

Transmission d'information par laser

Captivées par les défis technologiques du spatial, nous avons choisi d'explorer la transmission laser. Face aux enjeux de sécurité actuels, ce sujet s'est imposé par sa modernité. Il nous offre l'opportunité d'analyser concrètement les boucles de rétroaction appliquées à une communication sécurisée de pointe.

Le contrôle du système repose sur une boucle de retour garantissant la précision du pointage lors de la phase de transmission. Cette étude s'attachera également à analyser le cycle de transmission de l'information et sa robustesse.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- LAMONTAGNE Romane

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Traitement du Signal*)

- INFORMATIQUE (*Informatique pratique*)

- PHYSIQUE (*Physique Ondulatoire*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Communication laser *Laser communication*

Transmission de données *Data transmission*

Modulation optique *Optical modulation*

Onde *Wave*

Somme de contrôle *Checksum*

Bibliographie commentée

La transmission d'informations par réseau laser est une alternative prometteuse aux communications radio traditionnelles pour les satellites et stations au sol [1][2]. Elle permet d'atteindre des débits supérieurs (jusqu'à 1 Tb/s) [3], avec une consommation réduite [3] et une sécurité accrue[1], car le faisceau optique est beaucoup plus difficile à intercepter [3]. Cependant, ce type de communication impose des contraintes sévères sur le pointage : l'angle d'ouverture d'un faisceau laser est extrêmement faible, ce qui exige une précision de l'ordre de la

micro-radian [2] pour maintenir une liaison stable entre un satellite en mouvement et un récepteur terrestre.

Les recherches existantes montrent que cette précision de visée se heurte à deux limites principales :

Les mouvements relatifs : le satellite se déplace à environ 7 km/s [4] en orbite basse, ce qui nécessite un suivi dynamique et un repositionnement en temps réel.

Les perturbations atmosphériques [5] : la turbulence, la réfraction et la transparence variable de l'atmosphère peuvent interrompre le lien laser pendant une partie significative de l'année.

Pour résoudre ce problème, les systèmes actuels combinent plusieurs étages de contrôle : d'abord un suivi grossier par des systèmes mécaniques (ex. tourelle motorisée sur deux axes), puis un affinage par des miroirs [6]. La tourelle assure donc la première étape indispensable de capture et de maintien du faisceau.

Afin d'optimiser la précision de l'asservissement, il est primordial de déterminer avec rigueur les coordonnées de la cible. Cette localisation peut s'effectuer selon plusieurs méthodes :

Approche par modélisation photométrique : Un modèle mathématique simplifié permet d'établir une loi de correspondance entre la puissance incidente reçue par la photodiode et l'écart angulaire de la tourelle. La diminution du flux lumineux en fonction du dépointage permet de générer un signal d'erreur. L'asservissement vise alors à annuler cet écart à partir des mesures de tension délivrées par les capteurs.

Approche par mesure du temps de vol (Trilatération) : La mesure de la durée de propagation d'un signal radioélectrique entre un émetteur satellitaire et un récepteur permet d'évaluer la distance les séparant. Par l'exploitation des données issues de trois récepteurs distincts, la position de l'émetteur est déterminée de manière univoque par trilatération [7].

Au-delà de l'aspect mécanique du pointage, l'étude se focalise également sur la chaîne de transmission de l'information entre la Terre et un satellite. Pour garantir la fiabilité de la transmission, un protocole de vérification en boucle fermée est implémenté. Le processus suit une séquence cyclique : émission (modulation du laser), propagation (canal atmosphérique), réception (photodiode et numérisation), traitement, puis une étape de décision. Le dispositif d'émission valide la faisabilité d'une liaison optique Terre-satellite. L'utilisation d'un laser modulable et d'une détection par photodiode permet de s'affranchir des limitations de débit des radiofréquences traditionnelles.

Afin de vérifier la qualité de la transmission, un algorithme de somme de contrôle [8] est intégré dans le flux de données. Ce mécanisme permet de détecter les erreurs dues aux perturbations du canal (atténuation atmosphérique, turbulence, bruit optique). Si la somme de contrôle effectuée à la réception diffère de celle émise, le cycle de décision invalide le paquet de données et génère une requête de retransmission.

Problématique retenue

Comment concevoir et caractériser un système de communication laser sol-satellite conciliant stabilité du pointage optique par tourelle 2 axes et fidélité de la transmission des données par modulation et analyse du signal, tout en tenant compte des contraintes de précision et des perturbations externes ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Étudier expérimentalement la modulation d'un faisceau laser pour la transmission d'informations;
- Réaliser des mesures de signaux transmis via une photodiode et les analyser à l'oscilloscope;
- Concevoir un protocole de communication fiable;
- Assurer l'intégrité des données transmises par laser entre Terre et satellite malgré des perturbations externes.

Cette contribution complète celle de ma camarade, qui étudie le pointage par tourelle 2 axes, l'autre condition indispensable à une liaison fiable.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] TNO : Laser satellite communication : <https://www.tno.nl/en/digital/space/laser-satellite-communication/>
- [2] RICCARDO LAZZARO, CARLO BETTANINI : Évaluation de l'angle de pointage du satellite dérivé de TLE pour la communication laser : <https://link.springer.com/article/10.1007/s42496-022-00106-9>
- [3] IPLOOK : Communications laser par satellite : <https://fr.iplook.com/info/satellite-laser-communications-i00347i1.html>
- [4] WIKIPEDIA : GRAVES (système) : [https://fr.wikipedia.org/wiki/GRAVES_\(syst%C3%A8me\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/GRAVES_(syst%C3%A8me))
- [5] DAVID ALLIOUX : Comment les turbulences atmosphériques impactent les communications laser ? : <https://www.cailabs.com/fr/blog/aerospatial-et-defense/comment-les-turbulences-atmospheriques-impactent-les-communications-laser/>
- [6] CEDRAT TECHNOLOGIES : Mechanisms for space and new space : <https://pdf.directindustry.com/pdf/cedrat-technologies/point-ahead-mechanism-pam30-deep-space-optical-communication-dsoc/54728-926866.html>

[7] THOMAS, ADRIEN ET BRENDAN : Trilatération : <https://thuzhen.wordpress.com/2013/01/23/triangulation-par-les-distances/>

[8] WIKIPEDIA : Somme de contrôle : <https://en.wikipedia.org/wiki/Checksum>

Prototyper un accordeur automatique de piano

L'accordage de piano est une pratique qui demande beaucoup d'expérience. Pouvoir accorder soi-même son piano peut être intéressant dans une pratique amateur. C'est notamment dans notre lycée que plusieurs pianos désaccordés sont présents et pourraient être remis en état de marche à l'aide d'un tel dispositif.

L'accordeur automatique de piano fonctionne en deux étapes : un moteur modifie la tension de la corde puis une boucle de rétroaction compare la fréquence mesurée à la fréquence de référence, afin de corriger l'écart.

On retrouve donc une boucle d'asservissement classique, illustrant le thème "cycle et boucle".

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *BOUROUFFALA Inès*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)*

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Energétique)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Accordage *Tuning*

Tension *Tension*

Corde *String*

Motorisation *Motorisation*

Dynamique *Dynamics*

Bibliographie commentée

Le piano est un instrument de musique à cordes frappées, descendant direct du clavecin, inventé au début du XVIIIe siècle par Bartolomeo Cristofori. Du premier piano créé par Cristofori sont nés deux principaux types de piano, le piano droit et le piano à queue. Lorsque l'on appuie sur une touche, un marteau est poussé, frappant les cordes tendues au-dessus de la

table d'harmonie. Les cordes produisent alors une vibration complexe qui génère à la fois une fréquence fondamentale et plusieurs harmoniques. La fréquence fondamentale de vibration des notes dépend alors de la tension (T en newton), de la longueur (L en mètres) et de la masse linéique (μ en kilogramme par mètre) des cordes. [1] La caisse de résonance amplifie ensuite cette vibration. L'accordage consiste à ajuster la tension T de ces cordes afin de les amener à vibrer à une fréquence spécifique correspondant à une note de musique précise. Cette action nécessite une très grande précision, car chaque note est souvent formée de plusieurs cordes, qui doivent être accordées de manière simultanée et uniforme.[2]

La plupart du temps, on mesure la fréquence réelle des cordes à l'aide de capteurs piézoélectriques. En exploitant les propriétés des cristaux (comme le quartz), ils génèrent un signal électrique proportionnel à la déformation mécanique qu'ils subissent sous l'effet des vibrations des cordes.[3] Ce signal est ensuite analysé par des outils mathématiques comme la transformée de Fourier, qui permet de décomposer la vibration complexe de la corde en une somme de sinusoides élémentaires. Cette décomposition fournit la fréquence fondamentale ainsi que l'amplitude des harmoniques, permettant ainsi d'obtenir une mesure précise de la fréquence produite par la corde . [4]

L'accordeur automatique de piano se base sur un système asservi comportant une boucle de rétroaction. Cette dernière permet de mesurer la fréquence réelle de la corde et de la comparer à la fréquence de référence. Le système contient également une chaîne directe, permettant de modifier la tension de la corde via un moteur(souvent un moteur pas à pas). En cas d'écart, le système ajuste la tension à l'aide de la commande du moteur et corrige ainsi la position de la cheville à ajuster. La boucle de rétroaction est essentielle pour maintenir l'accordage car elle permet une correction en temps réel.[5]

Les moteurs pas-à-pas sont les plus adaptés à cette application car ils sont précis et répètent toujours le même mouvement pour la même commande. Couplé à la cheville d'accord, chaque pas du moteur entraîne une petite rotation de celle-ci, d'où l'importance de la précision. De plus, ce type de moteur possède un bon couple à faible vitesse, permettant ainsi de vaincre la résistance des chevilles [6]

Cependant, la conception d'un tel système nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs comme les perturbations dans le signal sonore. En effet, le système doit pouvoir agir sur celles-ci. C'est pourquoi, afin d'éviter les erreurs d'accordage, il est indispensable de considérer la précision du système de filtrage sonore, la rapidité de l'ajustement de la tension ainsi que la stabilité de l'asservissement.

Problématique retenue

Comment concevoir et optimiser un système d'accordage automatique de piano basé sur l'asservissement de la fréquence des cordes ?

Objectifs du TIPE du candidat

Concevoir et prototyper la chaîne directe d'accordage (moteur -> clé d'accord -> variation de tension de corde). Cela implique de :

- Dimensionner l'actionneur ;
- Valider les performances de la chaîne ouverte ;
- Concevoir la boucle d'asservissement ;
- Évaluer la précision, la rapidité et la reproductibilité du dispositif.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] WIKIPEDIA : Inharmonicité du piano : https://fr.wikipedia.org/wiki/Inharmonicit%C3%A9_du_piano
- [2] NEVILLE H. FLETCHER ; THOMAS D. ROSSING : The Physics of Musical Instruments : Springer, 1998, Chap.12, The Piano
- [3] FELIX SCHMID : Propriétés liées à la fréquence : <https://fr.f3lix-tutorial.com/accelerometer-properties/frequency-related-properties/frequency-related-properties-green>
- [4] ALAN V.OPPENHEIM ; RONALD W.SCHAFFER : Discrete-Time Signal Processing : Pearson, 2010, Chap.10, Fourier analysis of signal
- [5] KARL JOHAN ASTRÖM ; RICHARD M. MURRAY : Feedback Systems : Princeton University Press, 2008, Chap.1, Feedback and control ; Chap.5, Linear feedback systems
- [6] NICHOLAS J.GIORDANO, SR : Physics of the Piano : Oxford University Press, 2010, Chap.6, Hitting strings with hammers

Quels sont les facteurs physiques qui limitent les capacités de stockage sur disque ?

Intéressé par la technologies informatique, j'ai voulu comprendre pourquoi la capacité des disque ne peut augmenter indéfiniment. ce sujet permet donc d'étudier ces méthodes de stockage qui nous entourent tout en déterminant les limites de la matière

Cette étude s'inscrit dans le thème "cycles et boucles" en analysant les cycles d'écriture-lecture et les boucles de rétroaction entre miniaturisation technologique et limites physiques.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *INFORMATIQUE (Technologies informatiques)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Stockage magnétique</i>	<i>Magnetic storage</i>
<i>Densité surfacique</i>	<i>Areal density</i>
<i>Limite de superparamagnétisme</i>	<i>Superparamagnetic limit</i>
<i>Diffraction optique</i>	<i>Optical diffraction</i>
<i>Matériaux magnétiques</i>	<i>Magnetic materials</i>

Bibliographie commentée

[1] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 Tbit/in²," IEEE Transactions on Magnetics, 2000. Cet article identifie la limite du superparamagnétisme, phénomène apparaissant lorsque les domaines magnétiques servant à coder un bit deviennent si petits que leur énergie thermique (kBT) est comparable à leur énergie d'anisotropie magnétique (KV). L'état « 0 » ou « 1 » devient alors instable sur des temps d'observation de l'ordre de quelques années. Wood montre que, pour maintenir la stabilité, le produit KV/kBT doit rester supérieur à 60. Ce résultat fixe une taille minimale de grain magnétique, donc une densité de stockage maximale d'environ 1 Tbit/in² avec les matériaux utilisés vers 2000 (alliages CoPtCr). [2] B.D. Terris & T. Thomson, "Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media," Journal of Physics D: Applied Physics, 2005. Les auteurs passent en revue les solutions

proposées pour repousser la limite du superparamagnétisme : utilisation de matériaux à anisotropie plus forte (FePt, CoPt), réduction contrôlée des interactions dipolaires, et surtout développement de technologies HAMR (Heat-Assisted Magnetic Recording) et MAMR (Microwave-Assisted Magnetic Recording). Dans HAMR, la tête chauffe localement le support au-dessus de la température de Curie pour écrire, puis le refroidit rapidement, ce qui permet l'utilisation de matériaux plus durs magnétiquement. Cette approche illustre bien la contrainte thermique : il faut concilier stabilité à froid et possibilité d'écriture à chaud.

[3] M. Mansuripur, *The Physical Principles of Magneto-Optical Recording*, Cambridge University Press, 1995. Ouvrage de référence sur les supports optiques et magnéto-optiques. Mansuripur décrit le fonctionnement des systèmes d'écriture et de lecture par laser, basés sur la diffusion et la diffraction de la lumière sur des structures de taille micrométrique. La résolution est limitée par le critère d'Abbe, $d_{\min} = \lambda / (2 \text{ NA})$, où λ est la longueur d'onde et NA l'ouverture numérique de la lentille. Pour un laser rouge (650 nm) et une lentille classique (NA 0,6), la taille minimale des « pits » est d'environ 540 nm, ce qui fixe la capacité maximale d'un DVD. Ce cadre théorique explique la transition vers les lasers bleus (405 nm) du Blu-ray, permettant une densité multipliée par environ 5. [4] H. Nagata et al., "Blu-ray Disc technology: the current state and future prospects," *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004. Cet article retrace le développement du Blu-ray Disc, dont la principale avancée repose sur la réduction de la longueur d'onde (405 nm) et l'augmentation de l'ouverture numérique (NA = 0,85). Il montre comment ces paramètres physiques réduisent la taille des « pits » à environ 150 nm et la distance entre pistes à 320 nm. L'auteur aborde aussi les limites mécaniques : précision de mise au point du laser, vibrations, diffraction inter-pistes et absorption dans le substrat. Ces contraintes définissent une limite pratique à la miniaturisation, analogue à celle du superparamagnétisme pour les HDD. [5] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Ce manuel, référence en physique électromagnétique, fournit les fondements théoriques des phénomènes de diffraction et de focalisation nécessaires pour comprendre la lecture optique. Les équations de Maxwell y sont appliquées à la propagation des ondes lumineuses dans les milieux diélectriques, permettant de déduire les limites de résolution imposées par la nature ondulatoire de la lumière. Il constitue une base solide pour justifier mathématiquement les ordres de grandeur observés expérimentalement.

Problématique retenue

Quels mécanismes physiques fondamentaux (superparamagnétisme, diffraction, contraintes thermiques et mécaniques) imposent une limite à la miniaturisation des unités de stockage, et donc à l'augmentation de la capacité des disques ?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif est d'identifier et de modéliser les principaux facteurs physiques limitant la densité de stockage. On analysera d'une part la limite de superparamagnétisme pour les supports

magnétiques, et d'autre part les contraintes de diffraction pour les supports optiques. L'étude visera à comparer les ordres de grandeur, illustrer par des calculs simples (taille critique des grains, diamètre de focalisation d'un faisceau laser), et montrer comment ces limites expliquent l'évolution technologique (HAMR, lasers bleus).

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] R. WOOD : The feasibility of magnetic recording at 1 Tbit/in² : DOI: 10.1109/20.824422
- [2] B.D. TERRIS & T. THOMSON : Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media : DOI: 10.1088/0022-3727/38/12/R01
- [3] M. MANSURIPUR : The Physical Principles of Magneto-Optical Recording : <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622472>
- [4] JUNICHIRO TONAMI ET AL : Advanced Technologies for Read Channel on Blu-ray Disc : DOI: 10.1143/JJAP.43.4821
- [5] J.D. JACKSON : Classical Electrodynamics : ISBN-10 9780471309321

Conception de systèmes anti-Larsen.

Mon intérêt pour l'effet Larsen est né de situations concrètes observées lors de concerts, de l'utilisation d'appareils auditifs, où ce phénomène dégrade fortement la qualité sonore et peut devenir gênant, voire dangereux pour l'audition. Ainsi cela m'a motivé à comprendre ce phénomène physique connu grâce à la physique.

A travers l'étude de ce phénomène, nous cherchons à comprendre les causes physiques de l'apparition du Larsen, né d'une rétroaction du son, formant alors une boucle acoustique. Le but de ce TIPE est donc de trouver une manière de limiter voire supprimer cet effet, sans détériorer la qualité du signal.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Electronique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Effet Larsen</i>	<i>Acoustic feedback</i>
<i>Microphone</i>	<i>Microphone</i>
<i>Rétroaction</i>	<i>Feedback</i>
<i>Filtrage</i>	<i>Filtering</i>
<i>Résonance</i>	<i>Resonance</i>

Bibliographie commentée

L'effet Larsen, ou rétroaction acoustique, représente un défi majeur dans tout système de diffusion sonore. Ce phénomène naît d'une boucle de rétroaction où le son émis par un haut-parleur est capté par un microphone, puis réamplifié et diffusé à nouveau, créant une oscillation auto-entretenu. Dans des situations concrètes comme les concerts ou l'usage de prothèses auditives, ce sifflement dégrade fortement la qualité sonore et peut s'avérer dangereux pour l'appareil auditif humain. L'enjeu de ce TIPE est de comprendre les causes physiques de cette instabilité pour concevoir des systèmes capables de limiter ou supprimer cet effet sans altérer la fidélité du signal audio.

L'étude commence par une description fondamentale du phénomène. Le Larsen est une boucle acoustique dont l'apparition dépend de conditions strictes de gain et de phase. Selon les principes de la physique ondulatoire, si le gain de la boucle est supérieur à l'unité à une fréquence où le déphasage est un multiple de 2π , le système devient instable. Cette modélisation du système microphone-amplificateur-haut-parleur permet d'identifier les fréquences critiques de résonance propres à chaque environnement acoustique.

Pour remédier à cette instabilité, plusieurs méthodes de limitation sont explorées dans la littérature. Les approches les plus simples consistent à agir sur les paramètres physiques du système, notamment par la réduction du gain global ou le placement judicieux des capteurs par rapport aux sources d'émission. Cependant, ces méthodes passives limitent souvent la puissance sonore disponible. C'est pourquoi le recours au filtrage numérique est essentiel. L'utilisation de filtres coupe-bande (notch filters) et l'égalisation permettent de cibler et d'atténuer les fréquences responsables de l'accrochage sans dénaturer le reste du spectre sonore. JBL souligne l'importance de ces supprimeurs de larsen automatiques pour sécuriser les performances scéniques en temps réel.[3]

Dans le domaine médical, la problématique est encore plus complexe en raison de la miniaturisation. La proximité extrême entre le microphone et l'écouteur dans une aide auditive crée un risque permanent de rétroaction. La technologie *LarsenBloc* de Phonak fait ici figure de référence en proposant une gestion dynamique du signal pour annuler le larsen avant qu'il ne devienne audible. La recherche actuelle se concentre sur l'optimisation de ces algorithmes.[1] Les travaux de Thomas Fillon sur le traitement numérique du signal acoustique montrent comment une aide aux malentendants peut intégrer des filtres adaptatifs performants.[4] Enfin, l'étude comparative menée par Hugo Thomas permet d'évaluer l'efficacité de ces différents algorithmes anti-larsen et, surtout, d'analyser leur influence sur la qualité sonore perçue, ce qui constitue le cœur de notre problématique.[2]

En conclusion, la superposition de ces approches — de la modélisation physique fondamentale aux algorithmes de traitement numérique du signal — fournit les outils nécessaires pour concevoir un système anti-Larsen efficace. L'objectif final sera de confronter ces modèles théoriques à l'expérience afin d'estimer l'erreur entre le système réel et les simulations numériques

Problématique retenue

Comment limiter l'apparition de l'effet larsen dans un système de sonorisation tout en conservant une qualité sonore satisfaisante ?

Objectifs du TIPE du candidat

1-Décrire le phénomène physique de l'effet Larsen.

- *Chaîne de rétroaction acoustique*

- *Conditions d'apparition*

2- Modéliser le système microphone-amplificateur-haut-parleur.

- *Approche simplifiée en boucle de rétroaction*

- *Analyse fréquentielle du système*

3-Etudier les méthodes de limitation du Larsen.

- *Réduction du gain et placement de capteurs*

- *Filtre coupe-bande et égalisation*

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] PHONAK : Technologie LarsenBloc, e nouvel anti-larsen de référence : https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.phonak.com/content/dam/phonak/fr/evidence-library/phonak-insights/background_story_LarsenBloc_2008.pdf

[2] HUGO THOMAS : UNIVERSITÉ DE RENNES I - FACULTÉ DE MÉDECINE ÉCOLE D'AUDIOPROTHÈSE DE FOUGÈRES Étude comparative de l'efficacité des algorithmes anti-larsen et leurs éventuelles influences sur la qualité sonore. : <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.college-nat-audio.fr/wp-content/uploads/2024/08/THOMAS-Hugo-Memoire-definitif.pdf>

[3] JBL : What is feedback suppression and how can it help your performances? : <https://www.jbl.com/blogs/feedback-suppression.html>

[4] THOMAS FILLON : Traitement numérique du signal acoustique pour une aide aux malentendants : <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://pastel.hal.science/pastel-00001201/file/TheseTF.pdf>

[5] WIKIPÉDIA : Effet Larsen : https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Larsen

Prototyper un accordeur automatique de piano

L'accordage de piano est une pratique qui demande beaucoup d'expérience. Pouvoir accorder soi-même son piano peut être intéressant dans une pratique amateur. C'est notamment dans notre lycée que plusieurs pianos désaccordés sont présents et pourraient être remis en état de marche à l'aide d'un tel dispositif.

L'accordeur automatique de piano fonctionne en deux étapes : un moteur modifie la tension de la corde puis une boucle de rétroaction compare la fréquence mesurée à la fréquence de référence, afin de corriger l'écart.

On retrouve donc une boucle d'asservissement classique, illustrant le thème "cycle et boucle".

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- AMANIA Lucas

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)
- SCIENCES INDUSTRIELLES (Traitement du Signal)
- PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Fréquence</i>	<i>Frequency</i>
<i>Signal</i>	<i>Signal</i>
<i>Asservissement</i>	<i>Feedback</i>
<i>Filtrage</i>	<i>Filtering</i>
<i>Mesure</i>	<i>Measurement</i>

Bibliographie commentée

Le piano est un instrument de musique à cordes frappées, descendant direct du clavecin, inventé au début du XVIIIe siècle par Bartolomeo Cristofori. Du premier piano créé par Cristofori sont nés deux principaux types de piano, le piano droit et le piano à queue. Lorsque l'on appuie sur une touche, un marteau est poussé, frappant les cordes tendues au-dessus de la

table d'harmonie. Les cordes produisent alors une vibration complexe qui génère à la fois une fréquence fondamentale et plusieurs harmoniques. La fréquence fondamentale de vibration des notes dépend alors de la tension (T en newton), de la longueur (L en mètres) et de la masse linéique (μ en kilogramme par mètre) des cordes. [1] La caisse de résonance amplifie ensuite cette vibration. L'accordage consiste à ajuster la tension T de ces cordes afin de les amener à vibrer à une fréquence spécifique correspondant à une note de musique précise. Cette action nécessite une très grande précision, car chaque note est souvent formée de plusieurs cordes, qui doivent être accordées de manière simultanée et uniforme.[2]

La plupart du temps, on mesure la fréquence réelle des cordes à l'aide de capteurs piézoélectriques. En exploitant les propriétés des cristaux (comme le quartz), ils génèrent un signal électrique proportionnel à la déformation mécanique qu'ils subissent sous l'effet des vibrations des cordes.[3] Ce signal est ensuite analysé par des outils mathématiques comme la transformée de Fourier, qui permet de décomposer la vibration complexe de la corde en une somme de sinusoides élémentaires. Cette décomposition fournit la fréquence fondamentale ainsi que l'amplitude des harmoniques, permettant ainsi d'obtenir une mesure précise de la fréquence produite par la corde . [4]

L'accordeur automatique de piano se base sur un système asservi comportant une boucle de rétroaction. Cette dernière permet de mesurer la fréquence réelle de la corde et de la comparer à la fréquence de référence. Le système contient également une chaîne directe, permettant de modifier la tension de la corde via un moteur(souvent un moteur pas à pas). En cas d'écart, le système ajuste la tension à l'aide de la commande du moteur et corrige ainsi la position de la cheville à ajuster. La boucle de rétroaction est essentielle pour maintenir l'accordage car elle permet une correction en temps réel.[5]

Les moteurs pas-à-pas sont les plus adaptés à cette application car ils sont précis et répètent toujours le même mouvement pour la même commande. Couplé à la cheville d'accord, chaque pas du moteur entraîne une petite rotation de celle-ci, d'où l'importance de la précision. De plus, ce type de moteur possède un bon couple à faible vitesse, permettant ainsi de vaincre la résistance des chevilles [6]

Cependant, la conception d'un tel système nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs comme les perturbations dans le signal sonore. En effet, le système doit pouvoir agir sur celles-ci. C'est pourquoi, afin d'éviter les erreurs d'accordage, il est indispensable de considérer la précision du système de filtrage sonore, la rapidité de l'ajustement de la tension ainsi que la stabilité de l'asservissement.

