier temps les dimensions des éléments de structure et de prendre des moteurs de drone (moteur brushless) plus adaptés à cette application pour leur bon rapport vitesse de rotation/masse du moteur.

La dernière étape pour créer les propulseurs latéraux est de connaître la poussée souhaitée. Nous avons donc estimé le coefficient de traînée de l'enveloppe via une étude de mécanique des fluides à l'aide du logiciel *Solidworks* qui est cohérente avec les ouvrages (forme classique connue) [1]. Ensuite, avec la vitesse de déplacement souhaitée, nous avons obtenu une force de poussée nous amenant à choisir un couple moteur/hélice adéquat.

Nous avons donc choisi cette combinaison de variateur réversible, moteur (62W, 17g) et hélice :



Figure 7 : ESC CONTROLEUR  
16A F3P 3D/4D T-HOBBY



Figure 8 : AS2303 F3P / 3D / 4D  
2300KV 17GR T-MOTOR



Figure 9 : Hélice 5x5E

Des structures ont ensuite été réalisées à l'aide de tiges carbone et d'impression 3D et fixées à l'enveloppe (figure 10).



Figure 10 : Structure propulseur latéral

Pour le propulseur vertical le même moteur a été choisi mais une hélice plus grande a été sélectionnée, dû au fait qu'il n'y a qu'un seul moteur.

Le choix de la cinématique de vol s'est révélé judicieuse, permettant les déplacements souhaités et un asservissement indépendant des 4 axes (X,Y,Z, lacet).

En revanche, l'hélice de propulsion verticale de plus grande dimension est moins dynamique que les autres (difficulté au démarrage ou lors de changement de sens de rotation). De surcroît, la structure comprenant le moteur de poussée verticale transmet des vibrations à la caméra, qui ne permet alors pas la localisation. Une solution serait alors d'utiliser deux petits propulseurs verticaux identiques aux propulseurs latéraux et de les fixer sur des structures sur l'enveloppe, indépendantes de la nacelle.

## 2.2 - Préhension

La seconde partie constituait la réalisation d'un treuil muni d'une pince permettant de déposer un colis dans une cible. La solution présentée ici se compose de trois fils de treuil formant une pyramide à base triangulaire assurant la stabilité de la pince. Une machine à courant continu en haut permet l'enroulage et le déroulage des câbles (câbles mécaniques et électriques). Une autre machine à courant continu positionnée sur la pince permet son ouverture et sa fermeture. Encore une fois la réduction de masse est très importante dans la réalisation de cette partie.

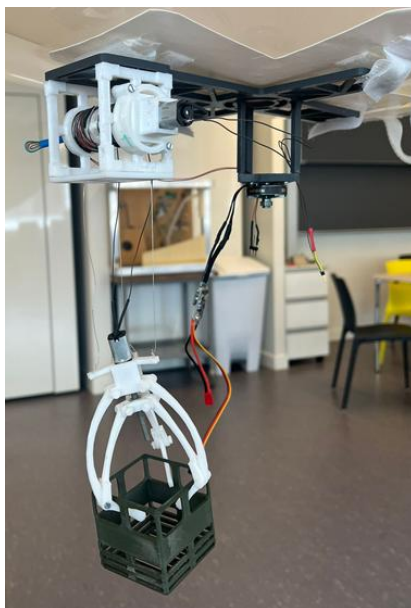


Figure 11 : Dispositif de préhension avec colis

## 2.3 - Nacelle

Une structure inférieure fixée au dirigeable permet enfin de fixer le treuil, le propulseur vertical, la batterie ainsi que les cartes de commandes et les capteurs qui sont détaillés dans la partie suivante. Cette structure comprend plusieurs éléments assez volumineux mais doit aussi être de masse minimale. L'espace entre l'hélice verticale et l'enveloppe du dirigeable doit permettre un flux d'air suffisant mais l'hélice ne doit pas cacher le sol à la caméra grand angle.

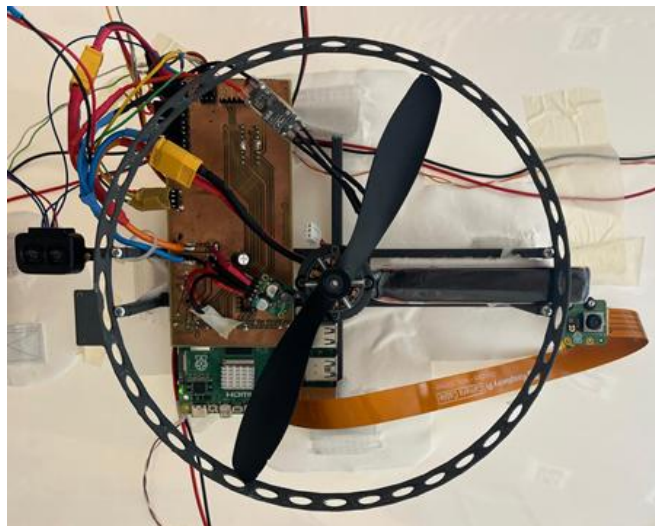


Figure 12 : Nacelle inférieure

## 3 - Localisation intérieure

Pour assurer la navigation autonome du dirigeable en intérieur (et donc sans solution GNSS possible), plusieurs capteurs sont utilisés afin de collecter des informations sur l'environnement et l'état du système :

