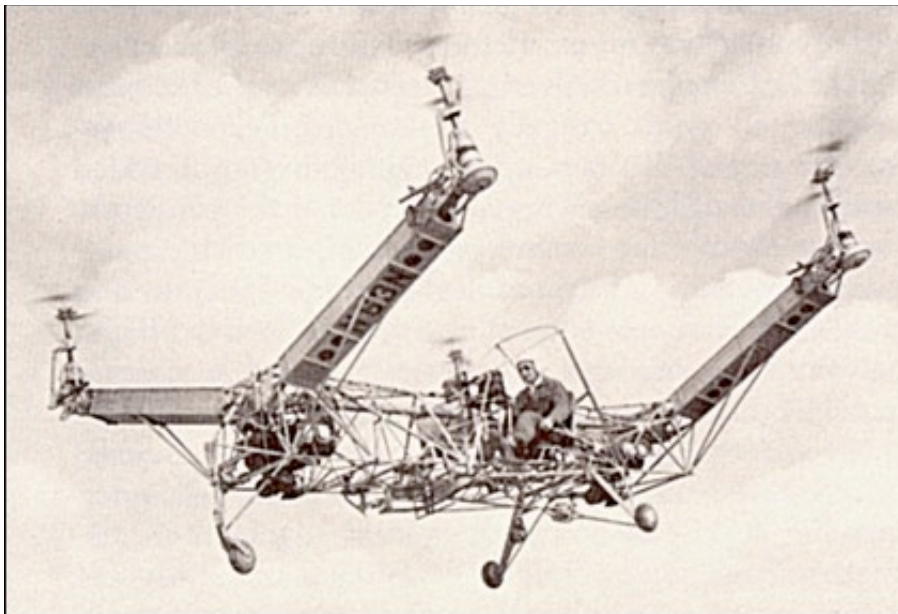


CAHIER DES CHARGES  
12 mai 2006

Etude et réalisation d'un modèle réduit d'hélicoptère  
à quatre hélices



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>2</b>
1.1	Objectif de ce projet . . . . .	2
1.2	Aperçu général d'un hélicoptère à quatre hélices . . . . .	2
1.3	Comportement général de la dynamique d'un hélicoptère à quatre hélices . . . .	3
1.4	Contraintes du projet . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Etude préliminaire du matériel</b>	<b>3</b>
2.1	Description des principaux composants électroniques . . . . .	3
2.2	Coût du projet . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Prévision du déroulement du projet</b>	<b>4</b>
3.1	Réalisation d'un demi hélicoptère . . . . .	5
3.2	Réalisation de l'hélicoptère complet . . . . .	5

# 1 Présentation du projet

## 1.1 Objectif de ce projet

Ce document, dans le cadre de l'année de spécialisation en temps réel de l'EPITA, présente un projet mettant en oeuvre l'étude et la réalisation d'un hélicoptère modèle réduit à quatre hélices (que l'on abrégera, par la suite, par le mot hélicoptère) et de son banc d'essai électromécanique et logiciel. La stabilisation de l'hélicoptère est calculée par un ordinateur non embarqué avec des outils de hauts niveaux. La communication entre des microcontrôleurs et l'ordinateur permet à ce dernier de recevoir les données émises des différents capteurs de l'hélicoptère et d'effectuer les calculs numériques (loi de commandes, consignes) puis de renvoyer les valeurs au microcontrôleur qui réalise les commandes de stabilisation. Les moyens de calcul embarqués permettront dans une deuxième phase de rendre autonome l'hélicoptère en lui permettant de calculer lui même les lois de commande.

Des projets similaires existent déjà sous la forme commerciale connus sous les noms de Draganflyer [14], X-UFO [15]. Il existe également des projets réalisés par des étudiants [16], ou par des passionnés [13, 23].

## 1.2 Aperçu général d'un hélicoptère à quatre hélices

Un hélicoptère à 4 hélices est une plate-forme volante comprenant une partie matérielle et une partie électronique (cf. figure 1).

