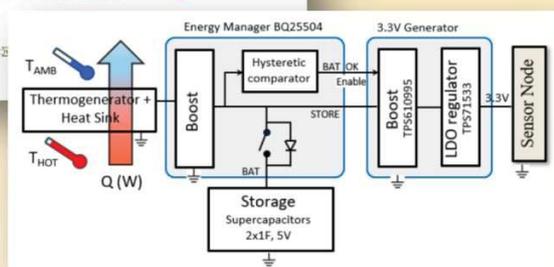
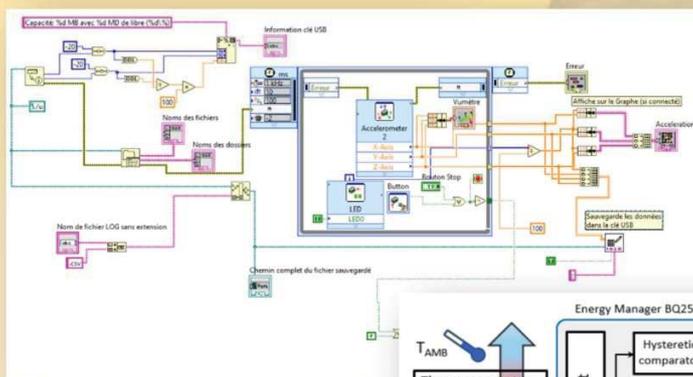
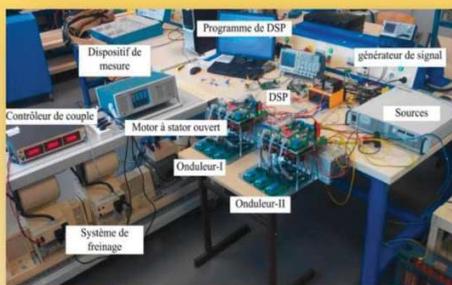
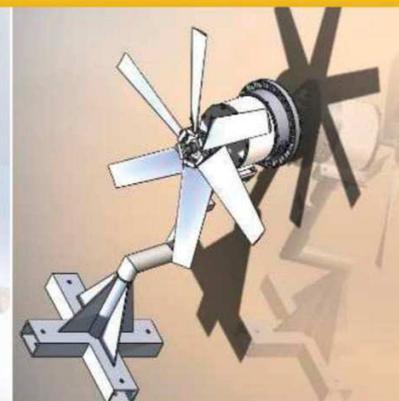
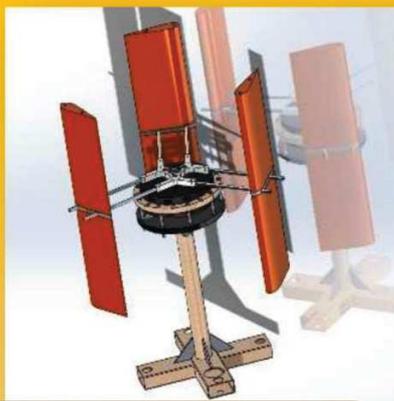
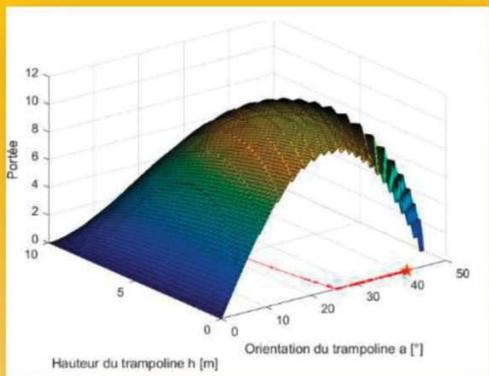


La Revue SEE



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



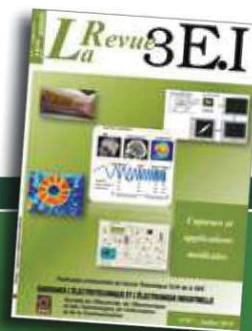
IDEES DE PROJETS ET ENSEIGNEMENT A DISTANCE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication

Abonnez-vous à *La* Revue 3E.I



- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes et des femmes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre
- 3 dossiers complets par an sur des sujets d'actualité + 1 N° Pratique pédagogique

BULLETIN D'ABONNEMENT 2021

À compléter et renvoyer : SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris - France - Tél. 01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr



VERSION PAPIER

4 numéros : janvier, avril, juillet, octobre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 40 € TTC	<input type="checkbox"/> 49,18 € HT



VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter
de la date de paiement

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 30 € TTC	<input type="checkbox"/> 29,38 € HT



VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 50 € TTC	<input type="checkbox"/> 58,97 € HT

VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès e3E.I
- + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC
+ Abonnement 3E.I (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 32 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 41,34 € HT

TVA de la revue 3E.I : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de €

par Chèque à l'ordre de la SEE

Virement après réception de la facture

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité N° cryptogramme (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 Paris ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr
Offre valable du 01/01/2021 au 31/12/2021.

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° :
et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date

Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



ABONNEMENT + RAPIDE : <https://www.see.asso.fr/3ei>

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE.
Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site
www.see.asso.fr/3ei





La Revue 3EI
publication trimestrielle
de la SEE

SOCIÉTÉ de l'ÉLECTRICITÉ, de l'ÉLECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, 75116 PARIS
Tél : 01 56 90 37 17
site web : www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

	Sommaire du n° 102
<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 PARIS</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei@gmail.com ou sur le site https://www.see.asso.fr/3ei rubrique "soumettre un article"</p> <p>Communication : Mme. Mélisande DE LASSENCE Communication1@see.asso.fr 01 56 90 37 17</p> <p>Promotion et Abonnements : (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2020. Tél : 01 56 90 37 17 abo@see.asso.fr</p> <p>Tarifs 2020 :</p> <p>Version PAPIER :</p> <p>France et UE (TTC).....40 € Pays hors UE (HT)..... 49,18 €</p> <p>Version NUMÉRIQUE :</p> <p>France et UE (TTC).....30 € Pays hors UE (HT)..... 29,38 €</p> <p>Version DUO (Papier+Num.) :</p> <p>France et UE (TTC).....50 € Pays hors UE (HT) 58,97 €</p> <p>Impression : JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Octobre 2020 Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p>Idées de projets et enseignement à distance</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 <i>Cartable Distant : Un environnement numérique complet pour l'enseignement pratique à distance</i> Bastien VINCKE, Bruno DARRACQ, Sergio RODRIGUEZ, Roger REYNAUD, Benoît TONNERRE IUT d'Orsay, Université Paris Saclay</p> <p>p. 9 <i>Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : Séance de travaux pratiques distanciels asynchrones 2/3</i> Agathe DUPAS¹, Javier OJEDA² 1 Lycée Polyvalent de Cachan 2 Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette</p> <p>p. 28 <i>Les éoliennes urbaines et le concours GIMEole comme supports et contexte de projet tuteuré en IUT</i> Stephane RODDIER, Arnaud BRUGIER, Thomas JOSEPH Département GIM de l'IUT de Saint-Denis</p> <p>p. 51 <i>Identifications paramétriques et Optimisation appliquées un problème de Mécanique</i> Adrien SPECHT & Pierric MELEARD ENS Paris-Saclay</p> <p>p. 61 <i>Alimentation d'un capteur sans fil basse consommation en environnement industriel : récupération d'énergie avec un thermogénérateur et stockage sur supercapacités.</i> Vincent BOITIER, Lionel SEGUIER, Xavier DOLLAT, Florian HUET, Jean Marie DILHAC, Université de Toulouse, UPS, LAAS</p> <p>p. 72 <i>Réalisation d'un DataLogger Autonome sur MyRIO</i> Jean-Philippe ILARY IUT GEII – Ville d'Avray</p> <p>p. 75 <i>Electro mobilité : commande d'un double-onduleur</i> Khalil EL KHAMLICHI DRISSI¹, Christophe PASQUIER¹ et Alain JAAFARI² 1 Université Clermont Auvergne, Institut Pascal 2 Advanced ElectroMobility, AEM, Beaumont</p>

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Numéro 102 de la revue 3EI

« N° 102 : Idées de projets et enseignement à distance »

Dans notre dernier numéro, nous avons orienté nos publications sur l'urgence du moment : l'enseignement en distanciel. Nous avons dû nous adapter à ce mode particulier d'enseignement et nous sommes nombreux à être en demande de matériels et de retour d'expérience. C'est d'autant plus vrai que, après le répit des vacances d'été, nous sommes à nouveau confrontés à cette nécessité de jongler entre présentiel et distanciel que ce soit en entreprise ou dans l'enseignement.

Le comité de rédaction de la revue 3EI souhaite donc prolonger cette réflexion sur les outils que l'on peut utiliser en distanciel et sur les idées de projets que nous pouvons envisager dans nos formations. Nous poursuivrons dans cette veine dans les premiers numéros de 2021. N'hésitez donc pas à nous faire part de vos expérimentations.

Ce numéro 102, s'ouvre avec l'article de l'équipe de M. Vinckle de l'IUT d'Orsay qui présente une solution très innovante permettant de mettre en œuvre des TP à distance. En effet, le département Mesures Physiques de l'IUT d'Orsay a mis en place durant le confinement une solution numérique (dite « Cartable Distant ») ayant permis d'assurer une continuité pédagogique à distance avec notamment la réalisation de TP d'électronique.

L'article de Mme Dupas et de M. Ojeda fait suite au premier article de M. Ojeda publié dans le numéro 101 de la revue 3EI. Ils poursuivent l'exposé des outils numériques logiciels par le biais du langage Python et du notebook Jupyter.

L'équipe de Stéphane Roddier, Arnaud Brugier et Thomas Joseph de l'IUT de St Denis aborde les organisations pédagogiques et matérielles nécessaires à la réalisation du concours national GIMEole à l'IUT. Ils présentent également les derniers développements et évolutions des petites éoliennes urbaines produites à cet effet au sein du « GIMlab » et baptisées « Dionysiennes ».

Adrien Specht et Pierrick Méleard, élèves de l'ENS Paris Saclay, proposent un article sur l'optimisation. Il s'appuie sur une application bien connue de la mécanique classique, et vise à déterminer les paramètres qui répondent au mieux à une problématique. Idéal pour une activité documentaire, ou un travail pratique, cet article présente plusieurs méthodes pour calculer un gradient, pour choisir le pas de l'algorithme, et pour optimiser.

Faisant suite à leur article publié dans le numéro 101 de la revue, l'équipe de M. Boitier du LAAS de Toulouse nous offre un article sur le dimensionnement, la caractérisation et la mise en fonctionnement d'une alimentation à faible coût, 3,3 V - 60 mA, sans pile, destinée à l'alimentation de nœuds de capteurs sans fil à faible consommation sur de très longues durées, avec un rechargement par électrothermogénération.

Dans son article, M. Ilary de l'IUT de Ville d'Avray, présente la mise en place d'un programme sur MyRIO réalisant la sauvegarde de données sur clé USB dans le but de réaliser un DataLogger embarqué. Cette application s'intègre dans le cadre d'un projet de modernisation d'un Kart électrique par les étudiants de seconde année d'IUT GEII.

M. El Khamlichi Drissi et son équipe propose une solution innovante pour la conception des véhicules électriques et hybrides. Ils proposent une structure double-onduleur associée à un moteur à stator ouvert et détaillent la stratégie de commande associée et ses performances énergétiques et harmoniques.

Comme vous pourrez le lire, les articles que nous vous proposons traitent de sujets variés et dénotent de la volonté des auteurs de partager leur travail auprès d'une communauté la plus large possible. N'hésitez pas à diffuser autour de vous ces articles et à nous proposer vos productions, qui seront on ne peut plus appréciées dans ces périodes d'enseignement à distance.

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

Faites connaître notre revue
Vous en assurez la pérennité

La Revue 3EI

Comité de publication

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Anthony JUTON

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

CARTABLE DISTANT : UN ENVIRONNEMENT NUMERIQUE COMPLET POUR L'ENSEIGNEMENT PRATIQUE A DISTANCE

BASTIEN VINCKE, BRUNO DARRACQ, SERGIO RODRIGUEZ, ROGER REYNAUD, BENOIT TONNERRE
IUT d'Orsay, Université Paris Saclay, Plateau du Moulon, 91400 Orsay
bastien.vincke@universite-paris-saclay.fr

Résumé : Fort d'une expérience de 10 ans sur la mise en œuvre d'un cartable numérique, le département Mesures Physiques de l'IUT d'Orsay a mis en place durant le confinement une solution numérique (dite «Cartable Distant») ayant permis d'assurer une continuité pédagogique à distance sur des modules à fort contenu expérimental.

L'utilisation combinée d'un serveur de bureaux distants (Apache Guacamole) et d'un outil de classe virtuelle (BigBlueButton) intégré à la plateforme Moodle de l'IUT, a notamment permis aux étudiants de réaliser à distance tous les TP de ces modules, avec du côté de l'équipe enseignante un investissement raisonnable sur l'adaptation des supports pédagogiques.

I/ Introduction

Les outils pour l'enseignement à distance ont vu leur nombre s'accroître de façon vertigineuse ces dernières années avec l'essor des Nouvelles Technologies de l'Information et de Communication (NTIC). De nombreuses technologies basées sur des plateformes d'apprentissage en ligne (Moodle, MOOCs,...) permettent aujourd'hui aux apprenants de se former à distance dans de nombreuses disciplines, notamment sur les aspects théoriques. En ce qui concerne la formation pratique sur du contenu expérimental, l'offre en ligne est assez restreinte car d'une part, les modalités techniques de mise à disposition à distance de matériel s'avèrent délicates, et d'autre part les outils permettant d'accompagner l'apprenant pour appréhender à distance la démarche expérimentale (à savoir bien dissocier le monde virtuel de l'internet du monde réel de l'expérimentation en laboratoire) n'étaient pas bien identifiés.

A ce jour, peu de formations scientifiques proposent des apprentissages expérimentaux à distance. En France le dispositif le plus abouti est sans conteste celui mis en place à l'Université de Limoges qui propose des formations scientifiques et technologiques 100% en ligne sur différents niveaux de diplôme (DUT, Licence Générale ou Professionnelle, Master) [1]. Ce dispositif s'est développé à l'international via le projet E-Lives [2] soutenu par l'agence Erasmus et l'entreprise LabsLand qui propose une offre diversifiée de TP distants (Remote Labs) en physique appliquée [3].

D'autres plateformes de TP à distance ont été mises en place dans différentes universités ou écoles d'ingénieur, parfois pour répondre à une problématique d'éloignement des campus. On peut citer, de façon non exhaustive : LaboREM à l'IUT de Bayonne [4], STEEVE à l'ENS Paris-Saclay [5], ou encore la plateforme de l'Institut Mines-Télécom de Brest [6].

A l'IUT d'Orsay, le développement d'une plateforme de TP distants, initiée depuis 2012, s'est longtemps heurtée au problème de l'accès sécurisé au matériel de l'IUT par un grand nombre d'utilisateurs depuis l'extérieur de l'Université. L'approche décrite dans cet article se structure sur la base d'Apache Guacamole qui a facilité en grande partie la mise en place de la solution.

Notre stratégie destinée à permettre aux étudiants d'augmenter leur temps de pratique sur le matériel de l'IUT en dehors des séances académiques s'était déjà concrétisée par la mise en place depuis 2009 d'un cartable numérique consistant à prêter du matériel bas coût aux étudiants.

La solution décrite dans cet article, déployée en un temps très court au début de la période de confinement due au COVID-19, résulte à la fois de la maturité de notre expérience sur le cartable numérique et les TP distants, et de l'efficacité du service informatique pour la mise en place de technologies numériques elles aussi arrivées à maturité.

II/ Le Cartable Numérique

Avec l'évolution des technologies numériques dans le domaine de l'électronique et de l'instrumentation, il est aujourd'hui possible de réaliser des systèmes portables bas coût intégrant un ensemble complet d'instruments de mesure (oscilloscope, générateur de fonction, multimètre, ...), pilotables et programmables par un ordinateur portable. Tenant compte de cette évolution nous avons proposé, depuis 2009, un système de prêt de matériel à nos étudiants dans le cadre d'un cartable numérique.

II.1/ Objectifs pédagogiques

Notre objectif était de mettre en place des outils permettant aux étudiants de travailler chez eux ou en dehors des salles spécialisées de l'IUT qui sont très occupées. Nous avons souhaité que chaque étudiant

dispose d'une carte d'acquisition et puisse emporter dans un système de prêt les cartes filles correspondant à chacun des TPs afin de pouvoir s'exercer par lui-même à la pratique de l'acquisition de données et du langage de programmation graphique LabVIEW.

II.2/ Moyens en œuvre

Notre cartable numérique consiste d'une part à prêter aux étudiants un système instrumenté compact accompagné de cartes d'extension spécifiques au type d'enseignement, et d'autre part à mettre en place une pédagogie cherchant à favoriser la motivation et l'auto-apprentissage.

Depuis 2009, nous prêtons tous les ans plus de 100 modules myDAQ de National Instrument aux étudiants de première année, ce qui leur permet travailler en autonomie sur des cartes personnalisées dédiées à la pédagogie de notre filière (DUT Mesures Physiques).

La figure 1 illustre une partie du matériel développé pour notre cartable numérique.

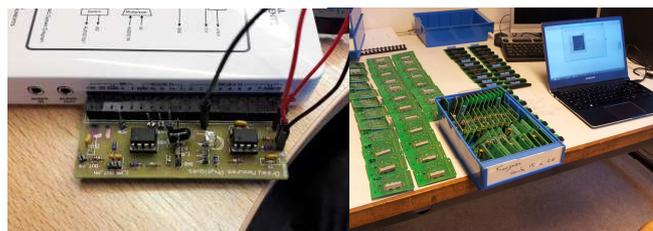


Figure 1: Exemple de matériel développé dans le cadre du cartable numérique

Le premier objectif est de pouvoir réaliser un maximum de travaux pratiques à distance. En effet, notre filière est une filière technologique (DUT Mesures Physiques) et nos étudiants réalisent en temps normal 50% de Travaux Pratiques durant leur cursus. Il était donc indispensable de trouver une solution.

Le second objectif est de permettre une pédagogie active à distance. Lors de nos premières classes virtuelles, nous avons eu beaucoup d'étudiants "fantôme" qui étaient connectés mais ne participaient pas aux interventions. Il était donc indispensable de rendre les étudiants actifs lors des classes virtuelles.

Nous aurions pu étendre le cartable numérique en prêtant du matériel à l'ensemble des étudiants. Cependant, cette solution a été vite écartée à cause des problématiques de coût et de gestion du matériel.

Nous avons donc mis en place une solution distante basée sur deux éléments : une classe virtuelle et un accès distant aux machines de notre établissement.

II.3/ Difficultés rencontrées

La pédagogie associée à notre cartable numérique a été très bien acceptée par les étudiants. L'appropriation du matériel est une étape importante pour l'implication de l'étudiant dans ces modules.

Cependant, en l'état, le cartable numérique demande une gestion coûteuse et complexe du matériel. Il est nécessaire de distribuer le matériel dans le cadre d'une convention de prêt, de réparer le matériel endommagé, d'inventorier le matériel à chaque passage des étudiants. La gestion administrative du cartable ne nous permet pas de généraliser cette solution pour l'ensemble de nos promotions. Enfin, sur un plan financier, il n'est pas envisageable de dupliquer l'intégralité du matériel. Le passage à une grande échelle de la solution cartable numérique n'est pas assuré. La solution nécessite ainsi un support distant pour pallier cette limitation.

III/ Contributions

Fort de notre expérience de cartable numérique, nous proposons une solution incluant une classe virtuelle et un accès distant à des ordinateurs hébergés par l'établissement. Cette solution nous permet, en plus de faire une classe distancielle classique, de réaliser des travaux pratiques sans que l'étudiant n'ait besoin d'avoir le matériel chez lui.

De plus, nous proposons une méthode d'interaction avec le matériel classiquement utilisé lors de travaux pratiques en électronique.

IV/ Le Cartable Distant

IV.1/ Objectifs pédagogiques

Suite au confinement dû au COVID-19, nous avons synthétisé les besoins pédagogiques que nous souhaitons garder malgré la distance.

IV.2/ Critères de sélection des outils

Afin de sélectionner nos outils, nous avons défini une liste de critères. Nous souhaitons :

- **Pouvoir utiliser du "vrai" matériel** : de nombreuses choses ont pu être réalisées en simulation mais il reste de nombreux domaines où la simulation n'est pas envisageable.
- **Pouvoir interagir avec les étudiants** : nous souhaitons pouvoir interagir selon plusieurs modalités (audio, vidéo, écran partagé).
- **Solutionner le problème d'installation de logiciels** : les étudiants disposent d'un ordinateur bureautique non spécialisé pour les applications pédagogiques. Nous souhaitons favoriser une solution qui réduise considérablement les prérequis matériels.
- **Pouvoir interagir sur le travail de l'étudiant** : lors d'une séance de TP traditionnelle, l'enseignant travaille avec chaque étudiant pour le guider vers la solution. Il nous a paru indispensable de pouvoir reproduire cette action pédagogique.
- **Travailler en petit groupe ou binôme** : les étudiants ont un comportement très différent en petit groupe. Ils ont l'habitude de travailler en binôme en TP et sont beaucoup plus actifs et efficaces dans ces conditions. Nous avons donc cherché à reproduire ce type de modalité de travail en groupe.

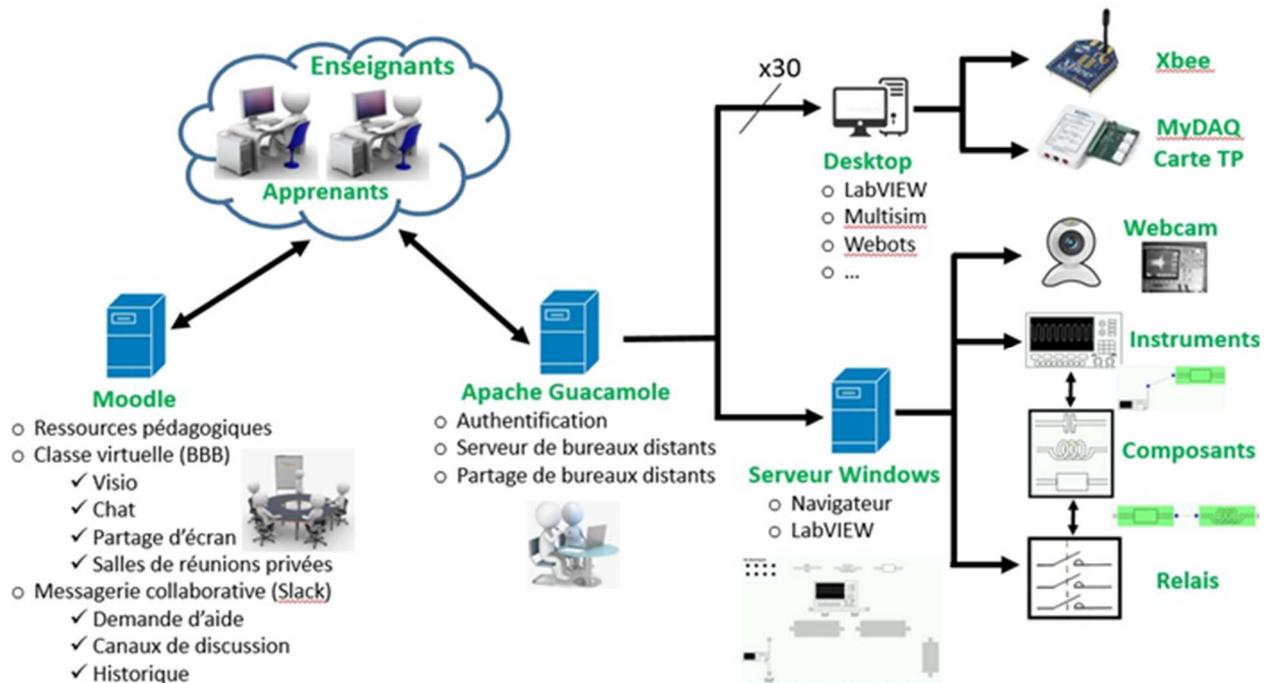


Figure 2 : Architecture du cartable distant

- **Avoir un retour d'expérience rapide des étudiants** : en classe traditionnelle, nous avons un retour très rapide des étudiants en les regardant travailler. Il est indispensable de trouver un moyen équivalent à distance.
- **Travailler sur une plage horaire étendue** : nous souhaitons permettre aux étudiants d'approfondir leur travail en dehors des séances dédiées.
- **Données hébergées à l'IUT** : nous souhaitons conserver la propriété et la maîtrise de l'ensemble de nos données en les hébergeant dans notre établissement. De plus, nous souhaitons trouver une solution peu onéreuse et pérenne.

IV.3/ Classe virtuelle

Notre premier outil est l'utilitaire BigBlueButton (BBB). Cette solution de classe virtuelle est Open-source et directement intégrée dans la plateforme d'apprentissage Moodle. Elle nécessite cependant un serveur informatique ayant de très bonnes performances.

BBB nous permet de réaliser des classes virtuelles en temps réel. La solution a été testée avec plus de 100 étudiants connectés simultanément. Elle permet de :

- **Diffuser une présentation**, la commenter et l'annoter : la présentation peut être préchargée pour permettre aux utilisateurs ayant des connexions à faible débit de garder un niveau de fonctionnement tout à fait acceptable.
- **Communiquer avec une caméra et un microphone** : il est possible de diffuser un flux audio et vidéo. Lorsque les étudiants sont en nombre important, il n'est pas souhaitable pour eux d'activer leur caméra.
- **Communiquer via un tchat** : les étudiants peuvent poser leurs questions et faire des remarques textuelles via un tchat public visible par

l'ensemble des utilisateurs. Les utilisateurs peuvent aussi communiquer sur des canaux de discussion privés.

- **Créer des groupes de travail** : BBB nous permet de créer des salons de travail pour l'ensemble des étudiants. Il est possible de les répartir très simplement (ou de les laisser se répartir) dans des salons. L'enseignant peut ensuite passer de salon en salon pour aider les étudiants et suivre leur avancement.
- **Enregistrer les sessions** : les sessions de travail peuvent être enregistrées puis mises à disposition des étudiants.
- **Réaliser des sondages** : BBB permet de réaliser des sondages très rapidement. Cela nous permet d'avoir un retour très rapide des étudiants. De plus, les sondages peuvent être facilement détournés pour avoir un suivi d'avancement des étudiants. Il est par exemple beaucoup plus efficace de demander de valider le sondage lorsqu'ils ont fini un exercice plutôt que de leur demander d'écrire sur le tchat.

La solution proposée par BBB a de nombreux avantages pour nous : intégration à Moodle, Open-source, etc ... Elle répond à l'ensemble des critères que nous avons défini concernant la classe virtuelle.

IV.4/ Accès distant

La mise en place de la classe virtuelle nous a permis de retrouver en environnement de salle de classe ainsi que la possibilité de travailler en petits groupes. Il nous restait à trouver une solution permettant aux étudiants d'avoir accès aux matériels et aux logiciels que l'on utilise habituellement.

Nous avons donc mis en place l'utilitaire Apache Guacamole. Cet utilitaire permet de faire un lien entre un client (étudiant) et un ordinateur de l'IUT en utilisant le bureau à distance de Windows ou un serveur VNC sous Linux. Concrètement, l'étudiant, à travers un navigateur web, accédera à la liste de tous les ordinateurs disponibles. Il pourra ensuite se connecter sur l'un d'entre eux et avoir accès au bureau de l'ordinateur comme s'il était en face de l'ordinateur.

Nous avons structuré virtuellement notre serveur exactement de la même manière que la disposition de salles de l'IUT. Les étudiants retrouvent ainsi les mêmes noms de bâtiment et de salles (cf. Figure 4).

Il est donc possible d'accéder via un bureau à distance à l'ensemble des ordinateurs de notre établissement. Il faut cependant que les ordinateurs soient allumés. De plus, le principal avantage a été de pouvoir installer sur les ordinateurs l'ensemble du matériel pédagogique. La Figure 3 illustre une salle de notre établissement durant la période de confinement. On remarque nos périphériques USB installés sur chaque poste. Les étudiants peuvent donc se connecter sur l'ordinateur et utiliser le matériel connecté.

Il faut souligner que cette solution permet à l'étudiant d'utiliser l'ensemble des ressources numériques de l'établissement. La solution ne nécessite aucune installation mais uniquement un navigateur web compatible HTML5.

Apache Guacamole permet aussi de partager une même session entre plusieurs utilisateurs. Il est possible pour deux étudiants de partager la même session mais aussi à un enseignant de s'y connecter pour aider les étudiants dans leurs manipulations. En couplant BBB et Guacamole, il est alors possible d'agir sur un même ordinateur tout en dialoguant en audio ou vidéo.

La gestion du matériel a été significativement simplifiée par rapport au cartable numérique. En effet, nous avons dû installer le matériel sur chaque poste et s'assurer que le matériel était en état de fonctionnement. Cette solution permet de se franchir des limitations d'échelle (en coût et en logistique) du cartable numérique.

Concernant la sécurité, Apache Guacamole est connecté sur le système d'authentification de notre établissement (LDAP) pour gérer les accès. Il est ensuite possible de donner des droits évolutifs aux utilisateurs.



Figure 4: Salle de TP accessible à distance avec le matériel installé

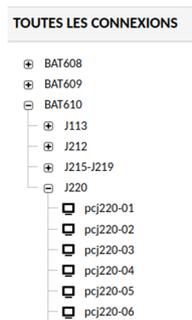
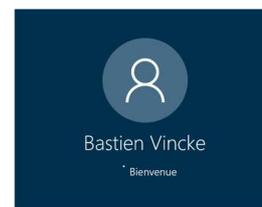


Figure 3 : Notre bâtiment virtuel et le lancement d'une session



Enfin, nous cherchions une solution à bas coût pour cet accès distant. La solution mise en place n'a nécessité que la mise en place d'une machine virtuelle pour héberger Apache Guacamole donc une solution à faible coût.

V/ Architecture de notre cartable distant

La Figure 2 représente l'ensemble de l'architecture informatique et électronique mise en place. On retrouve les éléments suivants :

- **Moodle** : notre plateforme d'apprentissage en ligne (LMS), que les étudiants utilisent quotidiennement, et dans laquelle nous avons inclus notre classe virtuelle (BBB). Cette plateforme contient aussi toutes les ressources pédagogiques nécessaires au bon fonctionnement des enseignements.
- **Apache Guacamole** : un serveur qui permet de mettre à disposition des étudiants et des enseignants les ressources informatiques de l'IUT à distance. Les utilisateurs se connectent par internet directement sur un ordinateur. De plus, cet utilitaire permet de travailler à plusieurs sur un même poste en session partagée.
- **Ordinateurs** : il s'agit des ordinateurs classiques de l'IUT. Nous avons, en plus, ajouté du matériel connecté en USB (cartes myDAQ, Xbee) pour permettre aux étudiants de réaliser leur travaux pratiques.

VI/ Interaction avec le matériel

Classiquement, lorsque l'on réalise un TP en classe, les étudiants sont amenés à manipuler du matériel. Ils doivent, par exemple, réaliser un câblage électronique. En l'état, avec notre solution distante, il n'est pas possible de manipuler directement le matériel.

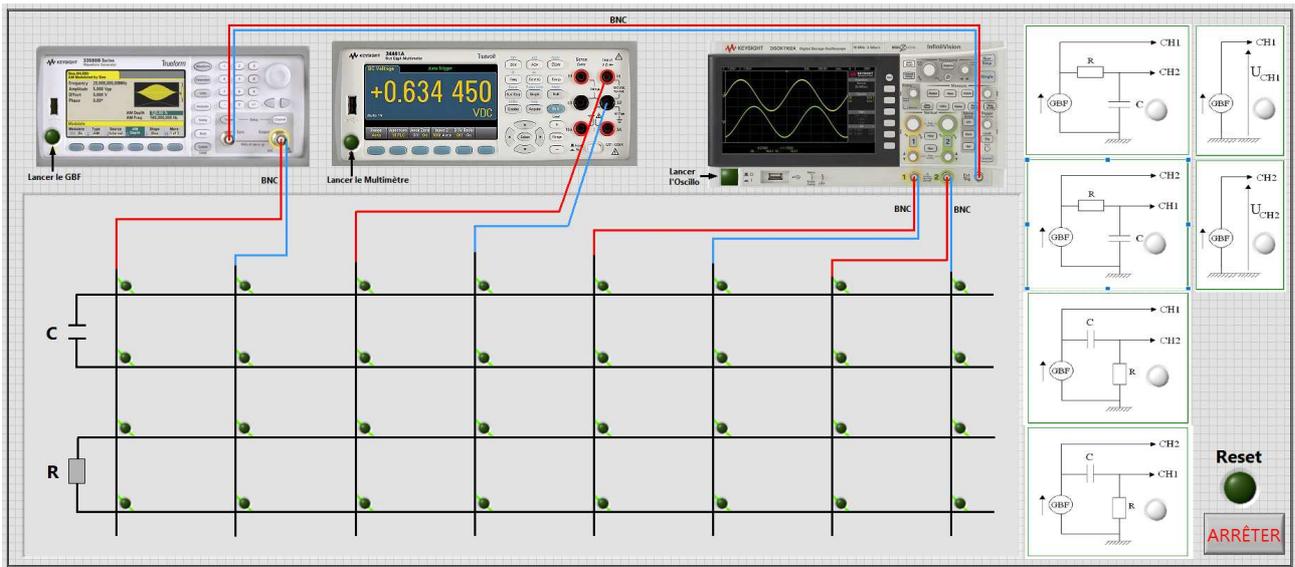


Figure 5 : Interface de paramétrage de la matrice de relais

Nous avons donc testé une première solution permettant de réaliser le câblage physique à distance. Cette solution est basée sur une matrice de relais qui permet de relier physiquement une série de câbles entre eux. Nous avons câblé les composants nécessaires à la manipulation sur les lignes de notre matrice (dans notre cas une résistance et un condensateur) et les instruments sur les colonnes. Les étudiants peuvent ainsi réaliser le circuit et connecter les instruments au circuit en activant un jeu de relais. La Figure 5 représente l'interface de notre matrice de relais. Il faut souligner que le paramétrage est réalisé de manière physique, à savoir que les étudiants réalisent le circuit à l'aide du réseau de relais et peuvent voir le résultat sur le banc expérimental via une Webcam connectée au réseau. La Figure 7 est une photo prise par cette Webcam positionnée en face du matériel utilisé pour le TP.

Les possibilités offertes par cette matrice sont très importantes. Nous pouvons réaliser différents types de circuits et effectuer diverses mesures selon les composants et instruments branchés sur la matrice.

Cette solution est en phase de test utilisateurs et nous espérons pouvoir la mettre en production pour les étudiants de première année à partir de la rentrée de septembre.

Cependant la duplication de cette solution pour répondre aux besoins utilisateurs se heurte à un problème de coût. A titre d'exemple, une matrice industrielle contenant 512 relais coûte plus de 4000€. Nous avons donc commencé à développer une solution "maison" qui devrait nous permettre de réaliser ce câblage avec un coût d'environ 1 euro par relai. Notre solution est en cours d'évaluation mais semble prometteuse.

Concernant les instruments de mesure utilisés, nous avons commencé notre projet avec des instruments de mesure compatibles au standard LXI. Les nouveaux instruments disposent d'une interface web compatible HTML5 (voir Figure 6) et sont donc pilotables via un navigateur web. En effet, il n'est pas possible de faire des mesures précises à l'aide d'un retour vidéo de

qualité moyenne. Grâce aux interfaces web, il est tout à fait possible de récupérer les mesures comme si vous étiez en face de vos instruments.

Cette solution est parfaitement fonctionnelle. Elle nécessite par contre, un investissement très coûteux sur l'instrumentation car les instruments compatibles LXI restent chers. De plus, il est nécessaire de connecter l'ensemble de ces instruments aux réseaux de l'établissement. Une solution alternative beaucoup moins coûteuse est de remplacer les instruments LXI par le module myDAQ de National Instruments qui instrumente intègre l'équivalent d'un générateur de fonction, d'un oscilloscope, d'un multimètre, des alimentations ainsi que des entrées/sorties numériques. L'accès distant au MyDAQ permet de mettre à disposition des étudiants l'ensemble du matériel nécessaire à une manipulation.

VII/ Retour d'expérience des étudiants

Concernant les étudiants, il est important de leur faire comprendre qu'ils utilisent de vrais ordinateurs, avec du vrai matériel sur de vraies expériences. Pour cela, il est indispensable de leur envoyer des photos et si possible ajouter des caméras pour montrer aux étudiants les salles et le matériel qu'ils utilisent.

Les étudiants ont été très satisfaits par cette solution. En effet, elle a permis de mettre tous les étudiants sur un pied d'égalité concernant notamment les performances des ordinateurs. Il faut noter que la solution pédagogique ne dépend pas du système d'exploitation installé sur la machine de l'utilisateur car un simple navigateur compatible HTML5 est suffisant, ce qui a grandement facilité la prise en main par les étudiants.

Cette solution a permis à plusieurs étudiants de reprendre le cours des modules d'enseignements durant le confinement.

Nous avons testé la solution avec plus de 50 étudiants connectés sans aucun souci de ralentissement. La charge étant répartie sur les ordinateurs, il n'y a pas de problème de performance. De plus, l'accès via le

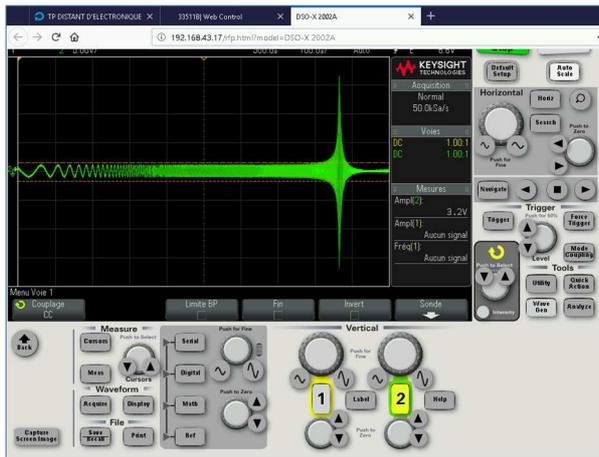


Figure 6 : Exemple de face avant distante

Bureau Distant de Windows nécessite uniquement 2 Mbit/s de bande passante pour être fluide et satisfaisante à l'utilisation.

Enfin, l'utilisation de salles de réunions privées combinée à l'accès mutualisé à un même ordinateur a permis de reconstituer l'environnement de travail traditionnel des TP en binôme. Cette solution a été massivement plébiscitée par les étudiants lors des travaux pratiques.

VIII/ Perspectives

Comme nous l'avons présenté, la solution a un faible coût matériel par la réutilisation de moyens déjà présents sur les laboratoires et sous employés en période de confinement. Le coût logiciel est lui aussi limité.

Mais nous aimerions pérenniser cette solution dans deux autres configurations à savoir un fonctionnement hybride (50% de présentiel et 50% de distanciel) et un fonctionnement où cohabiterait 100% de présentiel et un accès distant des TP pour tous les étudiants.

L'hypothèse de base est que les postes de travail sont déjà utilisés en présentiel durant les heures ouvrées de l'IUT. En fonctionnement hybride, plusieurs scénarios peuvent être envisagés. Un premier est d'organiser chaque binôme : un en distanciel et l'autre en présentiel quand la salle est dimensionnée que pour un demi TP (en supposant 4m² par étudiant). La solution reste opérationnelle et l'étudiant présent a en charge les manipulations sur les instruments de mesure. Mais il nous paraît difficile d'intervenir sur l'installation des manipulations afin qu'elles soient accessibles par le cartable distant en soirée et le week-end. D'autres scénarios existent, en particulier le fait d'avoir des journées en présentiel et des journées en distanciel. On peut imposer de mettre les étudiants considérés en distanciel pour le TP dans des salles informatiques sur l'IUT.

Dans un fonctionnement cartable distant en période 'saine', il nous paraît plus judicieux d'investir sur du matériel de type station et serveur dédiés au fonctionnement distant sur lesquels seraient installées des manipulations qui pourraient évoluer en fonction de l'avancement des programmes et de la demande des étudiants. Ces stations ne seraient pas accessibles aux



Figure 7 : Manipulation vue par la Webcam

étudiants en présentiel et la maintenance des TP distants en serait réduite.

IX/ Conclusion

Nous avons mis en place une solution de bout en bout permettant de réaliser une classe virtuelle ainsi que des travaux pratiques entièrement à distance. Cette solution s'appuie sur deux outils libres : BigBlueButton et Apache Guacamole. Les étudiants peuvent ainsi profiter des ressources de notre établissement en se connectant à distance sur les ordinateurs et en profitant des instruments connectés sur notre réseau ou en USB sur les postes informatiques.

La solution a été très bien adoptée par les étudiants grâce à la simplicité d'utilisation de ces outils. Ils ont pu travailler en groupe sur un même ordinateur tout en échangeant des informations par audio et vidéo. Enfin, cette solution a permis de lisser les difficultés matérielles.

X/ Références

- [1] P. Leproux, D. Barataud, S. Bailly, R. Nieto, "LABENVI, un dispositif pour les travaux pratiques à distance", Interfaces Numériques vol 2 n°3 (2013), <https://www.unilim.fr/interfaces-numeriques/2011&file=1>
<https://cvtic.unilim.fr/>
- [2] <https://e-lives.eu/>
- [3] <https://labsland.com/en>
- [4] B. Larroque, F. Luthon. LaboREM, "De vrais TP d'électronique... Oui mais à distance". Congrès National de la recherche des IUT, Jun 2016, hal-01332258
- [5] <https://ens-paris-saclay.fr/actualite/realisez-vos-tp-distance>
- [6] P. Maille, "Accompagner et guider à distance des élèves en TP", https://formations.telecom-bretagne.eu/fad/pluginfile.php/40759/mod_resource/content/0/articles_valides/FicheIPTB_TPRES.pdf

APPORTS DES OUTILS NUMERIQUES SUR L'ENSEIGNEMENT DE L'AUTOMATIQUE : SEANCE DE TRAVAUX PRATIQUES DISTANCIELS ASYNCHRONES

AGATHE DUPAS¹, JAVIER OJEDA²

¹Lycée Polyvalent de Cachan, 63 Avenue du Président Wilson 94235 Cachan

²Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette
javier.ojeda@ens-paris-saclay.fr

Résumé : L'évolution des outils numériques aussi bien des logiciels que du matériel permet d'envisager l'enseignement de l'automatique de manière plus illustrative et participative. Illustrative, car des outils numériques, le plus souvent libres, sont disponibles pour les étudiants afin de mettre en image des notions parfois complexes de l'automatique et participative, car au travers d'ateliers réalisés par les étudiants, ceux-ci peuvent appréhender des notions principales ou annexes par leurs simulations et expérimentations. Par ailleurs, participative, par le fait que les outils numériques permettent des échanges enseignant-apprenant en ligne via un site web, des plateformes moodle, slack, etc. C'est au travers d'une série de trois articles qui seront publiés dans trois numéros de la revue [1] que l'évolution des outils numériques sera abordée du point de vue théorique, logiciel, hardware et pratique. Dans ce deuxième article, il sera abordé la notion d'enseignement pratique à distance en utilisant un notebook Jupyter.

I/ Introduction

Les sciences de l'ingénieur forment des étudiants pour et par l'expérimentation, la mise en place de manipulations et l'exploitation de celles-ci. Plusieurs savoir-faire fondamentaux sont nécessaires à cette formation :

- Le design expérimental, être capable de synthétiser une manipulation dans le but de mettre en exergue un phénomène physique, inventer une nouvelle fonction ou porter une amélioration technologique.
- La mise en place technologique, être capable de choisir les bons outils et composants technologiques.
- L'exploitation des résultats d'expérimentations et leurs mises en contexte.