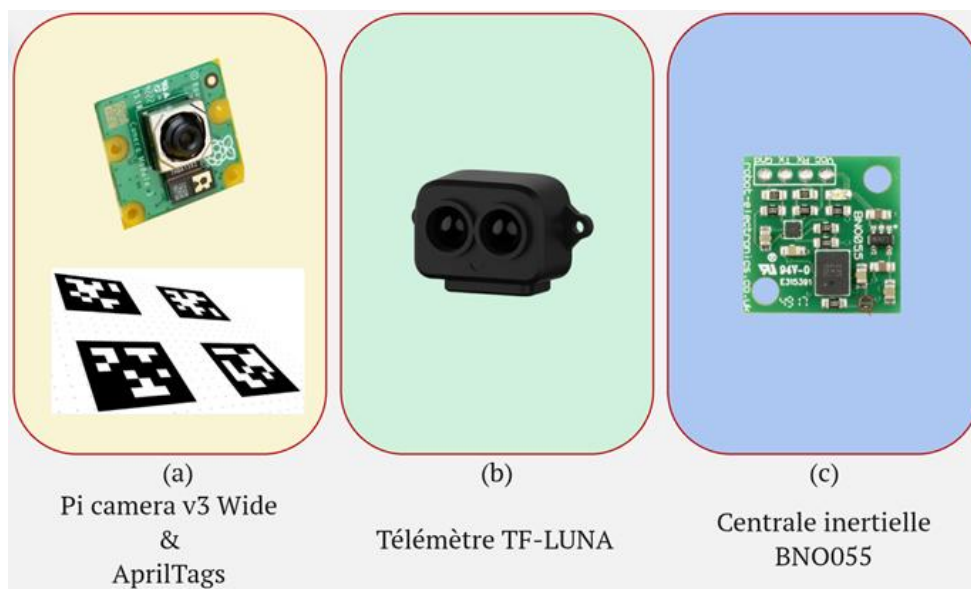


Figure 13 : Capteurs utilisés pour la localisation

La conception du dirigeable, soumise à une contrainte de masse stricte, nous a poussés à limiter le nombre de capteurs embarqués. Nous avons donc commencé avec une configuration minimale basée sur une **caméra** et des marqueurs **AprilTags** (Figure 13-a et Figure 16). Après plusieurs tests visant à évaluer la précision du système (Figure 15), nous avons constaté que l'estimation de l'altitude manquait de fiabilité. Or, ce paramètre est essentiel pour les phases de préhension et de dépôt du colis. De plus, lorsque le dirigeable se trouvait trop proche du sol, les tags n'étaient plus détectés.

Pour pallier ces limitations, nous avons ajouté un télémètre TF Luna (figure 13-b) afin d'obtenir une mesure directe de la distance au sol. Cependant, les inclinaisons du dirigeable influençaient la valeur renvoyée par le télémètre. Nous avons donc intégré une centrale inertielle BNO055 permettant de corriger la mesure d'altitude en fonction de l'orientation du dirigeable, améliorant ainsi la précision globale de la localisation.

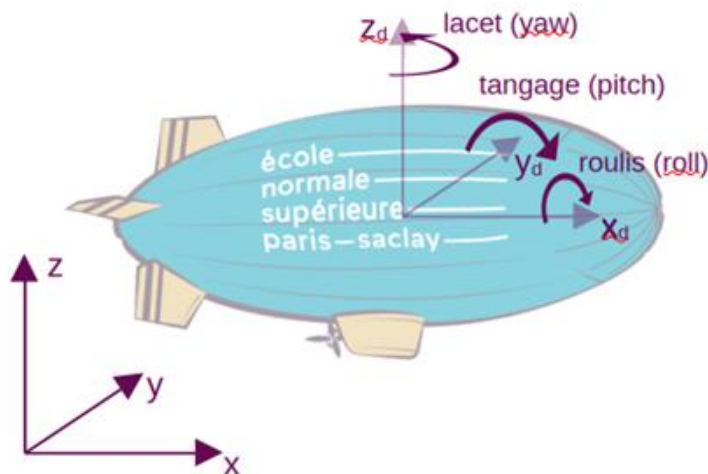


Figure 14 : Repère terrestre  $(x,y,z)$ , relatif au dirigeable  $(x_d, y_d, z_d)$  et angles d'Euler associés

### 3.1 - Localisation via la vision avec la bibliothèque AprilTags.

Une description détaillée de l'utilisation de la bibliothèque AprilTags est disponible dans la ressource « Localisation via la vision avec la bibliothèque AprilTags » [2].

Nous avons commencé par équiper le dirigeable d'une caméra Picam v3 Wide associée à des AprilTags, des marqueurs visuels similaires à des codes QR (Figure 16). La Picam v3 Wide présente plusieurs avantages pour notre application : elle offre une haute résolution, un grand angle de vue et une bonne sensibilité à la lumière, ce qui permet une détection fiable des tags même lorsque le dirigeable se déplace ou que les conditions lumineuses varient, tout en couvrant une large zone avec un seul capteur. Les AprilTags, de leur côté, permettent une détection relativement rapide (100 ms) de la position.

Pour évaluer la précision de notre système basé sur la caméra Picam v3 et les AprilTags, nous avons réalisé plusieurs mesures expérimentales à différentes hauteurs et positions du dirigeable, notons que le cahier des charges imposait une erreur de position inférieure à 10 cm.