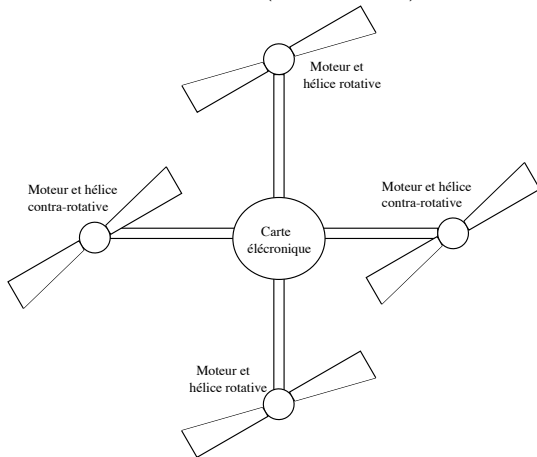


FIG. 1 – un H4H vue de haut



FIG. 2 – Le X-UFO

La partie matérielle a la forme d'une croix sur laquelle est attachée, à chacune de ses extrémités, une paire moteur-hélice. Ces hélices sont à pas fixe ce qui signifie qu'elles sont fixes par rapport au moyeu (à l'opposé des hélicoptères "standard"). Afin de réduire au maximum le moment induit de l'appareil, les hélices (prises par paire) ont deux formes différentes : une première paire est rotative alors que l'autre est contra-rotative. Il est intéressant de noter que les hélicoptères de petites tailles (comme [23]) peuvent avoir les quatre hélices rotatives.

La deuxième partie est la partie électronique située au centre de la croix. Elle contrôle la vitesse des moteurs en fonction des consignes envoyées par l'utilisateur. En général, elle possède un port de communication avec le PC permettant de débiter ou de charger des programmes.

### 1.3 Comportement général de la dynamique d'un hélicoptère à quatre hélices

**Mouvement stationnaire** Si on considère que les quatre moteurs tournent à la même vitesse et que tous les éléments sont identiques (hélices, dimensions, équilibre des masses), le mobile est théoriquement stable sur ses 3 axes : il vole à plat et ne tourne pas sur son axe central car, à vitesse égale pour les quatre hélices, les couples de rotation générés par paire de moteurs s'annulent.

**Monter et descendre** Pour faire monter ou descendre l'engin, il suffit d'augmenter ou diminuer la puissance des quatre moteurs (tous ensemble). Comme tous les rotors tournent à la même vitesse, il n'y a pas de rotation horizontale.

**Déplacement** Pour obtenir un mouvement de tangage ou roulis, (avancer vers l'avant par exemple), il suffit d'augmenter la vitesse du moteur arrière et diminuer celle du moteur avant (dans les mêmes proportions pour conserver la portance intacte) sans modifier la vitesse des moteurs latéraux. On fera l'inverse pour pencher vers l'arrière. Le roulis est obtenu avec les moteurs gauche et droit.

**Tourner** Pour le mouvement de lacet (rotation sur lui-même), il faut augmenter la vitesse d'une paire de moteur et diminuer d'autant celle de l'autre paire. Le sens du mouvement de lacet dépendra du sens de rotation qu'on aura choisi pour les paires de moteurs.

Des figures illustrant le comportement général de la dynamique d'un hélicoptère à quatre hélices peuvent être trouvées sur les liens [13, 20, 21]. En fait, un hélicoptère à quatre hélices n'est pas un système stable, il faut asservir l'appareil afin qu'il maintienne, par exemple, son inclinaison, ... C'est le rôle de la carte électronique et de l'ordinateur. Les liens [18, 19] expliquent respectivement le modèle physique de l'engin ainsi que son contrôle (PID et LQG).

### 1.4 Contraintes du projet

**Robustesse à son environnement.** L'appareil est prévu pour fonctionner en intérieur, avec des conditions météorologiques idéales (donc sans contraintes et sans perturbations).

**Contraintes de dimension et de poids l'hélicoptère.** L'engin se veut être de dimension et de poids le plus réduit possible (ordre d'idée : envergure en dessous des 30 cm, poids en dessous des 200 g). L'utilisation de cartes commerciales d'acquisitions (type mini cartes mères embarquées) sont prohibées car elles sont trop excessives (poids, volume, puissance de calculs) pour ce projet. La partie électronique doit donc être fabriquée et adaptée à l'hélicoptère. Elle doit également avoir une interface de communication avec l'ordinateur (pour le débogage, chargement de programmes).

**Contrainte de l'ordinateur et de l'IHM.** L'interface homme machine permet de simuler la plate-forme, puis de la contrôler réellement tout en visualisant ses états. L'ordinateur sera un modèle standard (PC, Macintosh), avec éventuellement un OS temps réel dur ou mou mais il devra être suffisamment réactif pour assurer son rôle de gestion de la stabilité.

## 2 Etude préliminaire du matériel

### 2.1 Description des principaux composants électroniques

Voici, une liste (non exhaustive) des principaux composants constitutifs (électronique et matériel) l'hélicoptère final.