C'est parfois l'aptitude à comprendre et à exploiter des résultats expérimentaux qui peut faire défaut aux apprenants. Nous allons donc pour cet article nous attacher à ce point.

De plus, l'enseignement à distance se développe à grande vitesse. Parfois de manière contrainte, parfois de manière souhaitée, il n'est souvent pas aisé de concilier expérimentations et distanciel. Plusieurs acteurs des sciences de l'ingénieur se sont penchés sur ces problèmes. Nous pouvons citer la plateforme STEEVE, Solutions pour Travaux Expérimentaux en Environnement Virtualisé, financée par l'université Paris-Saclay (ENS Paris-Saclay, Centrale Supélec, Université Paris-Saclay) [2] ou encore la plateforme

LABENVI de l'Université de Limoges [3]. Dans cet article, nous allons aborder le thème des travaux pratiques à distance en utilisant un notebook Jupyter [4]. Les avantages vont être d'utiliser le même outil pour les cours d'informatique scientifique, de simulation numérique et d'expérimentation. Les étudiants n'auront pas besoin d'outils supplémentaires et les problèmes de versions/compatibilités seront minimisés. Le langage Markdown inclus dans le notebook Jupyter va permettre de mettre en forme de manière simple et puissante.

Le support d'application de cet article sera le système didactisée d'un axe linéaire qui permet le positionnement de pièces, Control'X de DMS education [5]. Ce TP peut être proposé sur différents supports si ceux-ci permettent des mesures en boucle ouverte et fermée ainsi que le réglage d'un gain proportionnel.

Ce TP n'est qu'un guide pour l'utilisation du notebook Jupyter. Les activités proposées ne sont pas formulées sous forme de question ni de problématique. Cet exemple demande donc à être adapté en fonction des compétences précédemment abordées par les étudiants ainsi que de la progression annuelle.

II/ Présentation du support d'application et de son modèle

II.1/ Le système Control'X

Le système industriel dont le Control'X est extrait, est un robot portique 3 axes commercialisé par l'industriel Schneider. L'axe linéaire commercialisé par DMS est une version didactique de l'axe industriel. La partie mécanique est en tout point identique à celle

présente dans le système industriel. Cette partie est composée du réducteur, des poulies et courroies, du chariot et enfin des guidages. La partie électrique, dans le système industriel, est composée d'un moteur brushless et de son variateur. Ceux-ci sont remplacés par un moteur à courant continu à balais avec un variateur pour la version didactique. Celui-ci est utilisé en amplificateur de tension de gain pur.

Concernant les capteurs, seul le codeur incrémental placé sur l'arbre moteur est présent dans le système industriel.

Dans le cadre de cette activité, nous nous intéresserons à plusieurs exigences de performances du système présentées à la Figure 1. L'objectif sera après une modélisation du système de vérifier les exigences 1.1.1, 1.3.1 et 1.4.1 pour plusieurs valeurs d'un correcteur proportionnel.

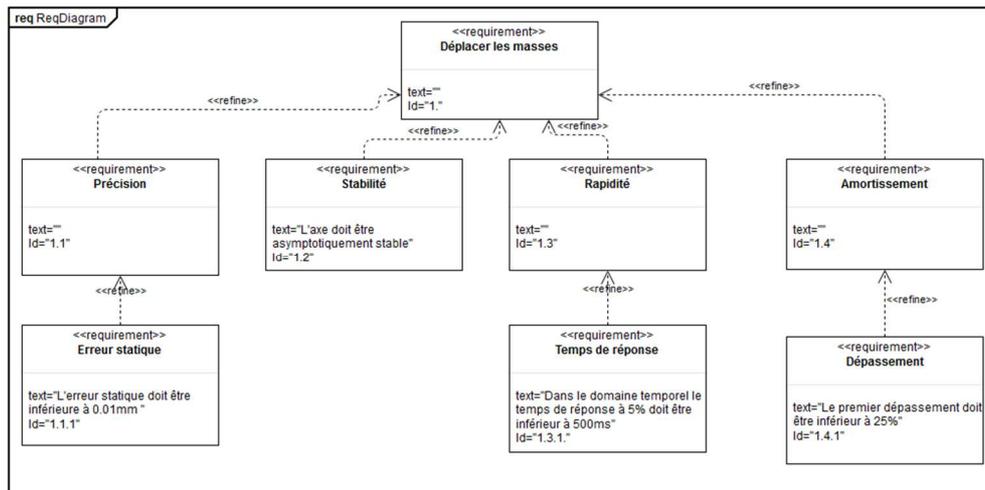


Figure 1 : Diagramme partiel des exigences

II.2/ Toolbox Control

Pour s'affranchir d'un logiciel de modélisation type Matlab/Simulink ou Scilab/Xcos, le schéma bloc du système sera simulé grâce à la toolbox Control [6]. Une première partie du TP consiste à prendre en main la toolbox en modélisant un premier ordre avec un retour unitaire.

```
# Système exemple
K_0 = 1.0           # Gain statique
TAU = 1e-3         # Constante de temps du 1er
ordre en secondes

#####
# Fonction de transfert en BO de l'exemple
#

NUM = [K_0] # Numérateur de la fonction de transfert

# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre
décroissant en p ou s
DENUM = [TAU, 1]

SYS_BO_EXEMPLE = ctl.tf(NUM, DENUM) # Fonction de
transfert en p

#####
# Bouclage avec rétro-action unitaire avec la
fonction feedback
#

SYS_BF_EXEMPLE = ctl.feedback(SYS_BO_EXEMPLE)
```

La fonction `ctl.feedback` permet de réaliser la contre réaction unitaire. Il est également possible de réaliser une contre-réaction non unitaire en entrant la fonction de transfert dans la chaîne de retour dans la liste des arguments. Dans la suite du tutoriel de prise en main de la toolbox, il est demandé de tracer la réponse indicielle, impulsionnelle ainsi que des relevés de Bode, Black-Nichols...

II.3/ Modèle à partir d'un schéma bloc et simplifications

Le système est un axe linéaire asservi en position. Le schéma bloc de la Figure 2 représente la structure du système et de son asservissement.

Afin de se ramener aux notions vues en cours, il est nécessaire de modifier le schéma pour obtenir un schéma bloc à retour unitaire. La simplification ne sera pas exposée ici, mais peut être proposée en travail préliminaire aux étudiants lors de travaux dirigés par exemple. L'identification des blocs à partir de la documentation technique du système peut aussi composer une activité supplémentaire.

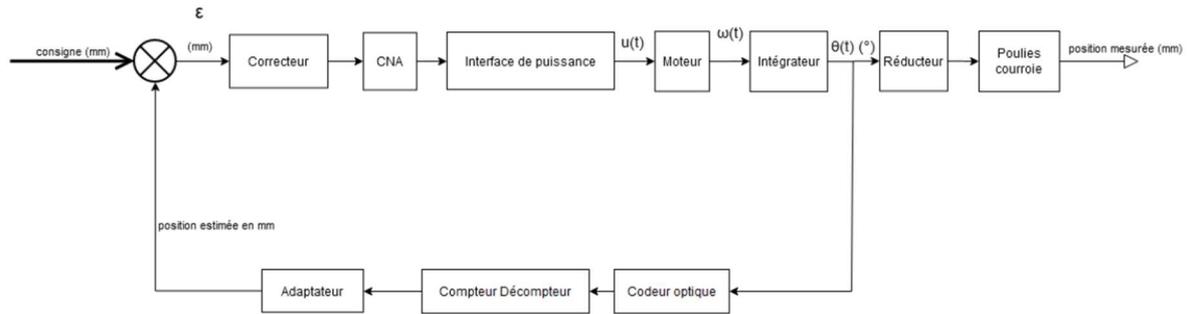


Figure 2 : Schéma bloc du système didactisé

II.4/ Mesures préliminaires

Pour proposer une activité pratique à distance aux étudiants, il est nécessaire d'effectuer plusieurs mesures en amont. Les étudiants auront accès aux fichiers des mesures. Le post-traitement des mesures est entièrement fourni dans ce TP, mais peut faire l'objet de question ou de travaux pratiques en IPT (Informatique Pour Tous).

Tableau 1 : Exemples de contenus pouvant être abordés en IPT en lien avec le TP.

Recherche du maximum dans une liste de nombres
Fichiers : notion de chemin d'accès, lecture et écriture de données numériques ou de type chaîne de caractères depuis ou vers un fichier.

Le système modélisé en boucle fermée a pour entrée la position souhaitée sur l'axe X et comme sortie la position mesurée. Il est évident qu'en pratique nous avons accès à une tension image de la position et non la position, mais pour des raisons de simplification, nous parlerons de la position et non de la tension image de la position. Le système possède un intégrateur pur dans la chaîne directe, il n'est donc pas réalisable d'identifier la boucle ouverte complète. Nous proposons d'identifier en boucle ouverte le système qui possède comme entrée la tension moteur et comme sortie la vitesse linéaire.

Les essais nécessaires pour caractériser le système sont :

- Essais en boucle ouverte : pour plusieurs tensions d'entrée du moteur, la mesure de la vitesse linéaire du chariot est effectuée.
- Essais en boucle fermée : pour différentes valeurs de consigne de position et de correcteur, la mesure de la position du chariot et de la tension d'alimentation de la MCC sont réalisées.

La liste des valeurs de tension d'entrée, consignes de position et valeurs du correcteur proportionnel utilisées dans l'atelier est résumée en annexe.

III/ Positionnement de l'étudiant et du professeur durant le TP

Ce TP est conçu pour être proposé aux étudiants à distance (ou non) et en temps réel ou de façon autonome. L'utilisation d'un seul outil libre et facilement disponible par les étudiants permet de s'affranchir des difficultés d'obtention de licences, d'installation de packages et l'incompatibilité entre plusieurs versions d'un même logiciel.

Les différentes activités sont ici entièrement réalisées, mais pourront être adaptées en fonction du degré d'autonomie des étudiants. Malgré des activités préfabriquées, l'étudiant ne sera pas dans une attitude uniquement d'observateur et pourra être amené à modifier le code ou entrer ses propres valeurs déterminées par le biais de widgets inclus dans le notebook Jupyter comme à partir de la fonction `click.prompt`.

Dans le cas d'un TP à distance proposé en temps réel, le professeur pourra alors interagir avec les étudiants en les questionnant notamment sur les conclusions pour chaque partie. Dans la possibilité d'un TP asynchrone, les questionnements devront sans doute être plus détaillés pour s'assurer un maximum de réflexion de l'étudiant.

IV/Activités proposées

IV.1/ Démarche du TP

Le TP présenté dans cet article a pour objectif de déterminer un modèle de comportement du système à partir d'essais en boucle ouverte puis dans un deuxième temps de mettre en évidence l'impact de la valeur du gain proportionnel sur les performances de rapidité, précision et amortissement.

Les différentes parties vont être détaillées dans la suite ainsi que les compétences et savoir-faire associés.

IV.2/ Première partie : modélisation du système

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie est présenté sur le [Tableau 2](#).

Tableau 2 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés dans la partie modélisation en boucle ouverte

Modèles de comportement	Renseigner les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement
Mettre en œuvre un protocole expérimental	
Identification temporelle d'un modèle de comportement	Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle
Modèles de comportement	Extraire les grandeurs désirées et les traiter

Le schéma bloc présenté en *Figure 2* est modifié afin d'obtenir un retour unitaire et nous souhaitons identifier sa fonction de transfert en boucle ouverte. Le modèle utilisé pour l'identification est présenté en *Figure 3*.

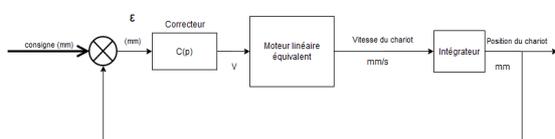


Figure 3 : Schéma bloc à retour unitaire utilisé pour la modélisation en boucle ouverte.

À partir de la mesure en boucle ouverte fournie, une identification de la fonction de transfert par itérations est effectuée. Les étudiants possèdent deux curseurs correspondants au gain statique et à la constante de temps d'un premier ordre. De plus, il est donné une valeur chiffrée de l'erreur par le biais de l'erreur quadratique entre la mesure et le modèle. Par itérations, les étudiants règlent les deux paramètres en se basant sur la minimisation de l'erreur. La réponse indicielle obtenue à partir du modèle est ensuite comparée à l'expérimental sur la *Figure 4*.

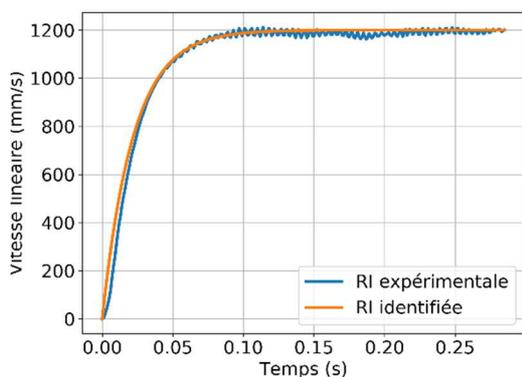


Figure 4 : Comparaison des réponses indicielles modélisées et mesurées

La dérivée à l'origine du système mesurée est nulle ce qui laisse penser à un système du second ordre. Cependant, c'est la non-linéarité du système et notamment la zone morte qui crée cette tangente nulle à l'origine. Un retour sur les non-linéarités du système sera effectué à la fin de l'article. Le modèle étant validé

en boucle ouverte, une validation en boucle fermée est effectuée.

IV.3/ Deuxième partie : validation du modèle en boucle fermée

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie est présenté sur le *Tableau 3*.

Tableau 3 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés dans la partie vérification du modèle en BF

Point de fonctionnement Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil)	Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les résultats d'expérimentation
--	---

Deux réponses à un échelon de position en boucle fermée sont utilisées pour comparer le modèle et le système réel en boucle fermée. Afin de donner plus de sens à cette validation un contexte peut être présenté et un point de fonctionnement proposé. La validation sera alors faite autour du point de fonctionnement, les mesures fournies seront alors adaptées à ce point de fonctionnement.

La définition de la fonction modélisée en boucle fermée utilisant la fonction feedback est présentée ci-dessous.

```
#####
#####
# Fonction de transfert identifiée
#
NUM = [K_M] # Numérateur de la fonction de transfert
# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [TAU_M, 1]
SYS_IDEN = ct1.tf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p
#####
#####
# Résultat de la simulation avec un correcteur K_P = 1
#
K_P = 1 # Gain du proportionnel du correcteur
INTEG = ct1.tf(1, [1, 0]) # Intégrateur pur pour le passage vitesse -> position
SYS_BF_K = ct1.feedback(K_P*SYS_IDEN*INTEG)
```

IV.4/ Troisième partie : Influence du correcteur proportionnel sur les performances

Un exemple des savoir-faire et compétences abordés lors de cette partie est présenté sur le *Tableau 4*.

Tableau 4 : Exemple de connaissance et savoir-faire abordés

Rapidité des SLCI : temps de réponse à 5 %	
Précision des SLCI : - erreur en régime permanent	Déterminer l'erreur en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon ou en rampe
Point de fonctionnement Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil)	Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les résultats d'expérimentation

Lorsque le modèle est validé en boucle fermée, il peut être utilisé pour mettre en évidence l'influence de la valeur du correcteur proportionnel sur les performances du système. En utilisant la fonction interactive, on peut proposer aux étudiants de faire varier le correcteur grâce à un slide comme présenté en Figure 5.

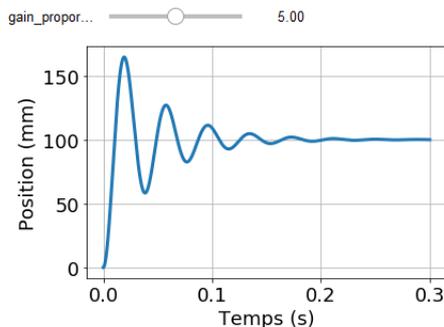


Figure 5 : Utilisation de la fonction interactive (widget) pour faire varier la valeur du correcteur

Une première approche est de susciter un questionnement de l'étudiant sur l'allure globale de la sortie du système et sur les performances (dépassement ou non, erreur statique nulle ou non, rapidité) en fonction de la valeur du gain proportionnel.

Dans un second temps, les performances en rapidité, précision et amortissement sont évaluées par les étudiants. Pour faciliter la détermination du temps de réponse à 5%, des droites à $\pm 5\%$ de la valeur finale sont tracées comme représentées à la Figure 6. Pour la détermination du dépassement, l'amplitude maximale peut être calculée ou déterminée de façon graphique. Les performances pourront être déterminées pour le point de fonctionnement et pour différentes valeurs du correcteur proportionnel.

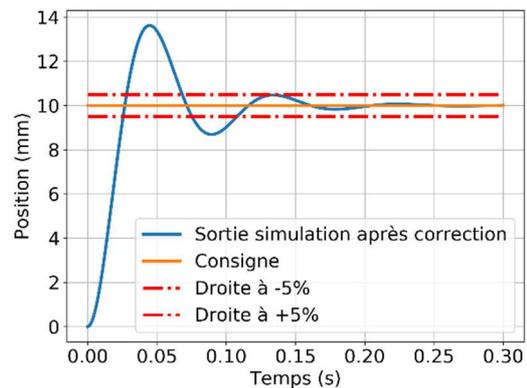


Figure 6 : Mise en évidence du temps de réponse à 5%

VI/ Possibilité d'évolution vers les non-linéarités des systèmes

Une première proposition d'évolution est évoquée dans l'atelier et concerne l'impact de la saturation de l'alimentation du moteur sur la réponse en boucle fermée. En effet l'alimentation du moteur sature à 40V et de nombreuses combinaisons de valeur de consigne et de correcteur entraînent cette saturation comme présentée à la Figure 7. Un travail peut alors être proposé pour identifier la saturation ainsi que son impact sur la rapidité du système.

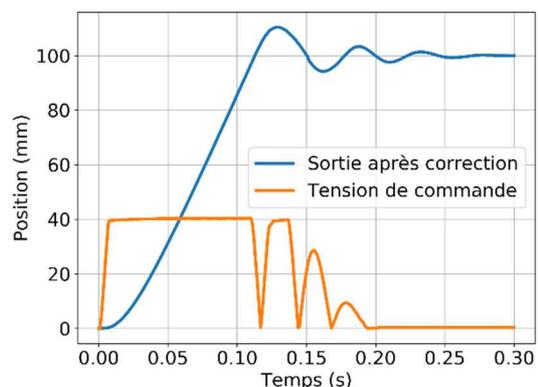


Figure 7 : Visualisation de la tension de commande du moteur saturée

L'autre partie non linéaire concerne la zone morte en tension du moteur. En effet, un moteur « petit couple » associé à un réducteur de valeurs importantes entraîne l'apparition d'une zone morte en tension de commande. Le « petit couple » généré par le moteur à de faibles valeurs de tension n'est pas suffisant pour mettre en mouvement le système. Cet effet est particulièrement visible pour des petites valeurs de correction proportionnelle et entraîne une erreur statique non nulle avec pourtant un intégrateur dans la chaîne directe.

VI/Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté différentes activités qui montrent les possibilités offertes par l'utilisation de Jupyter notebook et de la toolbox control de Python. Les séances de travaux pratiques à distance sont moins conçues pour apprendre des compétences d'expérimentation sur un système, mais plutôt pour faire réfléchir les étudiants sur des expériences et leur permettre d'interpréter des résultats issus d'un système physique.

Cet atelier peut être vu comme une première approche de l'outil et possède des possibilités d'évolution en fonction de l'autonomie des élèves ainsi que des compétences et connaissances acquises en amont.

Peu de fonctions ou de syntaxes propres au langage Python sont nécessaires, cependant, ces séances de travaux pratiques peuvent être couplées aux séances d'Informatique Pour Tous.

VII/ Bibliographie

- [1] J. Ojeda, "Apports des outils numériques sur l'enseignement de l'automatique : Ateliers à partir d'un notebook Jupyter," 3EI, no. 101, pp. 40–49, 2020.
- [2] F. LOUF, "Réalisez vos tp à distance." <https://ens-paris-saclay.fr/actualite/realisez-vos-tp-distance>.
- [3] P. Leproux, D. Barataud, S. Bailly, and R. Nieto, "LABENVI, un dispositif pour les travaux pratiques à distance. Présentation et analyse des nouveaux usages," Interfaces numériques, vol. 2, no. 3, pp. 453–467, Mar. 2013, doi: 10.3166/rin.2.453-467.
- [4] "Jupyter notebook." <https://jupyter.org/>.
- [5] D. Education, "Control'X." http://www.dmseducation.eu/controlx-xml-350_357-1126.html.
- [6] "Python Control Systems Library." <https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/>.
- [7] "Culture Sciences de l'ingénieur - École normale supérieure Paris-Saclay." https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/apports-des-outils-numeriques-sur-lenseignement-de-lautomatique-travaux-pratiques-distanciels-asynchrones

VIII/ Annexes

Liste des mesures à effectuer en amont pour la préparation de l'atelier.

Boucle ouverte						
Tension de commande	10V					
Boucle fermée						
Consigne de position	10mm		20mm		100mm	
Valeur du correcteur proportionnel	1	2	1	0.5	3	10

L'atelier est téléchargeable librement sur [7] ou avec le QR code.



Séance de travaux pratiques : Identification et correction d'un système de positionnement horizontal à partir de la plateforme Control'X

Auteurs : Agathe DUPAS & Javier OJEDA

Date : 15/09/2020

Version : 0.1

Importation des packages nécessaires

```
In [1]: import control as ctl # Package control pour l'automatique
```

[Lien pour le package control \(https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/\)](https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/)

```
In [2]: #Affichage avec la bibliothèque graphique intégrée à Notebook
# Pour un affichage avec interactions dans le graphique
%matplotlib notebook
# Pour un affichage sans interactions
%matplotlib inline

import matplotlib.pyplot as plt # Package pour le représentation graphique
plt.rcParams.update({'font.size': 18}) # Changer la taille de police par défaut
plt.rcParams.update({'lines.linewidth': 3}) # Changer la taille des lignes

import numpy as np # Package pour le calcul scientifique

import click # Package pour définir des grandeurs d'entrée

import csv # Package pour la gestion des fichiers .csv des données expérimentales

from ipywidgets import interactive # Import de la fonction interactive pour des graphiques interactifs temps réel

import warnings
warnings.filterwarnings('ignore') # Pour retirer les warnings intempestifs
```

Méthodologie

Objectif : Cet atelier doit permettre de mettre en place l'identification d'un système aperiodique à partir de mesures indicelles faites en amont. Dans une deuxième partie nous déterminerons certaines performances du système.

Plateforme expérimentale : Le support pédagogique à cette séance de travaux pratiques asynchrone est la plateforme expérimentale Control'X de DMS éducation.

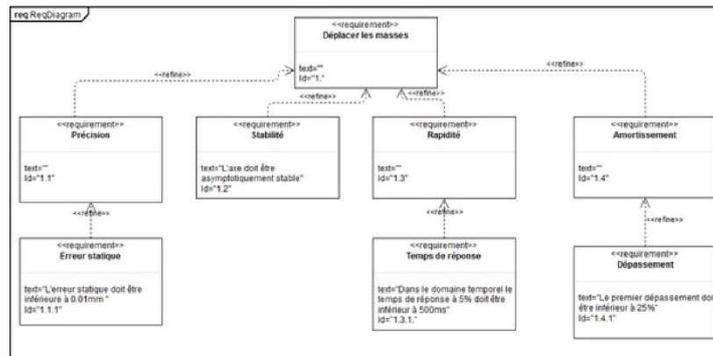
[Lien vers la plateforme Control'X \(http://www.dmseducation.eu/controlx-xml-350_357-1126.html\)](http://www.dmseducation.eu/controlx-xml-350_357-1126.html)



copyright © 2016

L'image a été extraite du site web de DMS education.

Cahier des charges partiel :

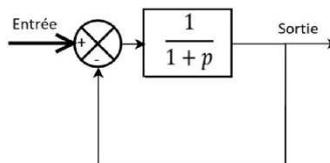


(<https://ibb.co/pxrh9DY>)

Utilisation de la toolbox control pour faire une contre réaction

Afin de prendre en main la toolbox control, il vous est proposé un exemple d'une contre réaction utilisant les fonctions de la toolbox.

Le système exemple est noté SYS_BO_EXEMPLE. Il sera défini comme un premier ordre avec un gain unitaire et une constante de temps de 1ms. Nous proposons de réaliser une contre réaction avec un retour unitaire. Le système obtenu sera noté SYS_BF_EXEMPLE.



(<https://ibb.co/N3HNF5P>)

Définition de la fonction de transfert en boucle ouverte

```
In [3]: # Système exemple
K_0 = 1.0 # Gain statique
TAU = 1e-3 # Constante de temps du 1er ordre

#####
# Fonction de transfert en BO de l'exemple
#
NUM = [K_0] # Numérateur de la fonction de transfert

# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [TAU, 1]

SYS_BO_EXEMPLE = ctl.tf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p
```

Bouclage par un retour unitaire

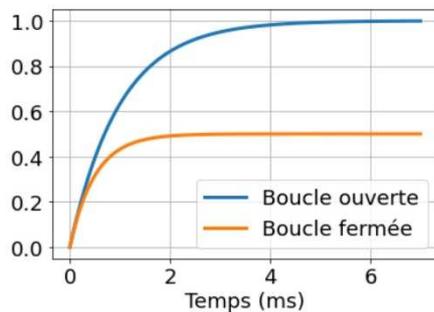
```
In [4]: #####
# Bouclage avec rétro-action unitaire en utilisant la fonction feedback
#
SYS_BF_EXEMPLE = ctl.feedback(SYS_BO_EXEMPLE)
```

Visualisation de la réponse indicielle

```
In [5]: # Calcul de la réponse indicielle en boucle ouverte
TEMPS_EX, RIND_BO_EXEMPLE = ctl.step_response(SYS_BO_EXEMPLE)
# Calcul de la réponse indicielle en boucle fermée
TEMPS_EX, RIND_BF_EXEMPLE = ctl.step_response(SYS_BF_EXEMPLE, TEMPS_EX)
```

```
In [6]: plt.figure(1)
plt.plot(TEMPS_EX*1000, RIND_BO_EXEMPLE, label='Boucle ouverte')
plt.plot(TEMPS_EX*1000, RIND_BF_EXEMPLE, label='Boucle fermée')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.xlabel('Temps (ms)')
```

Out[6]: Text(0.5, 0, 'Temps (ms)')



Remarques

Lorsque l'on souhaite mettre deux fonctions de transfert en série avec un retour unitaire, il suffit d'employer le symbole *pour la mise en série*. Exemple : la mise en série de H_1 et H_2 avec un retour unitaire s'écrit `ctl.feedback(H_1 H_2)`

Définir un retour non unitaire se fait via la modification de la fonction `feedback`. Exemple : la mise en série de H_1 et H_2 puis un retour via H_3 se note `ctl.feedback(H_1 * H_2, H_3)`

La documentation de la fonction `feedback` se trouve sur le lien ci-dessous :

[Lien pour la fonction feedback \(https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/generated/control.feedback.html\)](https://python-control.readthedocs.io/en/0.8.3/generated/control.feedback.html)

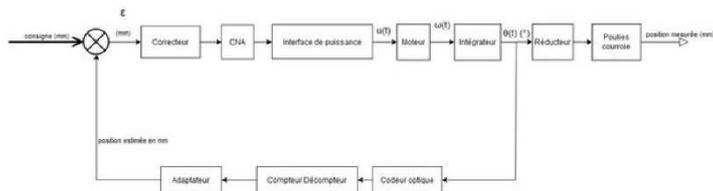
Etude d'un système de positionnement horizontal via le système Control'X

Préambule

Présentation du système

Le système industriel dont le Control'X est extrait, est un robot portique 3 axes commercialisé par l'industriel Schneider. L'axe linéaire commercialisé par DMS est une version didactique de l'axe industriel. Il est en tout point identique à celui utilisé dans l'industrie en ce qui concerne sa partie mécanique : réducteur, poulies-courroies, chariot, guidages. La partie électrique composée d'un moteur brushless et de son variateur dans le système industriel a été remplacée par un moteur à courant continu à balais avec un variateur. Celui-ci est réglé en amplificateur de tension de gain pur. Concernant les capteurs, seul le codeur incrémental placé sur l'arbre moteur est présent dans le système industriel.

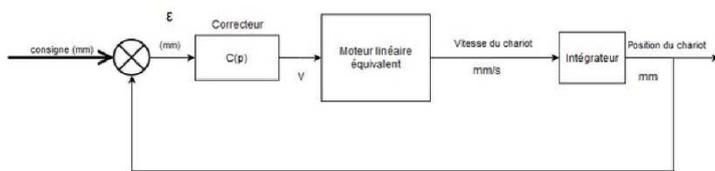
Hypothèses générales : Modèle linéaire, non perturbé, constante de temps électrique du moteur négligée devant la constante de temps mécanique. La figure ci-dessous représente le schéma bloc du système didactisé complet.



<https://ibb.co/xMSpRpr>

Modification du schéma bloc pour avoir un retour unitaire

Afin d'utiliser la toolbox control il est nécessaire d'avoir un schéma bloc à retour unitaire. En déplaçant le point de piquage de boucle de retour réelle, à la sortie et en définissant le gain de l'adaptateur pour avoir un retour unitaire, on peut alors obtenir le schéma bloc de la figure suivante.



<https://ibb.co/QQp5ChQ>

Détermination du modèle par identification de la fonction de transfert en boucle ouverte

On souhaite réaliser une identification en boucle ouverte basée sur la réponse en vitesse.

Connaissances abordées

Connaissances	Savoir-faire
Modèles de comportement	Renseigner les paramètres caractéristiques d'un modèle de comportement

Mettre en œuvre un protocole expérimental

Connaissances	Savoir-faire
Identification temporelle d'un modèle de comportement	Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle
Modèles de comportement	Extraire les grandeurs désirées et les traiter

Réalisation expérimentale

Un essai indiciel ayant comme entrée une consigne de 10 V. La vitesse du chariot est mesurée en mm/s. Cette réponse indicielle sera notée RI_SYSTEME_EXP.

```
In [7]: #####
# Lecture du fichier des résultats de l'identification sur le système
#
TEMPS = [] # Vecteur avec le temps physique
ENTREE = [] # Vecteur entrée du système
SORTIE = [] # Vecteur sortie du système

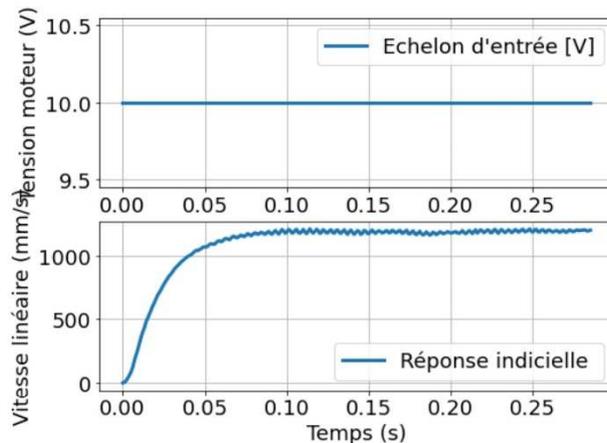
# Nom du fichier contenant les données
fnom = "Identification_bo.csv"

# Première colonne = TEMPS, deuxième colonne = ENTREE, troisième colonne = SORTIE
with open(fnom, newline='') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='|')
    for row in spamreader:
        TEMPS.append(float(row[0]))
        ENTREE.append(float(row[1]))
        SORTIE.append(float(row[2]))
```

Visualisation de l'expérimentation

```
In [8]: plt.figure(2, [8, 6])
plt.subplot(2,1,1)
plt.plot(TEMPS, ENTREE, label='Echelon d\'entrée [V]')
plt.grid(True)
plt.ylabel('Tension moteur (V)')
plt.legend()
plt.subplot(2,1,2)
plt.plot(TEMPS, SORTIE, label='Réponse indicielle ')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.ylabel('Vitesse linéaire (mm/s)')
plt.xlabel('Temps (s)')
```

Out[8]: Text(0.5, 0, 'Temps (s)')



Identification par un système du premier ordre

Pour identifier le système, on propose de définir un premier ordre ayant comme gain statique K_M et comme constante de temps τ_M . Ce système sera nommé SYS_IDEN et aura comme réponse indicielle $RI_SYSTEME_IDEN$.

Attention à bien prendre en compte que l'échelon n'est pas unitaire et qu'il faut donc le considérer dans le calcul du gain statique.

```
In [9]: ECH_MAX = 10 # Valeur de l'amplitude de l'échelon
```

```
In [10]: #####
# Identification de la fonction de transfert par aller-retours
#
def plot_interactif_identification(gain_statique, constante_temps):
#####
# Fonction de transfert identifiée
#
NUM = [gain_statique] # Numérateur de la fonction de transfert

# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [constante_temps, 1]

SYS_IDEN = ctl.tf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p

TEMPS_IDEN = np.linspace(0, 0.285, 286) # Vecteur temps de simulation

# Calcul de la réponse indicielle du modèle identifié
TEMPS_IDEN, RIND_IDEN = ctl.step_response(SYS_IDEN, TEMPS_IDEN)

plt.figure(4)
plt.plot(TEMPS, SORTIE, label='RI expérimentale')
plt.plot(TEMPS_IDEN, ECH_MAX*RIND_IDEN, label='RI identifiée')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.ylabel('Vitesse linéaire (mm/s)')
plt.xlabel('Temps (s)')

# Calcul de l'erreur de modélisation :
# nous calculons l'erreur comme étant la somme quadratique de toutes les erreurs entre le modèle et la
mesure.

ERREUR = np.linalg.norm(ECH_MAX*RIND_IDEN - SORTIE)

print('L erreur quadratique de modélisation vaut ' + str(ERREUR))

interactive_plot = interactive(plot_interactif_identification, gain_statique=(10, 200, 10),
                             constante_temps=(0.01, 0.05, 0.001))
output = interactive_plot.children[-1]
output.layout.height = '350px'
interactive_plot
```

Sauvegarde des paramètres de la modélisation

```
In [11]: K_M = click.prompt("Valeur du gain statique", type=float, default=120.0)
print("Le gain statique défini vaut " + str(K_M))

Valeur du gain statique [120.0]:
Le gain statique défini vaut 120.0

In [12]: TAU_M = click.prompt("Valeur de la constante de temps en secondes", type=float, default=0.022)
print("La constante de temps définie vaut " + str(TAU_M) + " s")

Valeur de la constante de temps en secondes [0.022]:
La constante de temps définie vaut 0.022 s

In [13]: #####
# Fonction de transfert identifiée
#
NUM = [K_M] # Numérateur de la fonction de transfert

# Dénominateur de la fonction de transfert par ordre décroissant en p ou s
DENUM = [TAU_M, 1]

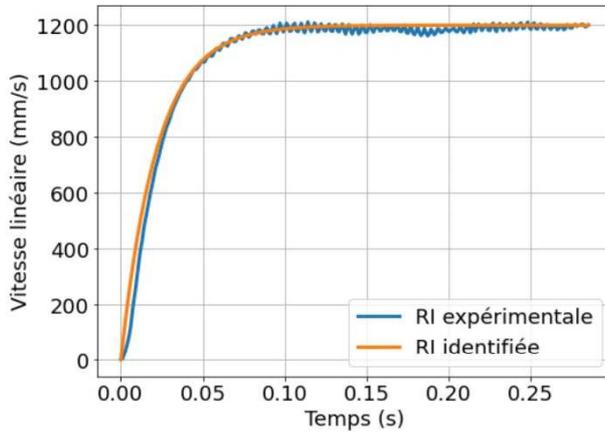
SYS_IDEN = ctl.tf(NUM, DENUM) # Fonction de transfert en p
```

Comparaison modèle et experimentation

```
In [14]: TEMPS, RIND_IDEN = ctl.step_response(SYS_IDEN, TEMPS) # Calcul de la réponse indicielle du modèle identifié
```

```
In [15]: plt.figure(5, [8, 6])

plt.plot(TEMPS, SORTIE, label='RI expérimentale')
plt.plot(TEMPS, ECH_MAX*RIND_IDEN, label='RI identifiée')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Vitesse linéaire (mm/s)')
plt.savefig("iden_rep_ind.png", dpi=300)
```



Comparaison du modèle en boucle fermée avec l'expérimentation et influence du correcteur proportionnel

Compétences visées

Valider un modèle

Connaissances	Savoir-faire
Point de fonctionnement Non-linéarités (hystérésis, saturation, seuil)	Vérifier la cohérence du modèle choisi avec les résultats d'expérimentation

Mettre en œuvre un protocole expérimental

Connaissances	Savoir-faire
Identification temporelle d'un modèle de comportement	Identifier les paramètres caractéristiques d'un modèle du premier ordre ou du deuxième ordre à partir de sa réponse indicielle
Modèles de comportement	Extraire les grandeurs désirées et les traiter

Comparaison de réponses, simulées et mesurées, à un échelon en boucle fermée pour différentes valeurs de correcteur.

Afin d'éviter la saturation de l'alimentation du moteur les échelons seront inférieurs à 20mm

```
In [16]: REF_CONSIGNE = 10 # Amplitude de la consigne en mm
```

```
In [17]: #####
# Lecture du fichier contenant les mesures effectuées sur le système pour un échelon de 10mm et un correcteur de 1
#
TEMPS_BF_k1 = [] # Vecteur avec le temps physique
ENTREE_BF_k1 = [] # Vecteur entrée du système (consigne de position)
SORTIE_BF_k1 = [] # Vecteur sortie du système (position mesurée)

# Nom du fichier contenant les données
fnom = "echelon_bf_10m_k1.csv"

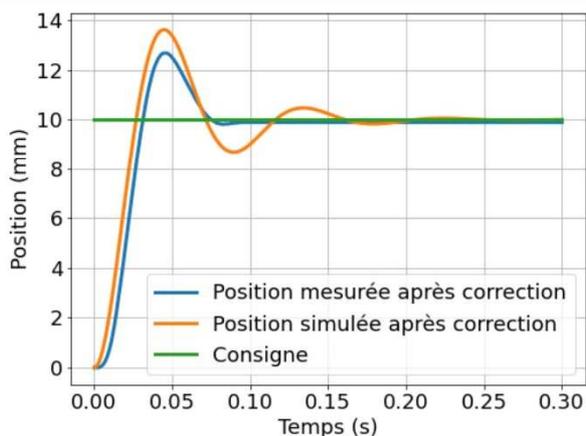
# Première colonne = TEMPS_BF, deuxième colonne = ENTREE_BF, troisième colonne = SORTIE_BF
with open(fnom, newline='') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='|')
    for row in spamreader:
        TEMPS_BF_k1.append(float(row[0]))
        ENTREE_BF_k1.append(float(row[1]))
        SORTIE_BF_k1.append(float(row[2]))
```

```
In [18]: #####
# Résultat de la simulation avec un correcteur K_P = 1
#

K_P = 1 # Gain du proportionnel

INTEG = ctl.tf(1, [1, 0]) # Intégrateur pur pour le passage vitesse -> position
SYS_BF_K = ctl.feedback(K_P*SYS_IDEN*INTEG)
TEMPS_BF_k1, SORTIE_CORRECTEUR_BF_k1 = ctl.step_response(SYS_BF_K, TEMPS_BF_k1)
```

```
In [19]: plt.figure(8, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k1, SORTIE_BF_k1, label='Position mesurée après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k1, REF_CONSIGNE*SORTIE_CORRECTEUR_BF_k1, label='Position simulée après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k1, ENTREE_BF_k1, label='Consigne')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.savefig("comp_rep_bf.png", dpi=300)
```



```
In [20]: #####
# Lecture du fichier contenant les mesures effectuées sur le système pour un échelon de 10mm et
# un correcteur de 2
#

TEMPS_BF_k2 = [] # Vecteur avec le temps physique
ENTREE_BF_k2 = [] # Vecteur entrée du système (consigne de position)
SORTIE_BF_k2 = [] # Vecteur sortie du système (position mesurée)

# Nom du fichier contenant les données
fnom = "echelon_bf_10m_k2.csv"

# Première colonne = TEMPS_BF, deuxième colonne = ENTREE_BF, troisième colonne = SORTIE_BF
with open(fnom, newline='') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='|')
    for row in spamreader:
        TEMPS_BF_k2.append(float(row[0]))
        ENTREE_BF_k2.append(float(row[1]))
        SORTIE_BF_k2.append(float(row[2]))
```

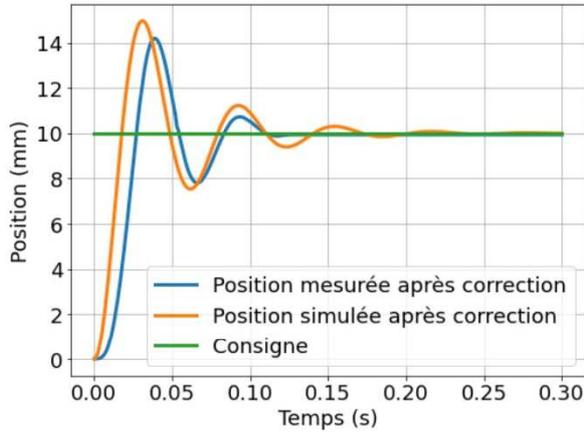
```
In [21]: #####
# Résultat de la simulation avec un correcteur K_P = 2
#

K_P = 2 # Gain du proportionnel

INTEG = ctl.tf(1, [1, 0]) # Intégrateur pur pour le passage vitesse -> position
SYS_BF_K = ctl.feedback(K_P*SYS_IDEN*INTEG)
TEMPS_BF_k1, SORTIE_CORRECTEUR_BF_k2 = ctl.step_response(SYS_BF_K, TEMPS_BF_k2)
```

```
In [22]: plt.figure(9, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k2, SORTIE_BF_k2, label='Position mesurée après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k2, REF_CONSIGNE*SORTIE_CORRECTEUR_BF_k2, label='Position simulée après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k2, ENTREE_BF_k2, label='Consigne')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.xlabel('Temps (s)')
```

Out[22]: Text(0.5, 0, 'Temps (s)')



Influence de la valeur du correcteur sur la sortie.

Nous allons utiliser le modèle obtenu précédemment pour observer l'influence de la valeur du correcteur sur la réponse à un échelon. La valeur du correcteur pourra être modifiée directement sur la figure obtenue dans la partie suivante.

```
In [23]: REF_CONSIGNE = 100 # Amplitude de la consigne en mm

In [24]: #####
# Influence du correcteur proportionnel
#
def plot_interactif_correcteur(gain_proportionnel):
    plt.figure(7)
    TEMPS = np.linspace(0, 0.3, 1000) # Vecteur temps de simulation
    INTEG = ctl.tf(1, [1, 0]) # Intégrateur pur pour le passage vitesse mm/s -> position mm
    SYS_BF_K = ctl.feedback(gain_proportionnel*SYS_IDEN*INTEG)
    TEMPS, SORTIE_CORRECTEUR = ctl.step_response(SYS_BF_K, TEMPS)
    plt.plot(TEMPS, REF_CONSIGNE*SORTIE_CORRECTEUR)
    plt.grid(True)
    plt.ylabel('Position (mm)')
    plt.xlabel('Temps (s)')

#Ajout d'un curseur interactif pour faire varier la valeur du gain proportionnel
interactive_plot = interactive(plot_interactif_correcteur, gain_proportionnel=(0.1, 10.0, 0.1))
output = interactive_plot.children[-1]
output.layout.height = '350px'
interactive_plot
```

Impact de la saturation de l'alimentation sur la réponse en boucle fermée.