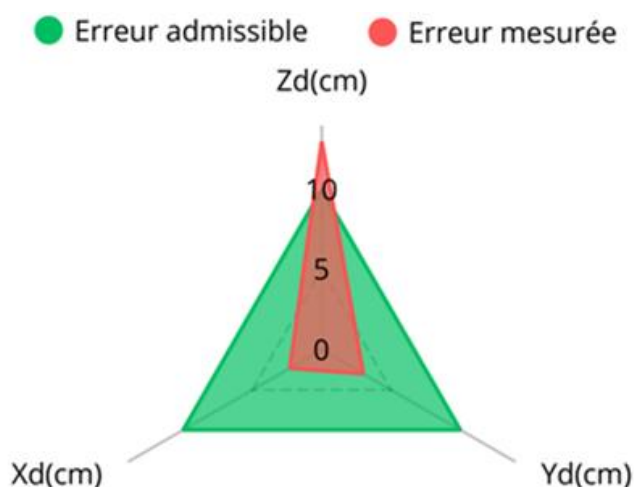


Figure 15 : Erreur sur la position estimée par le système caméra-AprilTags

Ces tests ont montré que, bien que les AprilTags offrent une bonne estimation de la latitude, la longitude, et l'angle de lacet, l'erreur sur l'altitude ne satisfait pas le cahier des charges. En plus, si le dirigeable est trop proche du sol la caméra ne détecte pas les tags. Ces résultats mettent en évidence les limitations de l'usage exclusif de la caméra, et justifient l'intégration d'un télémètre pour assurer un suivi fiable de l'altitude du dirigeable.



Figure 16 : Dirigeable se déplaçant au-dessus des AprilTags

### 3.2 - Estimation de l'altitude par télémétrie.

Afin de pallier les limites de la localisation par vision, notamment la perte de détection des AprilTags à faible altitude et l'erreur sur l'altitude estimée, nous avons intégré un télémètre TF-Luna pour mesurer directement la distance entre le dirigeable et le sol. Ce capteur repose sur la technologie ToF (Time of Flight), qui consiste à mesurer le temps mis par une onde lumineuse (généralement infrarouge) pour parcourir l'aller-retour entre le capteur et la surface réfléchissante. Cette méthode permet d'obtenir une estimation rapide et précise de l'altitude du dirigeable. Cependant, en cas d'inclinaison, le faisceau n'est plus perpendiculaire au sol, ce qui entraîne une surestimation de la distance mesurée (la figure 17 illustre ce problème). Ainsi, la précision du télémètre dépend fortement de l'orientation du dirigeable, limitant son utilisation seule pour une mesure d'altitude fiable.

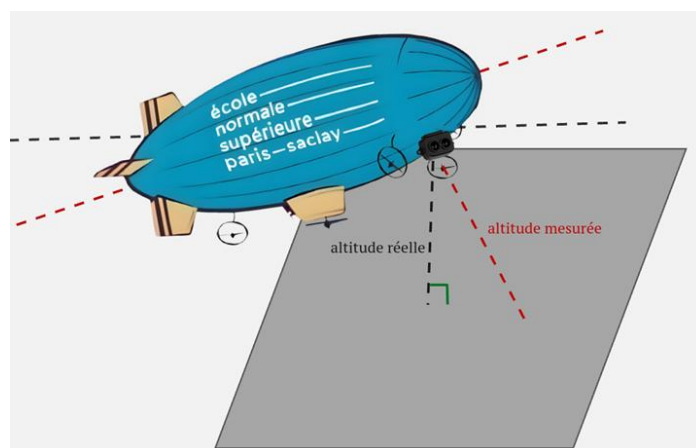


Figure 17 : Erreur d'estimation de l'altitude à cause de l'inclinaison du dirigeable

Afin de compenser l'erreur d'altitude causée par l'inclinaison du dirigeable, une centrale inertielle BNO055 a été intégrée au système.

### 3.3 - Centrale inertielle BNO055.

Le BNO055 (Bosch Sensortec) est un capteur inertielle de type IMU 9-DoF (Inertial Measurement Unit, 9 degrés de liberté) intégrant un accéléromètre, un gyroscope et un magnétomètre tri-axiaux dans un même circuit intégré (System-in-Package SiP). Il comprend également un microcontrôleur interne (Cortex-M0+) chargé d'exécuter l'algorithme de fusion des capteurs et de fournir directement les sorties d'orientation (quaternions, angles d'Euler, vecteurs magnétiques, etc.).

Pour corriger la mesure de l'altitude, on récupère les valeurs des angles de roulis et de tangage renvoyées par la centrale inertielle et on applique la formule suivante :

$$h = h_{mesuré} \times \cos(\Phi) \times \cos(\theta)$$

Avec :

$h$  : L'altitude du dirigeable.

$h_{mesuré}$  : L'altitude mesurée par le télémètre.

$\Phi$  : L'angle de roulis du dirigeable.

$\theta$  : L'angle de tangage du dirigeable.

## 4 - Électronique embarquée

Cette partie s'intéresse à l'électronique embarquée dans le dirigeable permettant la lecture des capteurs, la commande des moteurs et l'asservissement.

### 4.1 - Informatique embarquée : le nano-ordinateur et le protocole i2c

Le nano-ordinateur est la pièce centrale de notre solution d'électronique embarquée : il traite les informations reçues des capteurs et envoie les signaux de commande aux moteurs. La bibliothèque AprilTag nécessitant des ressources importantes pour un traitement en moins de 100 ms des images, nous avons choisi un nano-ordinateur **RaspberryPi5** bon marché et avec une large communauté partageant son expérience.



Figure 18 : Nano-ordinateur Raspberry Pi 5, source raspberrypi.com

L'utilisateur peut écrire et lancer des programmes informatiques (de localisation ou de commande moteurs) sur la Raspberry en s'y connectant, par Wifi, en ssh via un terminal ou VScode sur un pc.

On parle d'ordinateur headless (sans clavier ni écran). La carte Raspberry supportant le bluetooth, il est possible d'y connecter une manette de console Sony PS4.