**Hélice rotative et contra-rotative** Afin de réduire le moment induit de l'hélicoptère généré par les hélices, il est préférable d'avoir 2 hélices rotatives et 2 contra-rotatives. Les hélices contra-rotatives de petite tailles sont beaucoup plus difficiles à trouver que les rotatives.

**Moteur courant continu** Les moteurs à courants continus brushless ont un très bon rendement par rapport aux moteurs à courants continus "normaux" mais ils sont durs à utiliser. En effet, ils nécessitent en entrée trois signaux déphasés, d'où la création d'une carte électronique pour les contrôler. C'est pour cela, que nous utiliserons que des moteurs à courants continus "normaux".

**Gyroscope piézoélectrique** Ce capteur donne la vitesse angulaire. Il faut trois capteurs de ce type à bord de l'hélicoptère pour fournir les vitesses angulaires selon trois axes. Le désavantage avec ces capteurs et qu'il faut leur ajouter un circuit amplificateur à chaque gyroscope afin de filtrer leur signal. On trouve facilement des gyroscopes avec leur filtre que l'on branche sur des servomoteurs (avions télécommandés).

**Accéléromètre** Ce capteur permet mesurer, sur deux axes, l'accélération et l'inclinaison de l'appareil grâce à la force de gravité de la Terre. L'hélicoptère aura un ou deux accéléromètres.

**Télémètre** Ce capteur donne l'altitude et donc servira à stabiliser l'appareil en altitude. Il existe deux types de télémètre qui nous intéressent : les infra rouges et les ultra sons. Un télémètre est suffisant pour ce projet.

**Capteur d'orientation (compas)** Ce capteur donne l'orientation angulaire absolue de l'hélicoptère dans l'espace. Il est utilisé pour les H4H télécommandés (cf. [16]). Il est fortement probable qu'il ne sera pas utilisé pour cet appareil.

**Microcontrôleur PIC et dsPIC** Les microcontrôleurs PIC de MicroChip sont assez simples à programmer, peu chers et on trouve beaucoup de documentations sur ce sujet sur le web (comme [25]). Les dsPIC sont des PIC spécialisés dans le traitement du signal (ds voulant dire data signal).

## 2.2 Coût du projet

Nom	Quantité	Prix unitaire (euros)
Hélice rotative	2	2
Hélice contra-rotative	2	2
Moteur CC	4	3
Gyroscope	3	25
Accéléromètre	2	5
Compas	0	?
Télémètre	1	15
Microcontrôleur PIC, dsPIC	maxi 5	3-7
Programmeur PIC	1	30
Câble série	1	2
Plaquette d'aluminium et epoxy	1	2
Tube de carbone	1	2
<i>Total (H4H)</i>	1	170

## 3 Prévission du déroulement du projet

Le projet se décompose en plusieurs étapes, chaque étape comprenant plusieurs phases. Certaines phases peuvent être menées en parallèle d'autres demandent la réalisation de tâches préalables. Une tentative de planification avec affectation des tâches est réalisée pour simuler les contraintes d'un projet industriel à développement itératif. L'absence d'expérience rendant très peu précise les estimations de temps, ce planning ne sera qu'indicatif.

### 3.1 Réalisation d'un demi hélicoptère

Le but de cette étape est d'obtenir un demi hélicoptère sur un banc d'essai capable de communiquer avec un ordinateur qui calcule la loi de stabilisation. Le demi hélicoptère est constitué de deux moteurs liées par un axe rigide sur lequel sont disposés un gyroscope et un accéléromètre à deux degrés de libertés. La stabilisation consiste à maintenir l'axe horizontal attaché au banc en son centre de gravité. Le banc permettant un seul degré de liberté (rotation de l'axe autour de son centre de gravité dans un plan fixé.