Nous allons maintenant observer le comportement du système pour des valeurs d'entrée et du correcteur entraînant une saturation de la commande du moteur.



```
In [25]: #####
# Lecture du fichier contenant les mesures effectuées sur le système pour un échelon de 100mm
#et un correcteur de 1
#

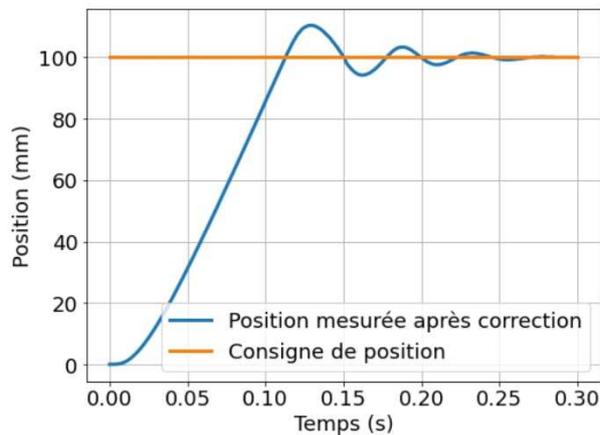
TEMPS_BF_k3 = [] # Vecteur avec le temps physique
ENTREE_BF_k3 = [] # Vecteur entrée du système
SORTIE_BF_k3 = [] # Vecteur sortie du système
TENSION_BF_k3 = [] # Vecteur tension d'alimentation du système

# Nom du fichier contenant les données
fnom = "echelon_bf_100m_k3.csv"

# Première colonne = TEMPS_BF, deuxième colonne = ENTREE_BF, troisième colonne = SORTIE_BF
with open(fnom, newline='') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='')
    for row in spamreader:
        TEMPS_BF_k3.append(float(row[0]))
        ENTREE_BF_k3.append(float(row[1]))
        SORTIE_BF_k3.append(float(row[2]))
        TENSION_BF_k3.append(float(row[3]))
```

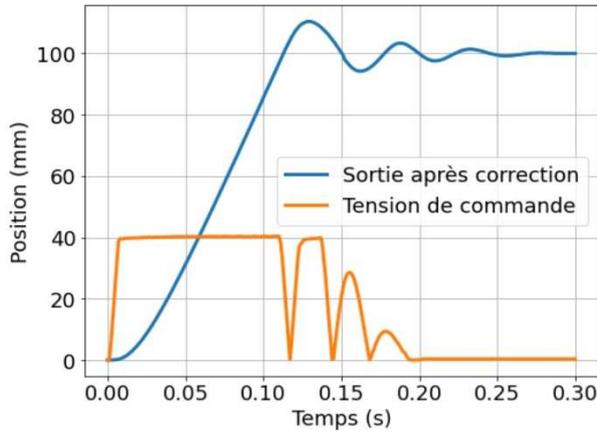
```
In [26]: plt.figure(10, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k3, SORTIE_BF_k3, label='Position mesurée après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k3, ENTREE_BF_k3, label='Consigne de position')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.xlabel('Temps (s)')
```

Out[26]: Text(0.5, 0, 'Temps (s)')



Mise en évidence de la saturation de l'alimentation du moteur

```
In [27]: plt.figure(11, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k3, SORTIE_BF_k3, label='Sortie après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k3, TENSION_BF_k3, label='Tension de commande')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.savefig("comp_rep_bf_sat.png", dpi=300)
```



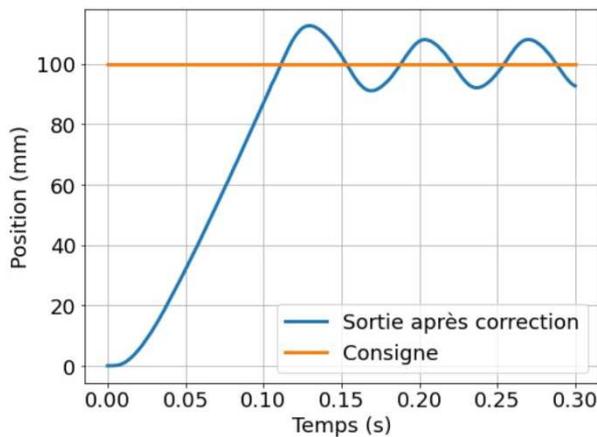
```
In [28]: #####
# Lecture du fichier des résultats de la correction du système
#
TEMPS_BF_k10 = [] # Vecteur avec le temps physique
ENTREE_BF_k10 = [] # Vecteur entrée du système
SORTIE_BF_k10 = [] # Vecteur sortie du système

# Nom du fichier contenant les données
fnom = "echelon_bf_100m_k10.csv"

# Première colonne = TEMPS_BF, deuxième colonne = ENTREE_BF, troisième colonne = SORTIE_BF
with open(fnom, newline='') as csvfile:
    spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter=';', quotechar='|')
    for row in spamreader:
        TEMPS_BF_k10.append(float(row[0]))
        ENTREE_BF_k10.append(float(row[1]))
        SORTIE_BF_k10.append(float(row[2]))
```

```
In [29]: plt.figure(12, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k10, SORTIE_BF_k10, label='Sortie après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k10, ENTREE_BF_k10, label='Consigne')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.xlabel('Temps (s)')
```

Out[29]: Text(0.5, 0, 'Temps (s)')



Détermination des performances du système, comparaison aux exigences

Compétences visées

Procéder à la mise en œuvre d'une démarche de résolution analytique

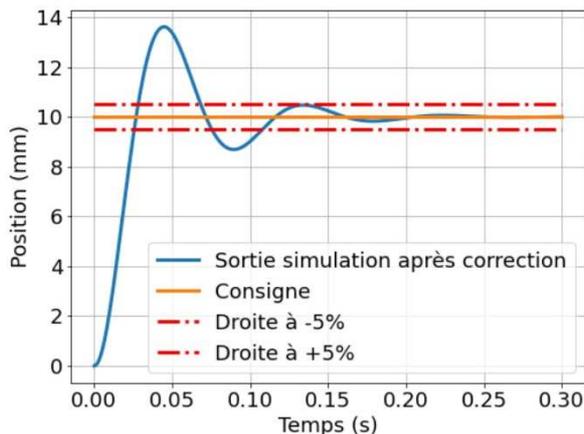
Connaissances	Savoir-faire
Rapidité des SLCI : temps de réponse à 5 %	
Précision des SLCI : - erreur en régime permanent	Déterminer l'erreur en régime permanent vis-à-vis d'une entrée en échelon ou en rampe

Démarche :

à partir d'une courbe de réponse simulée à un échelon on détermine le temps de réponse à 5% par lecture graphique ainsi que le dépassement et l'erreur statique. Ces trois performances sont alors comparées au diagramme des exigences. Ces déterminations peuvent être faites pour différents gains du correcteur afin de mettre en évidence son impact sur les performances du système.

```
In [30]: AMPLITUDE_ENTREE = 10

plt.figure(13, [8, 6])
plt.plot(TEMPS_BF_k1, AMPLITUDE_ENTREE*SORTIE_CORRECTEUR_BF_k1, label='Sortie simulation après correction')
plt.plot(TEMPS_BF_k1, ENTREE_BF_k1, label='Consigne')
plt.plot([0.0, 0.3], [AMPLITUDE_ENTREE*0.95, AMPLITUDE_ENTREE*0.95], 'r--', label='Droite à -5%')
plt.plot([0.0, 0.3], [AMPLITUDE_ENTREE*1.05, AMPLITUDE_ENTREE*1.05], 'r--', label='Droite à +5%')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.ylabel('Position (mm)')
plt.xlabel('Temps (s)')
plt.savefig("comp_rep_cdc.png", dpi=300)
```



Détermination du temps de réponse à 5%

```
In [31]: TEMPS_REP_5PP = click.prompt("Temps de réponse à 5%", type=float, default=0.11)
print("Le temps de réponse à 5% est de " + str(TEMPS_REP_5PP) + " s")

Temps de réponse à 5% [0.11]:
Le temps de réponse à 5% est de 0.11 s
```

Détermination du dépassement

```
In [32]: MAX_ENTREE = click.prompt("Amplitude de l'entrée", type=float, default=10.0)
print("L'amplitude de l'entrée est de " + str(MAX_ENTREE)+"mm")

Amplitude de l'entrée [10.0]:
L'amplitude de l'entrée est de 10.0mm

In [33]: FINAL_SORTIE = click.prompt("Valeur finale de la sortie", type=float, default=10.0)
print("La valeur finale de la sortie est de " + str(MAX_ENTREE)+"mm")

Valeur finale de la sortie [10.0]:
La valeur finale de la sortie est de 10.0mm
```

```
In [34]: MAX_1_DE = click.prompt("Amplitude du premier dépassement", type=float, default=13.0)
print("L'amplitude du premier dépassement est de " + str(MAX_1_DE)+"mm")

Amplitude du premier dépassement [13.0]:
L'amplitude du premier dépassement est de 13.0mm

In [35]: DEPASSEMENT = np.abs(MAX_1_DE - FINAL_SORTIE) / FINAL_SORTIE*100
print("Le dépassement en % est de " + str(DEPASSEMENT))

Le dépassement en % est de 30.0
```

Commandez les numéros de la *La Revue* 3E.I

Les archives de la 3E.I, pour partager l'enseignement du génie électrotechnique et de l'électronique industrielle

N°94/2018



Numéro spécial: Le génie électrique moteur d'innovation pour les forces armées et leurs hommes

N°95/2019



Innovation du GE dans les transports

N°96/2019



Réseaux à faibles consommation et longue portée

N°97/2019



Capteurs et applications médicales

N°98/2019



Projets étudiants

N°99/2020



Véhicule électrifié, avenir de l'automobile ?

N°100/2020



Véhicule électrifié, avenir de l'automobile ? (suite)

N°101/2020



Idees de projets et enseignement à distance

La 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE. Vous pouvez commander les numéros parus dans la limite des stocks disponibles en remplissant le formulaire ci-dessous. Liste complète des archives disponible sur le site www.see.asso.fr



Retrouvez les numéros sur <https://www.see.asso.fr/3ei>

LES EOLIENNES URBAINES ET LE CONCOURS GIMEOLE COMME SUPPORTS ET CONTEXTE DE PROJET TUTEURE EN IUT

STEPHANE RODDIER, ARNAUD BRUGIER, THOMAS JOSEPH

Stephane.roddier@sorbonne-paris-nord.fr, brugier@sorbonne-paris-nord.fr, thomas.joseph@sorbonne-paris-nord.fr, Enseignants de SII (ingénierie électrique et ingénierie mécanique)

Département GIM de l'IUT de Saint-Denis, place du 8 mai 1945, 93200 St-Denis

Université Sorbonne Paris Nord (<https://iutsd.univ-paris13.fr/departement/genie-industriel-maintenance/>)

Résumé : après un bref retour sur les différentes participations au concours national GIMEole des étudiant.e.s du département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Saint-Denis, nous aborderons les organisations pédagogiques et matérielles nécessaires à la réalisation d'une action de cette envergure à l'IUT. Nous présenterons également les derniers développements et évolutions des petites éoliennes urbaines produites à cet effet au sein de notre « GIMlab » et baptisées « Dionysiennes ». De nouveaux outils de conception et modélisation, d'autres procédés de fabrication et l'amélioration des moyens d'essais laissent entrevoir des performances accrues alors que de nombreux progrès ont déjà été faits depuis la publication en 2014 d'un premier article¹ à ce sujet dans La Revue 3EI.

I/ Introduction

Depuis pratiquement une dizaine d'années l'équipe pédagogique du Département Génie Industriel et Maintenance (GIM) de l'IUT de Saint-Denis² inscrit certaines activités de projet tuteuré du Programme Pédagogique National (PPN) dans le cadre du concours national GIMEole³.



Ce concours inter-départements, créé à l'initiative de l'Assemblée des Chef.fe.s de Département GIM⁴ pour promouvoir au niveau national les spécificités de la formation et de nos départements, a vu sa première édition se tenir à l'IUT de Cherbourg Manche en 2008. Durant trois jours au mois de mars, les étudiant.e.s confrontent les éoliennes conçues, fabriquées et mises au point au sein de chaque département GIM, participent à des défis et animations relatifs à l'exploitation de ressources renouvelables, à la sobriété et à l'efficacité énergétiques, aux solutions de transports propres et ce, dans une ambiance universitaire permettant aussi de créer des liens, des amitiés et des coopérations entre les participant.e.s. Depuis lors, le règlement a évolué au gré du déplacement du concours à l'IUT de Villeurbanne, Université de Lyon 1, à l'IUT de Roanne, Université Jean Monnet et, depuis 2020, à l'IUT de Saint-Nazaire, Université de Nantes. L'édition 2020 de GIMEole a malheureusement dû être annulée suite aux mesures prises par le gouvernement afin de lutter contre la propagation du virus COVID-19.

L'objectif de ce concours est de présenter un aérogénérateur le plus performant possible et respectant un ensemble de contraintes liées à son utilisation en milieu urbain. Aussi, le classement général prend évidemment en compte la quantité d'énergie produite au cours des manches en soufflerie mais également d'autres critères contrôlés par des mesures ou estimés par des jurys d'enseignant.e.s et de professionnel.le.s :

- Energie
 - Energie totale fournie sur la phase énergie.
 - Meilleur total sur les deux manches, en pourcentage de l'éolienne qui a produit le plus.
- Vitesse d'accrochage
 - Définit lorsque le courant produit dépasse 0,1A.
 - Note calculée avec une échelle linéaire entre la meilleure vitesse et 55km/h de vitesse de vent.
- Puissance
 - Moyenne des deux notes attribuées pour la puissance maximale à 55km/h et pour la puissance à 43.2km/h de vitesse de vent. Meilleure note des deux manches, en pourcentage de l'éolienne qui a produit la puissance la plus importante.
- Fiabilité
 - Passage sans dommage de la phase sécurité lors de la manche en soufflerie (280-290s).
 - Passage sans dommage au test climatique.
 - Serrage adapté des fixations.
 - Fiabilité – Sécurité.
- Innovation
 - Innovation par rapport aux éoliennes du commerce.
 - Innovation par rapport aux autres éoliennes présentées.
 - Innovation par rapport aux éoliennes du même IUT des années précédentes.
- Maintenance
 - Dossier de maintenance.
 - Intégration de capteurs à l'éolienne.

Traitement-communication des informations à l'utilisateur.

Autres documents (montage, ...).

- Intégration urbaine
Esthétique, Design, Finition.
Nuisance sonore.

A l'issue du concours, chaque éolienne se voit attribuer un score global pour le classement général.

Les équipes concourent en :

- catégorie *Ultimate*

Dans cette catégorie, l'équipe a conçu et réalisé entièrement l'éolienne, aussi bien la partie électrique que la partie mécanique. Aucune partie de l'éolienne ne doit provenir ou être une copie ou une simple amélioration d'une partie d'une éolienne du commerce.

L'équipe doit être capable d'expliquer son travail et de valoriser la création de l'éolienne de A à Z.

- catégorie *Open*

Cette catégorie est moins restrictive. L'utilisation de parties d'éoliennes du commerce, ainsi que la copie ou l'amélioration de ces parties (par exemple : mécanique, turbine, génératrice, électronique) est autorisée. L'équipe doit être capable d'expliquer le travail réalisé et de valoriser les innovations apportées.

L'ensemble des contraintes imposées est donné dans le règlement du concours cité en bibliographie.

Les étudiant.e.s du département GIM de l'IUT de Saint-Denis ont donc, chaque année depuis leur première participation en 2011, imaginé et amélioré différentes solutions techniques baptisées "Dionysiennes" qui ont été parfois remarquées, parfois récompensées par un prix ou même par la victoire au concours, mais aussi parfois détruites ou se sont simplement avérées trop peu performantes. Nous proposons ci-dessous un rappel rapide des principales solutions présentées depuis 2011 :



Figure 1 : Dionysienne "ondulienne" (2011, Cherbourg, Prix de l'innovation). Les voiles, soumises au vent, entraînent dans un mouvement de translation un chariot sur lequel est assemblée une génératrice

linéaire. Principe validé par une production très faible obtenue l'année suivante et avec une seule voile.



Figure 2 : à gauche, dernière version d'"ondulienne" présentée puis abandonnée (2013, Villeurbanne). A droite, premier prototype de Dionysienne à axe vertical. Turbine : de type Darrieus, éléments de profil NACA réalisés par usinage avec une CNC 3 axes puis assemblés / Génératrice (MSAP) de VAE / Electronique maison. Lors de cette édition la turbine en bois (MDF) a été plusieurs fois détruite en soufflerie (électronique défaillante) mais à chaque fois réparée par les étudiant.e.s !



Figure 3 : première victoire pour une Dionysienne (2014, Villeurbanne). Le principe de l'axe vertical de type Darrieus est validé ainsi que celui de la génératrice maison à aimants permanents. L'électronique reste encore à développer pour optimiser les performances (PD3 seul utilisé lors de la manche gagnante)



Figure 4 : deux dionysiennes à axe vertical de type Darrieus sont présentées et remportent des prix ((2015, Villeurbanne). La fabrication des pales au profil amélioré est réalisée par découpe fil chaud de pains de polystyrène expansé avec une petite CNC maison et une seconde génératrice est construite.



Figure 5 : nouvelle victoire d'une de nos équipes (2016, Roanne). Les Dionysiennes ont été améliorées sur de nombreux points : matériaux, inertie, génératrices, électronique enfin opérationnelle. Un dispositif de communication avec le smartphone des capitaines (modes manuel et automatique de régulation, mesures, alarme...) est expérimenté.



Figure 6 : à Roanne en 2017⁵ les deux Dionysiennes présentent, en plus d'un réel effort de finition, deux innovations importantes permettant de réduire l'inertie : une génératrice à bobines tournantes sur l'une (ci-dessus) et une génératrice à triple plateaux sur l'autre



Figure 7 : deux équipes enfin mixtes pour l'édition 2018 à Roanne. La première Dionysienne voit sa génératrice déportée en pied de mât pour améliorer le flux d'air dans la turbine et la seconde son électronique intégrée dans le support avec une fonction de redondance pour améliorer sa disponibilité pendant l'épreuve. Nouvelle victoire à GIMEole pour cette dernière !



Figure 8 : pour la dernière édition du concours à Roanne en 2019, deux nouvelles génératrices sont développées dont une pour une Dionysienne à axe horizontal. L'impression 3D est utilisée plus massivement : diverses petites pièces mais surtout génératrice et pâles de la turbine horizontale. Les profils de pâles sont sélectionnés en amont à l'aide d'un algorithme génétique manipulé par les étudiant.e.s.



Figure 9 : les étudiant.e.s étaient prêt.e.s, avant le confinement, pour concourir lors de GIMEole 2020 avec une Dionysienne à axe horizontal intégrant l'électronique à l'arrière du bloc génératrice ainsi que des pâles réalisées avec de nouveaux profils mais aussi avec une Dionysienne à axe vertical équipée d'une nouvelle génératrice imprimée.



Figure 10 : passage d'une Dionysienne en soufflerie lors d'une manche (GIMEole2018, Roanne)

Tout au long de ces années une réelle démarche de "génie industriel" a été progressivement mise en oeuvre lors des activités de projet puisque les étudiant.e.s sont amené.e.s à :

- imaginer, comparer, évaluer, concevoir et valider certains constituants des aérogénérateurs par modélisation/simulation, prototypage, essais, ...
- mettre en oeuvre et maintenir, voire même concevoir, les outils et procédés nécessaires à la production et aux essais de validation et de test,

- gérer l'espace de production et d'essai appelé "GIMlab" qui se trouve dans des espaces réaménagés au fil du temps au sous-sol de l'IUT de St-Denis, à proximité des "Plateaux Techniques" de l'IUT, qui sont eux aussi des lieux ressources pour la production (techniciens et procédés),
- gérer l'approvisionnement, la production et l'assemblage des pièces, voire la sous-traitance,
- produire les supports de communication demandés,
- communiquer entre eux afin de coordonner leurs actions et se préparer à satisfaire tous les critères imposés par le règlement du concours,
- planifier toutes les étapes du projet et anticiper les questions logistiques, administratives et financières pour participer au concours.



Figure 12 : remue méninge des étudiant.e.s au sujet des critères imposés par le règlement du concours - Bilan à quelques semaines du départ en 2020

II/ Analyses du système pluri-technique "Dionysienne"

Dès la fin de la première année (semaine de Projet Tuteuré (PT1)) et au début de la deuxième année (PT2), les étudiant.e.s qui ont choisi de s'investir dans l'aventure GIMEole vont devoir appréhender le cadre du règlement du concours. Les enseignants utilisent le langage SysML et ses différents diagrammes (transversal, structurels, comportementaux) pour présenter le système pluri-technique "Dionysienne" et les contraintes qui vont s'appliquer à sa conception mais aussi celles qui concernent les autres critères du règlement auxquels les équipier.e.s devront s'intéresser

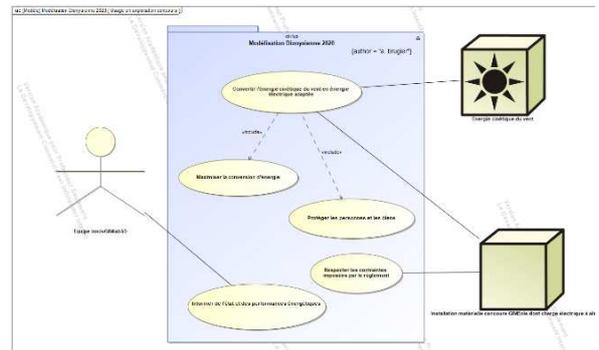


Figure 13 : diagramme de cas d'utilisation en "exploitation normale" (UC Diagram), c'est à dire lors d'une manche du concours GIMEole, pour situer les acteurs externes au système "Dionysienne" et définir les fonctions principales que ce dernier doit assurer

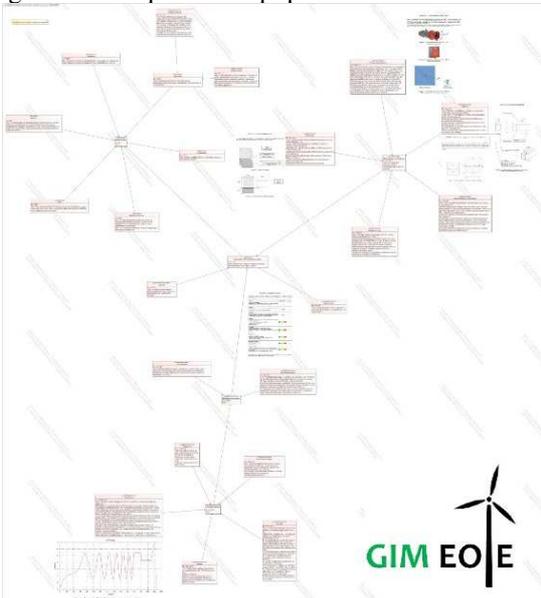


Figure 11 : utilisation d'un diagramme transversal d'exigence (Req Diagram) pour trier et organiser pas à pas, avec les étudiant.e.s, les contraintes de différentes natures exprimées dans le règlement du concours.

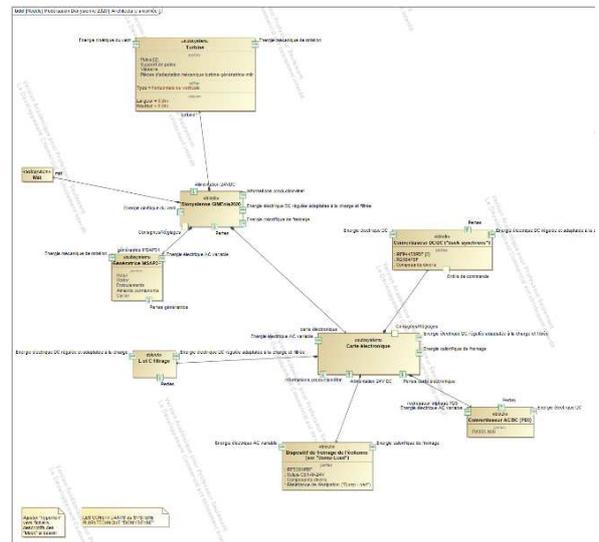


Figure 14 : diagramme de blocs (BDD Diagram) permettant de décrire les principaux sous-systèmes de la "Dionysienne" ainsi que les ports de flux d'énergie/matière/information associés. Les principales solutions techniques seront définies ensuite en cours de projet par les équipier.e.s

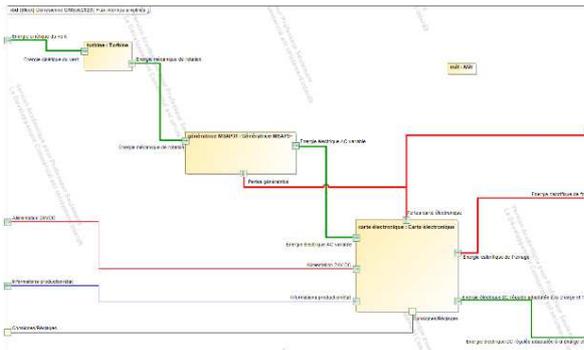


Figure 15 : diagramme de blocs internes (IBD Diagram) présentant les flux d'énergie et d'information entre les trois sous-systèmes de la "Dionysienne". Ce diagramme permet aux étudiant.e.s d'anticiper les relations entre les différents objets techniques à réaliser

III/ Développements récents

Chaque année, à partir des analyses et conclusions tirées par les équipes d'étudiant.e.s et l'équipe pédagogique post-concours, des pistes d'amélioration sont mises sur la table. Il faut alors, en amont des premières séances de PT, tenter d'évaluer leur pertinence et les moyens nécessaires pour les réaliser. Si ces moyens sont accessibles, soit au sein de notre GIMlab, soit au sein des Plateaux Techniques de l'IUT ou encore par sous-traitance, des cahiers des charges fonctionnels sont rédigés et confiés à de petits groupes d'étudiant.e.s, qui les choisissent selon leur intérêt pour les sujets à traiter. Cette réflexion est aussi conduite dans le cadre de l'adaptation des éoliennes aux modifications de règlement qui peuvent survenir ou sur proposition spontanée des nouveaux étudiants.

Exemple des sujets proposés pour la rentrée 2020 aux étudiant.e.s (PT2) :

- amélioration des profils de pales Darwin 2020 (vertical / horizontal) (3 étudiant.e.s)
- amélioration de la génératrice 2020 pour l'éolienne à axe vertical (2 étudiant.e.s)
- amélioration de la génératrice 2020 pour l'éolienne à axe horizontal (3 étudiant.e.s)
- évolution de la carte électronique 2020 (redresseur-hacheur) avec nouvelle commande par intelligence artificielle (3 étudiant.e.s)
- amélioration des éléments de cartérisation et mâts 2020 pour éoliennes (2 étudiant.e.s)
- outils et méthodes de maintenance y compris préventive conditionnelle et prévisionnelle des dionysiennes (4 étudiant.e.s)

III.1/ Conception

De nombreux outils informatiques orientés "métiers" nous sont utiles lors de la phase de conception des solutions. Voici présentés ci-dessous quelques exemples d'utilisation par les étudiant.e.s.

III.1.1/ CAO mécanique (SolidWorks⁶, licence éducation et licence IUT)

Utilisé pour la modélisation et la conception des pièces et ensembles mécaniques des Dionysiennes. Les "éclatés", les différentes vues possibles et les nomenclatures permettent aussi d'enrichir ensuite les dossiers de maintenance et d'alimenter l'outil d'analyse de l'impact environnemental au cours du cycle de vie.

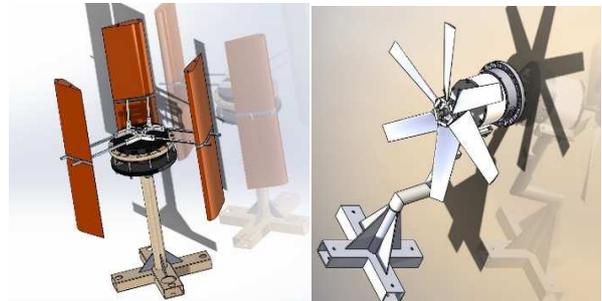


Figure 16 : vue des modélisations 3D des Dionysiennes conçues pour GIMEole2020

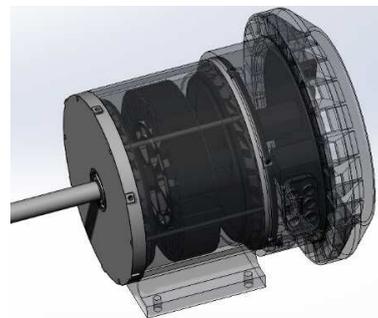


Figure 17 : détail de la génératrice et du logement auto-ventilé de la carte électronique à l'arrière (Dionysienne à axe vertical 2020)

III.1.2/ CAO mécanique des fluides (XFoil⁷, libre + outil Darwin sous Scilab⁸, libre)

La conception d'un profil de pale ne peut être effectué simplement. Le choix pourrait se faire parmi les profils développés pour l'industrie aéronautique mais il s'avère qu'ils ne sont pas adaptés à nos besoins (vitesses de rotation, taille de la turbine, typologie, ...). Les quelques profils disponibles dans le domaine de l'industrie éolienne n'ont pas non plus les caractéristiques souhaitées pour satisfaire aux exigences spécifiques au concours GIMEole.

Afin de déterminer un profil adapté, les étudiant.e.s mettent en oeuvre l'outil logiciel "Darwin" développé par l'enseignant sous Scilab sur la base d'un algorithme génétique et qui sollicite l'outil XFoil via des lignes de commande. XFoil renvoie alors un fichier des caractéristiques aérodynamiques du profil (efforts de portance et traînée pour chaque angle d'incidence) vers Darwin qui fait son tri. Qblade⁹, une des interfaces graphiques d'XFoil dédiée à l'éolien, est aussi utilisé pour présenter graphiquement les résultats du profil et parfois même estimer la production de la turbine.

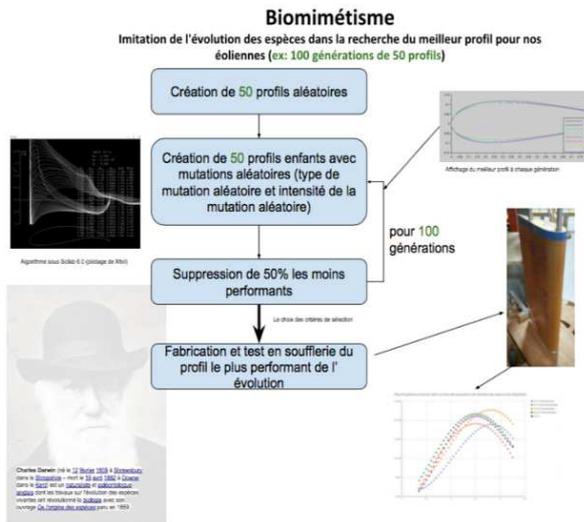


Figure 18 : principe de création et sélection des profils de pale (sous Scilab/Darwin) avant fabrication et test

L'étudiant.e utilise ces outils en choisissant les critères (plage d'angle d'incidence, ratio portance/trainée, plage d'épaisseur de pale réalisable, ...) sur lequel Darwin se base pour effectuer la création et la sélection des profils permettant d'améliorer ou régler les caractéristiques importantes pour nos Dionysiennes : facilité de démarrage, CPmax, plage de fonctionnement CPmax/lambda, vitesse de rotation optimale (sachant qu'une vitesse rapide améliore le rendement de la génératrice et qu'une vitesse lente diminue les risques de "démontage ultra-rapide", c'est à dire d'explosion...). Pour déterminer les critères qui vont avoir un impact sur les caractéristiques et performances des profils et savoir comment les régler, un plan d'expériences est utilisé.

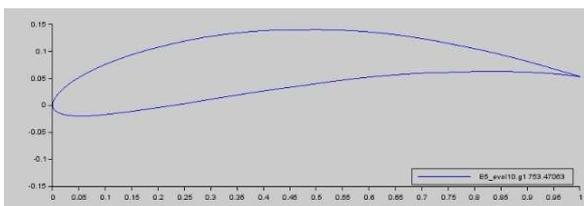


Figure 19 : affichage des coordonnées envoyées à Xfoil du profil généré par Scilab (outil Darwin)

Reste que les performances réelles du profil retenu peuvent décevoir par rapport aux prévisions. La finition des pales est de ce point de vue importante !

III.1.3/CAO mécanique des fluides (module Flow¹⁰ de SolidWorks, licence éducation et licence IUT)

L'utilisation du module de mécanique des fluides de Solidworks ne nous donne pas satisfaction pour l'étude

des profils de pale. Cependant, nous l'utilisons parfois comme illustré fig. 20 pour visualiser l'influence du mât et des coffrets sur le flux d'air traversant la turbine.

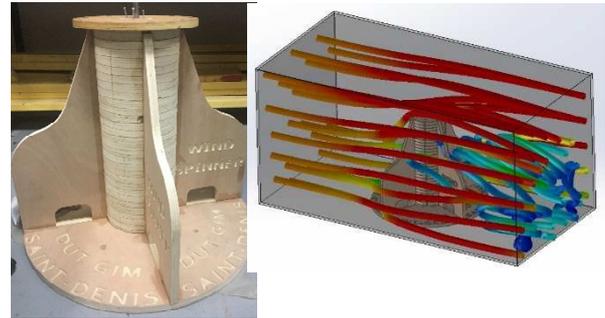


Figure 20 : évaluation des perturbations générées par un mât placé dans la veine de la soufflerie de GIMEole (Dionysienne à axe vertical 2018 / abandon de ce prototype)

III.1.4/ CAO électro-magnétique (FEMM¹¹, libre)

Utilisé pour modéliser et déterminer les caractéristiques des génératrices triphasées à aimants permanents. Les valeurs d'induction, flux, inductance et résistance électrique d'enroulement sont prédéterminées ainsi. L'automatisation des calculs avec le script LUA et l'export des données vers un tableur permettent de tracer l'évolution des forces électromotrices.

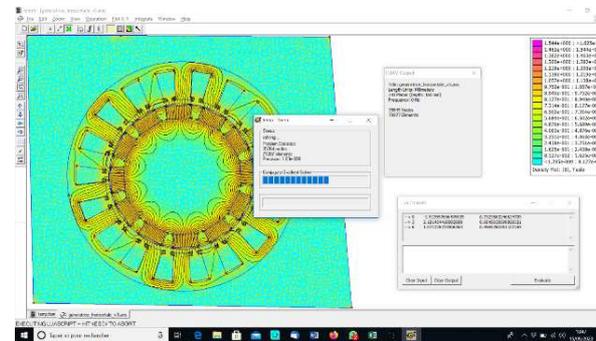


Figure 21 : vue de calculs en cours sur la génératrice à flux radial (Dionysienne à axe horizontal, GIMEole2020)

III.1.5/CAO électronique (EasyEDA¹², gratuit)

Le développement de la carte électronique qui gère le traitement et la communication des données ainsi que le flux d'énergie électrique fourni par la génératrice est réalisé avec cet outil en ligne : schéma avec composants en bibliothèque, typons et génération des fichiers de fabrication. Les différentes versions de ce projet et les modifications sont donc sauvegardées automatiquement et le travail collaboratif est possible. Une fonctionnalité de simulation est aussi proposée mais non utilisée ici.

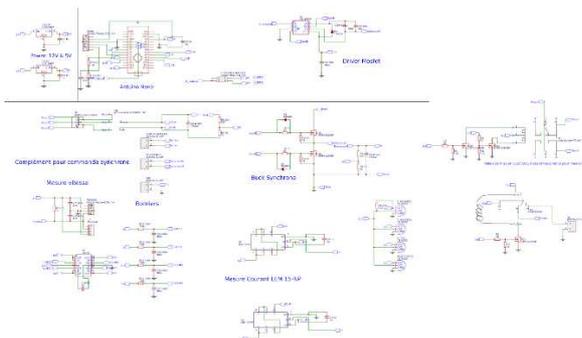


Figure 22 : vue du schéma de la carte électronique version 2020 édité sous EasyEDA

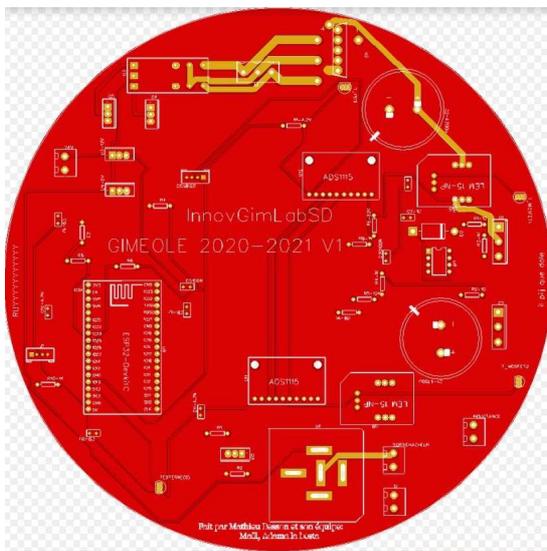


Figure 23 : vue du typon double face créé à partir du schéma électrique pour la Dionysienne à axe horizontal (GIMEole2021, uC : ESP32)

III.1.6/ Programmation micro-contrôleur (IDE Arduino¹³, libre)

Le micro-contrôleur Arduino Nano implanté sur la carte électronique est programmé à l'aide d'un code édité sous l'IDE Arduino. Ce code prend en charge la régulation des grandeurs électriques et l'action sur la commande rapprochée des transistors MOSFETs du hacheur abaisseur. La régulation mise en oeuvre permet de maximiser la puissance électrique extraite de la génératrice et transmise à la charge du concours et ce, quelle que soit la vitesse de rotation de la turbine.

```

Buck_GimAeroLab2018_V1Beta | Arduino 1.8.12
Fichier Edition Croquis Outils Aide
Buck_GimAeroLab2018_V1Beta
void setup()
{
  pinMode(PCB1B0611111000(Da0)); //passe le pin à 32kHz Attention fonctionne sur 5v 10
  attachInterrupt(0, Comptage, CHANGE); // attache l'interruption externe n°0 à la fonction vitesse
  //A chaque fois que le capteur branché sur la broche 2 de l'arduino ,l'interruption n°0, on exécute la fonction comptage
  pinMode(BrocheAbaisseur,OUTPUT);
  pinMode(BrocheDumpLoad,OUTPUT);
  pinMode(BrocheNormal,OUTPUT);
  pinMode(BrocheCourtCircuit,OUTPUT);
  digitalWrite(BrocheNormal,HIGH); //mise en mode normal du relai Court Circuit
  delay(500);
  digitalWrite(BrocheNormal,LOW);
  analogWrite(BrocheAbaisseur,0); //Laisse du temps au condo bootstrap de se charger
  delay(500);
  Serial.begin(9600);
  BluetoothSerial.begin(9600);
}

//-----Calcul de vitesse de rotation
void Comptage() // la fonction appelée par l'interruption externe n°0
{
  Thourneau=100000;
  Delta=Thourneau-Tancien;
  if(Delta>5000)
  {
    Vitesse=6000000.0/(Delta*Delta);
    Tancien=Thourneau;
    //Serial.println(round(Vitesse));
    IndexVitesse++;
    VitesseSomme+=Vitesse;
    if(IndexVitesse==10){VitesseMoyenne=VitesseSomme/IndexVitesse;IndexVitesse=0;VitesseSomme=0;};Serial.println(round(VitesseMoyenne));
  }
}

```

Figure 24 : extrait du code édité et commenté

Le code, associé à la carte électronique, prend également en charge de nouvelles fonctions permettant de satisfaire des contraintes qui évoluent au fil des règlements, notamment celle de freinage et de mise en sécurité pour intégration urbaine :

- ralentissement-freinage par alimentation, via le hacheur, d'une résistance externe ("dumpload"). Permet d'éviter les survitesses en cas de disparition de la charge (ce qui est testé lors du concours),
- mise en sécurité de l'éolienne par mise en court-circuit des enroulements de la génératrice,

Remarque : des solutions de frein mécanique à manque de courant et à courants de Foucault ont été envisagées, voire prototypée pour cette dernière : en cas de survitesse détectée, une plaque de cuivre se rapproche, grâce à un petit système motorisé, d'un flux variable créé par des aimants en rotation.

- gestion codée et câblée (redondance) d'un BPAU coup de poing, de capteurs "fin de course porte" sur d'éventuels carters ou couvercles de coffret, d'un thermo-rupteur monté sur le dissipateur thermique du bras de pont,
- intégration d'une DEL multicolore sur la turbine pour afficher l'état de l'éolienne selon un code couleur, voire d'un bandeau de DELs permettant d'afficher des messages visibles par persistance rétinienne de l'oeil (*persistant of vision display system, POV*). Des étudiant.e.s ont expérimenté ce principe avec succès en 2013 et 2016 dans le cadre de démonstrations hors concours.
- communication de certaines grandeurs électriques et mécaniques mesurées vers le smartphone des équipier.e.s, via un module "Bluetooth" associé à l'Arduino Nano. Cette interface autorise aussi le choix du mode de fonctionnement automatique ou manuel de la régulation et certains réglages.

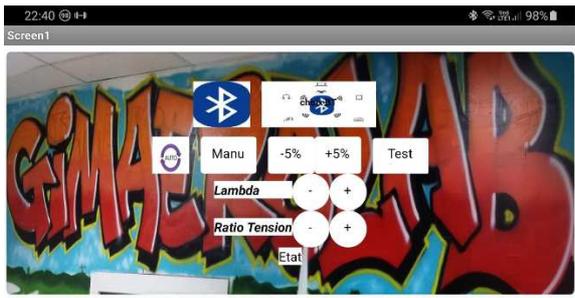


Figure 25 : capture d'écran de l'application pour smartphone dédiée à la visualisation de certaines données ainsi qu'à la configuration et au réglage de la régulation de la Dionysienne (sous OS Android)

Pour la prochaine édition de GIMEole, un des groupes de projet s'est vu confier le développement d'un nouvel outil de gestion informatique de régulation la production électrique de l'éolienne à partir d'un réseau de neurones ("intelligence artificielle"). Cette approche n'est pas nécessaire au bon fonctionnement de la régulation, le correcteur PID codé aujourd'hui dans le microcontrôleur donnant d'excellent résultats. Cependant, il s'agit d'aborder à cette occasion ce domaine en plein développement, d'identifier d'éventuels avantages et d'obtenir peut-être des performances encore non envisagées. La recherche de performances par l'innovation, l'ouverture d'esprit et les méthodes originales de résolution de problèmes font parties de l'ADN de ce concours.

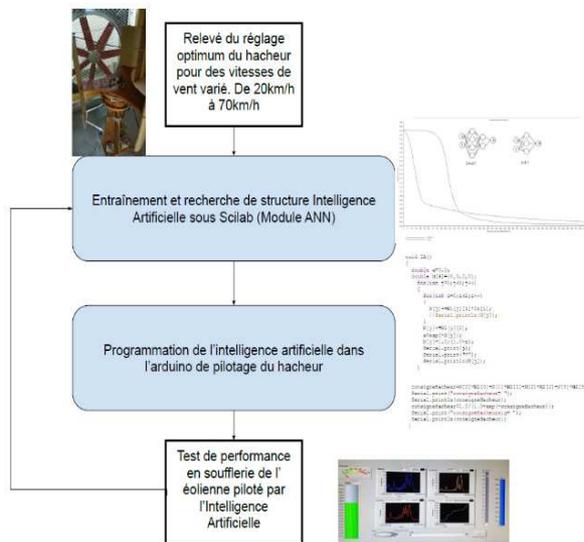


Figure 26 : élaboration de l'ordre de commande du convertisseur DC/DC avec un réseau de neurones (2 neurones en entrée - tension et courant en sortie du convertisseur AC/DC - et un neurone en sortie - rapport cyclique de commande du convertisseur DC/DC -).

III.1.7/CAO électrique (Qelectrotech¹⁴, libre),

Cet outil est utile pour le développement de petits équipements électriques, pneumatiques et hydrauliques comme, par exemple, le coffret de charge électrique nous permettant à la sortie de la soufflerie d'obtenir des contraintes similaires à celles du concours au sein de notre GIMaéroLab. Les étudiant.e.s ont l'habitude d'échanger des fichiers conçus avec cet outil en projet, en TP et avec les techniciens des PT.

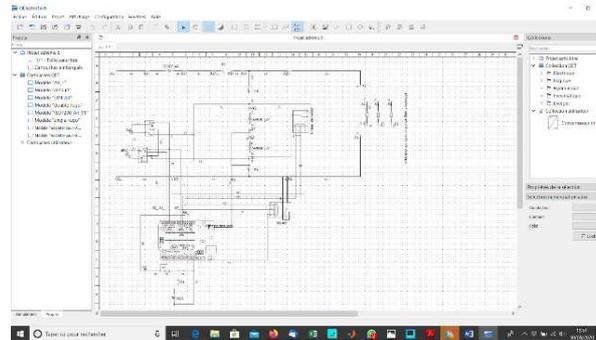


Figure 27 : vue du schéma électrique du coffret de charge de l'éolienne utilisé au GIMaéroLab

III.2/ Fabrication

Plusieurs procédés sont mis en œuvre par les étudiant.e.s pour (re)fabriquer et mettre en œuvre les éléments constitutifs des sous-systèmes turbine, génératrice, carte électronique et pièces de support et mât. Voici quelques illustrations de cette mise en œuvre.

III.2.1/Réalisations matérielles

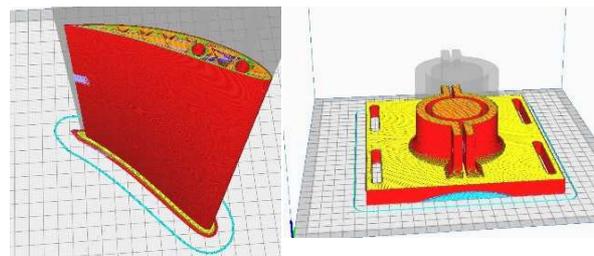


Figure 28 : préparation de l'impression 3D d'une pale et d'une pièce de support (FAO Ultimaker Cura15)

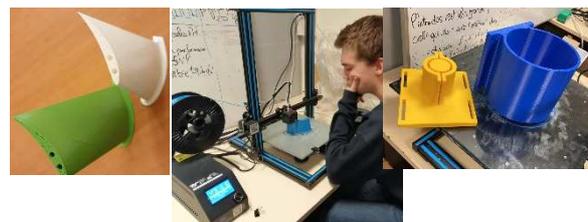


Figure 29 : surveillance de l'impression 3D en PLA d'une pale et de pièces de support et carter (Dionysienne à axe horizontal 2020)

Le procédé d'impression 3D permet également d'envisager des améliorations de forme et structure. L'impression peut aussi s'effectuer sur place, le jour (ou la nuit !) du concours, pour produire à la demande les pièces de rechange nécessaires, limitant ainsi le stock de pièces de rechange à transporter.



Figure 30 : jeux de pales de différents profils, expérimentés puis rangés. A droite, montage d'une turbine 7 pales (Dionysienne à axe horizontal 2020)

Pour les pales de la Dionysienne à axe vertical le procédé de découpe fil chaud de pains de polystyrène (utilisés pour l'isolation extérieure des bâtiments) est privilégié étant donné la régularité du profil.

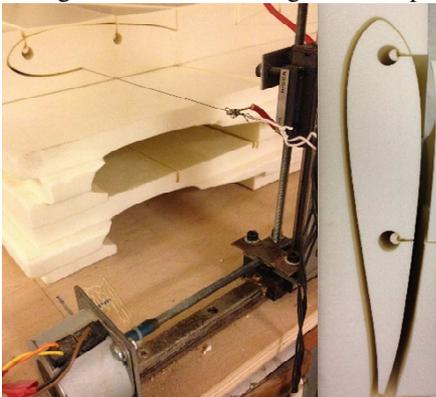


Figure 31 : une MOCN construite au GIMlab, et pilotée par un logiciel de FAO (GRBL16, libre), permet de réaliser ces pales par découpe avec un fil chaud.



Figure 32 : un revêtement en papier Craft déposé avec de la colle à bois permet ensuite d'augmenter la rigidité de la pale de polystyrène. L'état de surface est amélioré avec une épaisseur de film plastique (incorporant les motifs de décoration ou logos des sponsors). La préparation des tubes de rigidification des pales en polystyrène s'effectue avec des outils électroportatifs

Pour certaines pièces en bois (MDF, contreplaqué pour bras de pales, plateaux de bobines et aimants ou mât/structure), la fabrication est réalisée par usinage grâce à une MOCN 3 à 5 axes (Thermwood 67) avec l'aide d'un technicien des Plateaux Techniques.



Figure 33 : à droite, une Dionysienne à axe vertical de 2018 réalisée avec de nombreuses pièces en bois usinées avec la MOCN "Thermwood 67"

La recherche d'améliorations sur les pales et turbines concerne toujours la recherche d'un profil optimisé et le nombre adéquat de pales étant données les contraintes imposées. Les étudiant.e.s se penchent aussi actuellement sur la mise en place d'ailettes ("winglets") pour la finition des bouts de pales de la Dionysienne à axe horizontal afin de diminuer les perturbations aérodynamiques générées et le bruit. Peut-on imaginer un dispositif continu sur la périphérie de la turbine ? Avec un profil permettant en quelque sorte de prolonger chaque pale ? Ce dispositif pourrait-il servir aussi d'anneau extérieur de renforcement ?...

Les génératrices à flux axial des Dionysiennes à axe vertical sont développées depuis notre quatrième participation à GIMEole : bon nombre d'améliorations y ont été apportées depuis lors, que ce soit en terme de

procédé de réalisation, de matériaux, de frottements, d'inertie, de force électromotrice générée... Cela ne fait par contre que deux ans que les étudiant.e.s s'investissent sur les génératrices destinées à la nouvelle Dionysienne à axe horizontal. Les premiers prototypes sont encourageants et de nombreuses techniques ont déjà été mises en œuvre pour réaliser ces machines synchrones à aimants permanents (MSAP).



Figure 34 : différentes génératrices de Dionysienne à axe horizontal construites en 2019 et 2020



Figure 35 : prototype de rotor en acier massif en cours de découpe avec un procédé d'électroérosion. On observe les logements des 12 aimants permanents à la périphérie du futur cylindre. A droite, le procédé de découpe par électroérosion (MOCN Mitsubishi Electric, Advance type 2) mis en œuvre par un technicien des PT.



Figure 36 : tôle statorique découpée à la poinçonneuse-grignoteuse puis recouverte d'un vernis isolant au pinceau. A droite, procédé de grignotage de tôles (MOCN Amada Promecam Aries 222) mis en œuvre par un technicien des PT.

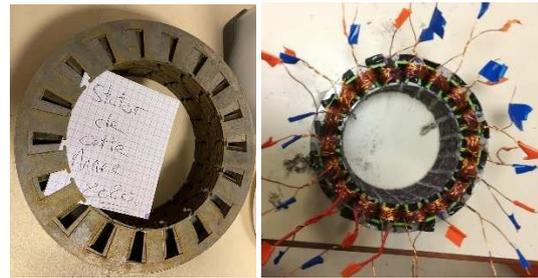


Figure 37 : empilement de tôles statoriques vernies (Dionysienne à axe horizontal 2020). A droite, stator complet bobiné (Dionysienne à axe horizontal 2019). On note ici la présence de protections imprimées 3D dans les encoches pour éviter la rupture du vernis isolant des conducteurs en cuivre par contact avec les tôles abrasives.

Pour les génératrices à flux axial (Dionysiennes à axe vertical), le stator peut être constitué comme sur la fig. 39 de deux plateaux imprimés 3D - sécable en deux parties pour faciliter le montage - permettant d'accueillir les bobines.

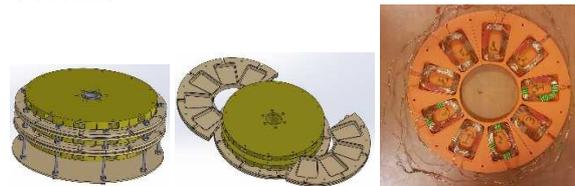


Figure 38 : génératrice à deux plateaux de bobines et trois plateaux d'aimants (Dionysienne 2019).

Le (re)bobinage à la main des génératrices est assez laborieux. L'optimisation du remplissage des encoches reste un défi. Augmenter le nombre de brins en parallèle permet de réduire la résistance d'enroulement et donc les pertes Joule.



Figure 39 : re-bobinage du stator de la génératrice à flux radial (Dionysienne à axe horizontal 2020) avec protections de fond d'encoches

Une nouvelle façon de réaliser un rotor a été testée en 2020 par moulage de résine et de limaille de fer.



Figure 40 : démoulage du stator en résine et limaille de fer (Dionysienne à axe horizontal 2020). Moules extérieurs et intérieurs (ici à droite) imprimés 3D.

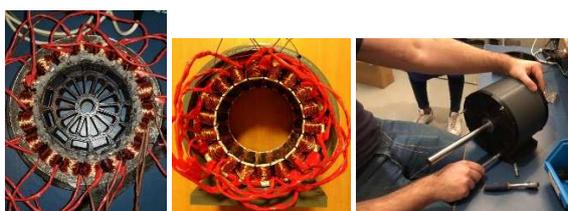


Figure 41 : connexions des bobines pratiquées sur le stator moulé pour former les enroulements triphasés de la génératrice et vue du rotor porte-aimants (version imprimée 3D). Au centre, stator bobiné monté dans son carter imprimé 3D. A droite, montage des flasques de la génératrice. (Dionysienne à axe horizontal 2020)

Lors du premier montage des flasques (figure 42), les étudiant.e.s ont constaté un problème de centrage rotor/stator qu'ils ont résolu par réimpression de pièces de carter ajustées permettant de compenser le défaut.

Les opérations de montage et démontage des prototypes sont nombreuses en vue de pratiquer des essais dans la soufflerie du GIMaéroLab. Les étudiant.e.s s'entraînent ainsi en vue des conditions de concours qui nécessitent une parfaite maîtrise de la préparation des aérogénérateurs présentés.



Figure 42 : montage d'un prototype par les étudiant.e.s (Dionysienne à axe vertical 2019)

Pour ce qui est de la carte électronique permettant principalement d'adapter les formes d'ondes et de réguler la puissance transmise par la génératrice à la charge du concours, une fois les circuits imprimés reçus (une quinzaine de jours après la commande via EasyEDA), les étudiant.e.s se chargent d'implanter et souder les composants préalablement approvisionnés et rangés dans le stock. Il faudra également implanter le code développé sous l'IDE Arduino et effectuer des essais avant le raccordement à la génératrice et à l'armoire de charge type concours au GIMaéroLab.



Figure 43 : vue recto/verso des circuits imprimés réalisés via un service en ligne proposé par la plateforme EasyEDA et adaptés à une intégration à l'arrière de la génératrice horizontale. A droite, implantation des composants avant soudure manuelle de la carte électronique (Dionysienne GIMEole2020).



Figures 44 : cartes électroniques montées dans leur coffret respectif, adapté et imprimé 3D (Dionysiennes à axe horizontal 2020 et à axe vertical 2019)

III.2.2/La Dionysienne, un objet connecté

La préparation de GIMEole 2020 a été l'occasion de commencer à s'intéresser à l'internet des objets (*Internet of Things*, IoT), notamment à des fins de supervision et télé-maintenance de la Dionysienne. Un partenariat avec SigFox¹⁷ nous a permis d'avoir accès à un pack composé d'un "shield" Arduino MKRFOX1200 et d'une antenne. Ce pack permet la transmission de données acquises sur la Dionysienne (via une communication en bus I2C avec l'Arduino Nano de la carte électronique principale qui acquiert déjà bon nombre de grandeurs physiques) vers un serveur en ligne ("SigFox Backend") grâce à une liaison radio bas débit et avec un bas niveau de consommation d'énergie. La conservation et la gestion des données sur le serveur (historique, évolutions, ...)

doit nous permettre la mise en place d'une politique de maintenance préventive conditionnelle voire de maintenance prévisionnelle sur certains sous-systèmes de nos aérogénérateurs. Sont ainsi concernées, les courants et tensions, les durées de fonctionnement et de production, la température des enroulements de la génératrice et la vitesse de rotation de son rotor, l'information de défaut de la commande rapprochée des transistors MOSFets, etc.



Figure 44 bis : carte "Shield" Arduino MKRFOX1200

Finalement, il s'avère que cette solution est bien plus adaptée à des Dionysiennes que nous implanterons en site isolé (voir plus loin "les projets connexes à GIMEole"), loin de toute infrastructure de communication et sans alimentation électrique fiable. Dans la situation du concours ou celle des essais en soufflerie au GIMaéroLab pour lesquels il nous faut recueillir et archiver un grand nombre d'informations sur une courte plage de temps, un débit plus important et une source d'énergie pérenne sont nécessaires. Aussi, une nouvelle solution est actuellement étudiée pour GIMEole2021 et consiste à utiliser une seule carte de développement basée sur un micro-contrôleur ESP32¹⁸ (même IDE Arduino pour la programmation). Embarquant déjà les technologies de communication Bluetooth et WiFi, cette carte nous facilitera la mise en oeuvre du réglage de proximité par smartphone mais surtout de la supervision des grandeurs mesurées. Communicant en WiFi les grandeurs acquises vers une base de données (séries chronologiques, InfluxDB¹⁹) hébergée sur un PC ou une carte RaspberryPi²⁰, ce dispositif nous permettra ensuite d'analyser et surveiller ces données via un autre outil (Grafana²¹). L'outil Node-Red²² nous permettra même de mettre en place une interface de pilotage/réglage de la carte électronique de la Dionysienne via une page web avec n'importe quel support donc. De ce que l'on a pu voir pour l'instant, les étudiant.e.s impliqués sur ce projet arrivent à configurer tous ces outils pour obtenir des résultats prometteurs. La mise en place de seuils, alertes, alarmes et indicateurs reste encore à explorer.

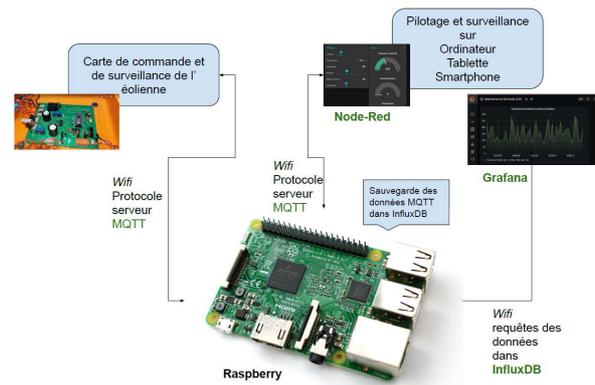


Figure 45 : principe de mise en œuvre des outils de communication, pilotage et réglage ainsi que de gestion et publication de données pour supervision et maintenance.

Cette carte, à la puissance de calcul plus importante, nous autorisera aussi une plus grande flexibilité de fréquence de découpage pour le convertisseur DC/DC (160kHz/320kHz au lieu de 60kHz au mieux avec la solution précédente), permettant ainsi de réduire l'encombrement des éléments (L, C) de filtrage. Bien qu'elle propose de meilleurs convertisseurs A/N (13 bits), nous lui associerons sur le prochain circuit imprimé des convertisseurs externes 16bits à entrées différentielles de type "Adafruit 4 channels" pour améliorer la précision des mesures des différentes grandeurs et diminuer leur susceptibilité EM.



Figure 46 : module NodeESP32 acquis pour commencer les développements (GIMEole2021)

IV/ Essais et mesures en soufflerie

Le GIMaéroLab est l'espace situé au sein du GIMlab où les étudiant.e.s peuvent effectuer des essais des solutions de Dionysienne qu'ils ont assemblées et ce, dans des conditions proches de celles du concours. Il a évolué au cours des années et est désormais constitué :

- d'une soufflerie en anneau munie d'un ventilateur principal de 22kW et d'un ventilateur supplémentaire de 3kW qui permet de créer des perturbations latérales. Cet équipement a été conçu, construit et mis en service par un étudiant accueilli au GIMlab en stage de DUT GIM en 2017, avec l'assistance des techniciens des Plateaux Techniques. Quelques tentatives d'amélioration de la qualité du flux d'air dans la zone d'essai ont été menées sans grand succès pour

le moment (nid d'abeille, mesures avec sonde de Pito, modélisation-simulation),



Figure 47 : construction de la soufflerie du GIMaéroLab et Dionysienne en zone d'essai.

- d'un poste de pilotage de la soufflerie, situé dans une pièce connexe permettant d'observer l'éolienne en exploitation. Un PC permet, via des modules d'E/S et l'outil logiciel Labview²³ (National Instruments), de piloter l'armoire électrique alimentant le ventilateur principal mais aussi d'acquérir les grandeurs caractéristiques de l'éolienne (vitesse, courants, tensions),
- d'une armoire de charge du type de celle qui sera utilisée au concours (batterie 24V à Saint-Nazaire),
- des appareils de mesure utiles à l'analyse de la conversion d'énergie et des signaux : wattmètre numérique, oscilloscope numérique, sondes de tension et de courant, multimètres, ...

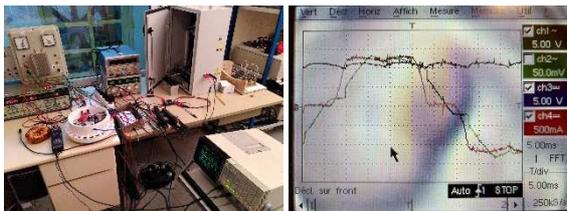


Figure 48 : vues d'une Dionysienne à axe horizontal destinée à GIMEole2020 en test dans la soufflerie ainsi que des appareils de mesure permettant d'analyser les performances de la chaîne d'énergie. Ici, des essais 24 - à vide, en continu et sur charge PD3 + R - pratiqués sur cette Dionysienne permettront d'identifier les éléments du modèle de la génératrice : coefficient de tension, résistance d'enroulement et inductance de phase. MSAP triphasée : 18 bobines prises en sandwich entre 2 plateaux d'aimants permanents, 12 pôles, pas de circuit magnétique car plateaux rotor et stator imprimés en PLA, couplage Y des enroulements.

Dès les premiers jours d'implication dans le projet, les étudiant.e.s sont formés à l'utilisation de la soufflerie afin de pouvoir conduire assez rapidement des essais de

caractérisation des turbines qu'ils fabriqueront tout au long de l'année et analyser le comportement de la chaîne d'énergie existante, en vue de l'améliorer. Pour caractériser les turbines de l'éolienne à axe vertical, la démarche est la suivante :

- recherche d'un profil prometteur,
- impression ou découpe des pales,
- montage des pales et donc de la turbine sur une génératrice et un mât,
- essais en soufflerie,
- mesures pour validation,
- pré-sélection ou non de cette solution.

Cette caractérisation en soufflerie est nécessaire pour déterminer l'importance de nos critères de sélection de profils et les réglages à effectuer. Ceux-ci devant induire une amélioration des performances des Dionysiennes, au fur et à mesure de nos tests en conditions réelles, ils sont affinés et notre compréhension de leur influence sur les performances des turbines augmente.

Le nombre de critères à suivre et les multiples possibilités de réglage rendent le nombre d'essais à réaliser très important. Afin d'optimiser nos ressources nous utilisons la méthode des plans d'expériences et réduisons ainsi le nombre d'essais.

		Cpmax	Delta lambda	Lambda max
Angle min	angleMin(0)	0,34	1,1	3,8
	angleMin(5)	0,395	2,1	4,5
	angleMax(11)	0,375	1,8	4,3
Angle max	angleMax(15)	0,36	1,4	4
	cl/cd	5,3	1,7	4,3
P3	cl	0,365	1,5	4

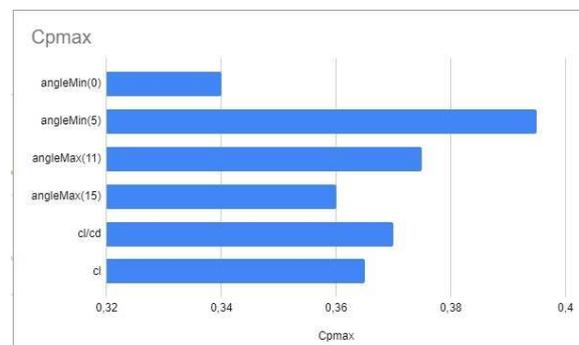


Figure 49 : exemple de mise en œuvre d'un plan d'expériences pour identifier le niveau du réglage de certains critères et optimiser les performances de la turbine de la Dionysienne. Le plan de réglage présenté ici nous permet de conclure aux choix d'un réglage optimal avec un "angle min à 5°", un "angle max à 15°" et le ratio portance/trainée ("cl/cd") à indiquer à l'outil DARWIN.

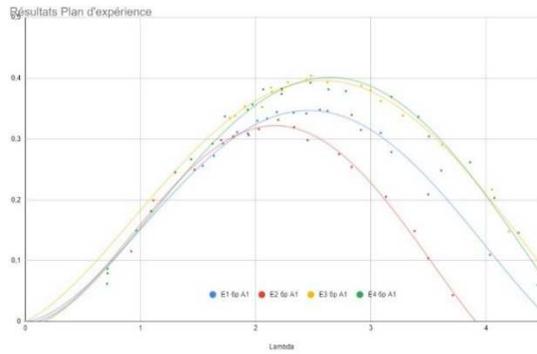


Figure 50 : le tracé des courbes $CP(\lambda)$ des quatre profils permet d'obtenir la caractérisation des performances (CP_{max} , largeur utile, couple de démarrage,...) puis d'indiquer les performances de chaque critère pour chaque niveau afin de choisir les niveaux des critères de sélection d'un cinquième profil plus performant encore.

Trois critères avec deux niveaux de réglage impliquent ici huit combinaisons possibles donc huit essais à conduire avec huit turbines à fabriquer. Grâce au plan d'expériences, on peut donc se limiter à quatre réalisations seulement puis peut-être à une cinquième, la turbine résultante du choix effectué.

La dernière étape consiste à comparer les performances de nos différents profils pré-sélectionnés dans les conditions du concours à l'aide de notre soufflerie.

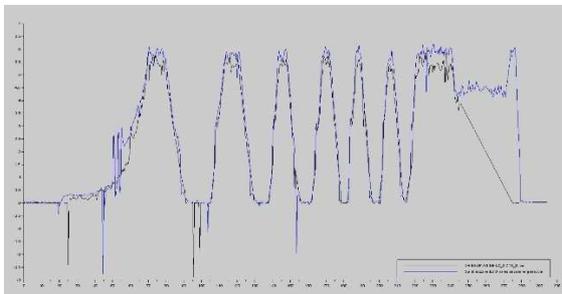


Figure 51 : relevés des performances de deux Dionysiennes permettant de conclure à la meilleure association turbine - génératrice en vue du concours.

Les différences de performance entre les profils de pale peuvent être très significatives. Notre recherche d'optimisation peut induire des gains de performance de l'ordre de 20 à 40%. Dans le cas de la Dionysienne à axe vertical, il aura fallu 4 années de développement pour obtenir un profil que l'on considère aujourd'hui comme optimal nécessitant ainsi des centaines de simulations et la réalisation et le test en soufflerie de plus de 20 turbines. Pour ce profil, nous espérons gagner quelques pourcents de performance mais nous n'avons plus de perspective de gain important. Par contre, concernant la Dionysienne à axe horizontal, son développement est encore récent et entre 2019 et 2020, une amélioration des performances de 20% a été obtenue. Un gain important nous semble encore possible.

Plusieurs autres procédés ont été développés pour évaluer certaines caractéristiques des Dionysiennes. Ils sont présentés sur les figures suivantes.



Figure 52 : prototype de banc d'essai pour génératrice à axe vertical (2017, avant la soufflerie). A droite, mise en œuvre d'un contrôleur d'installation pour vérifier l'isolement des enroulements bobinés (Dionysienne à axe horizontal 2020)



Figure 53 : test de rigidité d'une pale montée sur son support de pales. Au centre, test de résistance aux intempéries d'une demi pale en la laissant tout un hiver accrochée à la fenêtre de l'IUT. A droite, vérification rapide des dimensions de l'éolienne une fois montée à l'aide d'un cadre en bois construit selon les préconisations du règlement (Dionysienne à axe horizontal 2019).



Figure 54 : mesure de l'angle de décrochage aérodynamique des pales de la Dionysienne à axe vertical par observation en soufflerie d'un petit fil fixé au profil

Citons aussi :

- un dispositif d'équilibrage des turbines à axe vertical,
- une recherche de défauts dans les soudures des éléments de mât à l'aide d'un procédé de contrôle non destructif (CND) à ultra-sons,
- un dispositif optique fait maison permettant d'amplifier l'observation du mouvement du mât remplacé ensuite par une analyse vibratoire en soufflerie afin d'obtenir une signature caractéristique du prototype dans des conditions de fonctionnement données et permettre de détecter par la suite certains comportement problématiques dans les mêmes conditions,
- une analyse thermographique infra-rouge pour identifier d'éventuels points chauds en exploitation (frottements, carte électronique, ...),
- ...



Figure 55 : accueil d'un groupe de "petits débrouillards"²⁵ de Saint-Denis (93) pour une démonstration d'essai de Dionysienne au GIMaéroLab.

V/ Autres aspects développés par les équipes

V.1/ Maintenance

Nous avons évoqué précédemment les outils susceptibles de nous aider à mettre en œuvre des méthodes de maintenance préventive conditionnelle et de maintenance prévisionnelle. Mais les étudiant.e.s doivent également proposer une politique de maintenance qui passe par des actions préventives systématiques et décrire des procédures de diagnostic et correctif en cas de défaillance. Pour cela, ils utilisent l'outil en ligne de l'un des partenaires de notre département, CAPILOG²⁶, afin de planifier ces actions, documenter le système et les interventions (arborescence structurelle, plans 2D, éclatés, gammes de montage/démontage, méthodologie de diagnostic, ...), gérer le stock de pièces de rechange et même l'accès rapide aux ressources en ligne via des QR codes.

De plus, pour préparer ces interventions et faire en sorte qu'elles s'effectuent en toute sécurité pour les personnes et les biens, ils s'appuient sur le logiciel Programme d'Analyse des Risques lors des Interventions de Maintenance (PARI Maintenance²⁷).

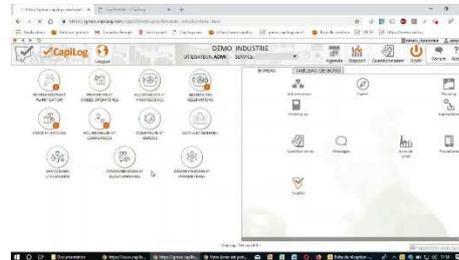


Figure 56 : CAPILOG et PARI Maintenance, outils de description et gestion des activités de maintenance

V.2/ Analyse du cycle de vie et impact environnementaux

Un autre projet de remplacement de stage proposé à un étudiant a permis d'aborder cet aspect qui avait été délaissé par manque de temps ces dernières années. La base de données IMPACTS²⁸ de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, <http://www.base-impacts.ademe.fr/>) a été utilisée et l'étude a démarré avec toutes les données à sa disposition relatives à la fabrication des deux Dionysiennes préparées pour GIMEole2020 : fichiers CAO, plans et nomenclatures des composants, masse et volume de chaque composant, nature des matériaux, factures de matière première ou de composants, procédés de fabrication, compléments fournis par les camarades, etc...

Cette étude sur l'ensemble des étapes du cycle de vie des Dionysiennes a permis d'obtenir des résultats d'impacts environnementaux de référence et va ainsi nous permettre de vérifier que les choix de solutions techniques qui seront faits à l'avenir permettront de les réduire. La quantification des impacts environnementaux ne fait pas partie des critères pris en compte pour le classement final au concours mais est toujours bien considéré par les jurys.

Fin de vie : Recyclage, Incinération et mise en décharge										
Procédé maître	Quantité	Masse	% Concerné	Zone gte	Filbre	Friction	Taux recyclage	Procédé recyclage	Taux incinération	Taux mise en déch
Fabrication > Support-Axe plein										
Axe inoxydable, roulements, bandes à frot (100% pour EEE (100% de recyclage))	0,707 kg	0,707 kg	100	France	Embu	Acier	66,7	FOV, PARI Acier Services d...	21,3	12

Figure 57 : une des fenêtres de la Base IMPACTS associée à l'étape « fin de vie » pour un élément de mât

Impact environnemental/sous-partie	Fabrication	Distribution	Utilisation	Fin d
Changement climatique fossiles (kg eq CO2)	29,64	0,29	2,71E-05	-
Utilisation ressources fossiles (MJ)	3542	50,23	0,03	-
Utilisation de ressources minérales et métalliques (kg eq sb)	0,0063	4,95E-06	1,92E-10	1,0
Changement climatique (kg eq CO2)	29,64	0,23	2,71E-05	-
Eutrophication des eaux douces (kg eq P)	-0,0016	2,88E-05	1,23E-10	0,0
Particules (incidence de maladie)	2,44E-05	1,56E-07	1,56E-11	6,1
Formation d'osone photochimique (kg eq COVNM)	1,03	1,00E-02	7,91E+00	-
Acidification (mol eq Hs)	3,23	1,70E-02	7,87E+00	-
Eutrophication terrestre (mol eq N)	3,19	8,00E-02	1,86E+06	-
Eutrophication marine (mol eq N)	0,04	7,00E-03	2,85E+00	-
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg eq CFC-11)	8,42E-06	1,28E-07	3,90E-12	-1,2
Radiations ionisantes (eq kBq U235)	13,28	3,00E-01	1,20E-02	-

Figure 58 : un des tableaux de présentation des résultats de calcul d'impacts environnementaux par étape du cycle de vie pour les différents constituants d'une Dionysienne (Diony Halliday).

V.3/ Communication

Plusieurs supports de communication sont à produire pour le concours. Ceux-ci peuvent être travaillés en amont dans les cours de communication et de langue anglaise de la formation. On retrouve ainsi :

- les posters qui seront installés sur le stand de l'équipe permettant aux visiteurs et aux jurys de découvrir les points forts, innovations et particularités de l'aérogénérateur et la démarche de génie industriel mise en œuvre,



Figure 59 : poster produit en 2020 (Diony Halliday)

- une page web avec une trame imposée à mettre en ligne avant le concours et sur le site du concours,
- une note écrite présentée ensuite en temps limité et à l'oral aux différents jurys de passage sur le stand. Celle-ci est produite par les équipier.e.s, selon leur affectation en projet et en tenant compte des critères imposés par le règlement,

- une vidéo de 3 minutes diffusée durant le concours (amphithéâtre dédié, repas de gala, ...) où prime l'originalité du scénario et de la mise en scène de l'éolienne. Une idée envisagée mais encore jamais réalisée par les équipes de St-Denis consisterait à utiliser un bras de robot industriel pour déplacer la caméra autour de l'éolienne et obtenir des mouvements et points de vue originaux.

Par ailleurs les journées portes ouvertes, l'exposition dans le hall de l'IUT au retour du concours ainsi que la participation à diverses manifestations (Savante Banlieue²⁹ sur Plaine Commune, festival de makers, ...) permettent aux étudiant.e.s de présenter leur travail au grand public et notamment aux lycéen.ne.s francilien.ne.s.

VI/Modélisations et simulations du point de vue système

Les outils précédents, bien qu'utilisés séparément, peuvent être utiles à la construction et à la validation d'un modèle multi-physique du système Dionysienne. Ainsi, des résultats issus de calculs, simulations et mesures peuvent être intégrés dans un modèle plus global intégrant la ressource en vent et la charge à alimenter en concours. Pour la réalisation de ce modèle, nous avons choisi l'outil logiciel PSIM³⁰ que les étudiant.e.s utilisent déjà dans d'autres modules d'enseignement. Nous le privilégions désormais pour son approche plus technologique, bien utile pour valider certains dimensionnements ou comportements observés.

Un modèle multi-physique sous Scilab-Xcos a été très utilisé jusqu'en 2017 nous permettant de tester rapidement nos stratégies de régulation pour le concours. Aujourd'hui ce modèle est moins utilisé car notre soufflerie, reproduisant à échelle réduite les conditions du concours, nous permet un réglage en temps réel de ces stratégies.

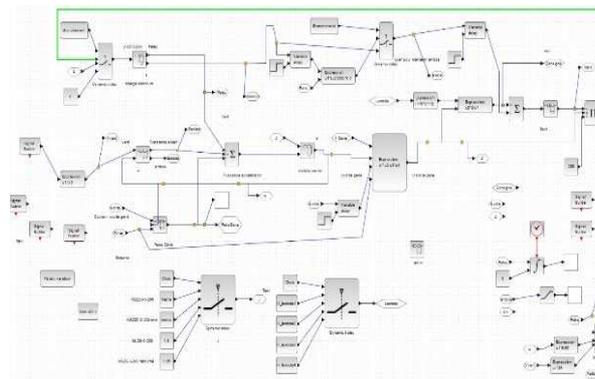


Figure 60 : vue du modèle multi-physique de la Dionysienne(+ cycles de vent soufflerie + charge concours) utilisé jusqu'en 2017 (Scilab-Xcos).

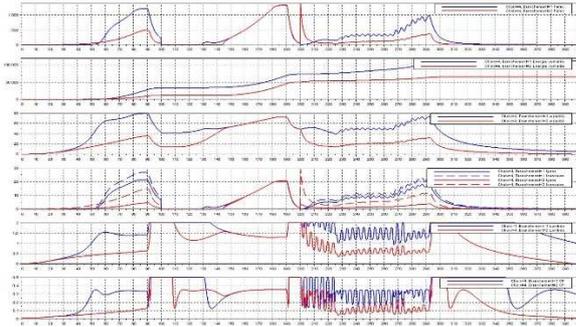


Figure 61 : Vue de quelques résultats de simulations de Dionysiennes sur une manche de concours pour différentes turbines (Scilab-Xcos)

Une mission de modélisation-simulation sous PSIM et POWERFORGE³¹ a été confié à la fin de l'année universitaire 2020 à un étudiant dans le cadre de son projet de remplacement de stage en entreprise qu'il n'a pu accomplir. Deux licences professionnelles "sponsor" ont été négociées auprès de l'éditeur PowerSys Solutions pour que l'étudiant et un enseignant puissent travailler ensemble, à distance. On donne ci-dessous des éléments de l'énoncé de ce travail qui n'est pas encore achevé et qui devra donc se poursuivre cette année :

- effectuer une synthèse des informations concernant les Dionysiennes 2020 et la nomenclature des composants électriques et électroniques utilisés (commande et puissance).
- découvrir les nombreux tutoriels, vidéos et webinaires existants pour prendre en main PSIM, POWERFORGE et FEMM et appréhender leurs principales fonctionnalités.
- avec PSIM, créer les chaînes d'énergie et d'information de chacune des deux Dionysiennes destinées au concours 2020 avec :
 - générateur de vent constant ou de cycles de vent concours --> Turbines avec caractéristiques $C_p(\lambda)$ fournies suite aux essais de caractérisation au GIMaéroLab --> Génératrices MSAP 3~ (paramètres fournis suite aux essais de caractérisation au GIMaéroLab) --> Electronique de puissance (composants 'IDEAL') avec deux structures à modéliser : a) redresseur PD3 + charge électrique concours (batterie) PUIS b) idem + hacheur abaisseur et sa commande simple en boucle ouverte + filtre --> Circuit de freinage. On doit arriver avec le cas b) à la structure de puissance présentée dans le schéma fourni EasyEDA des Dionysiennes de cette année.
 - mettre en place les dispositifs de mesures (v, i, P, E, ...) et d'acquisition sur le modèle. Renseigner au mieux (noms / caractéristiques / textes d'explication) ces premiers modèles avec les informations issues des camarades impliqués cette année.
- par ailleurs : modéliser et simuler (magnétostatique + script LUA) les deux génératrices utilisées à l'aide de FEMM (un exemple fourni) et en déduire les caractéristiques des génératrices : K, L, R, à comparer/valider avec les déterminations faites lors d'essais en soufflerie des deux dionysiennes et de leur génératrice.
- régler les paramètres de simulation et simuler les modèles complets sur PSIM pour différentes vitesses constantes de vent en entrée et pour différents rapports cycliques (si modèle avec hacheur). Rédiger un script pour automatiser les simulations possibles. Comparer les résultats et conclure sur le fonctionnement de ces modèles en comparant avec les résultats fournis issus de la littérature.
- en complément : créer différents défauts (coupure de phase génératrice, diode ou MOSFET HS, ...) et réaliser un catalogue de signatures des signaux électriques permettant de diagnostiquer le défaut.
- mettre en place la commande analogique régulée du modèle avec hacheur permettant une optimisation de la puissance transmise (Cf. existant et outil SMRTCTRL de PSIM). Principe de la régulation existante à reproduire : "*U est l'image de la vitesse de la turbine/génératrice et la puissance extraite de l'éolienne est proportionnelle à cette vitesse au cube : $P=k1*Vitesse^3=UxI$ en sortie du pont redresseur PD3. Ainsi $I=U^2/k2$. On mesure U en sortie du PD3 et on en déduit I à obtenir : c'est la consigne de la régulation analogique en boucle fermée avec correcteur PI(D) à réaliser. La régulation se stabilise uniquement quand l'équation est vraie. On obtient les coefficients par calculs (avec lambda et coefficient de tension de la génératrice) et par essais (à vent constant).*"
- simuler les modèles complets sur PSIM pour différentes vitesses constantes de vent en entrée puis pour les cycles de vent imposés lors des phases du concours. Pour cela mettre en œuvre un modèle moyen (AVERAGE MODEL) du hacheur pour simuler sur temps long au cours des cycles de vent concours et pour relever les puissances, les pertes et l'énergie fournies à la charge.
- comparer avec PSIM les différents modèles et résultats selon les variations de critères suivants en ce qui concerne les pertes dans les interrupteurs (conduction et commutation) et le rendement global de conversion :
 - la technologie des interrupteurs : MOSFET silicium classique déjà choisi (IDEAL, MODEL 1&2, SPICE) / MOSFET SiC (IDEAL, MODEL 1&2, SPICE) puis MOSFET GaN (si existant / IDEAL, MODEL 1&2, SPICE)
 - la fréquence de découpage

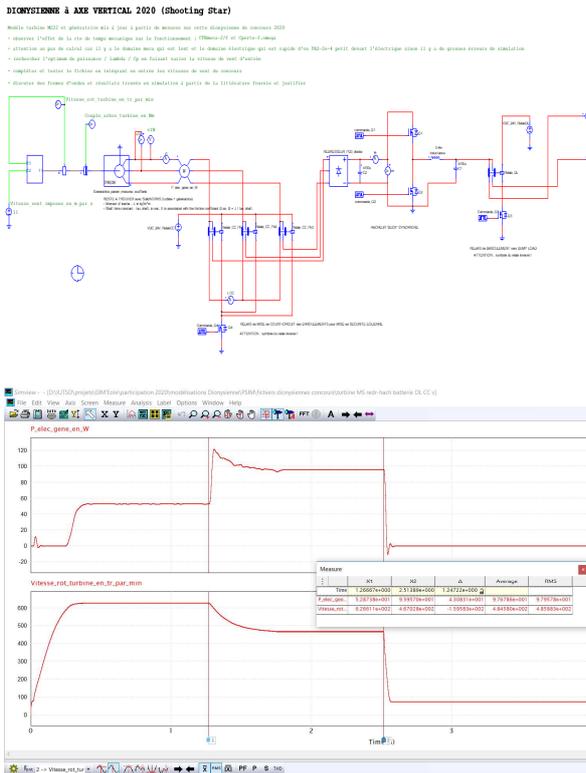


Figure 62 : exemple de modélisation et simulation de la Dionysienne à axe vertical sous PSIM (GIMEole2020) : turbine-MSAP-PD3 et hacheur abaisseur-charge batterie + test dispositifs de freinage puis d'arrêt par mise en CC des enroulements statoriques.

- sous POWERFORGE, afin de prendre l'outil en main, concevoir les convertisseurs et filtres précédents et réels (a) et (b) et les comparer selon les différents critères proposés. Comparer les résultats obtenus (notamment les pertes) avec ceux de l'étude précédente sous PSIM.
- avec POWERFORGE, compléter l'étude des convertisseurs précédents avec c) le pont redresseur associé à un hacheur entrelacé ("multi stages buck") et sa commande et d) un redresseur MLI à MOSFETs et sa commande. Importer ces convertisseurs dans PSIM afin de les simuler pour comparer les solutions globales avec a) et b) et ce, dans le cadre du concours.
- conclure alors sur la meilleure solution de convertisseur d'électronique de puissance à mettre en oeuvre pour chaque éolienne en 2021 en fonction des critères évoqués précédemment.

Les 3 derniers points ont pour objectif de mettre en oeuvre un outil original associé à PSIM, POWERFORGE. Celui-ci permet de comparer des pistes d'optimisation des performances et des dimensionnements des convertisseurs et de leurs éléments de filtrage associés : nature des interrupteurs, fréquences de découpage, typologies de convertisseurs (PD3 + hacheur "buck" entrelacé, pont redresseur commandé MLI + hacheur "buck" ou pas, ...). Nous prévoyons d'effectuer ce travail en nous basant

notamment sur les travaux et conclusions d'Adam Mirecki³² et du L&SiR³³.



Figure 63 : l'outil POWERFORGE associé à PSIM

L'utilisation de l'outil logiciel PSIM dans cette modélisation est intéressante notamment parce que les fonctionnalités suivantes sont proposées par l'outil et présentées dans le menu d'aide et les tutoriels :

- utilisation de sous-circuits pour améliorer la clarté du modèle complet et le présenter avec les différents blocs constitutifs de l'éolienne,
- "look up table (.tbl)" pour entrer des caractéristiques d'entrée/sortie : $C_p=f(\lambda)$ de la turbine ou contrôle de charge (P, R...),
- "curve capture tool" pour importer une courbe d'une documentation composant ou autre,
- "mechanical electrical block interface" pour faire le lien entre constituants mécaniques et électriques (turbine et génératrice, par ex),
- utilisation de composants idéaux ("IDEAL MODEL") puis de plus en plus réels ("LEVEL 1&2 MODEL") jusqu'à l'entrée des données constructeurs ("SPICE MODEL"),
- "device database editor" : bibliothèque et éditeur de composants avec entrée des caractéristiques via la documentation constructeur. Idéal pour comparer les performances des composants (électrique, thermique, ...) dans notre application,
- utilisation de convertisseurs préfabriqués ("pre built modules") pour les redresseurs non commandés et commandés par exemple,
- pour la simulation des convertisseurs et interrupteurs, possibilité de passer de "switch model" à "average model" pour permettre la simulation avec des constantes de temps très différentes (électriques à l'échelle de la commutation des composants / mécaniques pour la turbine et la génératrice),
- double pas de temps de simulation pour limiter le temps de simulation (plus de précision uniquement sur les commutations),
- "AC sweep" pour faire varier la fréquence d'une perturbation et obtenir le diagramme de Bode sortie/entrée,
- "SmartCTRL" pour mise au point des régulations en boucle fermée (boucles interne et externe),
- "parameter sweep" et "multiple parameter sweep" pour faire varier des valeurs de composants au cours d'une simulation,
- affichage et adaptation des échelles de temps et d'ordonnées à l'affichage des résultats sous SIMVIEW,

- "thermal modules" pour l'étude des pertes dans les interrupteurs (Transistors MOSFETS et Diodes),
- "script" pour écrire du code associé à la modélisation et automatiser des tâches,
- ...

Un premier objectif de ce travail est d'obtenir un modèle suffisamment précis et documenté de nos Dionysiennes pour évaluer rapidement l'impact d'une modification de nature ou de dimensionnement de solution technologique (fréquence de découpage, composant ou structure d'électronique de puissance, régulation, caractéristique de turbine, ...) sur les performances au concours et ce, avant même de s'investir sur une réalisation de la solution.

Un second objectif consiste à pouvoir caractériser, à des fins de surveillance et de maintenance, tout type de défaut interne à la Dionysienne, créer ainsi un catalogue de signatures permettant d'expliquer certains comportements anormaux observés au GIMaéroLab ou lors du concours et ainsi diagnostiquer rapidement la défaillance. Les fonctions d'affichage et d'analyse de l'outil Grafana cité précédemment devraient permettre de repérer ces anomalies.

VII/ Association étudiante innov'GIMlabSD

L'implication des étudiant.e.s dans le cadre des seuls modules de projet tuteuré n'est pas suffisante pour conduire un projet d'une telle envergure en un peu moins d'une année (PT1 au S2, PT2 au S3 et PT3 en début de S4). Au cours de ces modules, les étudiant.e.s ont des objectifs bien précis à réaliser qui peuvent être d'ailleurs différents de ceux imposés par le concours. C'est pourquoi il a été décidé il y a quelques années de créer une association étudiante permettant de mobiliser plus largement les jeunes souhaitant s'investir sur des projets à caractères scientifique et technique.

“L'association innov'GIMlabSD a pour objet de permettre aux adhérent.e.s de développer des objets techniques et des services en lien avec :

- une participation à un concours regional, national ou international ouvert aux étudiant.e.s et apprenti.e.s du département GIM de l'IUT de Saint-Denis (ex. : GIM'Eole, Solarcup, ...),
- le thème de l'adaptation locale du département GIM de l'IUT de Saint-Denis (Ex. : Transport, Energie et Maintenance en Milieu Urbain),
- tout autre projet à caractères scientifique et technique porté par des étudiant.e.s et apprenti.e.s du département GIM de l'IUT de Saint-Denis, après approbation par le bureau de l'association.

Les adhérent.e.s, grâce aux moyens conférés par cette structure, entendent pouvoir imaginer, concevoir, fabriquer, tester et maintenir des solutions techniques au sein du GIMlab, “makerspace” du département GIM de l'IUT de Saint-Denis.

Cette association doit également permettre la mise en place d'actions d'organisation, de gestion, de communication et d'information autour de ses projets et

des thématiques abordées.” Extrait des statuts de l'association étudiante innov'GIMlabSD.

Les adhérent.e.s de cette association, dont le bureau est renouvelé chaque début d'année universitaire et qui est domiciliée à l'IUT de St-Denis, définissent donc les projets annuels sur lesquels ils souhaitent s'investir et s'appuient sur sa structure pour résoudre des problèmes identifiés depuis longtemps : temps et moyens pour aborder tous les aspects imposés par le règlement d'un concours, besoin de collaboration transversale entre équipes d'un même projet ou projets, capitalisation des connaissances et partage des données, gestion du GIMlab et investissements, dépenses en autonomie vis à vis du département GIM, financement des projets via des recherches de subvention et de dons, organisation d'actions de communication internes et externes à l'IUT, accès à des moyens logistiques, partenariats ...



Figure 64 : aperçu des principaux partenaires et financeurs du projet GIMEole 2020 porté par l'association étudiante innov'GIMlabSD

VIII/ Projets connexes à GIMEole

Le département GIM et l'association étudiante innov'GIMlabSD sont impliqués dans plusieurs projets connexes s'appuyant sur les compétences acquises lors de la préparation du concours GIMEole.

VIII.1/ GIMEoleX³⁴

« GIMEole de l'extrême » est un exemple de projet dans lequel s'impliquent quelques étudiant.e.s et enseignants du département GIM. Proposé par la très dynamique équipe pédagogique de Roanne, en partenariat avec le Club Alpin Français, ce prolongement original du concours GIMEole consiste à transporter à pieds les matériels fabriqués par les étudiants (éoliennes, systèmes PV, générateurs à pédales, systèmes de stockage, de gestion et de comptage de l'énergie électrique, ...) jusqu'au refuge du Parmelan depuis l'IUT d'Annecy (parcours de 12km avec un dénivelé de 1500m) afin d'y organiser la vie et certaines activités sportives et festives en autonomie énergétique pendant trois jours.

Ici, l'entraide et la collaboration entre les équipes sont promus. Les éoliennes conçues et fabriquées doivent ainsi être légères, facilement démontables et

transportables. Certaines seront fabriquées de A à Z par les étudiant.e.s, d'autres sont issues des prototypes ayant servi pour GIMEole et adaptées ou sont des améliorations ou adaptations de petites éoliennes du commerce.

Après deux repérages par les équipes pédagogiques, l'implantation de plusieurs anémomètres et d'un *datalogger* afin d'analyser les caractéristiques du vent sur plusieurs semaines, des réunions avec les gestionnaires du refuge concernant la logistique et l'obtention d'une validation par l'association nationale des départements GIM, GIMEoleX a vu sa première édition prévue les 3,4,5 juin 2020 annulée. Neuf départements GIM devaient y participer.



Figure 65 : repérage par les enseignant.e.s des IUT de Roanne, Saint-Denis, Bayonne et Cherbourg en juin 2019

VIII.2/ Expérimentations :

VIII.2.1/ Centre Eolien Urbain GIM-EOL à St-Nazaire

Sur proposition de l'équipe pédagogique de l'IUT de Saint-Nazaire, nous avons répondu favorablement à la proposition d'installer une de nos Dionysiennes sur une plateforme d'essai et de formation située en ville. Cela se fera post-concours GIMEole organisé par ce même IUT et ce, pour une durée d'un an.

En février 2019, Saint-Nazaire Agglomération Tourisme (SNAT) a inauguré « EOL centre éolien³⁵ », le premier équipement touristique de découverte de l'éolien en mer. Installé au rez-de-chaussée de l'écluse fortifiée du port de Saint-Nazaire, cet espace de 240 m² propose une expérience immersive à travers un parcours ludique et pédagogique. La valorisation de la terrasse panoramique de l'écluse fortifiée, au-dessus du centre EOL, à travers une véritable plateforme d'essai (Centre Eolien Urbain GIM EOL), permettra d'observer la production des petits aérogénérateurs installés.

Ce projet répond aux enjeux et thématiques du territoire :

- mise en avant des savoirs-faire locaux,
- soutien à l'enseignement supérieur,
- expérimentation de la maintenance,
- diffusion de la culture scientifique technique et industrielle,
- valorisation touristique.

Trois à six éoliennes sur certaines périodes, pourront être installées sur ce centre éolien urbain GIM-EOL qui se veut être un site instrumenté et d'expérimentation des outils et des équipements de télé-maintenance.



Figure 66 : situation de la plateforme d'expérimentation, vue aérienne

VIII.2.2/ Développement de notre plateforme d'essai

L'installation et la maintenance d'une de nos Dionysiennes va être confiée cette année à un groupe d'apprentis de notre licence professionnelle "Maintenance et Technologie : Systèmes Pluri-techniques". Celle-ci se fera à proximité de notre champ photovoltaïque situé en toiture terrasse de l'IUTSD. Grâce à l'installation d'une centrale météorologique et à l'acquisition des grandeurs caractéristiques de chaque équipement, il sera alors possible de suivre les performances énergétique de l'ensemble.



Figure 67 : champ PV du département GIM installée sur une toiture terrasse de l'IUT de Saint-Denis (2kWc - stockage - gestion de l'énergie par un onduleur intelligent IMEON 3.6 d'Imeon Energy36)

VIII.2.3/ Micro-aérogénérateur "Dionysienne" en matériel libre³⁷

Ce projet, rédigé dans le cadre de la boîte à idées n°2 du démonstrateur industriel pour la ville durable "Rêve de Scènes Urbaines"³⁸, vise à proposer un micro-aérogénérateur pouvant être auto-construit par des usagers et ce, sous licence de matériel libre. Ce produit pourra aussi être modifié, distribué voire commercialisé librement et également servir de support aux formations scientifiques et industrielles sur notre territoire de Plaine

Commune ainsi qu'à l'information sur les énergies renouvelables (notamment en milieu urbain). Un volet complémentaire consiste à proposer un exemple de service de prédétermination du potentiel éolien d'un site précis par calculs numériques grâce à notre partenaire FLUIDYN³⁹ ainsi qu'une calculette du productible et de la consommation électrique de l'installation envisagée.

Les innovations proposées ici sont :

- technique : proposition d'une solution originale de micro-aérogénérateur adapté aux milieux urbain et péri-urbain pour la production d'énergie électrique et d'un service d'estimation de productible en amont du projet de fabrication-implantation,
- contractuelle : mise à disposition de la documentation du produit sous licence de matériel libre et travail collaboratif pour le faire évoluer (via une plateforme d'échanges et de partage),
- économique : licence de matériel libre autorisant la distribution et la commercialisation par une structure porteuse issue du territoire⁴⁰,
- usage : auto-production et auto-consommation d'énergie électrique en milieu urbain (ex. : territoire de Plaine Commune) par des usagers divers (du particulier à l'entreprise),
- ce même produit peut aussi servir de support de formation et d'information dans le cadre des activités du département GIM de l'IUT de Saint-Denis (FI, FA, FC, etc....) ou autre.

Prochaines étapes :

- calculs numériques de la ressource éolienne sur l'endroit exact d'installation de la Dionysienne à la ferme universitaire et validation avec des mesures issues de l'installation d'une centrale météorologique (en cours),
- réalisation d'un prototype, installation, modifications et production d'énergie à la ferme universitaire⁴¹ (en cours),
- améliorations de conception/production suite au retour d'expérience des expérimentations (en cours et d'après solutions validées sur la Dionysienne de concours (GIMEole)),
- rencontre avec de nouveaux acteurs (territoire et ailleurs) pour faire évoluer le produit et obtenir certaines réponses (juridique, réglementaire, coopérations,...),
- réalisation documentaire et mise en place de la plateforme web de diffusion-partage.

Un démonstrateur industriel pour la ville durable à la ferme universitaire



Figure 68 : bache présentant l'installation du prototype et accrochée devant la "ferme universitaire", face au campus principal de l'USPN (Villetaneuse)

VIII.2.4/ Autres pistes

Par ailleurs notre département est régulièrement contacté pour envisager des projets pédagogiques avec des étudiant.e.s ou apprenti.e.s. Citons :

- le dimensionnement de petits aérogénérateurs pour l'alimentation électrique en site autonome de fermes, jardins ou locaux associatifs sur le territoire de Plaine Commune,
- le dimensionnement de petits aérogénérateurs avec la société parisienne PICNIC⁴² qui fabrique des kiosques et "pop-up stores" autonomes et alimentés avec de petites éoliennes urbaines et/ou des modules PV,
-

IX/ Conclusion

S'investir dans un concours national annuel tel que celui-ci ne peut que stimuler la curiosité des étudiant.e.s pour les savoirs scientifique et technologique et enrichir les pratiques pédagogiques des enseignants, à condition toutefois de réunir les conditions matérielles et organisationnelles pour que puissent éclore les propositions et que se concrétisent les solutions imaginées. Poussé.e.s par les succès et les aventures vécues par leurs aîné.e.s les étudiant.e.s s'investissent en projet tuteuré et au travers de leur association. La confrontation et le partage avec les autres départements crée une émulation, des liens et des coopérations sur d'autres projets, y compris locaux, que nous n'envisagions pas en décidant de rejoindre dix ans auparavant Cherbourg en camionnette avec une « ondulienne » et une poignée de deuxième année.

X/ Remerciements

Les auteurs remercient les étudiant.e.s impliqué.e.s et les équipes organisatrices des différentes éditions du concours *GIM'Eole*, les collègues du département GIM et de l'IUT de Saint-Denis ainsi que les soutiens de l'association étudiante *innov'GIMlabSD*. Comme indiqué précédemment, certaines phases de réalisation ont nécessité les compétences spécifiques des techniciens des Plateaux Techniques de l'IUT de Saint-Denis. Nous tenons ici à remercier Joyce Bazabas (technicien mécanicien / commande numérique), Fabrice Villenave (technicien mécanicien), William Laurent (technicien électricien) et Patrice Ameglio (technicien / responsable du service) pour leur aide et leur disponibilité.

XI/ Bibliographie

- [1] “une expérience de projet pluri-technologique en IUT : conception et fabrication d’une éolienne “urbaine””, Stéphane Roddier et Arnaud Brugier, La Revue 3EI, Avril 2014
- [2] Site du département Génie Industriel et Maintenance de l’IUT de Saint-Denis, Université Sorbonne Paris Nord (<https://iutsd.univ-paris13.fr/departement/genie-industriel-maintenance/>)
- [3] Site du concours national étudiant GIMEOLE (www.gimeole.fr). On peut y retrouver de nombreuses <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/informations> concernant l’organisation de cet événement : règlement, contraintes imposées, épreuves, ... Règlement ici aussi : <https://gimeole.iut-sn.univ-nantes.fr/flipbook2/mobile/index.html#p=4>
- [4] Site national du département Génie Industriel et Maintenance : <https://iutgim.org/>
- [5] Découvrir le reportage réalisé sur les équipes de St-Denis Roanne en 2017 par le service audiovisuel de l’Université Jean Monnet ici : <https://www.youtube.com/watch?v=uVMQvikgJoo>
- [6] <https://www.solidworks.com/fr>
- [7] <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- [8] <https://www.scilab.org/>
- [9] <http://www.q-blade.org/>
- [10] <https://www.solidworks.com/fr/product/solid-works-flow-simulation>
- [11] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
- [12] <https://easymeda.com/fr>
- [13] <https://www.arduino.cc/>
- [14] <https://qelectrotech.org/>
- [15] <https://ultimaker.com/fr/software/ultimaker-cura>
- [16] <https://github.com/grbl/grbl>
- [17] <https://www.sigfox.com/en>
- [18] <https://www.gotronic.fr/art-module-nodemcu-esp32-28407.htm>
- [19] <https://www.influxdata.com/>
- [20] <https://www.raspberrypi.org/>
- [21] <https://grafana.com/>
- [22] <https://nodered.org/>
- [23] <https://www.ni.com/fr-fr/shop/labview.html>
- [24] Modélisation et essai d'une petite éolienne sous PSIM (IUFM de Créteil - site de St-Denis), 2008, IUFM de St-Denis, Franck Wilmot, PAF Académie de Créteil.
- [25] <https://www.lespetitsdebrouillards.org/>
- [26] <https://www.capilog.com/site/>
- [27] <https://iutlps.unistra.fr/iut/pole-pari-maintenance.html>
- [28] <http://www.base-impacts.ademe.fr/>
- [29] <https://www.savantebanlieue.com/>
- [30] Logiciel de modélisation et simulation de convertisseurs d’électronique de puissance et machines PSIM (<https://powersimtech.com/>). Permet l’analyse fine des solutions. Tous les modules de PSIM : <https://powersimtech.com/products/psim/> et le lien des ressources du site : <https://powersimtech.com/support/resources/>
- Pour toute question sur PSIM ou POWERFORGE :
Matthieu Castellucci | PSIM & PowerForge Sales Manager, www.powersys-solutions.com, m.castellucci@powersys.fr, <https://www.linkedin.com/in/matthieucastellucci/>
- [31] Logiciel d’aide au dimensionnement, de comparaison et de choix de convertisseurs d’électronique de puissance POWERFORGE (<https://www.powerdesign.tech/fr/>). Outil en ligne et accessible depuis PSIM.
- [32] “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance”. Thèse soutenue le 5 avril 2005 par Adam MIRECKI et préparée au Laboratoire d’Electrotechnique et d’Electronique Industrielle de l’ENSEEIH Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828
- [33] Modélisation d’une chaîne de conversion éolienne de petite puissance
O. GERGAUD, B. MULTON, H. BEN AHMED

LÉSiR – Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan
– Campus de Ker Lann – 35170 BRUZ
Electrotechnique du Futur 2001 – Nancy 14-15
novembre 2001

[34] <https://www.gimeoextreme.fr>

[35] <https://www.saint-nazaire-tourisme.com/les-visites/les-sites-de-visite/eol-centre-eolien/>

[36] <https://imeon-energy.com/>

[37] <https://francevilledurable.fr/content/la-dionysienne-leolienne-urbaine-en-materiel-libre-open-source-hardware>

[38] <https://francevilledurable.fr/content/demonstrateurs-industriels-pour-la-ville-durable-reve-de-scenes-urbaines>

[39] <http://www.fluidyn.com/>

[40] Exemple : <http://www.pointcarre.coop/>

[41] <https://lesfermesdespoir.fr/La-ferme-universitaire-P13-c-est-quoi>

[42] <https://www.picnic.paris/>

IDENTIFICATIONS PARAMETRIQUES ET OPTIMISATION APPLIQUEES UN PROBLEME DE MECANIQUE

ADRIEN SPECHT & PIERRIC MELEARD
 adrien.specht@ens-paris-saclay.fr
 pierric.meleard@ens-paris-saclay.fr

Résumé : Cet article a été réalisé dans le cadre de notre formation en Sciences Pour l'Ingénieur à l'École Normale Supérieure Paris Saclay. Il s'appuie sur une application bien connue de la mécanique classique, et vise à déterminer les paramètres qui répondent au mieux à une problématique. Idéal pour une activité documentaire, ou un travail pratique, cet article présente plusieurs méthodes pour calculer un gradient, pour choisir le pas de l'algorithme, et pour optimiser.

I/ Introduction

Dans un monde où les robots prennent de plus en plus d'importance, il est intéressant de connaître l'énergie et la direction à donner à un projectile pour qu'il réalise une fonction définie.

De nombreuses applications sont envisageables. Nous avons imaginé un monde dans lequel les colis de taille raisonnable seraient projetés dans les airs, puis atterriraient directement chez le particulier avec un système de filet. Le "drive" qui connaît tant de succès de nos jours laisserait sa place au "fly" pour encore plus de succès ! Nous pensons également à un monde dans lequel les agriculteurs ne se fatigueraient plus à disperser les graines dans leurs champs avec un tracteur, mais préféreraient propulser directement les graines dans les trous souhaités. Enfin, ce monde verra émerger des sports robotisés comme le golf, le tennis, ou le basket pour lesquels la maîtrise parfaite de l'objet rond sera primordiale !

C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'élaborer un modèle qui assure au robot la précision exigée. Nous étudierons le mouvement d'un projectile qui commence par tomber d'un immeuble (donne l'énergie), puis qui rebondit sur un trampoline (donne la direction), pour enfin voler vers sa destination finale.

Nous commencerons d'abord par chercher comment envoyer le projectile le plus loin possible dans une modélisation sans vent. Puis, nous modifierons notre modélisation pour tenir compte du vent. Enfin, nous verrons comment faire en sorte que le projectile passe dans une zone définie en amont comme dans un panier de basket

II/ Comment avoir une portée maximale ?

II.1/ Modélisation du problème

II.1.1/ Étude du mouvement

Le but de cette étude est de proposer une modélisation simplifiée de la trajectoire d'un projectile

sous l'effet de la pesanteur uniquement. Nous négligerons la poussée d'Archimède et la force de freinage exercée par l'air dans toute l'étude. Le référentiel d'étude sera le référentiel terrestre, supposé Galiléen.

Nous lâchons d'une hauteur H au-dessus du point O , origine du repère (xOy) , le projectile de masse m , puis ce dernier rencontre un trampoline en h qui fait un angle α avec l'horizontal.

Lors de la chute libre du projectile entre H et h , l'énergie se conserve :

$$E(H) = E(h) \\ mgH = mgh + \frac{1}{2}mv_h^2$$

Le projectile arrive donc en h avec la vitesse :

$$v_h = \sqrt{2g(H-h)}$$

Nous considérons ensuite que le trampoline se comporte comme un ressort idéal qui conserve l'énergie. En outre, il ne fait que dévier la trajectoire sans dissiper d'énergie comme un miroir ferait pour un rayon lumineux parfaitement réfléchi. Le projectile sort finalement du trampoline avec la vitesse :

$$\vec{v}_h = v_h \times (\sin(2\alpha)\vec{e}_x + \cos(2\alpha)\vec{e}_y)$$

L'application de la seconde loi de Newton au projectile permet d'écrire :

$$\frac{d^2\vec{OM}}{dt^2} = -g\vec{e}_y$$

La projection suivant \vec{e}_x et \vec{e}_y , puis la double intégration de l'équation précédente nous conduit aux équations paramétriques suivantes :

$$\begin{cases} x(t) = v_h \sin(2\alpha)t \\ y(t) = -\frac{g}{2}t^2 + v_h \cos(2\alpha)t \end{cases} \quad (1)$$

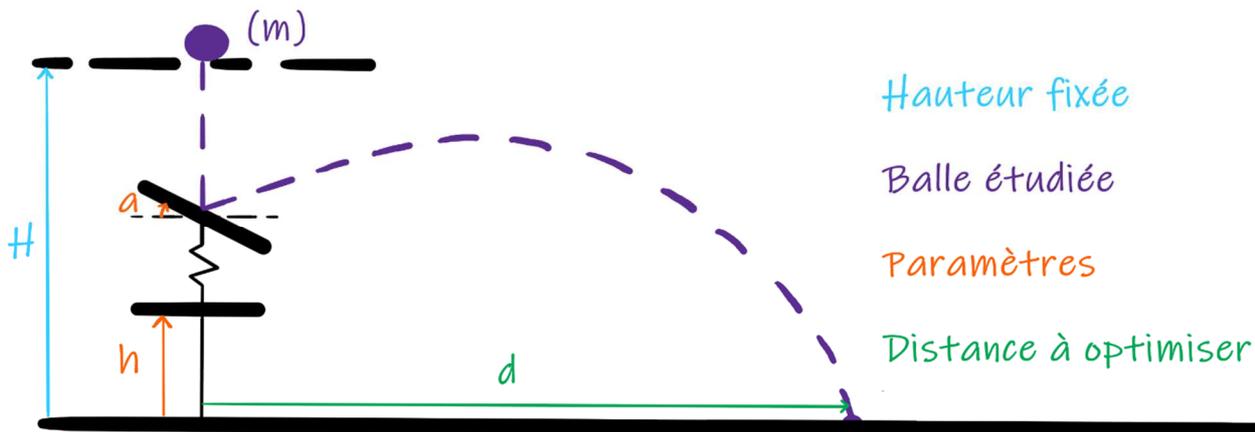


Figure 1 : Schéma de la situation imaginée

II.1.2/ Quelle est la portée ?

Nous cherchons l'expression de la distance horizontale pour laquelle le projectile retombe sur le sol. Autrement dit, il faut exprimer $x(t_s)$ avec t_s qui désigne l'instant où le projectile retombe sur le sol.

Le projectile touche le sol quand $y(t_s) = 0$. En résolvant l'équation du second degré et en choisissant la seule solution envisageable¹, nous trouvons :

$$t_s = \frac{v_h \cos(2a) + \sqrt{\Delta(a, h)}}{g}$$

$$\text{Avec } \Delta(a, h) = 2g(H - h) \cos^2(2a) + 2gh$$

Ensuite, nous injectons l'expression de t_s dans l'équation paramétrique (1) pour finalement obtenir la portée d en fonction de l'orientation et de la position du trampoline :

$$d(a, h) = (H - h) \sin(4a) + \sin(2a) \sqrt{\frac{2(H - h)\Delta(a, h)}{g}} \quad (2)$$

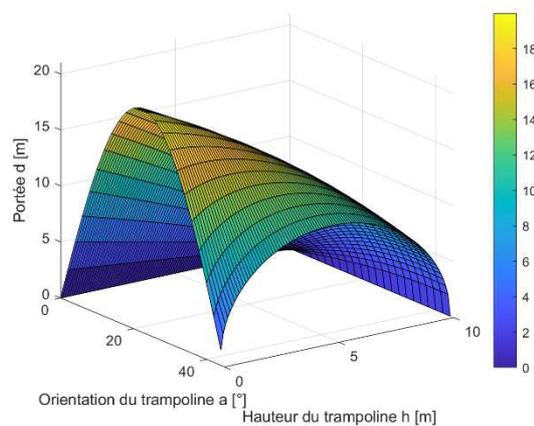
II.2/ Résolution du problème

II.2.1/ Illustration de la fonction portée $d(a, h)$

Nous cherchons à identifier l'angle et la hauteur qui permettent d'obtenir la portée maximale. Il s'agit donc de déterminer de façon numérique le maximum de la fonction $d(a, h)$. C'est ce que nous avons représenté sur la Fig. 2. Nous pouvons vérifier la cohérence de l'équation (2) avec les observations suivantes :

- si $h = H$, alors le projectile reste immobile, donc la portée est nulle ;
- si $a = 0$, alors le projectile oscille à la verticale, donc la portée est nulle ;

- si $(a, h) = (45, 0)$, alors le projectile est en chute libre jusqu'au sol, donc la portée est nulle.

Figure 2 : Tracé de la fonction portée $d(a, h)$

II.2.2/ Algorithme d'optimisation

La connaissance d'une expression explicite de la portée (2) nous guide vers une optimisation par la méthode du gradient. Cette dernière est une méthode itérative qui fait varier les paramètres d'angle et de hauteur dans la direction du gradient jusqu'à atteindre la portée maximale [1].

Dans l'algorithme 1, nous voyons qu'il est nécessaire de calculer le gradient de la fonction portée en p . Nous choisissons dans un premier temps un calcul par différences finies. Autrement dit, nous changeons légèrement les paramètres dans une direction puis dans l'autre, et nous comparons les portées calculées pour ces paramètres à la portée en p . Nous déterminons ainsi dans quelle direction la portée augmente le plus.

II.2.3/ Le domaine acceptable des paramètres

La première observation que nous faisons lorsque notre algorithme tourne, c'est que nous avons un problème de domaine (cf Fig 3a). Dès le départ, nous

¹ Nous ne développerons pas le discriminant Δ car cela conduit à une alternance positive/négative de t_s suivant l'orientation du trampoline.

avons en effet oublié de mentionner les conditions suivantes :

$$a \in [0,45] \text{ en degré et } h \in [0,10] \text{ en mètre} \quad (3)$$

Algorithme 1 : Montée selon le gradient

Entrée :

$p = (a_0, h_0)$: Paramètres de départ

N : Garde fou

δ : Pas

ϵ : Précision

PortéeGradient(p) : Fonction qui calcule la portée et le gradient de la portée au point $p = (a, h)$

Programme :

$(fini, compteur, d_{precedent}) \leftarrow (0, 0, 0)$;

tant que $fini = 0$ **faire**

$[d, gradient] \leftarrow$ PortéeGradient(p) ;

$p \leftarrow p + \delta \times gradient$;

$compteur \leftarrow compteur + 1$;

si $compteur \geq N$ **ou** $|d - d_{precedent}| < d$ **alors**

$fini \leftarrow 1$;

fin

$d_{precedent} \leftarrow d$;

fin

Sortie :

$p = (a_{opt}, h_{opt})$ et $d = d_{opt}$

Pour pallier ce problème, nous avons d'abord essayé de prolonger par continuité la fonction $d(a, h)$ par une exponentielle décroissante suivant h :

$$\hat{d}(a, h) = \begin{cases} d(a, h) & \text{Si } h > 0 \\ d(a, 0) \times \exp(-\beta h) & \text{Sinon.} \end{cases}$$

Ainsi, le paramètre β ajuste la décroissance suivant la hauteur h de sorte que le gradient pointe naturellement vers les hauteurs positives. Si cette solution fonctionne, elle n'est pas pour autant optimale. Non seulement elle converge parfois vers des solutions non exploitables, mais elle nécessite également de pouvoir imposer un β suffisamment grand pour que le gradient s'oriente vers le domaine acceptable quelle que soit la valeur de l'angle, ce qui s'est avéré plus compliqué que prévu. Nous avons opté pour une solution plus radicale : ajouter une boucle "si" (cf algorithme 2) dans la boucle "tant que" de l'algorithme 1.

Algorithme 2 : Pour éviter la sortie du domaine

si $h < 0$;

alors

$h \leftarrow 0$

fin

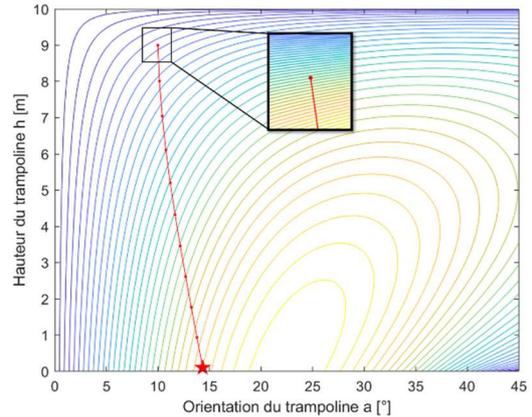
Sur la Fig. 3b, nous remarquons que le pas est de plus en plus petit lorsque les corrections sont appliquées. En effet, le gradient s'oriente davantage dans la direction de h que dans la direction de a . Or, le gradient de l'algorithme 1 est normée. Par conséquent, quand nous sommes proches de la limite du domaine, seule la

composante du gradient suivant l'angle a contribue au déplacement des paramètres.

II.2.4/ Optimisation du pas

Afin de réduire le nombre d'itérations de l'algorithme, nous aimerions ajuster le pas δ qui déplace les paramètres. Pour ce faire, nous anticipons en calculant la portée qui devrait être obtenue à l'itération suivante si le pas était fixé. Lorsqu'il s'agit d'une pente

(a) : Avant correction



(b) : Après correction

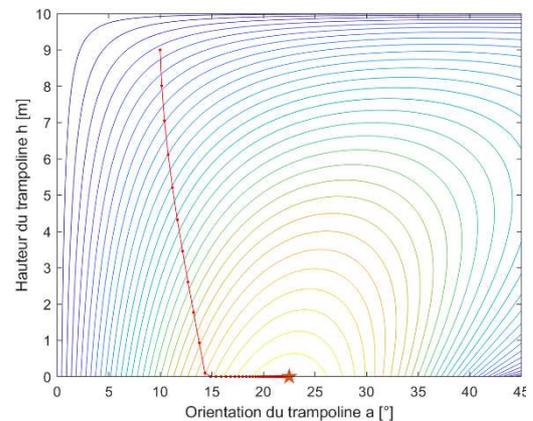


Figure 3 : Comment rester dans le domaine acceptable ? pour $\delta = 1$ et $p_0 = (10, 9)$

croissante, nous multiplions par μ . À l'inverse, lorsqu'il s'agit d'une pente décroissante, nous multiplions par λ [2]. Nous complétons ainsi l'algorithme 1 par l'algorithme 3.

Algorithme 3 : Pour gagner des itérations

$d_{suivant} \leftarrow$ Portée($p + \delta \times gradient$) ;

si $d_{suivant} > d$ **et** $\mu \times \delta < \delta_{max}$ **alors**

$\delta \leftarrow \mu \times \delta$;

fin

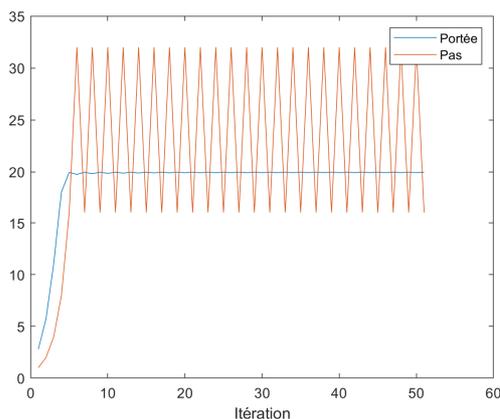
sinon

$\delta \leftarrow \lambda \times \delta$;

fin

Se pose maintenant la question des valeurs que nous donnons à μ et λ . Il est primordial que l'algorithme ralentisse drastiquement à la fin. En effet, imaginons que les premières itérations de l'algorithme contribuent à faire augmenter le pas δ . Si ce dernier est trop élevé à l'approche de l'extremum, alors il y a un fort risque pour que l'algorithme survole l'extremum et tombe de l'autre côté de la montagne. Ensuite, il remonte, mais le pas étant à nouveau trop élevé, l'algorithme survole encore l'extremum. Jamais nous n'atteignons le sommet de la montagne (cf Fig. 4a). Le meilleur moyen d'éviter ce

(a) : Divergence pour $\lambda = 0,5$



(b) : Convergence pour $\lambda = 0,1$

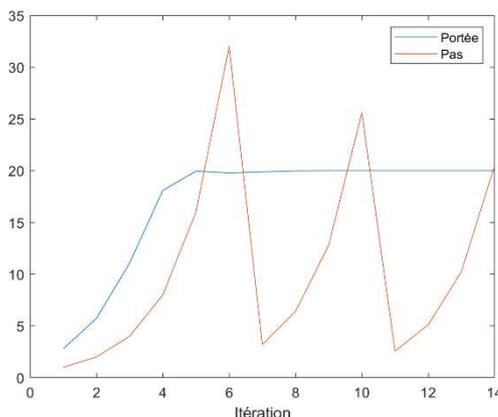


Figure 4 : Comment choisir λ ?
pour $\delta = 1$ et $p_0 = (10, 9)$

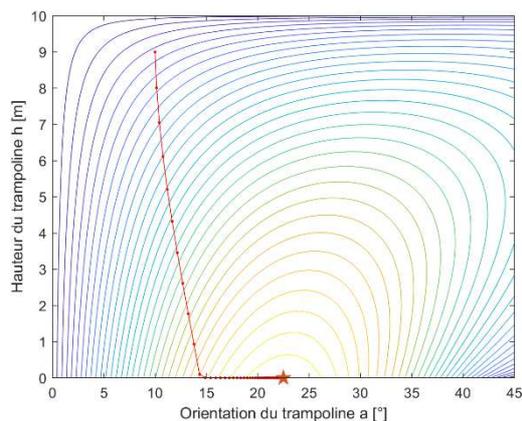
phénomène est d'imposer une forte diminution du pas δ quand l'algorithme est dans une pente décroissante. Nous veillerons également à ajouter une valeur maximale du pas, noté δ_{max} , afin d'éviter d'observer un emballement du pas qui n'aurait aucun sens physique car nous serions en dehors du domaine acceptable (3). Après de nombreux essais (cf Fig. 4b), nous avons constaté que l'algorithme avait un comportement satisfaisant pour :

$$\mu = 2 \quad \lambda = 0,1 \quad \delta_{max} = 3 \quad (4)$$

II.2.5/ Optimisation du pas

Une première approche pour évaluer le gain de l'optimisation consiste à comparer le comportement de l'algorithme pour un pas fixe et un pas optimisé, avec uniquement un point de départ. La Fig. 5 montre effectivement que l'algorithme fonctionne mieux : de 91 à 46 itérations. Une deuxième approche serait d'estimer l'impact d'une optimisation du pas sur l'efficacité de l'algorithme en moyennant pour différents points de départ. Nous générons l'algorithme à pas fixe et à pas variable, pour 1000 paramètres pris aléatoirement dans le domaine acceptable.

(a) : Avant optimisation



(b) : Après optimisation

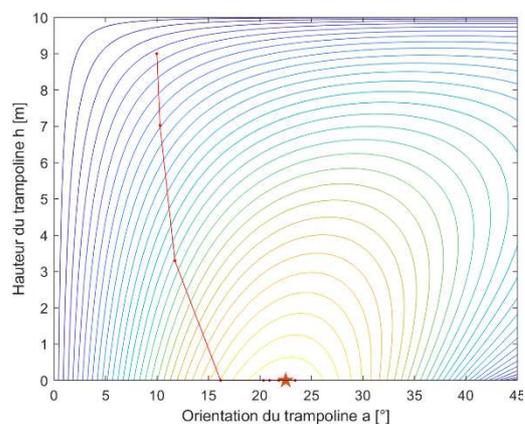


Figure 5 : Comment choisir pas ?
pour $\delta_0 = 1$ et $p_0 = (10, 9)$

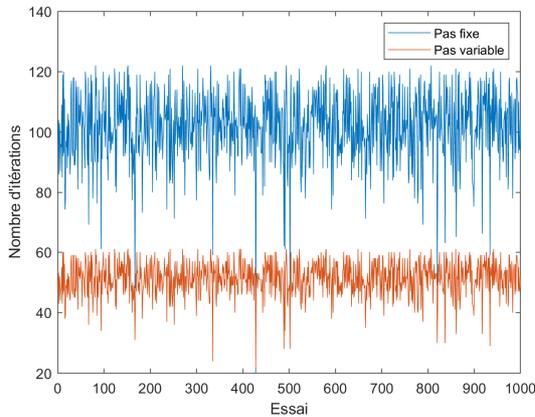
La Fig. 6 présente les résultats obtenus. En plus d'économiser près de 50% du temps de calcul, les valeurs vers lesquelles l'algorithme à pas variable converge sont presque 2 fois mieux concentrées autour de la valeur attendue. L'algorithme à pas variable est ainsi plus rapide et plus précis !

II.2.6/ Amélioration du calcul du gradient grâce au code adjoint

Dans l'algorithme 1, nous avons vu qu'il était nécessaire de calculer le gradient de la fonction portée en p . Plutôt qu'approcher le gradient avec une méthode

par différences finies, nous avons développé un code adjoint qui permet de calculer le gradient de façon exacte [3]. Si un calcul exact du gradient ne permet pas de diminuer directement le nombre d'itérations de l'algorithme, nous avons pu observer une tendance à se rapprocher plus rapidement de l'extremum. En effet, en imposant relativement élevé dans le critère d'arrêt de

(a) : Plus rapide



(b) : Plus précis

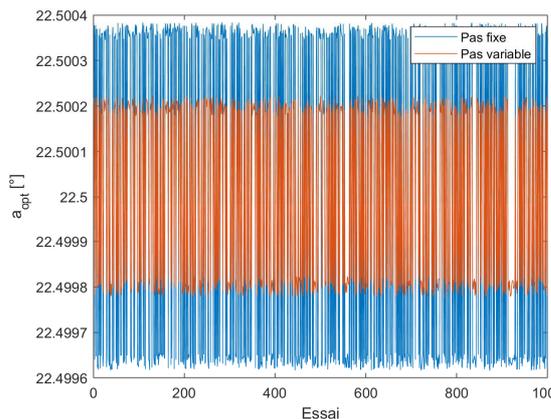


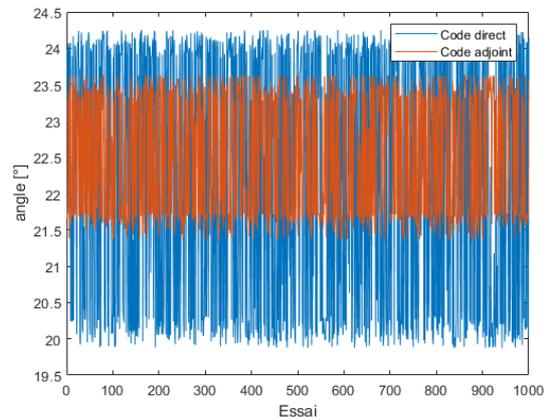
Figure 6 : Pourquoi avoir optimisé le pas ? pour $\delta = 1$ et $\varepsilon = 10^{-9}$

l'algorithme 1, nous voyons que la dispersion de l'angle² optimisé obtenue par différences finies est le double de celle obtenue par le code adjoint (cf Fig. 7a). Cela s'explique facilement car le pas dans les premières itérations est toujours plus grand que dans les dernières. Ainsi, nous en déduisons que l'approximation dégrade la phase d'approche de l'extremum.

Nous observons également que le paramètre de précision ε n'a pas d'influence sur la dispersion de l'angle optimisé obtenue par le code adjoint. Dans les Fig. 7, la dispersion du code adjoint est d'environ 2 dans les deux cas, alors même que la dispersion de la méthode par différences finies est divisée par 40.

De ce fait, nous concluons que l'optimisation du pas, l'amélioration de calcul du gradient, et le développement d'une méthode d'optimisation ne sont

(a) : $\varepsilon = 10^{-2}$



(b) : $\varepsilon = 10^{-5}$

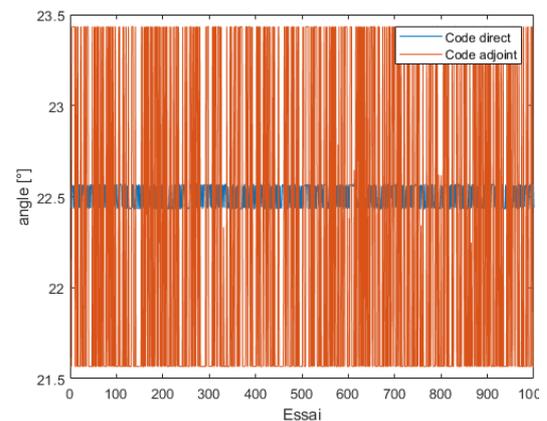


Figure 7 : Les effets du code adjoint

pas des pistes indépendantes qui permettraient de rendre l'optimisation plus efficace. Au contraire, il faut trouver les meilleures associations pour améliorer l'ensemble. Dans notre cas, le pas est certes optimisé, mais nous l'avons réalisée pour un calcul par différences finies, et non pour un code adjoint. Dans cette logique, il faudrait revenir vers une optimisation du pas pour le code adjoint, et enfin comparer à nouveau à la méthode par différences finies.

² La dispersion de la hauteur n'est pas pertinente, car nous imposons une hauteur positive et que la hauteur qui optimise la portée est nulle.

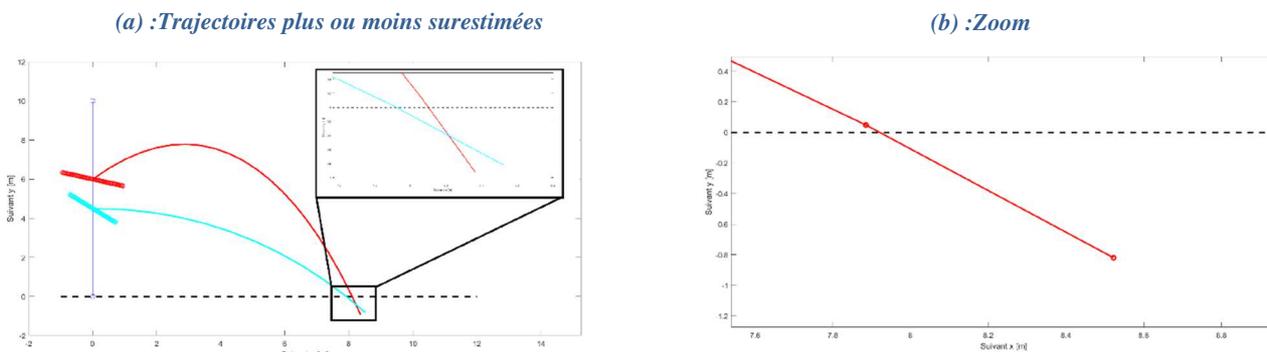


Figure 8 : Mise en évidence d'un défaut

III/ Comment avoir une portée maximale avec frottements ?

III.1/ Modélisation du problème

III.1.1/ Étude du mouvement du projectile en ajoutant les frottements de l'air

Nous considérons à partir de maintenant une sphère lisse parfaite de rayon $R \approx 0.1 \text{ m}$, allant à une vitesse $v \approx 1 \text{ m.s}^{-1}$, et nous calculons le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot R \cdot v}{\eta_{\text{air}}} = 6410$$

Cette première analyse nous conduit vers la modélisation d'un écoulement turbulent. D'où la force de traînée utilisée :

$$\vec{f}_t = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v \cdot \vec{v}$$

où ρ est la masse volumique de l'air, $S = \pi \cdot R^2$ est la surface du projectile projetée, et $C_x \approx 0,5$ est le coefficient de traînée pour un objet sphérique dont le nombre de Reynolds vérifie $10^3 < Re < 10^5$ [4].

Les conditions initiales en position restent les mêmes que dans l'étude sans frottements ($x(0) = 0$ et $y(0) = H$). Concernant la vitesse en sortie du trampoline, elle est obtenue à l'issue d'une étude simple de la trajectoire d'un projectile en chute libre depuis une hauteur H :

$$\begin{cases} \dot{x}_h = \sqrt{g/T} \cdot \tanh(\cosh^{-1}(\exp(T(h - H)))) \cdot \sin(2\alpha) \\ \dot{y}_h = \sqrt{g/T} \cdot \tanh(\cosh^{-1}(\exp(T(h - H)))) \cdot \cos(2\alpha) \end{cases} \quad (5)$$

Nous appliquons alors la seconde loi de Newton au projectile, l'origine des temps étant prise au moment où le projectile quitte le trampoline.

Nous en déduisons une expression de son accélération :

$$\vec{a} = -g\vec{e}_y - \frac{\rho \cdot C_x \cdot S}{2m} \cdot v \cdot \vec{v}$$

Nous posons pour simplifier $T = \frac{\rho \cdot C_x \cdot S}{2m}$. Nous projetons sur les deux axes, puis nous obtenons :

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = -T \cdot \dot{x}(t) \cdot \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \\ \ddot{y}(t) = -g - T \cdot \dot{y}(t) \cdot \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \end{cases} \quad (6)$$

III.1.2/ Quelle est la portée ?

Le système obtenu est non linéaire, et ne peut être résolu de manière analytique. Il faut donc utiliser une méthode numérique afin d'obtenir une solution approchée pour la trajectoire, puis pour la portée.

III.2/ Résolution du problème

III.2.1/ Premier algorithme

Pour ce faire, la méthode d'Euler à l'ordre 2 est utilisée. Le nombre d'itération maximale est défini de telle sorte que le dernier élément de la liste des différentes valeurs successives en abscisse soit une valeur approchée de la portée (cf. algorithme 4).

Algorithme 4 : Calcul de la trajectoire

Entrée :

$x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$: Conditions initiales
 T : Constante introduite plus haut
 g : Constante gravitationnelle
 pas_{tps} : Pas de temps (précision)

Programme :

```

X ← [x0];
Y ← [y0];
ẋ ← ẋ0;
ẏ ← ẏ0;
tant que Y(end) ≥ 0 faire
    X ← [X, X(end) + pastps * ẋ + pastps2/2 *
        (-T ẋ√(ẋ2 + ẏ2)] ;
    Y ← [Y, Y(end) + pastps * ẏ + pastps2/2 * (-g -
        T ẏ√(ẋ2 + ẏ2)] ;
    ẋ ← ẋ + pastps * (-T ẋ√(ẋ2 + ẏ2)) ;
    ẏ ← ẏ + pastps * (-g - T ẏ√(ẋ2 + ẏ2)) ;
fin
    
```

Sortie :
 X et Y

Ainsi, en remplaçant le dernier point de la liste des

Algorithme 6 : Affinage à proximité du sol

Initialisation :
 $pas_{tps} \leftarrow pas_{tps}^{(0)}$;
 $pas_{tps}^{min} \leftarrow \frac{pas_{tps}^{(0)}}{10}$;

Algorithme 5 : Interpolation linéaire

```

a ← (Y(end) - Y(end - 1)) / (X(end) - X(end - 1));
b ← Y(end) - a * X(end);
X(end) ← -b/a;
Y(end) ← 0;
Sortie :
X et Y
    
```

```

si pastps < pastpsmin alors
    | pastps ← pastpsmin
fin
fin
[...];
    
```

abscisses (notée X dans l'algorithme 4) par $-\frac{b}{a}$ (soit la

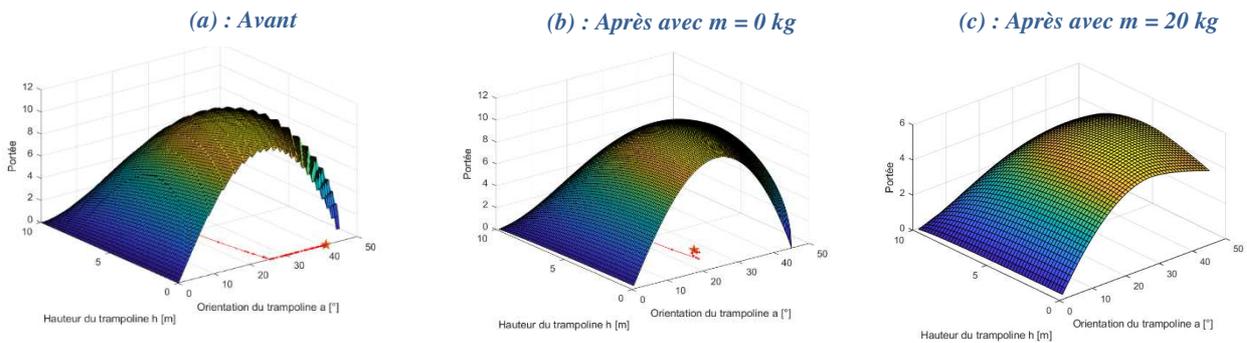


Figure 9 : Évolution de la portée (surface) et des paramètres (a,h)

III.2.2/ Problème de surestimation

Cependant, l'algorithme a tendance à renvoyer des abscisses trop grandes car entre deux pas de temps la trajectoire continue d'avancer suivant \vec{e}_x quand la trajectoire passe en-dessous de $y = 0$ pendant une itération. Ainsi, même une configuration non optimale a priori pourrait être privilégiée à une autre si elle parcourt une distance suffisante une fois passée sous le sol. Ce problème est illustré à travers la Fig. 8a : ici la configuration donnant la trajectoire bleu ciel sera considérée comme plus optimale que celle donnant la trajectoire rouge même si la rouge touche le sol après le bleu ciel.

Pour pallier ce problème et obtenir des trajectoires qui se terminent au plus proche du sol, nous approchons le bout de trajectoire entre les deux derniers points par une droite (cf Fig. 8b).

Notons D cette droite, définie par $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = ax + b\}$ où a et b sont définis à partir des coordonnées des deux derniers points de la trajectoire.

solution x de $y = ax + b = 0$, nous obtenons une meilleure approximation de la portée. Une modification est donc apportée à l'algorithme 4 en insérant l'algorithme 5 après la boucle "Tant que".

III.2.3/ Pas temporel

La méthode que nous choisissons pour le calcul de la trajectoire suppose un pas temporel suffisamment petit. Toutefois, si ce pas est trop petit ($pas_{tps}^{(0)} \approx 1 \text{ ms}$), nous avons constaté que le temps de calcul devenait déraisonnable (plus de 2h). De même, si ce pas est trop grand ($pas_{tps}^{(0)} \approx 100 \text{ ms}$), les trajectoires sont totalement faussées par les approximations successives de notre méthode. Le compromis qui a été choisi, et qui s'est révélé suffisamment précis est un pas temporel de :

$$pas_{tps}^{(0)} \approx 10 \text{ ms} \quad (7)$$

III.2.4/ Amélioration de la précision

Dans le but d'améliorer encore la précision de la valeur de portée obtenue tout en minimisant le temps de calcul supplémentaire, nous modifions l'algorithme de telle sorte à obtenir un pas de temps égal au dixième du pas initial pour calculer le dernier point (cf. algorithme

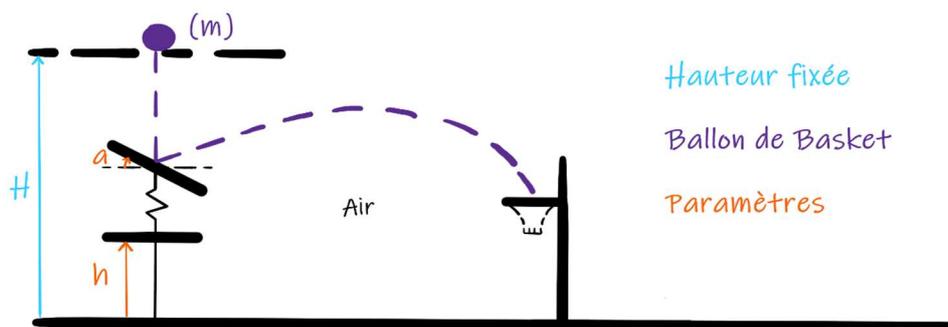


Figure 10 : Schéma de la situation imaginée

6). Le pas reste inchangé pour l'ensemble des points précédents afin d'éviter des calculs inutiles.

Finalement, nous observons sur la Fig. 9 que les résultats obtenus semblent plus cohérents qu'initialement. La surestimation n'était pas la même pour toutes les trajectoires : elle engendrait des "vaguelettes" irrégulières (cf Fig. 9a) qui empêchaient l'algorithme d'optimisation de fonctionner correctement. Sur la Fig. 9b, ces défauts ont complètement disparu, et nous retrouvons une surface proche de celle obtenue sur la Fig. 2 pour une masse nulle. Si nous changeons la masse (cf Fig. 9c), ou le coefficient C_x l'allure de la Fig. 9b change :

- la portée maximale est nettement plus petite,
- une trajectoire verticale est à privilégier.

IV/ Mise en situation

Maintenant que nous avons un modèle fonctionnel, nous pouvons aller plus loin ! Nous allons identifier les paramètres d'angle a et de hauteur h qui envoient un projectile sphérique vers une zone prédéfinie. Pour ce faire, nous cherchons d'abord les trajectoires qui permettent à un ballon de basket de faire un "swish"³. En d'autres termes, nous allons déterminer toutes les trajectoires qui rentrent dans un panier, sans toucher ni

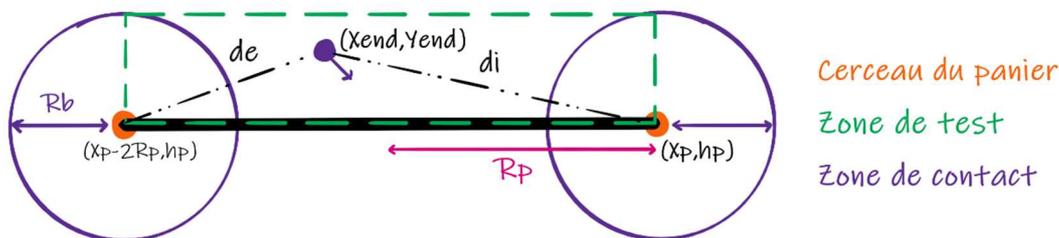


Figure 11 : Détails du swish

l'arceau, ni le panneau. Puis, nous tâcherons de sélectionner LA trajectoire qui est la plus adaptée dans ce contexte (cf Fig. 10)

IV.1/ Comment mettre un "swish" ?

Afin de savoir si le ballon passe bien dans le panier sans toucher le cerceau ou le panneau, nous avons besoin de modifier l'algorithme 4 en ajoutant une variable de sortie qui précise si le "swish" est "validé", ou "refusé". Avant tout chose, nous devons trouver un moyen de traduire numériquement un "swish".

IV.1.1/ Traduction numérique d'un "swish"

Nous définissons une zone rectangulaire au-dessus du cerceau, appelée zone de test, dont la longueur est le diamètre du cerceau, et la largeur est le rayon du ballon. Cette dernière représente la zone dans laquelle le ballon est à proximité du panier. Lorsque le ballon pénètre dans la zone de test, nous vérifions que :

- le ballon descend ;
- le ballon ne touche pas le cercle.

La première condition est vérifiée en regardant le signe de la dérivée suivant \vec{e}_y . Quant à la seconde, nous

³un tir direct réalisé lorsque le ballon rentre dans le panier sans toucher ni l'arceau ni le panneau.

calculons d'abord la distance euclidienne entre le cerceau extérieur et le ballon, ainsi que le cerceau intérieur et le ballon. Puis, nous vérifions que cette

Algorithme 7 : Détermination du Résultat

```

Initialisation :
Proximité = "Non"
Résultat = "Incertain"
Programme :
tant que  $X_{end} < x_p$  et  $Y_{end} > 0$  faire
    [...] si  $h_p < Y_{end} < h_p + R_b$ 
    et  $x_p - 2R_p < X_{end} < x_p$  alors
        si  $\dot{y} < 0$  alors
            Proximité  $\leftarrow$  "Oui" ;
             $d_e \leftarrow \sqrt{(X_{end} - x_p + 2R_p)^2 + (Y_{end} - h_p)^2}$  ;
             $d_i \leftarrow \sqrt{(X_{end} - x_p)^2 + (Y_{end} - h_p)^2}$  ;
            si  $d_e < R_b$  ou  $d_i < R_b$  alors
                | Résultat  $\leftarrow$  "Refusé"
            fin
        fin
    sinon
        | Résultat  $\leftarrow$  "Refusé"
    fin
fin
si Proximité = "Oui" et Résultat = "Incertain" alors
    | Résultat  $\leftarrow$  "Validé"
fin
sinon
    | Résultat  $\leftarrow$  "Refusé"
fin
Sortie :
Résultat
    
```

distance est supérieure au rayon du ballon R_b .

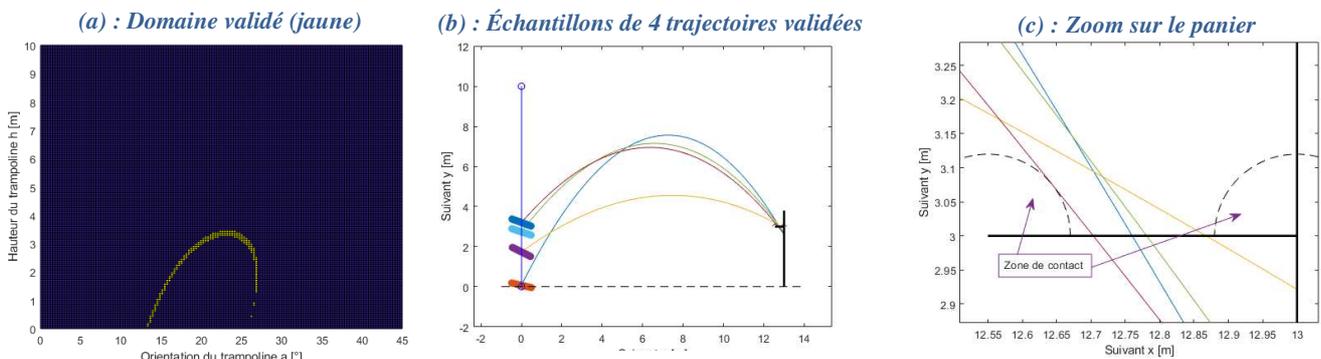


Figure 12 : Présentation des résultats

Graphiquement, la Fig. 11 présente la zone de test, avec deux cercles de rayon R_b qui délimitent les zones de contact avec le ballon. S'il s'avère que le ballon est passé à proximité, mais suffisamment éloigné du cerceau et de l'arceau, alors nous validons le "swish". L'algorithme 7, inspiré de l'algorithme 4 montre comment nous avons résolu ce problème.

IV.1.2/ Améliorer la précision

Si cet algorithme permet d'obtenir des résultats satisfaisants, il laisse quand même certaines trajectoires passer entre les mailles du filet... En effet, l'algorithme effectue ses contrôles tous les pas_{tps} ce qui signifie que

le ballon peut rencontrer le cerceau entre deux contrôles. Le choix du pas_{tps} est délicat : s'il est trop grand, les

Algorithme 8 : Amélioration de la précision

```

Initialisation :
Précision = "Non"
Programme :
si Précision = "Non" alors
    |  $pas_{tps} \leftarrow pas_{tps}/50$  ;
    | Précision  $\leftarrow$  "Oui" ;
fin
    
```

Algorithme 9 : Calcul de la hauteur maximale atteinte

```

Entrée :
Y : Liste des ordonnées de la trajectoire dont on
cherche la hauteur maximale
pasinit : Pas initiale de parcours indiciel de la liste
Programme :
Listehauteur  $\leftarrow$  [Y(1), Y(1 + pasinit) ;
indiceY  $\leftarrow$  1 + pasinit;
pas  $\leftarrow$  pasinit;
pasmin  $\leftarrow$  1;
tant que
Listehauteur(end) - Listehauteur(end - 1)  $\geq$  0.001
faire
    tant que Y(indiceY + pas)  $\leq$ 
Listehauteur(end) et pas  $>$  pasmin faire
        pas  $\leftarrow$  pas - 1 ;
        si pas  $\leq$  pasmin alors
            | pas  $\leftarrow$  pasmin
        fin
    fin
Listehauteur  $\leftarrow$  [Listehauteur, Y(indiceY + pas)];
indiceY  $\leftarrow$  indiceY + pas
fin
Sortie :
Listehauteur(end)
    
```

résultats sont aberrants, et s'il est trop petit, le temps de calcul rend notre algorithme inexploitable. Pour s'affranchir de ce problème, nous avons choisi de prendre un pas acceptable pour le calcul de la trajectoire, puis de le diviser par 50 si le ballon est dans la zone de test. Il suffit donc d'insérer l'algorithme 8 après la ligne où "Proximité" vaut "Oui" dans l'algorithme 7.

Les résultats obtenus sur la Fig. 12 mettent en évidence toutes les possibilités de mettre des "swish". Nous voyons en particulier que pour une hauteur donnée, il peut y avoir deux possibilités selon que la trajectoire est tendue ou bombée.

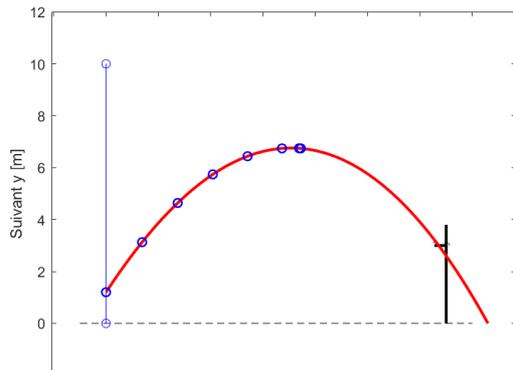


Figure 13 : Points parcourus (cercles bleus) par l'algorithme de montée avec backtracking

IV.2/Quelle est la meilleure trajectoire ?

A partir des différentes trajectoires validées, nous allons maintenant extraire celle qui réalise le "meilleur" "swish". La notion de "meilleur" étant assez subjective, nous considérons qu'un "swish" est mieux réussi qu'un autre lorsque le projectile arrive de plus haut. Dans un match de basket par exemple, envoyer le ballon plus haut en tirant un panier empêche les joueurs adverses de stopper sa trajectoire, et augmente la vitesse de la balle lorsqu'il redescend vers le panier, ce qui le rend plus difficile à contrer !

Nous nous intéressons donc à la hauteur maximale atteinte par chacune des trajectoires validées, afin d'isoler la trajectoire qui monte le plus haut. Pour ce faire, nous utilisons un algorithme de montée associé à une optimisation du pas par backtracking [1] (cf algorithme 9).

La Fig. 13 illustre le schéma itératif de l'algorithme 9. Pour chaque trajectoire validée, nous parcourons la liste des ordonnées Y par indexation avec un pas entre chaque indice initialement grand (20 par exemple). Tant que deux hauteurs consécutives sont suffisamment éloignées, nous réalisons une itération sur l'indice de Y . Si la nouvelle valeur de hauteur est inférieure à la dernière valeur de $Liste_{hauteur}$, alors nous diminuons le pas tout en s'assurant qu'il reste entier pour que $Y(indice_Y + pas)$ ait un sens. Puis, nous modifions la dernière itération jusqu'à ce que la nouvelle valeur de hauteur soit inférieure à la dernière valeur de $Liste_{hauteur}$. Enfin, nous recommençons ce processus jusqu'à obtenir la hauteur maximale de la trajectoire étudiée.

Finalement, en parcourant l'ensemble des trajectoires validées, puis en extrayant leur hauteur maximale atteinte, nous trouvons la configuration optimale pour réaliser le meilleur "swish" :

$$a = 16.5^\circ ; h = 1.2 \text{ m} ; 6.74 \text{ m} \quad (8)$$

V/ Conclusion

En définitive, nous avons d'abord modélisé une situation physique simple, puis résolu un problème. Nous avons ensuite complexifié le modèle, puis résolu

le problème à nouveau. Enfin, nous avons orienté notre travail vers une situation analogue à celle évoquée dans l'introduction. Au-delà du côté ludique, ce projet nous a permis de mettre en pratique de nombreuses notions vues en cours : algorithme du gradient, calcul du gradient par différences finies ou code adjoint, et optimisation simple du pas ou backtracking. Tout du long, nous avons également rusé d'astuces pour rendre notre travail plus rigoureux : domaine physiquement acceptable, choix des pas temporels, interpolation linéaire, résolution d'une équation différentielle non linéaire, critère de validation d'un "swish"...etc. Pour être plus complet dans la situation du basket, nous pourrions considérer tous les paniers validés. Qu'il y ait un rebond sur le sol, ou sur le panier, quels sont les paramètres d'angle a et de hauteur h qui envoient la balle dans le panier ? Il faudrait également anticiper la météo pour prévoir le vent, et ajuster la trajectoire... De la même façon, nous pourrions imaginer une expérience dans laquelle nous filmions un ballon de basket dans son mouvement. Nous pourrions alors estimer le rendement du trampoline (ici égal à 1), et il s'agirait alors d'une nouvelle étude sur l'identification du paramètre rendement η comme nous avons déjà fait dans le TP 1 [5].

VI/ Références

- [1] KIEFFER, Michel. Optimisation. [En ligne]. Lieu d'édition : ENS Paris-Saclay, 2020, 49 diapositives. Disponible sur : https://elearn.ens-cachan.fr/file.php/912/Cours4_Gradient13.pdf (dates de consultation : mars/avril/mai 2020)
- [2] KIEFFER, Michel, et OJEDA Javier. TP 2 - \Estimation de la viscosité d'un fluide. [En ligne]. Lieu d'édition : ENS Paris-Saclay, 2020, 5 pages. Disponible sur : https://elearn.ens-cachan.fr/file.php/912/Saph_211_sujet_TP_2.pdf (dates de consultation : mars/avril/mai 2020)
- [3] KIEFFER, Michel. Calcul de dérivées, gradients, hessiens. [En ligne]. Lieu d'édition : ENS Paris-Saclay, 2020, 49 diapositives. Disponible sur : https://elearn.ens-cachan.fr/file.php/912/Cours5_CalculGradient13.pdf (dates de consultation : mars/avril/mai 2020)
- [4] MIQUEY E.. Trajectoire et rebond d'une balle au tennis de table. [en ligne] T.I.P.E., 2009, 7 pages. Disponible sur : <https://www.irif.fr/~emiquey/stuff/TIPE.pdf> (dates de consultation : mars/avril/mai 2020)
- [5] KIEFFER, Michel, et OJEDA Javier. TP 1 - Identification de système et annulation d'écho. [En ligne]. Lieu d'édition : ENS Paris-Saclay, 2020, 5 pages. Disponible sur : https://elearn.ens-cachan.fr/file.php/912/Saph_211_sujet_TP_1.pdf (dates de consultation: mars/avril/mai 2020)

ALIMENTATION D'UN CAPTEUR SANS FIL BASSE CONSOMMATION EN ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL : RECUPERATION D'ENERGIE AVEC UN THERMOGENERATEUR ET STOCKAGE SUR SUPERCAPACITES.

VINCENT BOITIER, LIONEL SEGUIER, XAVIER DOLLAT, FLORIAN HUET, JEAN MARIE DILHAC,
vboitier@laas.fr, lseguier@laas.fr
 Université de Toulouse, UPS, LAAS, 7 Ave du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

Résumé : Cet article développe la réalisation d'une alimentation 3,3 V 60 mA, destinée à l'alimentation de nœuds de capteurs sans fil à faible consommation sur de très longues durées, avec un rechargement par électrothermogénération. L'analyse du potentiel thermique et de la puissance électrique effectivement récupérable est présentée, suivie par la mise en place de la carte électronique avec ces étages : récupérateur d'énergie avec un BQ25504, stockage sur supercapacités, et enfin, mise en forme de la tension de sortie avec un boost (TPS610995) suivi d'un LDO (TPS71533).

Mots clés : récupération d'énergie, système sans batterie, supercapacité, thermogénérateur, TEG, BQ25504, gestion d'énergie.

I/ INTRODUCTION

Pour répondre à une demande croissante en mesures pour la surveillance d'installations industrielles ou pour la maintenance préventive [1][2], les capteurs bas coût connectés sur des réseaux sans fil, basse consommation et bas débit (LORA, Sigfox) apportent une solution modulable et facilement déployable.

Leur alimentation électronique est souvent fournie par une pile, rechargeable ou non. Dans certains environnements industriels, des gradients thermiques sont présents en permanence (conduites où circulent des fluides chauds ou froids, proximité de machines tournantes, ...). Dans ce cas l'utilisation d'un thermogénérateur ou thermo-électro-générateur (TEG) pour convertir l'énergie thermique en énergie électrique est pertinente et permet d'alimenter les nœuds de capteurs communicants sans fil à travers une électronique adaptée réalisant l'extraction, le stockage et la gestion de l'énergie [3][4][5][6].

Cet article présente la réalisation d'un dispositif modulaire aisément intégrable dans des structures existantes et adaptable pour des températures chaudes entre 50 et 200°C. Le système doit être capable de fournir 60 mA sous 3,3 V à un prix compétitif (<50 €). Un circuit spécialisé (BQ25504) récupère et gère l'énergie électrique fourni par un thermogénérateur (3x3 cm²). Un stockage sur supercapacités (2x1 F, 2,5 V) a été préféré à l'utilisation d'une batterie rechargeable pour leurs performances accrues notamment en cyclage et tenue en température élevée. Il permet de subvenir aux pics de consommation et de pallier à l'absence temporaire éventuelle de la ressource thermique.

Après une présentation globale de la structure, l'analyse de la consommation du nœud de capteur à alimenter est présentée. La partie suivante s'intéresse à

la thermogénération : potentiel thermique; modélisation et choix du thermogénérateur et de son dissipateur; validation. On s'intéresse alors au circuit d'extraction d'énergie, à l'étage de stockage et enfin à la régulation du 3,3 V. Un essai expérimental du système complet vient valider la partie électronique suivi d'une discussion et d'une conclusion.

II/ PRESENTATION DE LA STRUCTURE

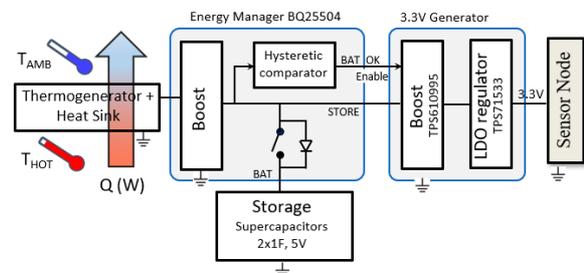


Figure 1. Structure de l'alimentation

La structure de l'alimentation est illustrée sur la Figure 1. L'énergie électrique provenant du thermogénérateur est extraite par un circuit dédié (BQ25504) qui optimise la récupération de l'énergie (fonction MPPT par fraction de V_{OC}) mais aussi le contrôle des niveaux de charge de l'étage de stockage. Le stockage est constitué de 2 supercondensateurs en série. La génération du 3,3 V pour alimenter le nœud de capteur est réalisé en associant un convertisseur boost (TPS610995) suivi d'un LDO (TPS71533). La sortie d'un comparateur à hystérésis interne au BQ25504 active ou bloque la génération du 3,3V en fonction du niveau de la tension des supercapacités. Le schéma électrique complet est fourni Figure 20.

III/ NŒUD DE CAPTEUR

III.1/ Présentation

Pour tester les solutions de récupération d'énergie développées, nous avons utilisé un nœud de capteurs communicant basé sur un module Jennic 5148 précédé d'un régulateur LDO [7].

Ce module accepte une tension d'alimentation V_{JEN} comprise entre 2,4 V et 3,6 V. Le protocole de communication est de type Zigbee, Le système a une portée maximale entre le nœud de capteur et le coordinateur voisin de 20 m. Les informations radios sont récupérées par le module coordinateur du réseau de capteurs, puis redirigées via une liaison série filaire sur un PC

III.2/ Consommation

Avec une alimentation régulée à 3,3V, nous avons relevé le courant fourni au module pour calculer sa consommation (mesure avec un DC power analyser N6705B d'Agilent).

Initialisation :

Le temps que le nœud de capteur se connecte au réseau, la consommation est conséquente. L'énergie nécessaire au démarrage $E_{STARTUP}$ est mesurée à 0,35 J au bout de 20 s. la courant lors du démarrage est représentée sur la Figure 2.

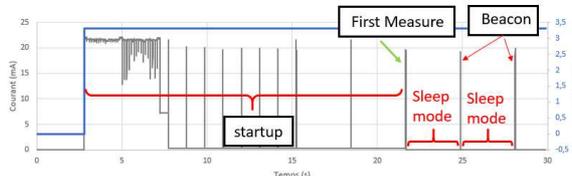


Figure 2. Démarrage initial du module.

Après l'initialisation

Une fois la phase d'initialisation terminée, le cycle de fonctionnement se décompose en deux phases : une phase active durant laquelle sont effectuées les mesures, leurs traitements et la transmission radio ; une phase de veille avec une très faible consommation. La phase de veille est entrecoupée régulièrement d'envois radios très courts (« beacon ») pour rappeler que le module est bien présent sur le réseau. Ces phases sont visibles sur le chronogramme de la Figure 3.

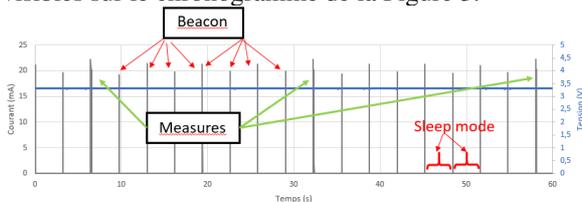


Figure 3. Tension et courant en fonctionnement

L'analyse de la consommation, donne les résultats suivants : un cycle de mesure chaque 25,8 s (durée mesure 112 ms, conso 22 mA), entre 2 mesures : 7 beacons (un beacon chaque 3,22 s environ, durée 8 ms à 21 mA), le reste du temps, le système est en mode sommeil (sleep mode 4,3 μ A). Cela donne, une consommation par cycle $E_{CYCLE} = 12,4$ mJ, et une puissance moyenne $P_{CYCLE} \approx 0,5$ mW.

IV/ THERMOGENERATION

IV.1/ Evaluation du potentiel thermique.

Si la consommation d'un nœud de capteur est prévisible, il est plus difficile d'estimer avant installation sur un site le potentiel d'énergie électrique d'origine thermique. Quelques mesures sur le site sont nécessaires. A titre d'exemple, nous présentons les mesures réalisées dans une usine pétrochimique proche du Havre (Total Gonfreville).

Une première analyse rapide est réalisée avec une caméra thermique FLIR i60 (limitée à 150 °C) (partie droite de la Figure 4). Les relevés de température sont ensuite réalisés à l'aide d'un thermomètre Fluke 54 II B et de deux sondes thermocouples K TME : une sonde de contact KS07 ($T_{max} < 600$ °C) et une sonde à distance de 4 mm KA04 ($T_{max} < 750$ °C). La partie gauche de la Figure 4 montre la même image dans le visible. On relève un gradient de température à fort potentiel énergétique avec un point de mesure dont la température de contact est de 180°C, une température relevée à 4mm de 96°C et une température de l'air ambiant à 1 m de 25°C.

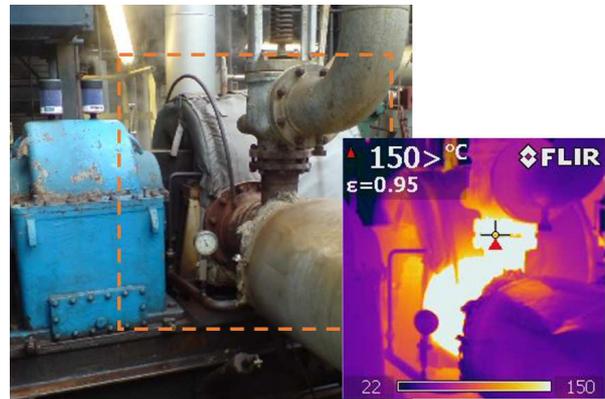


Figure 4. Turbine, image dans le visible et image thermique de la même zone. (avec l'aimable autorisation de Total Gonfreville)

IV.2/ TEG et dissipateur : modélisation

L'ensemble thermogénérateur et dissipateur est schématisé Figure 5. Le TEG est caractérisé au niveau électrique par son coefficient de Seebeck α (V/°C) et sa résistance électrique R (Ω). La modélisation de la Figure 6 donne la relation électrique suivante :

$$V_{TEG} = \alpha \cdot \Delta T_{TEG} - R \cdot I_{TEG} \quad \text{Eq.1}$$

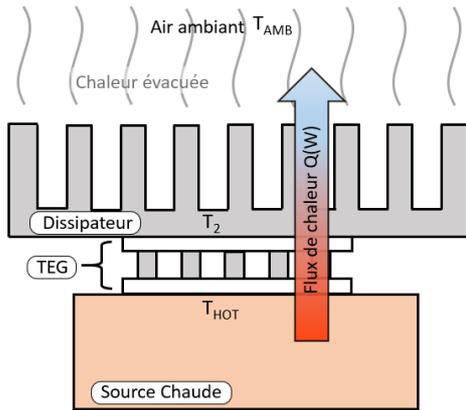


Figure 5. Représentation simplifiée d'un TEG intercalé entre son dissipateur et une source chaude.

Sur le plan thermique, l'ensemble est modélisé avec le modèle simple de la Figure 6 en utilisant une analogie électrique où le flux thermique Q (W), la température T (°C) et la résistance thermique R_{th} (°C/W) ont pour analogues respectifs le courant électrique I (A), le potentiel V (V) et la résistance électrique R (Ω).

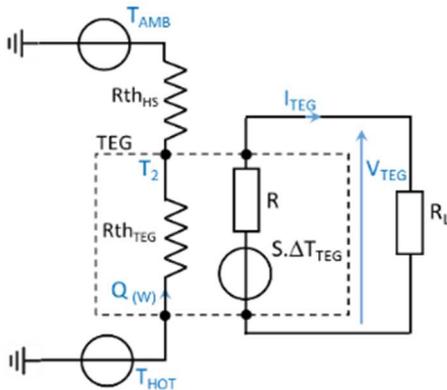


Figure 6. Modélisations électrique et thermique par analogie électrique du système (d'après [8])

Le TEG et le dissipateur sont modélisés par leurs résistances thermiques respectives $R_{th_{TEG}}$ et $R_{th_{HS}}$ (HS pour Heat Sink). Pour faciliter la compréhension du modèle, sur la Figure 6, deux épaisseurs d'aluminium ont été omises, l'une entre la source chaude et le TEG et l'autre entre le TEG et le dissipateur. On peut les inclure dans le modèle en rajoutant en série R_{th}' et R_{th}'' voisines chacune de 0,03 °C/W.

On note : Q (W) le flux thermique moyen traversant le TEG, T_{HOT} , T_2 et T_{AMB} (°C) les températures respectives de la source chaude, à l'interface TEG/dissipateur et de la température de l'air ambiant. A partir du modèle proposé on obtient :

$$\Delta T = T_{HOT} - T_{AMB} = (R_{th_{TEG}} + R_{th_{HS}}) \cdot Q \quad \text{Eq.2}$$

et

$$\Delta T_{TEG} = T_{HOT} - T_2 = R_{th_{TEG}} \cdot Q \quad \text{Eq.3}$$

ce qui permet d'exprimer le gradient aux bornes du TEG, ΔT_{TEG} sous la forme :

$$\Delta T_{TEG} = \frac{R_{th_{TEG}}}{R_{th_{TEG}} + R_{th_{HS}}} \cdot \Delta T = \beta \cdot \Delta T \quad \text{Eq.4}$$

$$\text{avec} \quad \beta = \frac{R_{th_{TEG}}}{R_{th_{TEG}} + R_{th_{HS}}} < 1 \quad \text{Eq.5}$$

Cette modélisation suppose constants les paramètres du modèle, hypothèse valable si les températures varient peu [9]. Elle ne prend pas en compte les aspects dynamiques (on suppose le régime permanent atteint) ni les phénomènes plus complexes liés à la convection avec l'air ambiant. Néanmoins, elle permet une estimation de la puissance électrique récupérable en fonction du TEG et du dissipateur choisis. En pratique nous avons constaté que la puissance effectivement récupérée sera de 10 à 20 % inférieure. En effet la résistance thermique équivalente du TEG $R_{th_{TEG}}$, considérée comme constante, diminue lorsque le TEG fournit du courant, ce qui diminue le gradient aux bornes du TEG et donc la puissance récupérable [10].

En pratique, les incertitudes liées aux échanges thermiques avec le milieu ambiant (air ventilé ou non, variation de la température du point chaud, de l'air ambiant, ...) sont importantes. Il n'est donc pas utile d'avoir un modèle plus fin.

La tension en circuit ouvert aux bornes du thermogénérateur V_{OC} est définie par la relation suivante :

$$V_{OC} = \alpha \cdot \Delta T_{TEG} \quad \text{Eq.6}$$

De façon générale, l'expression de la puissance électrique fournie par le TEG en fonction de la tension du TEG est une parabole [11] d'équation :

$$P_{TEG} = \frac{1}{R} (V_{OC} - V_{TEG}) \cdot V_{TEG} \quad \text{Eq.7}$$

Si le TEG débite sur une charge R_L adaptée ($R_L = R$), la puissance électrique est maximale et vaut :

$$P_{MAX} = \frac{V_{OC}^2}{4 \cdot R} = \frac{(\alpha \cdot \Delta T_{TEG})^2}{4 \cdot R} \quad \text{Eq.8}$$

Le circuit intégré connecté au TEG va réaliser l'adaptation d'impédance électrique en fixant V_{TEG} au voisinage de $V_{OC} / 2$. Dans ce cas, maximiser la puissance électrique revient à maximiser V_{OC} et donc ΔT_{TEG} . Pour cela, on cherchera à avoir la résistance thermique la plus petite possible (β proche de 1).

Si l'on souhaite aller plus loin dans la modélisation, C. Goupil [12], R. Monthéard [13] ont exprimé les conditions thermiques et électrique à respecter pour maximiser la puissance électrique, mais ces conditions sont difficiles à réaliser et à maintenir en permanence.

IV.3/ Choix du TEG

Les critères de choix du TEG les plus importants sont la tenue en température, la surface disponible, les performances (coefficient de Seebeck, résistance électrique et thermique) et bien sûr le prix.

Le TEG choisi (ref Eureka TEG1-30-30-8.5/200 supporte 200°C, ce qui convient à l'application visée.

Ses spécifications sont : Coefficient de Seebeck $\alpha = 53 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, Résistance électrique interne du module $R = 3,4 \ \Omega$, Résistance thermique $R_{thTEG} = 3,2 \ ^\circ\text{C}/\text{W}$, Dimensions $30 \times 30 \times 3,6 \text{ mm}^3$

IV.4/ Dissipateur (heat sink)

Le TEG seul ne peut pas garantir les performances nécessaires au bon fonctionnement du système global. Il est primordial de considérer l'ensemble TEG + dissipateur pour obtenir un fonctionnement optimisé et efficace.

On choisira le dissipateur de façon à favoriser le transfert du flux de chaleur avec l'air ambiant et donc avec la résistance thermique la plus faible possible comme exprimé dans le paragraphe précédent. Il faudra donc la surface d'échange maximale avec l'air ambiant tout en gardant des dimensions et un poids acceptables : un compromis est à trouver.

Pour garantir un encombrement minimum du dispositif et pour ne pas privilégier de direction de flux d'air (positionnement vertical ou horizontal), nous avons choisi, parmi les modèles disponibles sur le marché, le dissipateur Coolinnovations ref 3-202011M ($R_{thHS} = 4,7 \ ^\circ\text{C}/\text{W}$ en air calme à pression atmosphérique). Si un flux d'air est présent, ou si le positionnement du dispositif favorise la convection naturelle, cela favorise les échanges thermiques, ce qui diminue la résistance thermique du dissipateur ($R_{thHS} = 1,8 \ ^\circ\text{C}/\text{W}$ @ $0,5 \text{ m/s}$ de vitesse de vent). Inversement, si la pression de l'air diminue (cas d'une application aéronautique en haute altitude), cela freine les échanges thermiques entre le radiateur et son environnement et augmente la résistance thermique du dissipateur.

IV.5/ Assemblage.

La bonne fixation de l'ensemble du système sur la paroi chaude est nécessaire pour assurer la conduction thermique. Une fixation avec 8 aimants Samarium Cobalt (SmCo) (référence KIPP-K0550-A, $F = 40 \text{ N}$, $T_{max} = 200^\circ\text{C}$) assure le maintien du système même en présence de vibrations. Cela permet de déployer le dispositif facilement sur les surfaces planes magnétiques. Pour des fixations sur des tubes ou sur des surfaces amagnétiques, d'autres solutions techniques sont possibles : vissage, brides, ...

L'assemblage ($60 \times 60 \times 40 \text{ mm}^3$) est présenté Figure 7, 8 et 9. Les aimants sont intégrés dans une pièce en aluminium. Cette pièce conduit la chaleur au TEG. Ce dernier est enchâssé dans un bloc évidé de Teflon (isolant thermique), intercalé entre le support en aluminium et le radiateur de dissipation. Des vis assurent la fixation des éléments entre eux. On notera que le positionnement des vis évite partiellement les ponts thermiques entre la paroi chaude et le dissipateur (des vis en Duratron et non en inox auraient permis d'éviter les ponts thermiques). La pression de serrage

influe sur la puissance récupérée [14] mais cela n'a pas été étudié dans cet article.

Une fine couche de graisse thermique à forte conduction thermique ($2,9 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) est intercalée entre les éléments pour améliorer le contact thermique. La qualité de la graisse thermique joue un rôle important et on la choisira avec la résistance thermique la plus faible.

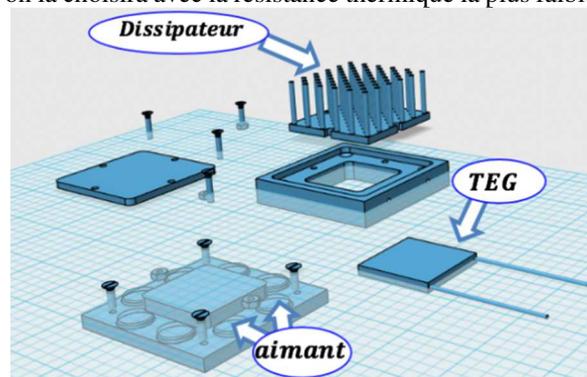


Figure 7. Vue éclatée du dispositif.

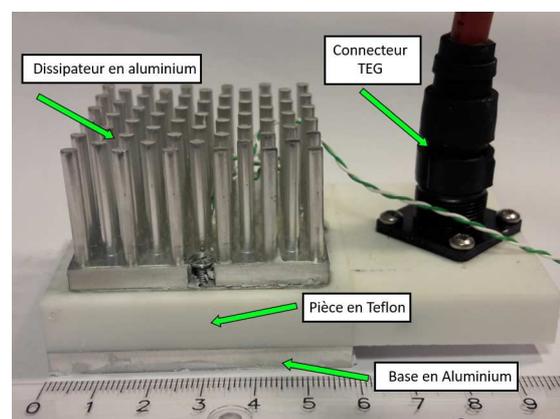


Figure 8. Récupérateur d'énergie assemblé.

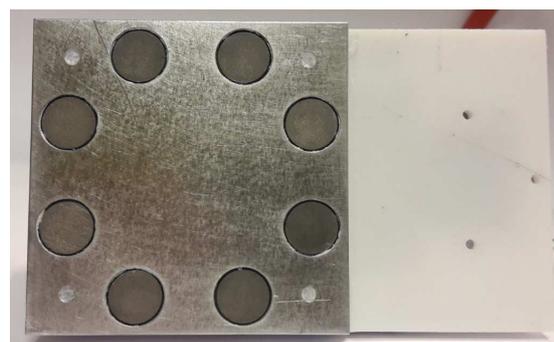


Figure 9. Vue de dessous avec les 8 aimants

IV.6/ Tests de l'ensemble TEG+dissipateur.

IV.6.1/Dispositif de tests

Pour tester l'ensemble TEG et dissipateur, nous utilisons une plaque aimantable en acier derrière laquelle circule de l'eau régulée en température. Trois thermocouples permettent de relever T_{HOT} , T_{AMB} et T_2

(T'_2 est la température du fond du dissipateur). On confondra T'_2 et T_2 (température à l'interface TEG/dissipateur). En effet, avec 5 mm d'épaisseur pour la plaque entre le TEG et le dissipateur, 5 mm pour le dissipateur, une surface S de $3 \times 3 \text{ cm}^2$, et une conductivité thermique λ_{ALU} de 200 W/(m.K) , on trouve une résistance thermique R_{th1} entre l'interface TEG/dissipateur et le fond du dissipateur données par l'équation :

$$R_{th1} = L / (\lambda_{\text{ALU}} \cdot S) \quad \text{Eq.9}$$

Soit $R_{th1} \approx 0,05 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Il faudrait donc 20 W de flux thermique pour avoir $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de différence entre T_2 et T'_2 . Or $Q > 20 \text{ W}$ (cf Eq 2) si $T_{\text{HOT}} < 180^\circ\text{C}$

IV.6.2/Analyse du régime transitoire.

L'ensemble TEG et dissipateur, initialement à température ambiante, vient se fixer sur la plaque chaude grâce aux aimants (une fine couche de graisse thermique est déposée au préalable sur le fond du récupérateur d'énergie). On relève l'évolution de V_{OC} et des températures (Figure 10).

On voit que V_{OC} augmente rapidement pour atteindre $1,35 \text{ V}$ puis redescend pour se stabiliser à $0,5 \text{ V}$ une fois le régime permanent atteint. Ceci est normal car le gradient initialement disponible diminue à mesure que le dissipateur monte en température. Cet essai met en évidence la dynamique du système (modélisable pour T_2 et V_{OC} par un premier ordre de constante de temps $\tau = 3,5 \text{ mn}$). Il nous montre aussi qu'il ne faut pas confondre ΔT et ΔT_{TEG} . Avec l'hypothèse $T'_2 \approx T_2$, le calcul du rapport $\Delta T_{\text{TEG}} / V_{OC_TEG}$ donne $\alpha = 30 \text{ mV/}^\circ\text{C}$. Cette valeur de α est beaucoup plus basse que la valeur donnée par la doc technique ($53 \text{ mV/}^\circ\text{C}$), mais elle a été vérifiée expérimentalement avec une autre expérience, en imposant une source chaude d'un côté et une source froide de l'autre côté du TEG. Il est possible que ce TEG ait été partiellement détérioré lors d'essais préalables à l'étude présentée. $\beta = \Delta T_{\text{TEG}} / \Delta T$ vaut $0,35$, ce qui permet de trouver R_{thHS} connaissant R_{thTEG} . Le calcul donne $R_{thHS} = 6^\circ\text{C/W}$. Cette valeur est cohérente avec la donnée constructeur ($4,7 \text{ }^\circ\text{C/W}$). La caractérisation du dissipateur faite par le fournisseur, utilise généralement une source de chaleur de surface égale à celle du dissipateur, or dans le cas étudié, la surface du TEG est inférieure à celle du dissipateur, ceci défavorise le transfert thermique et augmente donc la résistance thermique.

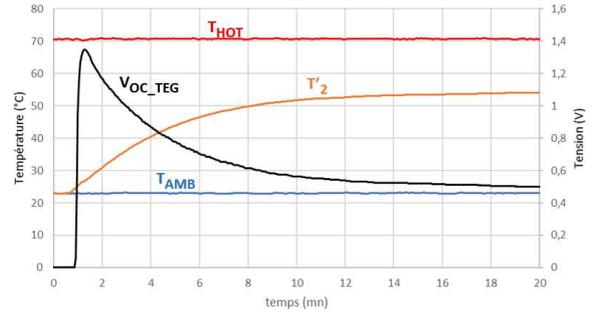


Figure 10. Evolution de V_{oc} et de T'_2 .

IV.6.3/Evolution de P_{max} vs I_{TEG}

Une fois le régime permanent atteint, on note $V_{OC_ITEG=0}$, la tension de circuit ouvert. Avec une charge active, on fait varier le point de fonctionnement (courbes A sur la Figure 11, relevées en partant de $V_{OC_ITEG=0}$). Puis, la charge active maintient V_{TEG} tel que $V_{\text{TEG}} = (V_{OC_ITEG=0})/2$. Une fois le nouveau régime permanent atteint (au bout de 20 mn), après que le courant I_{TEG} se soit stabilisé, on trace « rapidement » (par rapport à la dynamique du système) les nouvelles caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ @ $V_{OC_ITEG=0}/2$ (courbes B). On constate une diminution de la puissance maximale de l'ordre de 10% . Elle passe de $12,3 \text{ mW}$ à 11 mW . La raison de cette diminution a été brièvement décrite à la fin du § 4.2. Cela nous montre également que la caractéristique relevée après un régime permanent en circuit ouvert conduit à surestimer la puissance récupérable d'environ 10% par rapport au régime établi de fonctionnement à P_{max} . La pente des courbes $I(V)$ permet d'estimer la résistance série R . On trouve une valeur voisine de 5Ω , un peu plus élevée que prévue par les données constructeur ($3,4 \Omega$), mais qui reste cohérente.

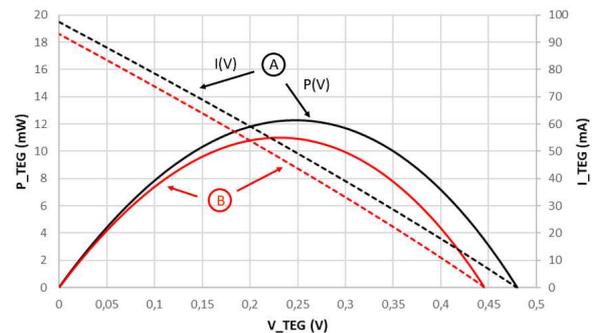


Figure 11. Relevés de $I(V)$ et $P(V)$ avec ΔT constant, ($T_{\text{HOT}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{AMB}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$) mais deux points de fonctionnement initiaux différents.

VI/ RECUPERATION D'ENERGIE

Différents circuits intégrés du commerce sont en mesure d'extraire l'énergie provenant de cellules solaires ou de TEG. Ces circuits gèrent à la fois la fonctionnalité MPPT (Maximum Power Point Tracking) et la charge d'un élément de stockage (batterie rechargeable ou supercondensateur). Les références

BQ25504, BQ25570 disponible en demo board, SPV1050 [15], MAX17710, ADP5090, AEM10941... sont disponibles sur le marché.

V.1/ BQ25504

Compte tenu des niveaux assez faible de tension V_{TEG} attendus, nous avons choisi d'utiliser sur ce projet le BQ25504 de Texas Instrument. Ces caractéristiques principales sont les suivantes : Tension d'entrée côté thermogénérateur (V_{IN}) entre 0,13 et 3,0 V, avec une tension minimale de démarrage de 0,6 V ; Courant d'entrée (I_{IN}) limité à 100 mA, tension de l'étage de stockage (V_{SC}) < 5.25 V. La consommation du circuit est très faible (< 1 μ A) en mode de veille.

Le circuit fonctionne en boost après une phase de cold start.

Ce circuit est fait pour recharger et gérer un accumulateur (ce qui explique les notations de la documentation technique avec V_{BAT}) ou des supercondensateurs. Nous l'utiliserons dans cette dernière configuration. (cf Figure 12).

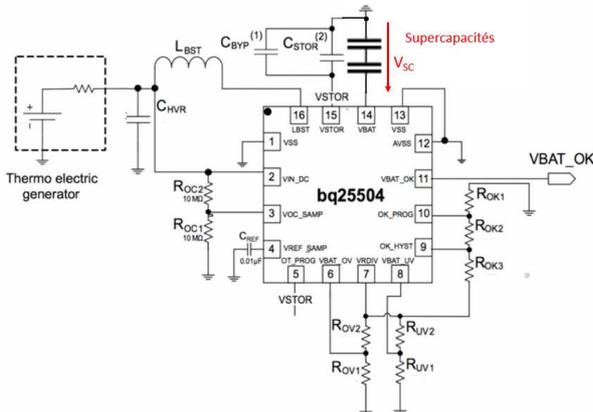


Figure 12. BQ25504 avec TEG et supercondensateurs.

V.1.1/ Transistor de déconnection

Sur la Figure 13, on note un transistor interne au BQ25504 qui permet la déconnection de l'étage de stockage lorsque la tension de ce dernier est trop faible. Avant le premier démarrage, ce transistor est ouvert. Il se ferme lorsque la tension V_{STOR} atteint 2,3 V. Il restera alors fermé, sauf si V_{STOR} passe sous ce seuil avec un effet d'hystérésis. Une fois le transistor fermé, $V_{STOR} = V_{SC}$. V_{STOR} correspond alors à la tension aux bornes des supercondensateurs.

Lorsque le transistor est ouvert, les supercondensateurs ne peuvent plus se décharger. On note la diode en parallèle sur ce transistor qui permet aux supercondensateurs de se charger quel que soit l'état du transistor.

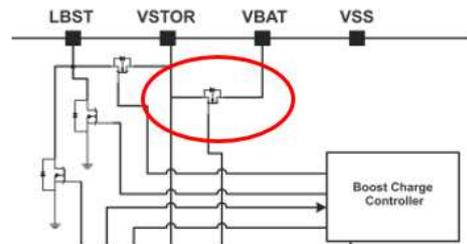


Figure 13. Connexion interne entre VBAT et VSTOR (extrait doc BQ25504)

V.1.2/ Boost et MPPT

Un convertisseur DC/DC de type boost est placé entre le thermogénérateur et l'étage de stockage. Tant que la tension V_{STOR} n'a pas atteint un seuil minimal d'environ 1,8V, le boost fonctionne en mode dégradé avec un mauvais rendement de conversion (entre 10 et 50 %). Une fois le seuil atteint, le boost se met en fonctionnement normal.

Pour V_{STOR} comprise entre 1,8 V et $V_{BAT_OV} = 4,9$ V, le convertisseur fonctionne en mode recherche du maximum de puissance (mode MPPT). C'est une MPPT dite de fraction de V_{oc} . Toute les 16 s, durant 256 ms, le TEG est déconnecté, ce qui permet au BQ25504 de mesurer la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le reste du temps, le DC/DC fonctionne en régulant la tension du TEG à une tension de consigne $V_{MPP} = V_{oc} / 2$.

Toutefois, si l'étage de stockage est plein, c'est-à-dire lorsque V_{STOR} atteint V_{BAT_OV} , et tant que $V_{STOR} > V_{EOC} - 50$ mV, le convertisseur DC/DC s'arrête pour éviter la surcharge.

Il faut noter aussi la limitation active du circuit BQ25504 à 100 mA sur le courant d'entrée.

V.1.3/ Comparateur interne

Le BQ25504 intègre un comparateur à hystérésis, sa sortie V_{BAT_OK} vient activer l'étage élévateur situé en entrée du bloc qui génère et régule le 3,3 V. La tension mesurée par le comparateur est la tension V_{STOR} (égale à V_{SC} dès que l'interrupteur interne est passant.) On note V_{BAT_H} et V_{BAT_L} les seuils haut et bas du comparateur. Pour avoir un démarrage initial rapide, on a pris $V_{BAT_H} = 3,0$ V. V_{BAT_L} est fixée au niveau minimum soit 2,3 V.

V.2/ Test BQ25504

Pour ce test, le thermogénérateur est posé sur une plaque chauffante avec de la pâte thermique intercalée. Les mesures de température sont relevées avec des thermocouples $T_{HOT} = 170$ °C, $T_{AMB} = 25$ °C. Les mesures électriques sont réalisées avec un powermeter (N6705B). Il n'y a pas de charge connectée sur les supercondensateurs. La charge est rapide (180 s) car le gradient est élevé.

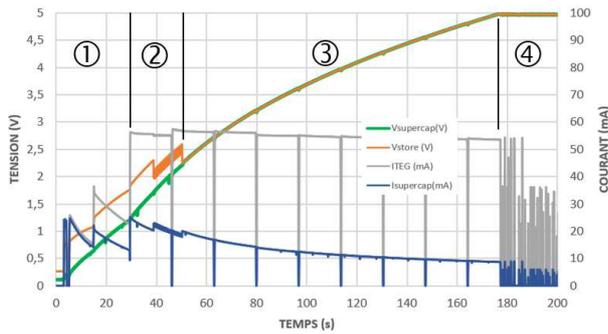


Figure 14. Caractéristiques courants et tensions :

On observe bien les phases prévues :

Phase 1 : Phase de COLD START. V_{STOR} passe de 0V à 1,8V. Dès que V_{STOR} atteint 1,8V, c'est le début de la phase suivante.

Phase 2 : le boost est opérationnel en mode MPPT et le courant issu du TEG augmente de façon significative à 55 mA, la tension du TEG est voisine de $V_{OC}/2$, soit 1,05V. Le transistor interne placé entre V_{BAT} et V_{STOR} est ouvert mais les supercondensateurs se chargent grâce au courant qui passe par la diode interne de ce transistor. La différence entre les tensions V_{STOR} et V_{SC} correspond au potentiel vu par cette diode. Quand V_{STOR} est au voisinage de 2,2 V, le transistor se ferme et s'ouvre (pilotage autour de 2,2 V sur V_{STOR} avec un effet d'hystérésis).

Phase 3 : Dès que V_{STOR} est supérieur à 2,2 V, le transistor interne reste fermé. Les supercondensateurs continuent à se charger. Jusqu'à V_{BAT_OV} le boost est en mode MPPT. On retrouve les phases de mise en circuit ouvert du TEG toutes les 16s (le courant I_{TEG} chute à zéro et la tension du TEG (non visible sur ce graphique) passe brièvement à 2,1 V.

Phase 4 : V_{STOR} est au voisinage de V_{BAT_OV} . Les supercondensateurs sont chargés au maximum. Le circuit boost du BQ25504 fonctionne par intermittence pour compenser les pertes (hystérésis autour de V_{BAT_OV}).

V.3/ Rendement BQ25504

Plusieurs essais ont été menés avec différentes températures pour le côté chaud, et donc différentes tensions V_{TEG} . Le rendement reste supérieur à 80% si $V_{TEG} > 0,4$ V, $V_{SC} > 2,2$ V et $I_{TEG} > 0,1$ mA (Figure 15). En revanche, pour les faibles valeurs de tension V_{SC} le rendement décroît fortement. Il conviendra donc d'éviter de décharger les supercondensateurs sous 2,2 V, ainsi seule la phase du démarrage initial se fera à faible rendement.

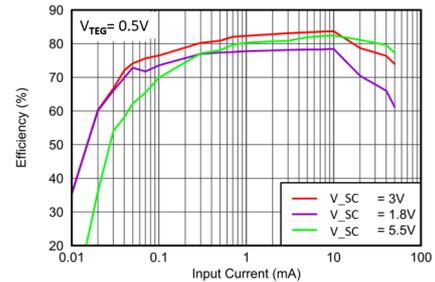


Figure 15. Exemple de courbes de rendement du BQ25504 (extrait doc BQ25504)

VI/ ETAGE DE STOCKAGE

Le choix des supercondensateurs est toujours à mettre en concurrence avec le choix d'une pile rechargeable. Pour l'application qui nous intéresse avec un gradient de température quasi permanent, les supercondensateurs sont intéressantes pour leur tenue en température et dans une moindre mesure pour leur tenue au cyclage (dans le cas de charges avec des phases consommatrices qui vidant partiellement les supercondensateurs).

Le modèle choisi est une supercondensateur PowerStor® ref : Powerstor-B0810-2R5105-R de capacité $C = 1$ F, une tension de 2,5 V, un courant de fuite de 4 μ A et une résistance série ESR de 0,5 Ω .

VI.1/ Dimensionnement

Pour ce projet nous avons choisi de stocker l'énergie sous une tension maximale $V_{BAT_OV} = 4,9$ V. Il y a 2 supercondensateurs en série. Le niveau maximal de charge reste en dessous du maximum atteignable qui est de 5,0 V pour les supercondensateurs, de 5,25 V pour le BQ25504 et de 5,5 V pour le TPS610995. Ceci permet de garantir une plage de sécurité au système.

On note C_{EQ} la capacité équivalente des deux supercondensateurs en série. $C_{EQ} = C/2 = 0,5$ F. L'énergie du pack est donnée par la relation :

$$E_{SC} = \frac{1}{2} C_{EQ} \cdot V_{SC}^2 \quad \text{Eq.10}$$

On note $\eta_{3,3}$ le rendement moyen de l'étage qui fournit le 3,3 V. $\eta_{3,3}$ est pris à 0,7 (valeur qui sera validée par la suite)

VI.1.1/Critère lié au démarrage.

L'étage de sortie est activé pour $V_{SC} = V_{STORE} = V_{BAT_H}$, avec V_{BAT_H} choisie à 3,0 V. Lors du démarrage du capteur, la tension aux bornes des supercondensateurs va diminuer. Elle doit rester à un niveau suffisant pour le bon fonctionnement du boost de sortie (au-dessus de 0,7 V). A la fin du démarrage, il faut $V_{SC} = V_{STORE} > V_{BAT_L}$. V_{BAT_L} est choisie à 2,3V. Avec la valeur de C choisie, la relation suivante est bien respectée :

$$E_{SC(V_{SC}=V_{BAT_H})} \geq E_{SC(V_{SC}=V_{BAT_L})} + \frac{E_{STARTUP}}{\eta_{3,3}}$$

Eq11

VI.1.2/Critère lié à l'autonomie.

Une fois les supercondensateurs chargés, le système doit avoir 1 h d'autonomie, cette valeur est suffisante car le gradient est présent en permanence. On note N le nombre de cycles réalisables en 1h ($T_{CYCLE} = 25,8$ s, on souhaite $N = 140$). On néglige l'autodécharge des supercondensateurs. Le niveau maximum de charge des supercondensateurs est V_{BAT_OV} et le niveau minimal est V_{BAT_L} . On vérifie que la relation suivante est bien validée avec les valeurs choisies :

$$E_{SC}(V_{SC}=V_{BAT_OV}) - E_{SC}(V_{SC}=V_{BAT_L}) \geq \frac{N \cdot E_{CYCLE}}{\eta_{3,3}} \quad \text{Eq12}$$

VI.2/ Autodécharge

La récupération d'énergie étant normalement toujours active, l'autodécharge n'a pas beaucoup d'importance pour le cas de figure étudié (à la condition que l'énergie récupérée soit suffisante).

VI.3/ Circuit d'équilibrage

Pour des petites supercondensateurs (<10F par élément), l'expérience nous a montré qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter un circuit d'équilibrage si les supercondensateurs ont la même valeur initiale de capacité et restent à la même température, ce qui est le cas pour l'application visée.

Comme le courant d'autodécharge varie comme la tension, cela crée un équilibrage naturel.

VII/ GENERATION DU 3,3V

Plusieurs solutions ont été envisagées partant de l'étage à supercondensateurs pour fournir du 3,3V sur la charge. La première utilise un convertisseur boost, mais cela limite la tension des supercondensateurs à 3,3V. La deuxième comporte un LDO, mais il faut maintenir les supercondensateurs à une tension supérieure à 3,3 V. La troisième solution utilise un buck/boost (TPS63001) et peut être aussi intéressante du point de vue rendement que la solution présentée ci-dessous.

La solution qui a été retenue cascade un boost (TPS610995) et un LDO (TPS71533). Cette solution permet de combiner l'utilisation des supercondensateurs sur une large plage de 2,3 V à 4,9 V (75% de l'énergie stockée pour un niveau maximum de 5V est utilisable) avec un rendement supérieur à 80% pour $V_{SC} < 3,6V$.

Le TPS610995 est activé (pin Enable) par le signal logique V_{BAT_OK} venant du BQ25504 dès que la tension des supercondensateurs est suffisante. Il accepte de délivrer jusqu'à 800 mA sur une plage de tension entre 0,7 et 5,5 V. Il présente des courants de veille $< 1 \mu A$ lorsqu'il est désactivé (Enable au niveau Low). Il fournit du 3,6 V en sortie si la tension d'entrée reste en dessous de 3,65 V. Au-delà, la régulation est inopérante et le boost délivre en sortie la tension d'entrée, à la chute de tension de la diode interne près, mais elle est négligeable.

Le LDO TPS71533 délivre du 3,3 V en sortie. Il accepte une tension d'entrée entre 2,5 V et 24 V et délivre un courant maximal de 60 mA. Sa consommation propre reste faible ($< 3,2 \mu A$). Il travaille avec un très bon rendement tant que $V_{SC} < 3,65$ V ; au-delà, la chute de tension à ces bornes augmente, ce qui réduit ses performances.

VIII/ CIRCUIT FINAL

La Figure 20 montre le schéma électrique de l'ensemble du dispositif. L'électronique est intégrée sur la carte présentée Figure 16. La taille de la carte est de $4 \times 5 \text{ cm}^2$.



Figure 16 Carte électronique.

Les étages sont testés séparément puis des résistances de 0Ω permettent de faire les connexions entre les étages. Des points de test sont placés sur le prototype présenté mais ne sont pas présents sur la version finale.

L'ensemble est placé dans un boîtier relié au thermogénérateur par un câble à isolant silicone résistant aux températures élevées. Le prix du système complet est voisin de 60 € pour l'ensemble de cette carte (pour une série de 250, dont 17 € pour le TEG et 25€ pour les aimants).

Au début de l'essai présenté Figure 17, le TEG est fixé sur la surface chaude depuis 30 mn. $T_{HOT} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{AMB} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Les supercondensateurs sont court-circuités. A $t = 0$, on enlève le court-circuit, le BQ25504 est en phase de cold start, la puissance récupérée est faible. Dès que V_{SC} atteint 1,5 V, le circuit passe en mode MPPT ($V_{TEG} \approx V_{OC}/2$) et maximise la puissance récupérée (5 mW au niveau des supercondensateurs). Pour $V_{SC} = 3$ V, la tension de sortie est activée et passe à 3,3 V, le module capteur est alors alimenté et démarre ce qui induit une chute brutale de V_{SC} . Quand les supercondensateurs sont chargés, la puissance récupérée diminue et vient juste compenser la consommation du module capteur.

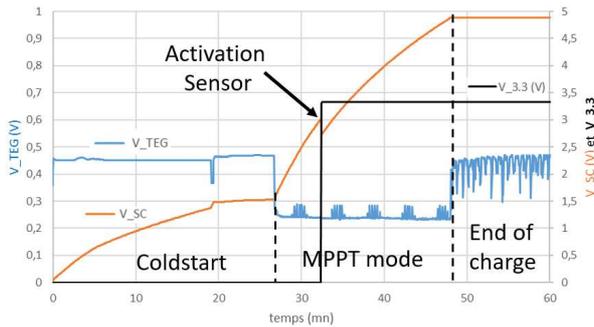


Figure 17. Démarrage avec $THOT=75^{\circ}C$ et $TAMB=23^{\circ}C$

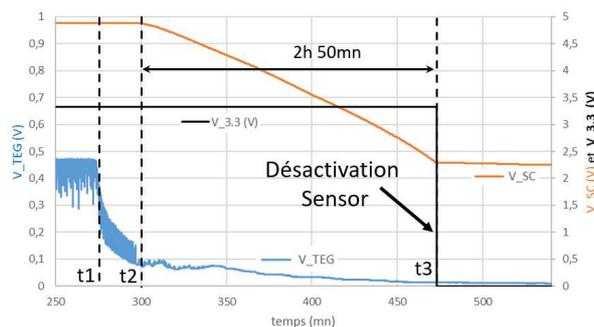


Figure 18. Fonctionnement en autonomie.

La Figure 18 permet d'apprécier l'autonomie du système. A $t = t_1$, on retire le TEG de la plaque chaude, il thermalise rapidement et V_{TEG} chute. L'autonomie mesurée est de 2 h 50 mn, ce qui est supérieure à l'estimation initiale de 2 h obtenue pour un rendement $\eta_{3.3}$ de 0,7. Cela signifie que le rendement moyen de l'ensemble qui génère le 3,3 V est supérieur à 0,8 (nous avons aussi constaté que la consommation du module Jennic diminue au bout d'un certain temps de fonctionnement). A $t = t_3$, l'étage qui génère le 3,3 V est déconnecté, les supercondensateurs se vident très lentement (autodécharge supercondensateurs + faible consommation parasite autour du BQ25504 et du TPS610995).

IX/ DISCUSSION

Différents tests de validations ont été menés avec succès. Nous avons néanmoins constaté que les conditions expérimentales (état de surface de la source chaude, position horizontale ou verticale du TEG, serrage entre les parties ...) influent notablement sur les performances de l'ensemble thermogénérateur et dissipateur. Des travaux en cours montrent aussi qu'il est intéressant d'éloigner le dissipateur de la source chaude pour augmenter le gradient disponible et ainsi la puissance électrique récupérable. De même, si le volume n'est pas une contrainte, il faut choisir un dissipateur volumineux avec une grande surface d'échange avec l'air (type dissipateur de PC).

Pour les derniers prototypes (non présentés dans cet article), nous avons aussi privilégié une conception limitant le nombre d'éléments pour améliorer le transfert

de la chaleur et mis en place une fixation qui évite les ponts thermiques entre la partie chaude et le dissipateur.

Côté électronique, Le BQ25504 est un circuit facile à utiliser et performant sauf durant la phase de coldstart. Mais cette phase ne doit se produire qu'une seule fois. Il faut noter la limitation en courant d'entrée à 100 mA qui peut faire diminuer la puissance récupérable. Le boîtier QFN peut aussi compliquer la réalisation mais on trouve encore la demo board du BQ25504 ou plus facilement celle du BQ25770 [16].

La carte électronique réalisée est parfaitement adaptée pour des application TEG mais elle peut être très facilement reconfigurée pour une source solaire avec une ou deux cellules en série (une résistance à changer pour modifier le rapport V_{MPP}/V_{OC}).

X/ CONCLUSION.

Cet article a présenté la réalisation d'une alimentation (3,3V, 60 mA) utilisant l'énergie fournie par un gradient thermique présent aux bornes d'un thermogénérateur.

Le système présenté comporte deux parties : La première partie, composée d'un thermogénérateur associé avec un radiateur de dissipation, est utilisable pour des températures allant jusqu'à $200^{\circ}C$. La fixation par aimant la rend aisément déployable sur des surfaces plates magnétiques. La deuxième partie est une carte électronique qui assure l'extraction, le stockage, la mise en forme et la gestion de l'énergie stockée. Les deux parties sont séparées et connectées avec un câble adapté aux températures élevées ; cela permet de déporter l'électronique vers une zone moins chaude ($< 60^{\circ}C$). Le stockage est assuré par des supercondensateurs.

En environnement industriel, à proximité de sources permanentes de chaleur, cette alimentation permet d'avoir un fonctionnement a priori perpétuel. Par rapport à une solution à pile, un surcoût initial est à déplorer. Mais, sur le long terme, l'absence de maintenance (remplacement des piles, coût du personnel dédié au changement des piles...) met les deux options en concurrence. En fonction de la durée d'usage visée et du volume autorisé, la solution utilisant un TEG pourra être plus avantageuse.

XI/ REMERCIEMENTS

Ce travail a été conduit dans le cadre du projet 2ido (Internet Industriel Des Objets et Des Opérateurs) financé par la BPI (Banque Public d'Investissement) dans le cadre d'un PIA (Programme d'Investissements d'Avenir)

XII/ RÉFÉRENCES

[1] Kasama, T., Koide, T., Bula, W.P., Yaji, Y., et al., "Low Cost and Robust Field-Deployable Environmental Sensor

for Smart Agriculture”, 2nd International Symposium on Devices, Circuits and Systems, Hiroshima, Japan, pp. 1-4, 2019.

- [2] C. Kamienski, J.P.Soininen, et al., “Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture”, *Sensors* 2019, 19, 276; doi:10.3390/s19020276
- [3] <http://www.micropelt.com>
- [4] H. Hachiuma et al., “Thermoelectric Generation Technology and the Applied Products”, *Komatsu technical report*, 2019. https://home.komatsu/en/company/tech-innovation/report/pdf/190329_09e.pdf
- [5] H. Park et al., “Energy harvesting using thermoelectricity for IoT (Internet of Things) and E-skinsensors”, *J.Phys.:Energy*1(2019)042001
- [6] N. Jaziri et al., “A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications”, *Elsevier, Energy reports*, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>
- [7] V.Boitier, P.Tajan et al. “WSN Nodes: Design Considerations and Energy Management”, *PowerMEMS, dec2016, Paris*
- [8] Y Apertet et al, “Internal convection in thermoelectric generator models” 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* 395 012103
- [9] www.eureca.de/files/pdf/cooling/teg/TEGenerators.pdf
- [10] M. Freunek, M. Müller, et al., “New physical model for thermoelectric generators” *Journal of Electronic Materials*, vol. 38, pp. 1214–1220, jul. 2009.]
- [11] Paul Durand-Estèbe, “Systèmes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique.”, thèse, 2016.
- [12] C. Goupil, *Ecole GdR Thermoélectricité*, 2012, [dispo : http://gdr-thermoelectricite.cnrs.fr/ecole2012/ermit2012-goupil2.pdf](http://gdr-thermoelectricite.cnrs.fr/ecole2012/ermit2012-goupil2.pdf)
- [13] R. Monthéard, “Récupération d'énergie aéroacoustique et thermique pour capteurs sans fil embarqués sur avion.”, thèse, 2014.

[14] A. Nour Eddine, “Modélisation et optimisation d'un système de récupération d'énergie à l'échappement des moteurs de navires en utilisant la thermoélectricité (effet Seebeck)”, thèse, 2017.

- [15] L.Seguir, V.Boitier et al. , “Réalisation d'une alimentation DC 3,3V sans pile avec récupération d'énergie photovoltaïque et stockage sur supercapacités pour l'alimentation d'un capteur sans fil basse consommation.”, *revue 3EI-SEE*, juillet 2020
- [16] <https://www.mikroe.com/solar-energy-click>

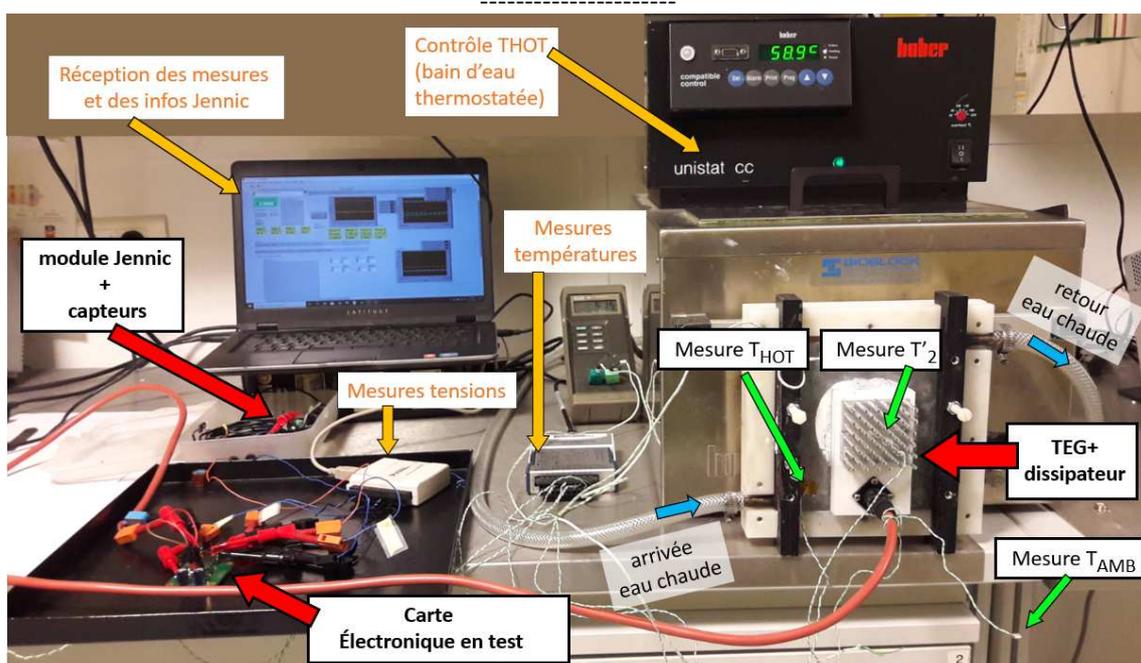


Figure 19. Dispositif de tests de l'ensemble TEG et dissipateur.

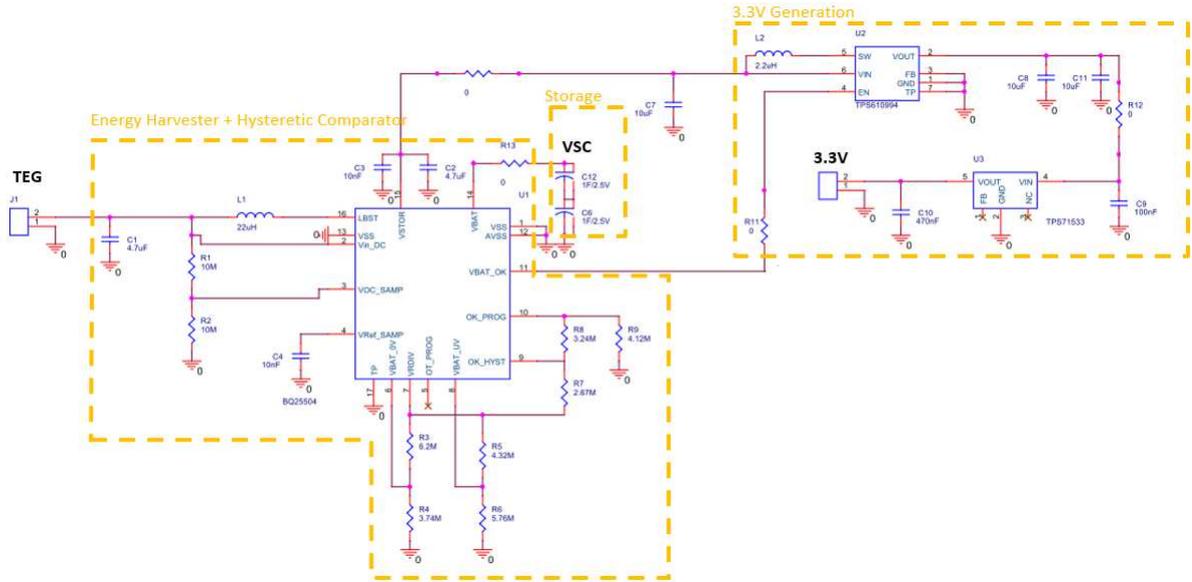


Figure 20. Schématique du circuit électronique

REALISATION D'UN DATALOGGER AUTONOME SUR MYRIO (1/2)

JEAN-PHILIPPE ILARY
IUT Ville d'Avray - GEII
50, Rue Sèvres, 92410 Ville d'Avray

Résumé : Dans le cadre des projets de seconde année de DUT, il a été proposé aux étudiants de moderniser un Kart électrique et de l'équiper entre autres d'un datalogger afin de relever certaines caractéristiques électriques. Ces mesures doivent permettre aux étudiants de mieux comprendre les stratégies de commande, de consommation et ainsi adapter le pilotage afin de maîtriser au mieux l'énergie nécessaire au déplacement.

Ce premier document présentera la mise en place d'un programme sur MyRIO réalisant la sauvegarde de données sur clé USB avec le MyRIO.

I/ Mise en place

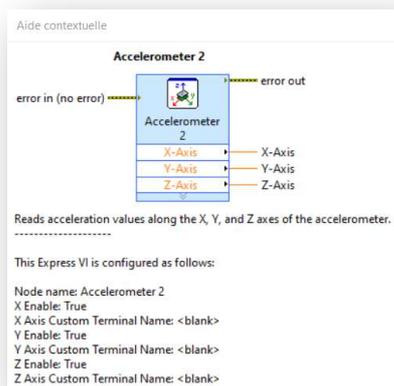
Le MyRIO de National Instrument a été choisi car il intègre un accéléromètre, à la possibilité d'embarquer le programme Labview de façon autonome et peut être alimenté avec une pile 9V.

De plus, une clé USB peut être connectée afin de sauvegarder les données générées.

II/ Lire les données d'accélération

Les blocs fonctions prédéfinis pour le MyRIO permettent un accès rapide au matériel (accéléromètre, Dels et bouton poussoir par exemple).

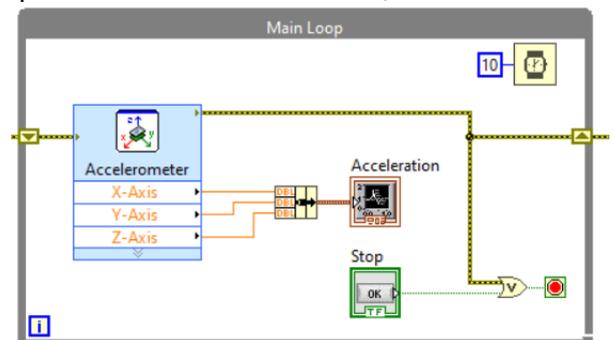
Le bloc Accéléromètre fournit l'accélération sur les trois axes.



La mise en œuvre de ce bloc est relativement simple. Dans l'exemple ci-dessous, on a une période d'échantillonnage de 10ms. Le résultat de l'acquisition est envoyé sur un graphe déroulant.

La mise en œuvre d'un tel capteur est très intéressante. Cela permet aux étudiants d'étudier ce type de capteur et de visualiser les accélérations et décélérations et d'en déduire la vitesse, voire la position.

Voici un premier programme qui permet de récupérer l'accélération sur les axes X, Y et Z.



Dans l'état actuel, il est contraignant de travailler sur de telles données si l'on fait de l'embarqué. Il est possible de récupérer les points et de les exporter vers un fichier Excel (ou autre).

Mais, sachant que l'objectif est d'avoir un système de mesure autonome, donc déconnecté d'un ordinateur, il est impératif d'écrire les données sur un support tel qu'une clé USB.

III/ Sauvegarder les données sur une Clé USB

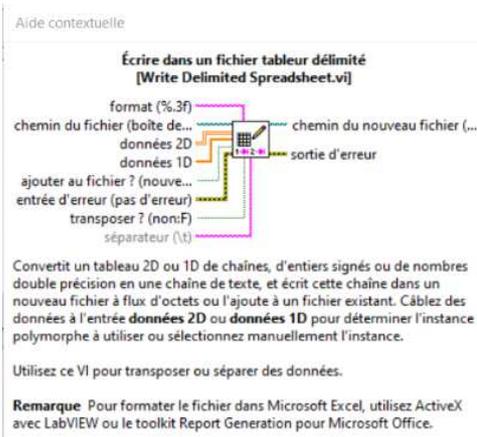
Les données produites par le bloc Accéléromètre doivent être mises en forme avant leur écriture sur la clé.

Il a été choisi le format CSV. Un fichier CSV est un fichier tableur, contenant des données sur chaque ligne séparée par un caractère de séparation (généralement une virgule, un point-virgule ou une tabulation). Ainsi, il sera possible de lire le fichier sur un tableau quelconque, voire un éditeur de texte de base.

Volontairement, il a été fait ce choix afin d'être le plus polyvalent possible et de s'adapter à une utilisation en bord de piste par exemple, avec l'utilisation d'une tablette (+clé OTG).

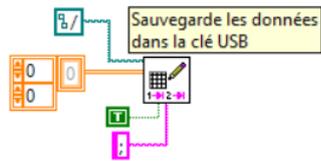
La fonction « Écrire dans un fichier tableur délimité (VI) » disponible dans *File I/O* permet d'écrire les données dans le format voulu.

L'analyse des entrées se fait en s'appuyant sur l'aide contextuelle ci-après.



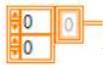
Aide Labview : Ecrire fichier

La mise en œuvre de cette fonction est relativement simple :



: Définit le chemin où sera écrit le fichier.

L'écriture du fichier Data.csv sur la clé USB (/u) sera par exemple : `/u/Data.csv`.



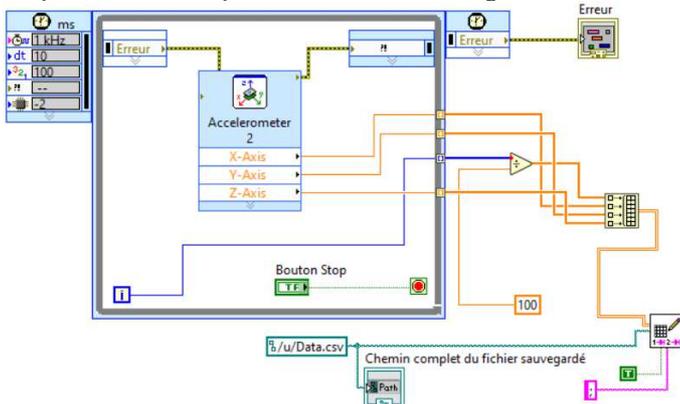
Les données 2D qui vont être écrites dans le fichier.



Transposer ? : spécifie si le VI transpose les données après les avoir converties à partir d'une chaîne. La valeur par défaut est FAUX. Si transposer ? est égal à FAUX, chaque appel à ce VI crée une nouvelle ligne ou ligne dans le fichier.



Séparateur représente le caractère ou la chaîne de caractères à utiliser pour séparer les champs dans le fichier tableur. Par exemple : la valeur, (une virgule) définit une virgule comme séparateur. La valeur par défaut est \t, ce qui spécifie un caractère de tabulation comme séparateur. Ici, on choisit le ';' qui est lisible par Excel et compris comme retour à la ligne.



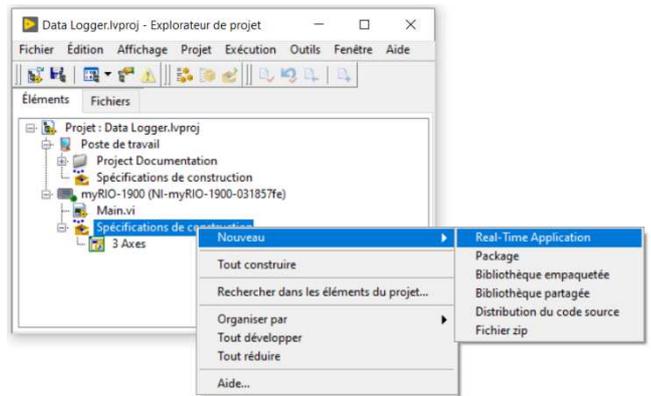
L'exemple d'implémentation ci-dessus permet déjà d'avoir une idée de la programmation d'un système de DataLogger avec récupération des données sur une clé USB.

IV/ Implanter le programme dans le MyRIO

Afin de placer le système de mesurage par MyRIO sur le Karting, il est nécessaire d'implanter le programme et de le rendre bootable.

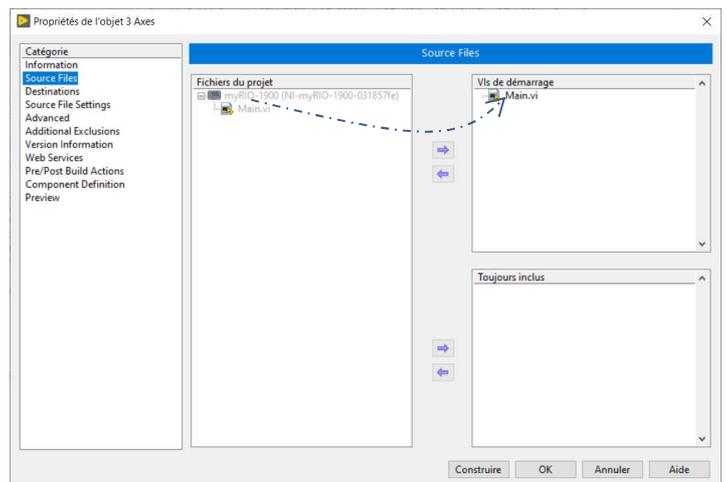
Il faut commencer par créer un projet (bonne pratique) et ensuite de développer le programme dans celui-ci.

Il faut ensuite créer une application Temps réel comme indiqué ci-dessous.



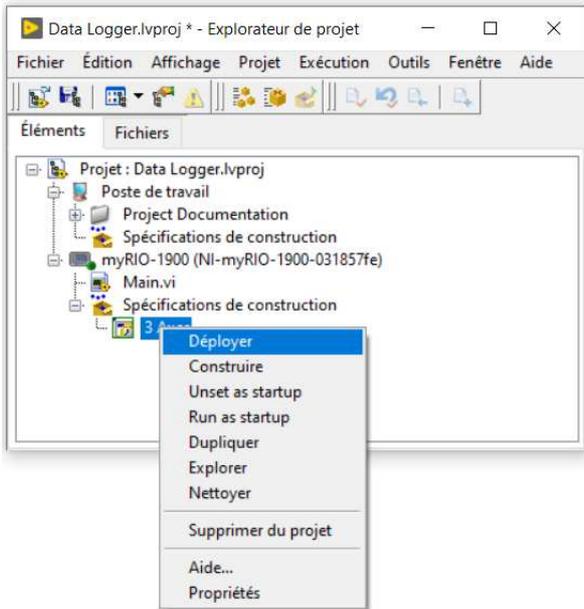
Dans la catégorie « Informations », saisir le nom de votre application, ici 3 Axes.

La catégorie suivante (Source Files) est la plus importante, c'est là que l'on définit les programmes qui seront implantés dans le MyRIO, et plus particulièrement le programme de démarrage. N'ayant ici qu'un seul programme « main.vi », la démarche est donnée ci-dessous.



Il ne reste plus qu'à construire l'application en cliquant sur le bouton du bas de la fenêtre.

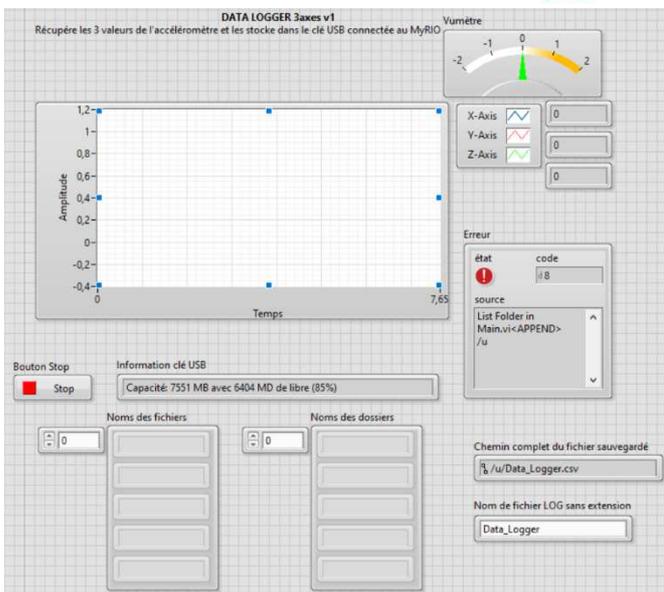
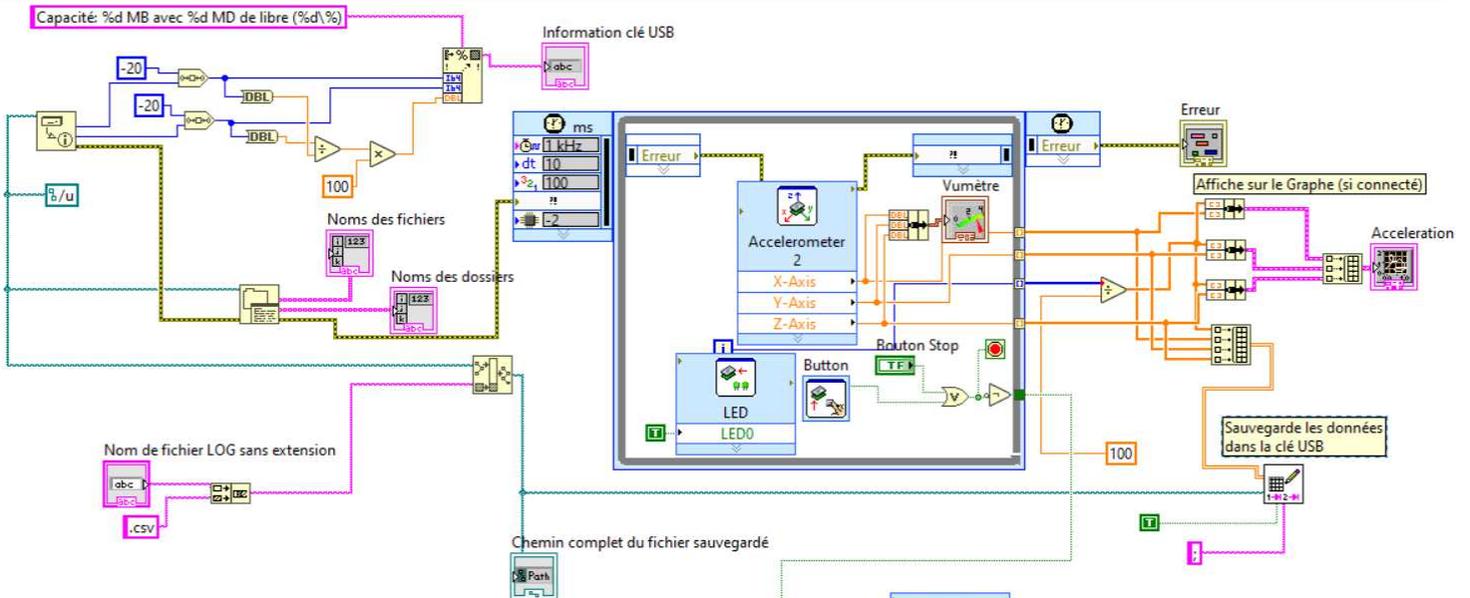
Pour terminer, il faut transférer le programme dans le MyRIO en sélectionnant « Déployer ».



L'application étant autonome, il est préférable de mettre en place un système de mise en route, mais surtout une gestion d'arrêt.

V/ Programme de mise au point

Le programme qui suit doit permettre de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble (entre autre, l'accès à la clé). Il donne aussi une base aux étudiants qui devront réaliser le système de DataLogger pour instrumenter le Karting.



ELECTRO MOBILITE : COMMANDE D'UN DOUBLE-ONDULEUR

KHALIL EL KHAMLICHI DRISSI⁽¹⁾, CHRISTOPHE PASQUIER⁽¹⁾ ET ALAIN JAAFARI⁽²⁾

⁽¹⁾ **Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, BP10448, F-63171, Clermont-Ferrand, France and CNRS, UMR 6602**

⁽²⁾ **Advanced ElectroMobility, AEM, 28 rue Alexandre Varenne, 63110 Beaumont**

Résumé : Cet article reprend une partie des travaux de thèse de doctorat développés au sein de l'équipe CEM de l'institut Pascal et en collaboration avec le département génie électrique de Polytech Clermont Ferrand. Il propose une structure de double-onduleur pour suppléer l'utilisation classique du hacheur survolteur ou Boost, technologie courante dans la conception standard des véhicules électriques et hybrides. En effet, la chaîne d'alimentation des véhicules actuels est constituée d'un convertisseur continu-continu (DC/DC) suivi d'un onduleur (DC/AC) ; cette chaîne n'est cependant pas optimale en termes de rendement et d'utilisation de composants passifs. Les dispositifs d'alimentation en courant continu des moteurs des véhicules électriques ou hybrides actuels comportent des batteries dont la tension doit être augmentée afin de permettre à l'onduleur triphasé de délivrer une tension suffisante. Cependant, les moyens utilisés, tels que des survolteurs, sont coûteux, prennent un volume important et ont un poids conséquent qui affecte directement les performances du véhicule. Nous proposons une structure double-onduleur associée à un moteur à stator ouvert. L'approche pédagogique sera centrée sur la stratégie de commande associée et ses performances énergétiques et harmoniques. Elle pourra être mise en œuvre par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink ou expérimentalement.

I/ Introduction

Durant ces dernières années, l'intérêt pour les technologies des véhicules à faibles émissions carbonées a fait un bond important à travers l'Union européenne (UE) et au-delà, encouragé en cela par les gouvernements, des groupes de citoyens et les constructeurs automobiles. De grands espoirs ont été mis plus récemment dans les véhicules électriques (VE) et les véhicules électriques hybrides (VEH) en tant que technologies clés pour atténuer le changement climatique, encourager les énergies alternatives et favoriser une nouvelle branche de l'industrie dans le secteur automobile. Ainsi, l'électromobilité des transports revient véritablement sur la scène industrielle après quasiment un siècle de mise en veille. Elle contribuera indéniablement à des mutations profondes dans le fret et la mobilité des personnes.

II/ Structures classique et alternative

Classiquement, les Véhicules Electriques (VE) ou Hybrides (VHE) utilisent un bus continu basse tension pour tenir compte des contraintes de sécurité. Par conséquent,

dans la chaîne de traction, un convertisseur DC/DC survolteur [1] connecté à l'onduleur est utilisé afin de doubler le niveau de la tension continue (voir Figure 1). Ce hacheur survolteur utilise une inductance qui pèse lourdement dans le poids total du convertisseur. Dans les travaux de thèse [2], la structure à double-onduleur a été proposée et se révèle être appropriée pour être utilisée dans la chaîne de puissance pour les applications de traction tout en évitant l'utilisation d'un convertisseur DC/DC. Nous pouvons distinguer deux types de structures à double-onduleur pour alimenter un moteur à stator ouvert : une isolée à double batterie et l'autre non isolée à une batterie.

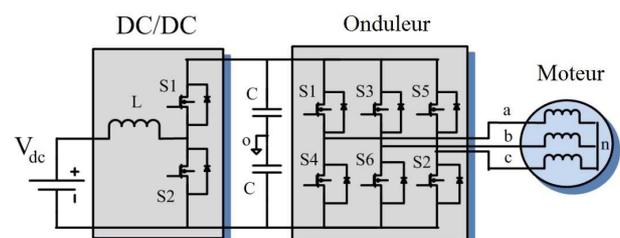


Figure 1. Chaîne de traction avec hacheur survolteur

Les travaux de Stemmler et Guggenbach [3] montrent qu'un moteur à stator ouvert peut être entraîné par un double-onduleur en rendant disponibles les six bornes des bobines du moteur.

On note aisément que la solution classique utilise une inductance et huit semi-conducteurs tandis que la solution alternative utilise uniquement douze semi-conducteurs.

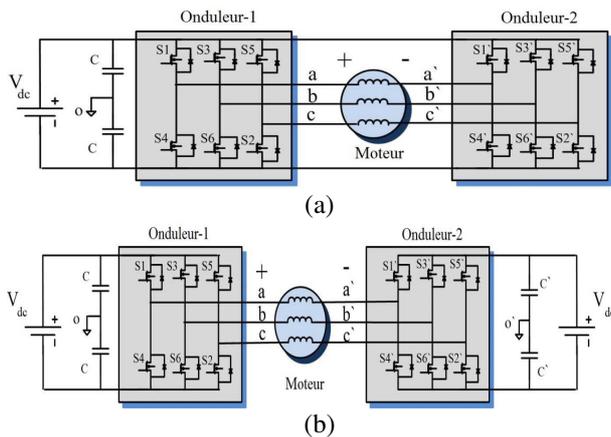


Figure 2. Structure à double-onduleur alimentée par :
(a) une seule batterie
(b) deux batteries isolées

Dans la chaîne de conversion classique, les pertes par commutation sont renforcées par la présence d'un hacheur survolteur, le rendement total est affecté.

La structure alternative, si elle est associée à une stratégie de commande appropriée, permet d'augmenter le rendement de l'onduleur d'environ 5% [4].

Grâce à cette amélioration du rendement, la batterie du véhicule gagne en longévité. En effet, la profondeur de décharge de la batterie a une évolution exponentielle décroissante par rapport à son espérance de vie telle qu'indiquée dans la Figure 3.

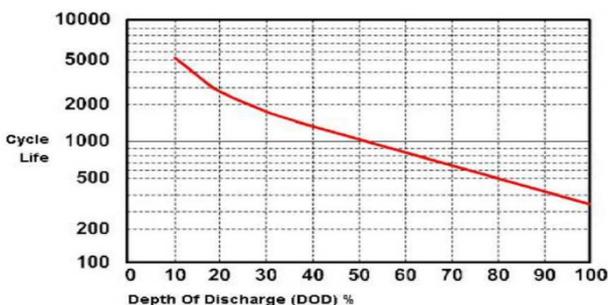


Figure 3. Espérance de vie des batteries

III/ Stratégies de commande

Depuis les années 1970, la modulation de largeur d'impulsions (MLI) s'est imposée en électronique de puissance et a vu naître un nombre considérable de stratégies de commandes. Quelques-unes de ces stratégies ont réussi à s'imposer dans le monde industriel (MLI-Sinus, MLI en surmodulation ou encore la modulation vectorielle).

Dans cet article, on se propose d'étudier la modulation vectorielle modifiée MSVM qui s'applique essentiellement à la structure double onduleur de la Figure 2. (a) Les performances de cette stratégie de commande seront comparées à celle de la modulation vectorielle classique du point de vue des pertes par commutation, du taux de distorsion harmonique de la tension et du courant de sortie.

III.1/ Découplage de la commande des onduleurs

Contrairement à ce qui est proposé dans la littérature [5], nous proposons ici de commander chaque onduleur d'une manière indépendante. Chaque onduleur met en œuvre indépendamment l'un de l'autre, huit combinaisons de commutation, étiquetées $i=1$ à 8 (voir Figure 4). On applique ensuite deux vecteurs de référence pour chaque onduleur, les vecteurs réels appliqués s'expriment alors dans le plan $\alpha\beta$ par :

$$V_{i,x}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} (s_{a,i}^x + a s_{b,i}^x + a^2 s_{c,i}^x) \quad (1)$$

$$\text{avec } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

V_{dc} représente la tension continue délivrée par la batterie, $s_{a,i}^x$, $s_{b,i}^x$, $s_{c,i}^x$ désignent les états de commutation de l'onduleur et x ($=1$ ou 2) indique le numéro de l'onduleur. Par conséquent, chaque onduleur produit 8 vecteurs qui construisent l'hexagone de référence pour sa commande propre.

Le vecteur de commande du moteur est par conséquent la différence entre les vecteurs $V_{i,1}^*$ et $V_{i,2}^*$, dans l'espace vectoriel des tensions :

$$V_{com}^* = V_{i,1}^* - V_{i,2}^* \quad (2)$$

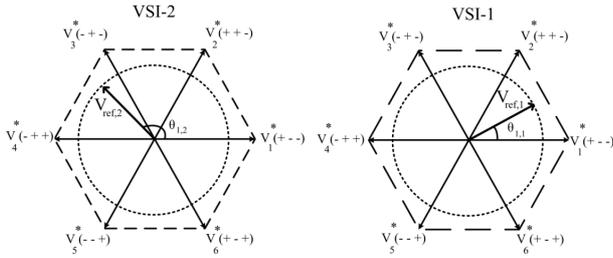


Figure 4. Déclage de la commande par onduleur

III.2/ Les commandes SVM et MSVM :

La modulation vectorielle [6] (Space Vector Modulation ou SVM) est obtenue en projetant le vecteur de référence sur les deux vecteurs actifs voisins. Les rapports cycliques sont calculés en normalisant les temps d'application de chaque vecteur actif par rapport à la période d'échantillonnage ou de commande T_s , soit $\alpha_{i,1} = \frac{t_{i,1}}{T_s}$ et $\alpha_{i,2} = \frac{t_{i,2}}{T_s}$, où $1 \leq i \leq 6$ désigne le numéro du secteur. Les équations (3.1) et (3.2) expriment ces rapports cycliques $(\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2})_{1 \leq i \leq 6}$ d'application des vecteurs actifs et les rapports cycliques d'application des vecteurs nuls $\alpha_0 = \alpha_7 = \frac{1}{2}(1 - \alpha_{i,1} - \alpha_{i,2})$:

$$\alpha_{i,1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} M_x \sin\left(i\frac{\pi}{3} - \theta_{1,x}\right) \quad (3.1)$$

$$\alpha_{i,2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} M_x \sin\left(\theta_{1,x} - (i-1)\frac{\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

La commande MSVM répartit le rapport cyclique d'utilisation du vecteur nul ($\alpha_0 + \alpha_7$) équitablement sur les deux vecteurs actifs voisins. Pas conséquent, les rapports cycliques des vecteurs actifs deviennent :

$$\alpha_{i,1}^{new} = \frac{1}{2} - \frac{3}{\pi} M_x^{new} \sin\left(\theta_{1,x} - (i-\frac{1}{2})\frac{\pi}{3}\right) \quad (4.1)$$

$$\alpha_{i,2}^{new} = \frac{1}{2} + \frac{3}{\pi} M_x^{new} \sin\left(\theta_{1,x} - (i-\frac{1}{2})\frac{\pi}{3}\right) \quad (4.2)$$

Les deux onduleurs fonctionnent ainsi dans la zone de saturation, où $\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \approx \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) \leq M_x^{new} \leq \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \approx \frac{3}{\pi}\right)$. En conséquence, le nombre de commutations sur une période de commande T_s est limité à 4 pour le double-onduleur commandé par MSVM à comparer aux 12 nécessaires pour une commande de type SVM.

IV/Analyse de la tension de sortie

Un indice de modulation angulaire (AMI) basé sur une modification de l'angle entre les deux vecteurs de référence est proposé afin de minimiser le nombre de commutations tout en ayant une gamme de tension appliquée à la charge la plus large possible.

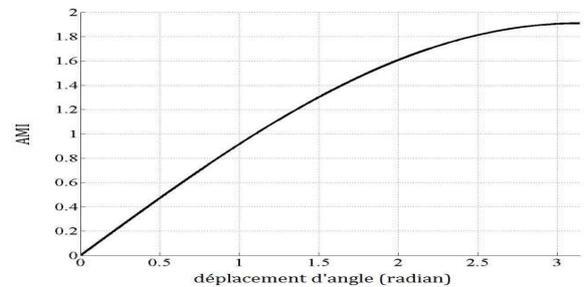
Les expressions de (2.3) et (2.4) spécifient les vecteurs de référence montrés dans la Figure 4 où $\theta_{1,x}$ et $\|\vec{V}_{ref,x}\|$ sont les déphasages et amplitudes des vecteurs de référence ; x ($=1$ et 2).

$$\vec{V}_{ref,x} = \|\vec{V}_{ref,x}\| e^{j(\omega t + \theta_{1,x})}$$

La tension de sortie désirée est la différence des deux tensions de référence, en considérant que les deux amplitudes des deux vecteurs de référence sont identiques, il découle :

$$\vec{V}_{ref} = \vec{V}_{ref,1} - \vec{V}_{ref,2} = 2 \|\vec{V}_{ref,1}\| \sin\left(\frac{\theta_{1,1} - \theta_{1,2}}{2}\right) (e^{j(\omega t + \theta_t)}) \quad (5)$$

Où $\|\vec{V}_{ref,1}\| = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{dc} M_x^{new}$. L'indice de modulation angulaire AMI varie en fonction du déphasage $\Delta\theta$.

Figure 5. AMI en fonction de l'angle de déplacement $\Delta\theta$.

$$AMI = \frac{\|\vec{V}_{ref}\|}{\frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{dc}} = 2 M_x^{new} \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (6)$$

$$\text{et } \theta_t = \frac{\pi}{2} + \frac{\theta_{1,1} + \theta_{1,2}}{2} \text{ avec } \Delta\theta = \theta_{1,1} - \theta_{1,2}$$

La Figure 5 montre l'évolution de l'indice AMI en fonction de $\Delta\theta$. La méthode proposée permet d'atteindre une valeur de AMI maximale de $6/\pi$ soit une tension enveloppe de sortie en fonction de l'angle $\Delta\theta$ ($V_{peak} = 2 \left(\frac{6}{\pi^2}\right) V_{dc} \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)$) qui peut atteindre le niveau maximal de $\left(\frac{12}{\pi^2}\right) V_{dc}$.

V/ Les pertes par commutation

Avec la commande MSVM, le courant dans la phase 'a' est modulé dans le secteur 2 (où $V_2(++-)$ et $V_3(-+-)$ sont mis en œuvre) et le secteur 5 (où $V_5(--+)$ et $V_6(+++)$ sont mis en œuvre). En appliquant la même approche, le courant dans les phases 'b' et 'c' est modulé respectivement dans les secteurs 1, 4 et 3, 6. Pour exprimer les pertes par commutation, on applique une approche mathématique pour le courant sur la phase 'a' d'un onduleur modulé par MSVM, en considérant que la charge est équilibrée d'argument égale à \emptyset :

$$P_{SW} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} E_{SR} \frac{|I_m \cos(\omega t - \emptyset)| \cdot V_{dc}}{I_{ref} \cdot V_{ref}} f_s d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}}^{2\pi/3} E_{SR} \frac{|I_m \cos(\omega t - \emptyset)| \cdot V_{dc}}{I_{ref} \cdot V_{ref}} f_s d(\omega t) \right] \quad (7)$$

Après les simplifications, les pertes par commutation peuvent être exprimées en fonction du facteur de puissance :

$$P_{SW} = \frac{k E_{SR} \cdot I_m \cdot f_s \cdot V_{dc}}{\pi I_{ref} \cdot V_{ref}} \quad k = \begin{cases} 2 - \sqrt{3} |\cos(\emptyset)|, & |\cos(\emptyset)| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \\ |\sin(\emptyset)|, & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

En configuration double VSI, chaque VSI induit des pertes par commutation liées à l'angle entre le courant de sortie et le vecteur de référence, \emptyset_1 et \emptyset_2 (où \emptyset_1 et \emptyset_2 sont : $\emptyset_1 = \frac{\pi}{2} + \emptyset - \frac{\Delta\theta}{2}$ et $\emptyset_2 = \frac{\pi}{2} + \emptyset + \frac{\Delta\theta}{2}$).

Finalement, les pertes par commutation, dans la structure à double-onduleur, sont égales à la somme des pertes produites séparément par chaque onduleur :

$$P_{SW_dual} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{k_1 + k_2}{4} \right) \frac{E_{SR} \cdot I_m \cdot f_s \cdot V_{dc}}{I_{ref} \cdot V_{ref}}$$

$$k_x = \begin{cases} 2 - \sqrt{3} |\cos(\emptyset_x)|, & |\cos(\emptyset_x)| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \\ |\sin(\emptyset_x)|, & \text{sinon} \end{cases}$$

La Figure 6 montre la courbe de l'équivalent K ($= \frac{k_1 + k_2}{4}$) pour le double-onduleur obtenue par la méthode proposée en fonction de $\sin\left(\frac{PAD}{2}\right)$ et du facteur de puissance $\cos(\emptyset)$ avec $PAD = \Delta\theta$. Les pertes par

commutation sont fortement réduites : de l'ordre de 50% à 86,6% par rapport à celles d'un double-onduleur commandé par SVM classique.

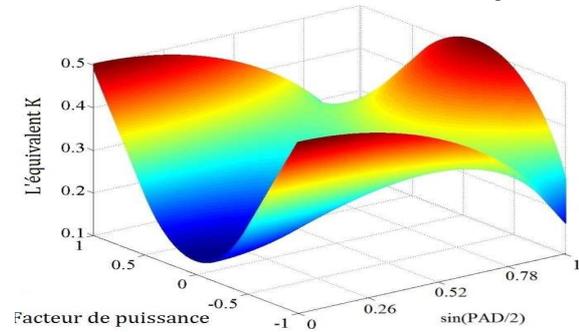


Figure 6. K en fonction de $\sin(\Delta\theta/2)$ et du facteur de puissance.

VI/ THD de la tension et du courant

Les expressions des harmoniques de tension pour le premier VSI commandé par la MSVM, en considérant le premier vecteur de référence, sont données par les formules (9.1), (9.2) et (9.3) tels que :

$$V_{6n+1,x}^* = \frac{a V_{dc}}{-j\pi(6n+1)} \left(a + \sum_{k=1}^{k=N} \begin{pmatrix} e^{-j(6n+1)\theta_{2,x}^B} \\ -e^{-j(6n+1)\theta_{1,x}^B} \end{pmatrix} \right) \quad (9.1)$$

$$V_{6n-1,x}^* = \frac{a^{-1} V_{dc}}{-j\pi(6n-1)} \left(a^{-1} + \sum_{k=1}^{k=N} \begin{pmatrix} e^{-j(6n-1)\theta_{2,x}^B} \\ -e^{-j(6n-1)\theta_{1,x}^B} \end{pmatrix} \right) \quad (9.2)$$

$$V_{6n+3,x}^* = \frac{V_{dc}}{-j\pi(6n+3)} \left(1 + \sum_{k=1}^{k=N} \begin{pmatrix} e^{-j(6n+3)\theta_{2,x}^B} \\ -e^{-j(6n+3)\theta_{1,x}^B} \end{pmatrix} \right) \quad (9.3)$$

Où $\theta_{1,x}^B$ et $\theta_{2,x}^B$ sont définis par :

$$\theta_{2,x}^B = \frac{\pi}{3N} \left(k - \frac{1}{2} + \frac{\alpha_{1,2}^{new}}{2} \right)$$

$$\theta_{1,x}^B = \frac{\pi}{3N} \left(k - \frac{1}{2} - \frac{\alpha_{1,2}^{new}}{2} \right)$$

Avec k entre 1 et N , N désigne le nombre d'échantillons par secteur.

$\alpha_{1,2}^{new}$ est considéré invariant pour chaque onduleur et est donné par :

$$\alpha_{1,2}^{new} = \frac{1}{2} + \frac{3}{\pi} M_x^{new} \sin\left(\left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{3N} - \frac{\pi}{6}\right)$$

La tension de sortie aux bornes de la charge correspond à la différence des tensions en sortie de chaque VSI. Les coefficients complexes de Fourier de cette tension s'expriment alors en fonction de l'angle de phase $\Delta\theta$:

$$V_{2n+1}^* = V_{2n+1,1}^* - V_{2n+1,2}^* e^{-j(2n+1)(\Delta\theta)} \quad (10)$$

Où V_{2n+1}^* représentent les coefficients harmoniques complexes de la tension, $\Delta\theta = \left(k' - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{3N}$ avec k' entre 1 et $3N$. Enfin, les THD de la tension et du courant peuvent être exprimés comme suit :

$$THD_V = \sqrt{2 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{V_{2n+1}^*}{V_1^*} \right|^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} THD_I &= \sqrt{2 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{I_{2n+1}^*}{I_1^*} \right|^2} \\ &= \sqrt{2 \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{V_{2n+1}^* \cos(\phi_{2n+1})}{V_1^* \cos(\phi)} \right|^2} \quad (12) \end{aligned}$$

Où I_{2n+1}^* représentent les coefficients harmoniques complexes du courant de sortie avec ϕ l'argument de la charge et ϕ_{2n+1} les arguments harmoniques de la charge avec $tg(\phi_{2n+1}) = (2n+1) tg(\phi)$.

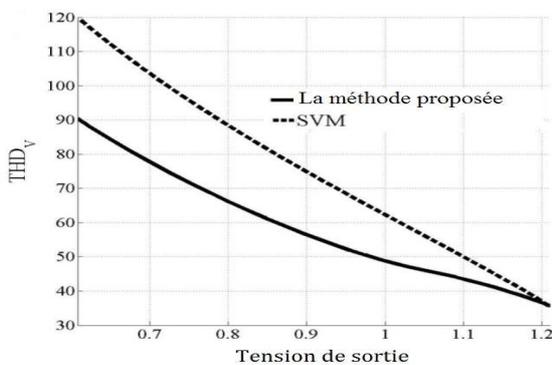


Figure 7. THDV en fonction de V_{peak} (normalisé par V_{dc})

La Figure 7 représente le taux de distorsion harmonique de la tension THD_V pour les commandes de type SVM et MSVM en fonction de la tension de sortie V_{peak} dont les valeurs varient entre $\left(\frac{6}{\pi^2}\right) V_{dc}$ et $2 \left(\frac{6}{\pi^2}\right) V_{dc}$.

On remarque que pour toute la plage de réglage de la tension moteur, le taux de distorsion harmonique est meilleur dans le cas de la commande MSVM notamment grâce à l'annulation de la composante homopolaire.

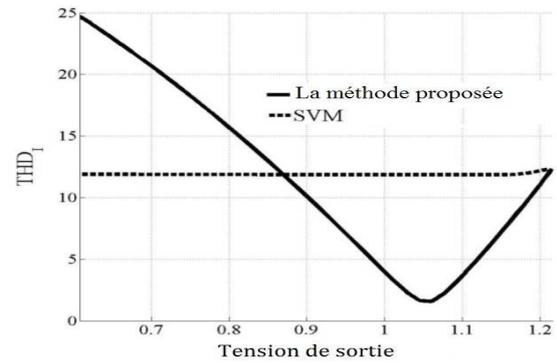


Figure 8. THDI en fonction de V_{peak} (normalisé par V_{dc}) pour $\cos(\phi)=0.866$

La Figure 8 représente le taux de distorsion harmonique du courant THD_I en fonction de la tension de sortie V_{peak} pour une charge motrice telle que $\cos(\phi) = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$.

Le taux de distorsion harmonique du courant est meilleur dans le cas de la MSVM si $\frac{V_{peak}}{V_{dc}} \geq \cos(\phi)$, il est par contre meilleur dans le cas de la SVM si $\frac{V_{peak}}{V_{dc}} \leq \cos(\phi)$.

VII/ Résultats expérimentaux et par simulation

Un prototype constitué d'un onduleur triphasé à deux niveaux fourni par ARCEL Co., de deux sources (pouvant être utilisées de façon isolées ou non isolées), un moteur à stator ouvert de 3 kW (Siemens modèle 1AV2105B), et un système de freinage sont assemblés comme indiqué sur la Figure 9.

Les algorithmes proposés pour la structure à double-onduleur sont mis en œuvre dans un système numérique en programmant un Digital Signal Processor (DSP), modèle RSF562TAADFH, de Renesas. Le code DSP est écrit sous e² studio (fourni par Renesas).

Si on ne dispose pas d'onduleurs triphasés pour réaliser l'expérimentation, on peut utiliser simplement le logiciel Simulink. Les résultats sont très similaires comme le montre les figures 10 à 14.

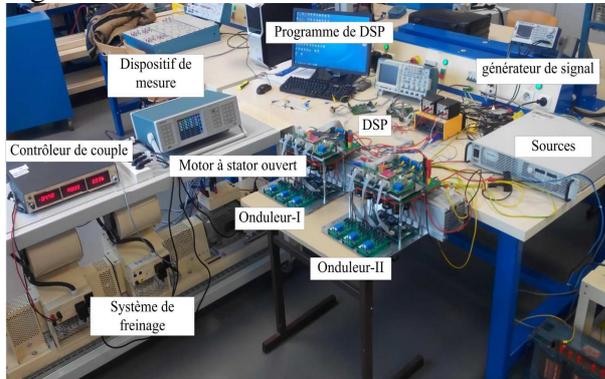


Figure 9. Prototype de 3 kW

Le prototype est composé d'une source d'alimentation réglable, de deux onduleurs, d'un dispositif numérique de commande, d'un banc moteur et de différents capteurs.

Dans cette partie, nous étudions la simulation et les résultats expérimentaux de la première méthode proposée. Pour cette méthode, le double-onduleur est alimenté par des sources non isolées et commandé par la stratégie MSVM de telle sorte que les pertes par commutation soient minimisés. Les signaux de commande pour un onduleur en utilisant les techniques SVM et MSVM sont illustrés sur la Figure 10 où pour la commande MSVM, ce sont les vecteurs V_3 - V_2 - V_3 qui sont activés et où pour la commande SVM, se sont les vecteurs V_8 - V_1 - V_6 - V_7 - V_6 - V_1 - V_8 qui sont activés. Pour la commande MSVM, la fréquence de commutation effective est diminuée de 66%, ce qui réduit les pertes par commutation.

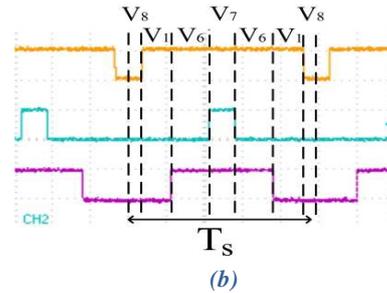
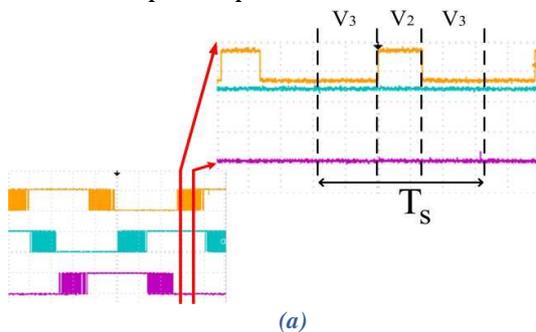


Figure 10. Résultats expérimentaux des signaux de commande : (a) MSVM (b) SVM

Les profils de la tension de sortie et du courant absorbé par le moteur pour une commande SVM sont obtenus par simulation et expérimentalement, ils sont présentés sur les Figures 11 et 12. On observe la présence d'harmoniques de rangs multiples de trois.

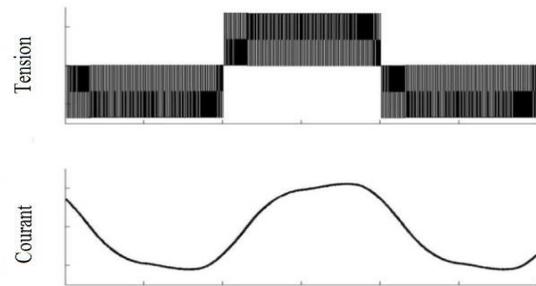


Figure 11. Résultats de la simulation de la tension et du courant pour $\cos(\phi) = 0.866$ et $\|\vec{v}_{ref,1}\| = 0.7V_{dc}$.

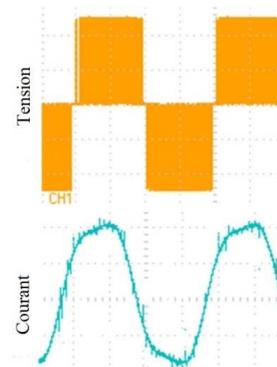


Figure 12. Résultats expérimentaux de la tension et du courant pour $\cos(\phi) = 0.866$ et $\|\vec{v}_{ref,1}\| = 0.7V_{dc}$.

Les profils de la tension et du courant en sortie du double-onduleur commandé par la méthode proposée sont illustrés en simulation et expérimentalement sur les Figures 13 et 14. Le THD du courant peut être considéré comme négligeable, comme le montre les calculs faits sous MATLAB/Simulink qui donnent respectivement 1.37% et 2.08% pour les cas (a) et (b) de la Figure 13.

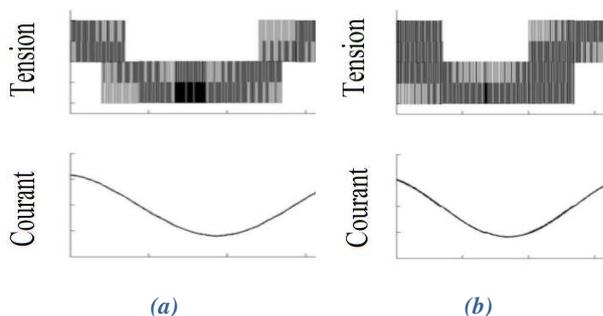


Figure 13. Résultats de la simulation de la tension et du courant pour $\cos(\phi) = 0.866$ et $\|\vec{V}_{ref,1}\| = 0.7V_{dc}$.

(a) $MI = 0.808$ à $\Delta\theta = 85.49^\circ$

(b) $MI = 0.6349$ à $\Delta\theta = 120^\circ$

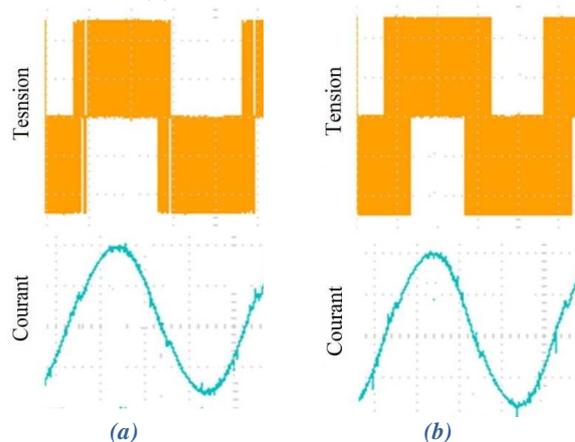


Figure 14. Résultats de la simulation de la tension et du courant pour $\cos(\phi) = 0.866$ et $\|\vec{V}_{ref,1}\| = 0.7V_{dc}$.

(a) $MI = 0.808$ à $\Delta\theta = 85.49^\circ$

(b) $MI = 0.6349$ à $\Delta\theta = 120^\circ$

Le rendement est évalué sur la Figure 15 expérimentalement pour le double-onduleur contrôlé par la méthode MSVM proposée et la méthode SVM en fonction du courant continu de la batterie. Le rendement est amélioré d'environ 3% grâce à la méthode proposée.

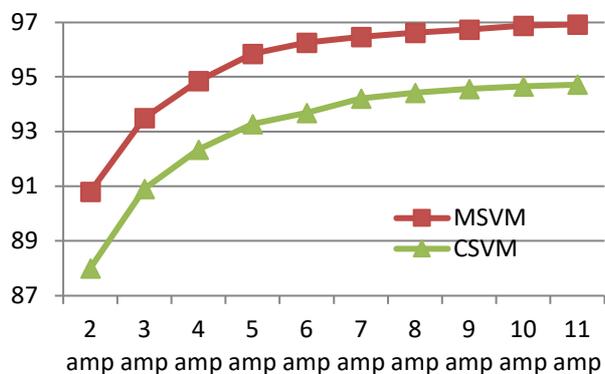


Figure 15. Rendement du convertisseur en % pour les commandes SVM et MSVM en fonction du courant batterie en ampères pour $f_s = 8,1$ kHz.

VIII/ Conclusion et perspectives

L'article propose une structure de double-onduleur pour suppléer l'utilisation classique du hacheur survolteur ou Boost [7], technologie courante dans la conception standard des véhicules électriques et hybrides. Le poids de cette nouvelle structure est allégé de l'inductance du "Boost". De plus, on associe à ce double-onduleur la commande MSVM qui permet d'éviter les phases de roue libre matérialisées par les vecteurs nuls de la commande SVM. Le nombre de commutations par période de commande passe de 12 à 4 et les pertes sont divisées par 2 à 7,5 comme on peut le voir sur la Figure 6. Cela se traduit par un rendement amélioré de 3% entre des commandes SVM et des commandes MSVM si elles sont respectivement appliquées au double-onduleur. Si on rajoute à cela l'évitement des composants passifs (qui sont massifs et coûteux), le rendement est amélioré au minimum de 5% et c'est autant d'autonomie gagnée.

En guise de perspective pour de tels systèmes, nous sommes convaincus que l'effort est à apporter au niveau de la batterie, en l'utilisant comme un réservoir d'appoint et la ravitaillant régulièrement et sans contact. Cela se traduit par une source d'énergie au sol qui transmet l'électricité à la batterie par le phénomène de l'induction. Cette recharge peut se faire soit en statique soit en dynamique à l'instar de ce qui se fait déjà pour les téléphones portables et certains usages domestiques.

La perte d'autonomie serait alors recouvrée et il serait possible de relier deux lieux en gagnant de la charge et en économisant une part notable du poids de la batterie.

C'est le challenge que le site "Charade électrique" compte relever dans les années qui viennent avec l'appui de différents acteurs dont l'Université Clermont Auvergne.

IX/ Références

[1] Q. Lei and F. Z. Peng, "Space vector pulsewidth amplitude modulation for a buck-boost voltage/current source inverter," IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 266–274, Jan. 2014.

- [2] Abbas DEGHANI KIADEHI, "Commande vectorielle innovante pour véhicules électriques ou hybrides", Thèse de doctorat, soutenue le 3 février 2017 à l'Université Clermont Auvergne.
- [3] H. Stemmler, P. Guggenbach, "Configurations of High-Power Voltage Source Inverter Drives", Proc. EPE Conf., pp. 7-14, (1993).
- [4] A. DEGHANIKIADEHI, K. EL KHAMLICHI DRISSI and C. PASQUIER, " Voltage THD Reduction for Dual-Inverter Fed Open-End Load with Isolated DC Sources", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, Issue 3, pp. 2102 - 2111, March 2017.
- [5] J. Kalaiselvi and S. Srinivas, "Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-Inverter-Fed Open-End Winding Induction Motor With Reduced CMV PWM Methods," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 144–152, Jan. 2015.
- [6] P. C.-K. Luk and K. D. E. Khamlichi, "An innovative DSP-based teaching module for electrical machine drives," IEEE Transactions on Education, vol. 39, no. 2, pp. 158–164, May 1996.
- [7] K. EL KHAMLICHI DRISSI, A. DEGHANI KIADEHI and C. PASQUIER, "Current conversion method and device, vehicle comprising such a device", WO 2017081398 A1, May 18, 2017.



En tant que membre de la SEE, vous bénéficiez de nombreux avantages



Élargir son réseau professionnel par la participation à des structures de réflexion adaptées

• **6 Clubs techniques**

- Cybersécurité et réseaux Intelligents
- Ingénierie des systèmes d'information et de communication
- Capteurs et Systèmes Electromagnétiques
- Stockage et nouveaux moyens de production
- Eco-conception en génie électrique
- Systèmes électriques

• **6 groupes régionaux**

- **Le cercle des entreprises**
- **Le cercle histoire**



Participer et bénéficier de tarifs préférentiels pour les Conférences et Journées d'études SEE

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-débats
- Congrès internationaux, en partenariat ou non avec d'autres sociétés scientifiques



Consulter et télécharger gratuitement les publications (REE et 3EI) en version numérique et s'abonner aux publications papier à tarif préférentiel

• **La Revue de l'électricité et de l'électronique (REE)**

est destinée aux ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication. Paraissant cinq fois par an, la revue s'articule autour de dossiers techniques, flash-infos, articles invités, entretiens avec des personnalités du monde de la recherche et de l'industrie.

- **La revue 3EI** est une publication trimestrielle destinée aux professeurs, universitaires et industriels concernés par l'enseignement de l'électricité et de l'électronique industrielle.



S'engager dans une association qui reconnaît les talents et crée une émulation parmi ses membres

- Grades senior et émérite SEE
- Remise de prix et trophées pour les professionnels confirmés, jeunes actifs et étudiants (Brillouin-Glavieux, général Ferrié, André Blanc Lapierre...)
- Remise de médailles (Ampère, Blondel...)

→ *Pour rejoindre la SEE, deux modes d'adhésion :*



Adhésion individuelle :
via le site www.see.asso.fr
ou le bulletin d'adhésion



Adhésion collective :
partenariat d'entreprise ou
d'école via des conventions

NOUS CONTACTER :

SEE - Service adhésions - 17 rue de l'amiral Hamelin - 75116 Paris - France.
01 56 90 37 17 - adhesion@see.asso.fr - www.see.asso.fr

Abonnez-vous à la



BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :
SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris - France
01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT 2021



VERSION PAPIER

5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 132,43 € HT



VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter
de la date du paiement

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC	<input type="checkbox"/> 88,15 € HT



VERSION DUO

Version imprimée
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 155 € TTC	<input type="checkbox"/> 161,81 € HT

VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès eREE
- + Tarif préférentiel à la revue REE format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC
+ Abonnement REE (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 63 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 71,70 € HT

TVA de la revue REE : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail* :

* Obligatoire

MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de €

par Chèque à l'ordre de la SEE

Virement après réception de la facture

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité N° cryptogramme (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 Paris ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr
Offre valable du 01/01/2021 au 31/12/2021.

ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

e-mail* :

* Obligatoire

Date Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



ABONNEMENT + RAPIDE :
<https://www.see.asso.fr/ree>



La REE est une publication trimestrielle de la SEE