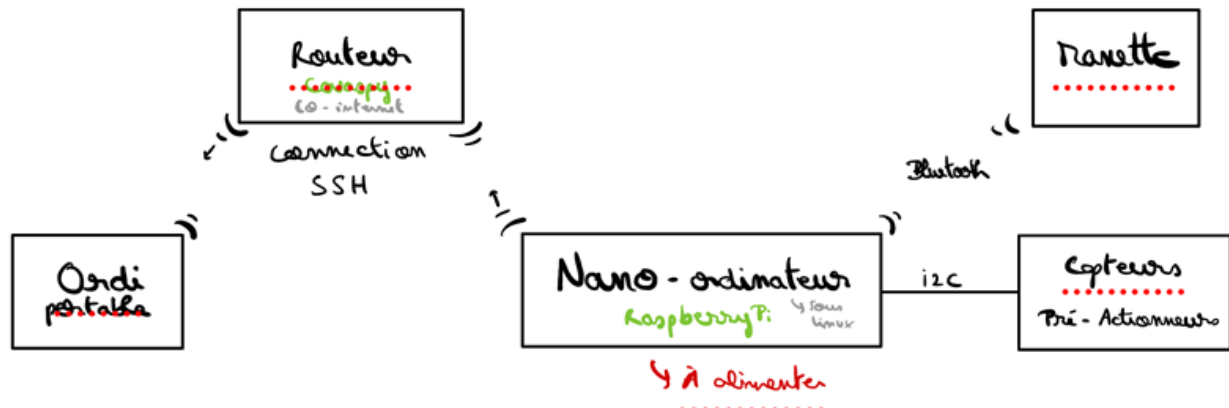


Figure 19 : Éléments communicant avec le microcontrôleur

Le microcontrôleur communique avec les capteurs et les moteurs via le **protocole i2C**. Le protocole i2C est un bus série permettant de faire communiquer entre eux un composant électronique "maître" et des composants électroniques "esclaves" grâce à deux signaux : un signal de donnée (SDA) et un signal d'horloge (SCL).

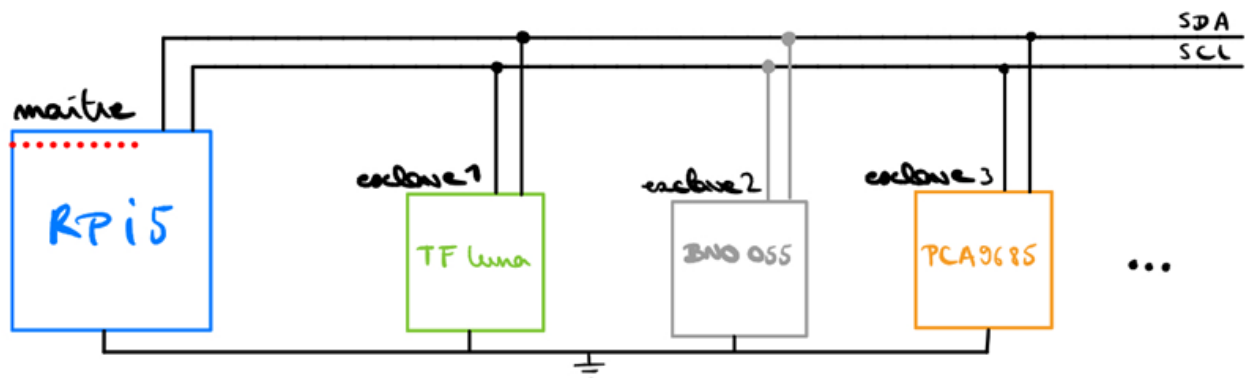


Figure 20 : Protocole i2C

Sur notre dirigeable, le maître est le nano-ordinateur Raspberry Pi5 et les esclaves sont les différents capteurs et moteurs.

Les bibliothèques de communication avec les capteurs et le module PCA9685 sont fournis en annexe de cette ressource [3].

## 4.2 - Commande des moteurs : le générateur de PWM PCA9685 et les différents moteurs

### Le générateur de PWM PCA9685

Pour commander des moteurs, on utilise des signaux PWM (Pulse Width Modulation) dont on modifie la largeur d'impulsion pour commander la vitesse des moteurs. Généralement :

- 1 ms correspond à la vitesse maximale en marche arrière ;
- 1,5 ms correspond à la vitesse nulle ;
- 2 ms correspond à la vitesse maximale.

Les PWM hardware des Raspberry Pi étant peu nombreuses et les PWM software pas suffisamment stables, on utilise un composant externe, le **PCA9685**, pour générer ces signaux.



Figure 21 : Composant PCA9685, source [lisleapex.fr](http://lisleapex.fr)

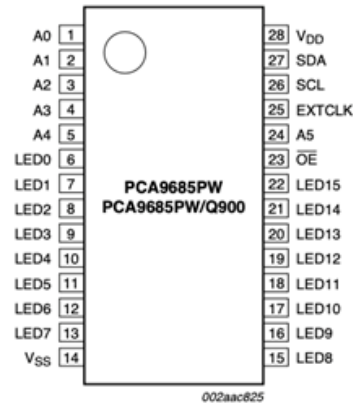


Figure 22 : Configuration des pins, source [Datasheet PCA9685](#)

Le PCA9685 est capable de générer **16 signaux PWM** à la **même fréquence** (sur les pins LED0 à LED15 sur la figure).

On choisit une fréquence de PWM de **50Hz** (période de 20 ms) comme suggéré dans la documentation technique du variateur du moteur Brushless.