1. La première tâche consiste à modéliser et à simuler la dynamique d'un demi d'hélicoptère (que l'on appelle aussi balançoire). La figure 3 montre la demi balançoire. La simulation et la conception de la commande est réalisée grâce à un logiciel de calcul numérique (notre choix s'est porté sur le logiciel Scilab qui est l'équivalent de Matlab mais qui est libre). La commande est du type PID, placement de pôles ou LQG. La balançoire est modélisé comme un système linéaire multi entrées (accéléromètre, gyroscope) multi sorties (moteur/hélice). Le but de cette tâche est de simuler la dynamique de la balançoire et sa stabilisation à l'horizontale.
2. La deuxième tâche consiste à réaliser la communication entre l'ordinateur et un microcontrôleur embarqué par leur port série. Le microcontrôleur réalise les entrées-sorties et sous-traite à l'ordinateur :
  - les calculs de la loi de commande (fonctionnement normal),
  - l'identification des paramètres le débugeage de la loi de commande (mode développement).En effet, un PC standard dispose d'une puissance de calcul et d'un environnement logiciel sans commune mesure avec ceux disponibles sur un microcontrôleur. Cette tâche permet de se doter d'outils analogues à ceux disponible dans les laboratoires d'électronique disposant de générateurs de signaux, d'oscilloscope, d'analyseur de spectre numériques (10 bits) dans une bande de fréquence de 0 à 10kHz. Le labo numérique est alors la boîte à outils Scicos de Scilab qui est l'analogue de Simulink pour Matlab (éditeur de blocs diagrammes).
3. La troisième tâche consiste à construire (matériellement) la demi balançoire avec le microcontrôleur embarqué. Le bloc diagramme 'dynamique' du logiciel de simulation est alors remplacé par la 'véritable' dynamique de la balançoire acquise grâce au microcontrôleur embarqué. Scicos calcule le feedback en faisant des calculs flottants et renvoie le résultat au microcontrôleur qui implémente en ligne le résultat. En fin de compte le microcontrôleur de la balançoire fait l'acquisition des données du gyroscope, les envoie à l'ordinateur. Ce dernier calcule la commande et renvoie le résultat au microcontrôleur. Celui-ci envoie par sa sortie PWM la commande au moteur (et donc à l'hélice). La balançoire doit se stabiliser.

### 3.2 Réalisation de l'hélicoptère complet

Une réalisation complète du H4H sera faite en utilisant la méthodologie mise au point sur la balançoire. Elle se fera en plusieurs étapes.

1. Réalisation du simulateur de l'hélicoptère complet avec la régulation des ses trois axes de libertés.
2. Réalisation d'une autre balançoire identique à la première. Puis assemblage de l'hélicoptère.
3. Réalisation du circuit électronique assurant la stabilisation du lacet en utilisant l'information d'un gyroscope supplémentaire.
4. Teste sur le banc d'essai (sur une rotule).
5. Réalisation de l'électronique de stabilisation de l'altitude et essaie de vol libre.

## Références

### Page web

- [1] L'évolution de ce projet peut être suivie sur la page web :  
<http://quentin.quadrat.free.fr/index-fr.html>

### Logiciels utilisés

- [2] La page principale de Scilab : <http://www-rocq.inria.fr/syndex/>

**Remarque 1** *Scilab est un logiciel libre pour le calcul scientifique, c'est un interpréteur de langage manipulant des objets mathématiques typés dynamiquement. Il inclut de nombreuses fonctions spécialisées pour le calcul numérique organisées sous forme de bibliothèques ou de boîtes à outils qui couvrent des domaines tels que la simulation, l'optimisation, et le traitement du signal et du contrôle.*

- [3] La page principale de Scicos : <http://www.scicos.org/>

**Remarque 2** *Une des boîtes à outils les plus importantes de Scilab est Scicos. C'est un éditeur graphique de bloc diagrammes permettant de modéliser et de simuler des systèmes dynamiques. Il est particulièrement utilisé pour modéliser des systèmes où des composants temps-continu et temps-discret sont inter-connectés.*

- [4] La page principale de SynDEx : <http://www-rocq.inria.fr/syndex/>

**Remarque 3** *SynDEx est un logiciel de CAO mettant en oeuvre la méthodologie Adéquation Algorithme Architecture (AAA) pour le prototypage rapide et l'optimisation de la mise en oeuvre d'applications distribuées temps réel embarquées. A partir d'un algorithme et d'une architecture donnés sous forme de graphe SynDEx génère une implémentation distribuée de l'algorithme en macro-code m4.*

- [5] La page principale de KTechlab : <http://ktechlab.org/>

- [6] La page principale de Qucs : <http://qucs.sourceforge.net/screenshots.html>

**Remarque 4** *KTechlab et Qucs sont des simulateurs de circuits intégrés.*

### Documentation des logiciels

- [7] Stephen L. Campbell, Jean-Philippe Chancelier and Ramine Nikoukhah, *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos*, Springer, 2005.