Problématique retenue

Comment concevoir et optimiser un système d'accordage automatique de piano basé sur l'asservissement de la fréquence des cordes ?

Objectifs du TIPE du candidat

-Choisir et valider un capteur de fréquence.

-Programmer une stratégie de contrôle.

-Développer et tester la boucle de rétroaction (acquisition du son, filtrage du signal, calcul de la fréquence, correction automatique).

-Étudier l'efficacité de l'asservissement en termes de stabilité et de précision d'accordage.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] WIKIPEDIA : Inharmonicité du piano : https://fr.wikipedia.org/wiki/Inharmonicit%C3%A9_du_piano

[2] NEVILLE H. FLETCHER, THOMAS D. ROSSING : The Physics of Musical Instruments : Springer, 1998, Chapitre 12 : The Piano

[3] FELIX SCHMID : Propriétés liées à la fréquence : <https://fr.f3lix-tutorial.com/accelerometer-properties/frequency-related-properties/frequency-related-properties-green>

[4] ALAN V.OPPENHEIM, RONALD W.SCHAFFER, JOHN R.BUCK : Discrete-Time Signal Processing : Pearson, 2010, Chapitre 10 : Fourier analysis of signal

[5] KARL JOHAN ASTRÖM, RICHARD M.MURRAY : Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers : Princeton University Press, 2008, Chapitre 1 : Feedback and control, Chapitre 5 : Linear feedback systems

[6] NICHOLAS J. GIORDANO : Physics of the Piano : Oxford University Press, 2010, Chapitre 6 : Hitting strings with hammers

Quelle est la trajectoire optimale pour se rendre sur Mars ?

Ce choix vient de mon intérêt particulier pour le domaine spatial qui m'intrigue depuis petit. J'ai choisi ce sujet car c'est celui qui s'inscrit pour moi le mieux dans le sujet.

Cette étude s'inscrit dans le thème Cycles et Boucles, car toute mon étude se base sur les orbites qui sont cycliques, et dont le cycle est important pour étudier les trajectoires optimales pour les voyages spatiaux, et notamment pour se rendre sur Mars.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Mécanique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Orbite de transfert</i>	<i>Transfer orbit</i>
<i>Lois de Kepler</i>	<i>Kepler's laws</i>
<i>Economie</i>	<i>Economy</i>
<i>Simulation numérique</i>	<i>Numerical Simulation</i>
<i>Non linéaire</i>	<i>Nonlinear</i>

Bibliographie commentée

Dans le contexte actuel de l'exploration spatiale, l'optimisation des trajectoires interplanétaires est un problème central pour la conception de missions efficaces. L'enjeu est à la fois scientifique — comprendre les lois qui gouvernent le mouvement des engins spatiaux — et économique, car minimiser la consommation de carburant (quantifiée par la somme des changements de vitesse nécessaires, Δv) est crucial pour réduire les coûts et les risques associés aux missions spatiales de longue durée.

La mécanique céleste fournit le cadre théorique nécessaire pour analyser ces transferts orbitaux en utilisant les lois de Newton et de Kepler, qui permettent de décrire les trajectoires sous l'influence gravitationnelle d'un corps central tel que le soleil. Dans un modèle idéal simplifié (sans perturbations externes), ces lois conduisent à des solutions analytiques pour les transferts orbitaux qui minimisent l'énergie requise [1].

Le transfert orbital de Hohmann, introduit au début du XX^e siècle dans le cadre de la mécanique orbitale, représente une solution analytique clé dans ce domaine. Il s'agit d'une trajectoire elliptique tangente à deux orbites coplanaires circulaires consécutives, nécessitant seulement deux impulsions de moteur pour passer d'une orbite à l'autre avec un Δv minimal dans le modèle impulsionnel basique. Cette configuration constitue la base des trajectoires optimales dans de nombreux problèmes d'orbite de transfert, notamment pour des missions entre orbites terrestres ou interplanétaires.

Si l'orbite de Hohmann reste un outil fondamental, la littérature scientifique contemporaine montre que son optimisation peut être approfondie ou généralisée. Par exemple, des travaux récents explorent des trajectoires non coplanaires où l'angle entre les plans orbitaux devient un paramètre optimisable, ce qui permet d'étendre le concept de Hohmann à des configurations plus réalistes de satellites ayant différents plans orbitaux [2]. De plus, l'optimisation des transferts peut être étudiée en considérant plusieurs impulsions et en cherchant à minimiser la somme des Δv , ce qui complexifie la problématique mais permet d'atteindre des solutions plus efficaces dans des contextes variés [3].

Par ailleurs, l'optimisation des transferts à faible poussée (low-thrust), qui s'écarte du modèle impulsionnel classique vers des moteurs à poussée continue, suscite un intérêt grandissant. Des méthodes modernes combinant analyse dynamique et formulation de contrôle optimal permettent de trouver des trajectoires qui équilibrent la consommation de carburant et le temps de vol, offrant un cadre plus flexible que les solutions analytiques classiques [4].

D'autres approches avancées en optimisation de trajectoires consistent à employer des algorithmes numériques, comme des algorithmes génétiques, pour explorer des familles de solutions et identifier des transferts qui peuvent surpasser les trajectoires de Hohmann dans certains cas tout en respectant des contraintes supplémentaires (par exemple pour des orbites très éloignées ou des configurations complexes) [5].

Ces développements récents illustrent que, bien que le principe fondamental de minimisation de Δv soit toujours au centre des transferts orbitaux, la résolution du problème devient de plus en plus sophistiquée avec l'intégration de méthodes numériques, de formulations de contrôle optimal, et de modèles plus réalistes des capacités de propulsion.

Sur le plan économique et politique, la réduction de la consommation de carburant impacte directement les budgets des missions spatiales, ce qui motive fortement la recherche en optimisation de trajectoire. Les agences spatiales, soucieuses de maximiser le rendement scientifique de leurs missions, s'appuient sur ces avancées pour concevoir des trajectoires économes et fiables dans des environnements spatiaux complexes.

Enfin, le rôle du public et des acteurs non gouvernementaux influence également le développement des technologies orbitales. L'intérêt croissant pour les missions interplanétaires

(notamment vers Mars) stimule la recherche et les investissements dans des modèles de trajectoires toujours plus sophistiqués, intégrant non seulement la minimisation de l'énergie mais aussi des contraintes de sécurité, de temps, et d'innovation technologique.

Problématique retenue

Comment optimiser un trajet spatial à l'aide des cycles orbitaux des planètes ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Étudier les principes physiques des orbites de transfert interplanétaires.
- Modéliser analytiquement l'orbite de transfert de Hohmann.
- Déterminer les conditions minimisant la variation de vitesse.
- Analyser le rôle des fenêtres de lancement Terre–Mars.
- Mettre en évidence les limites du modèle de Hohmann.
- Comparer différentes stratégies de transfert orbital.
- Relier les choix de trajectoire aux contraintes économiques et politiques.
- Comprendre l'influence des attentes du public sur les missions spatiales.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1]** VASILOFF, K., ADESINA, I., WANG, Z., MALL, K., & DELAURENTIS, D. A : Trajectory Optimization for Orbit Transfers: Principles, Advances, Case Studies, and Outlook. Aerospace : <https://www.mdpi.com/2226-4310/12/12/1087>
- [2]** RINCÓN, A., ROJO, P., LACRUZ, E., ABELLÁN, G., & DÍAZ, S. : On non-coplanar Hohmann Transfer using angles as parameters. : <https://arxiv.org/abs/1509.05550>
- [3]** TAHERI, E., & JUNKINS, J. L. : How Many Impulses Redux : <https://arxiv.org/abs/1906.01839>
- [4]** LEOMANNI, M., BIANCHINI, G., GARULLI, A., & QUARTULLO, R : Optimal Low-Thrust Orbit Transfers Made Easy: A Direct Approach. : <https://arxiv.org/abs/2101.08160>
- [5]** DO, P. H., & LE, T. D. : A Genetic Algorithm Framework for Optimizing Three-Impulse Orbital Transfers with Poliastro Simulation. : <https://www.arxiv.org/abs/2508.03466>

Etude d'un Système de refroidissement par évaporation.

Lors des fortes chaleurs de l'été 2025, j'ai pensé à concevoir un dispositif capable de fournir de l'air frais tout en contribuant au refroidissement d'une pièce. Dans un premier temps, un ventilateur simple a été utilisé, avant d'y associer une serviette humide afin d'exploiter le principe d'évaporation.

En passant de l'état liquide à gazeux, l'eau absorbe de la chaleur et provoque un refroidissement de l'air mais aussi une augmentation de l'humidité. L'expérience met en évidence un cycle où l'eau circule entre deux états.

L'étude permet d'évaluer les avantages et les limites d'un refroidissement par évaporation.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) **Mots-clés (en anglais)**

Cycle thermodynamique *Thermodynamic cycle*

hygrométrie *hygrometry*

refroidissement adiabatique *adiabatic cooling*

asservissement *feedback control*

température de bulbe humide *wet-bulb temperature*

Bibliographie commentée

Le monde est plongé dans une crise de l'énergie sans précédent. Cette crise touche à la fois les entreprises et les ménages. En Éthiopie, par exemple, comme le souligne Misrak Girma Haile, seulement 45 % de la population ont accès à l'électricité. Face à cette réalité, l'adoption des systèmes de refroidissement par évaporation s'est progressivement répandue afin de combattre la chaleur du climat éthiopien. Ces systèmes permettent de maintenir une température intérieure comprise entre 23 et 27 °C, avec un taux d'humidité variant entre 30 et 50 %. [1]

En pratique, le fonctionnement est simple : une ventilation envoie de l'air à travers un filtre humide. L'air se charge en vapeur d'eau par évaporation, ce qui entraîne une baisse de sa température pouvant atteindre 4 °C. [2] [3]

Le principe physique repose sur la thermodynamique de l'évaporation de l'eau : lors du passage de l'état liquide à l'état gazeux, une quantité d'énergie est absorbée ce qui fait diminuer la température de l'air et de l'eau. Ce processus est endothermique et implique la chaleur latente de vaporisation. Le système est généralement considéré comme adiabatique, les échanges thermiques avec l'extérieur étant négligeables. [1] [3]

La performance du système dépend de la nature du filtre : sa capacité de rétention d'eau et sa surface de contact avec l'air sont déterminantes. Comme le montre Tom Fred Ishugah, différents matériaux ont été testés, tels que le papier kraft, la céramique, le PVC, la brique ou encore l'eucalyptus. [4]

L'évaluation de l'efficacité du refroidissement repose sur deux mesures psychrométriques :

La température sèche (*dry bulb temperature*) : c'est la température de l'air ambiant mesurée par un thermomètre classique.

La température humide (*wet bulb temperature*) : Cette valeur traduit la capacité de l'air à absorber de l'humidité et peut être déterminée grâce au diagramme psychrométrique. Plus la différence entre température sèche et humide est grande, plus l'air est sec et donc plus le refroidissement par évaporation est efficace. [3] [5]

Toutefois, une limite importante existe : le système augmente fortement l'humidité intérieure. Dans certains cas, elle peut atteindre 84 %, un niveau inconfortable pour les occupants. Pour limiter cet effet, T. O. Ahmadu propose l'intégration d'un tampon de déshumidification au charbon actif.

D'une part, Le système de refroidissement par évaporation seul offre une réduction significative de la température intérieure et l'ajout du déshumidificateur maintient l'humidité sous le seuil de 50 % ce qui améliore le confort.

Cependant, sans déshumidificateur, l'humidité relative atteint des niveaux inconfortables et avec le déshumidificateur, la température intérieure reste plus élevée avec une diminution de 2,5 °C. De plus, les performances globales du système (capacité de refroidissement, efficacité et COP) diminuent. Ainsi, l'ajout d'un déshumidificateur permet de préserver un confort hygrothermique, mais son usage réduit le rendement énergétique global. [5]

Problématique retenue

Comment concevoir et réguler un système de refroidissement à évaporation tout en maintenant un compromis entre confort hygrothermique et baisse de température ?

Objectifs du TIPE du candidat

- 1-Rendre compte de l'efficacité de ce refroidissement par évaporation.
- 2-Proposer un modèle fiable qui simule la réalité.
- 3-Concevoir un asservissement afin d'expérimenter le comportement du système.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] MISRAK GIRMA HAILE : Review of Evaporative Cooling Systems for Buildings in Hot and Dry Climates : <https://www.mdpi.com/3023848>
- [2] NORESO : Evaporative cooling center, building America solution Center : <https://bas.pnnl.gov/resource-guides/evaporative-cooling-systems>
- [3] THE ENGINEERING TOOLBOX : Dry Bulb, Wet Bulb and Dew Point Temperatures by engineering tool box : https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-d_816.html
- [4] TOM FRED ISHUGAH : Current Status, Challenges, and Opportunities of Evaporative Cooling for Building Indoor Thermal Comfort Using Water as a Refrigerant : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/1026136>
- [5] T. O. AHMADU : Experimental evaluation of a modified direct evaporative cooling system combining luffa fiber—charcoal cooling pad and activated carbon dehumidifying pa : <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-022-00116-1>

Régulation de vitesse: Influence de la latence de consigne sur la dynamique d'un véhicule

Ce sujet est très intéressant car il mélange traitement de signal et automatique et permet de visualiser l'effet d'un temps de calcul sur un objet physique telle que la voiture.

Notre étude s'inscrit dans le thème de l'année "cycles et boucles" car elle traite la latence du cycle de perception dans une boucle de régulation de vitesse qui peut emmener des oscillations que nous tenterons de corriger.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- HALOUI Ziyad

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)

- INFORMATIQUE (Informatique pratique)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Asservissement *Control system*

Contrôle de vitesse *Speed Control*

Automobile *Automobile*

Traitement d'images *Image procession*

Sécurité *Security*

Bibliographie commentée

L'histoire de la régulation de vitesse marque le passage d'un **cycle de vigilance** humain, sujet à la fatigue, vers une **boucle de contrôle** automatisée. Si les premiers régulateurs mécaniques de Watt réagissent instantanément par force centrifuge, l'ère moderne impose des défis numériques. Le cadre légal actuel rend désormais obligatoire les systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse (ISA), exigeant une fiabilité absolue de la boucle de détection face aux aléas de la route.[1]

La conception de cet asservissement nécessite d'abord une modélisation fine du système physique. Le véhicule ne peut être réduit à un point matériel ; l'ouvrage de référence de T. Gillespie permet d'établir les équations dynamiques longitudinales où les forces résistantes (aérodynamisme, frottements) agissent comme des perturbations constantes sur la **boucle de régulation**.**[2]**

Sur le plan de la commande, la théorie classique de l'automatique linéaire démontre qu'un système asservi en vitesse ne peut être stable que si la **marge de phase** de la boucle ouverte est suffisante. L'auteur insiste sur le réglage délicat du correcteur PID : l'action intégrale est nécessaire pour annuler l'erreur statique, mais elle risque d'engendrer des dépassements (overshoot) lors des phases transitoires d'accélération.**[3]**

La complexité s'accroît avec l'introduction de l'intelligence artificielle. Contrairement aux capteurs classiques, la définition de la consigne via une caméra introduit une latence. Ce délai agit comme un "retard pur" dans la chaîne d'information. Comme le théorise J.M. Godhavn , ce retard dégrade la phase du système et peut provoquer l'apparition de **cycles limites** (oscillations entretenues) autour de la vitesse cible, rendant le véhicule inconfortable voire dangereux. Notre étude vise donc à quantifier ce retard critique pour garantir la stabilité de la boucle fermée.**[4]**

L'automatisation de la vitesse est également un atout pour réduire la consommation. En maintenant une allure stable, le régulateur évite les accélérations inutiles et permet au moteur de fonctionner plus efficacement. Des études montrent qu'une **vitesse instable** peut **augmenter la consommation** de carburant **de 20 %** par rapport à une vitesse constante gérée par un asservissement **[5]**.

Ainsi, la précision du contrôle de vitesse permet non seulement d'améliorer la sécurité, mais aussi de limiter les pertes d'énergie et les émissions polluantes.

Problématique retenue

Comment concevoir une boucle de régulation de vitesse et paramétrer son correcteur pour garantir le meilleur compromis entre réactivité et stabilité face aux retards imposés par le traitement d'image ?

Objectifs du TIPE du candidat

Je me propose de :

-déterminer la latence de traitement: quantification du temps de calcul entre la capture d'une image et l'extraction de l'information

- Traduction des informations visuelles en données numériques pour l'unité de contrôle
- Optimisation du programme pour un grand nombre d'image par seconde
- Répondre aux besoins en couple et autonomie du prototype
- Conception de la logique de décision finale

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] PARLEMENT EUROPÉEN : Règlement (UE) 2019/2144 relatif aux prescriptions applicables à la réception par type des véhicules, Journal Officiel de l'UE, 2019. : <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj?locale=fr>
- [2] THOMAS GILLESPIE : Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers (SAE), 1992. : <https://fr.scribd.com/document/748164810/Fundamentaln-of-Vehicle-Dynamics>
- [3] PATRICK PROUVOST : Automatique - Systèmes linéaires et continus, Dunod, 2017 : <https://fr.scribd.com/document/177392794/Automatique-Controle-et-Regulation>
- [4] JOHN MORTEN GODHAVN : Nonlinear tracking control of surface vessels and vehicles, PhD Thesis, NTNU, 1999 : <https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=02c27c810b&attid=0.1&permmsgid=msg-f:1856029041390402123&th=19c1f09458e23a4b&view=att&zw&disp=inline&sadbat=ANGjdJ87ZNt>
- [5] OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY : Impact of Speed Variability on Fuel Consumption : <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-energy-efficiency/personal-vehicles/fuel-efficient-driving-techniques>

Stabilisation d'un drone à partir d'un correcteur PID

Les drones occupent aujourd'hui une place centrale, que ce soit en agriculture, défense, loisirs ou logistique. C'est ce dernier domaine qui retient mon attention. La question de leur stabilisation est essentielle pour garantir des déplacements fiables et précis, indispensables aux applications modernes.

Pour répondre à ce problème, on étudie un système asservi utilisant un régulateur PID. Celui-ci repose sur une boucle de rétroaction, ce qui illustre directement le thème "cycle et boucle".

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *RIBBENS Aristide*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Quadrirotor</i>	<i>Quadrirotor</i>
<i>Rétroactivité</i>	<i>Retroactivity</i>
<i>Stabilisation</i>	<i>Stabilization</i>
<i>Régulateur PID</i>	<i>PID regulator</i>
<i>Filtrage</i>	<i>Filtering</i>

Bibliographie commentée

La stabilisation d'un drone quadrirotor constitue une problématique centrale de la robotique aérienne. En raison de son instabilité naturelle, le maintien d'une assiette stable nécessite une boucle d'asservissement. La compréhension du système commence par une modélisation physique. Ainsi la thèse de Bouabdallah [1] définit exactement les équations du mouvement d'un drone via le formalisme de Newton-Euler, en isolant les couplages gyroscopiques entre les axes de roulis, de tangage et de lacet. L'intérêt majeur réside dans la linéarisation du modèle

autour du point d'équilibre, étape préalable indispensable pour justifier l'emploi d'outils d'automatique linéaire classiques sur un système initialement non linéaire.

Une fois le modèle dynamique posé, la conception de la boucle d'asservissement s'appuie sur les fondements théoriques exposés par Ogata [2]. Ce manuel permet de structurer l'étude de la chaîne fonctionnelle en utilisant les fonctions de transfert et les schémas-blocs. Il offre les méthodes nécessaires pour analyser la stabilité du système en boucle fermée, notamment par l'étude des marges de phase et de gain passant par une analyse fréquentielle. La transition vers la mise en œuvre numérique est ensuite assurée par les travaux de MathWorks [3]. L'utilisation de l'environnement Simulink ou Python permet de confronter le modèle théorique à une simulation informatique intégrant les saturations des moteurs et la discrétisation du correcteur ainsi que l'entièreté du modèle physique. C'est un maillon essentiel pour évaluer la robustesse du régulateur face à des variations de paramètres avant toute phase d'expérimentation réelle.

La réalité des contraintes matérielles est abordée à travers le rapport de projet de l'ENSICA [4]. Ce document apporte un éclairage pragmatique sur la réalisation d'un prototype, notamment concernant le choix des fréquences d'échantillonnage et le traitement des vibrations mécaniques qui viennent parasiter les mesures. Ces nuisances imposent une réflexion sur la qualité de l'information traitée par le correcteur PID. À cet égard, le cours de D. Alazard [5] sur le filtre de Kalman est fondamental. Il traite de la fusion de données capteurs, expliquant comment l'association des mesures accélérométriques et gyroscopiques permet d'obtenir une estimation de l'assiette exempte de dérive et de bruit haute fréquence. Cette précision est la condition sine qua non pour que l'action dérivée du PID ne dégrade pas la stabilité du système.

L'analyse de la chaîne d'acquisition est complétée par les travaux de Benmouhoub et Deladji [6], qui se focalisent sur l'instrumentation et la stabilité globale. Leur étude permet de quantifier l'impact des retards de mesure et de la précision des capteurs IMU sur la performance du vol stationnaire. Enfin, l'article de Mohammad et Hao [7] offre une mise en perspective critique du correcteur PID. Bien que ce dernier soit particulièrement efficace pour les faibles perturbations, ses limites apparaissent lors de sollicitations extrêmes comme du vent ou face à des incertitudes de modèle importantes. L'évocation de commandes intelligentes (réseaux de neurones) souligne que le PID reste une solution de base robuste qu'il convient parfois de compléter pour garantir la sécurité et la stabilité des systèmes autonomes.

En somme, cet ensemble de références permet de couvrir la totalité de la chaîne de conception : de la mécanique du vol à la synthèse de la loi de commande, tout en intégrant les problématiques cruciales de traitement du signal et de validation numérique.

Problématique retenue

Comment stabiliser un drone à l'aide d'un correcteur PID ?

Objectifs du TIPE du candidat

Je me propose:

-d'étudier la stabilisation de l'axe de roulis / tangage dans des condition réelles ainsi que les filtres nécessaires à cette stabilisation

-d'étudier la stabilisation de l'axe de lacets dans des conditions réelles ainsi que les filtres nécessaires à cette stabilisation

-d'étudier un drone complet avec tous les axes libres tout en maintenant une altitude constante à l'aide de mes précédentes recherches

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] S. BOUABDALLAH : Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying : <https://infoscience.epfl.ch/server/api/core/bitstreams/3f219824-6427-4d0f-bbd9-fc0812358b2b/content>

[2] K. OGATA : Modern Control Engineering : <https://plcsitemiz.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/03/modern-control-engineering-kogata-3rd-edition.pdf>

[3] MATHWORKS : Quadcopter Project Example (Simulink) : <https://fr.mathworks.com/help/sps/ug/quadcopter-drone.html>

[4] FRENOT ALEXIS, GOSSMANN ANTHONY, GUILLERM ROMARIC : Stabilisation d'un quadrirotor : http://minijonas95.free.fr/quadrirotor/Rapports/Rapport_PIP_Quadrirotor.pdf

[5] D.ALAZARD : Introduction au ltre de Kalman : https://pagespro.isae-supaero.fr/IMG/pdf/introKalman_vf_2008.pdf

[6] BENMOUHOUB IHAB, DELADJI HOCINE : Etude de stabilité d'un drone quadrirotor : https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/11523/1/BENMOUHOUB_IHAB_F1_Electronique%20et%20T%C3%A9l%C3%A9communications_Instrumentation.pdf

[7] J.MOHAMMAD, X.HAO : Intelligent Control for Unmanned Aerial Systems with System Uncertainties and Disturbances Using Artificial Neural Network : <https://www.mdpi.com/2504-446X/2/3/30>

Recharge sans fil par couplage inductif

La recharge sans fil est devenue banale au quotidien, pourtant son efficacité s'effondre dès que le positionnement n'est plus idéal. Ce décalage entre la simplicité apparente du principe et la difficulté technique réelle a suscité ma curiosité.

J'ai donc choisi d'étudier la physique de ces boucles de courant pour comprendre comment garantir un cycle de charge complet et performant.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Electrique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Energétique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Induction magnétique</i>	<i>Magnetic induction</i>
<i>Recharge sans fil</i>	<i>Wireless charging</i>
<i>Rendement</i>	<i>Efficiency</i>
<i>Couplage inductif</i>	<i>Inductive coupling</i>
<i>Résonance</i>	<i>Resonance</i>

Bibliographie commentée

La transmission d'énergie sans fil par couplage magnétique repose sur l'étude des champs électromagnétiques en régime de champ proche. L'enjeu est de réussir un transfert d'énergie efficace et sûr, même lorsque le milieu de propagation n'est plus l'air mais un environnement plus complexe, comme des tissus vivants dans le cas d'implants médicaux.

L'article de Karalis, Joannopoulos et Soljačić [1] pose les bases de la résonance magnétique. Les auteurs démontrent que le couplage et la qualité des circuits sont les points clés pour réussir un transfert à distance. Ce travail permet de comprendre pourquoi la résonance est indispensable.

La thèse de Wei Wang [2] est mon appui principal pour la partie expérimentale. Elle analyse comment la position des bobines influence le rendement. C'est une référence essentielle pour

mon projet : elle permet de prévoir les pertes d'énergie lorsque l'alignement entre l'émetteur et le récepteur n'est pas parfait.

Le document du Wireless Power Consortium sur la norme Qi [3] apporte une vision concrète et industrielle. Il détaille les standards utilisés pour les chargeurs actuels, ce qui me donne une base de comparaison pour mes propres montages et pour comprendre les fréquences de travail optimales.

L'article de D. L. Chandler [4] illustre les résultats pratiques obtenus par des chercheurs du MIT. Il montre concrètement comment l'optimisation des circuits permet de stabiliser la puissance transmise, faisant ainsi le lien entre mes calculs théoriques et les applications réelles.

L'étude de Kim et al. [5] est cruciale car elle transpose ces principes au domaine médical. Elle étudie spécifiquement le transfert d'énergie vers des implants à travers des modèles de tissus humains. Ce document me permet d'analyser comment l'environnement biologique peut influencer le couplage et impose des contraintes de conception spécifiques à ce type de dispositifs.

Enfin, la thèse d'Achraf Hammoud [6] approfondit l'aspect modélisation et optimisation des circuits de transfert. Bien que son étude porte sur de fortes puissances, elle propose des outils analytiques précis pour gérer la compensation de l'énergie réactive. Ces concepts sont directement transposables à mon sujet pour améliorer le rendement global du système et assurer la stabilité de la tension délivrée à l'implant.

Problématique retenue

Comment les paramètres géométriques et électriques d'un système de recharge par induction influencent-ils le transfert de puissance, et dans quelle mesure l'utilisation d'un couplage inductif résonant permet-elle d'améliorer le rendement énergétique ?

Objectifs du TIPE du candidat

Je me propose :

- d'étudier théoriquement le transfert d'énergie par induction magnétique entre deux bobines, en modélisant le système comme deux circuits couplés, avec et sans résonance ;
- de mesurer expérimentalement l'impact de la fréquence, de la distance et du désalignement des bobines sur le rendement ;
- de confronter ces mesures à une simulation numérique réalisée en Python ;

– d’observer comment la présence d’un milieu perturbateur (type tissus biologiques) modifie l’efficacité du transfert.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] A. KARALIS, J. D. JOANNOPOULOS, M. SOLJAČIĆ : Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer, *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, 2008. : https://www.mit.edu/~soljacic/wireless-power_AoP.pdf
- [2] W. WANG : Étude de la transmission d’énergie sans fil basée sur la résonance magnétique, Thèse de doctorat, Département de génie électrique, École Polytechnique de Montréal, 2014. : https://publications.polymtl.ca/1496/1/2014_WeiWang.pdf
- [3] WIRELESS POWER CONSORTIUM : Qi Wireless Power Transfer System – Power Class 0 Specification, Parts 1 & 2, Spécification technique, Version 1.2.3, 2019. : <https://faculty-web.msoe.edu/johnsontimoj/EE4980/files4980/Qi-PC0-part1%262-v1.2.3a.pdf>
- [4] D. L. CHANDLER : Toward more efficient wireless power delivery, *MIT News*, 2010. : <https://news.mit.edu/2010/wireless-power-0409>
- [5] S. KIM, ET AL : Evaluation of Specific Absorption Rate in Three-Layered Tissue Model for Inductively Powered Biomedical Implants, *Applied Sciences*, 2019. : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/6/1125/pdf>
- [6] A. HAMMOUD : Charge par induction de véhicules électriques : analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts, Thèse de doctorat, Université Montpellier, 2017. : https://theses.hal.science/tel-01905247/file/HAMMOUD_2017_archivage.pdf

Asservissement d'un télescope.

En tant qu'astrophotographe amateur et passionné, je me suis demandé comment améliorer la qualité de mes photos. La question de motoriser la monture de mon télescope est vite apparue. Ainsi concevoir un système me permet alors de mieux comprendre comment cela fonctionne.

Le mouvement apparent des astres est un cycle régulier imposé par la rotation terrestre. La motorisation d'une monture équatoriale permet de rompre cette boucle visuelle en synchronisant son déplacement avec celui du ciel, assurant ainsi netteté et précision en astrophotographie.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Asservissement</i>	<i>Feedback loop</i>
<i>Traitement d'image</i>	<i>Image processing</i>
<i>Mouvement diurne</i>	<i>Diurnal motion</i>
<i>erreur de position</i>	<i>position error</i>
<i>suivi</i>	<i>tracking</i>

Bibliographie commentée

Au début de l'histoire de l'astronomie, les observations étaient renseignées sous forme de croquis et de dessins. Bien que précieux, ces relevés restaient subjectifs et dépendaient fortement de l'œil et de la main de l'observateur. Avec l'invention de la photographie au début du XIX^e siècle, l'idée de capturer la lumière céleste directement devint possible. En 1840, John William Draper obtint l'une des premières photographies de la lune mais cette dernière reste de piètre qualité [1]. La question d'améliorer et optimiser la qualité des photographies astronomiques est donc vite apparue.

Les photos astronomiques sont limitées par plusieurs facteurs, dont l'un des plus importants est le suivi du mouvement apparent des astres. En effet, dû à la rotation de la terre, le ciel semble tourner d'Est en Ouest au cours de la nuit : ce phénomène, appelé mouvement diurne ou mouvement apparent sidéral, fait que les étoiles décrivent des arcs circulaires autour du pôle céleste. Or pour améliorer la qualité d'une photo astronomique il faut pouvoir augmenter le temps de pose lors de la prise de photo afin de capter un maximum de lumière. Cette difficulté est donc particulièrement marquée lors des expositions longues, où l'absence de suivi précis peut entraîner des traînées sur les images [2].

C'est ici qu'intervient la monture équatoriale. Ces montures permettent de compenser la rotation de la terre en alignant un de leurs axes (l'axe d'ascension droite) avec celui de la terre afin que l'instrument (comme un télescope) reste pointé sur un astre spécifique du ciel en pivotant uniquement sur cet axe [3]. En ajoutant donc un moteur au niveau de cet axe qui fait un tour en un jour il est possible de suivre un astre pendant une durée plus longue tout en éliminant le phénomène de traîné. Dans le cadre de ce projet et afin de réduire les coups il est possible de motoriser une monture sois même en pilotant un moteur pas à pas adapté qui est piloté par un driver et une carte Arduino [4].

Or, comme tout système, une monture motorisée à ses limites et les différents engrenages et imprécision du moteur peuvent amener une erreur périodique qu'il faut étudier pour la corriger. En effet quand la durée du suivie se rallonge l'astre va se déplacer légèrement dans le champ de l'oculaire et la photo va perdre en qualité dû à l'apparition du phénomène de traîné. Pour cela il est possible d'ajouter une caméra au montage qui mesure en temps réelle le décalage et renvoie une consigne de correction, mais cette technique est assez couteuse et complexe à mettre en place. Une autre méthode consiste à corriger l'erreur périodique en l'estimant pour ensuite la corriger à chaque période. C'est pourquoi l'étude de l'erreur périodique de tout le montage est primordiale [5].

Enfin, afin d'affiner l'étude de la qualité des photographies, il est possible de comparer une photo faite sans la monture motorisée et une avec la motorisation avec un code python. Ce code permet de mesurer concrètement l'amélioration de la qualité des photos et rend donc ce jugement plus objectif. De plus, en faisant plusieurs tests avec des temps de pose de plus en plus long, ce code permet également d'estimer le temps de pose maximal idéal avant qu'il n'y ait une dégradation trop importante de l'image [6].

Problématique retenue

Comment la motorisation d'une monture équatoriale permet-elle de compenser le cycle apparent du mouvement des astres afin d'améliorer la netteté et la qualité des photographies astronomique ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Conception et étude d'un prototype de suivi motorisé pour l'astrophotographie
- Développement d'un algorithme de traitement d'image (Python) : extraire la position du centre optique d'un astre pour quantifier l'écart de suivi

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] WIKIPÉDIA : Astrophotographie : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Astrophotographie>
- [2] : Untracked Astrophotography : https://beltoforion.de/en/astrophotography/untracked_astrophotography.php
- [3] PHILIPPE GARCELON : Les montures : <https://pg-astro.fr/astronomie/materiel-et-pratique/les-montures.html>
- [4] STARGAZERSLOUNGE : My low-cost DIY RA drive for EQ5 mount : <https://stargazerslounge.com/topic/291849-my-low-cost-diy-ra-drive-for-eq5-mount>
- [5] REGGIE JONES : Mount Periodic Error Correction : <https://community.telescope.live/articles/astro-photography-tips/mount-periodic-error-correction-r8>
- [6] JAYANT KOCHHAR : Search Write Sign up Sign in How to Evaluate Image Quality in Python: A Comprehensive Guide : <https://medium.com/%40jaikochhar06/how-to-evaluate-image-quality-in-python-a-comprehensive-guide-e486a0aa1f60>

Stabilité dans la marche robotique

La marche des robots et leur utilité dans la vie quotidienne m'ont intriguée, c'est pourquoi essayer de comprendre leur fonctionnement et leurs défauts m'ont motivée à les étudier.

Un robot marcheur se déplace en répétant un cycle de pas, correspondant à un cycle mécanique (phase d'appui et phase de balancement). De plus, un robot marcheur a besoin d'une boucle de rétroaction permettant de corriger les écarts pour que le cycle de marche reste stable, afin d'éviter la chute.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)*
- *PHYSIQUE (Mécanique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Robot</i>	<i>Robot</i>
<i>Marche</i>	<i>Walk</i>
<i>Stabilité</i>	<i>Stability</i>
<i>Equilibre</i>	<i>Balance</i>
<i>Chute</i>	<i>Fall</i>

Bibliographie commentée

Il existe trois types de robots créés par l'être humain. Le premier type de machine qualifiée de robot correspond aux Automates, qui sont des machines programmées à l'avance et qui ont pour but d'effectuer des actions répétitives. Le second type de robot correspond à ceux équipés de capteurs (de température, photoélectrique, à ultrasons...). Ceux-ci sont capables de s'adapter à leur environnement en prenant en compte certains paramètres (dus à leurs capteurs) : ils sont donc plus autonomes, mais nécessitent un investissement en temps de conception et en argent plus conséquent que les automates. Le dernier type de robot correspond à ceux disposant d'une intelligence artificielle et reposant sur des modèles complexes de l'être humain, tels que les

réseaux de neurones. Ils possèdent aussi des capteurs, mais, dû à leur intelligence, ils peuvent prendre des décisions plus complexes et évoluer en fonction de leur apprentissage. Ce sont les robots se rapprochant le plus du modèle de l'être humain [1].

Les premiers robots sont très récents, puisque le premier de ceux que nous pouvons retrouver aujourd'hui dans les usines s'appelle Unimate et n'a commencé ses fonctions qu'au début des années 60 [2]. Le premier robot anthropomorphe (ayant l'apparence d'un être humain) s'appelle WABOT-1, est né en 1972 et est capable de marcher sur deux jambes, de percevoir son environnement à travers ses senseurs visuels et de transporter des objets dans ses mains [3].

Les principales motivations de création de robots (d'abord non marcheur) sont pour améliorer la productivité et la compétitivité, puisque ceux-ci ont une certaine autonomie de travail sur un temps donné et une longue durée de vie [4]. Les robots sont notamment utiles dans les tâches telles que la manipulation, l'assemblage et le contrôle des produits grâce à leur vitesse [4]. De plus, les personnes âgées et plus fragiles pourraient bénéficier de l'aide de ces robots (à domicile éventuellement) : ils pourraient s'occuper des tâches pénibles ou dangereuses [3] et subvenir aux besoins de ces personnes. Ce sont à ces robots que la marche bipède est utile. En effet, celle-ci permet au robot de se mouvoir sur une plus grande variété de terrains qu'un robot rouleur par exemple, puisqu'il est capable d'affronter les obstacles se présentant sur son chemin [1].

Cependant, la marche étant innée chez certaines espèces et presque chez l'être humain, ce n'est pas le cas pour les robots. En effet, la locomotion humaine est un problème compliqué qui demande le contrôle en temps réel de beaucoup de paramètres, tout en tenant compte du centre de gravité, de l'équilibre, des appuis, de la vision... [3]. Le fait de programmer les robots à l'avance (comme les automates) ne leur permet pas de modifier leur comportement en cas de transformation soudaine de l'environnement, contrairement aux êtres humains qui peuvent anticiper leur trajectoire [3]. C'est pourquoi le robot chute facilement lorsqu'il rencontre un obstacle (poussée, sol glissant).

Afin de comprendre la marche robotique, nous pouvons modéliser un pantin à l'aide du logiciel SolidWorks dans le but d'étudier la position du centre de gravité en fonction des angles engendrés par les différentes positions des bras et des jambes par rapport au tronc fixe. Ainsi, pour améliorer l'équilibre du robot, il faut s'assurer que le ZMP (Zero Moment Point) ne dépasse pas l'aire d'appui [5]. En effet, si ce point la dépasse, le robot tombe (contrairement aux êtres humains qui pourraient se rattraper en posant un pied en avant). En somme, la stratégie ici serait de déplacer légèrement le corps ou les bras pour contrer ce déséquilibre, et ainsi, éviter la chute du robot marcheur [6].

Problématique retenue

Comment améliorer la qualité des robots marcheurs bipèdes afin que leur marche soit presque équivalente à celle de l'être humain ?

Objectifs du TIPE du candidat

J'aimerais étudier et améliorer la stabilité dynamique. Pour cela, j'aimerais :

- modéliser un pantin grâce à SolidWorks dans le but de trouver le centre de masse ;
- développer une stratégie de loi de mouvement des autres membres pour stabiliser l'ensemble.

Puis, j'aimerais étudier et améliorer la vitesse atteignable par le robot lors de la marche. Pour cela, j'aimerais faire une simulation afin de :

- déterminer le compromis optimal entre vitesse de déplacement et stabilité ;
- analyser l'influence de la longueur et fréquence des pas.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] FRÉDÉRIC TATOUT : Des automates aux robots : une perspective historique :

<https://www.caia.net/revue-auteurs-rubriques-numeros/article/des-automates-aux-robots-une-perspective-historique/710>

[2] ASSOCIATION FOR ADVANCING AUTOMATION : Unimate - The First Industrial

Robot : *<https://www.automate.org/robotics/engelberger/joseph-engelberger-unimate>*

[3] EWEN DANTEC : Pourquoi les robots ont-ils tant de mal à marcher ? : *<https://www.numerama.com/tech/1337136-pourquoi-les-robots-ont-ils-tant-de-mal-a-marcher.html>*

[4] ROBAUT CONCEPTION : Les quatre avantages de la robotisation : *<https://www.robaut.fr/actualites/les-4-avantages-de-la-robotisation/>*

[5] TING WANG : Walking control of biped robots : *<https://theses.hal.science/tel-00789856/>*

[6] IMSYSTEMS : Advanced Actuator Strategies for Humanoid Robot Balance :

<https://imsystems.nl/advanced-actuator-strategies-for-humanoid-robot-balance/>

Le puits canadien : étude des transferts thermiques et d'un système de bypass automatisé

Je me suis intéressée au puits canadien car il offre une solution écologique au gaspillage énergétique. Ce système m'a particulièrement motivée par les phénomènes physiques qu'il met en jeu, notamment les transferts thermiques, que j'ai souhaité étudier et modéliser afin de mieux comprendre son fonctionnement et son efficacité énergétique.

Boucle circulation d'air : l'air extérieur circule dans le puits puis est rejeté à l'extérieur.

Cycle saisonnier : la température du sol varie périodiquement au cours de l'année.

Boucle de régulation : le bypass est commandé automatiquement selon les températures pour optimiser le fonctionnement du système.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *RENAUD Maxence*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Energétique)*

- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Puits canadien

Conduction thermique dans le sol

Echange thermique sol-air

Système de bypass

Economie d'énergie et coûts

Mots-clés (en anglais)

Canadian well

Thermal conduction in the ground

ground-air heat exchange

Bypass system

Energy and cost savings

Bibliographie commentée

Le renouvellement de l'air intérieur est indispensable dans une habitation afin de garantir une bonne qualité de l'air et limiter les problèmes d'humidité. Cependant, les systèmes de

ventilation classiques, tels que les aérateurs de fenêtres, introduisent directement l'air extérieur, souvent à une température très différente de celle de l'intérieur. En hiver, l'air froid entrant doit être chauffé, et en été, l'air chaud doit être refroidi, ce qui entraîne une surconsommation énergétique. Cette situation pose un enjeu central : comment renouveler l'air intérieur tout en limitant les écarts de température inutiles avec l'air extérieur, problème décrit par Herzog [1].

Une solution passive et efficace repose sur l'exploitation de la stabilité thermique du sol. À partir d'une profondeur de 2 à 3 mètres, la température du sol varie peu au fil des saisons et reste proche de la moyenne annuelle locale [1,3]. Cette stabilité est due à la conduction thermique : la densité et la capacité calorifique du sol amortissent les variations de température en surface, faisant du sol un réservoir naturel pour préchauffer l'air en hiver ou le rafraîchir en été [1].

Le puits canadien, ou puits provençal, exploite ce principe en utilisant un conduit enterré dans lequel circule l'air extérieur avant son introduction dans le bâtiment. L'air échange de la chaleur avec le sol, d'abord par conduction à travers les parois, puis par convection forcée avec l'air en mouvement [1]. Ce procédé permet de prétempérer l'air entrant, réduisant ainsi les besoins de chauffage ou de climatisation [2].

Afin d'avoir un rendement optimal, il est essentiel de bien dimensionner le puits canadien, bien que cette tâche soit assez délicate. En effet, l'efficacité du système dépend de plusieurs paramètres physiques : conductivité et humidité du sol, profondeur, longueur et diamètre du conduit, ainsi que vitesse de circulation de l'air, qui influencent le temps de contact air-sol et la température en sortie [2,3]. En ce sens la thèse de D. Amitrano [3] nous a particulièrement intéressée, puisque son travail est principalement basé sur des simulations numériques permettant de voir l'effet de ces paramètres sur le flux thermique fourni par le puits canadien. Cette approche théorique est complétée par l'étude de B. Mebarki et al. [2], qui analyse l'intégration d'un puits canadien dans un système de climatisation en zone aride (Béchar, Maroc). Les résultats montrent une réduction notable de la température de l'air insufflé et de la consommation énergétique, confirmant l'efficacité pratique du dispositif.

L'article de C. Mary et G. Cozian [4] propose une modélisation du puits canadien en s'intéressant au phénomène de conducto-convection, permettant de simuler l'évolution de la température de l'air dans le conduit. Cette modélisation a également permis d'estimer la puissance thermique économisée sur le chauffage par l'intermédiaire de la loi de Newton.

Enfin, dans un contexte pratique, il est important de considérer des dispositifs comme le bypass automatique, maintenant utilisé dans de nombreuses habitations modernes, puisqu'il permet de court-circuiter le conduit lorsque la température extérieure est proche de la température intérieure souhaitée. Ce mécanisme, étudié dans la documentation industrielle [5], permet d'éviter des échanges thermiques inutiles ou contre-productifs, illustrant comment la théorie et la modélisation peuvent être appliquées pour optimiser le rendement réel du système.

L'ensemble de ces documents montre que les performances d'un puits canadien reposent sur le couplage entre la conduction thermique du sol et la convection forcée de l'air dans le conduit. Ils mettent en évidence les problématiques centrales du TIPE : l'influence des propriétés du sol sur l'atténuation et le déphasage des variations de température, l'étude du transfert conducto-convectif de l'air, ainsi que les limites du système lorsque la température extérieure se rapproche de la température intérieure, notamment aux mi-saisons. L'intégration d'un bypass automatique apparaît alors comme un élément clé pour éviter des échanges thermiques inutiles et optimiser le rendement global du dispositif.

Problématique retenue

Comment la conduction thermique du sol et le couplage conduction-convection air-sol influencent-ils les performances d'un puits canadien et le déclenchement d'un by-pass ?

Objectifs du TIPE du candidat

Estimer numériquement le coefficient de diffusion thermique à partir de mesures expérimentales.

Étudier le phénomène de conduction thermique dans le sol à partir des données météorologiques de mon village.

Étudier le transfert conducto-convectif dans un conduit d'air enterré.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] B. HERZOG : Le puits canadien : *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin, Eyrolles édition, 2008.*

[2] B. MEBARKI, B. DRAOUI, S. ABDESSEMED, A. KEBOUCHA, S. DRICI ET A. SAHLI : Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar : *Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N°3 (2012) 465-478.*

[3] D. AMITRANO : Éléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit "puits canadien" : *Thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble, 2008.*

[4] C. MARY, G. COZIAN : Le puits canadien, une simulation qui ne manque pas d'air : *Forum des technologies 204, septembre-octobre 2016.*

[5] MYDATEC : Bypass automatique pour puits canadien : <https://www.mydatec.com/fr/bypass-automatique/>

DOT

- [1] : 04/06/2025 : Première expérience avec de la terre du lycée dans un calorimètre en aluminium. Trois thermocouples sont placés à différentes profondeurs. Une lampe de 500 W est utilisée. Constat : La sonde du bas chauffe plus vite que celle du milieu, suggérant une conduction parasite par les parois du calorimètre.
- [2] : 13/06/2025 : Pour limiter l'échauffement des parois, un carton percé est ajouté au-dessus du calorimètre. Constat : Malgré cette modification, la sonde du bas reste toujours plus chaude que celle du milieu, confirmant que le calorimètre n'est pas adapté.
- [3] : 18/06/2025 : Nous remplaçons le calorimètre par un tube en carton épais, moins conducteur. Constat : Les températures des sondes du milieu et du bas évoluent de manière similaire.
- [4] : 27/06/2025 : Utilisation d'une terre végétale plus homogène. Le tube est raccourci et un quatrième thermocouple est ajouté pour mieux suivre la conduction thermique. Les résultats deviennent cohérents et les courbes obtenues sont satisfaisantes.
- [5] : Sept-Novembre 2026 : Réalisation d'un script Python afin de résoudre l'équation 1D de la chaleur par discrétisation différence finis et recherche du coefficient de diffusion associé à notre expérience du 27/06/2025.
- [6] : Décembre 2026 : Discussion avec notre prof de SI qui possède un puits canadien. Prise de connaissance des dimensions et caractéristiques de son puits.
- [7] : Nov-janvier 2026 : Réalisation d'un deuxième script Python prenant en compte des données météorologique réelle ainsi que la solution sinusoïdale de l'équation 1D de la chaleur. A partir des caractéristiques de la terre choisi, j'ai étudié l'évolution de la température à différentes profondeurs.
- [8] : Janvier-avril 2026 : Réalisation d'un troisième script Python pour mettre en évidence les transferts conducto-convectifs à partir des paramètres de convection (débit volumique, diamètre et nature du tube). Étude de l'évolution de la puissance thermique fournie par le sol en fonction de la longueur du tube et suivant les paramètres de convection.

Optimisation des serres agricoles

L'énergie utilisée pour maintenir un climat stable dans les serres agricoles constitue aujourd'hui un enjeu majeur, car le chauffage et la ventilation représentent une part importante de leur consommation énergétique. L'adoption de solutions de régulation adaptées est donc à privilégier pour optimiser l'efficacité énergétique des serres agricoles.

Face aux enjeux environnementaux, la maîtrise des flux de chaleur et d'humidité est primordiale pour limiter la consommation énergétique des serres agricoles. Le thème « Cycles, Boucles » m'a inspiré à développer un système de régulation automatisé de l'humidité reposant sur une boucle de rétroaction et intégrant le couplage température-humidité.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Régulation climatique

Serre agricole

Commande automatique

Efficacité énergétique

*Couplage température-
humidité*

Mots-clés (en anglais)

Climate control

Agricultural greenhouse

Automatic control

Energy efficiency

Temperature-humidity coupling

Bibliographie commentée

Le secteur de l'énergie solaire constitue un domaine d'intérêt majeur dans la recherche sur les énergies renouvelables. La Terre reçoit chaque jour environ 173 000 térawatts de puissance solaire, une valeur largement supérieure à la puissance totale consommée par l'ensemble des activités humaines, estimée à environ 18 térawatts. Cette énergie peut être complétée par d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie thermique ou électrique, afin de pallier sa variabilité et d'assurer un fonctionnement plus stable des systèmes qui en dépendent. [1]

Une serre agricole est un dispositif utilisant une enveloppe transparente pour capter le rayonnement solaire et le transmettre vers l'air, le sol et les cultures qu'elle abrite. Cette transmission permet d'augmenter la température intérieure et de créer un microclimat favorable au développement des plantes, en exploitant l'énergie solaire disponible. La structure de la serre est généralement constituée de matériaux transparents, tels que le verre ou les polymères plastiques, qui laissent passer le rayonnement lumineux tout en limitant les échanges thermiques avec l'environnement extérieur. [2],[3]

Pour assurer un contrôle efficace du taux d'humidité à l'intérieur d'une serre agricole, plusieurs paramètres physiques étroitement liés doivent être pris en compte. Parmi ceux-ci figurent la température de l'air, l'humidité relative et la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau, directement dépendante de la température. Ces grandeurs conditionnent les échanges hygrométriques entre l'air, les cultures et l'environnement extérieur, et déterminent ainsi l'évolution du climat intérieur de la serre. [2],[4]

Cependant, plusieurs limitations peuvent affecter l'efficacité de la régulation du taux d'humidité dans une serre agricole. Les variations rapides de la température extérieure et du rayonnement solaire modifient les échanges thermiques et hygrométriques à l'intérieur de la structure, perturbant l'équilibre du climat intérieur. De plus, la ventilation nécessaire au renouvellement de l'air, ainsi que les infiltrations non contrôlées, entraînent des fluctuations du taux d'humidité difficiles à maîtriser, notamment en présence d'une forte évapotranspiration des cultures. [3],[4]

L'efficacité globale du climat intérieur d'une serre agricole est également régie par les lois fondamentales de la thermodynamique. Le premier principe impose que tout apport ou retrait d'énergie thermique modifie la température et l'humidité de l'air intérieur, bien que des pertes par conduction, convection et renouvellement d'air soient inévitables. Le deuxième principe fixe une limite théorique à la maîtrise de ces échanges en raison de l'irréversibilité des transferts thermiques et de matière avec l'environnement extérieur. Ces contraintes soulignent l'importance de réduire les pertes afin d'assurer un contrôle efficace du climat intérieur. Le choix des matériaux constituant l'enveloppe de la serre joue ainsi un rôle essentiel dans son efficacité. Les parois transparentes doivent présenter une bonne transmission du rayonnement solaire tout en limitant les pertes thermiques, tandis que les matériaux du sol et des structures internes influencent les échanges de chaleur et de vapeur d'eau avec l'air intérieur. [2]

Un premier moyen d'améliorer la régulation du taux d'humidité consiste à mettre en œuvre des boucles de régulation multivariables. Ces stratégies reposent sur des modèles dynamiques intégrant le couplage température-humidité et utilisent des régulateurs automatiques capables d'ajuster les actionneurs à partir de mesures en temps réel. Des travaux récents montrent que ces approches permettent d'améliorer significativement la stabilité du climat intérieur malgré les perturbations externes. [4],[5]

Bien que ces stratégies de régulation multivariables améliorent la maîtrise de l'humidité et la stabilité du climat intérieur, elles présentent certaines contraintes. La complexité des modèles dynamiques mis en œuvre, la sensibilité aux erreurs de mesure et la nécessité de choisir des

actionneurs adaptés peuvent limiter leur déploiement. De plus, certaines solutions reposent sur des dispositifs énergivores ou difficiles à intégrer dans des serres de petite taille. [5],[6]

Il est donc parfois préférable de mettre en œuvre une régulation plus simple et ciblée du taux d'humidité, reposant sur un nombre limité de capteurs et d'actionneurs. Une telle approche permet de prendre en compte le couplage physique entre la température et l'humidité tout en réduisant la complexité du système de commande.

Problématique retenue

Comment le couplage température–humidité, décrit par des bilans physiques, conditionne-t-il la conception d'une boucle de régulation efficace de l'humidité dans une serre agricole ?

Objectifs du TIPE du candidat

1. Étude théorique des bilans de chaleur et de vapeur d'eau dans une serre agricole, afin de caractériser l'évolution conjointe de la température et de l'humidité de l'air intérieur.
2. Étude théorique du couplage température–humidité à partir d'un modèle simplifié du climat intérieur, afin d'analyser l'influence des variations thermiques sur l'humidité relative.
3. Analyse de l'influence des paramètres de commande d'une boucle de régulation de l'humidité en temps réel sur la stabilité du climat intérieur face aux perturbations.
4. Optimisation de la régulation de l'humidité en exploitant le couplage température–humidité afin de réduire la consommation énergétique d'une humidité cible donnée.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] PETER FORBES : Mimic the dance between carbon, hydrogen and oxygen, and you can tap into clean solar energy and ease climate change : <https://aeon.co>
- [2] BENJAMIN MORILLE : Élaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques (2013) : <https://hal.science/tel-00958617v1>
- [3] REZKI NEBBALI : Simulation dynamique du climat radiatif et convectif distribué au sein d'une serre cultivée (2019) : <https://hal.science/hal-02300106v1>
- [4] ZHENFENG XU : Dynamic Mechanistic Modeling of Air Temperature and Humidity in Greenhouses with On-Off Actuators : <https://www.semanticscholar.org>
- [5] FRANCISCO GARCÍA-MAÑAS : A Practical Solution for Multivariable Control of Temperature and Humidity in Greenhouses : <https://repositorio.ual.es>

[6] FRANCISCO GARCÍA-MAÑAS : Multivariable control of nighttime temperature and humidity in greenhouses combining heating and dehumidification : <https://repositorio.ual.es>

Etude des super-condensateurs pour le stockage et la restitution d'énergie sur un vélo.

Les super-condensateurs pourraient être une solution prometteuse pour l'avenir des vélos électriques (VAE). En effet, leur durée de vie permet un avenir plus durable pour les VAE qui pour l'instant fonctionnent avec des batteries difficiles à recycler.

Le VAE assiste le cycliste lors de fortes sollicitations. Un apport énergétique est nécessaire dans les phases d'assistances. Il provient d'un élément de stockage. Il convient de restituer de l'énergie lors de phases génératrices. L'élément de stockage subit des boucles de charges et restitutions de l'énergie.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Théorique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Energétique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Electronique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

*Vélo à assistance électrique
(VAE)*

Supercondensateur

Stockage d'énergie

Rendement énergétique

Écologie

Mots-clés (en anglais)

e-Bike

Supercapacitor

Energy storage

Energy efficiency

Ecology

Bibliographie commentée

La conception du Pi-Pop, un vélo à assistance électrique innovant, suscite aujourd'hui un vif intérêt car il exploite un système énergétique inédit reposant sur une autonomie sans recharge externe, contrairement aux modèles conventionnels [3]. Ce modèle fonctionne

grâce à une machine électrique réversible et un module de 14 super-condensateurs, qui se substituent intégralement à la batterie lithium habituelle. Ainsi, au lieu d'une charge sur secteur, le vélo convertit l'énergie mécanique issue du pédalage et du freinage en énergie électrique stockée dans les supercondensateurs, permettant un cycle continu de transfert d'énergie [3].

L'utilisation des super-condensateurs pour les véhicules hybrides apparaît dans les années 1990. Il a déjà fait ses preuves pour la recharge des tramways et moins couramment pour les bus. Ainsi, l'utilisation de condensateur pour les vélos électriques peut être une solution envisageable.[4]

Dans ce TIPE, nous nous concentrerons sur l'étude de ces super-condensateurs, car ils constituent l'élément central de la chaîne énergétique du Pi-Pop. Un super-condensateur est composé de deux électrodes séparées par une membrane poreuse. Chaque électrode présente une structure en double couche électrique : une armature conductrice et une couche d'ions de signe opposé attirés à l'interface [2]. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, un champ électrique s'établit entre les électrodes, créant une double couche capable de stocker une quantité significative de charges. Ce mécanisme explique la rapidité de charge et de décharge des super-condensateurs, les rendant particulièrement adaptés aux applications nécessitant une puissance instantanée, comme les véhicules hybrides ou les systèmes de récupération d'énergie [2].

Dans un vélo hybride, les super-condensateurs assurent une assistance continue à l'utilisateur tout en maximisant le rendement global du système [1]. Nous nous appuierons principalement sur les caractéristiques du super-condensateur Eaton HS1020-3R8506-R, dimensionné pour des cycles de charge/décharge rapides [5]. Le moteur, fonctionnant en mode générateur lors des phases d'inertie ou de freinage, assure alors la recharge du super-condensateur. Ce dernier alimente ensuite à nouveau le moteur,

créant un cycle énergétique fermé inspiré du fonctionnement du Pi-Pop [3]. Mais ce cycle énergétique reste plus compliqué dans la réalité: il faut aussi placer sur le vélo des éléments d'électronique de puissance permettant de garder un circuit stable dans le vélo et maximiser l'énergie fournie aux composants tel qu'un hacheur.

Les super-condensateurs présentent de nombreux avantages : une puissance massique élevée, une recharge en quelques secondes et une durée de vie supportant plusieurs centaines de milliers de cycles sans dégradation significative. Cependant, leur principal inconvénient réside dans leur faible densité énergétique, environ dix à vingt fois inférieure à celle des batteries lithium. Cela implique une capacité à délivrer une forte puissance sur un court intervalle, sans pour autant stocker assez d'énergie pour garantir une autonomie de longue durée. Les travaux scientifiques montrent que les super-condensateurs sont particulièrement efficaces dans les systèmes où l'énergie est fréquemment récupérée, comme dans les architectures hybrides série. [1][2]

Cependant, la faible densité énergétique des super-condensateurs reste un frein par rapport au lithium. Des solutions hybrides, comme celles développées par Anod, couplent super-condensateurs et batteries pour augmenter drastiquement la durée de vie de ces dernières (jusqu'à 1600%). L'optimisation du système nécessite l'ajout d'électronique de puissance, tel qu'un hacheur, pour stabiliser le circuit.[6]

Problématique retenue

Bien que le VAE soit écologique, l'empreinte carbone de ses batteries reste élevée. Comment l'intégration de super-condensateurs peut-elle permettre de créer un système de stockage autonome, durable et capable de supporter des pics de puissance tout en maximisant le rendement global de la chaîne énergétique ?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif du travail est d'évaluer la faisabilité d'un système auto-régénératif basé sur des super-condensateurs. Notre montage à petite échelle comportera un actionneur électrique (MCC), alimenté par un super-condensateur, et relié à une source motrice extérieure simulant l'effort fourni par le cycliste. Nos expériences viseront à mesurer : l'autonomie du moteur alimenté par le super-condensateur, sa dynamique de recharge lors des phases génératrices et le rendement global du cycle énergétique. Cela nous permettra de cerner les limites pratiques d'un système auto-régénératif et son potentiel pour la mobilité douce, à l'image du Pi-Pop.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] TOURNON EDGAR : Conception optimale d'un vélo à architecture hybride série et à base de supercondensateurs : *Université Claude Bernard Lyon 1, 2020*
- [2] LAJNEF WALID : Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant : *Université Sciences et Technologies*
- [3] SITE OFFICIEL PI-POP : Technologie du vélo à assistance électrique sans batterie : <https://pi-pop.fr/>
- [4] GUALOUS HAMID, GALLAY ROLAND : Applications des supercondensateurs : *Techniques de l'Ingénieur, 10 août 2007*
- [5] EATON : Fiche technique super-condensateur: HS1020-3R8506-R : <https://www.eaton.com/>
- [6] SITE OFFICIEL ANOD : Hybridation batterie et supercondensateurs : <https://www.anod.com/>

Régulation de vitesse : influence de la latence de consigne sur la dynamique du véhicule

Etant passionné de mécanique automobile, il m'est paru intéressant d'étudier la mise en œuvre d'un régulateur de vitesse, système embarqué omniprésent dans la conception des véhicules modernes pour son enjeu sur la sécurité routière ainsi que sa contribution à l'écoconduite.

Cette étude analyse la substitution de la vigilance humaine par une boucle d'asservissement numérique, visant à stabiliser la vitesse du véhicule face aux instabilités provoquées par la latence du traitement d'image.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *CISSE Adama*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Traitement du Signal)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Asservissement</i>	<i>Control system</i>
<i>Contrôle de vitesse</i>	<i>Speed control</i>
<i>Automobile</i>	<i>Automobile</i>
<i>Traitement d'images</i>	<i>Image processing</i>
<i>Sécurité</i>	<i>Security</i>

Bibliographie commentée

L'histoire de la régulation de vitesse marque le passage d'un **cycle de vigilance** humain, sujet à fatigue et faillibilité, vers une **boucle de contrôle** automatisée. Si les premiers régulateurs mécaniques de Watt réagissent instantanément par force centrifuge, l'ère moderne impose des

défis numériques. Le cadre légal actuel rend désormais obligatoire les systèmes d'adaptation intelligente de la vitesse (ISA), exigeant une fiabilité absolue de la boucle de détection face aux aléas de la route[1].

La conception de cet asservissement nécessite d'abord une modélisation fine du système physique. Le véhicule ne peut être réduit à un point matériel ; l'ouvrage de référence de T. Gillespie permet d'établir les équations dynamiques longitudinales où les forces résistantes (aérodynamisme, frottements) agissent comme des perturbations constantes sur la **boucle de régulation** [2].

Sur le plan de la commande, la théorie classique de l'automatique linéaire démontre qu'un système asservi en vitesse ne peut être stable que si la **marge de phase** de la boucle ouverte est suffisante [3]. L'auteur insiste sur le réglage délicat du correcteur PID : l'action intégrale est nécessaire pour annuler l'erreur statique, mais elle risque d'engendrer des dépassements (overshoot) lors des phases transitoires d'accélération.

La complexité s'accroît avec l'introduction de l'intelligence artificielle. Contrairement aux capteurs classiques, la définition de la consigne via une caméra introduit une latence. Ce délai agit comme un "retard pur" dans la chaîne d'information. Comme l'affirme J.M. Godhavn dans sa thèse, ce retard dégrade la phase du système et peut provoquer l'apparition de **cycles limites** (oscillations entretenues) autour de la vitesse cible, rendant le véhicule inconfortable voire dangereux. Notre étude vise donc à quantifier ce retard critique pour garantir la stabilité de la boucle fermée. [4]

L'automatisation de la vitesse est également un atout pour réduire la consommation. En maintenant une allure stable, le régulateur évite les accélérations inutiles et permet au moteur de fonctionner plus efficacement. Des études montrent qu'une **vitesse instable** peut **augmenter la consommation** de carburant de **20 %** par rapport à une vitesse constante gérée par un asservissement. [5]

Ainsi, la précision du contrôle de vitesse permet non seulement d'améliorer la sécurité, mais aussi de limiter les pertes d'énergie et les émissions polluantes.

Problématique retenue

Comment concevoir une boucle de régulation de vitesse et paramétrer son correcteur pour garantir le meilleur compromis entre réactivité et stabilité face aux retards imposés par le traitement d'image?

Objectifs du TIPE du candidat

Développer des algorithmes pour l'identification en temps réel des panneaux de limitation de vitesse et des obstacles (détection par Deep Learning)

Calculer la distance de l'obstacle (véhicule en face) en mesurant sa taille à l'écran de par des relations géométriques.

Établir le modèle mathématique des moteurs à courant continu et identifier expérimentalement leur réponse transitoire.

Implémenter le contrôle de vitesse par modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour ajuster la tension moyenne aux bornes des moteurs.

Développer un régulateur PID pour maintenir une distance de sécurité constante en ajustant automatiquement la vitesse du véhicule.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] PARLEMENT EUROPÉEN : Règlement (UE) 2019/2144 relatif aux prescriptions applicables à la réception par type des véhicules, Journal Officiel de l'UE, 2019. : <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj?locale=fr>
- [2] THOMAS GILLESPIE : Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers (SAE), 1992. : <https://fr.scribd.com/document/748164810/Fundamentaln-of-Vehicle-Dynamics>
- [3] PATRICK PROUVOST : Automatique - Systèmes linéaires et continus, Dunod, 2017. : <https://fr.scribd.com/document/177392794/Automatique-Controle-et-Regulation>
- [4] JOHN-MORTEN GODHAVN : Nonlinear Tracking of Underactuated Surface Vessels : https://www.academia.edu/29256777/Nonlinear_tracking_of_underactuated_surface_vessels
- [5] NRCAN : "Impact of Speed Variability on Fuel Consumption", Office of Energy Efficiency, Canada, 2024 : <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-energy-efficiency/personal-vehicles/fuel-efficient-driving-techniques>

Rendement cyclique de la main dans la propulsion en crawl

La natation occupant une place centrale dans mon parcours, l'analyse du rendement cyclique de la main en crawl permet d'approfondir la compréhension des mécanismes de la nage. Ce travail fait également écho à un projet d'intégrer une école d'officiers et d'améliorer les performances lors des épreuves sportives.

Mon étude s'inscrit dans le thème de l'année "cycles, boucles" car l'objectif est d'étudier le mouvement cyclique qu'effectue la main lors de la nage en crawl.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *LE CONG Elisa*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Traitement du Signal)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

crawl

crawl

main

hand

rendement

yield

modélisation

modelling

mouvement

movement

Bibliographie commentée

Le sport de haut niveau se joue souvent sur des détails infimes, parfois imperceptibles, mais qui font toute la différence. Aux Jeux Olympiques de 2024, Florent Manaudou a ainsi décroché la médaille de bronze du 50 mètres nage libre avec seulement 0,02 seconde d'avance sur le Canadien Joshua Liendo, un écart minime représentant à peine 0,09 % du temps total. Cette marge rappelle à quel point la moindre amélioration technique peut transformer une course :

passer de la 4^e place au podium, ou encore convertir une médaille d'argent en une médaille d'or. [1] C'est pourquoi la modélisation d'un bon positionnement du corps en crawl permet de définir des solutions optimales et d'accroître l'efficacité du mouvement.

À ce jour, le crawl ne dispose pas d'une définition officielle, contrairement à la brasse, au papillon ou au dos. Il s'agit d'une technique qui s'est progressivement développée au fil du temps, façonnée par les nageurs eux-mêmes.

On peut toutefois proposer la définition suivante : le crawl est une nage ventrale en surface, caractérisée par des mouvements alternés des bras et des jambes, la tête étant majoritairement immergée. L'inspiration s'effectue sur le côté, tandis que l'expiration se fait dans l'eau. La fréquence et l'amplitude des mouvements de bras — deux facteurs dont le produit détermine la vitesse de nage — varient selon la distance parcourue : plus la distance augmente, plus la fréquence diminue et l'amplitude des mouvements s'accroît. [2]

De nombreuses recherches, inspirées de la morphologie animale, se sont penchées sur les mécanismes de propulsion. Certaines ont montré qu'une surface de poussée plus grande, comparable à une pagaie élargie, améliorerait la performance. Mais cette idée est contestée : une surface plus importante exige aussi une force accrue sur l'eau, ce qui ne rime pas toujours avec efficacité. [3] Le véritable enjeu réside donc dans le compromis entre surface de propulsion et effort à fournir.

Sur ce point, l'exemple de la main est révélateur. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, garder les doigts parfaitement serrés — comme une cuillère — ne donne pas la surface la plus efficace. Au contraire, les études montrent qu'écarter légèrement les doigts, de 3 à 8 mm selon leur épaisseur, permettrait d'augmenter de près de 53 % la force exercée par le nageur. Ce gain s'explique par la formation d'une fine membrane d'eau invisible entre les doigts, qui agit comme un « bouclier » et empêche l'eau de s'échapper. [4] Un ajustement discret, mais suffisant pour faire basculer une course lorsque tout se joue au centième de seconde.

Dans le cas d'un sport comme la course, où l'athlète exerce une poussée contre un corps solide, la piste par exemple, le calcul de la force s'obtient facilement à l'aide de la troisième loi de Newton (ou principe des actions réciproques). Cependant, en milieu aquatique, il est plus difficile de réaliser ce calcul. En effet, la propulsion du nageur peut être assimilée à une hélice qui est un mécanisme qui dépend essentiellement de la vitesse de progression. Donc il n'est pas envisageable d'appliquer cette loi.

Il existe déjà de nombreux systèmes permettant de mesurer la force qu'un nageur exerce sur l'eau pour engendrer la poussée qui le fait avancer. L'un des plus reconnus et ingénieux est le système MAD (Measurement of Active Drag). Son principe de fonctionnement repose sur des palettes, posées sur la main du nageur, qui ont un rôle de capteur dans la mesure. Elles mesurent une différence de pression entre la paume et le dos de la main. Ensuite, ces données

sont analysées grâce à des logiciels adaptés, et permettent de déterminer des variables comme l'efficacité de la propulsion. [5] Dans notre étude, nous reprendrons le modèle de l'hélice pour des raisons techniques.

Problématique retenue

Comment l'angle d'attaque et la surface de la main influencent-ils l'efficacité propulsive sur un cycle complet ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Comprendre et analyser la décomposition de la main du nageur durant un cycle de crawl.
- Modéliser une main humaine.
- Etudier expérimentalement l'impact de la surface de la main lors de la nage.
- En déduire la meilleure surface de main pour optimiser le mouvement cyclique de la nage.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] CHARLIE PRÉTOT : Étude physique des courses de natation : <https://pastel.hal.science/tel-04010340v1/file/TH2022ENPC0033.pdf>
- [2] MATHIAS SAMSON : Étude expérimentale et numérique, en écoulement instationnaire, du trajet des bras en crawl à différentes allures de nage : <https://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/d8c68dee-7131-44e1-9ee4-8f08b46e63bf>
- [3] S. LORENTE, E. CETKIN, T. BELLO-OCHEDE, J. P. MEYER AND A. BEJAN : The constructal-law physics of why swimmers must spread their fingers and toes. : <https://repository.up.ac.za/server/api/core/bitstreams/4121a4c5-6b56-428b-a783-96b1f2a7d993/content>
- [4] CAMILLE LEUREGANS ET THOMAS ROUTIER : Optimisation technique de nage. : <https://moncoachdenatation.fr/mains-en-crawl/>
- [5] NUNZIO LANOTTE ET SOPHIE LEM : Sportifs high tech : *Edition Belin (2012)*. ISBN : 2701159660

Étude et réalisation d'un dispositif de pointage automatique : application au suivi de trajectoire d'un ballon de Rugby.

J'ai fait du rugby pendant 10 ans et c'est pas évident de saisir toute l'action quand le jeu s'accélère. Etant passionné par ce sport, j'ai eu envie de mettre à profit mes connaissances en ingénierie pour concevoir un système de suivi automatique, capable de faciliter l'analyse technique en vidéo.

Cette étude est centrée sur la réalisation d'une boucle de contrôle de position. Le système est conçu sur la base du cycle de traitement de l'information pour rectifier en temps réel l'écart entre la position de la balle et l'axe optique.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *PHYSIQUE (Physique Théorique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

ballon de rugby

Traitement d'images

Asservissement de position

triangulation radio

Analyse de trajectoire

sportive

Mots-clés (en anglais)

rugby ball

Image processing

Position control

radio triangulation

Sports trajectory analysis

Bibliographie commentée

Garder une caméra pointée automatiquement sur un ballon de rugby en plein mouvement constitue un défi technologique où la précision de la mesure et la rapidité de la réponse sont cruciales. L'analyse de la littérature scientifique et technique met en évidence la nécessité de coupler plusieurs capteurs pour garantir la robustesse du système, tout en soulignant l'importance centrale des boucles de rétroaction.

L'approche par vision artificielle, détaillée par Mace Robotics [1], constitue la première partie de l'acquisition. Ce document technique explicite la transition de l'espace colorimétrique RGB vers l'espace HSV (Teinte, Saturation, Valeur) pour isoler une cible. Cette méthode permet de s'affranchir partiellement des variations de luminosité, un point critique sur un terrain de sport. Cependant, l'analyse des travaux de Lefèvre [2] montre que le suivi mono-capteur par vision est intrinsèquement limité par les occultations (joueurs passant devant le ballon) et le bruit de mesure. Cela justifie la nécessité d'une "fusion d'informations" : l'étude de Lefèvre souligne que combiner plusieurs sources permet de réduire l'incertitude globale du système.

Pour pallier les failles de l'optique, la localisation radiofréquence (RF) est introduite. Le document de MokoSmart [3] explicite l'usage de l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI) pour l'estimation de distance. Bien que le RSSI soit sujet à des fluctuations dues aux réflexions (trajets multiples), il offre une donnée de position même sans contact visuel. Pour définir la position spatiale du ballon, le principe de la triangulation est fondamental. Comme l'explique l'article de Futura-Sciences [4], cette méthode géométrique permet de déterminer les coordonnées d'un point en mesurant sa distance par rapport à plusieurs points de référence connus. Cette ressource vulgarise le concept d'intersection de cercles. Pour la localisation par ondes radio, je me suis appuyé sur le site de Thuzhen [5] qui détaille le principe de la trilatération par les distances. Contrairement à la triangulation classique qui repose sur des mesures d'angles, cette méthode utilise la mesure du temps de parcours (ou de la puissance du signal RSSI) pour définir des rayons autour de récepteurs fixes. Le document démontre que l'intersection de trois cercles permet de déterminer de manière unique la position du ballon dans un plan. Cette ressource m'a permis de poser les bases géométriques de mon algorithme de calcul de position, tout en identifiant les sources d'erreurs potentielles liées à la précision des mesures de distance. L'intégration de cette méthode radio crée une redondance avec la vision, renforçant la fiabilité de la détection en temps réel.

Le cœur de la démarche réside toutefois dans l'exploitation de ces données pour commander un actionneur. C'est ici que s'inscrit l'ancrage majeur au thème de l'année. Le document de Garnier [6] sur les correcteurs automatiques est fondamental pour concevoir la boucle d'asservissement. Il permet de modéliser le comportement de la tourelle motorisée et de synthétiser un correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé). L'objectif est de minimiser l'écart entre l'axe optique de la caméra et la position estimée du ballon. La "boucle" devient ici l'objet d'étude principal : il s'agit de garantir la stabilité du système et de limiter le temps de réponse pour que le ballon reste au centre de l'image malgré ses accélérations brusques.

Enfin, bien que plus complexe, la thèse de Bosse [7] apporte un éclairage sur les méthodes probabilistes de filtrage et de suivi de cibles mobiles. Elle permet d'anticiper les difficultés liées à la synchronisation des données provenant de capteurs aux fréquences d'échantillonnage différentes (caméra vs balise radio).

En synthèse, cette bibliographie démontre que la réalisation d'une caméra suiveuse n'est pas seulement un défi de détection, mais surtout un problème de boucles de contrôle. La fusion de

la triangulation radio et de la détection visuelle alimente une boucle de rétroaction dont la performance définit la qualité du suivi cinématographique.

Problématique retenue

Comment concevoir un système de suivi capable de garder un ballon de rugby au centre de l'image, en combinant la détection visuelle et la localisation radio pour garantir la continuité du suivi malgré les obstacles ?

Objectifs du TIPE du candidat

Mon objectif principal dans ce projet est de concevoir et d'asservir une tourelle motorisée capable de maintenir un ballon de rugby au centre du champ visuel d'une caméra en mouvement. Je vais d'abord modéliser la chaîne d'information du support pour établir sa fonction de transfert. Je dois ensuite développer un algorithme de détection colorimétrique ainsi qu'un programme de calcul de position par trilatération radio. Enfin, j'implémenterai une boucle d'asservissement avec un correcteur PID pour assurer la stabilité du suivi et je comparerai la précision du système avec la fusion des deux capteurs

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] MACEROBOTICS : tracking d'une balle colorée : <https://fr.macerobotics.com/developpeur/partie-1-tracking-dune-balle-coloree/>
- [2] LEFÈVRE : Fusion d'Informations pour la Classification Multi-capteurs, Multi-cibles : <https://www.lgi2a.univ-artois.fr/~lefevre/LFA%272013%20Tracking.pdf>
- [3] MOKOSMART : Le rôle du Bluetooth RSSI dans le positionnement en intérieur : <https://www.mokosmart.com/fr/the-role-of-bluetooth-rssi-in-indoor-positioning/>
- [4] FUTURA-SCIENCES : Triangulation : qu'est-ce que c'est ? : <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-triangulation-10954/>
- [5] THOMAS, ADRIEN ET BRENDAN : Se repérer dans l'espace : <https://thuzhen.wordpress.com/2013/01/23/triangulation-par-les-distances/#:~:text=La%20trilat%C3%A9ration%20consiste%20%C3%A0%20utiliser,Expliquons%20ceci.&text=Or%20c'est%20un%20all%C3%A9,point%20inconnu%20et%20l'%C3%A9metteur>
- [6] HUGUES GARNIER : Correcteurs standards et leurs réglages : <http://w3.cran.univ-lorraine.fr/perso/hugues.garnier/Enseignement/Auto/F-Auto-Correcteurs.pdf>
- [7] JONATHAN BOSSE : Géolocalisation de sources radio-électriques : stratégies, algorithmes et performances : <https://theses.hal.science/tel-00700670v1/file/Bosse2012.pdf>

Zéro contact, zéro effort : vers une automatisation complète de la recharge des véhicules électriques.

Les progrès des batteries rendent les véhicules électriques compétitifs, cependant les bornes de recharge restent encombrantes et peu esthétiques. La recharge par induction, grâce à une infrastructure quasi invisible et performante, offre une alternative intéressante. C'est pourquoi ce système sera étudié en vue de faciliter la recharge des véhicules électriques.

Un système de recharge autonome par induction pour véhicule électrique permet d'assurer un cycle de recharge complet tout en limitant les contraintes des bornes classiques grâce à un asservissement en position, s'inscrivant ainsi pleinement dans le thème des cycles et des boucles.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Induction</i>	<i>Induction</i>
<i>Automatisation</i>	<i>Automation</i>
<i>Modélisation</i>	<i>Modelling</i>
<i>Conception</i>	<i>Conception</i>
<i>Rendement Énergétique</i>	<i>Energy Efficiency</i>

Bibliographie commentée

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de réduction des émissions de CO₂, le véhicule électrique s'impose comme une solution efficace, émettant trois fois moins de polluants que les véhicules thermiques [1]. Toutefois, son adoption est conditionnée par le développement d'infrastructures de recharge sûres, fiables et ergonomiques. Parmi les solutions étudiées, le transfert d'énergie sans fil par induction électromagnétique se distingue largement. Ce concept, issu des travaux de Nikola Tesla, repose sur le couplage magnétique entre deux circuits : une bobine primaire enterrée génère un flux magnétique variable, lequel induit une force électromotrice dans une bobine secondaire placée sous le châssis qui alimente ensuite la batterie.

Il existe 2 types de recharge, la recharge à l'arrêt, ou « statique » et la recharge en mouvement dites "dynamique". En mai 2018, BMW a intégré un système proposant une puissance de 3,2 kW avec un rendement d'environ 85 % en statique, ce qui permet une charge complète durant la nuit [2]. Dans un même temps, la société Evatran a développé le système Plugless Power, capable de transférer jusqu'à 7,2 kW sur un entrefer de 10 cm, pouvant s'adapter à plusieurs modèles tels que Tesla ou BMW [3]. Cependant le positionnement du véhicule peut avoir un impact important sur l'efficacité de transfert de charge et s'avère être un obstacle pour l'utilisateur. Porsche au travers de son dernier modèle a ainsi identifié que la nécessité pour le conducteur de se garer avec une certaine précision reste une contrainte forte [4].

Sur le plan théorique, cette problématique est liée à l'évolution de l'inductance mutuelle M et du coefficient de couplage k en fonction du désalignement des bobines. L'existence d'un entrefer important (jusqu'à 30 cm) augmente les flux de fuite, faisant chuter la valeur du coefficient de couplage. Les études montrent que pour compenser ces pertes, l'utilisation du couplage inductif par résonance est indispensable [5]. En accordant les circuits via des capacités telles que leur fréquence propre soit les mêmes on peut alors maximiser le facteur de qualité Q du système.

Le second mode de recharge, dit « dynamique », permet un transfert d'énergie pendant que le véhicule est en mouvement. Vinci a récemment déployé sur une section de 1500m des segments inductifs, visant à évaluer les performances du transfert d'énergie sans fil en conditions de circulation réelles [6]. Ce prototype a permis de valider l'absorption d'une puissance de 20 kW par le véhicule à des vitesses atteignant 100 km/h, confirmant ainsi la viabilité de la recharge dynamique pour réduire la masse critique des batteries embarquées. Une autre application intéressante est pour les véhicules de transport, le bus OLEV développé par le KAIST en Corée du Sud utilise des segments inductifs répartis sur le trajet, permettant de réduire la capacité de la batterie embarquée d'un facteur 3 à 5. Ce gain de masse significatif améliore les performances énergétiques du bus, toutefois le coût de déploiement de telles infrastructures demeure un frein majeur.[7]

Plus récemment, des recherches de l'Université de Chalmers en Suède ont permis de franchir un cap en atteignant 98% d'efficacité pour une puissance supérieur a 150 kW [8]. Ce niveau de performance, qui est comparable aux meilleures solutions filaires, repose sur une optimisation poussée des onduleurs haute fréquence et de la géométrie des bobines.

Enfin, la viabilité de ces systèmes est conditionnée par le respect de contraintes de sécurité électromagnétique. En effet, le transfert de fortes puissances génère des flux de fuite importants qu'il est nécessaire de confiner pour limiter l'exposition du public. Ainsi, la norme SAE J2954 fixe une limite d'induction magnétique de 27 μT pour les fréquences comprises entre 3 kHz et 10 MHz [9]. Ces seuils imposent une utilisation de blindage, notamment via l'utilisation de matériaux ferromagnétiques à haute perméabilité destinés à canaliser les lignes de champ.

Problématique retenue

Comment garantir un rendement de charge optimal sans intervention humaine via un système de positionnement automatisé ?

Objectifs du TIPE du candidat

- 1) Comprendre le phénomène de charge par induction statique
- 2) Expérimenter et modéliser le phénomène d'induction pour valider le modèle et en voir les limites
- 3) Réaliser un système permettant la charge automatique sur une place de parking

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] CHRISTOPHE MAGDELAINE : Voiture électrique contre voiture essence ou Diesel, quelle est la plus polluante ? : [https://www.notre-planete.info/actualites/1802-comparatif-voiture-electrique-essence-diesel-pollution#:text=Une%20berline%20%C3%A9lectrique%20%C3%A9met%20en.CO2%E2%80%93eq.\).%22](https://www.notre-planete.info/actualites/1802-comparatif-voiture-electrique-essence-diesel-pollution#:text=Une%20berline%20%C3%A9lectrique%20%C3%A9met%20en.CO2%E2%80%93eq.).%22)

[2] MATHIEU DEMEULE : BMW : une recharge par induction : <https://www.autoplus.fr/bmw/serie-5/bmw-une-recharge-par-induction-pour-la=530e-345012.html>

[3] PLUGLESS POWER INC. : Introducing the 2nd Generation Plugless System : <https://pluglesspower.com/learn/2nd-generation-plugless/>

[4] ROMAIN HEUILLARD : On a testé la recharge sans fil de porsche : https://www.frandroid.com/marques/porsche/2815847_on-a-teste-la-recharge-sans-fil-de-porsche-tesla-se-fait-encore-depasser-par-un-concurrent

[5] LUC LASNE : Etude des bobines couplées et transmission d'énergie à distance sous conditions de résonance : https://forums.futura-sciences.com/attachments/electronique/175253d1331241177-difference-entre-induction-resonance-magnetique-bobines_couplees_et_transmission_a_distance.pdf

[6] VINCI AUTOROUTES / EUROVIA : Communiqué de presse sur l'expérimentation de la route électrique (Projet A10), 2023-2024 : <https://www.vinci-autoroutes.com/fr/actualites/environnement/charge-you-drive-une-premiere-mondiale-sur-le-reseau-vinci-autoroutes-pour/>

[7] KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY : Online Electric Vehicle (OLEV) Introduced as Part of Smart Roads : https://www.kaist.ac.kr/newsen/html/news/?mode=V&mng_no=3984&skew=keyword&sval=%4f%6e%6c%69%6e%65%20%45%6c%65%63%74%72%69%63%20%56%65%68%69%63%6c%65&list_s_date=&list_e_date=&GotoPage=1

[8] YUJING LIU : New technology makes wireless charging of electric vehicles and ferries attractive : <https://www.chalmers.se/en/current/news/e2-new-technology-makes-wireless-charging-of-electric-vehicles-and-ferries-attractive/>

[9] ACHRAF HAMMOUD : : Charge par induction de véhicules électriques : Analyse du potentiel, limitations, nouveaux concepts : https://theses.hal.science/tel-01905247/file/HAMMOUD_2017_archivage.pdf

Transmission de l'information par laser

Captivées par les défis technologiques du spatial, nous avons choisi d'explorer la transmission laser. Face aux enjeux de sécurité actuels, ce sujet s'est imposé par sa modernité. Il nous offre l'opportunité d'analyser concrètement les boucles de rétroaction appliquées à une communication sécurisée de pointe.

Le contrôle du système repose sur une boucle de retour garantissant la précision du pointage lors de la phase de transmission. Cette étude s'attachera également à analyser le cycle de transmission de l'information et sa robustesse.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- ADDE Manon

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)

- SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)

- INFORMATIQUE (Informatique pratique)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Communication optique *Optical communication*

Laser *Laser*

Pointage *Pointing*

Asservissement *Control system*

Tourelle *Turret*

Bibliographie commentée

La transmission d'informations par réseau laser est une alternative prometteuse aux communications radio traditionnelles pour les satellites et stations au sol [1][2]. Elle permet d'atteindre des débits supérieurs (jusqu'à 1 Tb/s) [3], avec une consommation réduite [3] et une sécurité accrue[1], car le faisceau optique est beaucoup plus difficile à intercepter [3]. Cependant, ce type de communication impose des contraintes sévères sur le pointage : l'angle d'

ouverture d'un faisceau laser est extrêmement faible, ce qui exige une précision de l'ordre de la micro-radian [2] pour maintenir une liaison stable entre un satellite en mouvement et un récepteur terrestre.

Les recherches existantes montrent que cette précision de visée se heurte à deux limites principales :

- Les mouvements relatifs : le satellite se déplace à environ 7 km/s [4] en orbite basse, ce qui nécessite un suivi dynamique et un repositionnement en temps réel.
- Les perturbations atmosphériques [5] : la turbulence, la réfraction et la transparence variable de l'atmosphère peuvent interrompre le lien laser pendant une partie significative de l'année.

Pour résoudre ce problème, les systèmes actuels combinent plusieurs étages de contrôle : d'abord un suivi grossier par des systèmes mécaniques (ex. tourelle motorisée sur deux axes), puis un affinage par des miroirs [6]. La tourelle assure donc la première étape indispensable de capture et de maintien du faisceau.

Afin d'optimiser la précision de l'asservissement, il est primordial de déterminer avec rigueur les coordonnées de la cible. Cette localisation peut s'effectuer selon plusieurs méthodes :

- Approche par modélisation photométrique : Un modèle mathématique simplifié permet d'établir une loi de correspondance entre la puissance incidente reçue par la photodiode et l'écart angulaire de la tourelle. La diminution du flux lumineux en fonction du dépointage permet de générer un signal d'erreur. L'asservissement vise alors à annuler cet écart à partir des mesures de tension délivrées par les capteurs.
- Approche par mesure du temps de vol (Trilatération) : La mesure de la durée de propagation d'un signal radioélectrique entre un émetteur satellitaire et un récepteur permet d'évaluer la distance les séparant. Par l'exploitation des données issues de trois récepteurs distincts, la position de l'émetteur est déterminée de manière univoque par trilatération [7].

Au-delà de l'aspect mécanique du pointage, l'étude se focalise également sur la chaîne de transmission de l'information entre la Terre et un satellite. Pour garantir la fiabilité de la transmission, un protocole de vérification en boucle fermée est implémenté. Le processus suit une séquence cyclique : émission (modulation du laser), propagation (canal atmosphérique), réception (photodiode et numérisation), traitement, puis une étape de décision. Le dispositif d'émission valide la faisabilité d'une liaison optique Terre-satellite. L'utilisation d'un laser modulable et d'une détection par photodiode permet de s'affranchir des limitations de débit des radiofréquences traditionnelles.

Afin de vérifier la qualité de la transmission, un algorithme de somme de contrôle [8] est intégré dans le flux de données. Ce mécanisme permet de détecter les erreurs dues aux perturbations du

canal (atténuation atmosphérique, turbulence, bruit optique) [5]. Si la somme de contrôle effectuée à la réception diffère de celle émise, le cycle de décision invalide le paquet de données et génère une requête de retransmission.

Problématique retenue

Comment concevoir et caractériser un système de communication laser sol-satellite conciliant stabilité du pointage optique par tourelle 2 axes et fidélité de la transmission des données par modulation et analyse du signal, tout en tenant compte des contraintes de précision et des perturbations externes ?

Objectifs du TIPE du candidat

Mon objectif est d'étudier et de modéliser un système de pointage par tourelle 2 axes destiné à maintenir un faisceau laser aligné avec un récepteur. Je chercherai à :

- Etablir un cahier des charges.
- Caractériser la précision angulaire nécessaire pour assurer la communication.
- Localiser le satellite.
- Concevoir et expérimenter l'asservissement du pointage.
- Analyser l'impact des erreurs (vibrations, bruit, désalignement, le manque de précision des objets de mesure).
- Proposer des solutions pour améliorer la fiabilité du suivi.

Cette contribution complète celle de ma camarade, qui se concentre sur la modulation et l'analyse du signal transmis.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] TNO : Laser satellite communication : <https://www.tno.nl/en/digital/space/laser-satellite-communication/>

[2] AEROTECNICA MISSILI & SPAZIO : Evaluation of Satellite's Point-Ahead Angle Derived from TLE for Laser Communication : <https://link.springer.com/article/10.1007/s42496-022-00106-9>

[3] IPLOOK : Satellite laser communication : <https://fr.iplook.com/info/satellite-laser-communications-i00347i1.html>

- [4] WIKIPEDIA : Graves (disambiguation) : [https://fr.wikipedia.org/wiki/GRAVES_\(syst%C3%A8me\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/GRAVES_(syst%C3%A8me))
- [5] CAILABS : Impact des turbulences atmosphériques : <https://www.cailabs.com/fr/blog/aerospatial-et-defense/comment-les-turbulences-atmospheriques-impactent-les-communications-laser/>
- [6] CEDRAT TECHNOLOGIES : mechanisms for space & new space : <https://pdf.directindustry.com/pdf/cedrat-technologies/point-ahead-mechanism-pam30-deep-space-optical-communication-dsoc/54728-926866.html>
- [7] THOMAS, ADRIEN ET BRENDAN : Se repérer dans l'espace : <https://thuzhen.wordpress.com/2013/01/23/triangulation-par-les-distances/>
- [8] WIKIPEDIA : Checksum : <https://en.wikipedia.org/wiki/Checksum>

Système d'allumage de lampadaire intelligent

Passionné par le vélo depuis l'âge de 8 ans, je réalise souvent mes sorties en fin de journée. En hiver, mes retours dans mon village la nuit étaient dangereux par manque d'éclairage. Je me suis proposé d'étudier le pilotage automatique de l'éclairage public permettant d'adapter son éclairage à mon passage.

Ce projet s'inscrit dans le thème de cette année dans le sens où chaque luminaire est doté d'un système de commande adaptatif qui déclenche un cycle d'éclairage à chaque passage d'un cycliste.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*
- *INFORMATIQUE (Technologies informatiques)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Electronique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Eclairage automatique</i>	<i>Automatic lighting</i>
<i>Effet Doppler</i>	<i>Doppler effect</i>
<i>Capteur</i>	<i>Sensor</i>
<i>Traitement du signal</i>	<i>Signal processing</i>
<i>Système adaptatif</i>	<i>Adaptive system</i>

Bibliographie commentée

L'éclairage public intelligent répond à un double impératif : la limitation de la consommation énergétique et l'amélioration de la sécurité de chacun dans l'obscurité[1].

L'utilisation de diodes électroluminescentes (LED) est fondamentale car leur capacité à être pilotées permet une utilisation de l'éclairage adaptatif. Ce projet repose sur l'ajustement dynamique de l'intensité lumineuse en fonction de la présence d'un cycliste. Le système constitue alors une boucle de régulation. Un état initial, état de veille, est modifié par la présence d'un cycliste et s'adapte à la distance et la vitesse de ce dernier. L'objectif est de créer un cercle de lumière autour du cycliste garantissant sa sécurité et son confort visuel[2]. La loi de

commande de l'éclairage intègre une contrainte de sécurité active : le temps de réaction humain (environ 300ms) [3]. Afin de garantir une distance d'arrêt suffisante et une anticipation optimale face aux obstacles, le système de commande doit assurer une portée lumineuse dynamique corrélée à la vitesse du cycliste.

La technologie de détection est centrale dans notre projet puisqu'elle permet de mesurer une vitesse qui est communiquée à tout le réseau de luminaire. Une solution technique qui peut être retenue peut être la détection de vitesse d'un cycliste par effet Doppler, prédit par le physicien Christian Doppler, qui consiste à mesurer un décalage de fréquence entre la fréquence émise et la fréquence reçue[4]. Cet effet est notamment utilisé pour mesurer la vitesse d'une voiture ou encore la vitesse du sang lors d'examens médicaux (échographies, cardiologies...). D'autres solutions existent, telles que la mesure de vitesse par infrarouge ou par laser. Mais le choix du moyen de détection doit respecter certains compromis entre le coût, la robustesse et la précision.

Ensuite l'architecture du système ne s'arrête pas à un luminaire individuel, il s'agit de mettre en réseau plusieurs lampadaires pour créer l'onde de lumière souhaitée. Le luminaire détecteur doit communiquer avec les autres pour donner les ordres à effectuer en fonction de ce qui a été acquis. Dans les grandes villes le protocole de communication LoRa (Long Range) est souvent utilisé, il permet une communication à longue distance (plusieurs kilomètres) et à faible débit avec d'autres objets connectés. [5]

Enfin quelques soit les technologies utilisées en terme de détection et de communication, la gestion de la boucle de régulation nécessite un microcontrôleur. Une carte Arduino peut jouer ce rôle et réaliser des opérations de contrôle des informations :

- Il réalise l'acquisition des données du capteur

- Il exécute l'algorithme de traitement pour interpréter l'information

- Il prend la décision de modulation de l'intensité lumineuse et envoie l'ordre à la LED du luminaire. L'ordre est généralement transmis à la LED via des signaux PWM (Pulse Width Modulation). [6]

Le module Arduino ne dispose pas de protocole de communication sans fil mais il peut toutefois être utilisé avec un module de communication courte portée ou bien être connecté de manière filaire avec d'autres cartes.

Problématique retenue

Comment concevoir un système d'éclairage public intelligent adaptant l'intensité lumineuse en fonction du passage d'un cycliste ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Mesure de la vitesse par effet Doppler. En déduire la distance du cycliste à un luminaire via un module Arduino.
- Elaborer une consigne d'intensité lumineuse pertinente compte tenu de la position et de la vitesse d'un cycliste. Nous utiliserons une petite voiture et une LED pour l'expérience.
- Faire de même avec plusieurs LED dans le but d'obtenir une « vague » de lumière qui suit le cycliste.
- Concevoir un système permettant de déclencher notre cycle de fonctionnement dès qu'un cycliste s'approche d'une zone nécessitant un éclairage.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] ASSOCIATION FRANÇAISE DE L'ÉCLAIRAGE : Eclairage public : https://www.afe-eclairage.fr/?page_id=3682
- [2] PIERRICK ARLOT : Eclairage urbain intelligent : le groupe Lacroix s'offre la start-up belge SmartNodes : <https://www.l embarque.com/article/eclairage-urbain-intelligent-le-groupe-lacroix-soffre-la-start-up-belge-smartnodes>
- [3] XBITLABS : Test de Temps de Réaction : <https://www.xbitlabs.com/fr/test-temps-reaction/>
- [4] MARION GENDRAUD | : L'effet Doppler et ses applications dans les différents domaines de la physique : <https://share.google/vIwUGzqteLzCsjc9Z>
- [5] DELTA CONSO EXPERT : Réseau LoRa : l'essentiel sur ce mode de communication sans fil : <https://www.deltaconso-expert.fr/blog/reseau-lora>
- [6] TUTODUINO : C'est quoi... un signal PWM ? : <https://tutoduno.fr/blog-pwm/>

Rendement cyclique de la main dans la propulsion en crawl

L'étude du rendement cyclique de la main dans la propulsion en crawl permet de comprendre comment certains nageurs olympiques parviennent à réaliser des temps records. Elle met en évidence le rôle majeur de la main dans le mouvement du crawl reliant ainsi l'impact énergétique et l'optimisation du rendement propulsif.

Ce sujet s'inscrit pleinement dans le thème « cycles, boucles » car la propulsion en crawl repose sur un mouvement périodique de la main, structuré en phases répétitives. Chaque cycle crée une boucle d'interaction avec l'eau, où l'action du nageur et la réaction du fluide se répondent continuellement.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *JUSTO Manon*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Traitement du Signal)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>crawl</i>	<i>crawl</i>
<i>main</i>	<i>hand</i>
<i>rendement</i>	<i>yield</i>
<i>modélisation</i>	<i>modelling</i>
<i>mouvement</i>	<i>movement</i>

Bibliographie commentée

Le sport de haut niveau se joue souvent sur des détails infimes, parfois imperceptibles, mais qui font toute la différence. Aux Jeux Olympiques de 2024, Florent Manaudou a ainsi décroché la médaille de bronze du 50 mètres nage libre avec seulement 0,02 seconde d'avance sur le Canadien Joshua Liendo, un écart minime représentant à peine 0,09 % du temps total. Cette marge rappelle à quel point la moindre amélioration technique peut transformer une course :

passer de la 4^e place au podium, ou encore convertir une médaille d'argent en une médaille d'or. [1] C'est pourquoi la modélisation d'un bon positionnement du corps en crawl permet de définir des solutions optimales et d'accroître l'efficacité du mouvement.

À ce jour, le crawl ne dispose pas d'une définition officielle, contrairement à la brasse, au papillon ou au dos. Il s'agit d'une technique qui s'est progressivement développée au fil du temps, façonnée par les nageurs eux-mêmes.

On peut toutefois proposer la définition suivante : le crawl est une nage ventrale en surface, caractérisée par des mouvements alternés des bras et des jambes, la tête étant majoritairement immergée. L'inspiration s'effectue sur le côté, tandis que l'expiration se fait dans l'eau. La fréquence et l'amplitude des mouvements de bras — deux facteurs dont le produit détermine la vitesse de nage — varient selon la distance parcourue : plus la distance augmente, plus la fréquence diminue et l'amplitude des mouvements s'accroît. [2]

De nombreuses recherches, inspirées de la morphologie animale, se sont penchées sur les mécanismes de propulsion. Certaines ont montré qu'une surface de poussée plus grande, comparable à une pagaie élargie, améliorerait la performance. Mais cette idée est contestée : une surface plus importante exige aussi une force accrue sur l'eau, ce qui ne rime pas toujours avec efficacité. [3] Le véritable enjeu réside donc dans le compromis entre surface de propulsion et effort à fournir.

Sur ce point, l'exemple de la main est révélateur. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, garder les doigts parfaitement serrés — comme une cuillère — ne donne pas la surface la plus efficace. Au contraire, les études montrent qu'écarter légèrement les doigts, de 3 à 8 mm selon leur épaisseur, permettrait d'augmenter de près de 53 % la force exercée par le nageur. Ce gain s'explique par la formation d'une fine membrane d'eau invisible entre les doigts, qui agit comme un « bouclier » et empêche l'eau de s'échapper. [4] Un ajustement discret, mais suffisant pour faire basculer une course lorsque tout se joue au centième de seconde.

Dans le cas d'un sport comme la course, où l'athlète exerce une poussée contre un corps solide, la piste par exemple, le calcul de la force s'obtient facilement à l'aide de la troisième loi de Newton (ou principe des actions réciproques). Cependant, en milieu aquatique, il est plus difficile de réaliser ce calcul. En effet, la propulsion du nageur peut être assimilée à une hélice qui est un mécanisme qui dépend essentiellement de la vitesse de progression. Donc il n'est pas envisageable d'appliquer cette loi.

Il existe déjà de nombreux systèmes permettant de mesurer la force qu'un nageur exerce sur l'eau pour engendrer la poussée qui le fait avancer. L'un des plus reconnus et ingénieux est le système MAD (Measurement of Active Drag). Son principe de fonctionnement repose sur des palettes, posées sur la main du nageur, qui ont un rôle de capteur dans la mesure. Elles mesurent une différence de pression entre la paume et le dos de la main. Ensuite, ces données

sont analysées grâce à des logiciels adaptés, et permettent de déterminer des variables comme l'efficacité de la propulsion. [5] Dans notre étude, nous reprendrons le modèle de l'hélice pour des raisons techniques.

Problématique retenue

Comment l'angle d'attaque et la surface de la main influencent-ils l'efficacité propulsive sur un cycle complet ?

Objectifs du TIPE du candidat

-Comprendre et analyser la décomposition de la main du nageur durant un cycle de crawl.

-Modéliser une main humaine.

-Étudier expérimentalement l'impact de l'angle d'attaque de la main lors de la nage.

-En déduire l'angle d'attaque optimal pour obtenir le meilleur rapport entre propulsion et dépense énergétique.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] CHARLIE PRÉTOT : Étude physique des courses de natation : <https://pastel.hal.science/tel-04010340v1/file/TH2022ENPC0033.pdf>

[2] MATHIAS SAMSON : Étude expérimentale et numérique, en écoulement instationnaire, du trajet des bras en crawl à différentes allures de nage : <https://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/d8c68dee-7131-44e1-9ee4-8f08b46e63bf>

[3] S. LORENTE, E. CETKIN, T. BELLO-OCHEDE, J. P. MEYER AND A. BEJAN : The constructal-law physics of why swimmers must spread their fingers and toes. : <https://repository.up.ac.za/server/api/core/bitstreams/4121a4c5-6b56-428b-a783-96b1f2a7d993/content>

[4] CAMILLE LEUREGANS ET THOMAS ROUTIER : Optimisation technique de nage. : <https://moncoachdenatation.fr/mains-en-crawl/>

[5] NUNZIO LANOTTE ET SOPHIE LEM : Sportifs high tech : *Edition Belin (2012). ISBN : 2701159660*

Système automatique d'aide à l'atterrissage

L'atterrissage est une phase critique du vol, surtout pour les avions légers où les aides électroniques sont souvent limitées. L'utilisation d'une caméra embarquée pour analyser la piste et en déduire la pente d'approche pourrait améliorer la sécurité des pilotes.

Ce projet explore les cycles de rétroaction visuelle en couplant traitement d'image, modélisation mathématique et automatisation. L'ajustement continu de la loi de consigne illustre une boucle dynamique, s'inscrivant ainsi dans le thème des cycles et boucles.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- VILLAUMET--REGNAULT Mattéo

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Traitement du Signal*)

- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Automatique*)

- INFORMATIQUE (*Informatique pratique*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Asservissement en position Position control

Traitement d'images Image processing

Détection de pente Slope detection

loi de consigne setpoint law

atterrissage assisté assisted landing

Bibliographie commentée

L'analyse d'image appliquée à l'aide à l'atterrissage s'appuie sur des méthodes robustes permettant d'extraire des structures géométriques pertinentes dans des conditions visuelles variables. Les travaux pionniers sur la détection de contours [1] et la détection de lignes [2] constituent la base de nombreux systèmes actuels. Dans notre projet, ces techniques permettent d'isoler l'axe de piste et d'identifier le seuil, première étape indispensable avant toute estimation géométrique.

La détection de contours constitue un outil de référence pour l'extraction de structures linéaires dans une image [1]. Elle est essentielle pour repérer les bords de la piste et le point cible. Par ailleurs, Duda et Hart [3] généralisent et formalisent la transformée de Hough, permettant de détecter des lignes droites dans une image, même en présence de bruit. Ces méthodes sont aujourd'hui implémentées dans des bibliothèques comme OpenCV, largement utilisées en robotique et en aéronautique.

Lors de la phase d'atterrissage, les pilotes de ligne utilisent des systèmes d'assistance tels que l'ILS (Instrument Landing System) ainsi que des aides visuelles comme le PAPI (Precision Approach Path Indicator). Ces dispositifs permettent de vérifier que l'avion suit la pente d'approche optimale, garantissant ainsi la sécurité des passagers et de l'équipage. Cependant, ces systèmes ne sont généralement pas disponibles sur les petits aérodromes, où les procédures d'approche reposent davantage sur les compétences visuelles et l'expérience des pilotes. De plus, les petits avions, souvent plus légers et moins équipés que les appareils de ligne, sont davantage soumis aux turbulences, ce qui rend la précision de l'approche et la stabilité de l'atterrissage encore plus critiques.

La suite du traitement s'inscrit dans le cadre de l'automatique. Une fois la pente estimée, il s'agit de construire une loi de consigne stable permettant de déterminer si l'avion est trop haut, trop bas ou à la pente idéale [4]. Les systèmes d'aide au pilotage modernes reposent largement sur ces principes : filtrage, correction et rétroaction. Cette approche est cohérente avec les pratiques des systèmes embarqués aéronautiques [5], qui doivent assurer une réponse fiable et rapide malgré les perturbations et les incertitudes.

Enfin, des travaux récents sur l'estimation de pose en temps réel et la vision embarquée [6], ainsi que des projets open-source comme ArduPilot [7], démontrent que la vision artificielle peut être intégrée sur des plateformes compactes et accessibles, offrant des systèmes performants pour l'aviation légère, combinant traitement d'image, modélisation géométrique et génération de consignes en temps réel.

Problématique retenue

Comment, à partir d'une séquence d'images capturées par une caméra embarquée, estimer en temps réel la pente d'approche d'un avion léger et générer une loi de consigne pour guider le pilote vers un atterrissage optimal ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Analyse de la géométrie lors d'un cycle d'atterrissage
- Etablir le cahier des charges/exigences

- **Étudier les algorithmes de détection de lignes et de contours** (Canny, Hough) pour repérer la piste sur une image.
- **Implémenter une méthode d'estimation de la pente**
- **Concevoir un système à deux LEDs** pour signaler au pilote, en temps réel, sa position par rapport à la pente d'atterrissage idéale.
- **Comparer les résultats** avec des systèmes existants (ILS, GPS) et discuter des limites

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] : Détection de contours — Tutoriel FR (implémentation OpenCV) : <https://www.aranacorp.com/fr/detection-de-contour-avec-opencv-et-python>
- [2] : Détection de lignes — Transformée de Hough (FR) : <https://www.aranacorp.com/fr/detection-dune-ligne-avec-python-et-opencv>
- [3] DUDA, R.O. & HART, P.E. : Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. Communications of the ACM, 15(1), 11-15.
- [4] COURS MINES PARIS : Introduction à l'asservissement & lois de commande — Cours Mines Paris (FR) : https://uma.ensta-paris.fr/~chauvin/automat/cours/cours_auto.pdf
- [5] STAC / DGAC : Systèmes d'aide au pilotage : <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr>
- [6] : Pose estimation & vision embarquée — Documentation OpenCV (EN) : https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html
- [7] ARDUPILOT : Plateformes embarquées aéronautiques open-source — ArduPilot : <https://ardupilot.org>

Étude d'un sous-marin : automatisation de la coulée

Suite à la lecture de *Vingt mille lieues sous les mers*, nous avons souhaité analyser les mécanismes physiques permettant la plongée précise d'un sous-marin. C'est ce qui nous a donné envie de comprendre et de reproduire techniquement la stabilité de l'immersion à l'aide d'une maquette.

Cette étude s'articule autour d'un cycle de plongée complet. Elle traite de deux problèmes d'automatique distincts : la boucle de régulation de la profondeur et le maintien de l'assiette horizontale durant l'immersion.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *PRIGENT KOUNAKOWITCH Elouan*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*

- *PHYSIQUE (Mécanique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Sous-marin</i>	<i>Submarine</i>
<i>Asservissement</i>	<i>Control loop</i>
<i>Immersion</i>	<i>Immersion</i>
<i>Profondeur</i>	<i>Depth</i>
<i>précision</i>	<i>precision</i>

Bibliographie commentée

Si le *Nautilus* de Jules Verne relève de la science-fiction, les sous-marins actuels sont des prouesses technologiques. Cependant, la physique régissant leur immersion et leur stabilisation statique en milieu sous-marin reste complexe à appréhender et à modéliser.

Le fonctionnement d'un sous-marin repose sur la maîtrise de la flottabilité grâce à des ballasts et sur la régulation de son orientation (tangage). Les ballasts sont des réservoirs pouvant se remplir d'eau ou d'air ; ils jouent un rôle crucial pour contrôler l'immersion : lorsqu'ils sont

pleins d'eau, la masse volumique globale du sous-marin augmente et il s'enfonce. À l'inverse, lorsque l'eau est chassée par de l'air comprimé, le sous-marin devient moins dense et remonte [1].

Une approche expérimentale à notre échelle consiste à concevoir une maquette de laboratoire. L'utilisation d'un système à seringue motorisée permet de modéliser les ballasts et de mettre en évidence les contraintes de régulation de profondeur et de stabilité [2].

La loi qui régit la flottabilité est la poussée d'Archimède : tout corps plongé dans un fluide subit une force verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé. Ainsi, la stabilisation de la profondeur d'un sous-marin passe par un équilibre entre la poussée d'Archimède et le poids total de l'engin, ce que l'on peut modéliser précisément grâce à des capteurs de pression. Ces capteurs détectent la pression exercée par la colonne d'eau, permettant d'estimer la profondeur d'immersion de la maquette et de piloter automatiquement les ballasts afin de maintenir cette position. Dans notre cas, on cherchera à automatiser la variation de volume d'air dans la seringue, ce qui nous permettrait de réguler la profondeur de la maquette [3].

Parallèlement, la gestion du tangage ou de l'assiette consiste à éviter que le sous-marin ne s'incline vers l'avant ou l'arrière, ce qui pourrait provoquer un déséquilibre. L'assiette peut être gérée par une répartition judicieuse des masses, ou par l'utilisation de gouvernes et de capteurs d'inclinaison (inclinomètres ou gyroscopes). Les sous-marins modernes embarquent des systèmes combinant ces capteurs pour ajuster leur assiette en temps réel. Il est donc pertinent d'imaginer comment simuler ou automatiser cette correction grâce à une maquette. La maquette consiste en un cadre métallique monté en liaison pivot sur un bâti fixe. Un moteur, couplé à un système de poulie, permet de déplacer une masse le long d'un rail intégré au cadre. L'objectif est de compenser toute perturbation angulaire : en déplaçant la masse, on modifie la position du centre de gravité de l'ensemble. Grâce à un asservissement précis, ce transfert de masse génère un couple correcteur permettant de ramener et de maintenir le cadre dans sa position d'équilibre initiale.[3][4]

Pour structurer notre démarche, nous nous appuyerons sur le diagramme des exigences issu du sujet de concours Banque PT 2012, portant sur les planeurs sous-marins de type Seaglider [5]. Ce document servira de base pour définir notre propre cahier des charges fonctionnel. Nous porterons une attention particulière aux exigences de précision de la profondeur d'immersion et de stabilité d'assiette, qui sont cruciales pour la performance de l'engin.

Problématique retenue

Comment concevoir un système automatisé capable de réguler la profondeur et l'assiette d'un sous-marin miniature lors d'un cycle de plongée ?

Objectifs du TIPE du candidat

Mon objectif est d'étudier un sous-marin à travers une maquette. Plus particulièrement la gestion de la profondeur avec notamment la relation entre l'air injecté dans les ballasts et la profondeur atteinte. Je me concentrerai aussi sur l'asservissement avec un capteur de pression et un vérin de cette profondeur. J'aurai comme objectif final d'automatiser le système de régulation en respectant les exigences.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] YANN ET GRÉGOIRE : Ballast : <http://codingrulz.free.fr/fichiers/ballast.htm>

[2] FRANÇOIS HERZIG : Maquette de ballast : <https://www.youtube.com/watch?v=pnkDUpBq-r0>

[3] ALAIN BOVIS : Hydrodynamique navale: Le sous marin : *Livre les presses de l'ENSTA*

[4] ALAIN : Les caisses d'assiettes : <http://www.sousmarinvenus.com/Caisses.html>

[5] BANQUE PT : Planeur sous-marin : <https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours/topics/sic-planeur-sous-marin>

Modélisation de l'écosystème par la création d'un outils numérique

Je suis animé par un intérêt personnel pour les animaux et la biodiversité et souhaite comprendre les mécanismes qui assurent l'équilibre des écosystèmes. Anticiper l'impact des aléas sur les populations vivantes permet d'agir de manière raisonnée pour préserver la biodiversité et lutter contre la disparition progressive de certaines espèces.

Mon étude s'inscrit dans le thème de l'année car elle mobilise des compétences numériques et mathématiques, notamment l'utilisation d'équations différentielles, afin de modéliser et comprendre les cycles dynamiques issus des interactions proie-prédateur.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *MATHEMATIQUES (Mathématiques Appliquées)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Equations différentielles</i>	<i>Differential Equations</i>
<i>Tkinter</i>	<i>Tkinter</i>
<i>Modélisation</i>	<i>Modeling</i>
<i>Nature</i>	<i>Nature</i>
<i>Cycle</i>	<i>Cycle</i>

Bibliographie commentée

À ce jour, environ deux millions d'espèces ont été inventoriées, et chacune joue un rôle spécifique dans la stabilité des écosystèmes. Cette stabilité repose sur des équilibres dynamiques souvent cycliques, indispensables à la survie des espèces et, indirectement, à celle de l'Homme. Il apparaît donc nécessaire de préserver ces équilibres [1], ce qui passe notamment par leur compréhension et leur modélisation mathématique.

La majorité des interactions interspécifiques observées dans la nature peut être schématisée par une relation proie-prédateur. Lotka et Volterra ont proposé un modèle mathématique fondamental pour décrire ce type d'interaction à l'aide d'équations différentielles non linéaires,

aujourd'hui connues sous le nom d'équations de Lotka–Volterra [2]. Bien que reposant sur des hypothèses simplificatrices, ces systèmes ont montré leur capacité à reproduire qualitativement certaines dynamiques biologiques. En particulier, les travaux de Volterra ont trouvé une validation expérimentale partielle dans l'étude de populations bactériennes présentant des oscillations proches de celles prédites théoriquement [3]. Il existe donc une corrélation non négligeable entre l'évolution de certaines populations biologiques et les dynamiques décrites par ces équations.

Cependant, la mise en place concrète des équations de Lotka–Volterra à partir de données réelles pose plusieurs difficultés : estimation de paramètres biologiques difficilement mesurables, intégration numérique de systèmes non linéaires sensibles aux conditions initiales, et traitement de données expérimentales souvent bruitées. Ces étapes sont techniques, chronophages et sources d'erreurs méthodologiques. La création d'un logiciel dédié apparaît alors pertinente afin d'automatiser l'ajustement des paramètres, de visualiser les dynamiques associées et de comparer différents modèles, rendant ainsi l'utilisation de ce formalisme plus rigoureuse et plus accessible.

Dans ce cadre, nous prendrons pour source une étude expérimentale portant sur un système proie-prédateur réel, en l'occurrence un couple lion et zèbre observé sur une période donnée [4]. L'objectif est de développer un logiciel permettant de confronter directement les données issues de cette expérience aux prédictions des équations de Lotka–Volterra. Cette confrontation constituera un point de départ pour analyser les écarts entre modèle et réalité, mettre en évidence les limites du modèle classique, et proposer progressivement des améliorations visant à mieux rendre compte de la complexité du système biologique étudié

Problématique retenue

Dans quelle mesure un outil numérique permet-il de confronter les équations de Lotka–Volterra à des données expérimentales afin de modéliser les cycles d'un écosystème et d'en identifier les limites ?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif de ce TIPE est de modéliser les dynamiques cycliques d'un écosystème proie-prédateur à l'aide des équations de Lotka–Volterra, en mobilisant des compétences mathématiques et numériques. À partir de données expérimentales réelles, un outil numérique est développé afin d'ajuster les paramètres du modèle, de visualiser les dynamiques et de confronter théorie et réalité. Cette approche permet d'identifier les limites du modèle classique, d'analyser les écarts observés et d'envisager des améliorations pour mieux représenter la complexité des systèmes biologiques.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] CHARLOTTE DEBUYSSCHER : La disparition des abeilles: quelles conséquences pour nous? : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02007952v1/document>
- [2] GREGORY VIAL : Le Système proie-prédateur de Volterra-Lotka : <https://w3.ens-rennes.fr/math/people/gregory.vial/files/cplts/volterra.pdf>
- [3] GEORGY FRANTSEVICH GAUSE : Experimental Demonstration of Volterra's Periodic Oscillations in the Numbers of Animals : <https://polydora.github.io/General-ecology/Literature/Gause%201934%20Predator%20paey%20Voltera%20model.pdf>
- [4] M.G.L. MILLS, T.M. SHENK : Predator--Prey Relationships: The Impact of Lion Predation on Wildebeest and Zebra Populations : <https://www.jstor.org/stable/5624>

Prototypage d'un accordeur automatique motorisé pour instruments à cordes frottées à chevilles coniques.

Je fais du violoncelle depuis mes cinq ans. L'accordage de l'instrument est difficile même pour les adultes confirmés. Chaque corde est maintenue tendue par une cheville conique qui est coincée dans la tête de l'instrument. Leur manipulation nécessite de combiner des efforts importants et une grande précision.

L'accordeur que je souhaite réaliser est un système bouclé : il sera doté de moteurs asservis à la fréquence de vibration de la corde à accorder.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Automatique*)
- PHYSIQUE (*Physique Ondulatoire*)
- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Génie Mécanique*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Instruments à cordes frottées *Bowed string instruments*

Cheville cônica *Conical peg*

Accordeur *Tuner*

Analyse spectrale *Spectral analysis*

Conception mécanique *Mechanical design*

Bibliographie commentée

Le violoncelle est un instrument de musique de la famille des cordes frottées (comme le violon, l'alto et la contrebasse). Il a très peu changé depuis sa création au XVIe siècle en Italie à Crémone par les luthiers de la famille Amati et leur disciple le plus célèbre Antonio Stradivari (XVIIe siècle). [1]

Les cordes sont mises en vibration par l'action de l'archet enduit de colophane. Cette résine végétale augmente la rugosité et permet de tirer et de relâcher la corde des centaines de fois par

seconde. A ce stade le son produit est très faible. La vibration est transmise par le chevalet, l'âme et la barre d'harmonie à la caisse de résonance (corps de l'instrument). Le son est ainsi amplifié et se propage au travers de deux orifices en forme de f.

La note de base de chaque corde dépend de sa longueur vibrante, de son diamètre, du matériau (densité, élasticité) et de sa tension. Ces facteurs déterminent la fréquence vibratoire, c'est-à-dire le nombre de vibrations par seconde. Cette vibration est complexe, elle combine le mouvement de la corde entière (note fondamentale) et des vibrations partielles de sa moitié, du tiers, du quart...[2]

Pour accorder l'instrument il faut commencer par retrouver cette note fondamentale. Plusieurs types de capteurs permettent de détecter le signal comme les microphones piézo-électriques. Une lame coupée dans certains matériaux (Quartz, sel de Seignette, etc.), et périodiquement comprimée, délivre un courant électrique qui a la même fréquence que le son enregistré et son amplitude est proportionnelle à celle du phénomène acoustique. [3]

Par voie mathématique, Fourier a montré qu'un phénomène périodique quelconque pouvait toujours se décomposer en une somme de sinusoïdes élémentaires (harmoniques), dont les fréquences respectives sont des multiples entiers de la composante la plus grave. La transformée de Fourier convertit un signal qui dépend du temps en une représentation qui dépend de la fréquence. [4]

Pour modifier l'accordage des cordes il faut manipuler les chevilles. Elles sont coniques, tout comme le trou dans lequel elles s'insèrent. Plus on l'enfonce dans son orifice, plus le couple nécessaire pour la faire tourner sur elle-même est grand. Ainsi, elle peut résister à l'action de la corde.

On commence par détendre légèrement la corde en tournant la cheville (Violon : MI et LA en sens anti-horaire ; RÉ et SOL en sens horaire. Alto et violoncelle : LA et RÉ en sens anti-horaire ; SOL et DO en sens horaire). Peu importe que la note soit trop haute ou trop basse, détendre la corde permet de débloquent la cheville (si on la débloquent en tendant la corde, on risque d'aller trop loin et de casser la corde). Ensuite il faut tourner la cheville pour faire monter la note jusqu'à la hauteur désirée, et enfin on exerce une pression vers le chevillier tout en continuant la rotation, de manière à bien enfonce le cône de la cheville dans son logement. Ainsi, la cheville sera bien bloquée en position lorsque la note sera juste. [5]

Il existe des accordeurs automatiques pour guitare mais ils ne sont pas adaptés aux instruments à cordes frottées et à leurs chevilles coniques. En effet le système d'accordage repose sur un mécanisme de roue et vis sans fin beaucoup plus simple à manipuler.

Problématique retenue

Pour pouvoir accorder automatiquement un violon, je dois réaliser un système autonome capable de déverrouiller la cheville (frottements solides), d'analyser la fréquence de vibration, de régler la tension de la corde puis de la maintenir afin d'obtenir la note souhaitée.

Objectifs du TIPE du candidat

1. Caractériser les actions mécaniques cheville/tête. Effort axial (déverrouillage), moment (opposition à la rotation).
2. Concevoir un mécanisme de verrouillage/déverrouillage de la cheville.
3. Étudier la fréquence vibratoire, la tension (et le couple correspondant) d'une corde.
4. Réaliser le système d'asservissement de la position angulaire de la cheville en fonction de la fréquence vibratoire de la corde.
5. Concevoir un prototype d'accordeur automatique de violon.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] WALTER KOLNEDER : The Amadeus Book of the Violin: Construction, History, and Music : *Amadeus Press (2003)*, ISBN-13 978-1574670387

[2] CHRIS JOHNSON, ROY COURTNALL : The Art of Violin Making : *Robert Hale Ltd (1999)*, ISBN-13 978-0709058762

[3] EMILE LEIPP : Acoustique et musique : *Presse des Mines (2010)*, 9782911256394

[4] MEINARD MÜLLER : Fundamentals of Music Processing : *Springer (2015)*, 978-3-319-21944-8

[5] GUILLAUME KESSLER : Atelier de lutherie L'art d'accorder son violon : <http://www.guillaume-kessler.fr/accorder-son-violon>

Étude d'un sous-marin : automatisation de la coulée

Suite à la lecture de *Vingt mille lieues sous les mers*, nous avons souhaité analyser les mécanismes physiques permettant la plongée précise d'un sous-marin. C'est ce qui nous a donné envie de comprendre et de reproduire techniquement la stabilité de l'immersion à l'aide de maquettes.

Cette étude s'articule autour d'un cycle de plongée complet. Elle traite de deux problèmes d'automatique distincts : la boucle de régulation de la profondeur et le maintien de l'assiette horizontale durant l'immersion.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- MAUREL Ilian

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- SCIENCES INDUSTRIELLES (*Automatique*)

- PHYSIQUE (*Mécanique*)

- INFORMATIQUE (*Informatique pratique*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Asservissement *Control loop*

Sous-marin *Submarine*

Tangage *Pitching*

Stabilité *Stability*

Immersion *Immersion*

Bibliographie commentée

Si le *Nautilus* de Jules Verne relève de la science-fiction, les sous-marins actuels sont des prouesses technologiques. Cependant, la physique régissant leur immersion et leur stabilisation statique en milieu sous-marin reste complexe à appréhender et à modéliser.

Le fonctionnement d'un sous-marin repose sur la maîtrise de la flottabilité grâce à des ballasts et sur la régulation de son orientation (tangage). Les ballasts sont des réservoirs pouvant se

remplir d'eau ou d'air ; ils jouent un rôle crucial pour contrôler l'immersion : lorsqu'ils sont pleins d'eau, la masse volumique globale du sous-marin augmente et il s'enfonce. À l'inverse, lorsque l'eau est chassée par de l'air comprimé, le sous-marin devient moins dense et remonte [1].

Une approche expérimentale à notre échelle consiste à concevoir une maquette de laboratoire. L'utilisation d'un système à seringue motorisée permet de modéliser les ballasts et de mettre en évidence les contraintes de régulation de profondeur et de stabilité [2].

La loi qui régit la flottabilité est la poussée d'Archimède : tout corps plongé dans un fluide subit une force verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du volume de fluide déplacé. Ainsi, la stabilisation de la profondeur d'un sous-marin passe par un équilibre entre la poussée d'Archimède et le poids total de l'engin, ce que l'on peut modéliser précisément grâce à des capteurs de pression. Ces capteurs détectent la pression exercée par la colonne d'eau, permettant d'estimer la profondeur d'immersion de la maquette et de piloter automatiquement les ballasts afin de maintenir cette position. Dans notre cas, on cherchera à automatiser la variation de volume d'air dans la seringue, ce qui nous permettrait de réguler la profondeur de la maquette [3].

Parallèlement, la gestion du tangage ou de l'assiette consiste à éviter que le sous-marin ne s'incline vers l'avant ou l'arrière, ce qui pourrait provoquer un déséquilibre. L'assiette peut être gérée par une répartition judicieuse des masses et par l'utilisation de gouvernes et de capteurs d'inclinaison (inclinomètres ou gyroscopes). Les sous-marins modernes embarquent des systèmes combinant ces capteurs pour ajuster leur assiette en temps réel. Il est donc pertinent d'imaginer comment simuler ou automatiser cette correction grâce à une maquette. La maquette consiste en un cadre métallique monté en liaison pivot sur un bâti fixe. Un moteur, couplé à un système de poulie, permet de déplacer une masse le long d'un rail intégré au cadre. L'objectif est de compenser toute perturbation angulaire : en déplaçant la masse, on modifie la position du centre de gravité de l'ensemble. Grâce à un asservissement précis, ce transfert de masse génère un couple correcteur permettant de ramener et de maintenir le cadre dans sa position d'équilibre initiale.[3][4]

Pour structurer notre démarche, nous nous appuyerons sur le diagramme des exigences issu du sujet de concours Banque PT 2012, portant sur les planeurs sous-marins de type *Seaglider* [5]. Ce document servira de base pour définir notre propre cahier des charges fonctionnel. Nous porterons une attention particulière aux exigences de précision de la profondeur d'immersion et de stabilité d'assiette, qui sont cruciales pour la performance de l'engin.

Problématique retenue

Comment concevoir un système d'automatisation capable de réguler la profondeur et l'assiette d'un sous-marin miniature lors d'un cycle de plongée ?

Objectifs du TIPE du candidat

Ce TIPE étudie la dynamique d'un sous-marin via une maquette centrée sur la gestion du tangage. Ce paramètre est contrôlé par un déplacement de masses, simulant le transfert d'eau entre les ballasts.

Mon but est de concevoir un système de contrepoids asservi en position. L'objectif est d'établir la relation entre l'angle d'inclinaison et la correction massique nécessaire. Concrètement, mon travail vise à modéliser et simuler le système, étudier ses performances (rapidité, précision, dépassement, marges) et valider la faisabilité d'un tel asservissement.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] YANN ET GRÉGOIRE : ballast : <http://codingrulz.free.fr/fichiers/ballast.htm>

[2] FRANÇOIS HERZIG : Maquette de ballast : <https://www.youtube.com/watch?v=pnkdUpBq-r0>

[3] ALAIN BOVIS : Hydrodynamique navale: Le sous marin : *Livre les presses de l'ENSTA*

[4] ALAIN : Les caisses d'assiettes : <http://www.sousmarinvenus.com/Caisses.html>

[5] BANQUE PT : Planeur sous marin : <https://www.upsti.fr/espace-etudiants/annales-de-concours/topics/sic-planeur-sous-marin>

Le puits canadien : étude des transferts thermiques et d'un système de bypass automatisé

Depuis toujours, je m'intéresse aux systèmes et à la manière d'en améliorer l'efficacité. Le puits canadien m'a particulièrement intrigué par sa capacité à réguler la température avec très peu d'énergie. Face à la hausse du coût énergétique, étudier un tel système me paraît essentiel.

Boucle circulation d'air : l'air extérieur circule dans le puits, puis est rejeté à l'extérieur.

Cycle saisonnier : la température du sol varie périodiquement au cours de l'année.

Boucle de régulation : le bypass est commandé automatiquement selon les températures pour optimiser le fonctionnement du système.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *FRANCESCATTO Léa*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Mécanique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Puits canadien

Conduction thermique dans le sol

Echange thermique sol-air

Système de bypass

Pilotage intelligent

Mots-clés (en anglais)

Canadian well

Thermal conduction in the ground

Ground-air heat exchange

Economie d'énergie et coûts

Energy and cost savings

Bibliographie commentée

Le renouvellement de l'air intérieur est indispensable dans une habitation afin de garantir une bonne qualité de l'air et limiter les problèmes d'humidité. Cependant, les systèmes de

ventilation classiques, tels que les aérateurs de fenêtres, introduisent directement l'air extérieur, souvent à une température très différente de celle de l'intérieur. En hiver, l'air froid entrant doit être chauffé, et en été, l'air chaud doit être refroidi, ce qui entraîne une surconsommation énergétique. Cette situation pose un enjeu central : comment renouveler l'air intérieur tout en limitant les écarts de température inutiles avec l'air extérieur, problème décrit par Herzog [1].

Une solution passive et efficace repose sur l'exploitation de la stabilité thermique du sol. À partir d'une profondeur de 2 à 3 mètres, la température du sol varie peu au fil des saisons et reste proche de la moyenne annuelle locale [1,2]. Cette stabilité est due à la conduction thermique : la densité et la capacité calorifique du sol amortissent les variations de température en surface, faisant du sol un réservoir naturel pour préchauffer l'air en hiver ou le rafraîchir en été [1].

Le puits canadien, ou puits provençal, exploite ce principe en utilisant un conduit enterré dans lequel circule l'air extérieur avant son introduction dans le bâtiment. L'air échange de la chaleur avec le sol, d'abord par conduction à travers les parois, puis par convection forcée avec l'air en mouvement [1]. Ce procédé permet de prétempérer l'air entrant, réduisant ainsi les besoins de chauffage ou de climatisation [3].

Afin d'avoir un rendement optimal, il est essentiel de bien dimensionner le puits canadien, bien que cette tâche soit assez délicate. En effet, l'efficacité du système dépend de plusieurs paramètres physiques : conductivité et humidité du sol, profondeur, longueur et diamètre du conduit, ainsi que vitesse de circulation de l'air, qui influencent le temps de contact air-sol et la température en sortie [2,3]. En ce sens la thèse de D. Amitrano [3] nous a particulièrement intéressée, puisque son travail est principalement basé sur des simulations numériques permettant de voir l'effet de ces paramètres sur le flux thermique fourni par le puits canadien. Cette approche théorique est complétée par l'étude de B. Mebarki et al. [2], qui analyse l'intégration d'un puits canadien dans un système de climatisation en zone aride (Béchar, Maroc). Les résultats montrent une réduction notable de la température de l'air insufflé et de la consommation énergétique, confirmant l'efficacité pratique du dispositif.

L'article de C. Mary et G. Cozian [4] propose une modélisation du puits canadien en s'intéressant au phénomène de conducto-convection, permettant de simuler l'évolution de la température de l'air dans le conduit. Cette modélisation a également permis d'estimer la puissance thermique économisée sur le chauffage par l'intermédiaire de la loi de Newton.

Enfin, dans un contexte pratique, il est important de considérer des dispositifs comme le bypass automatique, maintenant utilisé dans de nombreuses habitations modernes, puisqu'il permet de court-circuiter le conduit lorsque la température extérieure est proche de la température intérieure souhaitée. Ce mécanisme, étudié dans la documentation industrielle [5], permet d'éviter des échanges thermiques inutiles ou contre-productifs, illustrant comment la théorie et la modélisation peuvent être appliquées pour optimiser le rendement réel du système.

L'ensemble de ces documents montre que les performances d'un puits canadien reposent sur le couplage entre la conduction thermique du sol et la convection forcée de l'air dans le conduit. Ils mettent en évidence les problématiques centrales du TIPE : l'influence des propriétés du sol sur l'atténuation et le déphasage des variations de température, l'étude du transfert conducto-convectif de l'air, ainsi que les limites du système lorsque la température extérieure se rapproche de la température intérieure, notamment aux mi-saisons. L'intégration d'un bypass automatique apparaît alors comme un élément clé pour éviter des échanges thermiques inutiles et optimiser le rendement global du dispositif.

Problématique retenue

Comment la conduction thermique du sol et le couplage conduction-convection air-sol influencent-ils les performances d'un puits canadien et le déclenchement d'un by-pass ?

Objectifs du TIPE du candidat

Concevoir un système de bypass équipé d'un clapet automatique régulé par la température.

Étudier expérimentalement l'efficacité d'un bypass sur la température d'une pièce.

Valider l'utilisation d'un bypass dans le puits canadien selon plusieurs critères.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] B. HERZOG : Le puits canadien : *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin, Eyrolles édition, 2008*
- [2] B. MEBARKI, B. DRAOUI, S. ABDESSEMED, A. KEBOUCHA, S. DRICI ET A. SAHLI : Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar : *Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N°3 (2012) 465-478*
- [3] D. AMITRANO : Éléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol, dit "puits canadien" : *Thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble, 2008*
- [4] C. MARY, G. COZIAN : Le puits canadien, une simulation qui ne manque pas d'air : *Forum des technologies 204, septembre-octobre 2016.*
- [5] MYDATEC : Bypass automatique pour puits canadien : <https://www.mydatec.com/fr/bypass-automatique/>

Stabilisation d'un drone à partir d'un correcteur PID

Les drones constituent aujourd'hui un enjeu majeur dans des secteurs variés tels que l'agriculture, la défense, la logistique ou l'audiovisuel. Ce dernier domaine retient particulièrement mon attention, car il conjugue exigences artistiques et défis techniques. Dans ce contexte, la stabilisation du drone s'avère critique à l'obtention de prises de vues.

Pour répondre à cette problématique, on étudie un système asservi par un régulateur PID. Ce dispositif, reposant fondamentalement sur une boucle de rétroaction pour corriger l'erreur, s'inscrit dans le thème « Cycle et boucle ».

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *COUSTAURY* *Timothée*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *INFORMATIQUE* (*Informatique pratique*)

- *SCIENCES INDUSTRIELLES* (*Automatique*)

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

simulation *simulation*

boucle d'asservissement *feedback loop*

perturbation *disturbance*

régulateur PID *PID control*

Critère de performance *Performance criterion*

Bibliographie commentée

La stabilisation d'un drone quadrirotor constitue une problématique centrale de la robotique aérienne. En raison de son instabilité naturelle, le maintien d'une assiette stable nécessite une boucle d'asservissement. La compréhension du système commence par une modélisation physique. Ainsi la thèse de Bouabdallah [1] définit exactement les équations du mouvement d'un drone via le formalisme de Newton-Euler, en isolant les couplages gyroscopiques entre les axes de roulis, de tangage et de lacet. L'intérêt majeur réside dans la linéarisation du modèle

autour du point d'équilibre, étape préalable indispensable pour justifier l'emploi d'outils d'automatique linéaire classiques sur un système initialement non linéaire.

Une fois le modèle dynamique posé, la conception de la boucle d'asservissement s'appuie sur les fondements théoriques exposés par Ogata [2]. Ce manuel permet de structurer l'étude de la chaîne fonctionnelle en utilisant les fonctions de transfert et les schémas-blocs. Il offre les méthodes nécessaires pour analyser la stabilité du système en boucle fermée, notamment par l'étude des marges de phase et de gain passant par une analyse fréquentielle. La transition vers la mise en œuvre numérique est ensuite assurée par les travaux de MathWorks [3]. L'utilisation de l'environnement Simulink ou Python permet de confronter le modèle théorique à une simulation informatique intégrant les saturations des moteurs et la discrétisation du correcteur ainsi que l'entière réalité du modèle physique. C'est un maillon essentiel pour évaluer la robustesse du régulateur face à des variations de paramètres avant toute phase d'expérimentation réelle.

La réalité des contraintes matérielles est abordée à travers le rapport de projet de l'ENSICA [4]. Ce document apporte un éclairage pragmatique sur la réalisation d'un prototype, notamment concernant le choix des fréquences d'échantillonnage et le traitement des vibrations mécaniques qui viennent parasiter les mesures. Ces nuisances imposent une réflexion sur la qualité de l'information traitée par le correcteur PID. À cet égard, le cours de D. Alazard [5] sur le filtre de Kalman est fondamental. Il traite de la fusion de données capteurs, expliquant comment l'association des mesures accélérométriques et gyroscopiques permet d'obtenir une estimation de l'assiette exempte de dérive et de bruit haute fréquence. Cette précision est la condition sine qua non pour que l'action dérivée du PID ne dégrade pas la stabilité du système.

L'analyse de la chaîne d'acquisition est complétée par les travaux de Benmouhoub et Deladji [6], qui se focalisent sur l'instrumentation et la stabilité globale. Leur étude permet de quantifier l'impact des retards de mesure et de la précision des capteurs IMU sur la performance du vol stationnaire. Enfin, l'article de Mohammad et Hao [7] offre une mise en perspective critique du correcteur PID. Bien que ce dernier soit particulièrement efficace pour les faibles perturbations, ses limites apparaissent lors de sollicitations extrêmes comme du vent ou face à des incertitudes de modèle importantes. L'évocation de commandes intelligentes (réseaux de neurones) souligne que le PID reste une solution de base robuste qu'il convient parfois de compléter pour garantir la sécurité et la stabilité des systèmes autonomes.

En somme, cet ensemble de références permet de couvrir la totalité de la chaîne de conception : de la mécanique du vol à la synthèse de la loi de commande, tout en intégrant les problématiques cruciales de traitement du signal et de validation numérique.

Problématique retenue

Comment stabiliser un drone à l'aide d'un correcteur PID ?

Objectifs du TIPE du candidat

Je me propose:

-Mettre en place et simuler un modèle physique simplifié d'un drone en Python.

-Implémenter un asservissement des moteurs par un correcteur PID.

-Explorer des méthodes de détermination des meilleurs coefficients pour le PID.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] SAMIR BOUABDALLAH : Design and Control of quadrotors with application to autonomous flying : DOI: [10.5075/epfl-thesis-3727](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3727)

[2] KATSUHIKO OGATA : Modern Control Engineering Instrumentation and controls series Prentice-Hall electrical engineering series. Instrumentation and controls series : ISBN_10: 0-13-615673-8

[3] MATHWORKS : Quadcopter Project Example (Simulink), 2023. : <https://fr.mathworks.com/help/sps/ug/quadcopter-drone.html>

[4] FRENOT ALEXIS, GOSSMANN ANTHONY, GUILLERM ROMARIC : Rapport PIP "Stabilisation d'un quadrirotor" ENSICA 2005/2006 : <http://minijonas95.free.fr/quadrirotor/Rapports/Rapport%20quadrirotor%20I4.doc>

[5] D.ALAZARD : Introduction au filtre de Kalman Notes de cours Exercices corrigés : https://pagespro.isae-supaero.fr/IMG/pdf/introKalman_vf_2008.pdf

[6] BENMOUHOHB IHAB, DELADJI HOCINE : Etude de stabilité d'un drone quadrirotor : Université de Guelma, 2021 <https://fr.scribd.com/document/717625103/BENMOUHOUB-IHAB-F1-Electronique-et-Telecommunications-Instrumentation>

[7] J. MOHAMMAD, X. HAO : Intelligent Control for Unmanned Aerial Systems with System Uncertainties and Disturbances Using Artificial Neural Network : DOI: [10.3390/drones2030030](https://doi.org/10.3390/drones2030030)

Du calcul à la piste : de la modélisation théorique du looping à la maquette instrumentée

J'ai découvert la mécanique du solide en première année de classes préparatoires, ce qui m'a fortement intéressée. J'apprécie les sensations fortes, ce qui m'a poussé à relier montagnes russes et mécanique du solide. Après quelques recherches, j'ai découvert le fonctionnement du looping, avec les mécanismes de freinage et d'accélération.

Mon étude du looping entre dans le thème de l'année car c'est le mouvement d'un solide qui a la trajectoire d'une boucle.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Mécanique)*
- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>looping</i>	<i>looping</i>
<i>énergies</i>	<i>energies</i>
<i>force centrifuge</i>	<i>centrifugal force</i>
<i>accélération magnétique</i>	<i>magnetic acceleration</i>
<i>freinage magnétique</i>	<i>magnetic braking</i>

Bibliographie commentée

Les loopings ont vu le jour il y a déjà plus d'un siècle et connaissent encore aujourd'hui une importante évolution. En effet, la toute première attraction avec un looping, intitulée *FlipFlop Railway* était un cercle parfait de 8m de diamètre. Or cela créait une trop forte accélération pour les passagers (de 6 à 8 G) qui alors se retrouvaient écrasés au fond de leur siège de manière brutale. Cette attraction causa de nombreuses blessures au cou et dû fermer peu de temps après son ouverture. Les manèges avec looping étaient dangereux et perdirent leur popularité. [1] Jusqu'à ce qu'en 1976, l'ingénieur Werner Stengel repensa la forme du looping. [2] Avec un rayon qui diminue au fur et à mesure de la montée, les passagers subissent une

accélération progressive et donc plus assimilable par le corps humain. En effet, le corps humain a une tolérance limitée aux accélérations. Il ne peut subir que quelques fois son poids pendant des durées déterminées selon différents axes. Par exemple, il ne supporte généralement que 6 G pendant 60 secondes vers l'avant. [3] La physique du looping est une science reposant en grande partie sur la mécanique avec de nombreux phénomènes physiques. Par exemple, la force centrifuge permet de compenser le poids, évitant ainsi la perte d'adhérence du wagon aux rails, au sommet de la boucle. L'étude de l'énergie mécanique permet de prévoir la vitesse minimale nécessaire pour passer le looping. [4]

Cependant, avec l'évolution de la technologie, les attractions vont de plus en plus loin pour procurer des sensations fortes aux passagers. C'est le cas de la *Formula Rossa* à Abou Dhabi, une attraction atteignant les 250 km/h. Il faut donc donner suffisamment de vitesse au wagon pour le reste du parcours et notamment passer le looping. Afin d'y arriver, différents mécanismes de propulsion dont les LIM (Linear Induction Motor) ou bien des LSM (Linear Synchronous Motor) [5] sont utilisés, se basant tous les deux sur de l'électromagnétisme:

- Les LIM sont composés d'un stator en 2 parties, composées de bobines, disposées parallèlement à quelques centimètres d'écart. [6]

- Les LSM sont composés d'un stator constitué de bobines, situées tout le long du rail, mais aussi d'aimants permanents. Ceci permet aux LSM d'atteindre des vitesses plus importantes mais aussi de consommer moins d'électricité, expliquant alors son utilisation plus fréquente que les LIM. [7]

Or cette vitesse initialement donnée diminue au cours du parcours à cause des frottements mais reste importante à l'arrivée. C'est pourquoi il existe différents types de freinage. On compte en majorité des freinages par frottements sous le wagon mais aussi des freinages magnétiques. Ces freins magnétiques permettent un entretien moindre et fonctionnent avec tout type de météo. Cependant, ils sont nécessairement couplés avec des freins mécaniques (frottements) car les freins magnétiques fonctionnent mieux sur des grandes vitesses. Il faut donc d'autres freins afin d'immobiliser le wagon lorsque la vitesse est moins importante. [8]

Problématique retenue

Comment réaliser une maquette d'un looping, fidèle à la réalité ? Comment contrôler les différentes phases d'accélération et de freinage relatives au looping ?

Objectifs du TIPE du candidat

Etudier les conditions pour passer un looping

Maîtriser l'accélération avant le looping

Maîtriser le freinage après le looping

Réaliser une maquette réaliste d'un looping

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] : Flip Flap Railway : https://en.wikipedia.org/wiki/Flip_Flap_Railway

[2] : Vertical Loop : https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_loop

[3] : Issues on Human Acceleration Tolerance after Long-Duration Space Flights : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930020462/downloads/19930020462.pdf>

[4] DAVID LOUAPRE : La physique du looping : <https://scienceetonnante.com/2012/02/13/la-physique-du-looping/>

[5] : Launch Coasters - LIM et LSM : Quelles différences ? : <https://coastersworld.fr/launch-coasters-lim-lsm/>

[6] OLIVIA BRIGGS : Roller Coaster Acceleration : https://vc.bridgew.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1459&context=honors_proj

[7] JACEK F.GIERAS, ZBIGNIEW J.PIECH ET BRONISLAW TOMCZUK : Linear Synchronous Motors : <http://jfgieras.com/lsm-chapter%201.pdf>

[8] ANTOINE LESOBRE : Conception, modélisation et expérimentation de moteurs-freins intégrés à réluctance variable et à courant de Foucault : <https://theses.hal.science/tel-00448101v1>

Le retour haptique et réponse d'une commande d'un robot chirurgical.

Les robots chirurgicaux connaissent un développement avec les nouvelles technologies. Surtout dans la pratique de chirurgie mini-invasive, l'intervention d'un robot présente un inconvénient : le manque de sensations. Le retour haptique permet de restituer les sensations. Il serait intéressant d'étudier le retour de commande de ces robots.

Les robots haptiques possèdent une boucle de retour en effort, ce qui est en lien avec le thème de cette année. Il est aussi possible de corriger les tremblements de la main du chirurgien dans la boucle de commande.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Asservissement</i>	<i>Feedback Control</i>
<i>Retour</i>	<i>Feedback</i>
<i>Haptique</i>	<i>Haptics</i>
<i>Stabilité</i>	<i>Stability</i>
<i>Teleoperation</i>	<i>Teleoperation</i>

Bibliographie commentée

En médecine, plus précisément dans le domaine de la chirurgie, les technologies robotiques ainsi que les chirurgies mini-invasives ont connu un développement important ces dernières années [1]. Avec des systèmes robotiques qui permettent désormais aux chirurgiens de gagner en précision lors des opérations. L'avantage, contrairement à la chirurgie non robotisée, c'est la réduction de la taille des incisions [2]. Mais le problème avec la chirurgie robotique est la perte de sensations à cause de l'interface robotique. Le chirurgien ne peut plus sentir directement les tissus, cela étant désagréable et plus dangereux, puisque ce dernier n'a plus le contrôle sur ce qu'il voit et sur le ressenti [3]. C'est dans ce cas que l'haptique est important, il permet de recréer

et restituer les sensations du toucher mais aussi de répondre aux commandes du chirurgien. Par conséquent le retour haptique est fondamental pour la réussite des interventions [4]. Ainsi, c'est pourquoi l'étude de robots haptiques est importante [5] cela permet de comprendre comment ces systèmes fonctionnent. Mais avec le retour haptique arrivent de nouveaux problèmes, il y a l'introduction d'instabilités. En effet lors d'opérations sur des organes en mouvements, le cœur ou les poumons par exemple, des perturbations périodiques comme la respiration, causent des instabilités dans le retour haptique. Pour contrer ce nouveau problème il est possible de filtrer ces perturbations avec un correcteur [6] ou bien de concevoir des dispositifs qui compenseraient les mouvements [7].

Problématique retenue

Comment la fréquence et l'amplitude du retour haptique modifient-elles la perception, l'efficacité et le confort du chirurgien ?

Objectifs du TIPE du candidat

Mon objectif est de comprendre le lien entre les paramètres du retour haptique et la perception de l'utilisateur : c'est-à-dire de savoir comment varie le confort, si un paramètre nécessite plus d'effort par l'utilisateur qu'un autre ou est plus inconfortable qu'un autre. Pour montrer cela je compare trois profils qui varient selon différents paramètres. J'aimerai aussi par la suite étudier la stabilisation du retour haptique face aux perturbations respiratoires.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] SCINTU P. -F.; NORD B. : État de l'art de la chirurgie robotique : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1959756820300936>
- [2] JOCELYNE TROCCAZ : La robotisation en chirurgie. Les concepts. Pr Xaver Martin. Robotisation de la chirurgie. Etat des lieux, Académie Nationale de Chirurgie, 2020. : [ffhal-02987755f](https://doi.org/10.1016/j.ffa.2020.02.001)
- [3] FLORENT NAGEOTTE; SALIH ABDELAZIZ : Robotique médicale - Contraintes, spécificités et défis. : <https://doi.org/10.51257/a-v1-s7789>
- [4] WALID ZARRAD : Téléopération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive : *Walid Zarrad. Télé-opération avec retour d'effort pour la chirurgie mini-invasive. Automatique / Robotique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. ffNNT : ff. fftel-00263824f*
- [5] NABIL ZEMITI : Commande en effort des systèmes robotiques pour la chirurgie mini-invasive : *Nabil Zemiti. Commande en Effort des Systèmes Robotiques pour la Chirurgie Mini-Invasive. Automatique / Robotique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2005. Français. ffNNT : ff. fftel-00011767*

[6] MATHIEU JOINIÉ-MAURIN : Téléchirurgie robotisée au contact d'organes mobiles. :

https://publicationtheses.unistra.fr/public/theses_doctorat/2012/Joinie-Maurin_Mathieu_2012_ED269.pdf

[7] LENNART RUBBERT : Conception de mécanismes compliants pour la robotique

chirurgicale : *https://theses.hal.science/tel-00801892/file/Rubbert_Lennart_2012_ED269.pdf*

Modélisation du mouvement d'un pendule double

Ma motivation pour le pendule double est apparue lorsque j'ai appris, malgré sa "simple apparence", que le pendule possédait un mouvement irrégulier et même qualifié de chaotique. En effet, en observant son fonctionnement, je me suis rendu compte que son mouvement n'était jamais identique, bien qu'avec les mêmes conditions initiales.

Le pendule simple illustre le cycle par son mouvement périodique oscillatoire. Le passage au pendule double, que je vais tenter d'asservir, introduit des boucles de rétroactions complètes et une sensibilité aux conditions initiales. La modélisation informatique repose sur des boucles itératives (algorithme d'Euler) pour résoudre les équations.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Mécanique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Pendule</i>	<i>Pendulum</i>
<i>Mécanique</i>	<i>Mechanics</i>
<i>Mouvement chaotique</i>	<i>Chaotic movement</i>
<i>Lagrangien</i>	<i>Lagrangian</i>
<i>Déterminisme</i>	<i>Determinism</i>

Bibliographie commentée

Pour commencer, le pendule double est un système emblématique de la mécanique non linéaire et est souvent cité comme un exemple d'un comportement chaotique émergent à partir d'un dispositif simple. L' étude de ce système s'inscrit dans la continuité historique des travaux sur le pendule simple elle-même étudiée dès l'époque de Galilée et de Newton pour comprendre les lois du mouvement oscillatoire. Avec le pendule double, il est facile d'aborder un niveau de complexité supérieur où de simples ou de minuscules variations des conditions initiales entraînent des évolutions qui peuvent être similaires comme totalement différentes, illustrant concrètement la sensibilité au chaos.

Les ressources que j'ai effectuées permettent de relier l'histoire de ce concept à une approche plutôt moderne de modélisation. Le site de M. Péchaud[1] illustre le caractère imprévisible du système à travers des simulations numériques interactives. En observant les trajectoires obtenues, j'ai bien vu que même une modélisation précise ne garantit pas une certaine prédiction du mouvement. Cette idée est approfondie dans le cours de G.Gastebois[2] qui va détailler les équations newtoniennes reliant forces, angles et vitesses angulaires par exemple. On y découvre que la complexité n'est pas due à une absence de lois mais plutôt à la non-linéarité des équations différentielles du système.

Ainsi, pour dépasser la simple approche vectorielle, l'étude du texte de J.Sornette[3] sur la mécanique lagrangienne a été essentielle. Il permet notamment de formuler le problème à partir de principes énergétiques, ouvrant ainsi la voie à une description plus élégante et généralisable du mouvement. Cette approche sera également au cœur de la modélisation menée pendant le TIPE, par exemple en reliant les notions telles que l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et de coordonnées généralisées.

De plus, la chaîne youtube Drew's Campfire[4] parle et montre dans sa vidéo que le pendule est en réalité un système déterministe. En effet, le pendule double obéit à certaines lois physiques strictes donc en connaissant les conditions initiales des angles et des vitesses, le futur du système est unique sans hasard interne. Pourtant, l'effet papillon qui illustre la sensibilité extrême aux conditions initiales sans un système dynamique est souvent présent, impliquant que le pendule double prouve que le déterminisme n'implique la prédictibilité à long terme. "C'est un système mathématiquement parfait mais humainement imprévisible". En revanche, il apparaît peut-être des solutions en choisissant judicieusement les conditions initiales en couplant ce système avec des correcteurs.

Enfin, le travail pratique de M.Buffat[5] propose une mise en œuvre informatique complète en Python, reliant théorie et expérimentation numérique. Il illustre parfaitement comment la simulation peut devenir un outil de recherche à part entière pour étudier les systèmes chaotiques.

Problématique retenue

Dans quelles mesures la modélisation physique et informatique permettent-elles de s'affranchir de la sensibilité aux conditions initiales pour prédire le mouvement d'un système, de la régularité cyclique du pendule simple à la complexité chaotique du pendule double ?

Objectifs du TIPE du candidat

Je vais commencer par la conception du pendule simple et décrire son mouvement grâce à la mécanique newtonienne (je simplifierai pour montrer que le mouvement est linéaire dans

l'approximation des petits angles). J'étudierai ensuite le pendule double en adoptant une approche lagrangienne du problème et en essayant de voir s'il est possible de reproduire plus ou moins les mêmes cycles pour des conditions initiales différentes par exemple et je finirai en proposant des modélisations et simulations informatiques qui permettent de réduire le phénomène de "déterminisme" au maximum pour prédire au mieux le mouvement du pendule double.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] M. PÉCHAUD : Chaos : l'exemple du pendule double : <https://mpechaud.fr/scripts/penduledouble/pendule.html>
- [2] GILBERT GASTEBOIS : Le pendule double : https://ggastebois.fr/java/double/theorie_pendule_double.pdf
- [3] JOEL SORNETTE : Initiation à la mécanique lagrangienne et hamiltonienne : <https://www.joelsornette.fr/ressources/textes/cours216-2a.pdf>
- [4] DREW'S CAMPFIRE : Repousser les limites de la simulation pour trouver l'ordre dans le chaos : <https://youtu.be/8jVogdTJESw?si=RDEhknFf-4XPRtoR>
- [5] MARC BUFFAT : TP mouvement du pendule : https://perso.univ-lyon1.fr/marc.buffat/COURS/BOOK_PYTHON_SCIENTIFIQUE_HTML/MGC2028L/cours/source/06_TP_Trajectoire/TP_trajectoire_etu.html

Titre : Etude de la viabilité de la paille dans le secteur du bâtiment en terme de résistance thermique et mécanique.

Etant grandement intéressé par l'agriculture, j'ai voulu axer mon TIPE autour de l'étude d'un matériau agricole afin d'y trouver d'autres utilisations dans une démarche écologique et environnementale.

Etudier l'usage de la paille dans le bâtiment, c'est s'intéresser à un matériau renouvelable, inscrit dans le cycle biologique de la biomasse, ainsi qu'au recyclage d'un résidu agricole en nouvelle ressource du bâtiment.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*
- *PHYSIQUE (Physique Théorique)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Resistance des matériaux *Strength of materials*

Isolation thermique *Thermic isolation*

Botte *Ball*

Déformation *Deformation*

Humidité *Humidity*

Bibliographie commentée

[1] On souhaite étudier la déformation d'un matériau porteur. On étudie donc la résistance mécanique de plusieurs matériaux en compression en déterminant expérimentalement une courbe contrainte (Pa)-déplacement (m) qui va permettre d'identifier la contrainte à la rupture et le module de Young (pente de la courbe) du matériau afin de comparer la résistance mécanique de chaque matériaux. L'étude présentée dans la thèse met également en évidence l'incidence de l'ajout d'enduit sur la réponse de la paille à un effort de compression.

[2] Afin d'évaluer les performances d'un matériau d'isolation, on étudie principalement trois caractéristiques. Cet article se concentre plus particulièrement sur la conductivité thermique,

caractérisée par le coefficient λ , qui constitue un paramètre fondamental pour comparer l'efficacité des isolants. Le coefficient λ mesure la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur : plus sa valeur est faible, plus le matériau est isolant.

L'article met ensuite en relation cette grandeur avec la résistance thermique R , qui dépend à la fois de la conductivité thermique et de l'épaisseur du matériau, selon la relation $R=e/\lambda$. On relie alors une propriété intrinsèque du matériau à sa performance réelle dans un secteur donnée et on en déduit que: Plus la résistance thermique R est élevée, plus le matériau est isolant et, à épaisseur d'isolant égale, plus le coefficient λ est petit, plus le matériau est isolant

[3] L'étude de la déformation de bottes de foin au sein d'un mur passe d'abord par des calculs de résultantes de force exercé sur celle-ci. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude en statique afin de calculer des résultantes de force extérieur appliqués à/aux bottes. On passe alors par des calculs d'intégral pour déterminer l'effort appliqué à la surface de la paille. Une étude à mettre en lien avec la détermination des courbes contrainte (Pa)-déplacement (m).

[4] On a vu dans [1] la possible utilité de l'ajout d'enduit à la paille, il apparaît alors nécessaire d'obtenir des informations sur ce type de matériaux dans le cadre de l'optimisation des caractéristiques thermiques et mécaniques de la paille. L'enduit est de plus appliqué en une ou plusieurs couches, chacune ayant un rôle spécifique (accrochage, corps d'enduit, finition), il est généralement composé d'un liant (chaux, ciment ou mélange des deux), ce qui conditionne ses propriétés mécaniques et physiques. Selon sa formulation, il peut présenter une bonne adhérence au support et une résistance mécanique accrue (augmentation de la résistance à la traction).

[5] En plus d'être facile à poser sur une façade et compatible environnementalement (utilisation de matériaux naturels envisageable) l'enduit s'avère utile dans l'augmentation de la résistance thermique d'une façade.

Problématique retenue

En quoi la paille s'impose comme un matériau viable dans le secteur du bâtiment et comment améliorer ses propriétés thermiques et mécaniques ?

Objectifs du TIPE du candidat

-Etudier la résistance mécanique de la paille;

-Démontrer la viabilité de la paille face aux isolants thermiques usuels par une étude de résistance thermique;

-Déterminer le matériau le plus pertinent à ajouter pour augmenter la résistance mécanique de la paille.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] GILLES FORÊT, CÉDRIC HAMELIN, MYRIAM OLIVIER : LA BOTTE DE PAILLE, MATERIAU PORTEUR : <https://enpc.hal.science/hal-00940081/document#:~:text=Le%20module%20d'Young%20E,compression%20de%201%2C9%20MPa>
- [2] : Comment évaluer la performance d'un isolant ? : <https://www.toutsurlisolation.com/lambda-isolation-performance-thermique>
- [3] PAUL AIGROT : A-Dynamique (entier).pdf : https://drive.google.com/file/d/0Bzkjd57b7iwBc3ZxRUhhT2ZMQk0/view?usp=drive_link&resourcekey=0-7qQtqDpgAJgyi6V5ALtcHg
- [4] CAPEB (CONFÉDÉRATION DE L'ARTISANAT ET DES PETITES ENTREPRISES DU BÂTIMENT) : Guide travaux d'enduits de mortiers de façade : <https://www.capeb.fr/www/capeb/media///guide2012-capeb-bd-bat.pdf?>
- [5] GROUPE SOLVARI : Enduit Isolant : <https://www.isolation-info.fr/isolation-mur-exterieur/enduit-isolant#:~:text=La%20pose%20d'un%20enduit,pour%20r%C3%A9duire%20sa%20consommation%20%C3%A9nerg%C3%A9tique.>

Étude d'une Boucle à Induction Magnétique pour appareil auditif

Après avoir essayé de réparer l'appareil auditif de mon Grand père, j'ai appris que le sien fonctionnait aussi par boucle d'induction magnétique (BIM). Ayant trouvé ce système très intéressant et puisque celui-ci permet d'aider une grande partie de la population –toutes les personnes malentendantes, j'ai décidé de l'étudier.

Cette technologie, installée principalement dans les lieux publics, utilise de long fils électriques étendus (pour les BIM fixes) sous une pièce, formant ainsi une grande boucle entourant la pièce. L'étude de la transmission de signal par cette boucle est donc cohérente avec le thème de l'année.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Théorique)*
- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

<i>Champ magnétique</i>	<i>Magnetic field</i>
<i>Signal audio</i>	<i>Audio signal</i>
<i>Fréquence</i>	<i>Frequencies</i>
<i>Réception du signal</i>	<i>Signal reception</i>
<i>Boucle d'induction</i>	<i>Induction Loop</i>

Bibliographie commentée

Aujourd'hui, la plupart des appareils auditifs fonctionnent de la façon suivante : un microphone capte les sons ambiants qui, une fois traité et amplifié, est restitué par l'écouteur dans l'oreille du malentendant. Ce système bien que très utile dans les situations de tous les jours n'est pas idéal lorsque le malentendant doit concentrer son écoute sur une seule source auditive dans un environnement bruyant. Par exemple, il lui est difficile d'écouter la réceptionniste d'un aéroport lorsque son appareil amplifie aussi tous les bruits et discussions alentour. De même dans une salle de conférence pour la voix du présentateur.

Pour résoudre ce problème, certains appareils auditifs utilisent un système de Boucle Inductive Magnétique (BIM)[7]. Celui-ci transmet un signal sonore non pas par voie acoustique mais par un champ magnétique.

Le principe des BIM s'appuie sur l'induction électromagnétique. Un courant électrique modulé par le signal audio circule dans une boucle conductrice (bobine émettrice). Conformément à la loi de Maxwell-Ampère[6], ce courant génère un champ magnétique variable B . La géométrie du champ et sa décroissance spatiale sont modélisées par la loi de Biot et Savart [5]. Enfin, la loi de Faraday [6] explique comment la bobine réceptrice de l'appareil auditif (le "télécoil") convertit cette variation de flux magnétique en une force électromotrice, restituant ainsi le signal sonore original dans l'oreille de l'utilisateur sans les perturbations acoustiques ambiantes.

Bien qu'ingénieuse, cette technologie se heurte toutefois à certaines contraintes de puissance et de portée. En effet, la difficulté de ce système réside notamment dans le fait que la tension induite de la bobine réceptrice diminue fortement avec la distance. Dans notre cas la distance entre la bobine émettrice et l'appareil auditif est d'environ 1.2m pour une BIM fixe placée sous le sol (salles de conférences). Pour une BIM portable (guichet dans les aéroports) elle est moins élevée.[4] Il faut donc trouver un moyen d'amplifier le signal d'entrée.

Pour résoudre ce problème, les entreprises utilisent le fait que le champ magnétique créé par un fil est proportionnel au courant. Elles utilisent donc des amplificateur de courants tel que le PROLOP NX7 LOS [3] pour créer un plus grand et puissant champ magnétique afin que le signal capté soit suffisant.

Enfin, les entreprises ne peuvent pas augmenter la portée et la puissance du champ magnétique à leur guise. Ces derniers doivent suivre certaines normes tel que la norme NF EN 60118-4 qui limite le courant maximum dans l'appareil auditif afin d'éviter les saturations du signal. [2]

Pour la portée, afin d'éviter les problèmes de Diaphonie (influence du champ magnétique créé par la boucle d'une salle sur une autre salle proche) les salles doivent être espacées d'une certaine distance. Il existe cependant certaines dispositions de boucle qui permettent d'atténuer les champs extérieurs. [1]

Problématique retenue

Comment modéliser le champ magnétique d'une BIM fixe et comment l'optimiser pour répondre aux contraintes énergétiques et de diaphonie ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Trouver la fréquence d'émission du signal

- Simuler la propagation du champ magnétique pour une BIM fixe d'une salle de conférence
- Faire l'expérience pour pouvoir comparer avec la théorie
- Trouver quelle point il faut amplifier le courant pour avoir un signal audible

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] MAJORCOM : Boucle d'Induction Magnétique : <https://www.majorcom.fr/boucle-induction-magnetique/>
- [2] ELECTROACOUSTIQUE CONSULTANT (EAC) : Norme NF-EN 60118-4 : <https://www.eac84.com/librairie/norme-nf-en-60118-4.pdf>
- [3] AUDIOROPA : Fiche Technique : PROLOOP NX7 LOS – Amplificateur de boucle d'induction magnétique : <https://fra-connect.mo.cloudinary.net/PRODUCT/DOCUMENT/563/FTC-PROLOOP-NX7-LOS-FR.pdf?ts=1756332340585>
- [4] DÉLÉGATION MINISTÉRIELLE À L'ACCESSIBILITÉ (DMA) : BIM fixes et portables : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DMA%20-%20La%20BIM%20en%20question.pdf>
- [5] MICHEL FIOC, INSTITUT ASTROPHYSIQUE DE PARIS : Loi de Biot et Savart : <https://www2.iap.fr/users/fioc/enseignement/LU2PY121/Biot-Savart.pdf>
- [6] MICHEL FIOC, INSTITUT ASTROPHYSIQUE DE PARIS : Equations de Maxwell : <https://www2.iap.fr/users/fioc/enseignement/LU2PY121/Maxwell.pdf>
- [7] AUDIKA : Boucle magnétique et appareils auditifs : fonctionnement, avantages et accessibilité : <https://www.audika.fr/appareils-auditifs/types/bluetooth/boucles-magnetiques>

Étude et modélisation d'un onduleur pour la génération d'un courant sinusoïdal

La démocratisation des énergies renouvelables et des dispositifs électroniques domestiques rend essentielle l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique. L'onduleur permet cette conversion. Ce sujet permet donc de relier électronique de puissance, asservissement et traitement du signal à une application concrète du quotidien.

Le fonctionnement d'un onduleur repose sur des signaux créneaux générés par un système de modulation de largeur d'impulsion. L'asservissement du système utilise des boucles de rétroaction permettant de contrôler la forme du signal de sortie et d'améliorer sa qualité.

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Génie Energétique)*
- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Traitement du Signal)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

conversion d'énergie *energy conversion*

asservissement *feedback*

électronique de puissance *power electronics*

performance *performance*

traitement du signal *signal processing*

Bibliographie commentée

La croissance exponentielle de la demande en énergie observée depuis plusieurs décennies implique une forte hausse de la production [1]. Toutefois, celle-ci se heurte à des enjeux sociétaux et environnementaux. Le développement des énergies renouvelables et des systèmes de stockage réaffirme l'importance des dispositifs de conversion d'énergie électrique, pour l'intégration de ces sources dans le réseau électrique.

Parmi ces dispositifs, l'onduleur occupe une place centrale. Il permet de convertir une source de tension ou de courant continu en une grandeur alternative exploitable par les équipements

branchés sur le réseau. Son fonctionnement peut reposer sur un système de modulation de largeur d'impulsion (PWM) [2], produisant un signal périodique riche en harmoniques, éloigné d'un signal sinusoïdal idéal. La modélisation et la commande de ces systèmes constituent ainsi un enjeu majeur de l'électronique de puissance.

De nombreux travaux se sont intéressés à la modélisation et à l'étude des onduleurs PWM, ainsi qu'aux stratégies de commande permettant d'améliorer la qualité du signal de sortie. En particulier, l'utilisation de systèmes asservis permettant d'ajuster dynamiquement le fonctionnement de l'onduleur [3] afin de mieux contrôler la forme du courant délivré.

Cependant, même avec une commande adaptée, le signal obtenu reste fortement déformé. L'utilisation de filtres de sortie (RL, LC) est alors nécessaire pour atténuer les harmoniques indésirables et se rapprocher d'un signal sinusoïdal. Le choix de ces filtres influence directement les performances du système, notamment en termes de distorsion harmonique et de stabilité [4].

Problématique retenue

Comment fonctionne un onduleur et comment l'optimiser?

Objectifs du TIPE du candidat

L'objectif de ce TIPE est de concevoir et de modéliser un onduleur commandé par PWM et d'étudier l'influence des différents filtres sur la qualité du signal de sortie. On cherchera à obtenir une tension la plus proche possible d'un signal sinusoïdal, en analysant les performances et les limites du système.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] KÉVIN DURUISSEAU : Transition énergétique et géographie : le photovoltaïque au sol dans le sud de la France : *Thèse de doctorat en Géographie, Aix-Marseille Université, 2016*

[2] ZOHRA, BOUDJELLA FATIMA : Etude, Modélisation et Réalisation d'un Onduleur à Modulation Précalculée. Application à La Mutualisation Des Énergies Renouvelables Par Le Réseau de Distribution : <https://dspace.univ-sba.dz/items/ad016c59-8d99-4bed-a6c0-d7b8a8523d59/full>

[3] ERTASGIN, GURHAN, ET DAVID M. WHALEY : Enhanced Three-Phase Inverter Control: Robust Sliding Mode Control with Washout Filter for Low Harmonics. : <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/22/5889>

[4] BI, FEIYANG : Comprehensive Review on Harmonic Suppression by Filters in PWM Inverter Circuits : *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection, vol. 3, no 14, août 2025.*

Système automatique d'aide à l'atterrissage

L'atterrissage est une phase critique du vol, surtout pour les avions légers où les aides électroniques sont souvent limitées. L'utilisation d'une caméra embarquée pour analyser la piste et en déduire la pente d'approche pourrait améliorer la sécurité des pilotes.

Ce projet explore les cycles de rétroaction visuelle en couplant traitement d'image, modélisation mathématique et automatisation. L'ajustement continu de la loi de consigne illustre une boucle dynamique, s'inscrivant ainsi dans le thème des cycles et boucles.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *MATHIEU Julia*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *SCIENCES INDUSTRIELLES (Automatique)*

- *INFORMATIQUE (Informatique pratique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Asservissement en position Position control

Détection de pente Slope detection

Loi de consigne Setpoint law

Atterrissage assisté Assisted landing

Traitement d'images Image processing

Bibliographie commentée

L'analyse d'image appliquée à l'aide à l'atterrissage s'appuie sur des méthodes robustes permettant d'extraire des structures géométriques pertinentes dans des conditions visuelles variables. Les travaux pionniers sur la détection de contours [1] et la détection de lignes [2] constituent la base de nombreux systèmes actuels. Dans notre projet, ces techniques permettent d'isoler l'axe de piste et d'identifier le seuil, première étape indispensable avant toute estimation géométrique.

La détection de contours constitue un outil de référence pour l'extraction de structures linéaires dans une image [1]. Elle est essentielle pour repérer les bords de la piste et le point cible. Par ailleurs, Duda et Hart [3] généralisent et formalisent la transformée de Hough, permettant de détecter des lignes droites dans une image, même en présence de bruit. Ces méthodes sont aujourd'hui implémentées dans des bibliothèques comme OpenCV, largement utilisées en robotique et en aéronautique.

Lors de la phase d'atterrissage, les pilotes de ligne utilisent des systèmes d'assistance tels que l'ILS (Instrument Landing System) ainsi que des aides visuelles comme le PAPI (Precision Approach Path Indicator). Ces dispositifs permettent de vérifier que l'avion suit la pente d'approche optimale, garantissant ainsi la sécurité des passagers et de l'équipage. Cependant, ces systèmes ne sont généralement pas disponibles sur les petits aérodromes, où les procédures d'approche reposent davantage sur les compétences visuelles et l'expérience des pilotes. De plus, les petits avions, souvent plus légers et moins équipés que les appareils de ligne, sont davantage soumis aux turbulences, ce qui rend la précision de l'approche et la stabilité de l'atterrissage encore plus critiques.

La suite du traitement s'inscrit dans le cadre de l'automatique. Une fois la pente estimée, il s'agit de construire une loi de consigne stable permettant de déterminer si l'avion est trop haut, trop bas ou à la pente idéale [4]. Les systèmes d'aide au pilotage modernes reposent largement sur ces principes : filtrage, correction et rétroaction. Cette approche est cohérente avec les pratiques des systèmes embarqués aéronautiques [5], qui doivent assurer une réponse fiable et rapide malgré les perturbations et les incertitudes.

Enfin, des travaux récents sur l'estimation de pose en temps réel et la vision embarquée [6], ainsi que des projets open-source comme ArduPilot [7], démontrent que la vision artificielle peut être intégrée sur des plateformes compactes et accessibles, offrant des systèmes performants pour l'aviation légère, combinant traitement d'image, modélisation géométrique et génération de consignes en temps réel.

Problématique retenue

Comment, à partir d'une séquence d'images capturées par une caméra embarquée, estimer en temps réel la pente d'approche d'un avion léger et générer une loi de consigne pour guider le pilote vers un atterrissage optimal ?

Objectifs du TIPE du candidat

Analyse de la géométrie lors d'un cycle d'atterrissage

Etablir le cahier des charges/exigences

Développer une loi de consigne basée sur la rétroaction visuelle, en utilisant des outils d'automatique (PID)

Concevoir un axe de tangage asservi pour cadrer la piste

Simuler le système sur des séquences d'images réelles ou synthétiques, pour évaluer sa robustesse et sa précision.

Comparer les résultats avec des systèmes existants (ILS, GPS) et discuter des limites (conditions météo, résolution, latence).

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

[1] : Détection de contours — Tutoriel FR (implémentation OpenCV) : <https://www.aranacorp.com/fr/detection-de-contour-avec-opencv-et-python>

[2] : Détection de lignes — Transformée de Hough (FR) : <https://www.aranacorp.com/fr/detection-dune-ligne-avec-python-et-opencv>

[3] DUDA : Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. Communications of the ACM, 15(1), 11-15.

[4] MINES PARIS : Introduction à l'asservissement & lois de commande — Cours Mines Paris (FR) : https://uma.ensta-paris.fr/~chauvin/automat/cours/cours_auto.pdf

[5] DGAC : Systèmes d'aide au pilotage — STAC / DGAC (FR) : <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr>

[6] : Pose estimation & vision embarquée — Documentation OpenCV (EN) : https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html

[7] : Plateformes embarquées aéronautiques open-source — ArduPilot (EN) : <https://ardupilot.org>