Une fois la période imposée, ainsi que le passage à 1 de la PWM au début de chaque période, pour régler la largeur d'impulsion d'une PWM n, le PCA9685 met à disposition deux registres :

- **LEDn\_OFF\_L** : octet de poids faible (bits[7 :0]) de l'instant où la PWM passe à 0
- **LEDn\_OFF\_H** : octet de poids fort (bits[11 :8]) de l'instant où la PWM passe à 0

La bibliothèque fournie en annexe propose alors trois fonctions de haut niveau :

- `brushless.cmd_vit_pourcent(vit_pourcent)` pour la commande des moteurs de déplacement ;
- `MCC_2PWM.cmd_vit_pourcent(vit_pourcent)`, pour les moteurs à courant continu des treuil et pince ;
- `servo.cmd_angle_deg(angle)` pour les servomoteurs (non utilisée ici).

Pour tester ces fonctions, les moteurs peuvent être commandés depuis un ordinateur via connexion ssh ou par une manette PS4 via connexion Bluetooth à la Raspberry Pi 5.

### Le moteur brushless

Comme mentionné dans la partie 2.1, les cinq moteurs brushless que nous avons choisis pour le déplacement du dirigeable sont :



Figure 23 : AS2303 F3P / 3D / 4D 2300KV 17GR T-MOTOR

La commande de ce moteur se fait via un **variateur** qui peut être paramétré grâce à l'interface logicielle **BLHeliSuite 16.7.14**. On peut notamment y paramétrer la possibilité pour le moteur de tourner dans les deux sens de rotation.

Le variateur reçoit un signal PWM du PCA9685 et met en rotation le moteur brushless à la vitesse correspondant à la largeur d'impulsion de la PWM.

### La MCC (Machine à Courant Continu)

Pour le treuil et la pince, nous avons choisis ce modèle de mcc :



Figure 24 : MCC 1210GM-06100, source lextronic.fr

La commande d'une MCC se fait via un **hacheur** (pont en H) qui a besoin de :

- Un signal PWM pour la **valeur absolue de la vitesse** ;
- Un premier **signal logique** pour le sens **AVANT** de rotation ;
- Un second **signal logique** pour le sens **ARRIÈRE** de rotation.

Le signal PWM est généré par le PCA9685 comme vu précédemment.

Les signaux logiques (prennent les valeurs 0 ou 1) sont générés par la Raspberry Pi 5 :

- Quand la vitesse est positive, le premier signal logique est mis à 1 et le second à 0.
- Quand la vitesse est négative, le premier signal logique est mis à 0 et le second à 1.

### 4.3 - Carte électronique

Pour alimenter et relier les composants d'électronique embarquée, nous avons conçu une **carte électronique intermédiaire** sur le logiciel Eagle en prenant en compte les entrées pour l'alimentation (conversion des 7,2 Vcc de la batterie en 5 Vcc), les communications avec les différents capteurs, pré-actionneurs et actionneurs, et les pistes les reliant entre eux. Les servomoteurs, indiqués sur le schéma, ne sont pas utilisés par notre équipe.