**Remarque 5** *Ce livre (en Anglais) est un tutoriel sur l'utilisation de Scilab et de Scicos et s'attarde sur ses outils de simulation et de modélisation.*

- [8] XXX TODO

**Remarque 6** *Ce livre (en Français) pourvoit un autre tutoriel sur l'utilisation de Scilab et de Scicos en plus simple mais il date un peu.*

- [9] Thierry Grandpierre, Christophe Lavarenne, Yves Sorel, *Modèle d'exécutif distribué temps réel SynDEx*, INRIA, 1998.

**Remarque 7** *Ce document s'adresse aux concepteurs d'applications distribuées temps réel embarquées, qui désirent optimiser l'implantation de leurs algorithmes de commande et de traitement du signal et des images sur des architectures multiprocesseurs. Il s'adresse ensuite plus particulièrement aux utilisateurs du logiciel SynDEx qui supporte la méthodologie AAA.*

- [10] Yves Sorel, *Génération automatique d'exécutifs distribués temps réel embarqués optimisés pour SoC*

**Remarque 8** *Génération automatique d'exécutifs avec le logiciel SynDEx.*

## Automatique

- [11] Pierre Faure et Michel Depeyrot, *Eléments d'automatique*, Dunod, 1974.

**Remarque 9** *Livre sur l'automatique, complet mais assez dur pour débiter.*

- [12] Karl Johan Åström *Control System Design* ME155A.

**Remarque 10** *Karl Johan est un personnage important dans l'univers de l'automatique. Ses cours sont téléchargeables sur son site <http://www.control.lth.se/~kja/> Ils sont complets et très biens pour débiter dans l'automatique.*

## Les projets Quadrotors / draganflyer / XUFO et documentations

- [13] <http://perso.wanadoo.fr/grzflyer/>

**Remarque 11** *Site en français sur la construction d'un draganflyer. Avantages : il donne les caractéristiques du matériel électronique et mécanique. Inconvénients : il ne donne pas d'explications sur la réalisation du circuit électronique, ni sur le modèle physique.*

- [14] <http://www.rctoys.com/draganflyer5.php>

- [15] X-UFO TODO XXXX

**Remarque 12** *Deux sites commerciaux où l'on peut acheter son propre draganflyer radio-commandé.*

- [16] <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/indoorFlying.php>

- [17] <http://asl.epfl.ch/member.php?SCIPER=149618>

**Remarque 13** *Ce genre de projet a déjà été étudié/réalisé par des élèves ou professeurs de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).*

- [18] Samir Bouabdallah, Pierpaolo Murrieri, Roland Siegwart, *Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor*

- [19] Samir Bouabdallah, *PID vs. LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor*,

**Remarque 14** *Ce sont les documents les plus importants pour la modélisation physique et la stabilisation d'un hélicoptère. On peut les télécharger respectivement sur :*

- <http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/325.pdf>
- <http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/330.pdf>

- [20] Pierre-Olivier Latour, *Computer based control system for a model helicopter*, 2002.

- [21] André Noth, *Synthèse et implémentation d'un contrôleur pour Micro Hélicoptère à 4 rotors*, Février 2004.

- [22] Marc Kunze, *Hélicoptère indoor*, Février 2003.



**Remarque 15** Documents réalisés par des élèves de l'APFL (le meilleur est le premier de la liste). On peut les télécharger respectivement sur :

- <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportLatour.pdf>
- <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportNoth.pdf>
- <http://asl.epfl.ch/research/projects/VtolIndoorFlying/rapports/rapportKunze.pdf>

- [23] <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?s=05bcbf26fe1c60ab6f128e5e38fc88c5&t=297067&pp=15>

**Remarque 16** Contrairement aux projets de l'APFL, JoseJ utilise quatre hélices orientées dans le même sens et non deux dans le sens direct et deux dans les sens indirect. Ce qui nécessite de stabiliser l'hélicoptère (force de torsion) par un aileron et sûrement plus de calculs logiciels. Citation : "I had constructed other multirotor helis (bigger) but they have the disadvantage that I need to make CW and CCW propellers to correct and control the torque effect. This micro heli use standard and cheap motors and props (no CW and CCW props) and I correct the torque effect with a twist in the two ailerons motors, so I have yaw control".

## Microcontrôleur et électronique

- [24] <http://thomas.cremel.free.fr/wiki/wikiread.php?LaFaq>

**Remarque 17** FAQ concernant les problèmes les plus fréquemment rencontrés en robotique/électronique.

- [25] <http://www.abcelectronique.com/bigonoff/>

**Remarque 18** Le site de Bigonoff contenant tous les cours INDISPENSABLES pour maîtriser la programmation assembleur des PIC de Microchip (16F84, 16F876, 16F877, 16F87x(A), 18Fxx8). Merci Bigonoff!

- [26] <http://www.jdm.homepage.dk/newpic.htm>

**Remarque 19** Schéma électronique du programmeur JDM permettant d'envoyer un programme assembleur dans un PIC.

## Crédits

- [27] <http://homepages.paradise.net.nz/jameskea/index.html>

**Remarque 20** La photo de la couverture de ce document provient de ce site.

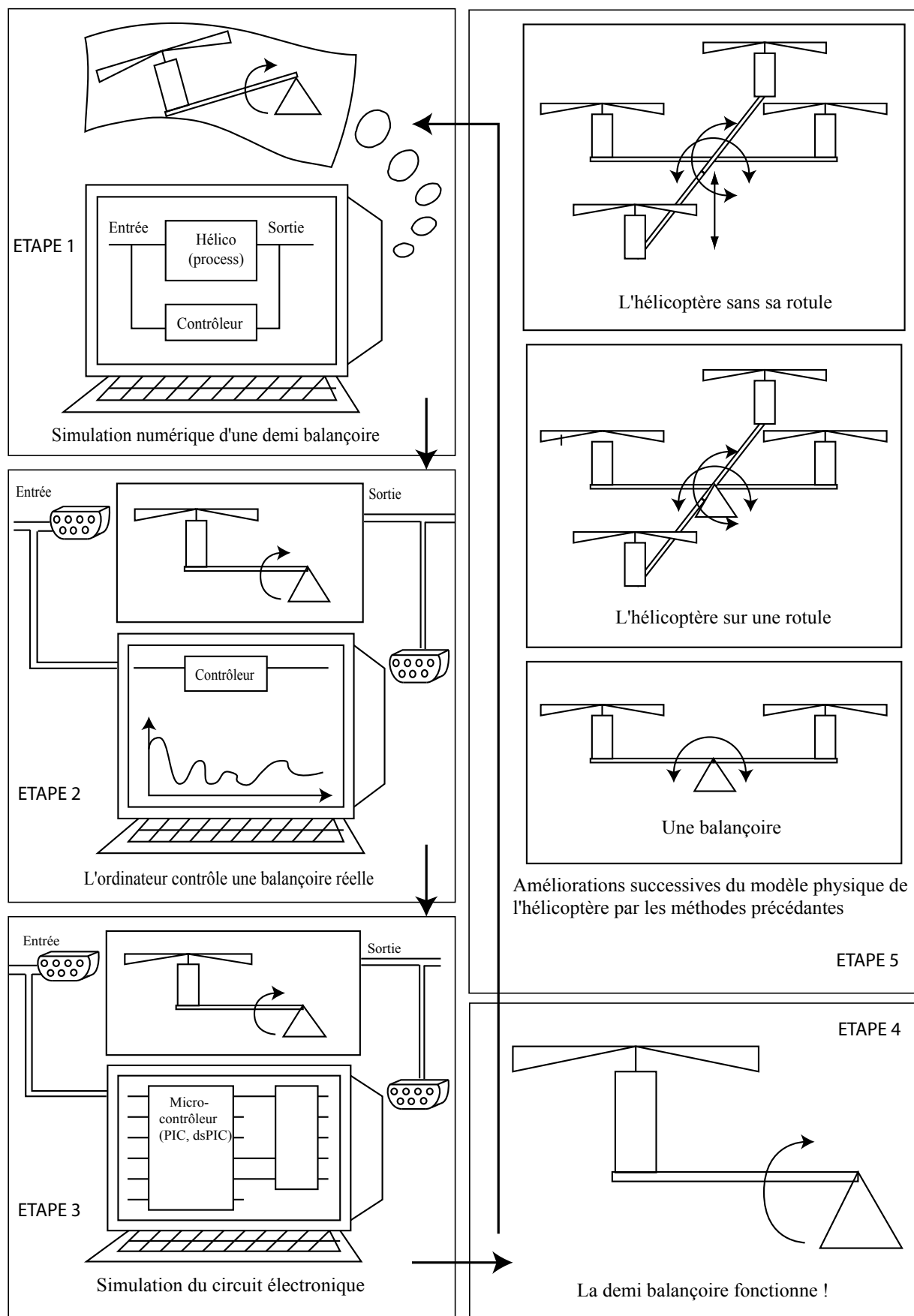


FIG. 3 – Les différentes étapes du projet.