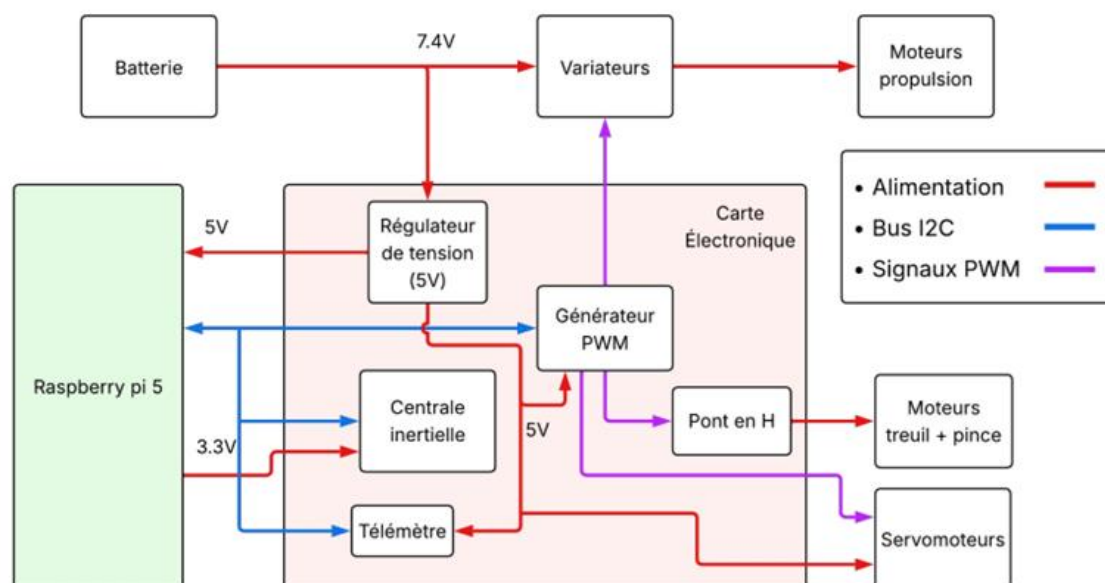


Figure 25 : Schéma synoptique de la carte électronique réalisée sur Eagle

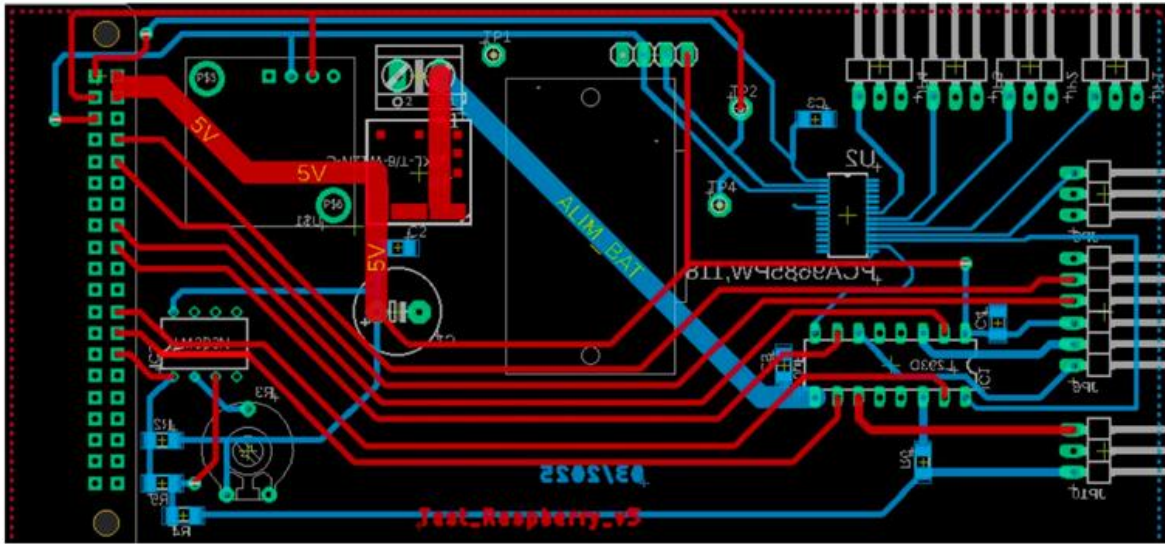


Figure 26 : Carte électronique réalisée sur Eagle

## 5 - Asservissement

Maintenant que le dirigeable est localisé et les moteurs pilotables, il nous reste à asservir les axes de déplacement du dirigeable pour s'assurer qu'il arrive à suivre une commande imposée. Le dirigeable ayant une inertie importante, son asservissement est un problème complexe mais très intéressant.

Pour faire simple dans cette première approche, la fin du projet étant en vue, nous avons asservi les 4 axes (x, y, z et lacet) indépendamment. Ce sont donc quatre problèmes identiques d'asservissement mono-variable que nous avons eu à résoudre. Est décrit ci-dessous l'asservissement selon l'axe z ; le schéma d'une boucle d'asservissement est le suivant :

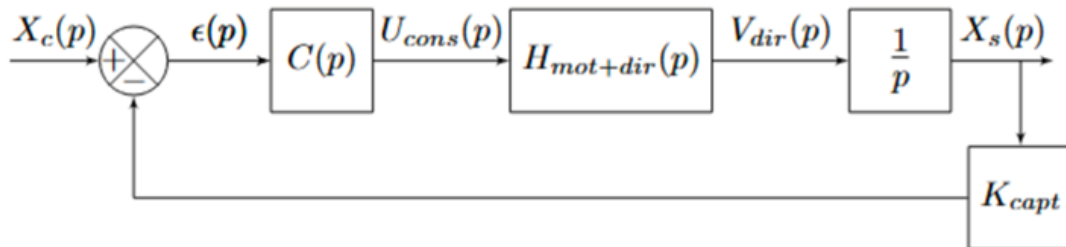


Figure 27 : Schéma de la boucle d'asservissement

### 5.1 - Première étape : identification

Nous commençons par réaliser un essai indiciel sur le dirigeable afin d'obtenir, à l'aide de Matlab un modèle du comportement du dirigeable le long de l'axe z.

Pour cela, nous avons écrit un programme simple, succession de montée et de descente de 12 s, réalisant l'enregistrement dans un fichier des informations du dirigeable (temps, position, commande) à chaque apparition d'une nouvelle valeur des capteurs.

Une fois les données acquises, nous les transférons sur le PC, nettoyons un peu (remplacement des '.' par des ',', suppression des points aberrants, séparation des données en colonne) et traçons.

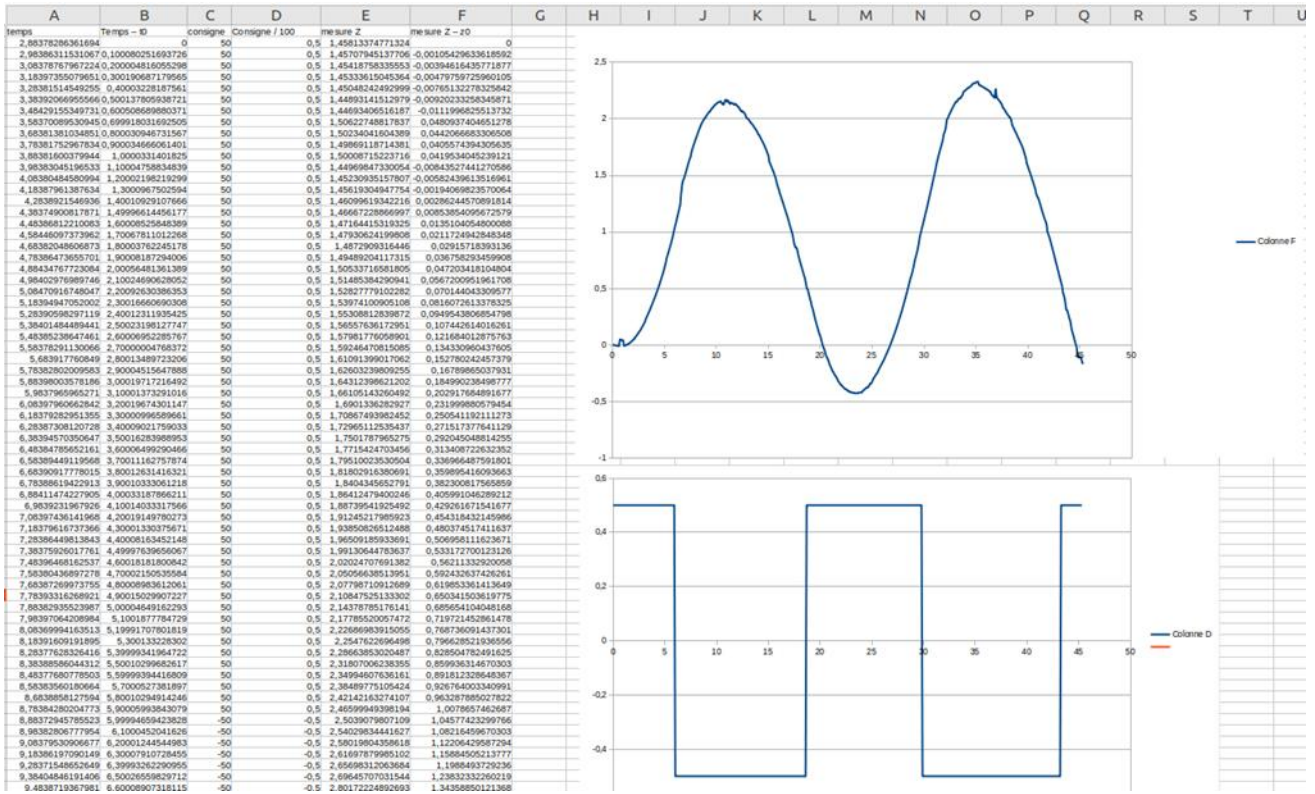


Figure 28 : Position et de la commande acquises lors d'un essai en boucle ouverte

Une fois les données vérifiées, elles sont exportées au format csv et exploitées sous Matlab avec la fonction `sys_tf` (ou l'outil `SystemIdentification`) pour obtenir un modèle du système.

```
>> data = readmatrix('/home/ajuton/Documents/a0_Saphire/Dirigeable/asservissement/data_essai_indiciel_3.csv');
>> t = data(:,1);
>> consigne = data(:,2);

data2 =
Time domain data set with 454 samples.
Sample time: 0.1 seconds

Outputs      Unit (if specified)
  y1

Inputs      Unit (if specified)
  u1

>> sys_tf = tfest(data2, 3, 2);
>> sys_tf

sys_tf =
From input "u1" to output "y1":
0.01645 s^-2 - 0.001026 s + 0.01059
-----
s^3 + 6.152 s^2 + 0.6814 s + 3.634e-12

Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 3   Number of zeros: 2
Number of free coefficients: 6
Use 'tfdata', 'getpvec', 'getcov' for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using TFEST on time domain data "data2".
Fit to estimation data: 49.14%
FPE: 0.2219, MSE: 0.2133
```

Figure 29 : Commandes Matlab pour l'identification d'un modèle pour le comportement du dirigeable selon l'axe z

Un essai dans Matlab Simulink du modèle obtenu permet de vérifier sa fidélité au modèle réel :

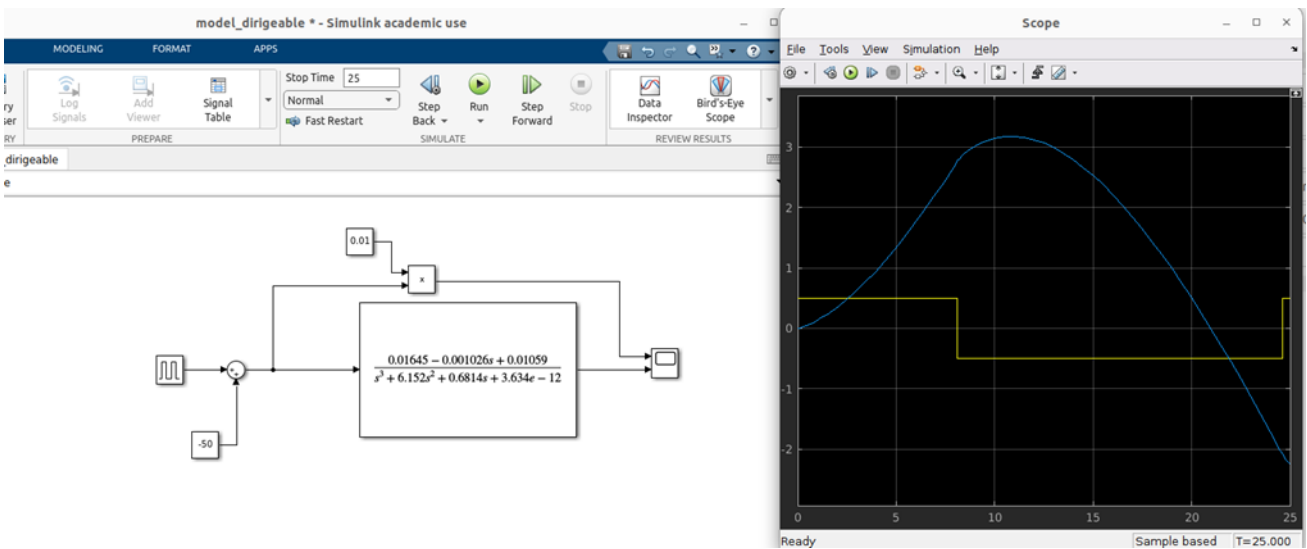


Figure 30 : Simulation en boucle ouverte pour vérifier le modèle obtenu

## 5.2 - Réglage d'un correcteur PID simulé

Nous avons ensuite ajouté dans Matlab Simulink un correcteur PID et utilisé la fonction auto-tune pour obtenir les premières valeurs de Kp, Ki (I), Kd (D).

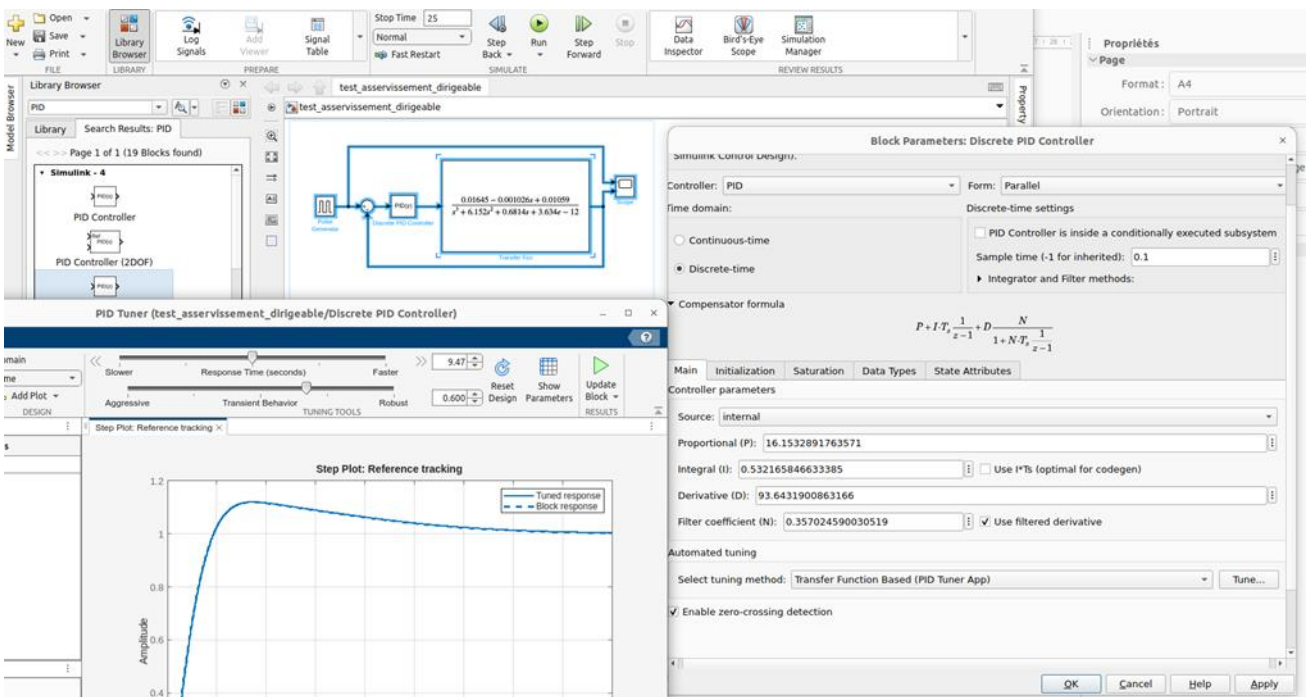


Figure 31 : Réglage du PID à l'aide de la fonction auto-tune de Matlab Simulink

## 5.3 - Intégration d'un correcteur réel et réglage de ce correcteur

Nous avons ensuite intégré ce correcteur dans le programme python du dirigeable et ajusté manuellement les paramètres du correcteur pour obtenir un comportement stable (mais pas très rapide...).

Nous avons répété cette séquence pour les 4 axes (x, y, z, lacet) avec pour résultat un déplacement lent mais stable et précis du dirigeable.

## 5.4 - Pistes d'amélioration

Pour que le dirigeable soit autonome, il faut que tous ces axes de déplacement soient correctement asservis. C'est pourquoi une réflexion est en cours pour améliorer le modèle (ordre plus élevé, modèles non linéaires, prise en compte de la portance qui varie en fonction des pertes d'hélium dans la semaine) et pour prendre en compte les 4 axes simultanément pour un asservissement multi-variables.

## 6 - Conclusion

Lors de ce projet plusieurs domaines de la physique et des sciences de l'ingénieur ont été abordés par les membres d'une équipe regroupée autour des trois problématiques majeures : l'optimisation de masse, la localisation intérieure et l'asservissement. Cela nous a permis d'aboutir à un dirigeable fonctionnel en juin 2025 et de laisser deux pistes d'amélioration principales :

- Deux petits propulseurs verticaux fixés à l'enveloppe au lieu d'un seul gros fixé à la nacelle pour éviter les vibrations de celle-ci et améliorer la dynamique.
- Un travail sur l'asservissement pour améliorer le modèle et mettre en œuvre une correction multi-variables.

Les étudiants de la promotion suivante ont d'ores et déjà repris ces deux thématiques ainsi que la création d'un dock de rechargement en hélium et en électricité pour assurer une réelle autonomie. Un travail est fait également pour limiter le nombre de tags à installer dans le bâtiment de vol du dirigeable.

## Références :

[1]: Fundamentals of Aircraft and Airship Design, Volume 2 - Airship Design and Case Studies, G. E. Carichner, L. M. Nicolai, AIAA Education series, february 2013, Coefficient de trainé, p. 69, section 3.3.2)

<https://rexresearch1.com/AeroEngineeringLibrary/FundamentalsAircraftAirshipDesignVol2.pdf>

[2]: Localisation via la vision avec la bibliothèque Aprilags, G.-A. Fade, A. Juton, novembre 2024, [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/localisation-via-la-vision-avecla-bibliotheque-aprilags](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/localisation-via-la-vision-avecla-bibliotheque-aprilags)

[3]: Annexe de la ressource « Réalisation d'un dirigeable autonome », S. Bairat, I. El Kassimi, A. Huet, A. Juton, [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/realisation-dun-dirigeable-autonome](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/realisation-dun-dirigeable-autonome)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay>