

Revue Scientifique
des
Ingénieurs Industriels

**ECAM
GRAMME
ISICHT
PIERRARD**

**Bruxelles
Liège
Mons et Charleroi
Virton**

Edition n°31 - Mai 2017
www.isilf.be

Revue scientifique n°31 – Mai 2017

Revue Scientifique
des
Ingénieurs Industriels

**ECAM
GRAMME
ISICht
PIERRARD**

**Bruxelles
Liège
Mons et Charleroi
Virton**

Edition n° 31 - Mai 2017
www.isilf.be

Cette revue peut être obtenue auprès des Instituts ci-dessous :

ECAM

Haute École Léonard de Vinci

Promenade de l'Alma, 50

1200 BRUXELLES

Tél : +32 (0)2/541.48.50

www.ecam.be

Fax : +32 (0)2/541.48.59

E-mail : secretariat@ecam.be

GRAMME

Haute École Libre Mosane

Quai du Condroz, 28

4031 ANGLEUR (LIEGE)

Tél : +32 (0)4/340.34.30

www.helmo.be/gramme

Fax : +32 (0)4/343.30.28

E-mail : gramme@helmo.be

ISICHT

Haute École Louvain en Hainaut

Chaussée de Binche, 159

7000 MONS

Tél : +32 (0)65/40.41.46

www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel

Fax : +32 (0)65/34.04.52

E-mail : tech.mons@helha.be

Grande-Rue, 185

6000 CHARLEROI

Tél : +32 (0)71/41.94.40

www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel

Fax : +32 (0)71/48.92.29

E-mail : tech.mons@helha.be

PIERRARD

Haute École de Namur-Liège-Luxembourg

Pierrard, rue d'Arlon, 112

6760 VIRTON

Tél : +32 (0)63/58.89.40

www.henallux.be/ingenieur-pierrard

Fax : +32 (0)63/57.67.62

E-mail : ingenieur.virton@henallux.be

Site de la revue : www.isilf.be

Editeur responsable : V. DE KEYSER
Secrétaire générale de la FédESuC
Avenue Mounier, 100
1200 BRUXELLES
Tél : +32 (0)2/256.70.51
Fax : +32 (0)2/256.70.55

Prix : 10 euros.

Page de couverture : roue à mouvement perpétuel (Léonard de Vinci)

Les quatre écoles d'ingénieurs du réseau libre obtiennent une accréditation européenne

1. Contexte

Dans le cadre de l'audit qualité réalisé par l'AEQES (Agence d'évaluation de la qualité de l'enseignement supérieur), la plupart des Hautes Ecoles organisant les Master en Sciences de l'ingénieur industriel, a profité de l'opportunité d'être audité en même temps par la CTI (Commission des Titres d'Ingénieur).

Après le dépôt d'un dossier d'évaluation interne et une visite des experts au cours de l'année académique 2015-2016, les conclusions de la CTI sont les suivantes :

L'assemblée plénière de la CTI du 13 septembre dernier a décidé de proposer l'admission par l'Etat français de la formation d'ingénieur industriel des Hautes Ecoles du réseau libre (HE HELMo-Gramme, HE Vinci-Ecam, HE Henallux-Pierrard, HE Louvain en Hainaut –Isic) pour une durée de 3 ou 5 ans à compter du 1 septembre 2016. Le label EUR-ACE pourra être accordé, sur demande de l'établissement, à cette formation pour la même durée.



Les explications qui suivent permettent de comprendre la portée de ces conclusions. La CTI (Commission des Titres d'Ingénieur) est un organisme français indépendant, chargé par la loi française depuis 1934 d'évaluer toutes les formations d'ingénieur organisées en France, de développer la qualité des formations, de promouvoir le titre et le métier d'ingénieur en France et à l'étranger. La loi prévoit que la CTI puisse évaluer les formations d'ingénieurs à l'étranger, sur demande des instituts concernés.

La CTI (<https://www.cti-commission.fr/>) a le pouvoir d'accréditer les formations évaluées, i.e. juger de leur conformité à un référentiel établi ; la CTI est donc un organisme d'accréditation pour le titre d'ingénieur diplômé. Ces accréditations sont valables pour une période déterminée (3 ans ou 5 ans).

Le ministère français de l'enseignement supérieur habilite les formations d'ingénieurs accréditées par la CTI sur le sol français. L'habilitation est donc l'acte qui transforme l'accréditation en disposition légale.

Pour les formations organisées à l'étranger et accréditées par la CTI, les établissements concernés, partenaires ou non d'écoles françaises, peuvent demander -par la voie diplomatique - l'admission de leurs diplômés par l'État français.

L'admission des diplômés étrangers par l'État français assure à leurs titulaires les mêmes droits en France que les écoles françaises.

2. Objectifs de la CTI

La mondialisation qui bouleverse l'économie est en train de changer la donne de l'enseignement supérieur, et plus particulièrement la formation des ingénieurs. Les établissements d'enseignement supérieur, dans un espace ouvert, doivent assurer à leurs étudiants les moyens de répondre aux enjeux majeurs de demain.

Développement des compétences dans un environnement professionnel, culture et mobilité internationale, esprit d'innovation acquis notamment par le contact avec la recherche et les projets en entreprise sont plus que jamais la base de la formation d'ingénieurs ; ce ne sont pas des notions nouvelles pour les écoles d'ingénieurs, mais elles doivent travailler pour les traduire concrètement dans les formations et mettre en place une véritable démarche qualité.

La Commission des Titres d'Ingénieur (CTI) est au service des écoles pour les accompagner dans leur démarche de progrès et leur assurer un label de qualité internationalement reconnu ; elle souhaite aussi les appuyer dans leur politique de développement à l'étranger.

3. Exigences de la CTI

En conformité avec les objectifs repris ci-dessus, la CTI

1. s'assure que les formations d'ingénieurs et leur recrutement diversifié répondent à la demande économique et sociale en veillant à leur caractère scientifique et professionnel ainsi qu'aux besoins des étudiants ;
2. veille à l'ouverture des formations à l'innovation, à la recherche, aux entreprises et à l'international ;
3. exige de professionnaliser et de systématiser l'assurance qualité ;
4. préconise que l'analyse en termes acquis d'apprentissage (learning outcomes) soit tout d'abord fondée sur les besoins des futurs métiers auxquels sont préparés les étudiants, et soit complétée par une analyse plus ouverte qui tiendra compte des évolutions de carrière des diplômés, de leur insertion plus générale encore dans la société et enfin de leur épanouissement personnel ;

5. considère comme fondamentale l'expression des objectifs propres à chaque formation, en termes acquis d'apprentissage : chaque école doit avoir clairement identifié les compétences générales et professionnelles, en concertation étroite avec les employeurs qui sont susceptibles d'embaucher ses diplômés ;
6. prône de tenir compte également des missions sociétales, culturelles et éthiques qui incombent à l'ingénieur dans un monde où la technologie et les sciences prennent une place, chaque jour, plus importante. Dans cette approche l'école doit s'attacher à ce que ses étudiants puissent également s'épanouir dans un contexte culturel, sportif et humain adapté à leur développement.

4. Label EUR-ACE



La CTI fait partie de l'association européenne *ENAE* (European Network for Engineering Education) ; elle a été un des membres fondateurs du projet EUR-ACE (European Accreditation for Engineering). Ce projet a établi un système européen pour l'accréditation des formations d'ingénieurs avec les objectifs suivants :

1. fournir un label européen aux étudiants des programmes accrédités ;
2. améliorer la qualité des programmes de formation d'ingénieurs ;
3. faciliter la reconnaissance transnationale par les autorités compétentes ;
4. faciliter les accords de reconnaissance mutuelle.

Les promoteurs du programme EUR-ACE ont décidé de décerner le label EUR-ACE aux formations d'ingénieurs satisfaisant des critères de qualité reconnus en Europe.

La CTI est l'une des sept agences européennes d'accréditation qui ont obtenu le droit de délivrer le label EUR-ACE, suite à une *accréditation par ENAE* sanctionnant sa conformité aux standards européens pour l'accréditation des formations d'ingénieurs de niveau master.

En outre, la CTI a signé des conventions avec la Chine et le Canada afin de faciliter la reconnaissance mutuelle des formations d'ingénieurs accréditées.

5. Conclusions

L'accréditation accordée par la CTI constitue une excellente nouvelle ; elle couronne les efforts consentis par les membres du personnel au service du développement harmonieux de la formation d'ingénieur, intégrant toutes les dimensions d'un enseignement supérieur de niveau 7 du CEC et répondant aux standards de qualité internationaux, en adéquation avec l'évolution de la société et en particulier du monde des entreprises.

Mais ce "succès" ne doit pas être considéré comme une fin en soi ; il doit être perçu comme un encouragement à continuer à aller de l'avant.

C'est un défi majeur auquel nos quatre écoles d'ingénieurs seront dorénavant confrontées ; le relever n'est pas l'apanage de quelques individualités, mais bien le fruit d'une responsabilité collective. C'est en équipes soudées, dynamiques, généreuses, solidaires et créatives que cet objectif sera atteint.

Ir Juan HERRERA,
Directeur de HELMo Gramme
avec l'aimable collaboration des
Directeurs des ISILF et du SEGEC

TABLE DES MATIERES

Editorial : Les quatre Ecoles d'ingénieurs du réseau libre obtiennent une accréditation européenne
par J. HERRERA

Système de guidage d'un drone à l'aide de capteurs lasers embarqués, destiné à la construction automatique d'ouvrages en maçonnerie,
par N. NEHRI, A. PAQUES, C. MARCHAND, S. GOESSENS, C. MUELLER, P. LATTEUR 1

Détermination des caractéristiques d'explosion de mélanges air/combustible – Approximations polynomiales,
par J. MAHIN 19

Analyse et dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux,
par T. DE PRYCK, C. HUVELLE, F. CERFONTAINE, P. BOEREAVE 31

Impact de l'ajout de sucres au brassage : aspects physicochimiques et sensoriels au niveau de la flaveur de la bière,
par L. RAPPE, V. JERKOVIC 57

Conception mécanique et mécatronique d'un système de compensation du poids corporel destiné à des fins de rééducation motrice,
par R. THIENPONT, C. NELSON 73

Conception d'un système d'aspiration Venturi pour les épandeurs de lisier,
par J. GABRIEL, V. HANUS 89

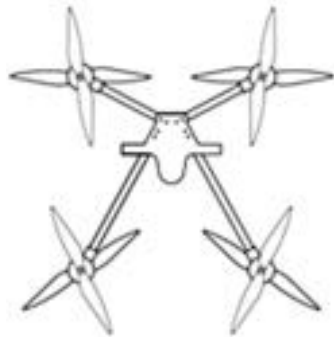
Développement d'un code de calcul destiné à la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes hydrauliques,
par S. COLAUX, V. KELNER 101

Conception et développement d'un banc d'essais pour un instrument de résection et de remplacement de la valve aortique,
par L. DEFAUW, X. BOLLEN, M. BION 121

Étude d'un modèle générique pour un cycle de Rankine à fluide organique,
par C. PONCELET, V. HANUS 135

Extension du développement de la biométhanisation en voie sèche en container maritime avec recirculation des percolats, <i>par S. GRODENT, C. CHARLIER</i>	149
Librairie en C/Python pour communiquer entre une Raspberry Pi et un Arduino dans le projet CASPER, <i>par J. DELVAUX, L. JOJCZYK</i>	169
Fiabilité de transistors industriels HEMTs de puissance basés sur la technologie AlGaIn/GaN, <i>par J. BARTHOLOMEUS</i>	189
Développement d'un simulateur de centrale inertielle dédié aux systèmes de navigation par satellites, <i>par C. DEMELENNE, J. LECOINTRE</i>	203
Récupération de tantale et d'étain d'un minerai namibien par une table densimétrique à air, <i>par J.-A. GEROME, C. CHARLIER</i>	229
<u>LISTE DES TRAVAUX DE FIN D'ETUDES</u>	257
1. Automatique	
2. Chimie	
3. Construction	
4. Electricité	
5. Electronique	
6. Environnement	
7. Géomatique	
8. Gestion	
9. Informatique	
10. Mathématiques appliquées	
11. Mécanique	
12. Mécanique des fluides et thermodynamique	
13. Physique	
<u>Remerciements</u>	279

Système de guidage d'un drone à l'aide de capteurs lasers embarqués, destiné à la construction automatique d'ouvrages en maçonnerie



Ing. N. NEHRI
Ing. A. PAQUES
Ir C. MARCHAND
ECAM – Bruxelles

Prof. PhD C. MUELLER
MIT – Boston/USA

Ir S. GOESSENS
Prof Dr Ir P. LATTEUR
UCL – Louvain-la-Neuve

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'UCL/pôle génie civil et environnemental et le MIT (Boston) visant à prouver la faisabilité de la construction automatisée d'ouvrages maçonnés à l'aide de robots volants, plus communément appelés drones. En particulier, ce travail concerne le développement d'une méthode de guidage et de positionnement d'un drone à l'aide de capteurs lasers embarqués pointant sur des écrans placés autour de la zone dans laquelle le drone doit déposer les blocs de maçonnerie.

Mots-clefs : drone, UAV, construction, maçonnerie, autonome, PixHawk, ROS, lasers, Arduino, Odroid

This work is part of a collaborative project between UCL/Civil and Environmental Engineering department and MIT (Boston) which intends to demonstrate the feasibility of automated construction of buildings using flying robots, commonly called drones. In particular, this work concerns the development of a drone guiding and positioning system using laser sensors, pointing on screens placed around the construction area.

Keywords: drone, UAV, construction, masonry, autonomous, PixHawk, ROS, lasers, Arduino, Odroid

1. Contexte

Dans le cadre d'un projet de recherche initié par Pierre Latteur en 2014 (UCL/Ecole Polytechnique/pôle génie civil et environnemental), un drone a été fabriqué sur mesure et constitue actuellement le plus gros drone multicoptère civil en Belgique (figure 1). Il est théoriquement capable de soulever des charges supérieures à 40 kg. A ce jour et pour différentes raisons liées notamment au train d'atterrissage qui nécessite un renforcement, il a été testé pour des charges allant jusqu'à 20 kg.



Figure 1 : le drone construit sur mesure pour cette recherche est capable de soulever des charges de 20 à 40 kg.

Le gros œuvre des bâtiments peut être constitué d'acier, de béton, de bois, de maçonnerie et de nombreux autres matériaux. Ce projet de recherche s'est focalisé dans un premier temps sur la construction en maçonnerie, en particulier sur des blocs en béton à géométrie adaptée pouvant être assemblés avec une certaine imprécision liée au drone qui, à ce jour, s'avère être de l'ordre de 5 cm en pilotage manuel. Les premiers résultats de cette recherche ont été présentés dans différentes conférences et ne seront pas repris dans la présente publication [1,2,3]. La figure 2 montre quelques exemples des blocs qui ont été développés.

Dans un tel processus constructif visant une mise en place automatique et préprogrammée des blocs de maçonnerie, la précision du système de guidage du drone est essentielle car de celle-ci dépend la façon dont devra être modifiée la géométrie de ces blocs.

Ce mémoire s'inscrit dans la mise au point d'un système de guidage précis, basé sur l'utilisation de trois paires de lasers dirigés respectivement vers 3 écrans (dont l'un peut-être le sol) qui entourent la zone de construction et dont les mesures permettent, par trigonométrie spatiale, de retrouver la position du drone dans l'espace (figure 3).

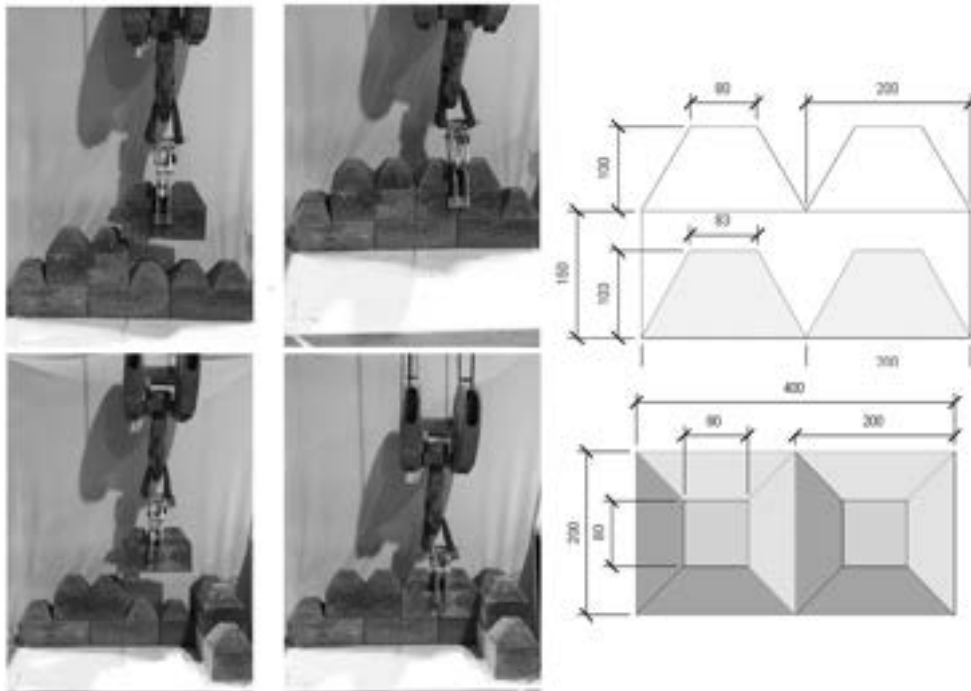


Figure 2 : quelques exemples des blocs de maçonnerie « drone compatible » développés à l'UCL dans le cadre du projet de recherche.

2. Objectif du travail

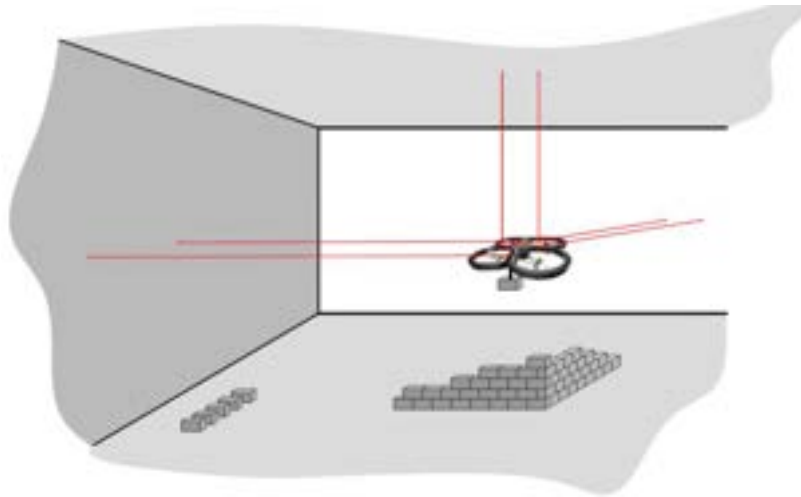


Figure 3 : méthode de localisation développée dans le cadre de ce travail de fin d'études. Les lignes représentent les faisceaux lasers

Les systèmes de localisation d'un drone se composent en général d'un IMU¹ souvent associé à un GPS ou un GPS-RTK². Certains systèmes utilisent aussi d'autres capteurs comme des caméras embarquées ou des capteurs à ultrasons. Cependant, étant basé sur le GPS, ces systèmes ne fournissent une précision acceptable, bien qu'encore insuffisante, qu'à l'extérieur des bâtiments et en zone dégagée. Pour une localisation à l'intérieur d'un bâtiment, il existe des systèmes de type MOCAP, constitués d'un quadrillage de caméras (6 à 12) permettant d'obtenir une précision de l'ordre du centimètre, mais pour des prix importants avoisinant les 120k€.

Dans le cadre de ce mémoire, un système particulier, basé sur l'utilisation de capteurs lasers, a été développé. Trois paires de lasers embarqués visant des murs de référence ont été installés sur le drone. Notons que le désavantage de cette méthode est d'une part de nécessiter des écrans et, d'autre part, d'être tributaire de l'angle yaw, c'est-à-dire de la rotation du drone sur lui-même dans le plan horizontal. En effet, si l'un des lasers ne pointe plus vers son écran de référence, la valeur qu'il

¹ IMU : *Inertial Measurement Unit* permet de déterminer l'état angulaire (les angles de rotations autour des axes X, Y et Z) du drone via un magnétomètre, un accéléromètre, un gyroscope avec ou sans redondances.

² GPS-RTK : *Real Time Kinematics* qui permet théoriquement, sur base des mêmes signaux GPS, d'obtenir une précision de (20+1ppm) mm en ajoutant une base (= une borne) précisément localisée, plus ou moins loin du lieu de travail. Remarque : 1 ppm = 1 mm d'erreur par km d'éloignement de la base.

renverra ne sera plus pertinente. Par contre, le système est conceptuellement simple, peut s'utiliser aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur, est peu coûteux, et fournit une précision meilleure que 5 cm, que des développements futurs pourront probablement porter à 1 cm. L'objectif du mémoire était :

- De maîtriser l'acquisition des données provenant des capteurs lasers ;
- De caractériser la sensibilité de ce système aux variations de température et d'angle entre le rayon et l'écran ;
- D'équiper un drone avec les capteurs lasers;
- De développer le système de contrôle et de stabilisation du drone sur base des mesures effectuées par les capteurs lasers

3. Matériel utilisé

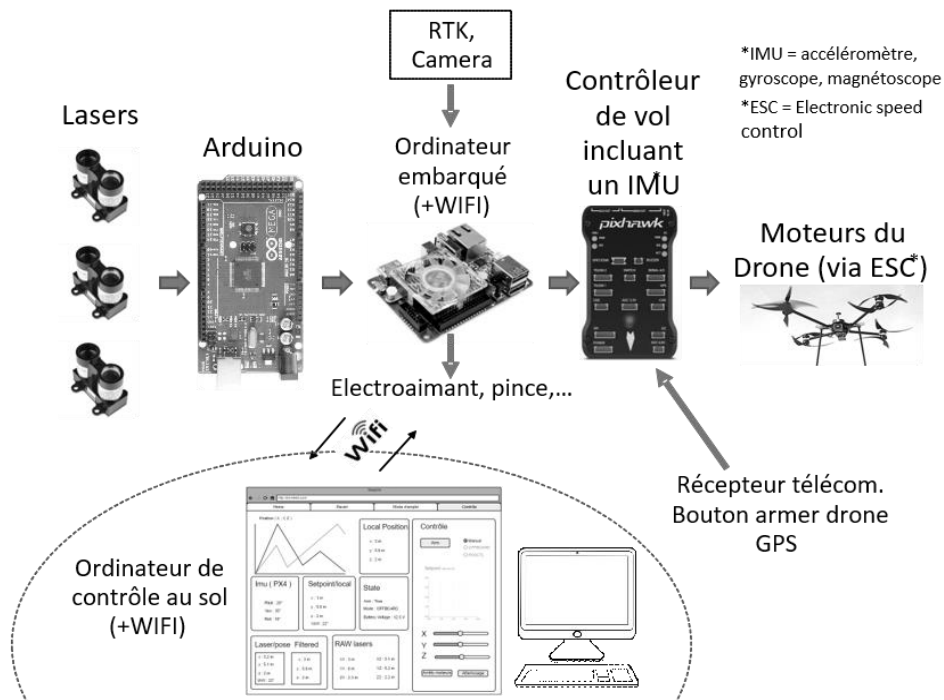


Figure 4 : schéma de principe général des connexions hardware

3.1. Les capteurs lasers

Trois alternatives « grand public » de télémètres lasers existent à des prix acceptables. Teraranger, LeddarTech et LidarLite sont trois concurrents, et le choix s'est porté sur le LidarLite v2 (figure 5, à gauche), car, pour un prix identique et des caractéristiques similaires, il est plus simple d'utilisation grâce à son port de communication (I²C) permettant d'en interfacier plusieurs en série.

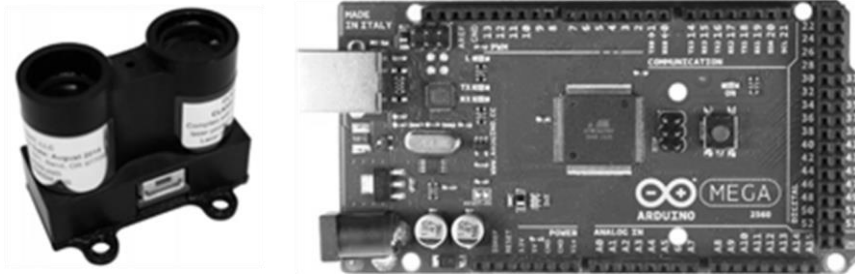


Figure 5 : à gauche, Laser LidarLite v2.
A droite, Microcontrôleur Arduino

Les caractéristiques du LidarLite v2 sont les suivantes :

- Portée : jusqu'à 50 mètres ;
- Jusqu'à 500 mesures par seconde ;
- Prix : 125\$;
- Précision : 2.5 cm ;
- Communication : I²C.

3.2. Le microcontrôleur Arduino

Afin de réaliser l'acquisition des lasers, un microcontrôleur est nécessaire (figure 5, droite). Il a deux avantages face à un ordinateur « standard », qui, par définition est multitâches, et ne donne donc pas la priorité aux mesures. En effet, l'Arduino n'effectue que le contrôle des mesures des lasers qui peuvent donc s'effectuer à des intervalles de temps très précis. Le second avantage est de rendre le système modulaire et de pouvoir ainsi utiliser les lasers directement sans programmation de « bas niveau ».

Le choix s'est porté pour une Arduino Mega 2560 car il possède plus de GPIO³ (4 GPIO par laser soit 24 GPIO au minimum) et de mémoire programme afin de pouvoir utiliser plusieurs bibliothèques sans se soucier de l'augmentation de la taille du programme.

3.3. L'ordinateur de bord

L'ordinateur est le cerveau du drone. Il permet d'organiser et connecter tous les autres modules entre eux, de gérer les communications ainsi que de réaliser des calculs comme par exemple du traitement d'images ou la gestion de l'algorithme trigonométrique de transformation des mesures lasers en position spatiale. De nombreuses solutions commerciales existent, dont les plus connues sont les RaspberryPi et les Odroid (figure 6).

³ GPIO : General Purpose Input/Output donne accès à des entrées sorties numériques ou analogiques permettant de communiquer avec d'autres périphériques ou instruments.



Figure 6 : de gauche à droite RaspberryPi 3, Odroid XU4 et PixHawk [4]

Le choix s'est porté sur l'Odroid-XU4 de chez Hardkernel, entreprise sud-coréenne, dont les designs sont beaucoup plus performants que ceux de Raspberry-Pi. En effet, l'Odroid XU4 incorpore un processeur 4 fois plus rapide que ses concurrents (Equivalent au Galaxy Samsung S5) et comporte une mémoire eMMC allant jusqu'à 120mo/s contre une carte SD pour la RaspberryPi allant jusqu'à 20 mo/s. Le tout pour 70\$, soit seulement le double d'une RaspberryPi.

3.4. Le contrôleur de vol PixHawk

Le contrôleur de vol utilisé est le PixHawk [4] (figure 6, droite). Contrairement aux nombreux autres contrôleurs de vol disponibles sur le marché, il a la particularité d'être Open-Source et Open-Hardware. Il est donc possible d'aller modifier le code soi-même. Ci-dessous, yaw correspond à l'angle de rotation du drone autour de l'axe Z.

Le contrôleur de vol reçoit :

- Par l'ordinateur embarqué, la position (x,y,z,yaw) du drone, calculée à partir des mesures lasers (figure 9) ;
- Une consigne de position spatiale (x,y,z,yaw) depuis l'ordinateur situé au sol (via le WIFI) ;
- Les mesures (gyroscope, compas, accéléromètre, baromètre) de la centrale inertielle (IMU) située dans le PixHawk ;
- En cas d'urgence, une consigne provenant de la télécommande (via un opérateur).

Le contrôleur de vol effectue :

- Le calcul de l'état angulaire du drone (roll, pitch, yaw) à partir des mesures de l'IMU ;

- La régulation de la puissance à appliquer aux moteurs pour, d'une part, assurer un vol stable et, d'autre part, répondre à la consigne donnée par l'ordinateur au sol.

4. Le système de localisation par lasers

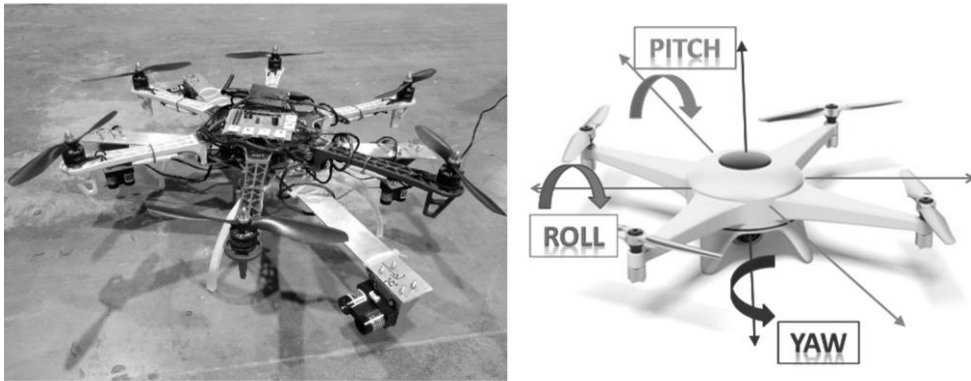


Figure 7 : à gauche, le drone équipé de ses capteurs lasers.
A droite, illustration des angles Pitch, Roll et Yaw.

Le système de localisation comprend :

- L'acquisition des lasers ;
- L'algorithme trigonométrique ;
- Le filtre de sortie.

Le système de localisation qui a été développé est basé sur des capteurs lasers de type LidarLite. Toutefois, grâce au système ROS (voir §5) installé sur l'ordinateur de bord, si un autre système de localisation est développé (RTK, MOCAP, ...), ou si d'autres types de capteurs lasers étaient utilisés, il suffirait de remplacer le programme s'occupant de l'acquisition, sans que le reste du programme ne doive être adapté.

4.1. Acquisition des lasers

L'acquisition se réalise via un microcontrôleur Arduino, sur lequel sont connectées trois paires de lasers pointant chacune vers une surface de référence (l'une d'elles étant le plafond ou le sol). Le driver fourni afin de réaliser les mesures des lasers n'étant pas assez robuste, un nouveau driver a été développé par les auteurs [5] de façon à s'assurer qu'il n'y ait pas de problèmes en vol, ainsi que pour augmenter le nombre de mesures par secondes.

4.2. Algorithme trigonométrique

Les inconnues sont au nombre de 6 : les 3 coordonnées (x,y,z) du drone et ses 3 positions angulaires (roll,pitch,yaw). L'IMU fournit avec grande précision les valeurs du pitch et du roll qui sont une image de son horizontalité. Le yaw, par contre, est donné par l'IMU avec beaucoup moins de précision car le compas est peu précis en intérieur, et de plus sensible à la présence de pièces métalliques avoisinantes et aux champs magnétiques créés notamment par les moteurs ou l'électroaimant qui sert à suspendre les charges. On dispose donc d'une redondance double dans les mesures puisque les lasers fournissent 6 mesures en plus du pitch et du roll fournis par l'IMU. L'algorithme développé intègre la position des 3 paires de lasers sur le drone et est schématisé à la figure 9. Cet algorithme, basé sur une formulation trigonométrique relativement complexe, a été validé par un modèle Geogebra (figure 8).

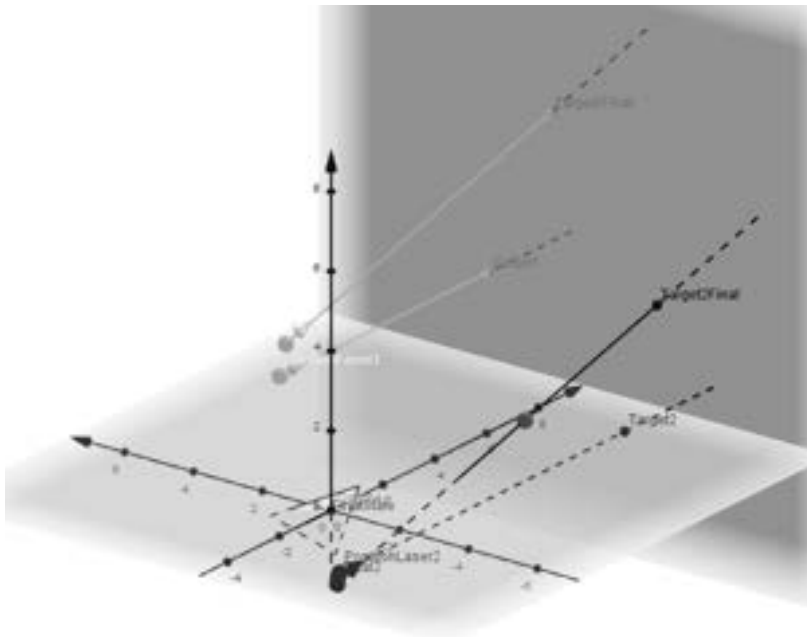
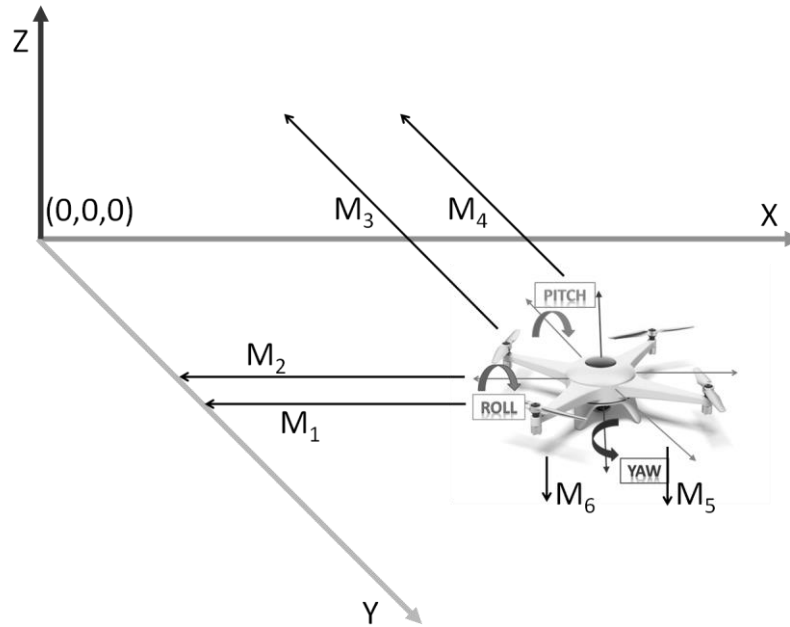


Figure 8 : validation de l'algorithme par Geogebra

L'algorithme permet d'obtenir une précision angulaire pour le yaw qui dépend de la distance relative entre les deux lasers M_1 et M_2 . Dans le cadre de ce travail, les paires de lasers ont été espacées de 40 cm afin d'obtenir une précision angulaire sur le yaw suffisante ($< 5^\circ$), malgré l'imprécision des lasers estimée à 25 mm (voir §7.1).



M_1, M_2 : distances mesurées avec lasers selon l'axe x
 M_3, M_4 : distances mesurées avec lasers selon l'axe y
 M_5, M_6 : distances mesurées avec lasers selon l'axe z (vertical)
 $roll_{IMU}, pitch_{IMU}$: donnés avec précision par IMU (Pixhawk)
 4 inconnues à déterminer : yaw, x,y,z
 2 redondances au total

Equations trigonométriques disponibles :

$$\begin{array}{l}
 M_1 = f(x, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_x) \\
 M_2 = f(x, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_x) \\
 M_3 = f(y, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_y) \\
 M_4 = f(y, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_y)
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \rightarrow \text{Calcul de } yaw_x \text{ (et } x) \\
 \rightarrow \text{Calcul de } yaw_y \text{ (et } y)
 \end{array} \right\} yaw_{moy} = (yaw_x + yaw_y) / 2$$

Equations trigonométriques disponibles :

$$\begin{array}{l}
 M_1 = f(x_1, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy}) \\
 M_2 = f(x_2, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy}) \\
 M_3 = f(y_1, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy}) \\
 M_4 = f(y_2, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy}) \\
 M_5 = f(z_1, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy}) \\
 M_6 = f(z_2, roll_{IMU}, pitch_{IMU}, yaw_{moy})
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \rightarrow x = (x_1 + x_2) / 2 \\
 \rightarrow y = (y_1 + y_2) / 2 \\
 \rightarrow z = (z_1 + z_2) / 2
 \end{array} \right\}$$

Figure 9 : algorithme de calcul de la position (x,y,z,yaw) à partir des 6 mesures lasers et des valeurs de (roll,pitch) fournies par l'IMU.

4.3. Filtre de sortie

Il est nécessaire de disposer d'une dizaine de positions par seconde pour que le drone puisse adapter la puissance des moteurs correctement. Par ailleurs chaque laser fournit 100 mesures par seconde, avec pour certaines une erreur dont l'amplitude peut atteindre 25 mm, même en l'absence de mouvement du drone. Il est donc nécessaire de filtrer ces mesures pour obtenir une valeur plus stable et correcte. Un premier filtre de type IIR (Infinite Impulse Response) est appliqué directement sur les mesures de chaque capteur. Ce filtre consiste à fournir une valeur basée sur les précédentes mesures, ce qui lisse les mesures. Ensuite, une pondération de trois filtres est utilisée ([6], figure 10). Le premier filtre réalise une prédiction de la position par l'intégration de l'accélération et de la vitesse du drone. Le deuxième est une moyenne sur 10 mesures et le troisième est un passthrough⁴. La pondération est calculée en fonction du type de vol et de l'erreur de mesure des lasers (constante). Si le vol correspond à de petits déplacements (phase de stabilisation du drone) le deuxième gain sera augmenté. Pour un vol correspondant à de grands déplacements (dans l'espace de vol), on préférera augmenter le gain du 1^{er} filtre.

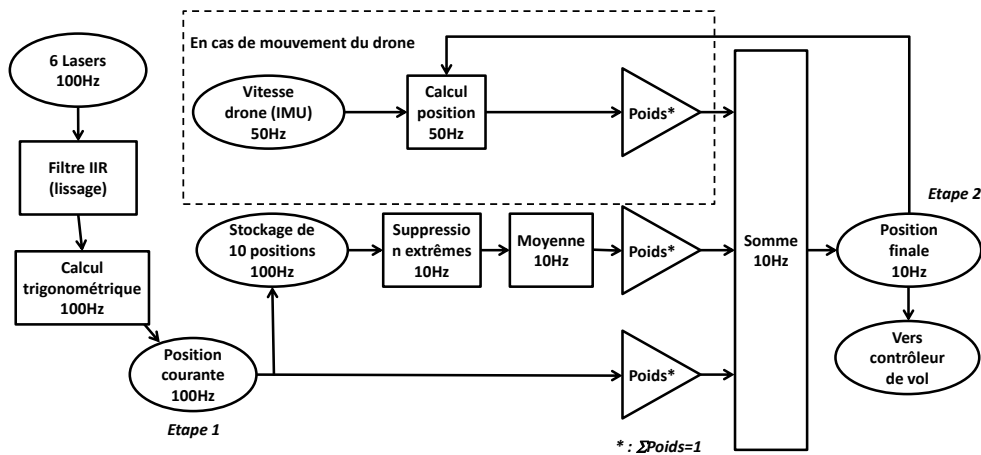


Figure 10 : filtre de sortie

5. Système ROS installé sur l'ordinateur embarqué

Dans ce système, chaque exécutable appelé nœud (node), peut communiquer avec tous les autres nœuds à travers un « topic » qui, en quelque sorte, représente le lieu d'échange entre les informations (figure 11). Un topic porte un nom explicite, par exemple le nœud d'acquisition des lasers publie au topic « /lasers/raw » les me-

⁴ Un passthrough fait passer l'entrée à la sortie sans y appliquer de traitement.

sures brutes des lasers (=nœud « publisher »). Le nœud de l’algorithme trigonométrique, quant à lui, souscrit au topic « /lasers/raw » et reçoit les mesures des lasers dès qu’elles sont disponibles (= nœud « subscriber »).

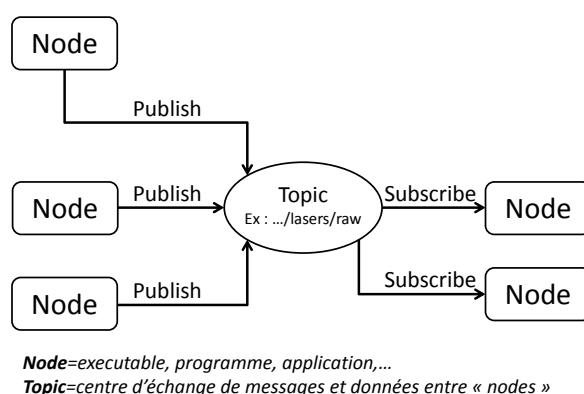


Figure 11 : principe des communications ROS

De plus, le système ROS fournit une multitude d’outils de robotique implémentant de nombreux algorithmes tels que du SLAM, de la Vision odometry, des transformations de systèmes de coordonnées et bien d’autres, qui sont préprogrammés [7]. Dans le cadre de ce travail, un nœud permettant la connexion entre des capteurs lasers et le calcul de la position du drone a été développé et mis à disposition de la communauté ROS.

Toutes ces bibliothèques et drivers accélèrent considérablement le développement software. C’est pourquoi ROS a été choisi dans le cadre de ce mémoire comme plateforme de développement. ROS est installé à la fois sur l’ordinateur embarqué et sur l’ordinateur au sol.

La figure 12 schématise l’architecture software du système ROS embarqué, telle qu’elle a été développée dans le cadre de ce mémoire.

Les définitions suivantes sont utilisées dans cette publication:

- Tâche : une action à réaliser par le drone comme un trajet, une gestion de la pince de manutention, un décollage, un atterrissage, un vol stationnaire, etc ;
- Mission : liste de tâches successives à réaliser.

La partie contrôle du drone est une suite de programmes (nœuds) utilisés afin de gérer la mission du drone. L’architecture choisie se compose de 5 nœuds : acquisition, algorithme trigonométrique, télémétrie, tâche et commande (figure 12).

Nœud d'acquisition : réalise l'acquisition des lasers et publie les valeurs sur le topic /Mesures.

Nœud d'algorithme trigonométrique : calcule la position (x,y,z,yaw) du drone à partir des lasers et des mesures fournies par l'IMU et la publie sur le topic /Position.

Nœud de Télémétrie : publie toutes les informations du drone vers une interface utilisateur web et envoie les instructions de l'utilisateur (=la mission) au nœud de tâches via le topic /Mission.

Nœud de tâches : gère la mission « ajouter ou retirer des tâches », vérifie si la tâche courante est réalisée et si oui, envoie la tâche suivante au nœud de commande.

Nœud de commande : reçoit la position du drone ainsi que la tâche à réaliser et communique ces informations au PixHawk.

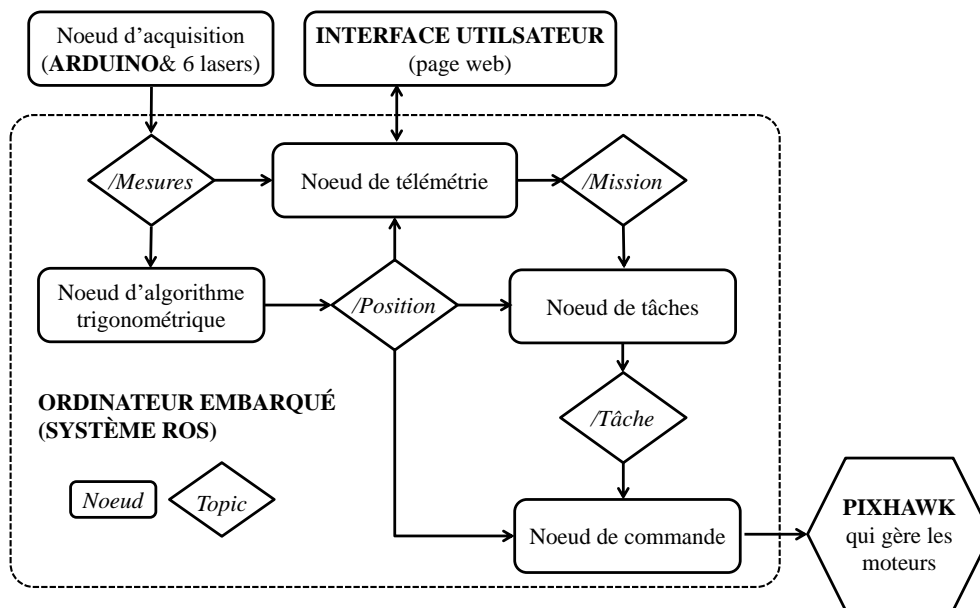


Figure 12 : architecture software globale

6. Interface

L'interface graphique est réalisée en HTML, Javascript et CSS (technologie web). L'avantage de ces langages de programmation est de rendre accessible l'interface à partir de n'importe quelle plateforme (ordinateur, smartphone, tablette) sans la moindre installation, et ceci quel que soit le système d'exploitation. La communica-

tion entre l'interface et le nœud de télémétrie est réalisée via une librairie ROS qui envoie les informations via un websocket⁵ avec des messages JSON⁶.

L'interface se veut simple mais complète. En plus de l'affichage brut des mesures pertinentes (état de la batterie, position du drone, consigne, roll, pitch, yaw, ...), l'utilisateur a accès à plusieurs graphiques comme celui du contrôle en temps réel (figure 13). Celui-ci fournit la position du drone (le rond), la consigne (la croix), représentant l'endroit où le drone doit se placer) et la position de la souris (un carré). Si l'utilisateur clique sur le graphique, le drone reçoit comme consigne de se déplacer à cet endroit. Les autres graphes permettent de contrôler l'altitude ainsi que d'observer la variation de la position (x,y,z) en fonction du temps.

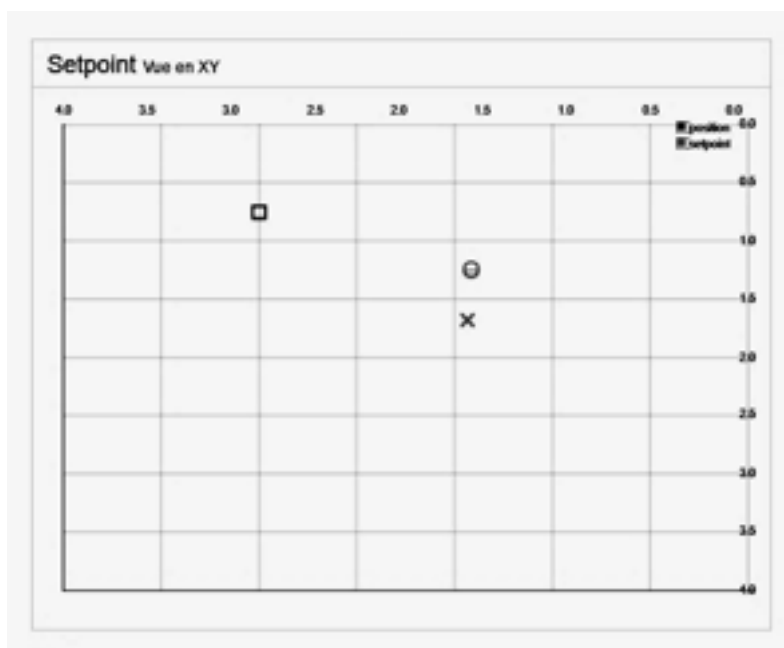


Figure 13 : contrôle de position en temps réel via l'interface graphique

7. Performances du système développé

7.1. Caractéristiques des lasers

Les mesures fournies par les lasers ont été comparées avec celles d'un étalon (un télémètre laser précis au millimètre). Pratiquement, 4 capteurs lasers ont été placés à côté avec l'étalon, en face d'un écran mobile, et une mesure (résultant d'une

⁵ Websocket est un protocole standard du web visant à créer un canal de communication entre deux applications (dans ce cas-ci, une interface et un serveur)

⁶ JSON est un format de données utilisé pour représenter des objets en Javascript

moyenne sur 100 mesures prises pendant 1 seconde) sur chaque capteur a été effectuée pour différentes distances allant de 50 cm à 10 m. L'amplitude de l'écart entre la valeur étalon et la moins bonne des mesures des 4 capteurs ne dépasse jamais 25 mm. Chaque capteur présente un offset constant qui lui est propre et que l'on intègre dans le traitement de la mesure.

Par ailleurs, le filtrage des mesures tel que représenté en figure 10 permet de réduire cette amplitude de 25 mm à 10 mm, comme discuté en 7.2.

7.2. Performances du système de localisation (étape 1, figure 10)

Le drone a été placé immobile sur le sol, avec un angle yaw nul (lasers perpendiculaires aux 2 écrans verticaux) pendant 90 secondes à des distances respectives de chaque écran de 186.2 cm (axe x) et 182.2 cm (axe y). Ces distances ont été mesurées à l'aide de l'étalon. 90 secondes correspondent à 9000 mesures brutes de distance (100 mesures par seconde) donnant donc lieu à 9000 positions calculées (voir figure 10, étape 1). Il s'agit de déterminer la qualité du système de localisation après calcul trigonométrique. Les résultats sont similaires pour chacun des axes, dès lors seuls les détails pour l'axe x et l'angle yaw seront considérés.

Il s'agit ici des résultats obtenus à l'étape 1 (figure 10), avant le filtrage. Les chiffres ci-dessous correspondent au jeu de 9000 valeurs :

- Moyenne de l'erreur de la position en x calculée : $| moy(x) - 186,2 | = 0.6$
cm
- Écart type de la position en x calculée : $\sigma = 0.82$ *cm*
- Moyenne de l'erreur de l'angle yaw calculé : $| moy(yaw) - 0 | = 0.3^\circ$
- Écart type de l'angle yaw calculé: $\sigma = 1,0^\circ$
- Ecart maximum par rapport à la valeur de 186,2 cm : *2.93cm*

7.3. Performance du contrôle de position (étape 2, figure 10)

On considère ici que la consigne est constante, c'est-à-dire un vol stationnaire. Contrairement à l'étape 1 pour laquelle un étalon adapté était disponible, aucun système « étalon 3D » n'était disponible au moment du mémoire afin d'avoir une référence exacte de position du drone. D'où l'importance d'avoir caractérisé la précision du système de localisation afin de connaître l'origine des imprécisions. Notons que le drone était trop fortement chargé par rapport à la capacité de ses moteurs à cause du matériel de développement embarqué, rendant le travail du contrôleur de vol plus difficile, ce qui a été une source d'imprécision dans les résultats annoncés ci-dessous. Il est probable qu'une meilleure précision aurait été obtenue avec un drone de plus grosse capacité portante.

La procédure a été la suivante :

- Placement du drone par terre, et, à l'aide du télémètre laser ayant servi d'étalon aux §7.1 et §7.2 pour mesurer la distance entre le point de

référence du drone et chacun des 2 écrans verticaux. Dans le cas présent, ces deux distances étaient de $x=193.4$ cm et $y=157.7$ cm;

- Décollage du drone avec comme consigne de garder la même position (x,y) ;
- Acquisition des mesures pendant 100 secondes (10 Hz en sortie du filtre, donc 1000 mesures finales). Ces mesures sont illustrées à la figure 14;
- Atterrissage.

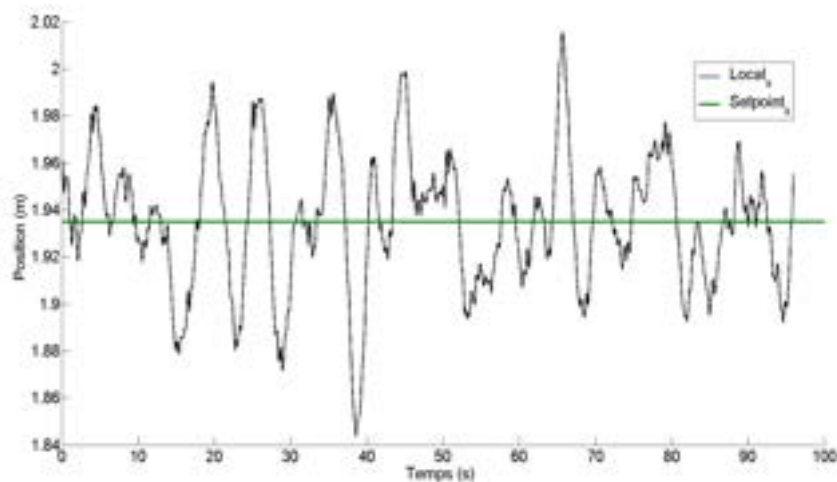


Figure 14 : Évolution de la position en X en fonction du temps pour un vol stationnaire. La ligne horizontale est le setpoint, la consigne.

Les mesures effectuées sur 100 secondes, visibles sur la figure 14, permettent de calculer les données suivantes :

- Moyenne de l'erreur de la position en x calculée : $| moy(x) - 193,4 | = 0.2$ cm
- Écart type de la position en x calculée : $\sigma = 2.8$ cm
- Moyenne de l'erreur de l'angle yaw calculé : $| moy(yaw) - 0 | = 1.5^\circ$
- Écart type de l'angle yaw calculé: $\sigma = 2,1^\circ$
- Ecart maximum en X par rapport à la valeur de 193,4 cm : 8.1cm
- Erreurs en x et en yaw maximales furent respectivement de 5,6 cm et $5,7^\circ$

Les valeurs données ci-dessus montrent que, bien qu'entachée d'une certaine imprécision, la moyenne de l'erreur de la position en x calculée est très bonne (0,2 cm). La régulation est donc assez performante.

Toutefois, comme on peut l'observer à la figure 14, bien que le PixHawk régule bien sa position XYZ en moyenne, sa position instantanée oscille fortement, ce qui est dû au surpoids du drone qui réduit grandement son temps de réaction.

8. Conclusion

Le travail réalisé a nécessité de nombreux développements software et hardware, dans un environnement parfois totalement inconnu comme celui des drones. Le résultat final est appréciable puisque le système développé est fonctionnel et va déboucher sur des développements complémentaires dans l'équipe de l'UCL active sur ce projet de construction avec les drones. La précision et les limitations du système ont été mis en évidence : imprécision dues aux capteurs lasers eux-mêmes, combinée à l'imprécision provenant de la régulation du vol. A ce sujet, une amélioration des résultats, déjà appréciables tels quels, devrait être obtenue en utilisant un drone avec plus de puissance qui permettrait une meilleure régulation avec les charges embarquées importantes.

Comme autres pistes d'amélioration, il semble opportun de combiner aux lasers plusieurs technologies comme le GPS (RTK), une caméra [8], ou d'autres systèmes plus particuliers comme une station totale de géomètre, probablement plus précise.

9. Références

- [1] PIERRE LATTEUR, SEBASTIEN GOESSENS, MILAN RENIERS, ZHAO MA, CAITLIN MUELLER, « *Masonry Construction with drones* », International Association for Shell and Spatial Structures, Tokyo, 26-30 septembre 2016.
- [2] GOESSENS S., MUELLER C., LATTEUR P., « Vers une robonumérisation de la construction », RUGC, Liège, 25-26-27 mai 2016.
- [3] PIERRE LATTEUR, SÉBASTIEN GOESSENS, JEAN-SÉBASTIEN BRETON, JUSTIN LEPLAT, ZHAO MA, CAITLIN MUELLER, “*Drone-Based Additive Manufacturing of Architectural Structures*”, International Association for Shell and Spatial Structures, Amsterdam, 17-20 août 2015
- [4] LORENZ MEIER, PETRI TANSKANEN, FRIEDRICH FRAUNDORFER AND MARC POLLEFEYS, « *PIXHAWK: A System for Autonomous Flight using Onboard Computer Vision* »
Adresse URL : http://cvg.ethz.ch/publications/pdf/pub_73260.pdf.
- [5] ALEXIS PAQUES, (consulté en décembre 2015) : *LidarEnhanced*
Adresse URL : <https://github.com/AlexisTM/LIDAREnhanced>.
- [6] S LYNEN AND M ACHELNIK AND S WEISS AND M CHLI AND R SIEGWART, « *A Robust and Modular Multi-Sensor Fusion Approach Applied to MAV Navigation* », Proc. of the IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013
- [7] ROS APIs, (consulté en janvier 2016) : *List of ROS APIs*
Adresse URL : <http://wiki.ros.org/APIs>.
- [8] FORSTER, CHRISTIAN AND PIZZOLI, MATIA AND SCARAMUZZA, DAVIDE, (2014), *SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry*
Adresse URL: https://github.com/uzh-rpg/rpg_svo.

Détermination des caractéristiques d'explosion de mélanges air/combustible – Approximations polynomiales

Ing. J. MAHIN
PIERRARD – Virton

Ce travail présente à la fois des prédictions théoriques et des déterminations expérimentales de la pression maximale atteinte lors de l'explosion de mélanges air/combustible ($\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ et $\text{H}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$). Les corrélations des données expérimentales obtenues via des expériences ou de modèles thermodynamiques sont présentées. Le but de cet article est de montrer comment les données expérimentales peuvent être mises en corrélation d'un point de vue uniforme à travers des formules sans dimension, et comment une fonction polynomiale peut être dérivée directement du comportement de ces données.

Mots-clefs : explosion, GASEQ 0.79, approximations polynomiales, méthane, hydrogène.

The present work addresses theoretical prediction and experimental determination of explosion characteristics of fuel/air mixtures ($\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ et $\text{H}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$). The correlations of experimental data obtained from either from experiment or thermodynamic model are presented. The goal of this article is to show: how the experimental data can be correlated from a uniform point a view through non-dimensionalization, and how the proposed polynomial function can be derived directly from the behavior of dimensionless plots of the experimental data.

Keywords: explosion, GASEQ 0.79, polynomial approximation, methane, hydrogen.

1. Introduction

Les explosions qui ont lieu dans le secteur industriel provoquent en nombre moins d'accidents graves que le feu (incendies) mais plus que les émissions toxiques. Cependant, lorsqu'elles arrivent, elles causent un plus grand nombre de pertes humaines et de dégâts que le feu. Une explosion est généralement considérée comme ayant un risque de catastrophe plus grand que le feu mais moindre que les émissions toxiques [1].

Par définition, une explosion est une réaction chimique exothermique qui, quand elle s'applique à un volume constant, provoque une soudaine et très forte augmentation de pression au sein de celui-ci [2]. Une explosion confinée se produit dans un espace confiné, tel qu'une cuve ou un bâtiment. Les deux scénarios les plus communs d'explosion confinée impliquent des vapeurs et des poussières explosives.

Des recherches empiriques ont montré que la nature de l'explosion est une fonction de plusieurs caractéristiques qui peuvent être déterminées expérimentalement. Ces caractéristiques dépendent du matériau explosif utilisé et incluent les limites d'inflammabilité et d'explosion, l'élévation de pression après l'ignition du mélange inflammable et la pression maximale atteinte après l'ignition. Ces caractéristiques sont déterminées en utilisant des appareils de laboratoires [3]. Cette étude utilise un appareil présentant une sphère de 1m³ construit par OZM Research s.r.o. à l'Energy Research Center, VSB- Technical University of Ostrava.

2. Méthode numérique

2.1. Modèle thermodynamique

Le logiciel GASEQ [4], méthode informatique utilisée dans ce travail pour le calcul de la pression maximale adiabatique, P_{ad} , a déjà été adopté dans la littérature [5]. Les calculs de l'équilibre de combustion sont obtenus par les propriétés des réactifs chimiques et de l'équilibre adiabatique des produits utilisant les valeurs thermodynamiques de différents fichiers de données.

Les modèles du programme GASEQ supposent les conditions adiabatiques dans un volume constant et la formation de concentrations équilibrées après l'explosion. De plus, la croissance due à l'évolution de température causée par la réaction exothermique considère le comportement de gaz idéaux.

Cette approche représente une déflagration idéale dans un système fermé et donne la plus haute d'explosion possible atteignable.

Cette méthode d'estimation numérique permet de déterminer l'estimation la plus prudente de P_{ad} (pression à partir de laquelle l'explosion a lieu dans des conditions adiabatiques), et peut être utilisée comme une prédiction fiable de la valeur expérimentale. Donc, dans un premier temps, les calculs prenant compte des conditions d'équilibre peuvent être une estimation grossière du pire scénario possible.

De même, ces valeurs peuvent être utilisées comme valeurs estimées initiales pour les expériences d'explosion qui ont lieu dans la sphère de 1m^3 construite par OZM Research s.r.o. à l'Energy Research Center, VSB-Technical University of Ostrava.

2.2. Formule polynomiale sans dimension

De simples formules expérimentales sans dimension (1) basées sur une fonction polynomiale sont proposées pour la corrélation de la pression maximale adiabatique de $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ et $\text{H}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$.

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \quad (1)$$

où a,b,c,d,e et f représentent les constantes à 5 chiffres significatifs, y la pression et x la fraction de mole du combustible (CH_4 ou H_2).

Les formules sont basées sur des données basées sur des hypothèses et portées aux conditions atmosphériques. Cette approche requiert à l'avance seulement cinq coefficients ainsi que la fraction de mole des différents composants.

Ces cinq coefficients sont affectés intrinsèquement par l'incertitude des expériences et la méthode de régression. Selon les résultats, la pression a été approximée par une équation polynomiale du 5^e degré, la puissance de l'ordinateur du laboratoire ne permettant pas un degré de précision supplémentaire.

L'approximation polynomiale a été réalisée avec Excel en utilisant un graphique en nuage de points. Les données expérimentales ont été utilisées afin de vérifier les formules et de valider les résultats obtenus. Les données corrélées par l'équation (1) pour les mélanges $\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{O}_2$ et $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ ont été utilisées ensemble avec des calculs itératifs.

3. Méthode expérimentale

Les mesures de la pression maximale atteinte pendant l'explosion, P_{max} , ont été réalisées dans une chambre d'explosion sphérique OZM Research s.r.o. décrite dans la figure 1.

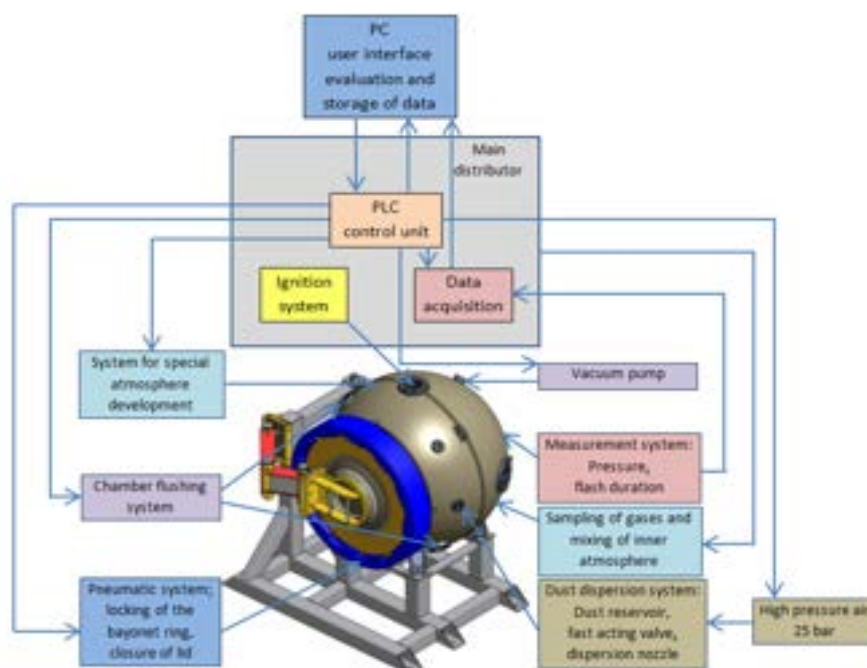


Figure 1 : schéma général du système expérimental utilisé

La chambre d'explosion permet de déterminer les valeurs des différents paramètres en accord avec la norme qui détermine les limites d'explosivités des gaz et des vapeurs [6]. Les gaz purs (H_2 : 99.995%, CH_4 : 99.995%, O_2 : 99.95%, N_2 : 99.9995%) ont été utilisés pour préparer les mélanges. Ceux-ci ont été dosés dans la chambre via le récipient doseur équipé de trois entrées pour la connexion avec le cylindre (azote, oxygène et l'orifice d'évacuation).

La source d'ignition est située au centre géométrique de la sphère. Dans l'expérience, l'ignition a été réalisée avec des électrodes en acier inoxydable. Après l'aspiration initiale, la chambre de combustion a été remplie en injectant un mélange air/combustible. L'expérience a été réalisée dans les conditions atmosphériques.

La chambre d'explosion est équipée avec un système de mesure du temps dépendant de la pression dynamique et de la mesure de la durée du flash. Elle utilise deux capteurs de pression (Kistler type 701A, précision: 0.00125 MPa, échantillon: 400 000 Hz). La variation de pression peut aller jusqu'à 25 MPa. La méthode de test est conçue pour produire une mesure de la pression d'explosion et de la pression maximale atteinte d'un mélange air/combustible inflammable dans un volume fermé aux températures et pression ambiantes.

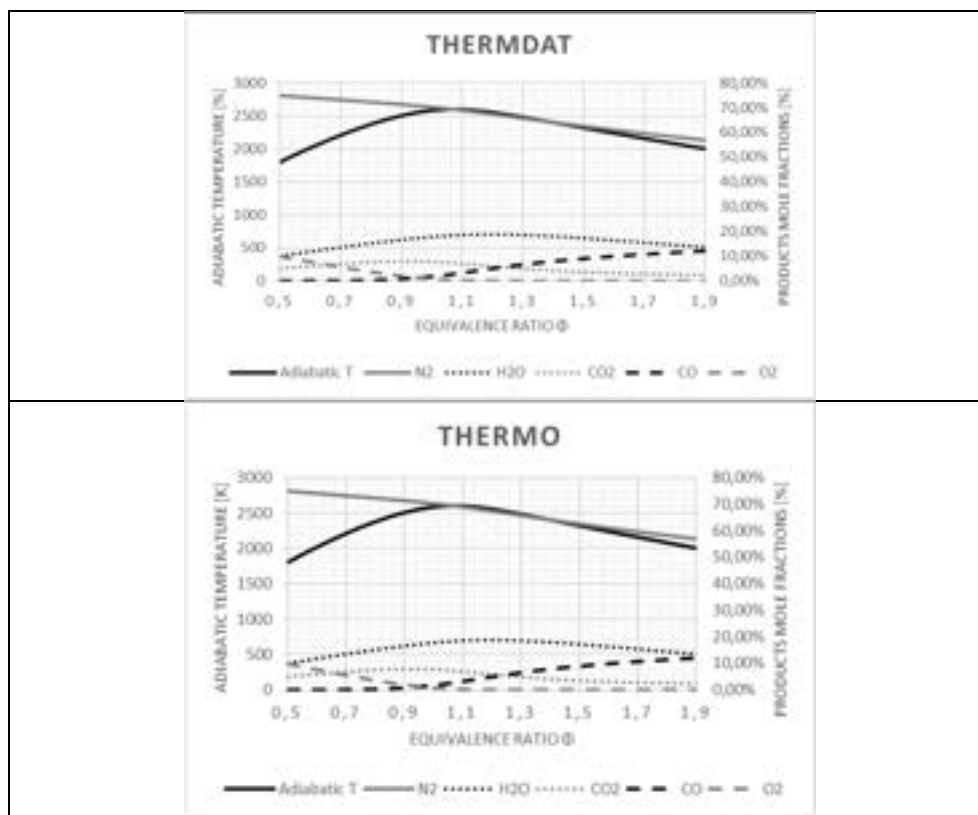


Figure 2 : Température adiabatique et fraction molaire pour différentes bases de données

4. Analyse des input files

Le but de cette analyse est d'identifier les différences entre les quatre bases de données thermodynamiques qui vont être utilisées dans le logiciel GASEQ (thermdat.tdd, Burcat.tdd, Leeds.tdd, Thermo.tdd). Ces bases de données ont été écrites dans le format CHEMKIN (14 coefficients sauf pour la base de données Burcat qui

en comporte 15). La comparaison est basée principalement sur les valeurs de la chaleur spécifique (C_p), l'enthalpie (H_0) et l'entropie (S_0) d'un composé chimique à une température donnée (298,15 K) et à la valeur de la température de la flamme adiabatique, T . Les résultats de la comparaison entre les bases de données Thermdat et Thermo pour cinq produits (N_2 , H_2O , CO_2 , CO , O_2) à $P=1$ atm et $T = 298,15$ K sont représentés aux figures 2.

Dans la figure2, l'équilibre des compositions calculées et la température de la flamme du produit de combustion ont été tracées en fonction du rapport d'équivalence. On peut directement voir que les différents résultats sont similaires quelle que soit la base de données utilisée.

Pour tous les graphiques, la flamme adiabatique atteint son maximum approximativement aux conditions stœchiométriques (lorsque le rapport d'équivalence $\Phi=1$). Ce maximum se trouve légèrement décalé dans la partie trop riche (où le rapport d'équivalence $\Phi>1$). Parce que le système est un peu sous-oxygéné, la chaleur spécifique du produit est réduite et donc la température de la flamme est augmentée. La dissociation des produits de combustion contribuent également à cet effet de décalage [6].

5. Résultats et discussions

5.1. Méthode expérimentale

Les résultats complets obtenus expérimentalement par l'explosion du mélange dans la chambre d'explosion sont représentés dans les tableaux 1 et 2. Dans le cadre de cette étude, seule la valeur de P_{max} (bar) sera utilisée par la suite à titre de comparaison.

Test (-)	Fuel (vol.%)	Air (vol.%)	P_{st} (bar)	P_{max} (bar)	P_{st}/P_{max} (bar)	T_{max} (ms)	$(dP/dT)_{max}$ (bar/s)	u_1 (m/s)
1	4.0	96.0	5.05	1.81±0.036	3.23	7.87	0.49±0.497	0.09
2	5.0	95.0	5.83	3.39±0.067	2.44	8.27	2.46±0.246	0.09
3	5.2	94.8	5.97	4.48±0.089	1.48	5.62	2.43±0.243	0.05
4	6.5	93.5	6.86	5.54±0.110	1.31	3.38	5.51±0.551	0.07
5	8.4	91.6	7.95	7.89±0.159	0.05	2.24	63.32±6.332	0.42
6	10.5	89.5	8.74	8.42±0.168	0.32	2.17	76.96±7.696	0.45
7	11.0	89.0	8.84	6.59±0.131	2.24	2.62	9.31±0.931	0.09
8	12.8	87.4	8.61	6.04±0.120	2.82	3.50	4.61±0.461	0.05
9	14.8	85.2	8.59	5.62±0.112	2.96	5.19	3.44±0.344	0.04
10	15.6	84.4	8.47	5.22±0.104	3.25	6.75	3.07±0.307	0.05

Tableau 1 : paramètres d'explosion mesurés pour mélanges $CH_4/O_2/N_2$

Test (-)	Fuel (vol.%)	Air (vol.%)	P_{ad} (bar)	P_{max} (bar)	P_{ad}/P_{max} (bar)	$T_{P_{max}}$ (ms)	$(dP/dT)_{max}$ (bar/s)	$\%_i$ (m/s)
1	5.0	95.0	2.76	1.67±0.033	1.08	9.72	0.42±0.042	0.10
2	10.2	88.8	5.30	4.40±0.088	0.89	1.72	45.11±4.511	1.03
3	16.0	84.0	6.75	5.90±0.118	0.84	1.09	226.95±22.695	2.92
4	20.0	80.0	7.60	6.91±0.138	1.69	1.03	524.11±52.411	5.00
5	26.0	74.0	8.60	7.77±0.155	0.82	0.99	842.30±84.230	6.45
6	29.0	71.0	8.92	8.01±0.160	0.90	0.98	927.77±92.777	6.72
7	30.0	70.0	8.91	7.95±0.159	0.95	0.98	922.72±92.272	6.78
8	35.0	65.0	7.95	7.82±0.156	0.12	0.98	918.10±91.810	6.95
9	37.2	62.8	7.86	7.56±0.151	0.29	1.28	675.28±67.528	5.44
10	45.0	55.0	7.38	6.92±0.138	0.45	1.50	659.29±65.921	6.27

Tableau 2 : paramètres d'explosion mesurés pour mélanges $H_2/O_2/N_2$

5.2. Méthode numérique

Les figures 3 et 4 montrent la pression adiabatique simulée via GASEQ ainsi que la pression maximale atteinte. Les tableaux inclus montrent l'approximation polynomiale de la pression d'explosion dans les conditions adiabatiques, P_{pol} , pour favoriser la comparaison avec les résultats de P_{max} et P_{ad} . La pression adiabatique calculée via GASEQ est représentée pour comparaison plutôt que pour validation.

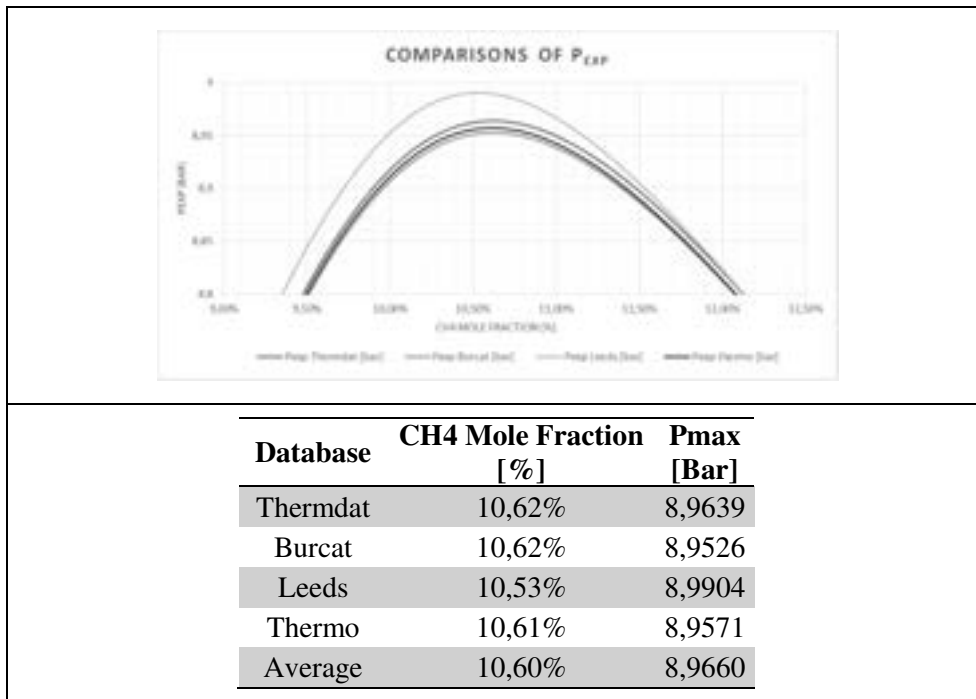


Figure 3 : pressions adiabatiques maximales calculées pour $CH_4/N_2/O_2$

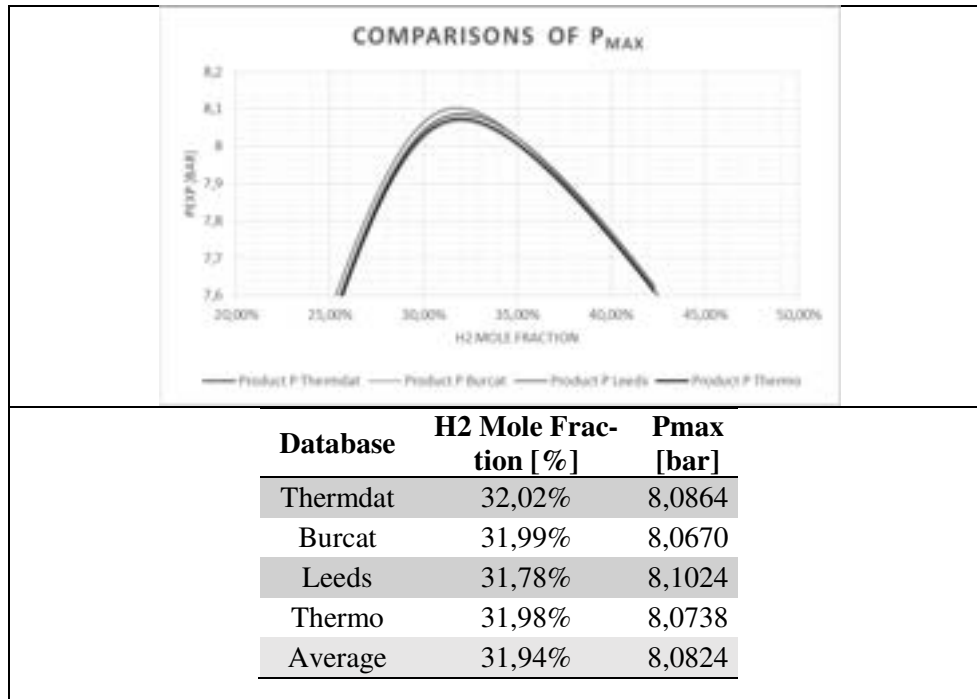


Figure 4 : pressions adiabatiques maximales calculées pour H₂/N₂/O₂

On remarque que les valeurs de pression adiabatique calculées sont supérieures à celles déterminées expérimentalement. Ceci est dû aux conditions de la chambre d'explosion qui ne sont pas parfaitement adiabatiques. Cependant, les différentes valeurs confirment une certaine tendance thermodynamique. Les valeurs de la pression adiabatique sont cohérentes avec une marge d'erreur maximale de 10^{-2} bar(a).

Par la suite, la valeur de la pression maximale calculée dans les conditions adiabatiques (P_{ad}) correspondra à la moyenne entre les différentes bases de données.

Formule polynomiale sans dimension

Les tableaux 3 et 4 présentent les équations polynomiales créées via Excel et sa fonction « courbe de tendance ».

Database	a	b	c	d	e	f	R ²
Thermdat	-1,3793E+06	8,1163E+05	-1,8062E+05	1,8276E+04	-7,7938E+02	1,7320E+01	9,9928E-01
Burcat	-4,6451E+05	2,9394E+05	-6,7688E+04	6,4641E+03	-1,8992E+02	6,1300E+00	9,9793E-01
Leeds	-4,6061E+05	2,8928E+05	-6,5856E+04	6,1511E+03	-1,6669E+02	5,5724E+00	9,9765E-01
Thermo	-4,6890E+05	2,9664E+05	-6,8293E+04	6,5238E+03	-1,9232E+02	6,1570E+00	9,9789E-01

Tableau 3 : Formule polynomiale pour CH₄/N₂/O₂

Database	a	b	c	d	e	f	R ²
Thermdat	-4,0237E+03	8,0051E+03	-5,8453E+03	1,9211E+03	-2,7135E+02	1,9289E+01	9,9947E-01
Burcat	-5,6616E+03	1,0061E+04	-6,8017E+03	2,1189E+03	-2,8792E+02	1,9625E+01	9,9929E-01
Leeds	-5,6585E+03	1,0056E+04	-6,7992E+03	2,1186E+03	-2,8799E+02	1,9642E+01	9,9928E-01
Thermo	-6,6530E+03	1,1934E+04	-8,1372E+03	2,5714E+03	-3,1607E+02	2,4158E+01	9,9210E-02

Tableau 4 : Formule polynomiale pour H₂/N₂/O₂

6. Résumé

Le tableau suivant donne les résultats de P_{\max} , P_{ad} et P_{pol} pour les mélanges CH₄/O₂/N₂ et H₂/O₂/N₂ pour les compositions utilisées dans la méthode expérimentale.

Test	Fuel	Air	P_{ad}	P_{pol}	P_{\max}	$P_{\text{ad}} - P_{\max}$	$P_{\text{ad}} - P_{\text{pol}}$
(-)	(vol.%)	(vol.%)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)
CH ₄	10.5	89.5	8.97	8.92	8.42	0.55	0.05
H ₂	32.0	71.0	8.08	8.08	8.01	0.90	0.00

Tableau 5 : tableau récapitulatif des différents P_{\max}

On peut voir que les valeurs prévues pour la simulation de P_{\max} (P_{pol}) sont presque identiques aux valeurs théoriques de P_{\max} (P_{ad}). Elles sont également plus importantes que les valeurs expérimentales, à la fois pour le mélange CH₄/N₂/O₂ et H₂/O₂/N₂.

Cette approche représente bien les déflagrations idéales dans un système fermé et donne la plus grande pression atteignable possible (pire scénario). Cette méthode permet donc de déterminer la valeur plus prudente de P_{ad} et peut être utilisée comme une estimation de la pression d'explosion dans des applications de sécurité.

7. Conclusion

Le comportement explosif des mélanges stœchiométriques CH₄/O₂/N₂ et H₂/O₂/N₂ aux conditions atmosphériques a été étudiée, à la fois expérimentalement et théoriquement à différentes concentrations de combustibles.

Les explosions ont été réalisées dans une chambre d'explosion sphérique fermée de 1m³ aux conditions atmosphériques. La pression maximale a été trouvée, en prenant compte la valeur de la moyenne des valeurs données par les deux capteurs de pression.

Tous les tests montrent la même tendance dans une chambre de combustion fermée. Les températures adiabatiques trouvées, les concentrations des produits après la combustion et la pression maximale pour les mélanges air/combustible aux conditions atmosphériques sont présentées.

La pression maximale atteinte trouvée est, comme attendu, plus petite que les valeurs théoriques suite aux conditions de test qui ne sont pas totalement adiabatiques. Cependant, les valeurs trouvées confirment la même évolution thermodynamique. L'approximation polynomiale proposée fournit une valeur avec une précision tout à fait acceptable.

8. Sources

- [1] MANNAN, S., *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Controls*, 4^e éd, volumes 1-3. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] ECKHOFF, R. K., *Explosion Hazards in the Process Industries*, 1^{re} éd. Houston, Gulf Publishing Company, 2005, 436 p.
- [3] CROWL, D. A., LOUVAR, J. F., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, 3^e éd. Boston, Pearson Education, Inc., 2011, 723 p.
- [4] MORLEY, C., (consulté le 29 juin 2016), *Gaseq Chemical Equilibrium Program*. Adresse URL: <http://www.c.morley.dsl.pipex.com/>
- [5] SCHROEDER, V. *et al.*, « Chemically Unstable Gases Flammability of Ethylene Oxide Mixtures in Sterilization Processes », in : *AIChE Spring Meeting & Global Congress on Process Safety*, New Orleans, USA, avril 2008, pp. 489-496.
- [6] *Détermination des limites d'explosivité des gaz et vapeurs*, NF EN 1839, Groupe AFNOR, La Plaine Saint-Denis, octobre 2012.
- [7] KUO, K.K., *Principles of combustion*, 2^e éd. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005. 760 p.

9. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « Innovation for Efficiency and Environment – Growth », code d'identification LO1403 avec le support financier du Ministre de l'Education, de la Jeunesse et des sports Tchèque dans le cadre du National-Sustainability Programme I.

Ce travail n'aurait pas été possible sans la contribution du Dr. Ing. Jan Skrinsky, chef du département fuel and technologies du laboratoire de recherche de l'université technique d'Ostrava.

Analyse et dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux

Ing. T. DE PRYCK
Ir C. HUVELLE
Ir F. CERFONTAINE
Ir P. BOEREAVE
GRAMME - Liège

Ce travail est un résumé de la littérature existante traitant du calcul des assemblages de pieds de poteaux. Celui-ci propose une synthèse d'un point de vue méthodologique et envisage des pistes de réflexion et des exemples complets représentatifs de cas rencontrés dans le domaine de la construction. Une fois l'analyse et la caractérisation des composantes d'un pied de poteau réalisées, un point essentiel devait être abordé : le modèle mécanique. En effet, le modèle proposé par l'Eurocode 3 ne semblait pas convenir pour des assemblages plus complexes, celui-ci s'avérant trop restrictif. Ainsi, l'objectif de ce travail est d'établir, sur base d'une recherche bibliographique, un modèle mécanique plus complet ainsi qu'une méthode systématique de calcul des diagrammes d'interaction sous des efforts combinés de flexion et de traction/compression.

Mots clés : Assemblage – Pied de poteau – Eurocode 3 – Interaction $M + N$ – Composantes – Analyse – Dimensionnement

This Master thesis aims at studying the literature on column bases with the objective of gathering as much data and converging towards a global computing solution. It provides a methodological review and encourages reflexions and gives comprehensive illustrations of case studies. After the analysis and characterization of components of column bases, we question the mechanical model proposed by Eurocode 3, which appears to be too restrictive, in particular when dealing with more complex joints. The aim of this work is to establish, based on a bibliographic search, a more complete mechanical model and a systematic method for calculating the interaction diagrams under combined bending and normal force.

Key words: Joint – Column base – Eurocode 3 – Interaction $M + N$ – Components – Analysis – Sizing

Symboles

α_{bf}	Coefficient qui prend en compte l'accroissement de la résistance à la compression du béton due à la diffusion de l'effort localisé à l'intérieur de la fondation.
β_w	Coefficient de corrélation obtenu à partir du tableau 4.1 de l'EN 1993-1-8 (Eurocodes 3).
b_{eff}	Largeur efficace d'un tronçon en T équivalent comprimé.
b_{fc}	Largeur de la section du poteau (largeur de la semelle du poteau en I).
b_p	Largeur de la platine d'extrémité.
c	Largeur d'appui additionnelle selon l'EN 1993-1-8.
d_f	Profondeur de la fondation.
d	Diamètre de la tige d'ancrage.
e_b	Distance minimale du bord de la platine d'extrémité rectangulaire au bord de la fondation rectangulaire dans le sens de la largeur.
e^{el}	Excentricité effective M/N .
e_h	Distance minimale du bord de la platine d'extrémité rectangulaire au bord de la fondation rectangulaire dans le sens de la longueur.
e_m	Épaisseur du scellement en mortier.
e_w	Diamètre de la rondelle ou le sur-angle de la tête du boulon ou de l'écrou selon le cas envisagé.
f_{bd}	Résistance à l'adhérence de l'acier avec le béton.
f_{cd}	Résistance de calcul du béton de la fondation à la compression.
f_{jd}	La résistance en pression localisée du béton.
f_u	Résistance ultime en traction minimale des pièces attachées.
f_{ub}	Résistance ultime en traction de l'acier des tiges.
f_y	De manière générale, limite d'élasticité de l'acier d'un élément.
h_c	Hauteur de la section de la colonne.
h_p	Longueur de la platine d'assise.
$k_{eff,r}$	Coefficient de rigidité équivalent de la rangée étudiée.
l_{eff}	Longueur efficace d'un tronçon en T équivalent tendu ou comprimé.

$l_{eff,cp}$	Longueur efficace du tronçon en T équivalent pour un mode de rupture circulaire.
$l_{eff,nc}$	Longueur efficace du tronçon en T équivalent pour un mode de rupture non circulaire.
$m - m_x$	Distance transversale entre un trou de tige d'ancrage dans la platine d'extrémité et la position de la rotule plastique à côté de l'élément tendu (âme ou semelle du poteau) d'un tronçon en T équivalent tendu (selon Yvor R.).
n	Distance transversale entre un trou de tige d'ancrage dans la platine d'extrémité et la position de l'effort de levier sur un tronçon en T équivalent tendu (selon Yvor R.).
n_b	Nombre de tiges d'ancrage dans tout l'assemblage.
t_{fc}	Épaisseur de la semelle de la colonne.
t_{fn}	Épaisseur de la semelle de la bêche.
t_p	Épaisseur de la platine d'extrémité.
t_{wa}	Épaisseur de la rondelle/plaquette.
t_{wc}	Épaisseur de l'âme du poteau.
A_{eff}	Aire efficace pour le calcul de la résistance en compression d'un tronçon.
A_v	Aire cisailée de l'âme de la bêche.
$E - E_c$	Module de Young de l'acier/béton.
$F_{t,Rd,ancr}$	Résistance en traction d'une tige d'ancrage.
$F_{vb,Rd}$	Résistance de calcul au cisaillement d'une tige d'ancrage.
$F_{v,Rd}$	Résistance au cisaillement.
L_b	Longueur d'allongement du boulon d'ancrage.
L_b^*	Longueur limite d'allongement du boulon d'ancrage.
$N_{c,Ed}$	Effort de compression appliqué au pied de poteau.
$N_{c,bc,Rd}$	Résistance en compression du tronçon en T.
$N_{t,Ed}$	Effort de traction appliqué au pied de poteau.
$N_{t,pl,Rd}$	Résistance à la traction pure d'une section.
$N_{c,pl,Rd}$	Résistance à la compression pure d'une section.
$S_{j,ini} - K_M^{el}$	Rigidité initiale d'un pied de poteau.

1. Introduction

Ce travail est l'aboutissement d'une recherche de documentation sur les assemblages de pieds de poteaux. Nous nous sommes efforcés de recueillir un maximum de données dans le but de les comparer entre elles et d'en tirer des conclusions. L'objectif final était d'obtenir une méthodologie claire et la plus complète possible afin de dimensionner des assemblages de pieds de poteaux. Les notions sont illustrées par des exemples dans l'optique de comprendre l'ensemble des concepts cachés derrière ces critères de dimensionnement. La plupart du temps, les différents documents analysés convergeaient vers les mêmes conclusions. Toutefois, il a fallu nuancer et analyser la validité de certaines hypothèses. Notre ligne de conduite consistait à suivre la norme Eurocode EN 1993-1-8 bien que celle-ci reste floue et incomplète sur certains points de calculs de ce type d'assemblage. Ce domaine restant, à l'heure actuelle, toujours à l'étude, nous n'avons pas été en mesure d'analyser un ensemble de cas complexes détaillés dans le travail intégral.

La première partie de ce travail propose une introduction sur les pieds de poteaux et plus particulièrement sur la mise en œuvre de ceux-ci. En effet, l'objectif était de présenter aux lecteurs les différentes solutions qui existent pour transmettre les efforts de la structure vers la fondation. Dans ce travail, nous proposons un échantillon des solutions exploitées en pratique. Cette introduction permet également d'illustrer une première fois la géométrie et les termes propres aux assemblages de pieds de poteaux et de ne pas se limiter à des aspects purement théoriques. Enfin, nous rappelons toutes les notions essentielles pour comprendre au mieux ce travail.

La seconde étape de ce travail consistait à récolter un maximum de données dans le but d'établir une caractérisation complète de chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité. Nous nous sommes efforcés de comparer la littérature et de veiller à respecter les normes. Cependant, en cas d'absence d'information de la part des Eurocodes, nous proposons des solutions aux lecteurs.

Enfin, une fois la cartographie des composantes réalisée, l'élaboration du modèle mécanique restait primordiale pour déterminer les courbes Moment-Rotation associées à l'assemblage. Les résistances obtenues permettent également de construire des diagrammes d'interaction utiles conduisant à une analyse plus approfondie de l'assemblage. Sur ce plan, nous proposons deux méthodes de dimensionnement plus générales.

Ce résumé ne présente qu'une mince partie du travail et peut paraître incomplet tant les notions à développer sont nombreuses. Nous recommandons fortement de se référer au document original pour plus de précisions.

2. Bases théoriques

Dans cette section, quelques éléments théoriques essentiels sont rappelés afin de bien saisir l'ensemble des concepts repris dans ce travail. Celui-ci, constituant avant tout une recherche bibliographique, reprend de nombreux éléments théoriques tous ensemble dans l'optique d'obtenir une vision plus globale sur le sujet traité.

2.1. Préliminaires

Pour tout assemblage, une loi Moment-Rotation peut être associée. En effet, cette loi décrit la relation entre le moment fléchissant $M_{j,sd}$ appliqué et la rotation relative ϕ_{Ed} entre les éléments assemblés. La valeur ϕ_{Ed} correspond à la rotation relative de l'extrémité entre les deux éléments assemblés comme illustré ci-dessous.

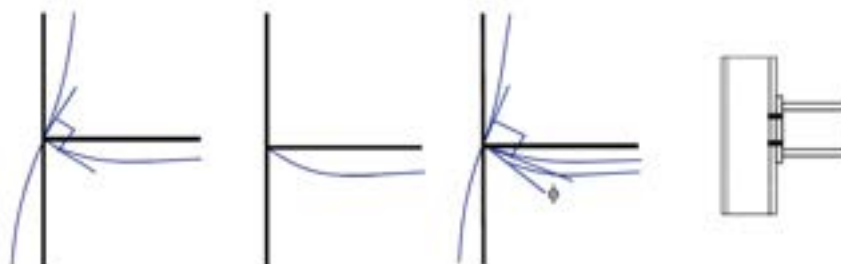


Figure 2-1 : Représentation de la rotation relative

Les courbes $M - \phi$ correspondent généralement à des modèles non linéaires, comme illustré à la Figure 2-2 avec différents types d'assemblages poutre poteau (Figure 2-2 - a). Cependant, ces lois peuvent être approchées par des modèles linéaires basés sur des analyses globales simplifiées (Figure 2-2 - b).

Chaque assemblage présentera une courbe Moment-Rotation qui lui est propre. Cette courbe permettra de classer un assemblage dans une des catégories explicitées ci-dessous en fonction de l'analyse de la structure réalisée :

- Analyse globale élastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur rigidité en rotation ;
- Analyse globale rigide-plastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur résistance et de leur capacité de rotation ductile ;
- Analyse globale élasto-plastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur rigidité mais également de leur résistance.

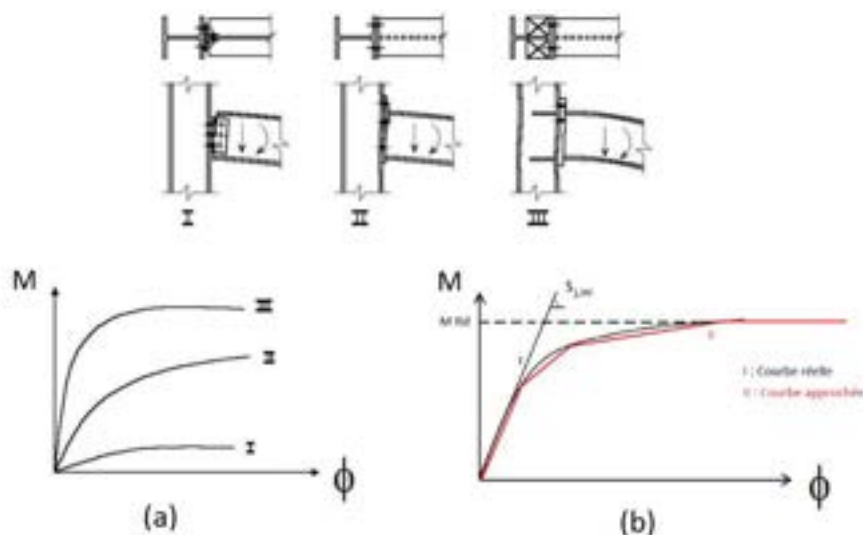


Figure 2-2 : Loi Moment-Rotation

Suite aux différentes analyses possibles, il semble évident que deux types de classification peuvent intervenir pour les assemblages : d'une part en fonction de leur rigidité flexionnelle et d'autre part selon leur capacité à reprendre les efforts qui leur sont appliqués.

2.2. Résistance d'un assemblage

La vérification d'un élément est méthodique. Il convient de comparer la valeur de résistance de l'élément à l'effort qui lui est imposé. Nous obtenons ainsi une valeur de résistance R_d comparée à une valeur « d'effet » E_d . Ainsi, l'analyse permet d'établir les efforts qui transitent dans l'assemblage (M_{Ed} , N_{Ed} et V_{Ed}) tandis que la méthode des composantes permet d'établir les valeurs de résistance (M_{Rd} , N_{Rd} et V_{Rd}). Si la résistance de l'élément analysé est supérieure au chargement appliqué, l'élément résiste. A l'inverse, l'assemblage ne résistera pas, devra être renforcé puis calculé de nouveau.

2.3. Capacité de rotation d'un assemblage

La capacité de rotation constitue en une mesure de la déformation maximale que peut subir l'assemblage avant que la ruine n'engendre une chute de la résistance flexionnelle. L'Eurocode 3 définit la capacité de rotation comme la rotation maximale que peut subir l'assemblage sans que son moment devienne inférieur au moment résistant de calcul. Généralement, les assemblages à comportement ductile

sont capables de développer des déformations importantes et contribuent à la sécurité de la structure lorsque celle-ci tend à être surchargée.

2.4. Moment résistant

Ce passage est inspiré intégralement de la thèse de Frédéric Cerfontaine qui décrit de manière exhaustive cette notion. Le moment résistant de calcul est basé sur l'application du théorème statique.

Trois types de distribution des efforts intérieurs peuvent être identifiés dans les rangées de boulon :

- Une distribution « plastique » ;
- Une distribution « élastique » ;
- Une distribution « élastique-plastique ».

La distribution appropriée dépendra de la capacité de déformation des composantes de l'assemblage. La Figure 2-3 illustre ces distributions.

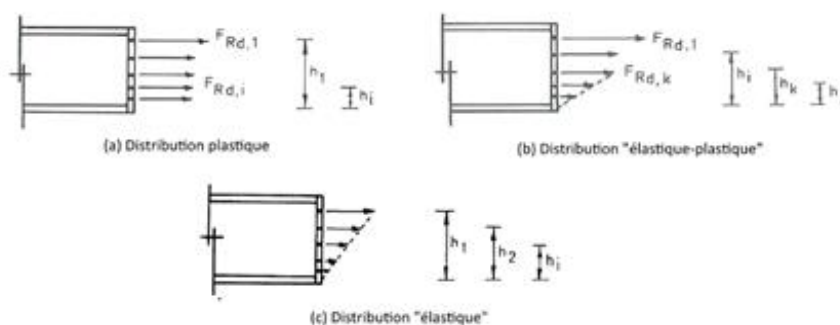


Figure 2-3 : Distribution intérieure des efforts

La Figure 2-3 (a) montre une distribution plastique des efforts intérieurs qui prend place progressivement de la rangée de boulons supérieure jusqu'aux rangées inférieures grâce aux capacités de déformation suffisantes des composantes considérées. Le moment résistant est alors considéré comme la somme des produits des efforts dans les rangées de boulons par leur bras de levier.

Dans d'autres configurations (Figure 2-3 (b)), la redistribution plastique des efforts est interrompue à cause du manque de capacité de déformation de la dernière rangée de boulons qui a atteint sa résistance de calcul et est conditionnée par la rupture des boulons ou de la platine. Dans les rangées de boulons situées sous cette rangée, les efforts sont distribués linéairement (à condition que leur résistance propre ne soit pas dépassée) suivant leur distance au centre de compression.

Enfin, la distribution élastique représentée à la Figure 2-3 (c) constitue un cas particulier de la distribution élasto-plastique où la première rangée atteint sa résistance et présente un comportement non ductile.

2.5. Rigidité d'un assemblage

Lors de l'analyse de la structure, il convient d'accorder une attention toute particulière à la rigidité de l'assemblage. En effet, la rigidité d'un assemblage conditionne les flèches et les déplacements relatifs de la structure dans lequel il se trouve ainsi que la reprise des efforts dans leur globalité.

L'Eurocode 3 définit la rigidité en rotation S_j comme « le moment nécessaire pour produire une rotation unitaire dans un assemblage ». « La raideur attire l'effort ». Ainsi, un assemblage à faible rigidité flexionnelle n'est pas en mesure de reprendre un moment de flexion important et sera considéré comme un assemblage dit « rotulé ».

2.6. La méthode des composantes

La méthode des composantes est une méthode de calcul applicable aux assemblages. Les grands principes de cette méthode sont détaillés dans l'Eurocode 3 et s'appliquent à tous les assemblages possibles. Le concept est basé sur une décomposition de l'élément étudié, l'assemblage, en un ensemble de « composantes » dans le même ordre d'idée qu'une analyse par éléments finis. Une fois chaque composante étudiée, il suffit de les regrouper pour déterminer le comportement de l'assemblage.

Trois types d'efforts dans les composantes sont identifiables : une partie en traction, une autre en compression et la dernière soumise au cisaillement. Chaque composante correspond à un mode de ruine possible de l'assemblage.

Methodologie

L'Eurocode 3 définit une composante d'un assemblage comme étant « une partie d'un assemblage qui apporte une contribution identifiée à une ou plusieurs de ses propriétés structurales ».

L'application de la méthode des composantes revient à suivre trois étapes bien distinctes :

- Identifier les composantes activées dans l'assemblage ;
- Caractériser en termes de résistance et/ou de rigidité les composantes activées ;
- Assembler les composantes avec comme objectif final de déterminer la rigidité et la résistance de l'assemblage global.

La première étape d'identification est la plus importante. En effet, il s'agit d'identifier les zones de compression, de traction et de cisaillement dans

l'assemblage mais également d'envisager les modes de ruine qui peuvent se produire.

La seconde étape revient à connaître la manière dont se comporte chaque composante ainsi que la procédure pour caractériser la composante. Ce travail a pour objectif d'énumérer les composantes susceptibles d'apparaître dans un assemblage de pied de poteau et de déterminer la résistance et la rigidité de chacune d'entre elles. La dernière étape consiste à assembler les composantes pour obtenir la résistance et la rigidité de l'assemblage final. En pratique, cette étape revient à assembler les résistances de toutes les composantes activées pour obtenir le M_{Rd} et à assembler les rigidités associées en vue d'obtenir le $S_{j,ini}$.

Ainsi, nous obtenons un ressort équivalent qui caractérise l'assemblage analysé. L'illustration de cette dernière étape est nécessaire pour bien expliciter l'assemblage de ces composantes.

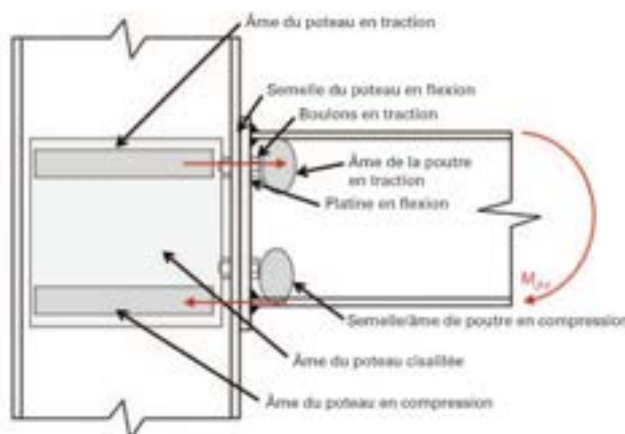


Figure 2-4 : Assemblage des composantes

La figure 2-4 montre la décomposition d'un assemblage par la méthode des composantes. Ainsi, sous un moment de flexion, il convient d'identifier les composantes « activées » et qui sont susceptibles de provoquer la ruine de l'assemblage. Une fois les composantes identifiées, la seconde étape consiste à caractériser chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité.

Cette étape revient à assimiler chaque composante à un ressort du modèle mécanique global de l'assemblage. Ce ressort est caractérisé par la rigidité et la résistance de la composante. Les Figure 2-5 et Figure 2-6 représentent donc chaque composante activée, sous la forme d'un ressort.

Ainsi, la Figure 2-5 illustre les composantes activées dans le cas d'un assemblage avec platine d'extrémité boulonnée. En (a), la rangée de ressorts supérieurs mis en série représente chaque composante activée par un ressort équivalent caractérisé par une rigidité et une résistance. Dans notre cas, il s'agit des déformations de la platine d'extrémité en flexion, des boulons en traction, de la semelle du poteau en flexion et de l'âme du poteau en traction.

Dès l'instant où chaque ressort est déterminé, nous pouvons simplifier le modèle et combiner ces composantes pour former un ressort effectif pour la rangée de boulons analysée $k_{eff,r}$ représentée en (b).

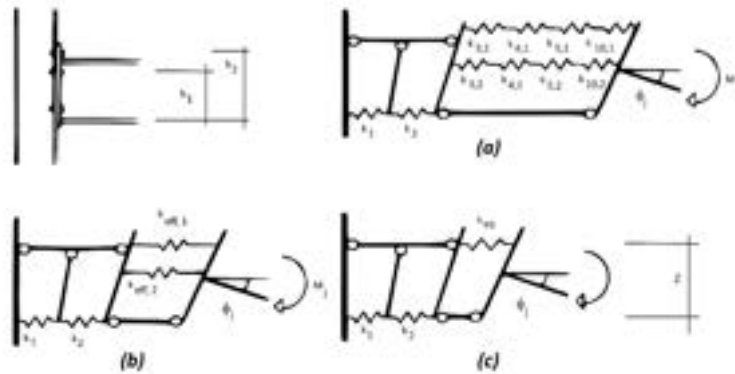


Figure 2-5 : Modélisation des composantes

L'expression du coefficient de rigidité équivalent de la rangée $k_{eff,r}$ se calcule au moyen de l'équation suivante (r étant le numéro de la rangée de boulons étudiée) :

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Pour faire une analogie électrique, nous pouvons dire que le ressort équivalent $k_{eff,r}$ de n composantes en série est équivalent à la mise en série de n condensateurs.

Nous devons également définir la notion de bras de levier équivalent z_{eq} qui est définie par l'équation suivante et illustrée à la Figure 2-5 (c). Ce bras de levier représente la distance entre le centre de compression et le centre de traction.

$$z = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r}$$

Après avoir défini les ressorts $k_{eff,r}$, la Figure 2-5 (c) illustre comment ces ressorts effectifs sont remplacés par un ressort équivalent unique k_{eq} . Pour reprendre une analogie électrique, des ressorts en parallèle k_{eff} sont assemblés comme des

résistances en série au prorata de leur bras de levier respectif. L'équation suivante définit ce bras de levier :

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z}$$

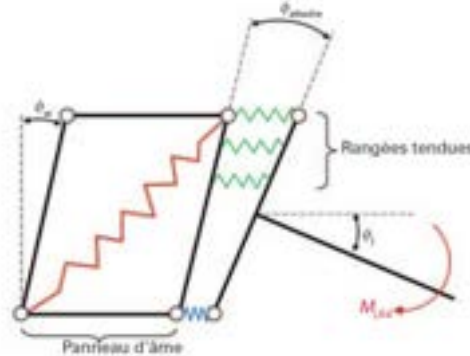


Figure 2-6 : Assemblage des composantes - les ressorts

Une fois que nous avons déterminé toutes ces caractéristiques, la rigidité initiale se détermine facilement en sachant que la rotation ϕ est égale à $(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{eq})/z$ pour le cas illustré. Ainsi, l'équation de la rigidité initiale $S_{j,ini}$ vaut :

$$S_{j,ini} = \frac{M_{j,Sd}}{\phi_j} = \frac{F z}{\frac{\sum \Delta_i}{z}} = \frac{F z^2}{E \sum \frac{1}{k_i}} = \frac{E z^2}{\sum \frac{1}{k_i}}$$

3. Analyse

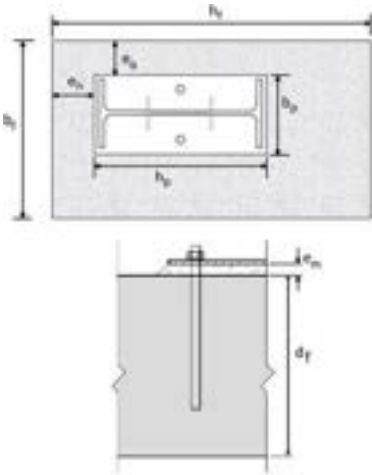
Cette section reprend l'ensemble de l'analyse effectuée dans le cadre de travail. La première étape consistait à caractériser les composantes actives au sein d'un assemblage de pied de poteau. L'analyse consistait à caractériser chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité.

La seconde étape menait à la réalisation d'un modèle mécanique en vue d'établir la courbe Moment-Rotation et le diagramme d'interaction lié à un assemblage déterminé. Ce document reprend une synthèse des résultats des recherches et explique de manière succincte le modèle mécanique.

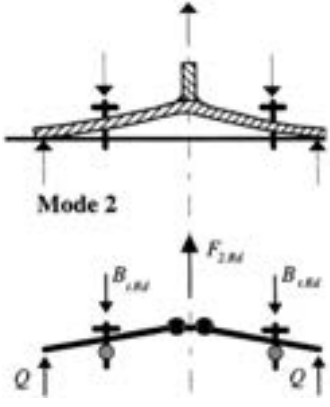
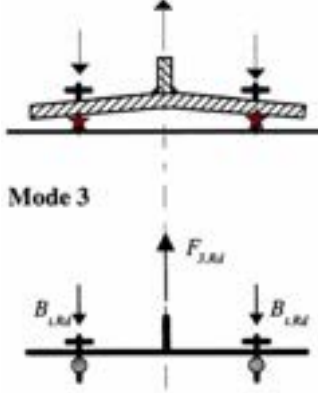
3.1. Composantes d'un assemblage de pied de poteau

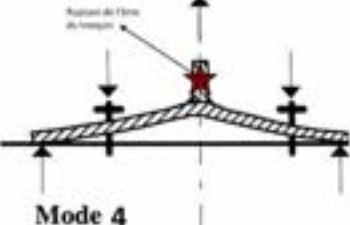
Voici une liste des composantes envisageables dans le cas de l'étude d'un assemblage de pied de poteau. Ces composantes sont systématiquement caractérisées en termes de résistances et de rigidité. Vu l'ampleur du travail de recherche, vous ne

trouvez dans ce tableau que les formules permettant de caractériser chaque composante. Chaque composante est analysée en profondeur dans le travail intégral.

Mode de ruine	Vérification
<p>Résistance du béton et de la platine en compression $N_{c,bc,Rd}$</p> 	$N_{c,bc,Rd} = f_{jd} A_{eff}$ <p>Avec respectivement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $f_{jd} = \beta_j \alpha_{bf} f_{cd}$; - $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$; - $\beta_j = 2/3$ et $\alpha_{cc} = 1$; - $\alpha_{bf} = \min \left[1 + \frac{d_f}{\max(h_p, b_p)} ; 1 + \frac{2e_h}{h_p} ; 1 + \frac{2e_b}{b_p} ; 3 \right]$; - $e_b = b_f - b_{fc} - 2t_{fc}$; - $e_h = (h_f - h_c - 2t_{fc})/2$; - $c = t_p \sqrt{\frac{f_{y,p}}{3 f_{jd} \gamma_{M0}}}$; - $A_{eff} = l_{eff} b_{eff}$; <p>Avec l_{eff} et b_{eff} qui sont définis dans le travail dans le cas d'un tronçon en T d'âme ou de semelle.</p>
<p>Mode 1 Plastification de la platine sans effet de levier $F_{T,1-2,Rd}$</p>	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$ <p>Note : m ou m_x en fonction de l'orientation du tronçon en T comme détaillé à la figure ci-contre.</p> <p>Avec :</p> $M_{pl,1,Rd} = \frac{l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{4 \gamma_{M0}}$

	<p>t_p étant l'épaisseur de la platine et $l_{eff,1}$ étant la longueur efficace liée au mode de rupture comme décrite dans le travail.</p> <p>Présence d'un effet de levier si :</p> $L_b \leq L_b^*$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $L_b = 8d + e_m + t_p + t_{wa} + 0,4d$; - $L_b^* = \frac{4,4 m_x^3 \sum A_s}{l_{eff,1} t_p^3}$ pour une rangée extérieure ; - $L_b^* = \frac{4,4 m^3 \sum A_s}{l_{eff,1} t_p^3}$ pour une rangée intérieure. <p>Avec m et m_x définis dans le travail</p>
<p style="text-align: center;">Mode 1 Plastification totale de la platine avec effet de levier</p> <p style="text-align: center;">$F_{T,1,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Mode 1</p>	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m_x}$ <p>Avec $M_{pl,1,Rd} = \frac{l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{4\gamma_{M0}}$</p> <p>Seconde méthode :</p> $F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) 0,25 l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{\gamma_{M0} (2mn - e_w (m + n))}$ <p>Avec :</p> $n = \min(e; 1,25 m) = \min(e_x; 1,25 m_x)$ $e_w = d_w / 4$ <p>Remarque : Ces équations sont valables pour un tronçon en T avec une rangée de 2 à 4 boulons.</p>
<p style="text-align: center;">Ruine des tiges et plastification partielle de la platine avec effet de levier</p> <p style="text-align: center;">$F_{T,2,Rd}$</p>	<p>Pour un tronçon constitué d'une rangée de 2 à 4 boulons extérieurs ou un tronçon d'une rangée de 2 boulons intérieurs :</p> $F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd,ancre,i}}{m_x + n}$ <p>Avec</p>

 <p>Mode 2</p>	$M_{pl,2,Rd} = \frac{l_{eff,2} t_p^2 f_{y,p}}{4 \gamma_{M0}}$ <p>$l_{eff,2}$ étant la longueur efficace liée au mode de rupture et définie dans le travail.</p> <p>Pour un tronçon de 4 boulons intérieurs :</p> $F_{T,2,Rd} = \min(F_{T,2,Rd,p}; F_{T,2,Rd,np})$ $F_{T,2,Rd,p} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + \frac{\sum F_{t,Rd,ancr,i}}{2} \left(\frac{n_1^2 + 2n_2^2 + 2n_1n_2}{n_1 + n_2} \right)}{(m + n_1 + n_2)}$ $F_{T,2,Rd,np} = \frac{2M_{pl,1,Rd} + \frac{\sum F_{t,Rd,ancr,i}}{2} n_1}{(m + n_1)}$ <p>Avec :</p> $n = e_1 + e_2 \text{ et } n_1 = e_1 \text{ et } n_2 = e_2 ;$ $n \leq 1,25 m \text{ et } n_2 \leq 1,25m + n_1.$
<p>Résistance des tiges d'ancrage</p> $F_{T,3,Rd}$  <p>Mode 3</p>	$F_{T,3,Rd} = \sum_i F_{t,Rd,ancr,i}$ <p>Pour un tronçon à 4 boulons intérieurs, la résistance est réduite :</p> $F_{T,3,Rd} = 0,9 \sum_i F_{t,Rd,ancr,i}$ <p>Avec $F_{t,Rd,ancr,i}$ qui représente la résistance individuelle d'une tige d'ancrage dépendant de :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type d'ancrage (droite, coude, plaquette...) - Diamètre de la tige - ... <p>Les résistances sont données dans le travail.</p>

<p>Plastification de l'âme du tronçon en T $F_{t,fc,Rd}$ ou $F_{t,wc,Rd}$</p>  <p>Mode 4</p>	<p>Dans le cas d'un tronçon en T avec une semelle (rangée de boulons extérieure) :</p> $F_{t,fc,Rd} = \frac{b_{eff,t} t_{fc} f_{y,fc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Avec :</p> <p>t_{fc} qui est l'épaisseur de la semelle de la colonne ; $b_{eff,t} = \min(l_{eff,1}; l_{eff,2})$ qui représente une longueur efficace fonction du tronçon en T.</p> <p>Dans le cas d'un tronçon en T d'âme (rangée de boulons intérieure) :</p> $F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$
<p>Résistance des soudures $F_{t,w,Rd}$</p>	<p>Pour de la traction pure :</p> $F_{t,w,Rd} = 2 l_{eff,1} a_{wc} \frac{f_u}{\sqrt{3} \gamma_{M2} \beta_w} \leq \sum l_{wi} a_i \frac{f_u}{\sqrt{3} \gamma_{M2} \beta_w}$ <p>Avec</p> $2 l_{eff,1} \leq l_{w,wb} = \sum l_{wi} a_i$ <p>β_w est défini dans le Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-8</p> <p>Pour une vérification plus générale indépendante de l'effort :</p> $\min\left(\frac{a}{t}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{f_y}{f_u} \frac{\beta_w \gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \right]$ <p>Avec :</p> <p>t étant l'épaisseur de la plaque liée au cordon ; a étant la dimension de la gorge du cordon de soudure.</p>

	<p>Méthode simplifiée de l'Eurocode :</p> $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \times a$ <p>Avec $f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}$</p>
<p>Résistance au frottement $F_{f,Rd}$</p>	<p>Sous un effort de compression, résistance pouvant être mobilisée contre le cisaillement :</p> $F_{f,Rd} = C_{f,d} N_{c,Ed}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $C_{f,d}$ est le coefficient de frottement dont la valeur est de 0,2 ; - $N_{c,Ed}$ est l'effort de compression à l'ELU appliqué sur le pied de poteau.
<p>Résistance d'une tige cisailée $F_{v,Rd}$</p>	$F_{v,Rd} = \min(F_{vb,Rd}; F_{p,cd})$ <p>La première résistance est donnée par :</p> $F_{vb,Rd} = \beta_{anc} \frac{\alpha_{bc} f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>Et :</p> $\alpha_{bc} = 0,44 - 0,0003 f_{yb}$ $\beta_{anc} = 0,85$ <p>Avec les conditions suivantes à respecter :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $235 \text{ N/mm}^2 \leq f_{y,b} \leq 640 \text{ N/mm}^2$; - $400 \text{ N/mm}^2 \leq f_{u,b} \leq 800 \text{ N/mm}^2$. <p>La seconde résistance est donnée par :</p> $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$

	<p>Lorsque le plan de cisaillement passe par la partie filetée du boulon (A_s est l'aire de la section résistante en traction du boulon) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\alpha_v = 0,6$ pour les classes 4.6, 5.6 et 8.8 en nuance d'acier S235/S275/S355 ; - $\alpha_v = 0,5$ pour les autres classes (4.8, 5.8, 6.8 et 10.9). <p>Lorsque le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $\alpha_v = 0,6$.
Rigidité de la partie tendue K_T	<p>Il convient de déterminer les coefficients de rigidité suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - k_{15} qui représente la rigidité associée à la flexibilité de la platine ; - k_{16} qui est la rigidité associée aux tiges d'ancrage. <p>Ainsi, la rigidité est donnée par :</p> $K_T = \frac{1}{\frac{1}{k_{15}} + \frac{1}{k_{16}}}$
Rigidité de la platine k_{15}	<p>Le coefficient k_{15} se détermine par les équations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si l'effet de levier est présent : $k_{15} = \frac{0,85 l_{eff} t_p^3}{m_x^3}$ <ul style="list-style-type: none"> - Si l'effet de levier n'est pas présent : $k_{15} = \frac{0,425 l_{eff} t_p^3}{m_x^3}$
Rigidité des tiges d'ancrage k_{16}	<p>Le coefficient se détermine par les équations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si l'effet de levier est présent :

	$k_{16} = 0,8 \frac{\sum A_s}{L_b}$ <ul style="list-style-type: none"> - Si l'effet de levier n'est pas présent : $k_{16} = \frac{\sum A_s}{L_b}$
Rigidité de la partie comprimée K_c	<p>Le coefficient de rigidité de la partie comprimée se détermine de la manière suivante :</p> $K_c = k_{13} = \frac{E_c \sqrt{l_{eff} b_{eff}}}{1,275 E}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - E_c représente le module de Young du béton défini dans le travail - l_{eff} et b_{eff} représentent la surface de béton comprimé ; - E est le module de Young de l'acier.

3.2. Modèle mécanique d'un assemblage de pied de poteau

Introduction

La thèse de Frédéric Cerfontaine établit un ensemble d'équations générales qui permettent de calculer la rigidité flexionnelle et extensionnelle d'un assemblage quelconque. Cette thèse n'a jamais été exploitée dans le cadre des assemblages de pieds de poteaux et nous avons pu montrer dans ce travail la validité des équations générales de Cerfontaine vis-à-vis de l'Eurocode. Nous allons reprendre dans la suite de ce travail l'ensemble des équations établissant les rigidités en fonction des efforts, qu'il s'agisse d'un moment de flexion, d'un effort normal de compression/traction ou bien d'une combinaison des deux.

Rigidité sous M+N

L'excentricité se détermine au moyen de l'équation suivante et son sens physique est illustré à la Figure 3-1. L'excentricité n'est autre que la distance nécessaire entre l'axe neutre et un effort normal pour créer un effort équivalent de flexion.

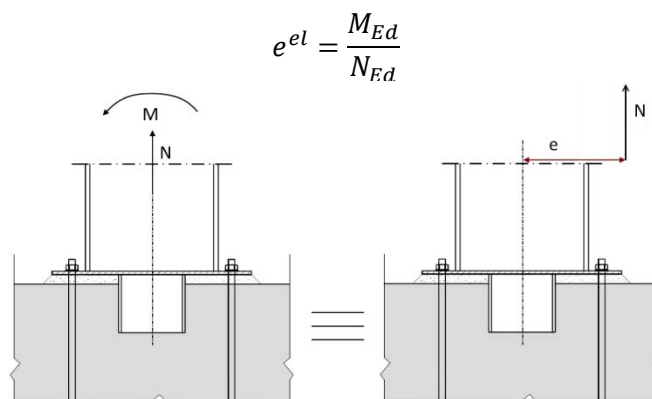


Figure 3-1 : Sens physique de l'excentricité

L'équation ci-dessous représente le paramètre h_0^{el} . Celui-ci permet de connaître directement les rangées chargées (tendues) et donc de pouvoir déterminer le coefficient de rigidité à appliquer pour une rangée de boulons donnée. Ce paramètre h_0^{el} représente l'« axe neutre » et caractérise plus couramment « le point de déplacement nul en régime élastique ». Il est valable uniquement dans le domaine élastique et ne peut être employé que pour le calcul de la rigidité initiale.

$$h_0^{el} = \frac{\sum K_{i,ini} h_i (h_i - e^{el})}{\sum K_{i,ini} (h_i - e^{el})}$$

La Figure 3-2 permet d'illustrer le déplacement de h_0^{el} en fonction de la valeur de l'excentricité e^{el} , tous les autres paramètres restant constants. Ceci suppose un effort de traction constant et un moment de flexion qui augmente entre (a) et (b), et par conséquent l'excentricité augmente également. Ainsi, lorsque l'excentricité augmente, l'axe neutre h_0^{el} se déplace et induit un modèle mécanique différent : la seconde rangée de boulons est maintenant tendue (en rouge) dans cet exemple.

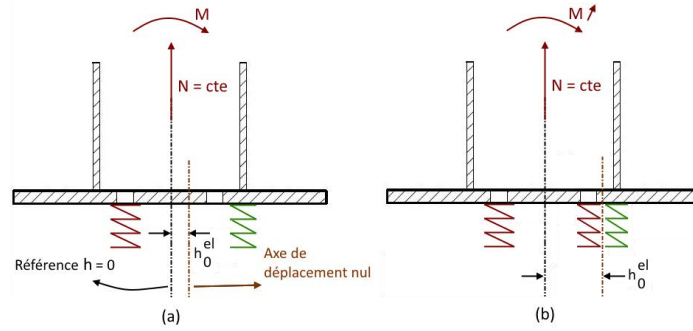


Figure 3-2 : Déplacement du h_0^{el} en fonction de l'effort appliqué

Il convient également de définir les paramètres h_i et $K_{i,ini}$. La valeur h_i représente le bras de levier entre la référence ($h = 0$) et le point d'application du ressort. Le second paramètre $K_{i,ini}$ représente la rigidité du ressort équivalent de la rangée étudiée dans l'assemblage. Il peut s'agir soit d'un élément tendu K_t soit d'un élément comprimé K_c . Dans la Figure 3-2, sur l'illustration de droite, les deux boulons en traction seront liés à un coefficient de rigidité K_t tandis que le ressort en compression (en vert à droite) sera lié à un coefficient K_c .

Détermination de h_0^{el}

En pratique, la valeur de h_0^{el} est inconnue lorsque la rigidité de l'assemblage doit être déterminée. Les seules données en notre possession sont les efforts appliqués sur le pied de poteau et par conséquent l'excentricité e^{el} . Il convient alors de réaliser une hypothèse sur h_0^{el} et de procéder par itération.

La rigidité extensionnelle K_N^{el} représente le déplacement vertical de l'assemblage dû à un effort de traction/compression. La rigidité flexionnelle K_M^{el} correspond, quant à elle, à la rotation de l'assemblage due à un moment de flexion.

$$K_N^{el} = \frac{\sum K_{i,ini} \sum K_{i,ini} h_i^2 - (\sum K_{i,ini} h_i)^2}{\sum K_{i,ini} h_i (h_i - e^{el})}$$

$$K_M^{el} = S_{j,ini} = \frac{e^{el} (\sum K_{i,ini} \sum K_{i,ini} h_i^2 - (\sum K_{i,ini} h_i)^2)}{\sum K_{i,ini} (e^{el} - h_i)}$$

Sur base de ces premières équations, nous pouvons établir la relation remarquable entre K_M^{el} et K_N^{el} :

$$K_M^{el} = S_{j,ini} = -e^{el} h_0^{el} K_N^{el}$$

Modèle mécanique général

Fort des analyses précédentes, un modèle mécanique plus général peut être proposé. La configuration ordinaire d'un pied de poteau est répétitive. Il est constitué de deux rangées capables de reprendre un effort de compression (les semelles du profilé) et de n rangées de boulons en mesure de subir un effort de traction. Ainsi, le modèle mécanique peut être assimilé à la Figure 3-3 suivante. Ce modèle général permet de calculer la rigidité d'un pied de poteau quelconque pour autant qu'on soit en possession des coefficients de rigidité associés à chaque rangée de l'assemblage. La méthode permet de résoudre les cas proposés par l'Eurocode ainsi que des cas plus complexes qui peuvent se présenter.

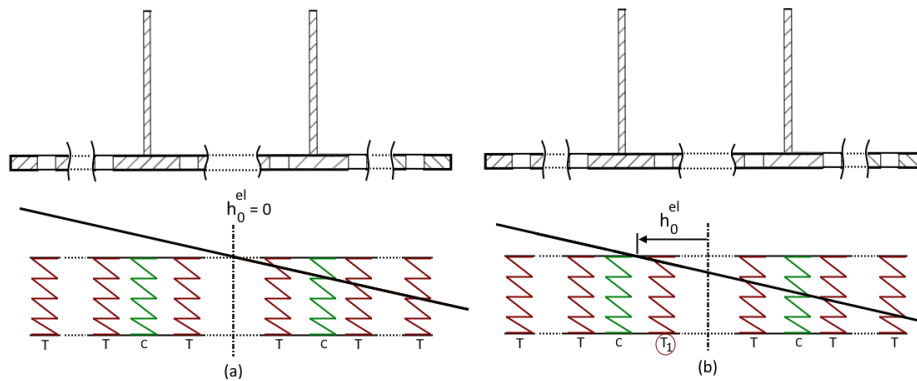


Figure 3-3 : Modèle mécanique général d'un pied de poteau

En fonction de la position de l'axe neutre h_0^{el} , les rangées chargées sont déterminées et le modèle mécanique établi. En (a), les rangées à gauche de l'axe neutre sont chargées en traction. Par conséquent, la rangée en compression (c, en vert) est inactive vu que la semelle du profilé ne peut pas reprendre de traction. À droite de l'axe neutre, les rangées sont en compression et donc seul la semelle du profilé est active vu que les boulons ne peuvent pas reprendre de compression. En (b), le déplacement de l'axe neutre dû à un changement hypothétique de l'effort entraîne la désactivation de la rangée de boulons T_1 qui est désormais en compression et qui ne peut donc reprendre aucun effort de compression.

En résumé, le modèle mécanique d'une configuration donnée quelconque peut être établi sur base de cette figure.

3.3. Diagramme d'interaction

Le diagramme d'interaction moment de flexion-effort normal d'un assemblage de pied de poteau définit une « surface » à l'intérieur de laquelle tous les couples $M -$

N constituent des efforts acceptables par l'assemblage. Dans le cas où les efforts $M - N$ appliqués se trouvent en dehors de la surface, le pied de poteau ne résistera pas. Enfin, le périmètre du diagramme d'interaction constitue une caractéristique de la ruine de l'attache. Toute combinaison de moment et d'effort normal se trouvant sur le périmètre représente une combinaison $M + N$ conduisant l'assemblage à la ruine.

La thèse de Cerfontaine définit de nombreux éléments qui permettent d'introduire un procédé général de construction du diagramme d'interaction. La construction du diagramme selon cette méthode permet également de prendre en compte les effets de groupe. Cette thèse a été démontrée au moyen d'essais expérimentaux et de nombreux concepts sont introduits dans cette thèse. Le lecteur peut consulter cet ouvrage pour comprendre le moindre détail des éléments introduits dans la suite.

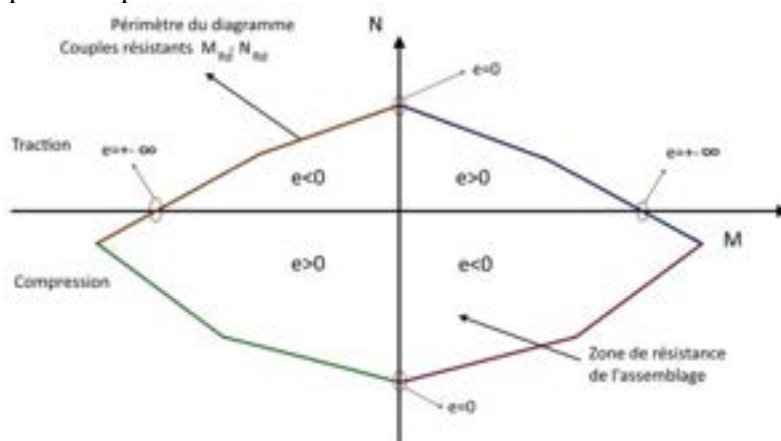


Figure 3-4 : Forme générale du diagramme d'interaction $M-N$

Au moyen de cette méthode, il est aisé d'établir un diagramme d'interaction comme illustré à la figure 3-5. Néanmoins, nous n'entrerons pas dans les détails dans le cadre de ce résumé. La méthode complète est explicitée dans le travail et montre son efficacité vis-à-vis de la méthode classique proposée par l'Eurocode. Plus rapide, plus complète et permettant de résoudre des cas plus complexes, la possession de la rigidité et du diagramme d'interaction d'un assemblage conduit à la création de la courbe Moment-Rotation, élément ultime de caractérisation d'un assemblage.

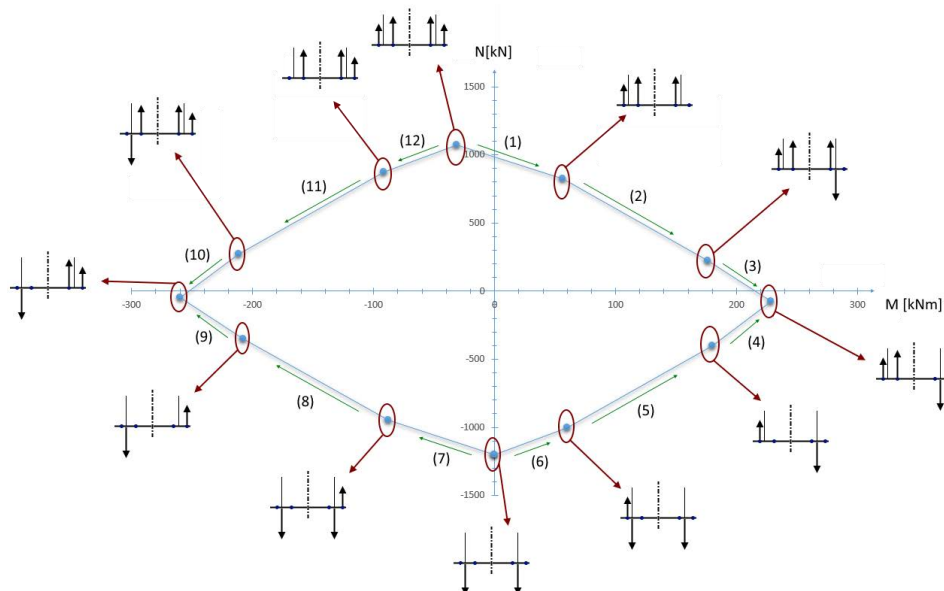


Figure 3-5 : Diagramme d'interaction et distribution des efforts dans l'assemblage

3.4. Conclusions et perspectives

Le travail de fin d'étude avait pour objectif de rassembler et de synthétiser la littérature disponible sur les assemblages de pieds de poteaux. L'Eurocode EN 1993-1-8 reste discret sur le dimensionnement de ce type d'assemblage et ne permet pas de modéliser un ensemble de situations pourtant présentes dans le domaine de la construction.

Cette synthèse a permis de caractériser les différentes composantes d'un assemblage de pied de poteau sous M , N et V et principalement de faire le point sur les techniques de calculs existantes et les limites de celles-ci. Un grand nombre de portes s'ouvrent d'ores et déjà pour combler le manque d'information et permettre de dimensionner des assemblages de pieds de poteaux plus complexes et répondant aux exigences des normes actuelles.

L'application de la thèse de Cerfontaine a permis de mettre en place une nouvelle approche pour calculer la rigidité d'un assemblage sous une combinaison $M + N$. Cette méthode, plus simple et plus généraliste, permet de calculer la rigidité d'un assemblage quelconque, pour autant qu'on soit en possession des coefficients de rigidité associés à chaque rangée de l'assemblage. Ce travail a également permis de mettre en place un outil systématique de calculs des diagrammes d'interaction, élément clés dans le cadre d'un bureau d'étude, la connaissance d'un diagramme d'interaction permettant de dimensionner au plus juste les assemblages et de connaître l'influence de tel ou tel paramètre sur la résistance globale de l'assemblage.

Cependant, de nombreuses questions restent sans réponses face aux demandes toujours plus complexes de l'industrie. Notamment, les tronçons en T à quatre boulons par rangée nécessitent également un travail conséquent d'analyse et de recherche pour mettre au point un modèle fonctionnel et des critères adaptés en vue de réaliser des outils de calculs performants. Les longueurs efficaces en présence de raidisseurs ou les effets de groupes entre rangées intérieures restent toujours des points d'interrogation dans le dimensionnement des assemblages de pied de poteaux et représentent un ensemble d'informations auquel nous n'avons pas encore accès, de nombreuses recherches étant toujours en cours.

En conclusion, ce travail a permis de rassembler un nombre suffisant de documents et met à disposition les connaissances et les outils nécessaires en vue d'approfondir l'étude des assemblages de pieds de poteaux. De nombreuses études sont néanmoins nécessaires en vue de modéliser des assemblages plus complexes répondant aux exigences toujours plus contraignantes du domaine de la construction.

4. Sources

N.B. : L'entièreté des sources est disponible dans le travail complet.

- [1] IVOR, R., *Assemblages des pieds de poteaux en acier. Dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux métalliques encastrés et articulés*, Marne-la-Vallée, CSTB, 2010.
- [2] *EN 1993-1-8: Eurocode 3: Calcul des structures en acier. Partie 1-8 : calcul des assemblages*, Bruxelles, Comité Européen de Normalisation, 2005.
- [3] CERFONTAINE, F., *Étude de l'interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés*, Liège : Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2004.
- [4] JASPART, J-P., *Recent advances in the field of steel joints column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices*, Liège: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 1997.
- [5] WALD, F., SOKOL, Z. & JASPART, J-P., *Base plate in bending and anchor in tension*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 30 pages.
- [6] STEENHUIS, M. *et al.*, *Concrete in compression and base plate in bending*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 18 pages.

- [7] JASPART, J-P. *et al.*, *Steel Column base classification*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 18 pages.
- [8] DEMONCEAU, J.-F. *et al.*, Marne-la-Vallée, CSTB, 2010. *Connections with four bolts per horizontal row*, EUROSTEEL 2010, September 2011, Budapest – Hungary, 6 pages.
- [9] DEMONCEAU, J.-F. *et al.*, *Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row*, September 2010, Rio de Janeiro, Brazil, 8 pages.
- [10] PISAREK Z. & KOZŁOWSKI A., *End-plate steel joint with four bolts in the ow*, Rzeszów University of Technology, 2006, Rzeszów, Poland, 10 pages.

Impact de l'ajout de sucres au brassage : aspects physicochimiques et sensoriels au niveau de la flaveur de la bière

Ing. L. RAPPE
Dr ir V. JERKOVIC
ISICHt - Mons

L'étude menée ici tentera de mettre en évidence l'impact de différents sucres ajoutés lors du brassage. Les bières ont été brassées avec un système automatique, dans lequel, l'empâtage, la filtration et la cuisson du moût se font dans la même cuve. Les bières subissent par la suite des tests sensoriels, faisant appel à un panel de sujets naïfs, visant à évaluer s'il existe une différence de flaveur entre les brassages. Les résultats de ces tests, seront mis en lien avec une analyse, faite par HPLC-RI, des sucres résiduels dans les bières finies.

Mots clefs : bière, brassage, sucre, test sensoriel, HPLC, EBC, ITT

The goal of this thesis is to evaluate the impact of various sugars addition during brewing. First, the beers are brewed with an automatic mash tun, wherein mashing, filtration and boiling are made in the same tank. Then, sensory tests take place, using a panel of naive subjects to show if there is a difference of flavor between the brewing. The results of these tests are related with HPLC-RI analysis of residuals sugars in finished beers.

Keywords: beer, brewing, sugar, sensory test, HPLC, EBC, ITT

1. Introduction

Une bière, selon la méthode de brassage utilisée, peut avoir différents goûts. Les grands ingrédients de base choisis ; l'eau, le malt, le houblon, les levures, jouent, suivant leur type et leur concentration, également un grand rôle au niveau de la perception gustative. D'autres ingrédients comme des épices, sucres, ..., peuvent également avoir un impact.

Ce travail, effectué au CERISIC, a été réalisé en collaboration avec la brasserie Saint-Feuillien.

A côté de l'étude de l'influence de l'ajout des sucres au brassage, nous étudierons la teneur en ces mêmes sucres résiduels avant et après fermentation. Une analyse de la coloration et du pouvoir réducteur des bières se fera également, en utilisant un spectrophotomètre UV-visible.

2. Partie bibliographique

2.1 La bière, son procédé de fabrication

Concassage/hydratation

Il s'agit de l'étape qui vise à broyer le malt. Le concassage est généralement grossier, on estime qu'un grain doit être écrasé en 4 à 5 morceaux [1].

Empâtage / Brassage / Filtration

L'empâtage est le mélange intime de la mouture avec de l'eau chaude pour obtenir la maïsche (eau + malt) à 50°C. Le brassage est fait à des températures précisément contrôlées pour permettre le travail d'enzymes déterminées. L'agitation stoppée, un gâteau de drêches (écorces, morceaux) se constitue. Un soutirage lent pour éviter le colmatage est effectué. Après soutirage, les drêches sont rincées pour récupérer l'extrait résiduel [1], [3].

Ébullition

Le rôle de l'ébullition sur la qualité du produit fini est multiple entre autre ; formation de la mousse, destruction d'une partie des bactéries potentielles, apport de l'amertume via l'ajout de houblon, coloration du moût par les réactions de Maillard, évaporation de diméthyle sulfure, précipitation des protéines responsables du trouble [1], [3].

Décantation, refroidissement et aération du moût.

Lorsque l'ébullition est terminée, le houblon et les flocons de protéines coagulées vont pouvoir être décantés. Afin d'accélérer et améliorer ce processus, un effet

Whirlpool peut être généré. Le moût est ensuite refroidi, bien souvent par un échangeur de chaleur, jusqu'aux environs de 20°C, oxygéné par de l'air si possible stérile et ensuite amené dans la cuve de fermentation [1], [3].

Fermentation

Au contact du moût les levures vont pouvoir se multiplier très rapidement, notamment grâce à l'oxygène ajouté au refroidissement. Les sucres sont fermentés et la température est contrôlée afin de garder un rythme optimal de fermentation. Le moût se charge en alcool, et une fois la fermentation terminée, la bière sera refroidie pour permettre une clarification en faisant sédimenter les levures [2], [3].

La garde

La garde permet à la bière de subir de très subtiles modifications, comme par exemple l'affinement de l'amertume, la stabilisation de la mousse, la clarification par le froid (température proche de zéro degré) [1].

Mise en bouteille et refermentation

Les bouteilles ou fût nettoyés et désinfectés vont pouvoir accueillir la bière qui est maintenant prête à se saturer en CO₂ grâce à la deuxième fermentation ou par ajout direct de CO₂ [1].

2.2 Évaluation sensorielle

Généralité

L'évaluation sensorielle est une science qui compte un ensemble de méthodes permettant de caractériser les produits avec les sens de l'Homme (vue, ouïe, odorat, goût, toucher).

Il est possible de distinguer deux perspectives de l'évaluation sensorielle. Nous avons d'abord l'analyse sensorielle qui cherche à déterminer les propriétés organoleptiques des aliments. Deux grandes catégories d'épreuves existent :

- Les épreuves discriminatives qui ont pour objectif de déterminer si deux ou plusieurs produits sont ou pas différents.
- Les épreuves descriptives qui ont pour objectif de mettre en avant les ressemblances et différences entre produit.

Le deuxième aspect de l'analyse sensorielle est l'évaluation hédonique qui est l'étude des préférences ou aversions entraînées par ces propriétés organoleptiques. Nous observons donc que l'analyse sensorielle s'intéresse au produit en tant que tel, tandis que l'évaluation hédonique s'intéresse à la façon dont un produit sera accepté par un groupe cible de consommateurs.

Les deux perspectives qui viennent d'être vues (analyse sensorielle et évaluation hédonique) sont complémentaires et celles-ci sont regroupées sous la dénomination d'évaluation sensorielle ou de métrologie sensorielle [7] [8].

Caractéristiques sensorielles d'une bière

Quatre composantes sont principalement discernables (les arômes, l'amertume, l'acidité, la saveur sucrée) avec en plus l'alcool qui est considéré comme un exhausteur de goût. L'acidité sera la plus faible possible car elle ne s'accorde pas avec l'amertume. Cette amertume donne au produit fini un certain profil aromatique et une persistance en bouche.

Les sucres résiduels présents dans la bière la rendent « moelleuse », « visqueuse » voire « lourde ». Cette caractéristique est principalement due à la nature et à la teneur en dextrines résiduelles. La saveur sucrée dépend de la nature des dextrines formées durant l'empâtage. Le pouvoir sucrant sera d'autant plus fort que la taille des dextrines sera faible.

D'autres arômes peuvent être apportés par le malt utilisé, la levure utilisée et également les arômes se trouvant dans l'éventuel sucre ajouté [1].

2.3 Les glucides

Les glucides, dénommés de manière impropre « sucre », sont une vaste famille biochimique complexe qu'il n'est pas facile de cerner avec précision. Cette famille, qui occupe une part importante dans notre alimentation, représente la principale source d'hydrates de carbone au niveau ration alimentaire [4].

Réactions de brunissement non enzymatiques.

Caramélisation

La caramélisation est une réaction qui, lorsque l'on chauffe des sucres en l'absence de protéines ou d'acides aminés, amène une couleur brune. Ce phénomène démarre lorsque, en présence d'un catalyseur acide, le sucre a atteint son point de fusion. Les réactions qui se passent sont complexes, et selon la méthode utilisée, on aura formation de différents composés aromatiques. L'un des premiers intermédiaires important formé lors de la réaction de caramélisation est l'hydroxy-méthyl furfural, molécule présentant des propriétés antioxydantes [11].

Réactions de Maillard

Il s'agit d'une combinaison entre un sucre réducteur (possédant une fonction carbonyle libre) et une protéine, un peptide ou un acide aminé (fonction amine libre). Ces réactions aboutissent à la formation :

- De pigments bruns (les mélanoidines)
- De composés volatils avec des propriétés aromatiques faisant suite à des traitements thermiques à températures élevées.

- De substances très réactives (réductones, hydroxyméthyl-furfural) qui par leurs pouvoirs réducteurs ont des propriétés antioxydantes.

Les réactions de Maillard sont fréquentes en technologie alimentaire de même qu'en cuisine. Elles peuvent être recherchées pour leurs avantages sensoriels ou être combattues par les altérations qu'elles entraînent [4].

Utilisation par les levures.

La fermentation alcoolique implique le transport de substrat à l'intérieur de la cellule et les voies métaboliques qui y sont impliquées [9]. Les sources de carbone les plus couramment utilisées sont les hydrates de carbone, dont certains mono-, di- et trisaccharides [5]. Il existe deux types de sucres disponibles pour la levure ; les sucres directement fermentescibles qui se trouvent déjà présents dans le milieu ou qui sont apportés, et les sucres issus de l'hydrolyse de l'amidon [6].

Saccharomyces cerevisiae peut fermenter les sucres suivants : les monosaccharides ; glucose, fructose et galactose, les disaccharides ; saccharose, maltose et le trisaccharide ; maltotriose [10].

Saccharomyces cerevisiae utilise préférentiellement les monosaccharides (sucre simple en C5 ou C6) comme le glucose, fructose. Ceux-ci sont donc fermentés très rapidement, tandis que le maltotriose est fermenté lentement et parfois de façon incomplète avec des traces pouvant rester dans la bière. Le maltotriose est utilisé en dernier après toute assimilation du maltose. L'assimilation complète du glucose est suivie par l'absorption de maltose, le principal sucre du moût. Les dextrines et β -glucanes, dérivés de la dégradation partielle de malt, ne sont quant à eux pas fermentescibles [10].

Les disaccharides devront subir une modification afin d'être assimilables. Au niveau de l'espace périplasmique (entre la paroi et la membrane cytoplasmique), le saccharose sera, en même temps que la consommation du glucose et du fructose, transformé en glucose et en fructose grâce à une invertase présente dans la levure. Cette étape permettra d'augmenter la concentration en glucose et fructose. Le maltose (disaccharide formé de deux glucoses) rentre dans la levure grâce à une maltoperméase et est scindé en glucose par une enzyme intracellulaire, la maltase [6].

3. Résultats et discussion

Dans cette étude, les brassins effectués ont été analysés à différentes périodes. Les bières sont brassées avec une cuve de brassage automatique Brauwmeister de 200 litres, dans laquelle, l'empâtage, la filtration et la cuisson du moût se réalisent dans la même cuve.

3.1 Analyses quantitatives des différents brassins

Test de couleur (norme EBC)

Numéro brassin	Type de sucre ajouté	Levure	EBC
0	sans sucre	Fermentis S-33	3,5
1	Inverti de betterave	Fermentis S-33	9
2	Candi foncé	Fermentis S-33	8
3	Sucre brûlé	Fermentis S-33	72
4	Inverti de canne	Fermentis S-33	5
5	Cassonade blonde	Fermentis S-33	6
6	Candi foncé	Fermentis T-58	7

Tableau 1 : Caractéristiques des bières produites.

Le tableau n°1 nous donne les résultats des analyses de couleur des bières pour chaque brassin. La figure n°1, permet de projeter les différentes bières sur l'échelle EBC.

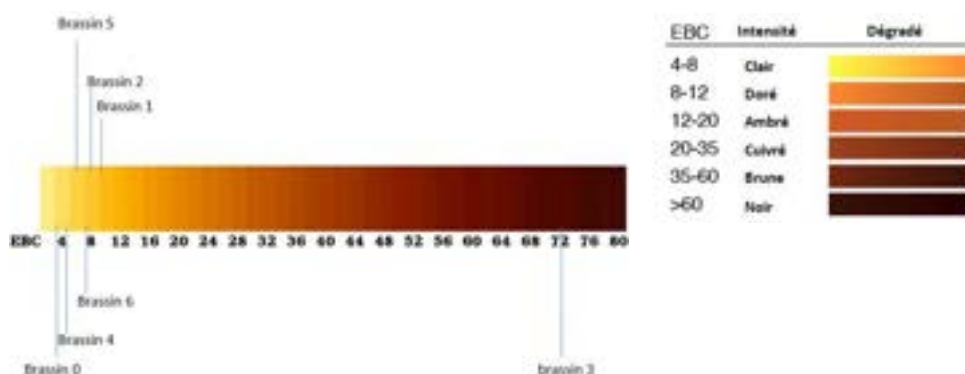


Figure 1 : Positionnement des bières sur l'échelle EBC.

Après que les échantillons soient passés au spectrophotomètre, nous pouvons, en comparant les résultats obtenus avec une échelle EBC (figure n°1), observer que les bières 0, 4, 5 et 6 restent dans une gamme de couleur assez claire. Le brassin 3 est dans l'intensité "noir" et les brassins 1 et 2 sont proches du doré.

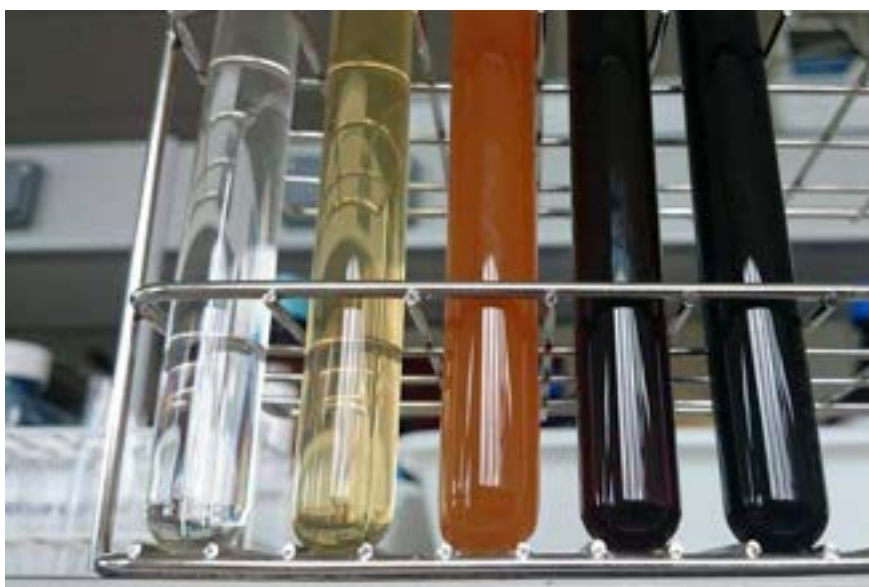
La figure n° 2 montre les différents brassins mis dans des verres.



Brassin n° :	5	4	0	6	2	1	3
EBC :	6	5	3.5	7	8	9	72

Figure 2 : Couleurs des différentes bières mises dans des verres

En comparant la couleur finale des bières (figure 2) avec celle des sucres initiaux (figure 3), nous pouvons conclure à un lien entre celles-ci. Seul le brassin 1 fait exception. L'inverti de betterave (sucre du brassin 1), bien que de composition similaire à celle du sucre inverti de canne (brassin 4) semble avoir subi de fortes réactions de brunissement non enzymatique.



Sucre :	Inverti b.	Inverti c.	Cassonade	Candi foncé	Brûlé
----------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------------	--------------

Figure 3 : Sucres utilisés pour dans différents brassins

Indication time test (ITT)

La mesure de l'ITT se réalise en mesurant au fur et à mesure la décoloration du réactif de Tillmans (le 2-6 dichlorophénol indophénol) par spectrophotométrie. La décoloration se fait grâce aux molécules anti-oxydantes se trouvant dans les brassins. Cette mesure de temps permet de mesurer le pouvoir réducteur d'une bière, nous montrant ainsi sa résistance à l'oxydation.

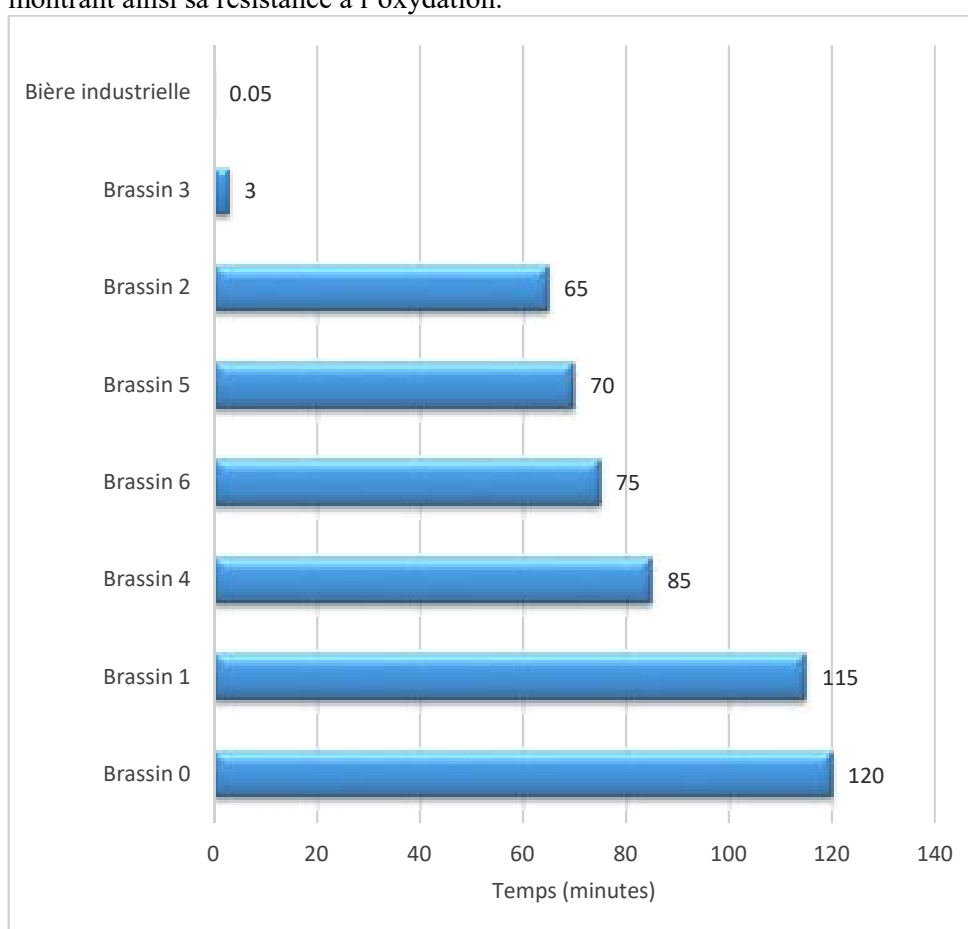


Figure 4 : Mesure de l'ITT. Brassin 0 : sans sucre ajouté. Brassin 1 : inverti de betterave. Brassin 2 : candi foncé. Brassin 3 : sucre brûlé. Brassin 4 : inverti de canne. Brassin 5 : cassonade blonde. Brassin 6 : candi foncé/levure Fermentis T-58.

La figure n°4 nous montre l'ITT correspondant à chaque brassin, et pour une bière de type industriel.

Nous pouvons voir qu'il existe bien une différence entre le brassin 0, 1 et les autres brassins.

De plus, il y a une très grande différence entre une bière faite en industrie (ITT de 4 secondes) et une bière faite en laboratoire. À plusieurs moments de leurs formations, les bières ont été exposées à l'oxygène provoquant au fur et à mesure une diminution du pouvoir antioxydant de ces dernières. Les moments les plus critiques sont, sans doute, la mise en garde et la mise en bouteille.

Malgré cela, le brassin n°3, ayant reçu le sucre brûlé, a gardé une bonne résistance à l'oxydation. Cette résistance est probablement due à la formation en grande quantité de l'hydroxy-méthyl furfural lors de la formation du sucre brûlé, qui a un pouvoir antioxydant important. Le sucre inverti de betterave ajouté au brassin 1, ne possédait pas de composés antioxydants. Bien que la figure n°5 montre que le brassin n°1 a bien subi des réactions de brunissement, l'ITT ne semble pas confirmer la présence de composés antioxydants dans ce dernier.

De manière générale, un lien entre la résistance à l'oxydation, et le sucre de base qui apporte avec lui des composés antioxydants est observé. Il serait, dès lors, intéressant d'analyser la composition antioxydantes des sucres.

Analyse des sucres par HPLC

Résultats des sucres se trouvant dans le brassin avant fermentation

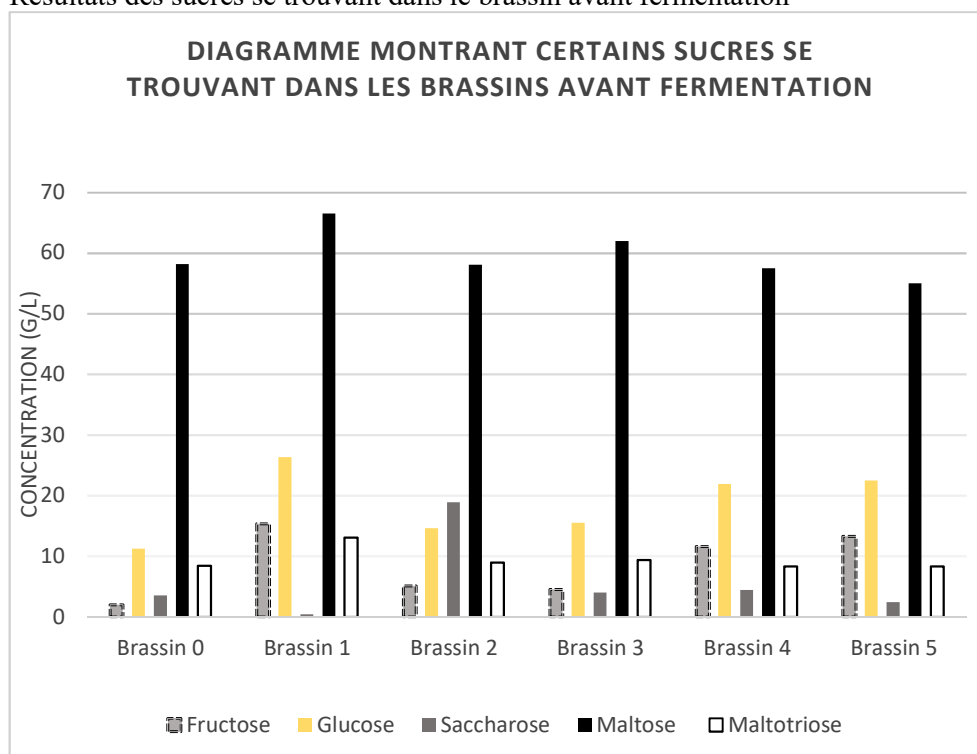


Figure 5 : Diagramme montrant certains sucres se trouvant dans les brassins avant fermentation

La figure n°5, montre une différence entre les brassins avec sucres et le brassin sans sucre. La variation en maltotriose et maltose entre les brassins est due à la quantité de malt ajouté (celle-ci pouvant un peu varier). Le brassin sans sucre ajouté peut être pris comme « blanc » afin de voir ce que chaque sucre amène.

Le brassin n°1 a bien une augmentation en glucose et fructose. La teneur en maltotriose indique que ce brassin a dû recevoir un peu plus de malt que les autres. Le fait qu'il ne reste presque plus du tout de saccharose peut s'expliquer par la prise d'échantillon qui a été faite juste après avoir introduit les levures. L'échantillon a été placé à moins 20°C, formant de nombreux cristaux, et tuant ainsi les levures. Une fois l'échantillon dégelé, les invertases contenues dans les levures ont pu se libérer et transformer le saccharose en glucose et fructose.

Le brassin n°2 présente une augmentation du saccharose qui le compose en grande partie, ainsi qu'une légère augmentation du glucose et du fructose.

Le brassin n°3 montre seulement une petite augmentation de glucose et fructose. Celle-ci peut s'expliquer par un dosage plus élevé de malt au brassage (voir le maltose), mais il semblerait également que ce sucre brûlé, contienne un petit pourcentage de glucose et de fructose dans sa composition.

Le brassin n°4 montre, comme le brassin n°1, une grande teneur en glucose et fructose. Cette augmentation est bien en lien avec la composition du sucre.

Le brassin n°5 utilisant un sucre composé de saccharose, ne présente pas le profil attendu. Nous aurions effectivement dû voir une grande concentration de saccharose. Au vu de la variation du glucose et du fructose, une hydrolyse a dû avoir lieu. Cette hydrolyse peut également s'expliquer par le fait que l'échantillon ait été prélevé après l'ajout des levures.

Suivant le type de sucre, la concentration varie en glucose, fructose et saccharose. Mis à part pour le brassin n°5, les profils semblent cohérents. Cette cassonade blonde a bien été vérifiée par HPLC-RI, et est composée essentiellement de saccharose. Ce résultat appuie l'idée que le saccharose a bien été hydrolysé, lors du dégel, par les invertases des levures.

Résultats des sucres résiduels après fermentation

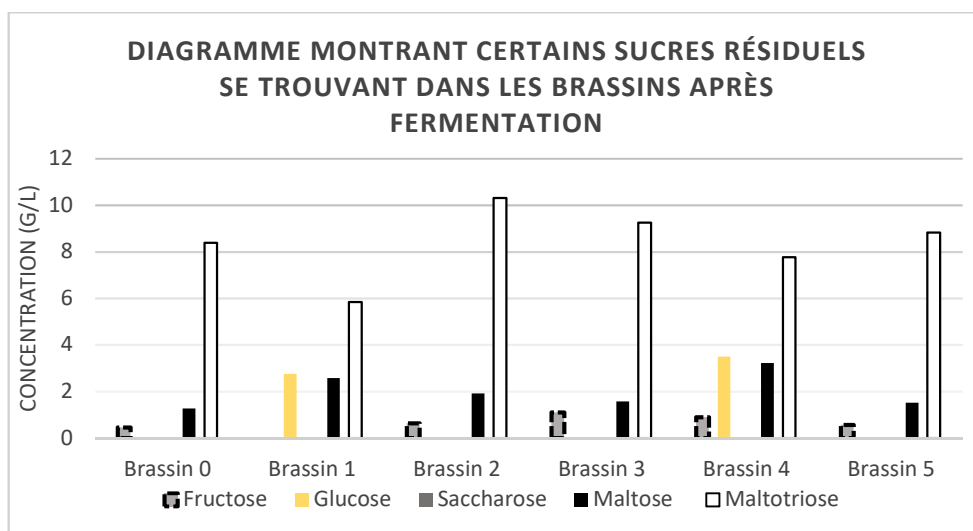


Figure 6 : Diagramme montrant certains sucres résiduels se trouvant dans les brassins après fermentation.

Les profils des brassins après fermentation (figure n°6) indiquent que tous les types de sucres ont été fermentés.

Nous voyons ici qu'il reste des sucres résiduels après fermentation. Contrairement à ce que nous avons pu voir dans la partie bibliographique (3.2. Utilisation des sucres par les levures), des sucres fermentescibles sont présents après les 7 jours de fermentation. Toutefois, nos tests ont été réalisés dans des conditions différentes de celles de la littérature. Bien qu'il reste des sucres fermentescibles, ceux-ci le sont en très petite quantité.

Cette partie théorique nous expliquait également que le maltotriose pouvait être fermenter de manière incomplète. Nos résultats (figure n°6) restent dans cette idée. Concernant la disparition totale du saccharose, comme vu dans la partie bibliographique, ce sucre est très rapidement hydrolysé par les invertases des levures pour donner du glucose et du fructose. Il est donc normal de ne plus voir de trace de ce dernier.

Résultats des sucres résiduels en bouteille

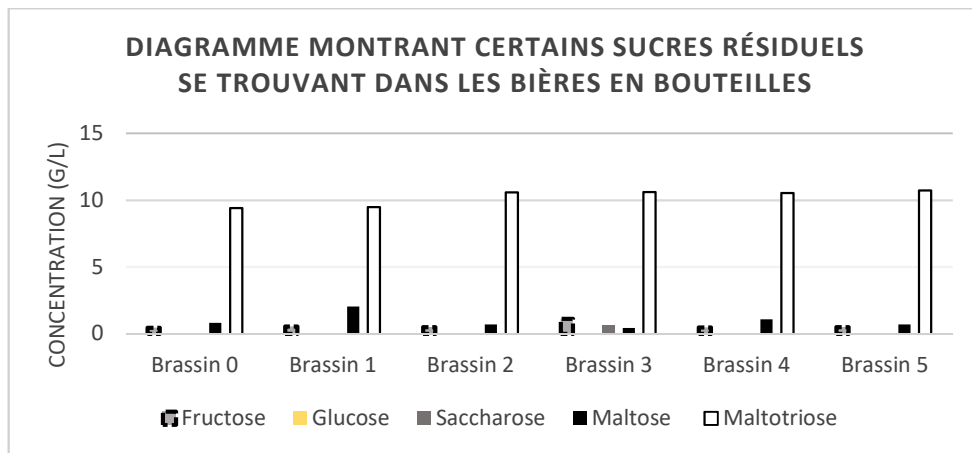


Figure 7 : Diagramme montrant certains sucres résiduels se trouvant dans les bières en bouteilles.

Nous observons sur la figure n°7, que le principal sucre résiduel est le maltotriose. Comme attendu (3.2. Utilisation des sucres par les levures), le maltotriose est fermenté de manière incomplète. Il y a toujours un peu de maltose et fructose dans tous les brassins.

Tous les profils de sucres restent néanmoins très proches les uns des autres.

Résultats des sucres résiduels des brassins avec levures différentes

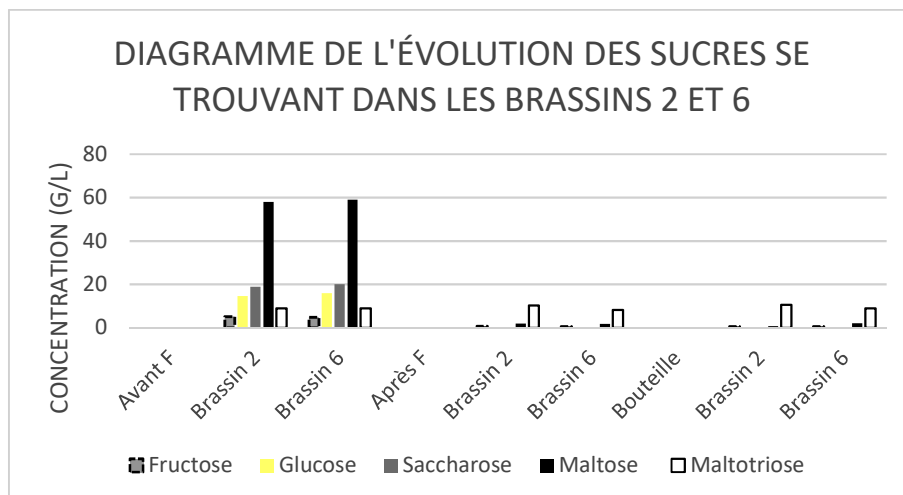


Figure 8 : Diagramme montrant l'évolution de certains sucres résiduels se trouvant dans les brassins 2 et 6.

La figure n°8 montre de gauche vers la droite, les sucres résiduels avant fermentation, après fermentation, et en bouteille. Il s'agit de deux brassins utilisant le même sucre (candi foncé) ayant chacun une levure différente.

Nous observons ici qu'à chaque fois, les profils de sucres sont très similaires. Nous en concluons que les levures T58 et S33, toutes les deux *Saccharomyces cerevisiae*, fermentent les sucres de la même façon.

3.2 Analyses qualitatives des différents brassins

Epreuves	Bières de bases utilisées pour le test	Type de sucres comparés	Résultats
I	Sans sucre	Inverti de b.	Bières différenciées
		Candi foncé	Bières différenciées
		Brûlé	Bières différenciées
		Inverti de c.	Bières différenciées
		Cassonade blonde	Bières différenciées
II	Sucre inverti de b.	Candi foncé	Bières non-différenciées
		Brûlé	Bières différenciées
		Inverti de c.	Bières différenciées
		Cassonade blonde	Bières différenciées
III	Sucre candi foncé	Candi foncé 1 ^{ère} et 2 ^{ème} fermentation	Bières non-différenciées
	Sucre brûlé	Brûlé 1 ^{ère} et 2 ^{ème} fermentation	Bières non-différenciées
	Inverti de c.	Inverti de c. 1 ^{ère} et 2 ^{ème} fermentation	Bières non-différenciées
	Cassonade blonde	Cassonade blonde 1 ^{ère} et 2 ^{ème} fermentation	Bières non-différenciées
IV	Sucre candi foncé	Candi foncé avec levure ≠ (T58)	Bières non-différenciées

Tableau 2 : Résultats des tests sensoriels.

L'épreuve I permet de différencier la bière sans sucre ajouté de toutes les autres bières. Lorsqu'on regarde le profil des sucres résiduels des bières en bouteilles, on ne voit pourtant pas de très grande variation entre eux. Les arômes apportés par les réactions de brunissement sont probablement à l'origine de celles-ci.

La bière contenant le sucre inverti de betterave (épreuve **II**) a également été différenciée de tous les autres brassins, sauf de celui contenant le sucre candi foncé. Pourtant le sucre candi foncé est quasiment identique (au niveau du profil de sucre) au brassin n°5 qui lui a bien été différencié de ce brassin n°1. A nouveau, les réactions secondaires sont à incriminer.

Un autre résultat intéressant, est la comparaison entre la brassin n°1 et le brassin n°4. Ces deux sucres, inverti de betterave et de canne, possèdent initialement la même composition chimique. Pourtant ces deux bières ont pu être différenciées. Ceci provient de ce que le sucre apporte avec lui, des réactions de Maillard très présentes dans le brassin n°1 (voir figure n°5), ou de l'addition de ces deux phénomènes.

L'épreuve **IV** nous renseigne sur le fait que les bières contenant le sucre candi mais deux types de levures différentes n'ont pas pu être différenciées.

Ces résultats montrent bien qu'il n'y a pas de corrélation entre le goût et les sucres résiduels fermentescibles. Du moins pas pour des profils de sucres si semblables. Nous sommes ici avec des concentrations variant de 1 à 2 g/L entre les brassins.

Quant à l'épreuve **III**, les bières qui ont seulement eu un sucre différent lors de la deuxième fermentation n'ont pas été distinguées. L'impact gustatif qu'apporte l'ajout de 3g de sucre, une fois inverti et une fois identique à celui de première fermentation, n'a pu être mis en évidence.

4. Conclusion et perspectives

L'analyse qualitative a permis de confirmer que le sucre ajouté lors du brassage entraîne bien un impact au niveau gustatif. Non seulement en comparant des bières avec sucre à d'autres sans sucre ajouté, mais également entre bières avec différents sucres. Il a également été trouvé, que les bières ayant reçu le sucre inverti de betterave et le sucre inverti de canne (sucres possédant la même composition chimique), ont été différenciées.

L'analyse qualitative comparée aux profils de sucres obtenus par HPLC-RI, nous montre que la variation au niveau du goût n'est pas due aux sucres résiduels analysés. Les profils de sucres en bouteilles sont effectivement très semblables. La conclusion de ce résultat est que la différence de goût ne vient pas des sucres résiduels mais sûrement des arômes apportés par les sucres et éventuellement des réactions de brunissement non enzymatique se produisant lors de l'ébullition.

Les analyses quantitatives mettent en évidence l'impact non négligeable des sucres sur la couleur du produit fini. Cette coloration vient de la couleur que le sucre apporte avec lui ainsi que des réactions de Maillard plus ou moins fortes suivant le sucre ajouté. Concernant la résistance à l'oxydation, un sucre, le sucre brûlé, s'est

particulièrement démarqué des autres sucres par la résistance à l'oxydation qu'il apporte à la bière.

Les deux levures utilisées n'ont montré aucune différence significative lors des analyses qualitatives et quantitatives.

En conclusion ; les analyses sensorielles couplées aux analyses de l'HPLC-RI, montrent que les sucres résiduels analysés, n'apportent pas d'influence au niveau du goût de la bière. Néanmoins, que cela soit par la couleur ou par une meilleure résistance à l'oxydation, les sucres qui ont été utilisés pour le brassage, apportent quelque chose à la bière. Les analyses sensorielles ont très clairement permis de montrer qu'une différence de goût peut exister suivant les sucres utilisés.

Au vu de ces résultats, de nouvelles questions attendent des réponses. Il serait intéressant de trouver le type d'arôme se trouvant dans les sucres initiaux, les bières finies, et de pouvoir en tirer les conclusions par rapport aux résultats des tests sensoriels. L'analyse des profils aromatiques pourrait par exemple se faire par chromatographie gazeuse.

L'utilisation pour les tests sensoriels d'un échantillon de sujet plus large, en terme d'âge, de sexe, voire d'experts, serait également intéressant. D'autres sucres, levures peuvent être testés afin de mieux comprendre l'impact qu'ils amènent sur la flaveur de la bière.

5. Sources

- [1] Faiveley M. *Fabrication des bières*. Technique de l'ingénieur. 2010.
- [2] Revy R. *Levures biologiques alimentaires et poudres levantes*. Technique de l'ingénieur. 2005.
- [3] Hardwick W. *Handbook of Brewing*. CRC Press, 1994.
- [4] Boutonnier L. *Glucides et alimentation : aspects physicochimiques*. Technique de l'ingénieur. 2014.
- [5] Graeme M. Walker. *Yest physiology and biotechnology*. Wiley. Chichester (Angleterre). 1998.
- [6] Revy R. *Levures biologiques alimentaires et poudres levantes*. Techniques de l'ingénieur. 2005.
- [7] Depledt F. *Évaluation sensorielle – Manuel méthodologique* (3e éd.). Lavoisier. Paris. 2009.
- [8] Depledt F, Sauvageot F. *Evaluation sensorielles des produits alimentaires*. Technique de l'ingénieur. 2002.
- [9] Lonvaud-Funel A, Renauf V, Strehaiano P. *Microbiologie du vin : bases fondamentales et applications*. Paris. Lavoisier, 2010.
- [10] Briggs E, Boulton A, Peter A. *Brewing Science and practice*. CRC Press. 2000.
- [11] Bauer J, Badoud R, Löliger J. *Sciences et technologie des aliments : principes de chimie*, 2010.

Conception mécanique et mécatronique d'un système de compensation du poids corporel destiné à des fins de rééducation motrice

Ing. R. THIENPONT
ECAM Bruxelles
Dr C. NELSON
University of Nebraska-Lincoln

Les équipements de rééducation motrice traditionnels sont généralement statiques reléguant, de ce fait, les aspects liés à la mobilité "réelle" à des étapes ultérieures du processus de revalidation. Afin de combler ce manque, un concept de système, basé sur une architecture de robot suspendu par câbles, est proposé. Celui-ci permet au patient de se mouvoir librement dans un large espace de travail, tout en lui fournissant un support uniforme.

Mots-clefs : rééducation motrice, robot parallèle à câbles, prototypage.

Traditional body-weight support systems are generally stationary devices, relegating the real-world mobility aspects to later stages of the rehabilitation process. To bridge that gap, a system based on a cable-suspended robot architecture is proposed. This system allows the patient to move freely throughout a large workspace, while providing him uniform body-weight support.

Keywords : walking rehabilitation, cable-based parallel robot, prototyping.

1. Introduction, motivation du projet

La capacité d'un être humain à se mouvoir au sein de son environnement est un aspect fondamental de sa santé et de son bien-être. Parfois, certains facteurs (accidents, maladies, etc.) peuvent handicaper cette mobilité. Heureusement, ces handicaps ne sont pas toujours permanents, et, grâce à des thérapies appropriées, la majorité des personnes touchées parviennent à retrouver, à terme, une mobilité avancée [4].

Cependant, de telles conditions s'accompagnent généralement d'un état d'importante faiblesse musculaire, empêchant les personnes touchées de supporter leur propre poids sans assistance externe, d'où la nécessité d'équipements appropriés. Ces derniers, qu'ils soient statiques (ex. : tapis roulant) ou mobiles (ex. : déambulateurs robotisés), sont généralement encombrants, et, du fait qu'ils l'entourent, empêchent le patient d'approcher des objets communs, et de réapprendre ainsi à effectuer des tâches de la vie quotidienne [5].

Il apparaît donc un clair manque d'équipements discrets avec un large espace de travail, conférant au patient une liberté complète de mouvement et lui permettant de ressentir une mobilité réelle, telle celle vécue au quotidien. Dans cette optique, un système de support partiel du poids corporel, comblant le manque entre les équipements traditionnels "stationnaires" et les phases de révalidation ultérieures, impliquant une mobilité plus avancée, est proposé.

2. Description du concept

Une architecture similaire à celle des robots parallèles suspendus par câbles s'avère appropriée pour une telle application. En effet, celle-ci présente des avantages indéniables, telles la légèreté, la compacité, et la possibilité de couvrir de larges espaces de travail, pour n'en mentionner que quelques-uns [1].

La configuration proposée, ainsi que son implémentation prévue dans une salle de thérapie dédiée, est représentée à la figure 1. Quatre câbles principaux, et autant d'actionneurs (moteurs électriques), sont utilisés. Les 4 coins de la pièce constituent les points d'ancrage du système. Afin de minimiser l'empreinte au sol, les systèmes d'entraînement de chacun des câbles peuvent être montés verticalement sur les parois.

Pour des raisons évidentes d'obstruction vis-à-vis des mouvements du patient, les câbles principaux ne sont pas directement attachés au harnais de celui-ci, mais par l'intermédiaire d'un câble vertical. De plus, moyennant une liaison appropriée (ex. :

pivot), une rotation du patient autour de son axe vertical est ajoutée.

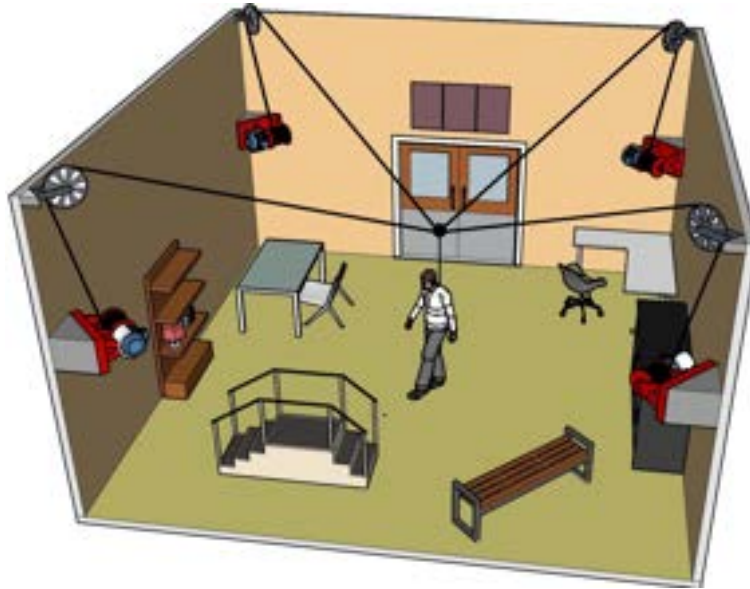


Figure 1 : Implémentation envisagée du système final

2.1. Sous-système de contrepoids passif

Afin de minimiser la puissance des actionneurs, un sous-système de contrepoids (non représenté à la figure 1), couplé au système, est étudié. Celui-ci utilise l'énergie potentielle contenue dans des contrepoids, de manière à compenser la charge verticale du système, tout en maintenant l'équilibre horizontal des forces. Entièrement passif, son réglage s'effectue mécaniquement par l'opérateur avant la session de thérapie, en fonction des besoins de celle-ci (assistance).

Selon la première configuration envisagée, le nombre de degrés de liberté du sous-système de contrepoids est d'une unité inférieur à celui du système lui-même. Dès lors, celui-ci n'est capable de compenser l'entièreté de la charge verticale que pour le niveau horizontal de référence pour lequel il a été dimensionné (2,6 m, cf. figure 2). Pour des niveaux différents, l'équilibre des forces est maintenu moyennant un effort supplémentaire des actionneurs.

Sa conception et réalisation faisant partie du travail de fin d'études d'un autre étudiant, et non de celui-ci, ce sous-système ne sera pas davantage abordé.

3. Prototype plan

Partant d'une feuille blanche, la conception d'un premier prototype grandeur nature, sur base d'un cadre préexistant, fut directement envisagée. D'une part, cela permet d'évaluer précisément les performances et capacités du système, et d'autre part, ce dernier étant destiné à assister des individus, un modèle réduit fut jugé moins pertinent.

Cependant, ce prototype ne sera qu'une version bidimensionnelle du système, voire unidimensionnelle dans un premier temps, compte tenu de la contrainte du niveau de référence. Il autorisera seulement le patient à se déplacer selon l'axe horizontal, dans un espace de travail constitué par le plan vertical, tout en supportant une fraction déterminée de son poids. En effet, les objectifs principaux poursuivis consistaient à réaliser avant tout une preuve de concept raisonnable, ainsi qu'une base expérimentale pour de futurs prototypes plus évolués.

L'architecture de ce prototype est représentée à la figure 2. Des deux points d'ancrage partent deux câbles principaux. Ceux-ci se rejoignent en un point d'attache, situé à la verticale du patient, duquel part un câble vertical vers le harnais du patient.

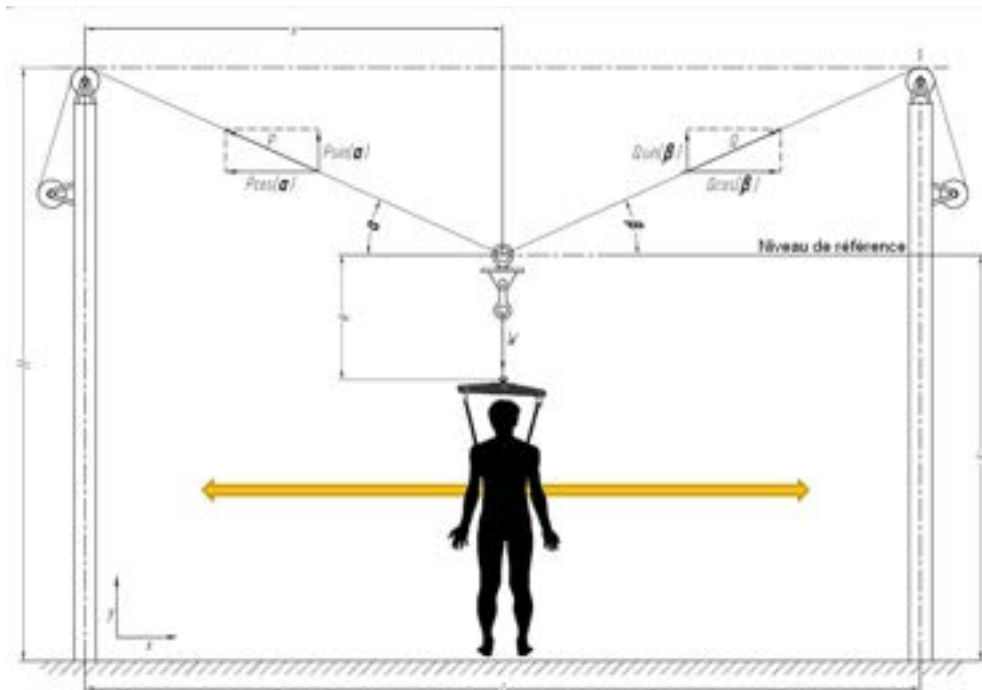


Figure 2 : Architecture simplifiée du prototype plan

3.1. Spécifications principales du prototype

Une des premières étapes du projet consistait à élaborer le cahier des charges du prototype. Au sein de celui-ci, trois éléments principaux peuvent être distingués : la charge et la vitesse de déplacement maximale admissible, ainsi que les dimensions de l'espace de travail. Ces dernières sont cependant fixées par le cadre préexistant, à savoir 3,64 x 3,65 m (L x H).

Afin de s'adapter à des personnes de différentes morphologies, la charge maximale du système fut définie arbitrairement à 100 kg. Rappelons ici que seule une fraction du poids du patient est supportée par le système. En ce qui concerne la vitesse maximale de déplacement horizontal admissible, cette dernière fut limitée à 1,5 m/s (5,4 km/h), valeur déjà particulièrement élevée dans un cadre de revalidation.

3.2. Hypothèses de travail

La modélisation du système, que ce soit à des fins de dimensionnement mécanique, ou de contrôle, est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, la plus importante étant celle de quasi-staticité du système.

Cette hypothèse peut paraître extrême, tant elle simplifie les calculs, nous en sommes conscients. Cependant, le nombre d'inconnues restantes à ce stade, la dynamique lente du système (déplacements du patient), ainsi que son inertie réduite, légitiment celle-ci.

En effet, se cantonnant à un rôle strict de support du patient, le système ne doit pas intervenir dans son déplacement, que ce soit en l'accélérant, ou en le freinant. L'inertie de la charge (patient) peut donc être négligée, et ne subsiste que celle du système lui-même, faible en l'absence du sous-système de contrepoids toujours à l'étude.

4. Système d'entraînement

Comme expliqué précédemment, le nombre de systèmes d'entraînement nécessaires est égal au nombre de câbles principaux, soit deux dans le cadre du prototype. Leur rôle est de compenser les imperfections du sous-système de contrepoids, de manière à maintenir l'équilibre des forces.

4.1. Dimensionnement mécanique

Sur base des hypothèses établies et des modèles simplifiés du système lui-même et du sous-système de contrepoids, un dimensionnement mécanique simplifié fut réalisé dans l'optique de déterminer les deux principales grandeurs dimensionnantes, à savoir le couple mécanique et la vitesse de rotation.

Le couple mécanique fut calculé sur base des équations liant la tension des câbles et la position du patient, tandis que la vitesse de rotation fut calculée sur base de la dérivée de la longueur des câbles (vitesse tangentielle) en fonction de la position du patient. La puissance mécanique, dépendant des deux grandeurs précédentes, est obtenue en effectuant le produit de celles-ci.

Le tableau 1 fixe l'ordre de grandeur des valeurs maximales de ces trois paramètres.

Tableau 1 : Grandeurs mécaniques : ordre de grandeur

Couple [Nm]	Vitesse de rotation [rpm]	Puissance mécanique [W]
30	140	430 (peak) - 300 (RMS)

4.2. Exigences supplémentaires

Les seules grandeurs mécaniques ne suffisant évidemment pas à la sélection d'un système d'entraînement, d'autres exigences ont dû être définies, tels les modes de contrôle (couple et position), la connectivité du variateur, la technologie de moteur, le type de capteur de retour, etc. De plus, en raison de la faible vitesse de rotation et du couple important demandé, une boîte de vitesse s'avérait indispensable.

Il était avant tout souhaitable de sélectionner un système facile à installer, à mettre en service, ainsi qu'à utiliser, tout en étant polyvalent. Cette dernière exigence s'inscrit dans un cadre plus large, notamment afin de pouvoir réutiliser le système d'entraînement pour les futurs prototypes. Enfin, s'agissant d'un projet de recherche disposant d'un budget non illimité, le prix était également un critère discriminant.

4.3. Processus de sélection

Diverses solutions furent étudiées, un cahier des charges fut rédigé, et de nombreuses demandes de devis furent envoyées à différents distributeurs. Trois offres pertinentes parmi celles reçues furent ensuite comparées. Le tableau 2 présente un résumé de

cette comparaison avec les principaux critères retenus.

Tableau 2 : Comparaison d'offres

	Kollmorgen AKD & VLM	JVL MAC 800	Bosch Rexroth Indra
Marge de vitesse	- 6%	+ 6%	+18%
Marge de couple	+39%	+44%	+5%
Capteur de retour	Encodeur incrémental	Encodeur incrémental	Encodeur absolu
Connectivité	Modbus - CANOpen - EtherCAT	RS422	Multi-Ethernet (incl. Sercos III)
Commande analogique	+++	+	++
Facilité d'installation	+ / ++	+++	+ / ++
Confort d'utilisation	+++	++	+
Options incluses	+++	++	+
Prix	\$ 6388.32	\$ 6630.05	\$ 6517.48

L'offre retenue fut le système d'entraînement Kollmorgen (représenté à la figure 3), principalement en raison de sa polyvalence, facilité d'utilisation et intuitivité. Cette offre était également la plus complète, pour un prix moindre. Il est à noter que le léger déficit en vitesse n'est pas pénalisant, en raison de l'importante marge de couple disponible, autorisant un fonctionnement en légère survitesse.



Figure 3 : Kollmorgen AKD & VLM Drive System [3]

5. Stratégie et structure de contrôle

5.1. Stratégie de contrôle

Le développement d'un système de contrôle s'intégrait également dans ce travail de fin d'études. L'objectif principal de celui-ci est de piloter le système de manière à ce que ce dernier suive le patient tout en supportant une fraction constante de son poids, pendant que celui-ci effectue des exercices de réhabilitation.

Deux sous-objectifs de contrôle peuvent dès lors être identifiés :

- Suivi du patient.
- Support uniforme d'une fraction déterminée de son poids.

Pour satisfaire ceux-ci, de nombreuses stratégies de contrôle peuvent être envisagées. Celle retenue consiste à traiter les deux sous-objectifs de contrôle de manière totalement indépendante, sur base de :

- **La mesure de l'angle de déflexion du câble vertical.** En effet, si le patient tend à se déplacer et que le système reste immobile, un angle se crée (figure 4), angle qu'il convient d'annuler pour assurer le suivi.
- **La mesure de la tension dans le câble vertical.** Celle-ci reflète directement la fraction du poids du patient supportée par le système.

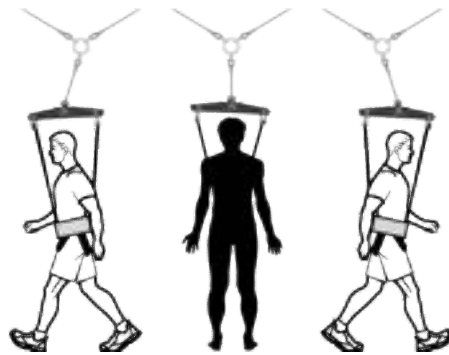


Figure 4 : Principe du suivi sur base de la mesure de l'angle de déflexion

Ainsi, les sous-objectifs de contrôle sont satisfaits de la manière suivante :

- **Suivi** : le système de contrôle incrémente ou décrémente la coordonnée x (horizontale) du point d'attache des câbles principaux de manière à maintenir l'angle de déflexion du câble connectant ce point et le harnais du patient nul.
- **Support uniforme** : le système de contrôle incrémente ou décrémente la coordonnée y (verticale) du point d'attache des câbles principaux de manière à maintenir la tension dans le câble vertical à sa valeur de consigne.

5.2. Structure de contrôle

La structure de contrôle en cascade simplifiée est présentée à la figure 5.

Sur base des grandeurs mesurées, c'est-à-dire la tension (W_{mes}) et l'angle de dé-

flexion (A_{mes}) du câble vertical, le système de contrôle calcule, via deux régulateurs PI, une position de consigne du point d'attache (x_{sp} , y_{sp}), de manière à atteindre les valeurs de consigne de ces deux paramètres, à savoir W_{sp} et A_{sp} (nul).

Dans le cadre de cette structure de contrôle, il fut choisi de contrôler les deux systèmes d'entraînement en position. Cependant, cette consigne de position ne peut être envoyée telle quelle aux variateurs de fréquence. Ceux-ci travaillant dans un espace linéaire, ils ne peuvent interpréter une consigne bidimensionnelle.

Celle-ci est donc convertie, via un calcul matriciel, en longueurs de câbles principaux correspondantes ($L1_{sp}$ et $L2_{sp}$), qui sont alors, envoyées aux variateurs sous forme analogique.

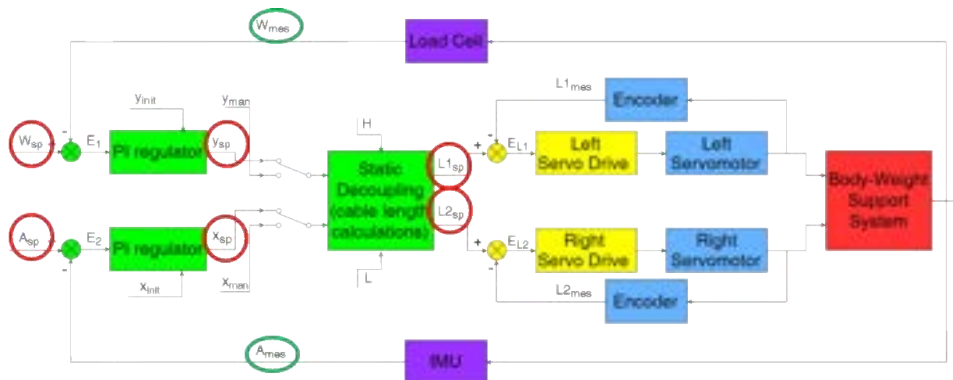


Figure 5 : Structure de contrôle simplifiée

6. Capteur sans fil et contrôleur

6.1. Capteur sans fil

La stratégie de contrôle, ainsi que les grandeurs mesurées et contrôlées, fut exposée au point 5.1. Cependant, la manière dont celles-ci sont mesurées n'a pas été explicitée. Afin de mesurer à la fois l'angle de déflexion du câble vertical, ainsi que la tension dans celui-ci, un capteur inédit fut développé (figure 6).

Ainsi, la tension dans le câble est mesurée via un capteur de force (type en "s"), tandis que l'angle de déflexion est mesuré à l'aide d'une petite centrale inertielle (IMU), dont le référentiel (inertiel) est extérieur au capteur. Ces mesures "brutes" sont collectées par une carte Arduino Uno, qui les conditionne ensuite, de manière à

les rendre exploitables par le contrôleur principal.

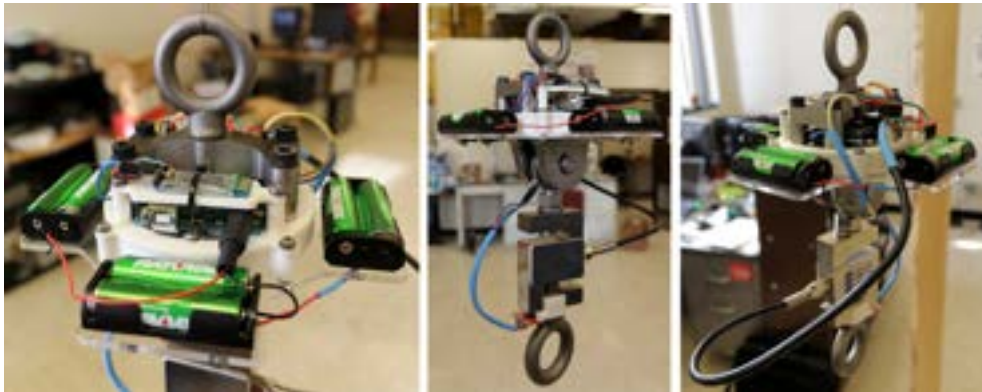


Figure 6 : Prototype de capteur réalisé

En effet, en ce qui concerne la centrale inertielle, par exemple, l'angle de déflexion peut-être mesuré de deux manières différentes. La première méthode consiste à n'utiliser que les accéléromètres. Les mesures sont alors précises, fiables dans le temps, mais fortement bruitées, en raison de la sensibilité des accéléromètres. Par conséquent, elles sont difficilement interprétables telles quelles par le contrôleur. La seconde méthode, elle, consiste à n'utiliser que les gyroscopes. Les mesures sont alors beaucoup plus propres et "douces", mais les gyroscopes dérivant dans le temps, elles finissent par devenir erronées après un certain temps.

Pour pallier ces défauts, la solution mise en place consiste à combiner les deux solutions, à savoir la précision et fiabilité des accéléromètres avec la qualité de signal des gyroscopes à l'aide d'un filtre de Kalman. Sur base de résultats expérimentaux, une comparaison entre ces méthodes est illustrée à la figure 7.

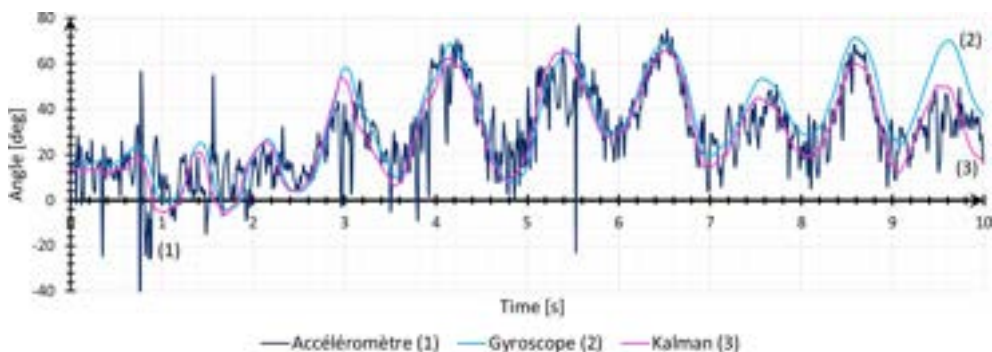


Figure 7 : Mesures d'angle : comparaison des différentes méthodes

Remplissant également les fonctions mécaniques de point d'attache entre les câbles principaux et le câble vertical connecté au harnais du patient, le capteur fut logiquement dimensionné aux efforts. De plus, en raison de sa position et mobilité, il fut jugé nettement plus ergonomique de le rendre complètement autonome, via un fonctionnement sur batteries (environ 30h d'autonomie) et une transmission sans fil (Bluetooth) avec le contrôleur principal.

6.2. Contrôleur

Basé sur une carte Arduino MEGA, le contrôleur principal (figure 8), conçu et réalisé par nos soins, est le "cerveau" du prototype. À partir des données transmises par le capteur sans fil, des paramètres du système, et de la consigne de support imposée par l'opérateur, le contrôleur détermine les consignes de position à envoyer aux variateurs de fréquence des servomoteurs, sous forme analogique, pour des raisons de facilité. En effet, les cartes Arduino ne supportent pas nativement les protocoles industriels usuels. Les implémenter est toutefois possible, mais aurait été beaucoup trop complexe à réaliser dans le cadre de ce travail.

Outre la carte Arduino elle-même, dans laquelle la structure de régulation est implémentée sous forme logicielle, le contrôleur comprend tous les équipements nécessaires à son fonctionnement. Ainsi, un panneau de commande, comprenant un écran LCD, différents boutons poussoir, deux encodeurs rotatifs et un potentiomètre, permet à l'opérateur de régler et commander le système, tout en consultant ses paramètres principaux en temps réel.



Figure 8 : Contrôleur réalisé / interface de commande

La carte Arduino MEGA étant incapable de générer de véritables signaux analogiques, mais uniquement des signaux PWM, un convertisseur numérique-analogique (DAC) fut utilisé pour générer les signaux simples analogiques de commande des va-

riateurs. Ces derniers travaillant en signalisation différentielle, un convertisseur signal simple (0-5V) vers différentiel ($\pm 5V$) fut également développé en interne. Ce type de signalisation présente des avantages indéniables en termes de rapport signal/bruit et de robustesse aux perturbations externes [2].

Caractéristiques additionnelles

Les cartes Arduino ne répondent pas aux mêmes standards et exigences que les automates industriels. Cependant, elles présentent d'indéniables qualités (prix, facilité d'utilisation, fonctionnalités...) dans le cadre de projets de recherche et de prototypage. Afin de pallier ce manque, une attention toute particulière fut apportée au développement du logiciel de contrôle, via l'intégration de plusieurs fonctionnalités :

- Modes manuels et automatiques. En mode automatique, le système suit et assiste le patient suivant la consigne de support donnée par le thérapeute. En mode manuel, ce dernier contrôle la position (x,y) du point d'attache du patient ("jog mode").
- Transition sans à-coups entre les modes automatique et manuel.
- Menu de configuration arborescent, permettant à l'opérateur d'ajuster les différents paramètres du contrôleur.
- Réinitialisation à distance de la centrale inertielle et tarage du capteur de force, pour corriger des décalages, par exemple.
- Fonctions de sécurité : limitations, saturations, contrôle de la liaison Bluetooth, etc. Celles-ci préviennent une mauvaise utilisation du système, en dépassant ses limites, ou en introduisant des paramètres erronés, par exemple.
- Routine de mémorisation des paramètres et de l'état du système dans la mémoire morte (EEPROM) de l'Arduino MEGA. Par défaut, cette dernière ne mémorise aucune donnée dans sa mémoire morte. En d'autres termes, toutes les modifications de paramètres effectuées pendant le fonctionnement du système sont perdues lors de sa mise hors tension, ce qui s'avère particulièrement gênant. Pour surmonter cet inconvénient, une routine fut développée, de manière à forcer, à la demande de l'opérateur, la mémorisation des paramètres. Ces derniers sont automatiquement rechargés au prochain démarrage du système.

7. Installation et mise en service du système d'entraînement

Ce travail de fin d'études ayant été réalisé sur une période restreinte d'environ 5 mois, les contraintes de temps furent importantes. Les systèmes d'entraînement Kollmorgen, ainsi que leurs accessoires, ayant été livrés tardivement, il ne fut pas possible de compléter leur intégration et réglage endéans les délais impartis.

Dès leur réception, un panneau électrique (figure 9) fut réalisé, incorporant les variateurs de fréquence, ainsi que tous les accessoires requis pour leur fonctionnement en toute sécurité (fusibles Ferraz Shawmut, contacteurs, filtres, alimentation 24V auxiliaire, connecteurs, etc.). Le câblage, mise à la terre, et blindage, furent réalisés suivant les recommandations du fabricant.



Figure 9 : Système d'entraînement (panneau électrique)

8. Essais réalisés

La construction du prototype n'ayant pu être achevée à temps, les aspects liés à son réglage et optimisation ne purent être abordés. La majorité des essais effectués eurent alors pour principal objectif de valider le fonctionnement des différents composants développés (capteur, contrôleur) ou achetés (système d'entraînement).

En ce qui concerne le contrôleur, par exemple, des essais furent menés afin de certifier le fonctionnement correct de celui-ci, en adéquation avec les résultats de simulations

obtenues à l'aide des logiciels Simulink (contrôle) et NI Multisim (convertisseur), ainsi qu'avec la table de corrélation théorique, établissant la relation entre les longueurs de câbles et les niveaux de tension des sorties analogiques. Les fonctions implémentées, y compris celles de sécurité, subirent également différents tests, de manière à déceler d'éventuelles anomalies.

Au niveau du système d'entraînement, seuls des essais à vide avec des paramètres de base furent effectués, et ce principalement afin de s'assurer du comportement correct de toute la chaîne de contrôle (capteur, contrôleur, système d'entraînement). Bien que les aspects relatifs à la performance du système ne purent être testés, la commande analogique répondit aux attentes, en termes de précision et de clarté de signal.

9. Conclusions

Chargés, en janvier 2016, de concrétiser l'idée originelle du concept, nous fûmes capables de poser de solides fondations pour ce passionnant projet de système de compensation du poids corporel doté d'une architecture à câbles. La conception et la réalisation partielle d'un premier prototype plan firent appel à de nombreux domaines d'ingénierie, et requièrent créativité, organisation, rigueur et polyvalence.

Après nous être imprégnés du projet et de ses objectifs, une méthodologie de travail fut élaborée. La majeure partie du travail fourni fut dédiée aux aspects mécaniques du projet, notamment à travers la réalisation complète du système de contrôle, ainsi qu'au dimensionnement et choix du système d'entraînement. Par rapport à ceux-ci, différentes solutions furent étudiées. Les plus pertinentes furent retenues, mais il est évident que ce ne sont pas les seules qui auraient pu convenir.

Bien qu'il fut frustrant de ne pouvoir compléter la construction du prototype, et d'ainsi pouvoir le tester réellement, en-deans les délais impartis, nous fûmes à même de certifier le fonctionnement correct des équipements développés. De nombreux aspects restent bien évidemment à améliorer, mais l'essentiel consistait ici à valider les choix techniques effectués, ainsi que les directions de développement retenues.

À ce titre, rappelons que les deux principaux objectifs poursuivis étaient la réalisation d'une preuve de concept raisonnable, ainsi que le développement d'une base expérimentale pour de futurs prototypes. La performance n'était donc pas de prime importance à ce stade du projet.

10. Travail futur

Le projet s'étalant sur plusieurs années, il est évident que d'innombrables tâches restent encore à réaliser avant d'envisager une industrialisation, voire une commercialisation de celui-ci. En limitant nos explications aux étapes à court-terme, il conviendra tout d'abord d'achever la construction du prototype, ainsi que l'intégration du système d'entraînement. Il sera alors possible d'en évaluer le comportement (méthodes d'identification expérimentales) à des fins de contrôle et de réglages. Nous nous attendons d'ailleurs à ce que cette étape soit particulièrement laborieuse.

Le système étant suffisamment puissant pour pouvoir blesser des individus en cas de défaut ou de mauvaise utilisation, un travail approfondi sera également à réaliser en ce qui concerne les aspects liés à la sécurité du prototype. A long terme, les standards médicaux devront pouvoir être satisfaits.

Le développement et l'intégration du sous-système de contrepoids, réalisés par un autre étudiant, sont également à l'ordre du jour à court-terme. Le comportement du système s'en trouvera fondamentalement modifié, ce qui nécessitera une nouvelle optimisation des paramètres. Enfin, si les résultats obtenus à l'aide du prototype bidimensionnel s'avèrent conformes aux attentes, une version tridimensionnelle, telle qu'envisagée à terme, sera alors développée.

Sources

- [1] BASAR, A. & AGRAWAL, S. K., « Cable Suspended Robots : Feedback Controllers with Positive Inputs », in : *American Control Conference*, University of Delaware, Newark, DE, U.S.A., février 2002.
- [2] HERRERA, S. & GERSTENHABER, M., *Versatile, Low-Power, Precision Single-Ended to Differential Converter*, rapp. tech., Analog Devices, octobre 2012.
- [3] KOLLMORGEN, *VLM Brushless Motor Selection Guide with AKD Servo Drive Systems*, Radford, VA, USA, 2014.
- [4] MA, O. ET AL., « Dynamically Removing Partial Body Mass Using Acceleration Feedback for Neural Training », in : *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, juin 2007.
- [5] NELSON, C., THIENPONT, R. & SHINDE, A., « Planar Pose-Independent Counterweighting of Cable-Suspended Payloads with Application to Rehabilitation », in : *6th European Conference on Mechanism Science (EUCOMES)*, Nantes, France, septembre 2016.

Conception d'un système d'aspiration Venturi pour les épandeurs de lisier

Ing. J. GABRIEL
Dr Ir V. HANUS
PIERRARD –Virton

Cet article traite de l'étude technique et de la réalisation d'un système d'aspiration Venturi à installer sur les épandeurs de lisier. Ce travail a été mené au sein de l'entreprise JOSKIN S.A. à Soumagne. L'objectif était d'étudier le comportement d'un fluide dans une conduite qui voit sa section varier en différents points et d'utiliser ce concept comme système d'aspiration.

Mots clefs : Venturi, épandeur de lisier, système d'aspiration, dépression, fluide, pompe centrifuge.

This article discusses of the technical study and the realization of a Venturi suction system to install on the slurry spreaders. This work was carried out within the company JOSKIN S.A. in Soumagne. The aim was to study the behavior of a fluid in a pipe which sees its section vary at different points and to use this concept like aspiration system.

Keywords : Venturi, slurry spreader, suction system, depression, fluid, centrifugal pump.

1. Introduction

En matière de système d'aspiration pour les épandeurs de lisier, la clientèle de la société JOSKIN a toujours souhaité les techniques les plus simples, les plus efficaces et les moins coûteuses. C'est la raison pour laquelle un nouveau système d'aspiration basé sur l'effet Venturi a été développé.

De manière générale, pour pouvoir fonctionner, des machines de haute capacité combinent l'utilisation de deux pompes, une dédiée à aspirer le liquide et une autre servant à l'épandre. Pour pouvoir répondre aux objectifs fixés, le travail consistait à concevoir un système d'aspiration permettant de n'utiliser qu'une seule et même pompe pour aspirer et épandre le fluide.

2. Approche théorique

2.1. Théorème de Bernoulli [1]

L'effet Venturi est un phénomène physique qui, suite au rétrécissement d'une conduite engendrant l'accélération d'un fluide, provoque une dépression dans une zone précise.

Daniel Bernoulli a décrit le principe de l'effet Venturi de la manière suivante : lorsque la vitesse d'un fluide augmente, la pression qu'il exerce diminue (voir équation de Bernoulli ci-dessous). Cela veut donc dire que si la vitesse d'un fluide incompressible varie, il y a une différence de pression.

$$\frac{1}{2} * \rho * c^2 + \rho * g * h + p = cste \quad (1)$$

où

- p : pression [Pa],
- ρ : masse volumique du fluide [kg/m³],
- c : vitesse du fluide [m/s],
- g : accélération de la pesanteur [m/s²], et
- h : altitude [m].

2.2. Composants du système

Pour pouvoir installer un système de pompage Venturi sur un épandeur de lisier, celui-ci doit obligatoirement être composé :

- d'une pompe centrifuge,
- d'un réservoir de fluide,
- d'un circuit composé de 2 Venturi,
- d'un bras de pompage.

Afin de réaliser l'opération de pompage, le circuit est alimenté par une pompe centrifuge. Pour fonctionner, la pompe doit être amorcée. Cet amorçage est assuré par un petit réservoir de lisier intégré dans l'épandeur. Une fois la pompe centrifuge remplie de lisier, elle le transfère au circuit composé de deux Venturi disposés l'un à la suite de l'autre (voir figure 1).

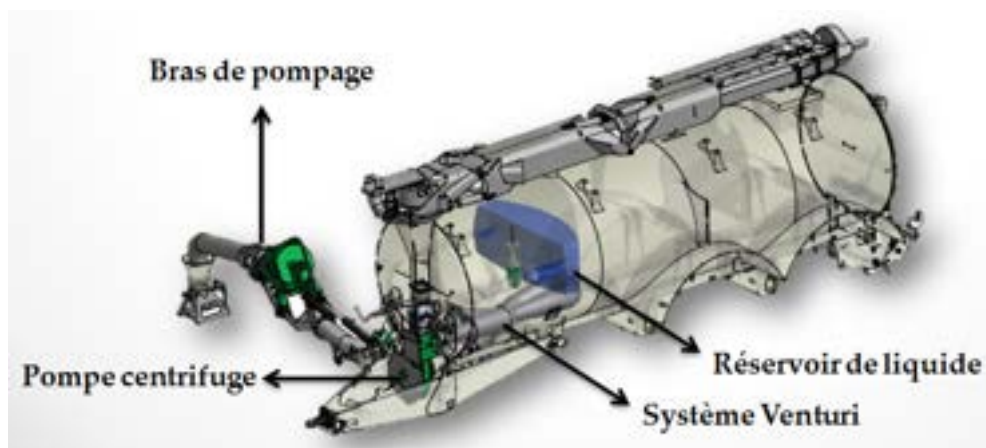


Figure 1 : Composants du système d'aspiration Venturi

La zone de dépression est reliée directement au bras de pompage. Lorsque cette dépression est suffisante, le lisier de la citerne est amené dans la cuve et le remplissage de celle-ci se réalise. Comme le réservoir de départ ne sert qu'à amorcer la pompe, une fois celui-ci vide, c'est le lisier déjà pompé qui sert à alimenter la pompe centrifuge et ce, jusqu'au remplissage complet de la cuve.

Sur la figure 2, la conduite d'entrée (« sortie de la pompe centrifuge ») est directement reliée à la pompe centrifuge et la sortie (« entrée dans la cuve ») correspond à la conduite d'arrivée dans la cuve. Le tuyau de pompage est raccordé à l'entrée « conduite d'aspiration ».

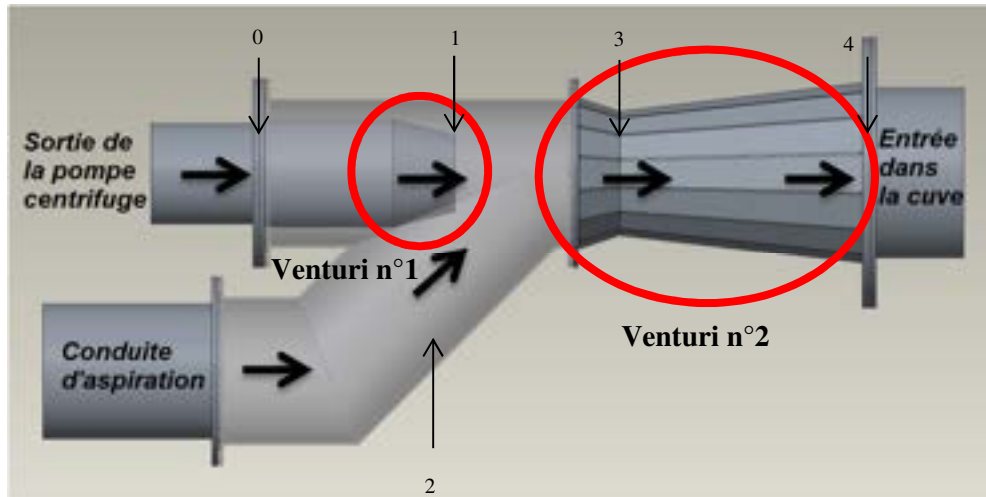


Figure 2 : Illustration des deux Venturi et division du système

Le premier Venturi permet de créer la dépression dans le bras de pompage et de communiquer l'énergie cinétique nécessaire pour mettre le fluide en mouvement. Le second Venturi permet d'expulser le lisier sous pression vers la cuve. Le deuxième Venturi doit pouvoir vaincre la pression atmosphérique ainsi que la hauteur maximale (diamètre de la cuve) que le fluide doit atteindre.

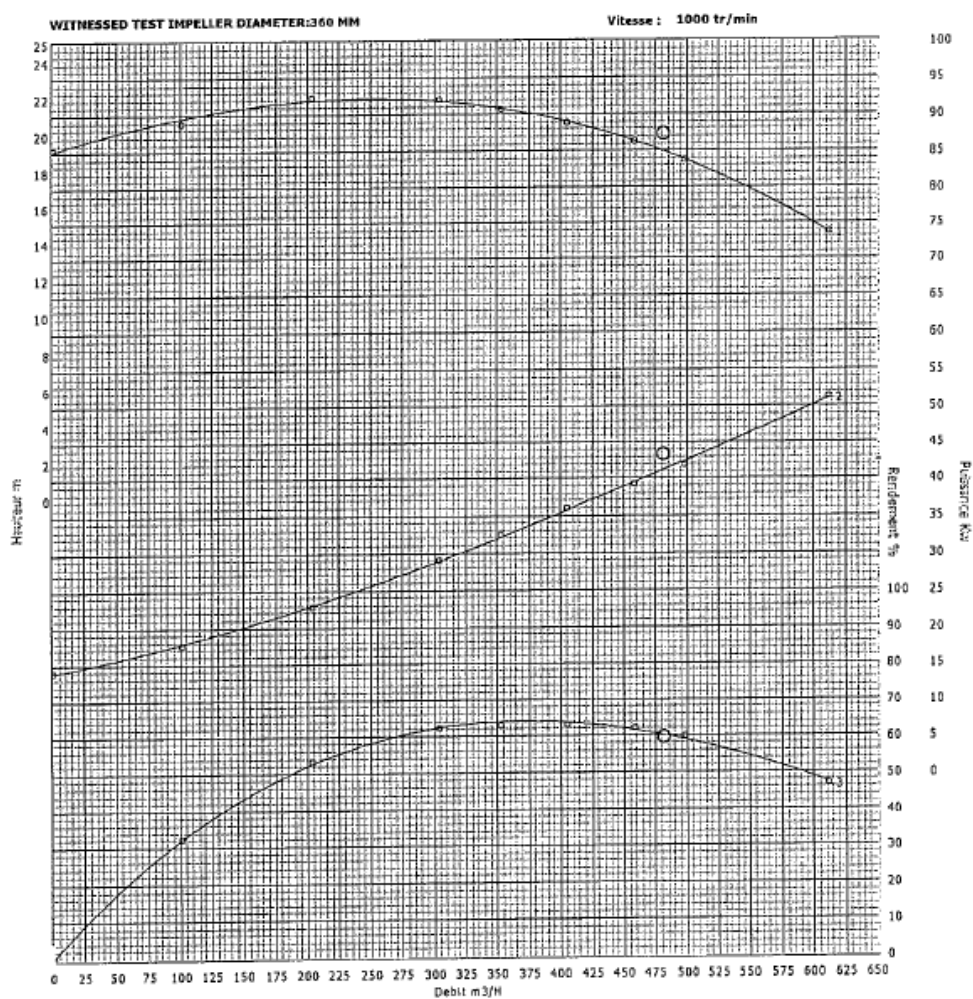
2.3. Modélisation du système [2, 3, 4]

Pour pouvoir modéliser le système d'aspiration Venturi, celui-ci a été divisé en 5 parties (voir figure 2).

C'est sur des caractéristiques de la pompe centrifuge (voir graphique 1) intégrée au système que se base la modélisation de celui-ci. Les caractéristiques principales de la pompe à environ 1000 tr/min avec pour amorçage une hauteur de fluide de 2,07 m sont les suivantes :

Hauteur manométrique totale : 18,51 m
 Débit volumique : 497,13 m³/h
 Puissance de la pompe mesurée : 45900 W
 Puissance de la pompe théorique : 41860 W
 Rendement de la pompe : 59,97 %

Comme le lisier est un fluide dont la densité est variable d'un type à l'autre, les calculs sont considérés sur base de la densité de l'eau (1000 kg/m³), qui est le fluide correspondant le plus au lisier.



Graphique 1 : Courbes d'essais de la pompe centrifuge

La pression obtenue à la sortie de la pompe centrifuge peut se calculer à partir de la formule suivante :

$$p = \rho * g * h_{\text{manométrique totale}} \quad (2)$$

où

- $h_{\text{manométrique totale}}$: hauteur manométrique totale [m].

Les pressions qu'il est possible d'obtenir au niveau des deux Venturi peuvent être déterminées via la formule de Bernoulli qui, pour un système disposé horizontalement, se définit comme suit :

$$\frac{p_1}{\rho * g} + \frac{c_1^2}{2 * g} = \frac{p_2}{\rho * g} + \frac{c_2^2}{2 * g} \quad (3)$$

où

- p_1 et p_2 : pressions avant et après le convergent/divergent [Pa], et
- c_1 et c_2 : vitesses avant et après le convergent/divergent [m/s].

Un Venturi peut également être comparé à une tuyère. Il est possible de déterminer les vitesses du fluide sur base de l'enthalpie massique en un point (0) situé avant le convergent en fonction d'un autre point (1) situé dans le convergent :

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2} \quad (4)$$

où

- h_0 et h_1 : enthalpies massiques aux différents points [J/kg].

Le débit massique peut donc être déterminé à partir de la connaissance du débit volumique et de la densité du fluide :

$$\dot{m} = \rho * q \quad (5)$$

où

- \dot{m} : débit massique [kg/s], et
- q : débit volumique [m³/s].

D'après le principe de conservation de la quantité de mouvement, certaines caractéristiques du second Venturi ont pu être déterminées:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (6)$$

$$\dot{m}_1 * \left(\frac{h_1 + c_1^2}{2} \right) + \dot{m}_2 * \left(\frac{h_2 + c_2^2}{2} \right) = \dot{m}_3 * \left(\frac{h_2 + c_2^2}{2} \right) \quad (7)$$

$$\dot{m}_1 * c_1 + \dot{m}_2 * c_2 = \dot{m}_3 * c_3 \quad (8)$$

où

- h_1, h_2 et h_3 : enthalpies massiques aux différents points [J/kg].

Pour que les résultats théoriques soient les plus proches des résultats pratiques, les pertes de charges linéaires et singulières ont été calculées.

Les pertes de charge linéaires ($\Delta p_{linéaire}$) en Pascal, se déterminent via la formule suivante :

$$\frac{\Delta p_{linéaire}}{\rho * g} = f * \left(\frac{l}{d}\right) * \left(\frac{c^2}{2 * g}\right) \quad (9)$$

où

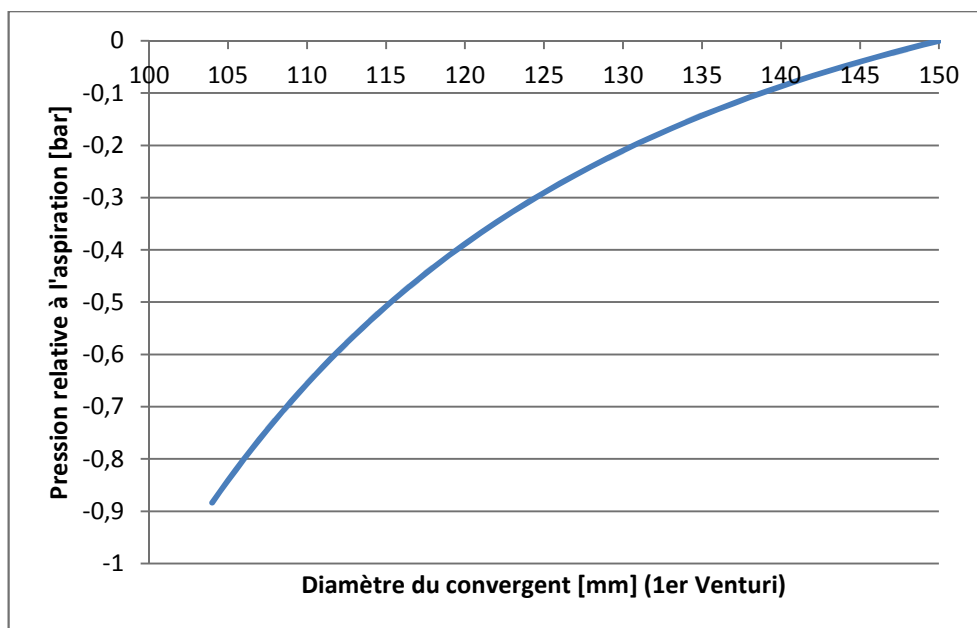
- f : facteur de friction de Darcy,
- l : longueur de la conduite [m], et
- d : diamètre de la conduite [m].

Les pertes de charge singulières ($\Delta p_{singulière}$) en Pascal, se déterminent via la formule suivante :

$$\Delta p_{singulière} = \left(\frac{K * c^2}{2 * g}\right) * \rho * g \quad (10)$$

où

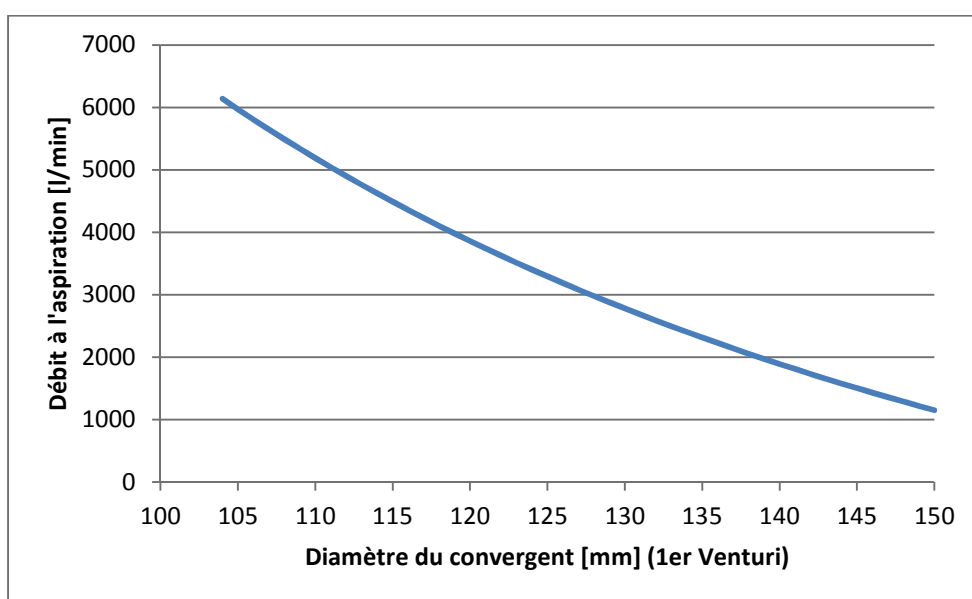
- K : coefficient de résistance, et
- $h_{singulière}$: longueur [m].



Graphique 2: Variation de la pression à l'aspiration en fonction du diamètre du 1er Venturi

Après avoir calculé l'ensemble des caractéristiques du système, ainsi que les pertes de charges linéaires et singulières, il est possible de représenter graphiquement la variation de la pression et du débit à l'aspiration en fonction du diamètre du premier Venturi. On peut donc remarquer sur le graphique 2, que la dépression est de plus en plus faible lorsque le diamètre du Venturi augmente.

Sur le graphique 3, on constate que plus le diamètre du Venturi augmente, plus le débit à l'aspiration est réduit.



Graphique 3 : Variation du débit à l'aspiration en fonction du diamètre du 1er Venturi

3. Réalisation du système d'aspiration Venturi [5]

Après avoir déterminé par calcul les caractéristiques des deux Venturi, il est possible de commencer la réalisation des dessins 3D du système et de lancer un modèle en production. Ce dernier a été réalisé avec un diamètre du convergent de 104 mm.

Afin de réaliser un essai réel, un épandeur de lisier équipé d'une pompe centrifuge identique à celle utilisée pour effectuer les calculs théoriques du système Venturi a été utilisé. Pour pouvoir mesurer un maximum de variables lors des essais, plusieurs manomètres et débitmètres ont été installés sur les différentes conduites du système.

Les essais pratiques ont prouvé l'efficacité du système malgré une petite différence avec les résultats théoriques obtenus suite à certains éléments qui variaient d'une situation à l'autre (longueur des conduites, faibles fuites, ...). En pratique il est possible d'obtenir une dépression maximale de 0,65 bar avec un débit à l'aspiration de 4600 l/min.

Le système d'aspiration Venturi assure un débit maximal à l'aspiration de 4600 l/min, avec une vitesse de rotation de la pompe centrifuge de 1000 tr/min, ce qui équivaut à un système de pompage traditionnel dans les mêmes conditions.

Cependant, un système d'aspiration traditionnel doit obligatoirement être accompagné d'une centrale hydraulique car les débits d'huile nécessaires au fonctionnement de celui-ci sont très importants (un tracteur seul est incapable de fournir la quantité d'huile nécessaire pour un fonctionnement optimal du système d'aspiration).

Le coût général d'un système traditionnel s'élève à environ 14000 €, tandis que celui du système Venturi est d'environ 8000 €. Le coût général comprend le bras de pompage, le système d'aspiration et les différents accessoires qui y sont liés.

La différence de coût entre les deux systèmes s'élève à environ 6000 €. Cette somme représente donc le gain réalisé grâce au système Venturi. En effet, le système Venturi ne nécessite pas de centrale hydraulique et n'utilise qu'une seule pompe pour fonctionner, ce qui représente d'énormes économies et simplifie très fortement la conception des épandeurs de lisier.



Figure 3 : Représentation d'un épandeur de lisier équipé d'un système d'aspiration traditionnel



Figure 4 : Représentation d'un épandeur de lisier équipé d'un système d'aspiration Venturi

Les figures 3 et 4 représentent l'aspect extérieur (sans bras de pompage) d'un épandeur de lisier équipé d'un système d'aspiration traditionnel et d'un système d'aspiration Venturi. On peut donc remarquer visuellement que le système d'aspiration Venturi simplifie fortement l'extérieur des machines.

4. Conclusion et perspectives

Le système d'aspiration Venturi possédant des capacités de débit à l'aspiration similaires au système traditionnel, cela lui procure de nombreux avantages :

- insensibilité aux corps étrangers dans le fluide ;
- longévité et efficacité constantes ;
- faibles coûts de maintenance ;
- remplissage optimal de la cuve (pas de dilatation du fluide) ;
- système facilement adaptable aux différents éléments de pompage (flèche dorsale, bras de pompage,...) ;
- coût général de production plus faible.

Le système d'aspiration Venturi est simple et est presque intégralement incorporé à l'intérieur de la cuve des épandeurs de lisier. C'est également sa simplicité d'utilisation, sa flexibilité, son coût général et son coût de maintenance relativement faibles qui font du système d'aspiration Venturi un moyen de pompage plus avantageux.

De manière générale, les résultats obtenus tant au niveau technique qu'économique sont plus que satisfaisants. Néanmoins, une étude financière plus complète sera requise pour tenir compte des éléments nécessaires au fonctionnement de la machine complète (consommation d'énergie du tracteur, ...).

Au niveau des pistes d'amélioration pour la modélisation du système, il serait intéressant de détailler l'efficacité du système et ce, grâce à la détermination de l'efficacité isentropique des deux Venturi. De plus, un modèle plus complet de la machine doit être envisagé pour pousser les résultats encore plus loin et ainsi choisir les accessoires (bras de pompage et la pompe centrifuge) les plus appropriés pour ce genre d'application.

Finalement, ce travail pourra certainement ouvrir des portes à la société JOSKIN sur de nouveaux marchés qui visent l'économie et le respect de l'environnement.

5. Sources

- [1] COUSSEMENT, G., *Mécanique des fluides*,
Mons, Université de Mons, Faculté Polytechnique, 2014-2015.
- [2] HANUS, V., *Modélisation des systèmes thermomécaniques*
Virton, Haute École de Namur-Liège-Luxembourg, Département Ingénieur
Industriel de Pierrard-Virton, 2014-2015.
- [3] GUILLEMAIN, D., *Système Venturi*
Reims, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2009.
- [4] RADOUX, L., *Cours de mécanique appliquée*
Liège, Cours Techniques Supérieurs de la Province de Liège, 1969.
- [5] JOSKIN, (consulté le 28 septembre 2016), *Joskin – Transport, épandage et
entretien des pâtures*.
Adresse URL : <http://www.joskin.com/>

Développement d'un code de calcul destiné à la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes hydrauliques

Ing. S. COLAUX
Ir. V. KELNER
GRAMME – Liège

Cet article montre comment élaborer un code de calcul permettant de modéliser, simuler et analyser un système hydraulique. L'application développée, SMASH, est constituée de deux parties distinctes : une bibliothèque reprenant la majorité des éléments présents dans un réseau hydraulique quelconque et un code calcul réalisé grâce à Simscape, un outil de Simulink. Les solutions obtenues lors de l'étude de réseaux de distribution d'eau ainsi que d'autres applications plus théoriques ont démontré que les résultats fournis par SMASH sont semblables aux solutions analytiques.

Mots-clés : Réseau hydraulique, Code de simulation, Simscape, Incompressible, Energie, Matlab, Système hydraulique, Simulation, Simulink, Bloc hydraulique.

The objective of this paper is to develop a computer code allowing to design, simulate and analyze a hydraulic system. The developed application, SMASH, consists of two distinct parts: a library that includes most of the elements of any water system and a computational code achieved through Simscape, a tool of Simulink. The solutions obtained in the study of water distribution systems and other more theoretical applications have shown that the results provided by SMASH are similar to the analytics ones.

Keywords: Water Distribution System, WDS, Pipe Network Analysis, Incompressible, Simscape, Simulink, Matlab, Hydraulic bloc, Hydraulic Computer Code.

1. Introduction

L'objectif de ce travail est de développer un code de calcul ayant la capacité de modéliser, simuler et analyser divers réseaux hydrauliques. Ce projet est parti de zéro et n'est pas la continuité ou le développement d'un autre projet. Il a donc exigé de nombreuses recherches sur les travaux existants dans le domaine de l'hydraulique incompressible et traitant du sujet en question.

L'étude de systèmes hydrauliques est un domaine de plus en plus présent au quotidien, que ce soit dans les réseaux publics de distribution d'eau ou les systèmes hydrauliques lors de la construction de bâtiments. L'analyse de ce type de réseaux résulte en une connaissance parfaite des débits et pressions en tous points du système ayant pour objectifs principaux une réduction des coûts et un renforcement de la sécurité de fonctionnement.

Jespersion [1] fournit un bref historique des réseaux de distribution d'eau potable. Selon lui, l'idée de ces réseaux remonte au septième siècle avant JC lorsque les « qanâts » ont été imaginés par les Perses et, quelques siècles après, lorsque les Romains ont commencé à construire les aqueducs ; qanâts et aqueducs ayant le même objectif, distribuer de l'eau potable aux endroits n'en disposant pas.

Le premier réseau d'eau public aux Etats-Unis fut construit à Boston en 1652, Ce réseau servait aussi bien à livrer de l'eau aux pompiers que pour l'usage domestique. A partir de ce moment-là, de nombreux réseaux sont apparus en Europe et en Amérique du Nord. Les filières étaient principalement faites en pierre, brique ou gravats alors que les conduites étaient construites avec de la fonte, du bois, des pierres forées, de l'argile ou du plomb.

Dès le dix-neuvième siècle, des avancées significatives ont permis de construire des joints entre conduites permettant de supporter des pressions élevées. Le vingtième siècle, quant à lui, a vu l'apparition de nouveaux matériaux pour construire les conduites, tels que l'acier, la fonte ductile, l'amiante ou le béton renforcé.

Plus les connaissances en matériaux ont augmenté, plus les ingénieurs ont imaginé des réseaux complexes et ce jusqu'au moment où la connaissance des débits et pressions au sein d'un réseau est devenue nécessaire afin de le construire. La compréhension des débits et pression au sein d'une conduite seule n'a plus été suffisante et dès lors une quête vers le calcul des réseaux de distribution a donné naissance aux recherches spécifiques liées à ce domaine qui porte désormais le nom de *Pipe Network Analysis*.

1.1. Les méthodes d'analyse.

De nombreuses méthodes ont été développées dans le passé afin de calculer les débits dans les réseaux de conduites hydrauliques. Ci-dessous la majorité des méthodes développées lors des cent dernières années sont présentées, dont

- la méthode Hardy-Cross
- la méthode des nœuds simultanés
- la méthode des boucles simultanées
- la méthode linéaire (conduites simultanées)
- la méthode du gradient (réseaux simultanés)

La pertinence, la fiabilité, l'efficacité et la précision de calcul de chacune de ces méthodes ont été développées dans la littérature à de nombreuses reprises. Toutes les méthodes listées ci-dessus, à l'exception de la démarche envisagée par Hardy-Cross, utilisent des matrices afin de profiter au mieux de la puissance de calcul offerte par les ordinateurs.

En 1936, Hardy Cross [2], un professeur d'ingénierie structurelle à l'Université d'Illinois, a développé une méthode mathématique capable de déterminer les moments dans un système de structure statique. Cross a ensuite compris que la méthode qu'il venait de développer pouvait également être utilisée pour résoudre des réseaux hydrauliques. Suite à la prise de connaissance de la puissance de l'algorithme qu'il venait d'imaginer, Hardy Cross a publié un article dans lequel il propose deux techniques différentes pour résoudre un réseau de conduites.

La première est une méthode itérative consistant à équilibrer les flux des différentes boucles constituant le réseau alors que la deuxième équilibre les débits à chaque nœud du réseau. Pour chacune de ces méthodes, il est nécessaire de faire une hypothèse quant à l'intensité et la direction des débits de chacune des conduites, l'équilibrage se fait ensuite à l'aide de facteurs calculés via l'itération précédente.

1.2. Méthodes computationnelles

En 1957, Hoag et Weinberg [3] ont tous deux adapté la méthode d'Hardy Cross aux ordinateurs digitaux leur permettant d'analyser le réseau de distribution de la ville de Palo Alto en Californie. En présentant leur projet, les auteurs ont également discuté de la rapidité, la précision et la viabilité économique d'une telle application. Durant la même année, un cabinet de calcul électronique, Datics Corporation [4] situé à Fort Worth au Texas est devenu l'une des premières entreprises à vendre un logiciel permettant d'analyser les réseaux de distribution d'eau.

Cette année a ainsi marqué le début du développement de logiciels permettant d'analyser les réseaux de distribution d'eau.

1.3. Méthodes informatiques avancées

En fonction de la taille et de la complexité du réseau étudié, la méthode d'Hardy Cross pouvait prendre beaucoup de temps à converger, et dans certains cas une solution finale était impossible à trouver. En réponse à ces limitations, plusieurs chercheurs ont commencé à étudier de nouvelles formulations mathématiques du problème d'analyse de réseau qui pourraient davantage profiter des possibilités offertes par les calculs à haute vitesse.

En 1963, Martin et Peters [4] sont les premiers chercheurs à publier un algorithme permettant de calculer simultanément les débits aux nœuds. La méthode est une amélioration de celle imaginée par Cross. La particularité des méthodes simultanées est que toutes les équations définissant le réseau sont mises ensemble dans une grande matrice afin de résoudre le système en une fois (et non plus boucle par boucle). Afin de rendre cette opération possible, il est nécessaire de linéariser les équations à l'aide de Taylor et ensuite résoudre d'une manière itérative l'ensemble de la matrice grâce à Newton Raphson. Notons qu'en 1968, Uri Shamir et Chuck Howard [5] ont démontré que l'algorithme des nœuds simultanés reste valable si l'on ajoute des vannes ou pompes au système.

En 1969, Robert Epp et Alvin Flower [6] ont imaginé une nouvelle approche basée sur la méthode des boucles de Cross. Cette avancée a permis de considérablement augmenter la convergence des solutions du réseau.

En 1972, Wood et Charles [7] ont conçu un nouvel algorithme. Contrairement ses prédécesseurs, ce dernier n'est plus basé sur les observations faites par Hardy Cross mais sur une approche plus scientifique. La méthode des conduites simultanées (ou méthode linéaire) s'appuie sur les lois de conservation de l'énergie et de la masse. Cette nouvelle approche permet d'avoir une très bonne efficacité, faisant de cet algorithme l'une des références dans le domaine des réseaux hydrauliques. Cette méthode est d'ailleurs toujours utilisée dans de nombreux logiciels de renommée mondiale, tels que PIPE2000 ou WOODNET.

La dernière des méthodes, celle du gradient (ou méthode composite), a été proposée par Todini et Pilati [8] en 1987. Dans cette démarche, chaque équation d'énergie de conduite est combinée aux équations des nœuds afin de fournir une solution simultanée pour les nœuds ainsi que les conduites. Comme pour les autres méthodes, il est nécessaire de linéariser les équations d'énergie grâce à Taylor. Cette approche permet de réduire considérablement le temps de calcul tout en gardant une bonne précision. Cette méthode est utilisée dans le programme EPANET [9].

2. Le réseau hydraulique

Par définition, un système ou réseau hydraulique est un assemblage d'au moins deux éléments hydrauliques. Il en existe une multitude, les plus connus étant les conduites, la pompe centrifuge, le réservoir et les vannes. Dès lors, l'application qui est destinée aux étudiants devra comporter deux modules distincts qui sont

- une bibliothèque reprenant les éléments d'un réseau, ces derniers devant être paramétrables (e.g. définir les paramètres géométriques d'un réservoir) et
- une zone de dessin où l'utilisateur élabore le réseau à partir des éléments disponibles dans la bibliothèque.

A titre d'exemples, les figures 1 et 2 illustrent respectivement une conduite reliant deux réservoirs, et un réseau de distribution complexe.

La résolution de systèmes de distribution d'eau entraîne l'étude de réseaux complexes qui possèdent de nombreuses boucles, réservoirs, pompes, ... Afin de pouvoir déterminer la pression à chaque endroit du système mais aussi le débit à travers chaque branche, les équations de conservation sont d'application. Ces dernières peuvent être exprimées comme suit :

- En chaque point, $\sum q = 0$ ce qui correspond à la conservation de la masse
- Entre deux points quelconques, les pertes de charges sont indépendantes du chemin choisi. Cette condition correspond à la conservation de l'énergie.

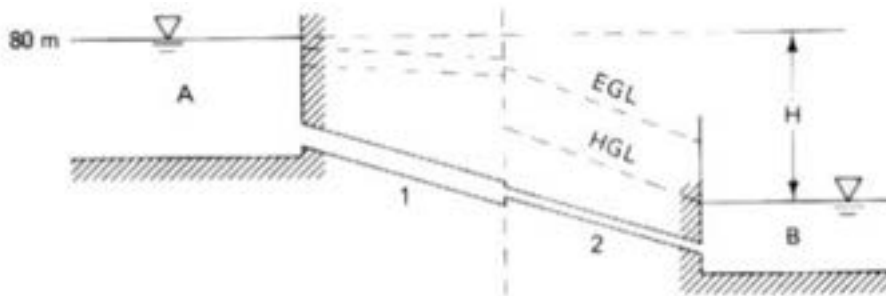


Figure 1 : Une conduite, deux réservoirs

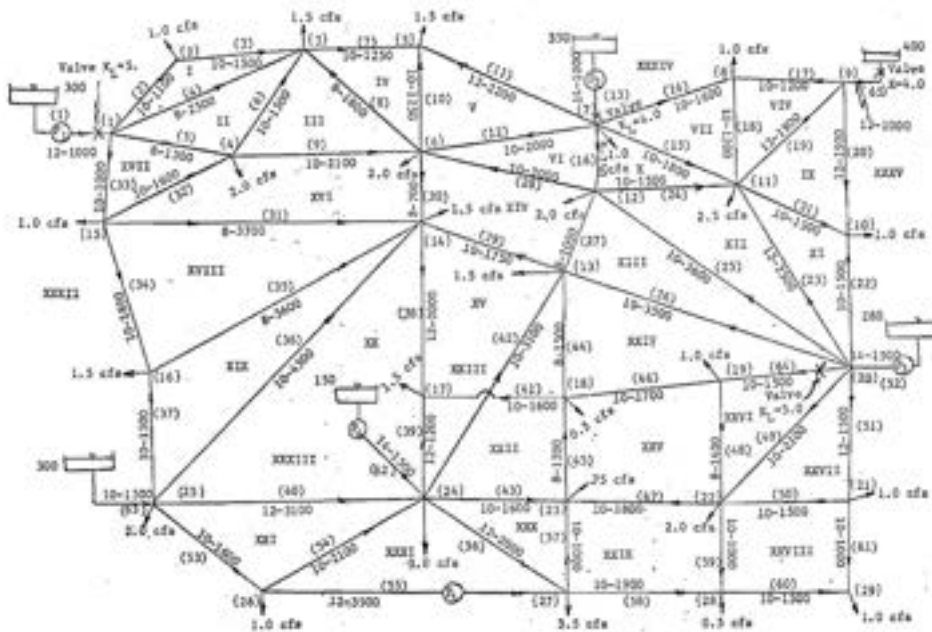


Figure 2 : Exemple d'un Water Distribution System

Afin d'étudier l'influence d'un composant sur le réseau hydraulique, il est nécessaire de connaître les équations régissant le débit (i.e. la conservation de la masse) ainsi que la pression (i.e. la conservation de l'énergie).

À titre d'exemple, si l'on considère un élément quelconque représenté sur la figure 3, nous remarquons qu'il possède deux variables, le débit et la pression différentielle. Ces deux variables sont directement liées par la nature de l'élément étudié.

$$q_{in} = q_{out}$$

$$P_{in} - P_{out} = \Delta P = f(q)$$

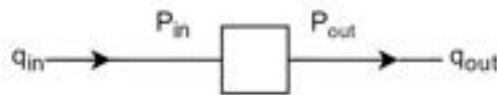


Figure 3: Elément hydraulique quelconque

3. Le code de calcul SMASH

Les concepts des réseaux et éléments hydrauliques étant assimilés, il est désormais nécessaire de s'étendre sur le développement d'une bibliothèque ainsi que sur l'interface permettant l'utilisation de celle-ci. Par conséquent, cette section introduira de nombreux concepts tels que le langage de programmation utilisé ou le modèle physique.

La première étape consiste à choisir un langage de programmation capable de mettre en œuvre la liste de fonctions reprise ci-dessous

- Une liste des éléments disponibles repris sous forme de bibliothèque ;
- Une fenêtre graphique où l'on déplace les éléments provenant de la bibliothèque ;
- Chaque élément doit être connectable (formant ainsi un réseau) et paramétrable (à l'aide d'un double clic par exemple)
- Un solveur ayant pour but de trouver la solution du réseau dessiné.

Au vu de ces exigences complexes, deux choix sont possibles : soit il faut développer un programme en partant de rien et donc concevoir l'interface graphique et le modèle mathématique, soit il est nécessaire d'utiliser un programme ayant déjà une partie des fonctions mentionnées ci-dessus et l'adapter à nos besoins.

La première solution requiert un langage de programmation orienté objet comme le C++, Java ou Python et permet ainsi au développeur de créer un programme répondant parfaitement aux conditions requises. Cependant, la mise en place d'une telle application requiert de très bonnes compétences en programmation (orientée objet) et beaucoup de temps.

La deuxième solution est plus adaptée à un travail d'ingénieur industriel, dans le sens où la partie concernant l'interface graphique est déjà développée, permettant ainsi d'approfondir le domaine technique de l'application. Nous utiliserons donc un environnement de développement et non un langage de programmation.

Le choix concernant le développement de l'application étant posé, il ne reste plus qu'à trouver un programme capable de répondre aux exigences du cahier de charges. La bibliothèque SMASH étant développée initialement dans le cadre d'une application et d'une utilisation académique, l'environnement Simscape a été retenu comme plateforme de développement. Cet environnement de travail sera détaillé dans les paragraphes suivants.

3.1. Simscape

Simscape [10] est un outil faisant partie de la suite MathWorks qui permet de créer un modèle physique en utilisant l'interface Simulink (nécessite Matlab). Un modèle physique est un ensemble d'éléments (ou blocs) couplés à l'aide de connexions physiques et interagissant ensemble afin de fournir une solution. Chaque élément du modèle appartient à un domaine physique spécifique définissant ainsi les variables de l'élément en question.

Grâce à Simscape, il est ainsi possible de simuler par exemple un réseau hydraulique, un moteur électrique ou un système de réfrigération. Il est possible de simuler n'importe quel type de phénomène physique pour autant que l'utilisateur soit capable de définir un domaine correspondant et de connaître les équations des composants du système en question.

Matlab

Matlab est un langage de programmation de quatrième génération émulé par un environnement de développement éponyme. Il appartient à la société MathWorks et permet, entre autres, de manipuler des matrices, d'afficher des courbes, de créer des interfaces utilisateurs et supporte la mise en œuvre d'algorithmes.

Matlab permet aussi de s'interfacer avec d'autres langages de programmation tels que le C, C++, Java, Fortran et Python, ce qui en fait un des programmes de calculs numériques les plus utilisés dans les entreprises. Les domaines d'application sont aussi nombreux que variés, citons l'ingénierie, l'économie ou les sciences appliquées, dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche.

Au fur et mesure des éditions, de nombreux modules et outils ont été développés et ajoutés à l'interface, permettant ainsi de couvrir de nouveaux domaines d'application tels que le traitement d'images. Parmi les modules les plus utilisés, citons l'*Optimization toolbox*, la toute nouvelle *Virtual Reality Toolbox* et *Simulink*.

Simulink

Simulink est un logiciel de modélisation système multi-physique édité par MathWorks ; il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation permettant le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement de signal. En d'autres termes, Simulink est utile pour :

- la modélisation et le design de systèmes dynamiques et algébriques ;
- la modélisation et le design de systèmes de contrôle et
- la modélisation et le design de traitement de signal.

3.2. Principes de base du modèle physique

Simscape procure un ensemble de bibliothèques comportant des blocs de simulation afin de modéliser un système physique dans l'interface Simulink. Simscape emploie une approche physique du modèle, ce qui diffère de l'approche de Simulink, et permet ainsi de simuler des systèmes de composants réels (un moteur, une résistance, une pompe, ...).

Au contraire de Simulink, Simscape permet de créer un modèle constitué de blocs ayant des connexions physiques. Ainsi, chaque port du bloc correspond à un échange d'énergie. Ces connexions sont unidirectionnelles et imitent le comportement réel entre deux éléments.

Si l'on considère deux blocs reliés ensemble, la connexion entre ces deux éléments représente le flux d'énergie qui peut être défini à l'aide des variables *Through* et *Across*. Ce principe est illustré sur la figure 4.

- Across variables : Les variables qui sont mesurées avec une jauge reliée en parallèle à un élément.
- Through variables : Les variables qui sont mesurées avec une jauge reliée en série à un élément.

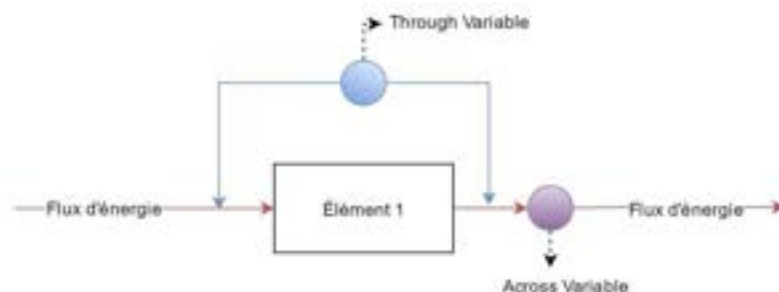


Figure 4 : Through et Across variables

Comme présenté sur la figure 4, un flux d'énergie est caractérisé par ses deux variables : *Across* et *Through*. Habituellement, le produit de ces variables correspond au flux d'énergie exprimé en Watt.

Dans cet exemple, le bloc *élément 1* modélise un élément quelconque, allant d'une conduite à un changement de section où les variables représentent respectivement le débit du fluide et la différence de pression. Chaque bloc sera ainsi défini par ses paramètres et équations caractéristiques. Dans la plupart des cas, le débit en entrée sera le même que le débit en sortie et une perte de charge sera engendrée par l'élément en question.

3.3. La bibliothèque hydraulique

Dans cette section, la liste des éléments repris dans la bibliothèque est présentée en détail. Pour plus de clarté, ils seront classés par rapport à leur fonction. Chacun des éléments a été développé à l'aide de Simscape, ils possèdent des variables, paramètres et équations propres à leur fonction.

Éléments à pertes de charges linéaires : conduite méthode Hazen-Williams (HW), conduite méthode Darcy-Weisbach (DW), conduite à pertes définies.

Éléments à pertes de charges singulières : coude mitré, coude à bride standard (45°, 90° et 180°), coude à bride, raccord en T, raccord en X, contraction graduelle, élargissement graduel, entrée de tuyau (flush et saillie interne), sortie de tuyau, diaphragme à bord carré

Éléments à gains de charges : pompe centrifuge, pompe volumétrique, source de débit volumique, source de pression

Les réservoirs : source infinie à niveau constant, réservoir à une entrée, cuve.

Les nœuds réseaux : nœuds réseaux (1, 2, 3 et 4 entrées), nœuds réseau avec capteur de pression (1, 2, 3 et 4 entrées), nœuds réseau avec capteur de pression et demande variable (1, 2, 3 et 4 entrées)

Les capteurs : capteur de pression différentielle, capteur de pression absolue, capteur de débit (parfait, Tuyère, Venturi et diaphragme).

Les vannes : vanne à boule, vanne à opercule, vanne V (Kv et Cv), vanne Kv à ouverture variable

Les utilitaires : paramètres de l'eau, paramètres du fluide, référence, référence variable, vanne parfaite, stop hydraulique, clapet anti-retour.

4. Validation et application du code de calcul

Cette section est orientée sur différents exemples ayant pour but de tester les limites du modèle mathématique et de valider les résultats fournis

Les cas étudiés tout au long de cette section sont un réseau de distribution d'eau théorique, un réseau de distribution d'eau réel, et un exemple concernant des réservoirs à volume variable.

4.1. Un réseau théorique

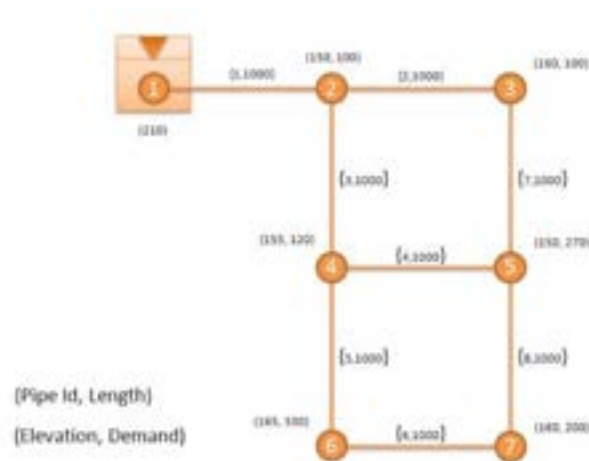


Figure 5 : Schéma du réseau théorique

Cet exemple, composé de deux boucles et huit tuyaux est fourni par M. Venturin [11] : il correspond à un réseau basique où aucune pompe n'est présente. L'énergie nécessaire au transport de l'eau provient des différences d'altitude entre la source et les nœuds.

Venturin a développé un programme permettant de résoudre ce type de réseaux à l'aide de Scilab. Les données ainsi que les résultats qu'il a obtenus sont repris dans les tableaux 1 et 2.

Afin de confirmer les résultats obtenus à l'aide de Scilab, validons cet exemple à l'aide d'EPANET. Les résultats obtenus sont affichés dans le tableau 3. Nous constatons que les valeurs ne diffèrent que de 0,5% dans le pire des cas.

Une fois les résultats validés, étudions ce cas basique à l'aide du modèle mathématique développé sous Simscape, SMASH. La figure 6 et le tableau 3 exposent les résultats obtenus. Nous observons que la solution acquise à l'aide de Simscape est semblable aux résultats fournis par l'auteur ainsi que par le programme de simulation EPANET. Les faibles variations au sein des résultats proviennent des formules pour calculer les pertes linéaires (Hazen-Williams pour EPANET et Scilab alors que SMASH utilise la formule de Darcy-Weisbach).

La figure 6 est la représentation du réseau à l'aide de SMASH. Ce schéma est composé de d'éléments hydrauliques (conduite, référence, débitmètre, ...) et de contrôles (affichage de donnée, mesure de pression, convertisseur de donnée, ...).

Chacun des blocs sont reliés afin de former le réseau hydraulique représenté sur la figure 5.

Tuyau	Longueur [ft]	Diamètre [ft]	H-Z Cst	Débit [GPM]
1	1000	18	130	1200
2	1000	10	130	336.88
3	1000	16	130	686.12
4	1000	4	130	32.56
5	1000	16	130	530.56
6	1000	10	130	200.56
7	1000	10	130	236.88
8	1000	1	130	0.56

Tableau 1 : WDS Théorique - Données et résultats des tuyaux via Scilab

Nœud	Altitude [ft]	Demande [GPM]	Pression [Psi]
1	210		0
2	150	100	25.85
3	160	100	21.15
4	155	120	23.55
5	150	270	25.31
6	165	330	19.12
7	160	200	21.16

Tableau 2 : WDS théorique - Données et résultats des noeuds via Scilab

Tuyau	Débit [GPM]			Nœud	Pression [Psi]		
	Scilab	EPANET	SMASH		Scilab	EPANET	SMASH
1	1200	1200	1200	1	0	0	0
2	336.88	336.88	337.9	2	25.85	25.81	25.83
3	683.12	683.12	682.1	3	21.15	21.12	21.16
4	32.56	32.56	31.54	4	23.55	23.51	23.54
5	530.56	530.56	530.6	5	25.31	25.27	25.31
6	200.56	200.56	200.6	6	19.12	19.09	19.13
7	236.88	236.88	237.9	7	21.16	21.12	21.17
8	0.56	0.56	0.5611				

Tableau 3 : WDS théorique - Comparaison des résultats

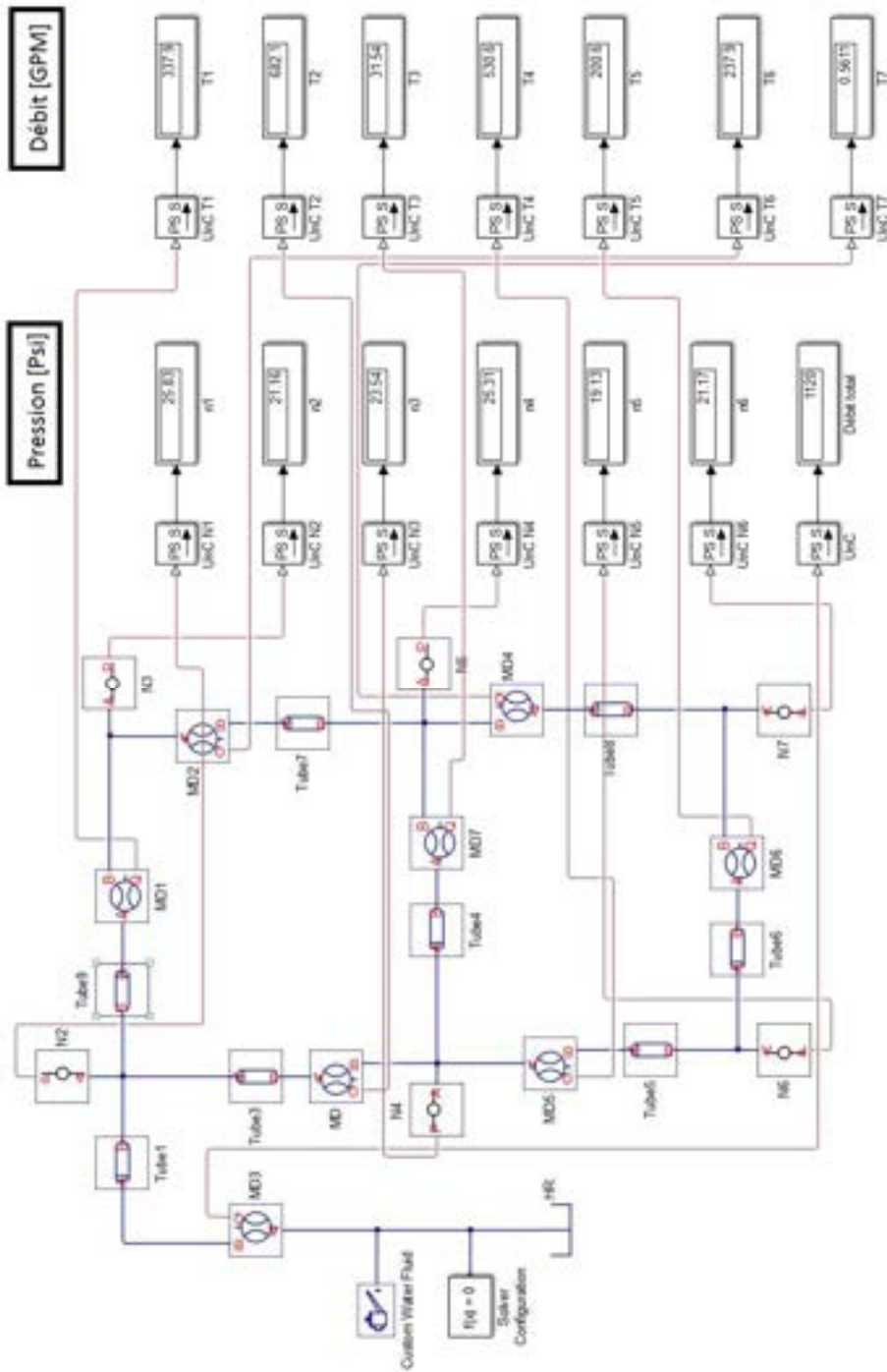


Figure 6 : WDS théorique - Réseau hydraulique via SMASH

4.2. Un exemple réel

Afin de vérifier les capacités de SMASH, étudions le cas d'un réseau de distribution réel. Le réseau représenté sur la figure 7 possède de nombreuses conduites et nœuds de demande, cinq pompes et réservoirs ainsi que quelques vannes (symbolisant des pertes de charges singulières).

Ce réseau a été étudié par Roland W. Jeppson [12] en 1974. Ce dernier a utilisé la méthode linéaire développée par Charles et Wood [7] deux années auparavant.

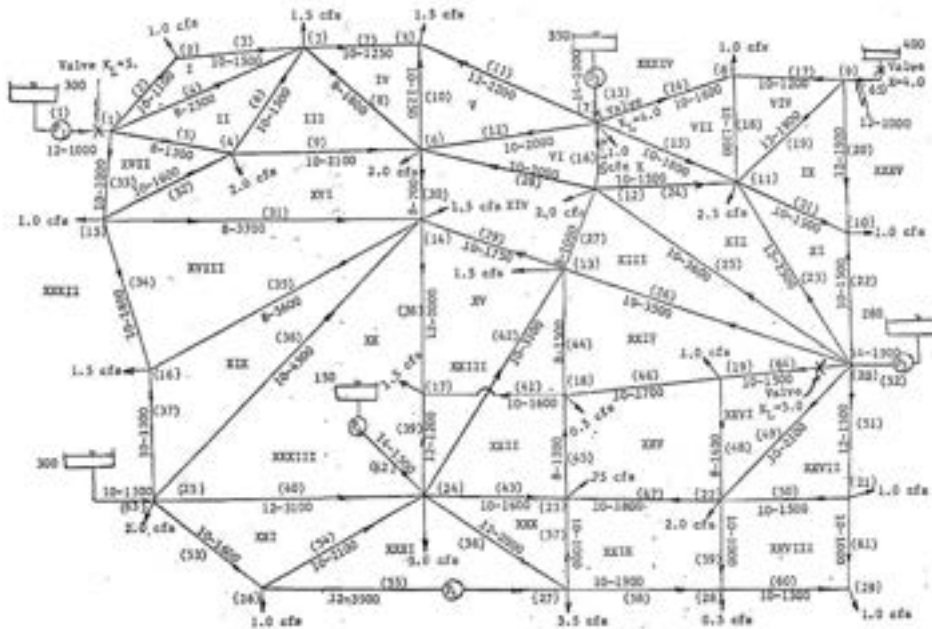


Figure 7 : Réseau réel de distribution

Afin de comparer les résultats fournis par Jeppson et SMASH, le tableau 4 présente les débits et pressions en certains endroits du réseau, pris aléatoirement.

Contrairement au réseau de distribution étudié précédemment, la différence entre les résultats fournis par Jeppson et SMASH est sensiblement plus élevée.

De fait, étant donnée la complexité du réseau étudié, une légère différence des formules utilisées pour calculer les pertes de charges linéaires entraîne des disparités au sein des résultats, principalement au niveau des débits.

Tuyau	Débit [CFS]			Nœud	Pression [Psi]		
	Jeppson	SMASH	Diff[%]		Jeppson	SMASH	Diff[%]
1	11.61	11.48	1.1	1	104.1	104	0.1
8	0.68	0.67	1.5	4	92.7	92.8	0.1
19	2.75	2.6	5.8	7	84.2	83.8	0.5
24	1.71	1.63	4.9	11	77.5	77.1	0.5
32	0.92	0.90	2.2	15	91.9	92.3	0.4
48	0.35	0.33	6.1	19	77.2	77.9	0.9
52	9.03	8.79	2.7	22	81.2	81.9	0.9
61	1.80	1.7	5.9	29	96.3	97.0	0.7

Tableau 4: Comparaison des résultats d'un WDS réel

4.3. Les réservoirs

Une dernière manière de valider le modèle mathématique est de connecter deux réservoirs atmosphériques remplis d'eau à l'aide d'une conduite. L'un des réservoirs sera rempli de fluide alors que l'autre sera presque vide. Le niveau des 2 réservoirs s'équilibre jusqu'à ce que l'énergie de pression soit la même dans les 2 cuves. Le schéma de départ est représenté sur la figure 8.

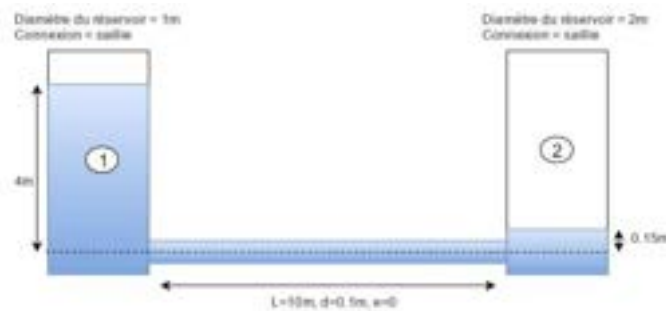


Figure 8 : Schéma de 2 réservoirs connectés par une conduite

En appliquant les équations de conservation d'énergie et de masse à ces réservoirs, il est possible de trouver la solution analytiquement. Cette dernière est ensuite comparée au résultat fourni par SMASH. Ainsi,

$$\frac{V_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho g}$$

$$\text{Volume Initial}_1 + \text{Volume Initial}_2 = \text{Volume Final}_1 + \text{Volume Final}_2$$

En considérant que la pression est la même dans les 2 réservoirs et que les vitesses du fluide sont nulles, ces équations peuvent se simplifier comme suit

$$h_1 = h_2$$

$$\left[h_1 \frac{\pi D_1^2}{4} + h_2 \frac{\pi D_2^2}{4} \right] - \left[h_{1,init} \frac{\pi D_1^2}{4} + h_{2,init} \frac{\pi D_2^2}{4} \right] = 0$$

Ainsi,

$$\left[h_1 \frac{\pi 2^2}{4} + h_1 \frac{\pi 4^2}{4} \right] - \left[4 \frac{\pi 2^2}{4} + 0.15 \frac{\pi 4^2}{4} \right] = 0$$

$$h_1 = h_2 = 0.92 \text{ m}$$

Les figures 9 et 10 présentent respectivement la schématisation à l'aide de SMASH et l'évolution de la hauteur du fluide en fonction du temps aux travers des 2 réservoirs. Ces 2 droites convergent en un point, de telle sorte que $h_1 = h_2 = 0.92m$, ce qui correspond bien à la valeur analytique.

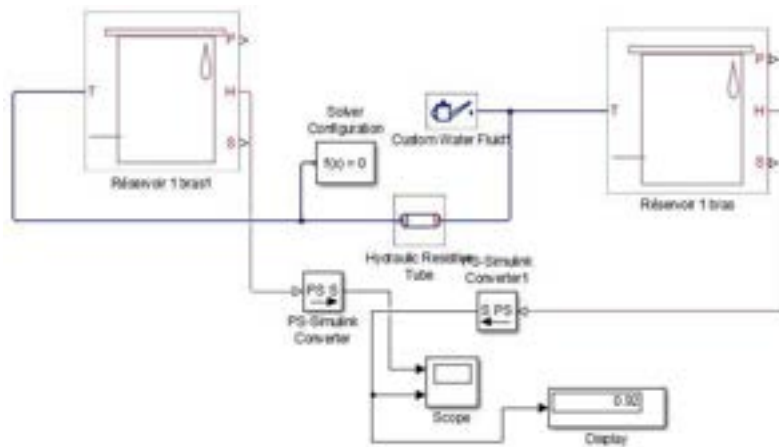


Figure 9 : Représentation des deux réservoirs à l'aide de SMASH

SMASH a l'avantage de nous fournir un résultat transitoire : ainsi plus la section de passage de la conduite sera élevée, plus le temps de convergence sera faible. Dans ce cas précis, on constate que les réservoirs sont quasi équilibrés après 1000 secondes, soit environ 15 minutes. Ce temps élevé est dû à la longueur conséquente de la conduite, mais aussi à son faible diamètre.

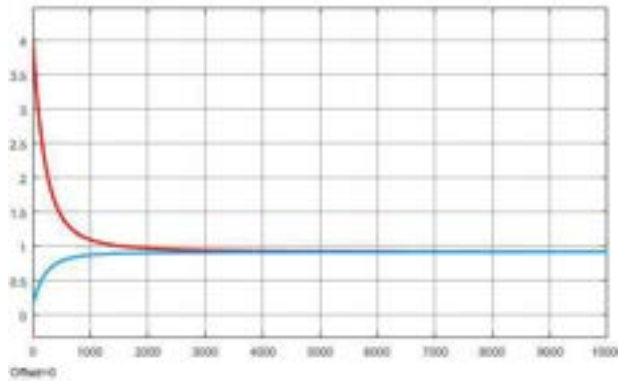


Figure 10 : Evolution de la hauteur de l'eau dans les réservoirs en fonction du temps

5. Conclusions et perspectives

L'objectif qui était poursuivi a été atteint et même dépassé grâce à l'immense potentiel du code de calcul.

De nombreux exemples ont permis de valider les performances fournies par le code de calcul SMASH. Ces derniers ont été sélectionnés afin de couvrir l'étendue des possibilités offertes par le code de calcul.

L'ensemble de ces exemples a ainsi permis de valider le code de calcul SMASH. La faible différence des résultats observée peut être expliquée grâce à la différence de l'une ou plusieurs des formules permettant de calculer les pertes de charges (singulières ou linéaires), auquel cas plus le réseau est complexe plus il entraîne une différence de résultats conséquente.

Dans la continuité du travail effectué, deux améliorations possibles sont abordées dans la section précédente : la prise en compte de la température comme variable et le développement d'un exécutable. Toutefois, ces deux améliorations ne sont pas les seules envisageables ; un add-on permettant la régulation en temps réel d'un réseau hydraulique pourrait être implémenté au sein de SMASH tout comme la prise en compte de phénomènes mécaniques (coup de bélier).

6. Sources

- [1] JESPERSON K., A brief history of drinking water distribution, *On Tap Associate Editor*, pp. 18–46, 2001.
- [2] CROSS H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, *Engineering Experiment Station, University of Illinois Bulletin No.286*, 1936.
- [3] HOAG L. & WEINBERG G., Pipeline network analysis by electronic digital computer, *Journal of the American Water Works Association*, pp. 517–524, 1957.
- [4] MARTIN D. & PETERS G., The application of newton’s method to network analysis by digital computer, *Journal of the Institute of Water Engineers*, pp. 17 :115–129, 1963.
- [5] SHAMIR U. & HOWARD C., Water distribution systems analysis, *Journal of the Hydraulic division, ASCE, 94, Proc. Paper 5758*, pp. 219–234, 1968.
- [6] EPP R. & FOWLER A., Efficient code for steady-state flows in networks, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 96, Proc. Paper 7002*, pp. 43–56, 1970.
- [7] WOOD D. & CHARLES C; Hydraulic network analysis using linear theory, *Journal of the Hydraulic division, ASCE, 98, Proc. Paper 9031*, pp. 1157–1170, 1972.
- [8] TODINI E. & PILATI S., A gradient method for the analysis of pipe networks., *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK.*, 1987.
- [9] ROSSMAN L. A., *EPANET 2 user’s manual*. U.S Environmental protection agency and NRMRL, 2000.
- [10] MathWorks, *Simscape User’s Guide*, 2016.
- [11] VENTURIN M., A hydraulic scilab toolbox for water distribution systems, *Open source*
- [12] JEPPSON R. W., Steady flow analysis of pipe networks : An instructional manual, *DigitalCommons, Utah Water Research Laboratory*, 1974.

Conception et développement d'un banc d'essais pour un instrument de résection et de remplacement de la valve aortique

Ing. L. DEFAUW
ECAM – Bruxelles

Dr X. BOLLEN
Ir M. BION
UCL – Louvain-la-Neuve

Le banc d'essais a pour but de tester un dispositif médical développé dans le cadre du projet AVATAR² (Aortic VALve TransApically Resected and Replaced). Pour ce faire, des modèles d'aortes et de ventricules ont été réalisés en silicone dans lesquels un substitut sanguin est pulsé. L'instrumentation permet de récupérer les informations de pression. Cela permettra le test du dispositif médical avant les opérations in-vivo.

Mots-clefs : médecine, valve aortique, sténose aortique, dispositif médical, banc d'essais, instrumentation.

The workbench has to test a medical device developed within the AVATAR² project (Aortic VALve TransApically Resected and Replaced). To do so, aortas and ventricles models have been moulded in silicone. A blood substitute is pulsed through it. The instrumentation allows to recover pressure data. This will permit to test the medical device before in-vivo intervention.

Keywords: medicine, aortic valve, aortic stenosis, medical device, workbench, instrumentation.

1. Introduction

Le projet AVATAR² (Aortic VALve TransApically Resected and Replaced) a pour but de développer un nouveau dispositif médical permettant la résection et le remplacement de la valve aortique par voie percutanée afin de soigner la sténose aortique.

L'objectif de ce travail a été la conception et le développement d'un banc d'essais permettant de tester ce nouveau dispositif médical. Les défis étaient multiples, car il fallait pouvoir recréer l'environnement de l'opération de manière à être le plus proche possible des conditions réelles. Les trois principaux challenges étaient : (1) d'avoir plusieurs modèles d'aortes, de valves et de ventricules gauches à disposition afin de pouvoir multiplier les essais ; (2) de recréer une pulsation du flux sanguin réaliste et réglable ; et (3) d'instrumenter le banc d'essais. Pour ce faire, le travail a été divisé en trois parties : l'analyse du besoin, la démarche de conception, et le développement de la solution. Les performances du banc d'essais ont enfin été analysées.

2. Analyse du besoin

La conception et le développement du banc d'essais se déroulant dans le cadre du projet AVATAR², il convient de faire une mise en contexte afin de bien comprendre les enjeux et les risques du projet AVATAR², et ainsi de comprendre le rôle du banc d'essais.

2.1. Le cœur

Le cœur est un organe musculaire qui est au centre du système cardiovasculaire. Ses muscles se contractent à intervalles réguliers afin de faire circuler le sang dans le corps humain. Ce faisant, il relève la pression du sang et assure ainsi le rôle de pompe du système circulatoire. Le cœur est divisé en deux parties assurant chacune des fonctions différentes : le cœur droit qui récupère le sang veineux et le propulse dans l'artère pulmonaire, et le cœur gauche qui récupère le sang oxygéné en provenance des poumons et l'envoie dans l'aorte. Chacune de ces parties est constituée de deux chambres : une oreillette (ou atrium) et un ventricule. De plus, quatre valves viennent réguler le passage du sang afin qu'il s'effectue toujours dans le bon sens. La valve concernée par le projet AVATAR² est la valve aortique. Celle-ci est située entre le ventricule gauche et l'aorte. [1, 2]

La figure 1 montre les pressions du ventricule gauche (LVP), de l'aorte (AP) et de l'oreillette gauche (LAP) lors d'un cycle cardiaque. Un relèvement de pression im-

portant s'observe pour le ventricule gauche et pour l'aorte lors de la systole (contraction du cœur). Ensuite, la pression redescend rapidement dans le cas du ventricule et plus lentement pour l'aorte. La pression de l'aorte varie entre 80 et 120 mmHg (pour une personne saine) tandis que la pression du ventricule varie entre un peu plus de 0 et 120 mmHg. [3]

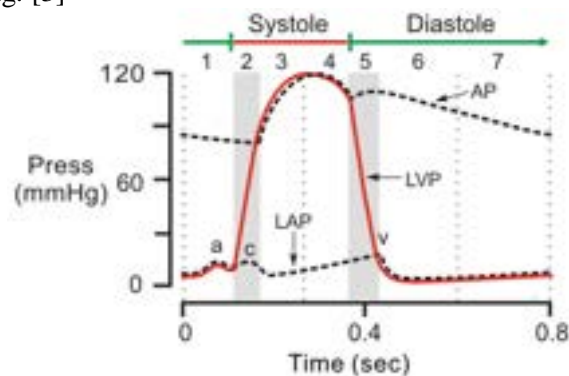


Figure 1 : Pression dans le ventricule gauche (LVP), dans l'aorte (AP) et dans l'oreillette gauche (LAP) lors du cycle cardiaque [3]

2.2. La sténose aortique

La sténose aortique est une maladie cardiaque qui consiste en l'altération de la valve aortique. Cette altération, d'origine dégénérative, provient la plupart du temps de la calcification de la valve et provoque un durcissement de celle-ci. La Figure 2 compare une valve saine avec une valve sténosée. Le fait que la valve soit sténosée induit deux effets : la valve ne se ferme plus convenablement et ne s'ouvre plus complètement. Cela implique d'une part que le flux sanguin circule alors qu'il ne devrait pas et, de l'autre, que le flux circule moins bien étant donné que la valve n'est pas complètement ouverte. Les performances cardiaques sont dès lors diminuées. [4, 5] Cette maladie touche environ 2 % de la population de plus de 65 ans, et ce plus particulièrement dans les pays occidentaux. [6]

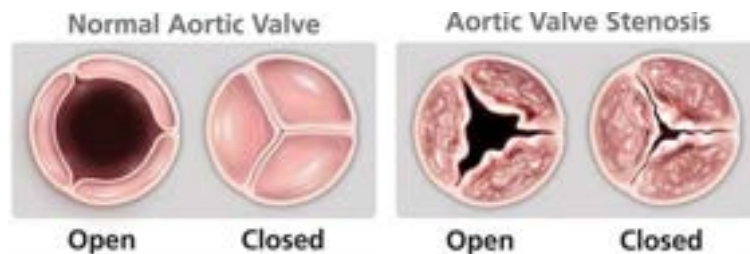


Figure 2 : Valve aortique saine et valve aortique sténosée [7]

De nos jours, la sténose aortique est traitée en remplaçant la valve sténosée. L'opération de référence consiste en une opération à cœur ouvert afin de remplacer la

valve. Il va sans dire que ce type d'opération lourde est traumatique pour les patients. Des techniques mini-invasives (principalement la procédure TAVI) permettent de ne plus devoir opérer à cœur ouvert dans certains cas. Cependant, dans ces cas, la valve sténosée n'est pas réséquée*. Un implant vient compresser la valve sténosée afin de venir prendre sa place et de jouer son rôle. Comme la valve native n'est pas réséquée, cette opération comprend plus de risques, notamment le risque d'embolie. [8, 9]

2.3. Le projet AVATAR²

Le projet AVATAR² a pour but de développer un nouveau dispositif médical permettant la résection et le remplacement de la valve native de manière mini-invasive afin de combiner les avantages des traitements existants de la sténose aortique. [6, 10] C'est-à-dire qu'il permettra d'opérer les patients de manière mini-invasive (comme la procédure TAVI), tout en réséquant la valve native (comme l'opération à cœur ouvert).

Au niveau des chiffres, il y a 265000 cas de sténose aortique à traiter chaque année. 35 % de ces cas sont récusés pour l'opération à cœur ouvert. Les patients sont alors traités par une approche fémorale ou apicale (procédure TAVI) dans 70 % des cas. Il reste encore environ 30000 patients par an qui ne peuvent pas être traités. Ce sont ces patients que le nouveau dispositif vise. [6]

Le principe d'une opération basée sur le dispositif AVATAR² est le suivant : (1) incision entre deux côtes ; (2) insertion de la gaine d'introduction contenant l'instrument dans le cœur ; (3) déploiement de la lame conique et du cône de découpe ; (4) résection de la valve sténosée ; (5) placement de la nouvelle valve ; (6) rétractation de la lame et du cône de découpe. Il est important de mentionner que le ventricule doit être en fibrillation de l'étape 3 à l'étape 5. Lors de la dernière étape, les déchets se trouvent entre la lame conique et le cône de découpe.

2.4. Cahier des charges

Sur base des éléments précédents, trois fonctions principales du banc d'essais ont été dégagées afin de définir le cahier des charges du banc. Celles-ci sont les suivantes :

- Faire circuler un substitut sanguin dans le banc d'essais. Celui-ci doit être pulsé afin de reproduire au mieux les conditions réelles dans lesquelles l'opération se déroulera. La fréquence de pulsation doit pouvoir monter jusqu'à 200 battements par minute (bpm) pour mimer la fibrillation ventriculaire.

* Résection : « ablation chirurgicale d'une partie d'un organe, en conservant les parties saines et en rétablissant, s'il y a lieu, leur continuité. » [Larousse, 2016]

- Récupérer des données. Des données, par exemple de pression, doivent être récupérées. Il faut pouvoir les visualiser, non seulement en temps réel, mais également après le test. Il faut donc pouvoir les enregistrer.
- Changer des parties du banc d'essais (ventricule gauche, valve aortique et aorte). Cela permettra de tester plusieurs morphologies différentes du ventricule gauche et de l'aorte. Dans le cas de la valve aortique, il faut pouvoir la changer facilement.

Le cahier des charges reprend également quelques fonctions de contraintes qui sont par exemple : le banc d'essais est étanche, l'outil de résection passe par la voie transapicale et un filtre est prévu afin de récupérer d'éventuel débris.

3. Démarche de conception

La démarche de conception comprend trois étapes : l'analyse fonctionnelle, la recherche de solution et le choix d'une solution globale.

3.1. L'analyse fonctionnelle

L'analyse consiste en la réalisation d'un graphe fonctionnel. Ce dernier est réalisé afin de mettre en évidence les flux des différents éléments de l'opération de test. Un flux peut représenter un outil, un liquide, une matière, etc. Cela permet d'avoir une idée précise de l'objet de la conception dans son utilisation destinée.

3.2. La recherche de solutions

Le but de cette étape est de penser à toutes les solutions qui pourraient être envisageables pour le projet. Des critères de sélections objectifs sont ensuite choisis pour chaque solution. Ils permettent d'établir des tableaux de comparaison et d'effectuer le meilleur choix. Afin que la solution choisie soit la plus adaptée, des poids sont associés à chaque critère. Cela permet de pondérer les critères en fonction de leur importance.

3.3. Le choix d'une solution

Une ou plusieurs solutions globales sont construites à partir des solutions par fonction. Si besoin, un choix est ensuite effectué afin de n'en retenir qu'une : la solution finale.

Dans le cas du banc d'essais, la solution finale est représentée sur la figure 3. Le schéma comprend les éléments suivants :

- Une pompe doseuse (1) permet de pulser le substitut sanguin dans le banc d'essais.
- Le substitut sanguin passe alors dans le ventricule gauche (2), dans la valve aortique (3) puis dans l'aorte (4). Le ventricule et l'aorte sont en silicone transparent, tandis que la valve est maintenue en place par un support.
- Le liquide passe ensuite dans la poche filtrante (5) avant de couler dans le réservoir (6).
- Durant l'opération de test, l'instrument de résection et de remplacement de la valve aortique est introduit par la voie d'introduction (7).
- Une caméra (8) filme ce qu'il se passe au niveau de la valve aortique lors du test.
- Lors du passage du liquide dans le ventricule et dans l'aorte, la pression de celui-ci est relevée à l'aide de capteurs de pression (9). Les données des capteurs sont échantillonnées par une Arduino (10).
- La caméra et l'Arduino envoient leurs données à un ordinateur (11) qui s'occupe de la gestion des données.

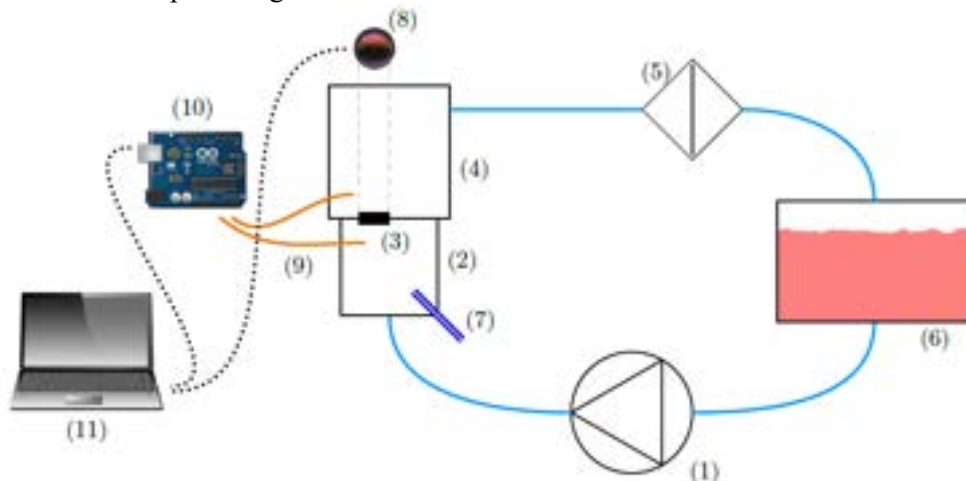


Figure 3 : Solution finale (pompe doseuse (1), ventricule gauche (2), valve aortique (3), aorte (4), poche filtrante (5), réservoir (6), voie d'introduction (7), caméra (8) [11], capteurs de pression (9), Arduino (10) [11], ordinateur (11) [11])

4. Développement de la solution

La solution a été développée en suivant trois axes : le circuit hydraulique, constitué d'une pompe, de tuyaux, d'un réservoir et d'un filtre ; la réalisation des parties changeables qui comprennent les ventricules gauches, un support permettant le maintien de valves aortiques et les aortes ; et la récupération des données ainsi que la commande de la pompe à partir d'une application web.

4.1. Circuit hydraulique

Le développement de la solution pour le circuit hydraulique du banc de test porte donc principalement sur la fonction "Faire circuler un substitut sanguin" du cahier des charges. Le circuit hydraulique repose sur la pompe qui pulse le substitut sanguin dans le circuit. Ensuite viennent s'ajouter le filtre, les tuyaux, les raccords et le réservoir. En plus de cela, un élément annexe, le passage pour le dispositif médical, permet de garantir l'étanchéité.

La pompe utilisée est une pompe doseuse qui permet d'éjecter jusqu'à 95,1 ml de liquide par pulsation et ce jusqu'à 90 bpm. Il y a donc un conflit avec ce qui a été énoncé dans le cahier des charges. Cependant, lorsque le ventricule entre en fibrillation et monte jusqu'à 200 bpm, il n'a pas le temps de se contracter et le flux sanguin peut être considéré comme à l'arrêt. Afin de mimer cette fibrillation ventriculaire, la pompe sera alors simplement arrêtée. La fréquence de pulsation est réglable sur la pompe elle-même ainsi qu'à distance.

Le passage du dispositif médical dans le banc d'essais est problématique en ce qui concerne l'étanchéité du banc d'essais. En effet, il faut pouvoir faire rentrer un outil d'un diamètre allant de 9 mm à 13 mm, l'entrée de celui-ci se situant au niveau du bout du ventricule gauche. La solution choisie a été l'utilisation de valves placées dans un support. Afin d'éviter que le passage ne bouge et n'abîme le ventricule, un bras articulé a été prévu afin de le maintenir.

4.2. Réalisation des parties changeables

La réalisation des parties changeables a été divisée en deux parties. La première partie concerne le support de la valve aortique et la deuxième concerne les ventricules et les aortes. Les premiers essais ont conduit à l'élaboration d'un support pour le banc d'essais afin de mieux maintenir les différents éléments du banc.

Support de la valve aortique

Deux types de valves aortiques seront utilisés pour les essais : une valve artificielle en silicone contenant des calcifications et une valve reconstruite à partir de trois feuillets valvulaires récupérés lors d'opérations à cœur ouvert. Afin de pouvoir utiliser les deux types de valves dans le banc d'essais, un support permettant leur maintien a été créé. Ce support assure également l'étanchéité entre les blocs de silicone.

Le support de la valve aortique (fig. 4) est constitué de deux pièces dont l'une vient se mettre dans l'autre. Les deux pièces sont maintenues entre elles avec des vis. Le support sera décliné en plusieurs exemplaires, chacun conçu pour un diamètre de

valve particulier (23 mm, 26 mm, 29 mm). Deux joints ont été prévus afin de permettre au chirurgien effectuant le test de pouvoir repérer où il faut placer le stent contenant la nouvelle valve.

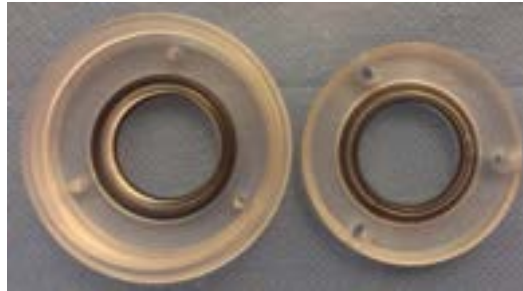


Figure 4 : Support de la valve aortique, version 26 mm

Réalisation des ventricules gauches et des aortes

Les ventricules gauches et les aortes sont réalisés de la même manière : ils sont moulés dans des blocs de silicone. La réalisation des ventricules et des aortes a commencé par leur modélisation (fig. 5). Une fois modélisé, il a fallu leur ajouter des dispositifs comme les sorties vers les capteurs ou les accès au circuit hydraulique. Afin de faciliter le moulage, des boîtes de moulage ont été réalisées. Le procédé de moulage était le suivant (fig. 6) :

- Impression du modèle en PLA (acide polylactique).
- Mise du modèle dans le support.
- Préparation du silicone transparent.
- Mise sous vide du silicone afin d'enlever les bulles d'air.
- Coulage du silicone.
- Réticulation (ou durcissement) du silicone pendant 24 h.
- Mise de la pièce en silicone dans un bain de soude caustique à 70°C afin de dégrader le PLA.
- Récupération de la pièce moulée.

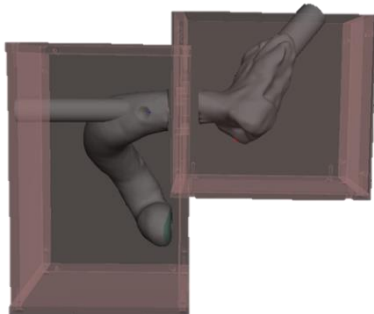


Figure 5 : Modélisation des moules



Figure 6 : Aorte en cours de réalisation

4.3. Récupération des données & commande de la pompe

Le banc d'essais comprend deux capteurs de pression, un dans l'aorte et l'autre dans le ventricule, ainsi qu'une caméra. La caméra permet de voir ce qu'il se passe au niveau du substitut de la valve aortique. Afin d'avoir une vue de bonne qualité, un hublot a été mis en place dans le prolongement de l'axe de la valve aortique. Celui-ci permet de récupérer des images de bonne qualité.

Les capteurs de pression permettent de mesurer la pression du ventricule gauche et de l'aorte afin de vérifier que l'opération de test n'influence pas, ou peu, ces pressions. Cette partie a été développée selon deux axes. D'une part, les capteurs (capteurs de pression et caméra) et la commande de la pompe, et de l'autre le programme de récupération des données (serveur et client). Le côté serveur de l'application gère les capteurs de pression et la commande de la pompe. Il récupère les valeurs des capteurs de pression selon deux critères : à une fréquence fixe, 125 Hz, et dès que la valeur d'un capteur dévie de plus de 0,59 mbar. Il y a également un capteur qui permet de récupérer la commande de la pompe afin de voir si elle est bien respectée. La fréquence d'échantillonnage de ce capteur est de 100 Hz. Dans les deux cas, il n'y a pas de perte de données. La commande de la pompe est une commande en courant. Du côté du client, il s'agit d'une interface graphique comprenant deux vues. L'une permet de gérer les capteurs de pression et la commande de la pompe à distance (en passant par le serveur). Et l'autre permet de visualiser tous les fichiers d'historique dans lesquels les données ont été stockées.

5. Discussion des résultats

Le circuit hydraulique développé ne permet de pulser le substitut sanguin que jusqu'à 90 bpm, néanmoins, il a été montré que la fibrillation ventriculaire peut être simulée par l'arrêt de la pompe. Dans ce cas, il n'est pas vraiment intéressant de pouvoir monter jusqu'à 200 bpm. Il est aussi important de dire que la pompe éjecte un volume maximal de 95,1 ml par battement, et que le volume éjecté lors d'une contraction du ventricule est de l'ordre de 75 ml. La pompe peut pulser des liquides dont la viscosité dépasse les 500 mPa.s. Même si aucun test n'a été effectué avec le substitut sanguin, il n'y aura pas de problème lorsque celui-ci sera utilisé.

Lors des tests, le banc d'essais n'était pas parfaitement étanche. Cependant, les fuites étaient limitées. Quelques gouttes coulaient au niveau de la sortie de l'aorte partant vers le réservoir. Il y avait également quelques gouttes au niveau du hublot pour la caméra et au niveau du support de la valve (mais pas à chaque test). Le support du banc d'essais apporte un vrai plus à ce niveau, car il récupère le peu de liquide qui s'échappe du banc lors des essais. Le substitut sanguin est bien injecté au niveau de

la valve mitrale et récupéré dans le prolongement de l'aorte. Après avoir été récupéré, il passe dans le filtre dont le seuil de rétention est de $100\ \mu\text{m}$, ce qui correspond à l'ordre de grandeur voulu.

L'utilisation des capteurs de pression a permis de constater qu'il y avait un peu trop de pression dans le ventricule. En effet, la pression monte jusqu'à 0,22 bar (fig. 7) lorsque la pompe ne pulse le liquide qu'à 40 bpm avec un volume éjecté de 75 ml par battement, alors qu'une pression normale serait de 0,16 bar pour 60 bpm et 75 ml/battement. Si le nombre de pulsations par minute augmente encore, la pression augmentera d'autant plus. Concernant la pression dans l'aorte, les tests ne sont pas indicatifs, car aucun test n'a été réalisé avec une valve. La pression dans l'aorte ressemble dès lors très fort à la pression dans le ventricule.



Figure 7 : Pressions dans l'aorte et dans le ventricule, 40 bpm, 75 ml/battement

La pression trop élevée dans le ventricule et dans l'aorte peut s'expliquer de plusieurs manières. La première hypothèse est que le circuit sanguin est probablement plus élastique que les modèles en silicone qui ont été réalisés. L'augmentation de pression serait alors un peu absorbée par le système sanguin, ce qui n'est pas le cas ici. Une deuxième possibilité se trouve dans le rapport contraction sur le temps total du cycle cardiaque. Celui-ci vaut environ 30 % dans le cas du banc d'essais contre environ 40 % en réalité (fig. 8). Comme le temps d'injection dans le cas du banc est plus faible, la pression est plus élevée. Une solution à ce problème serait de mettre un réducteur de pression après la pompe. Ce réducteur de pression permettrait de lisser un peu les battements de la pompe, et donc de prolonger le temps d'éjection par rapport au temps total du cycle.

Lorsque le banc d'essais est en route et que le rythme de pulsation dépasse 50 bpm pour un volume éjecté de 75 ml par battement, le bloc de silicone de l'aorte a tendance à se désolidariser du support de la valve aortique. Cela limite la fréquence de pulsation de la pompe. Une solution à ce problème serait d'ajouter un élément fixé sur la base et qui permettrait de maintenir le bloc de silicone au-dessus du hublot de la caméra. Malheureusement, le temps a manqué pour développer cette pièce. C'est une amélioration du banc qui pourra se faire dans le futur. Dans le même temps, le hublot de la caméra se fait éjecter de plus en plus du bloc de silicone. Il faut également prévoir une pièce permettant de mieux le maintenir en place.

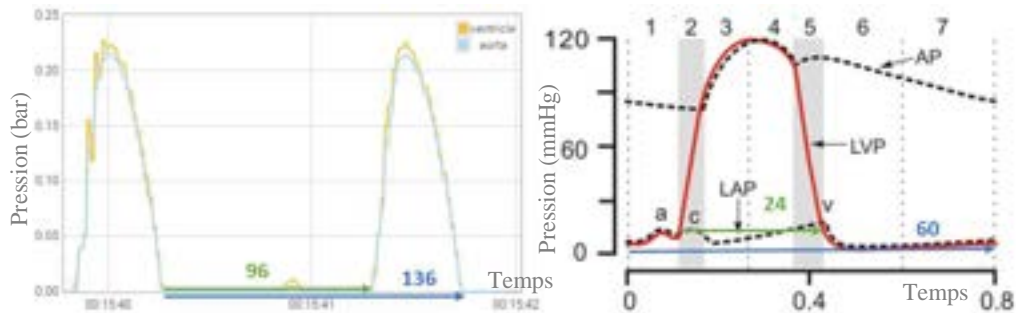


Figure 8 : Comparaison des cycles contraction (systole) – détente (diastole) dans le cas du banc d'essais et en réalité

6. Conclusion

Le prototype du banc d'essais (fig. 9) développé répond presque entièrement aux spécifications attendues. En effet, pour l'instant, il n'est pas possible de monter à plus de 50 bpm pour un volume éjecté de 75 ml/battement sans risquer la désolidarisation du bloc en silicone de l'aorte. Pour pouvoir monter jusqu'à 70 ou 90 bpm, il faut ajouter une pièce maintenant le haut du bloc de silicone de l'aorte. Un autre point faible du banc d'essais est le fait que la pression enregistrée dans le ventricule est trop élevée par rapport à une pression normale. Néanmoins, le banc d'essais est déjà prêt pour le test de l'instrument de résection et de remplacement de la valve aortique. Il pourra donc être employé dès que l'instrument sera prêt pour les tests.

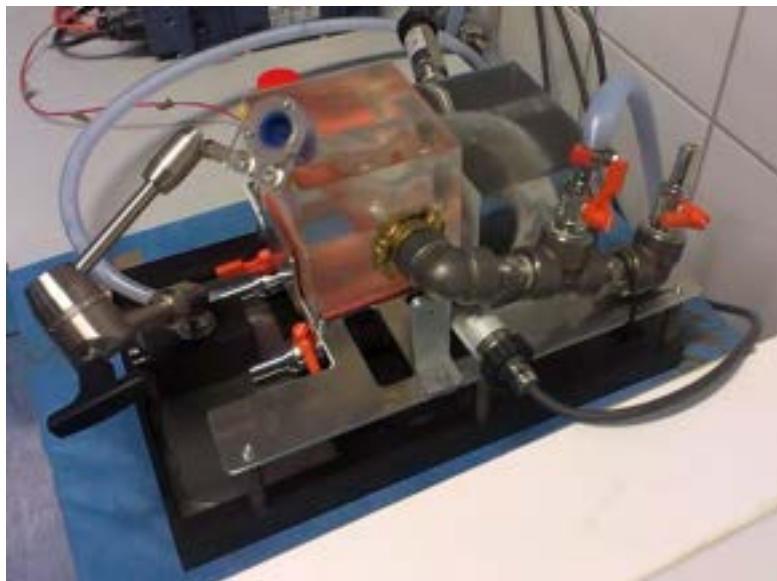


Figure 9 : Prototype du banc d'essais

7. Sources

- [1] DRAKE, R., *et al.*, *Gray's Anatomy for Students*, 3^e éd. Philadelphia, Churchill Livingstone, 2014.
- [2] FÉDÉRATION FRANÇAISE DE CARDIOLOGIE, (consulté le 9 octobre 2015), *Fonctionnement du cœur*.
Adresse URL : www.fedecardio.org
- [3] KLABUNDE, R., (mis à jour le 07 janvier 2015), *Cardiac cycle*.
Adresse URL : www.cvphysiology.com
- [4] CHRISTEN, T., LERCH, R. & TRINDADE, P., *Sténose aortique chez l'adulte*.
Forum Med Suisse, 6, 2006, pp. 626–632.
- [5] EDWARDS, (consulté le 9 octobre 2015), *Sténose aortique*.
Adresse URL : www.edwards.com
- [6] MEDI-LINE, *et al.*, *BW_AVATAR2 – Aortic Valve TransApically Resected and Replaced*.
BioWin 8e Appel, 2012.
- [7] LIVERPOOL HEART AND CHEST HOSPITAL, (consulté le 9 octobre 2015), *Tavi symposium – resources*.
Adresse URL : www.lhch.nhs.uk
- [8] PAI, R. & STUESSE, D., (mis en ligne le 12 mars 2014), *Aortic valve replacement surgery*.
Adresse URL : www.webmd.com
- [9] QUADEN, R., *et al.*, *Percutaneous aortic valve replacement : resection before implantation*.
European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, 27, 2005, pp. 836–840.
- [10] BOLLEN, X., *Assistance to the replacement of aortic valve through minimally invasive beating heart surgery*.
PhD thesis, 2016, UCLouvain.
- [11] CLIPART, (consulté le 14 mars 2016), Clipart.
Adresse URL : openclipart.org

Étude d'un modèle générique pour un cycle de Rankine à fluide organique

Ing. C. PONCELET
Dr Ir V. HANUS
PIERRARD – Virton

Cet article traite de l'étude d'un modèle générique pour la conception d'une machine à cycle de Rankine à fluide organique avec récupérateur de chaleur. Une plage d'étude a été établie pour le modèle de référence basé sur la méthode classique. Des explications sont données sur le modèle générique et son expression ainsi que les approches développées pour caractériser le récupérateur et les résultats obtenus.

Mots-clefs : cycle, Rankine, organique, ORC, récupérateur, échangeur de chaleur interne, modèle, thermodynamique, énergie, production.

This article deals with the study of a generic model for the design of an organic Rankine cycle unit with internal heat exchanger. A characteristic parameters range is established for the reference model based on the classic method. Explanations are given on the generic model and its expression moreover approaches developed to characterize the extra exchanger and results.

Keywords : cycle, Rankine, organic, ORC, recuperator, internal heat exchanger, IHE, model, thermodynamics, energy, production.

1. Introduction

Dans le cadre du développement d'un modèle générique pour un cycle de Rankine à fluide organique (ORC) sous-critique, une généralisation des calculs permettrait de déterminer les performances du système indépendamment du fluide employé, en contraste avec la méthode classique. Le travail réalisé permet d'explorer la possibilité d'étendre le modèle générique, en cours de validation à l'Ecole Polytechnique de Montréal pour une unité de base, à une configuration plus avancée, telle qu'avec un échangeur de chaleur interne. Plusieurs approches sont abordées afin de caractériser l'élément additionnel.

2. Cycle organique de Rankine

Le cycle organique de Rankine se base sur le cycle de Rankine traditionnel. Toutefois pour une unité ORC, le fluide utilisé est de type organique plutôt que de l'eau comme les centrales conventionnelles. Il est alors possible d'exploiter des sources d'énergie à plus basse température telles que le solaire concentré, la biomasse, la géothermie ou de valoriser des rejets thermiques industriels.

En ce qui concerne le cycle (Figure 1a), un fluide de travail (wf) est mis sous pression par une pompe (PP) ; ce fluide est ensuite évaporé grâce à un apport de chaleur (EV) d'une source chaude (hf) ; la vapeur ainsi générée traverse une turbine (EX) généralement couplée à un générateur produisant alors de l'électricité. Le cycle étant fermé, il est nécessaire de condenser le fluide (CD) pour la prochaine chauffe à l'aide d'une source froide (cf).

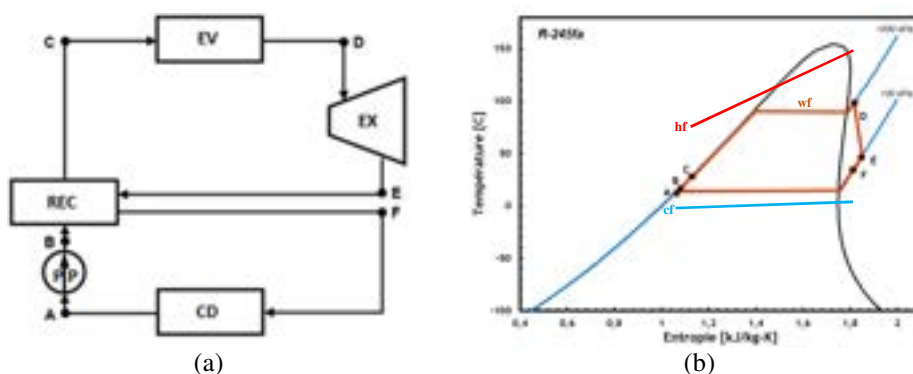


Figure 1 : (a) Schéma cycle de Rankine avec récupérateur ; (b) Diagramme T-s

Lorsque le fluide organique est de type sec, c'est-à-dire, lorsque la pente de la courbe de vapeur saturée est positive, il est possible d'implémenter un récupérateur de cha-

leur interne (REC) afin d'augmenter les performances du système. Cet élément permet alors de préchauffer le fluide en sortie de pompe grâce à la récupération de la chaleur sensible de vapeur surchauffée en sortie de turbine. Un tel aménagement permet la réduction d'énergie à apporter au fluide lors du préchauffage tout comme la taille du condenseur qui doit, dès lors, échanger moins de chaleur avec la source froide. Bien que le rendement global soit amélioré, il faut signaler un coût d'investissement plus élevé et des pertes de charges totales plus importantes.

Les diagrammes thermodynamiques les plus utilisés pour représenter ce cycle sont les diagrammes température-entropie (T-s) (Figure 1b) et enthalpie-entropie (h-s) (Figure 2a).

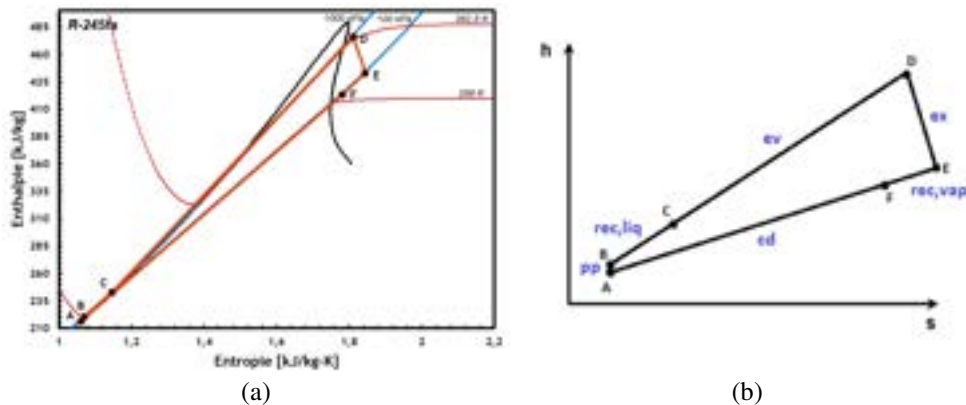


Figure 2 : (a) Diagramme h-s ; (b) Diagramme h-s simplifié

Dans ce dernier diagramme, les transformations isobares au niveau des échangeurs se rapprochent sensiblement à des droites, le diagramme est donc simplifié par la suite comme un quasi triangle (Figure 2b).

3. Modèle de référence

Une étude préliminaire a été nécessaire afin de mieux connaître l'ORC et son fonctionnement. Tout d'abord, une modélisation par la méthode classique a été effectuée à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver (EES). Pour cette modélisation, plusieurs hypothèses ont été posées : le fluide utilisé est le R-245fa, les échangeurs ont été modélisés en trois zones afin de caractériser les chaleurs sensibles et latente. Pour le récupérateur, la modélisation se limite à un échange monophasique. Pour les irréversibilités, seules les efficacités isentropiques au niveau de la pompe et de la turbine ainsi que les efficacités des échangeurs sont considérées. Cette modélisation sert de référence pour la suite du travail.

En parallèle, un travail de documentation a eu lieu via une revue de la littérature. Cela a permis de mettre en évidence les paramètres d'entrée pour la modélisation. De plus, une synthèse des conditions d'opérations a été effectuée parmi vingt références. Cette synthèse et une analyse des performances via le modèle classique a permis de proposer une plage d'étude préliminaire pour la suite, fournissant 3456 combinaisons de conditions d'opérations (Tableau 1, où les indices *in* et *out* représentent respectivement les états d'entrée et de sortie de l'élément considéré, \dot{m} est le débit massique, η_{is} est le rendement isentropique et ε désigne l'efficacité du récupérateur. Au niveau des échanges avec les fluides secondaires, les paramètres utilisés sont les températures des fluides T , les niveaux de surchauffe ΔT_{ev} et de sous refroidissement ΔT_{cd} ainsi que le pincement *pinch*). Les valeurs ainsi proposées permettent d'obtenir une simulation sur une large plage tout en conservant un temps de calcul raisonnable.

Paramètre	Valeur		
<i>Fluid\$</i>	R-245fa	$T_{crit} [C] = 154$	
$T_{h/in} [^{\circ}C]$	90	120	150
$T_{h/out} [^{\circ}C]$	70	80	
$\dot{m}_h [kg/s]$	10		
$T_{c/in} [^{\circ}C]$	5	12	25
$T_{c/out} [^{\circ}C]$	$T_{c,in} + 5$		
$\eta_{is,pp}$	0,5	0,8	
$\eta_{is,ex}$	0,5	0,8	
ε_{rec}	0,25	0,65	
$\Delta T_{ev} [^{\circ}C]$	3	9	15
$\Delta T_{cd} [^{\circ}C]$	1	5	
<i>pinch_{ev}</i> [$^{\circ}C$]	5	10	
<i>pinch_{cd}</i> [$^{\circ}C$]	5	10	

Tableau 1 : Synthèse des conditions d'opération

4. Modèle générique [1]

Tout d'abord, le modèle générique se base sur la notion de température équivalente \tilde{T} . Il s'agit de la pente de la droite caractérisant l'isobare du diagramme h-s (Figure 3), où *i* et *j* représentent les états thermodynamiques du cycle (Éq. 1).

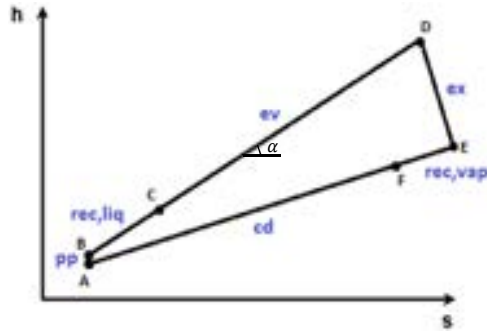


Figure 3 : Représentation graphique de la température équivalente

$$\tilde{T}_{ij} = \tan \alpha = \frac{\Delta h_{ij}}{\Delta s_{ij}} \quad (1)$$

De plus, il est nécessaire de déterminer des paramètres génériques (Tableau 2), c'est-à-dire des paramètres physiques indépendants du fluide de travail et permettant d'établir au minimum une comparaison économique.

Modèle classique	Modèle générique
$T_{hf,in} ; T_{cf,in} ; \dot{m}_{hf}$	$T_{hf,in} ; T_{cf,in} ; \dot{m}_{hf}$
$\eta_{is,pp} ; \eta_{is,ex}$	$\eta_{is,pp} ; \eta_{is,ex}$
$T_{hf,out} ; T_{cf,out}$	$\tilde{T}_{hf} ; \tilde{T}_{cf}$
$\Delta T_{ev} ; \Delta T_{cd}$	$(\bar{U}A)_{ev} ; (\bar{U}A)_{cd}$
ϵ_{rec}	$(\bar{U}A)_{rec}$
$pinch_{ev} ; pinch_{cd}$	$\tilde{T}_{ev} ; \tilde{T}_{cd}$

Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres par modèle

Par la suite, les bilans sont établis à partir des deux premiers principes de la thermodynamique. Après avoir écrit ces bilans, le seul terme devant encore être déterminé, par rapport aux équations pour une unité de base, est l'entropie générée au niveau du récupérateur \dot{S}_{rec} :

$$W_{pp} + \dot{Q}_{ev} - W_{ex} - \dot{Q}_{cd} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\dot{Q}_{ev}}{\tilde{T}_{ev}} - \frac{\dot{Q}_{cd}}{\tilde{T}_{cd}} + \dot{S}_{mec} + \dot{S}_{rec} = 0 \quad (3)$$

$$\dot{S}_{mec} = \dot{S}_{pp} + \dot{S}_{ex} \quad (4)$$

$$\dot{S}_{rec} = \dot{Q}_{rec} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{rec,liq}} - \frac{1}{\tilde{T}_{rec,vap}} \right) \quad (5)$$

avec $\dot{W}_i = \dot{m} \Delta h_i$ et $\dot{Q}_i = \dot{m} \Delta h_i$, qui désignent respectivement les puissances mécanique et thermique, et \dot{S}_i l'entropie générée, où i fait référence à l'élément du cycle considéré, ainsi que $\frac{\dot{Q}_{ev}}{T_{hf}}$ et $\frac{\dot{Q}_{cd}}{T_{cf}}$ représentent les entropies générées lors de l'échange de chaleur avec les sources externes.

5. Analyse

À travers l'analyse, il est question de mettre en avant un moyen permettant de déterminer les caractéristiques $\tilde{T}_{rec,liq}$ et $\tilde{T}_{rec,vap}$ de l'échangeur de récupération à partir des paramètres d'entrée connus afin de déterminer l'entropie générée au niveau du récupérateur (Éq. 5).

5.1. Relation au niveau du récupérateur

La première méthode de détermination explorée se base sur l'équilibre de l'échange thermique à travers le récupérateur (Éq. 5), telle que la chaleur de la vapeur est totalement transmise au liquide. Après développement, il pourrait être possible d'exprimer une température par rapport à l'autre via une relation linéaire (Éq. 8).

$$\Delta h_{rec,liq} = \Delta h_{rec,vap} \quad (6)$$

$$\tilde{T}_{rec,liq} \cdot \Delta S_{rec,liq} = \tilde{T}_{rec,vap} \cdot \Delta S_{rec,vap} \quad (7)$$

$$\tilde{T}_{rec,liq} = \frac{\Delta S_{rec,vap}}{\Delta S_{rec,liq}} \cdot \tilde{T}_{rec,vap} \quad (8)$$

Toutefois après simulation, aucune tendance directe n'apparaît (Figure 4). Après réflexion, il est possible de déduire que le rapport d'entropie $\frac{\Delta S_{rec,vap}}{\Delta S_{rec,liq}}$ ne peut représenter une constante.

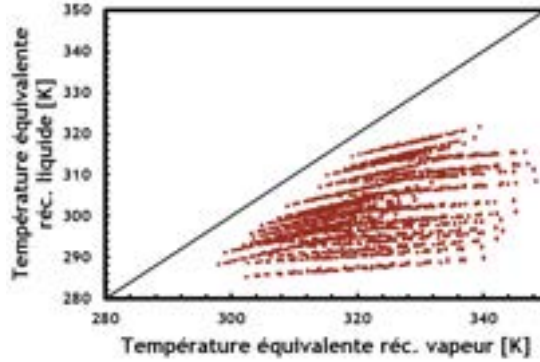


Figure 4 : Relation entre les températures équivalentes caractérisant le récupérateur

En effet, cela se traduit graphiquement (Figure 2a), la pente de la courbe de saturation pour le côté liquide (BC) du récupérateur est plus faible que pour le côté vapeur (EF). Dès lors, pour toute variation de la quantité de chaleur échangée Δh , l'entropie du côté liquide subira des variations plus importantes que pour celle côté vapeur.

5.2. Approximation graphique

La seconde méthode se base sur la représentation graphique du cycle dans le diagramme h-s simplifié (Figure 2b), il est possible de considérer une relation entre les températures équivalentes du récupérateur avec celles des deux échangeurs externes. Les niveaux de pression du côté liquide et du côté vapeur du récupérateur étant similaires respectivement à l'évaporateur et au condenseur, il est possible de supposer qu'il en est de même pour les températures équivalentes :

$$\tilde{T}_{rec,liq} \approx \tilde{T}_{ev} \quad (9)$$

$$\tilde{T}_{rec,vap} \approx \tilde{T}_{cd} \quad (10)$$

L'expression caractérisant l'entropie générée au niveau du récupérateur (Éq. 5) serait alors la suivante :

$$\dot{S}_{rec} = \dot{Q}_{rec} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{ev}} - \frac{1}{\tilde{T}_{cd}} \right) \quad (11)$$

Cependant, cette expression entraîne une variation d'entropie négative (Éq.13) en contradiction avec le second principe de la thermodynamique (Éq.12) :

$$\dot{Q}_{rec} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{rec,liq}} - \frac{1}{\tilde{T}_{rec,vap}} \right) > 0 \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{rec} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{ev}} - \frac{1}{\tilde{T}_{cd}} \right) < 0 \quad (13)$$

Les graphes présentés à la Figure 5 permettent de visualiser l'erreur commise sur chaque terme lors de cette approximation.

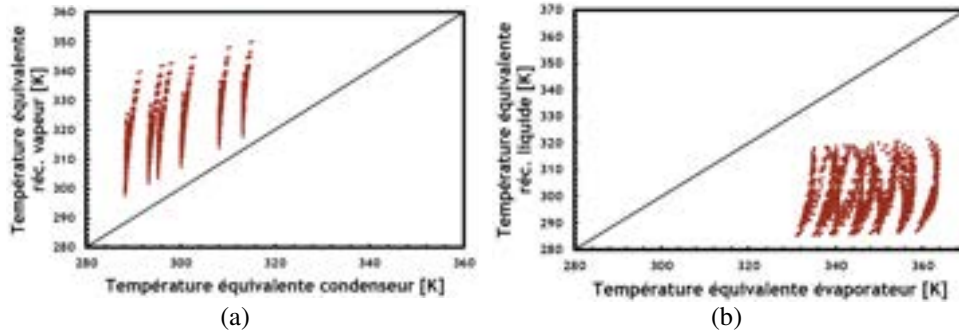


Figure 5 : Relation entre les températures équivalentes du récupérateur côté vapeur (a) et liquide (b) avec les échangeurs externes

$$\tilde{T}_{rec,vap} > \tilde{T}_{cd} \quad (14)$$

$$\tilde{T}_{rec,liq} < \tilde{T}_{ev} \quad (15)$$

Après analyse, il est clairement visible que $\tilde{T}_{rec,vap}$ est supérieur à \tilde{T}_{cd} et également invalidé pour le coté chauffe (Éq. 14 & 15).

5.3. Température moyenne logarithmique

La méthode suivante se base sur une autre interprétation de la température équivalente. Pour un échange de chaleur latente L_v , \tilde{T} est l'expression de la température de saturation à la pression donnée (Éq. 16). Pour la chaleur sensible, lorsque les variations de la capacité calorifique sont négligées, on remarque que la température équivalente se traduit en une expression de température moyenne logarithmique (LMT) (Éq. 17) :

$$\tilde{T}_{ij} = \frac{\Delta h_{ij}}{\Delta s_{ij}} = \frac{L_v}{\frac{L_v}{T_{sat}}} = T_{sat} \quad (16)$$

$$\tilde{T}_{ij} = \frac{\Delta h_{ij}}{\Delta s_{ij}} \approx \frac{c_p(T_j - T_i)}{c_p \ln \left(\frac{T_j}{T_i} \right)} = \frac{T_j - T_i}{\ln T_j - \ln T_i} = LMT \quad (17)$$

Il est alors pertinent de s'interroger sur la relation possible avec la différence de température moyenne logarithmique (LMTD), largement utilisée pour le dimensionnement d'échangeurs, comme étant la différence de température équivalente (Éq. 18).

$$\tilde{T}_j - \tilde{T}_i = LMT_j - LMT_i \approx LMTD_{ij} \quad (18)$$

Après analyse numérique, on constate que l'erreur maximale pour LMT sur les zones d'échange est plutôt négligeable mais pour toute la phase de chauffe, l'erreur augmente. Pour la relation LMTD, celle-ci n'est pas concluante sauf pour le récupérateur avec 1,32% d'erreur maximale tel que :

$$LMTD_{rec} \approx \tilde{T}_{rec,vap} - \tilde{T}_{rec,liq} \quad (19)$$

Par conséquent, la puissance thermique échangée et l'entropie générée au récupérateur peuvent donc être approximées en utilisant cette méthode :

$$\dot{Q}_{rec} = (\overline{UA})_{rec} LMTD_{rec} \approx (\overline{UA})_{rec} (\tilde{T}_{rec,vap} - \tilde{T}_{rec,liq}) \quad (20)$$

$$\dot{S}_{rec} \approx (\overline{UA})_{rec} (\tilde{T}_{rec,vap} - \tilde{T}_{rec,liq}) \left(\frac{1}{\tilde{T}_{rec,liq}} - \frac{1}{\tilde{T}_{rec,vap}} \right) \quad (21)$$

où le coefficient d'échange $(\overline{UA})_{rec}$ est de source connue. Il faut noter que la précision de l'approximation de l'échange thermique au récupérateur par la méthode de LMTD diminue lorsque la pente de la courbe de vapeur saturée s'accroît ou que le rendement isentropique de la turbine se réduit. En effet, le potentiel de vapeur surchauffée étant plus important et par conséquent les différences de température plus grandes, les approximations engendrent moins de précision.

5.4. Equilibre des échanges

Pour aller plus loin, il est possible de se baser sur une méthode géométrique plus précise en lien avec deux méthodes développées précédemment (Éq. 6 & 19). A partir de la représentation graphique de la Figure 6, où les notations font référence à la Figure 1a, il est possible de décomposer les droites BD et AE, représentant les isobares haute et basse pression, chacune en deux segments plus représentatifs de l'allure de la courbe de pression.

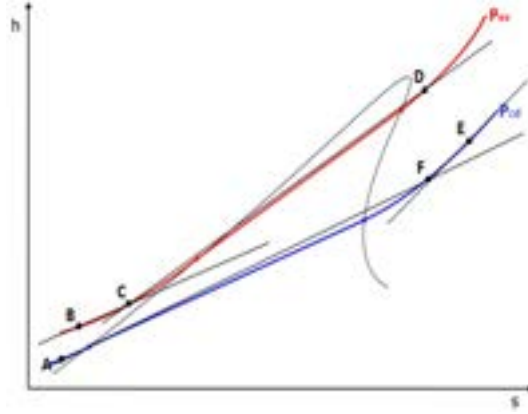


Figure 6 : Représentation des températures équivalentes pour le récupérateur

Les triangles BCD et AFE ainsi formés permettent de déduire deux équivalences :

$$\tilde{T}_{BD} (\dot{S}_{heating'} + \dot{S}_{rec,liq}) = \tilde{T}_{heating} \dot{S}_{heating'} + \tilde{T}_{rec,liq} \dot{S}_{rec,liq} \quad (22)$$

$$\tilde{T}_{AE} (\dot{S}_{cooling'} + \dot{S}_{rec,vap}) = \tilde{T}_{cooling} \dot{S}_{cooling'} + \tilde{T}_{rec,vap} \dot{S}_{rec,vap} \quad (23)$$

où $\dot{S}_{heating'} = \frac{\dot{Q}_{heating}}{\tilde{T}_{heating}}$, $\dot{S}_{cooling'} = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\tilde{T}_{cooling}}$, $\dot{S}_{rec,liq} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\tilde{T}_{rec,liq}}$, $\dot{S}_{rec,vap} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\tilde{T}_{rec,vap}}$ et $\dot{Q}_{rec} = L_{rec} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{rec,liq}} - \frac{1}{\tilde{T}_{rec,vap}} \right)$, approximé au point précédent (Éq. 20), avec, L_{rec} qui désigne un coefficient d'échange phénoménologique pour le récupérateur.

Par ailleurs, la puissance de source chaude disponible pouvant être définie à partir des données relatives au fluide secondaire chaud, il est possible de déterminer la température équivalente pour la zone de chauffe via la méthode LMT ainsi que l'entropie générée telles que :

$$\dot{Q}_{heating} = \dot{m}_{hf} c_{p_{hf}} (T_{hf,in} - T_{hf,out}) = \dot{m}_{hf} c_{p_{hf}} 2(T_{hf,in} - \tilde{T}_{hf}) \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{heating} = L_{heating} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{heating}} - \frac{1}{\tilde{T}_{hf}} \right) \quad (25)$$

$$\dot{S}_{heating} = \dot{Q}_{heating} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{heating}} - \frac{1}{\tilde{T}_{hf}} \right) \quad (26)$$

où $L_{heating}$ représente le coefficient d'échange phénoménologique, i.e. un coefficient basé sur des relations empiriques, pour la chauffe. La différence de température lors de l'échange (Éq. 24) est déterminée à partir du double de la différence entre la tem-

pérature d'entrée du fluide secondaire chaude et la température moyenne logarithmique. Cette expression se base sur l'approche du point milieu d'un segment (Figure 7), le point milieu P correspond à la valeur moyenne d'un segment OQ tel qu'il est possible d'écrire la relation $Q-O = 2(Q-P)$.

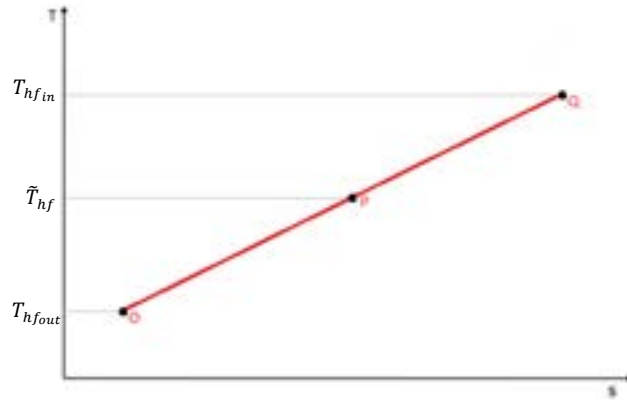


Figure 7 : Représentation du point milieu

Par la suite, des expressions similaires peuvent être données pour le refroidissement :

$$\dot{Q}_{cooling} = L_{cooling} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{cf}} - \frac{1}{\tilde{T}_{cooling}} \right) \quad (27)$$

$$\dot{S}_{cooling} = \dot{Q}_{cooling} \left(\frac{1}{\tilde{T}_{cf}} - \frac{1}{\tilde{T}_{cooling}} \right) \quad (28)$$

où $L_{cooling}$ représente le coefficient d'échange phénoménologique pour le refroidissement. Par la suite les bilans de puissance (Éq. 2) et d'entropie (Éq. 3) doivent être respectés tout comme le bilan :

$$\dot{S}_{pp} + \frac{\dot{Q}_{rec} + \dot{Q}_{heating}}{\tilde{T}_{BD}} + \dot{S}_{ex} = \frac{\dot{Q}_{cooling} + \dot{Q}_{rec}}{\tilde{T}_{AE}} \quad (29)$$

L'évaluation des entropies générées à la pompe et la turbine sont respectivement :

$$\dot{S}_{pp} = \frac{\dot{W}_{pp}}{\tilde{T}_{pp}} \quad (30)$$

$$\dot{S}_{ex} = -\frac{\dot{W}_{ex}}{\tilde{T}_{ex}} \quad (31)$$

avec $\tilde{T}_{pp} = \left(\frac{1}{1 - \eta_{is,pp}} \right) \tilde{T}_{rec,liq}$ et $\tilde{T}_{ex} = \left(\frac{-\eta_{is,ex}}{1 - \eta_{is,ex}} \right) \tilde{T}_{rec,vap}$

En récapitulatif, les paramètres utilisés pour cette approche sont repris dans le Tableau 3 suivant en comparaison avec les paramètres utilisés dans le modèle classique.

Modèle classique	Modèle générique
$T_{hf,in} ; T_{cf,in} ; \dot{m}_{hf}$	$\bar{T}_{hf,in} ; \bar{T}_{cf,in} ; \dot{m}_{hf}$
$\eta_{is,pp} ; \eta_{is,ex}$	$\eta_{is,pp} ; \eta_{is,ex}$
$T_{hf,out} ; T_{cf,out}$	$\bar{T}_{hf} ; \bar{T}_{cf}$
$\Delta T_{ev} ; \Delta T_{cd}$	$L_{ev} ; L_{cd}$
ϵ_{rec}	L_{rec}
$pinch_{ev} ; pinch_{cd}$	$\bar{T}_{BD} ; \bar{T}_{AE}$

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres de modélisation

Les seules erreurs introduites dans cette approche proviennent de l'évaluation de la température équivalente de chauffe (Éq. 24) et de l'approximation de l'échange thermique au récupérateur si l'expression approximée par la méthode LMT (Éq. 19), donnée au point précédent, est utilisée.

6. Perspectives

Au niveau des perspectives, il serait nécessaire d'évaluer de manière numérique la dernière méthode proposée. Par ailleurs, un avis critique conduit à se demander s'il est vraiment possible d'établir un modèle générique pour une configuration ORC avec récupérateur. La capacité de récupération dépendant du fluide utilisé, il est en effet difficile d'imaginer une généralisation totale.

Pour finir, le modèle générique étant intéressant pour une simplification de conception, il est pertinent de continuer son extension pour davantage de fluides, de même que pour d'autres configurations, telles qu'une unité avec régénération.

7. Conclusion

Après un approfondissement des connaissances sur l'ORC, il a été possible de développer plusieurs méthodes afin de déterminer une relation permettant de caractériser l'élément additionnel. Les résultats de l'analyse préliminaire sont concluants et permettent de guider la suite du projet. Toutefois, la perspective d'une généralisation pour une unité avec récupération reste difficile à concevoir au vu du lien direct avec la courbe de saturation caractéristique pour chaque fluide et donc leur potentiel de récupération.

8. Sources

- [1] NEVEU, P. *et al.*, « Optimal integration of Rankine cycles in concentrated solar power plant », in : *Proceedings of ECOS 2015-The 28th International Conference on efficiency, cost, optimization and environmental impact of energy systems*, Pau, France, 2015.

9. Remerciements

Nous tenons à remercier Monsieur Alberto TEYSSEDOU, professeur titulaire au département de génie physique de l'Ecole Polytechnique de Montréal pour avoir offert la possibilité de réaliser un stage au sein de son département, ainsi que Monsieur Etienne SALOUX, post doctorant, pour son suivi et sa patience tout au long de ce projet, ainsi que son aimable autorisation pour cette publication.

Extension du développement de la biométhanisation en voie sèche en container maritime avec recirculation des percolats

Ing. S. GRODENT
Ir C. CHARLIER
GRAMME – Liège

La biométhanisation constitue une filière d'avenir. Pour de petites exploitations générant du fumier, une solution de biométhanisation en voie sèche réalisée à partir de container maritime a été imaginée. Pour ce type de digestion, la gestion des percolats issus de la digestion se révèle déterminante pour optimiser la production. Ce travail vise à mieux cerner l'importance de cette gestion, d'une part théoriquement sur une unité à grande échelle et d'autre part pratiquement grâce à des tests réalisés sur une unité de laboratoire.

Mots-clefs : méthanisation sèche, container, recirculation des percolats, digestion, unité pilote.

The biogas is a promising sector. For small farms which generating manure, a dry anaerobic digestion solution made from shipping container was designed. For this type of digestion, the management of leachates from digestion appears crucial to optimize production. This work aims to better understand the importance of this management, on the one hand theoretically on a large scale unit and on the other practically through tests carried out on a laboratory unit shipping containers.

Key words: dry anaerobic digestion, container, percolate recirculation, digestion, pilot unit.

1. Introduction

Ce travail est issu de la volonté de l'entreprise *BSP Construction* de poursuivre le développement d'une unité de biométhanisation en voie sèche discontinue à partir de containers maritimes. Cette entreprise œuvrant dans le domaine de la construction métallique souhaite diversifier son activité en apportant une solution mettant en œuvre la biométhanisation en voie sèche pour les exploitations agricoles de plus petite taille.

Un premier travail réalisé en 2015 avait permis de lancer le projet en fournissant une représentation de l'unité, ainsi que les outils permettant de dimensionner l'installation sur base des ressources disponibles et de calculer la rentabilité d'un projet.

Suite à ce travail, *BSP Construction* désirait mettre en pratique le schéma de production grâce à une unité pilote. Pour réaliser des tests dans les temps, une unité de laboratoire présente à l'institut HELMo Gramme a donc été adaptée afin d'étudier la digestion en voie sèche discontinue.

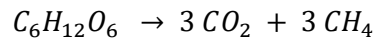
Tout d'abord, il a fallu comprendre les mécanismes de la voie sèche discontinue à travers l'étude de la dynamique réactionnelle et de la gestion des percolats au sein du fumier en digestion.

Finalement, un test de production de biogaz a été lancé dans l'unité de laboratoire adaptée. Une production de méthane a été obtenue à partir de fumier, sans inoculation, ni recirculation des jus. Ainsi, il a été prouvé qu'une digestion simple, sans recirculation, était envisageable pour les plus petites unités.

1.1. La biométhanisation

La méthanisation est une fermentation anaérobie c'est-à-dire en absence d'oxygène, en conditions contrôlées, au cours de laquelle les micro-organismes dégradent la matière organique. Cette dégradation génère deux produits à savoir un gaz combustible, le biogaz, composé principalement de méthane, qui peut être utilisé comme combustible pour produire de l'électricité et de la chaleur, et un produit humide riche en matières organiques partiellement stabilisées, appelé digestat. Le retour au sol du digestat s'effectue en l'état ou après une phase de compostage. Toutes les matières organiques sont susceptibles d'être méthanisées (excepté des composés très stables comme la lignine ou le bois) et de produire du biogaz, avec un potentiel méthanogène (capacité à produire du méthane par fermentation anaérobie) toutefois très variable en fonction du déchet traité. La méthanisation est un procédé d'une technicité plus poussée et plus complexe que le compostage.

Lorsqu'elle est appliquée sur une molécule organique, le glucose par exemple, la réaction de dégradation anaérobie est la suivante :



Cette réaction de craquage de la molécule de glucose est réalisée par les micro-organismes participant au processus de biométhanisation. Il est à noter que globalement la réaction est endothermique et nécessite donc un apport d'énergie sous forme de chaleur.

1.2. La biométhanisation en voie sèche discontinue

Les procédés les plus connus et les plus répandus sont les procédés humides infiniment mélangés, procédés dans lesquels la biomasse humide est mélangée par brassage aux micro-organismes. Ces procédés sont particulièrement utilisés pour de grosses installations pouvant disposer d'un apport continu en substrat. Les exploitations agricoles dont l'effluent principal est le fumier se dirigeront plutôt vers la biométhanisation en voie sèche discontinue (taux de matière sèche > 20%).

Fonctionnement d'une installation en voie sèche discontinue

Une unité de biométhanisation en voie sèche discontinue est constituée de plusieurs digesteurs fonctionnant en parallèle. En effet, le fonctionnement discontinu induit une irrégularité dans la production de biogaz. Pour garantir une production de biogaz la plus stable et la plus régulière possible, les digesteurs sont remplis tour à tour de matière fraîche, puis sont refermés hermétiquement. Ils produisent ainsi du biogaz avec un certain déphasage les uns par rapport aux autres, ce qui a pour effet de lisser la production. Une fois que la production d'un des digesteurs est jugée insuffisante, celui-ci est ouvert pour le vider de son digestat, et le remplir ensuite avec de la matière fraîche.

Pour améliorer le rendement, les jus issus de la digestion des matières organiques ou percolats sont récupérés dans une cuve de stockage avant d'être aspergés sur la matière en décomposition comme on peut le voir sur la figure 1. Selon les cas, une recirculation interne propre à chaque digesteur peut également être envisagée.

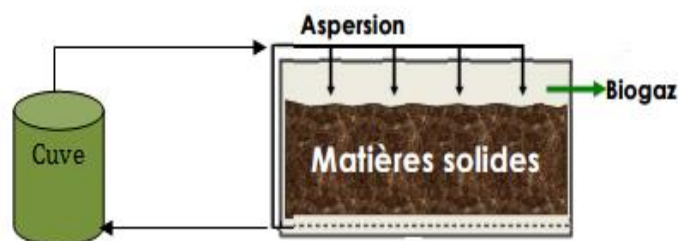


Figure 1: Recirculation des percolats issus de la digestion anaérobie.

2. Les paramètres influençant la digestion en voie sèche discontinue

2.1. Ajout d'inoculum

Afin d'éviter une acidification durant la digestion, le substrat frais, à savoir la matière première, doit être mélangé à un inoculum (matière précédemment digérée). En effet, l'inoculum contient des bactéries qui vont directement pouvoir être opérationnelles et ainsi accélérer le démarrage de la digestion anaérobie. Les bactéries méthanogènes présentes, trouvent au sein de cet inoculum un refuge pour se développer sans être inhibées par les produits des premières phases du processus (hydrolyse et acidogénèse). De plus, l'inoculum a un pouvoir tampon assez élevé qui va aider à maintenir le pH dans des zones acceptables pour les bactéries. La quantité d'inoculum à ajouter dépend quant à elle des caractéristiques du substrat qui l'accompagne. Pour le fumier bovin, une quantité de 20% d'inoculum est idéale [5].

2.2. Fréquence de recirculation

La fréquence de recirculation des jus produits par la digestion a une influence sur la production de méthane. La fréquence a particulièrement de l'importance lorsque la matière est facilement hydrolysable. Une expérience réalisée par Sigrid Kush [6] a montré qu'avec une recirculation discontinue à raison de 2 recirculations journalières, on obtenait une production supplémentaire de 50% par rapport à une recirculation appliquée en continu.

2.3. Immersion du substrat

En immergeant le substrat, la teneur en eau de la matière est directement ajustée, les bactéries peuvent dès lors se développer plus vite. Une étude française [1] a révélé l'impact que pouvait avoir cette immersion du substrat sur le rendement de production de méthane. Ils ont constaté une augmentation non négligeable de la production de méthane (13%) lorsque le substrat passe de 33 à 50% d'immersion.

3. Application sur une unité réalisée en container maritime

Au vu de la théorie sur la recirculation, il est possible de voir que la gestion des percolats est un paramètre-clé pour la digestion. Un cycle complet dure en théorie 35 jours [7]. En théorie avec six digesteurs, un des digesteurs sera donc vidé puis rempli tous les six jours environ. Le schéma du fonctionnement de la recirculation est donné sur la figure 2.

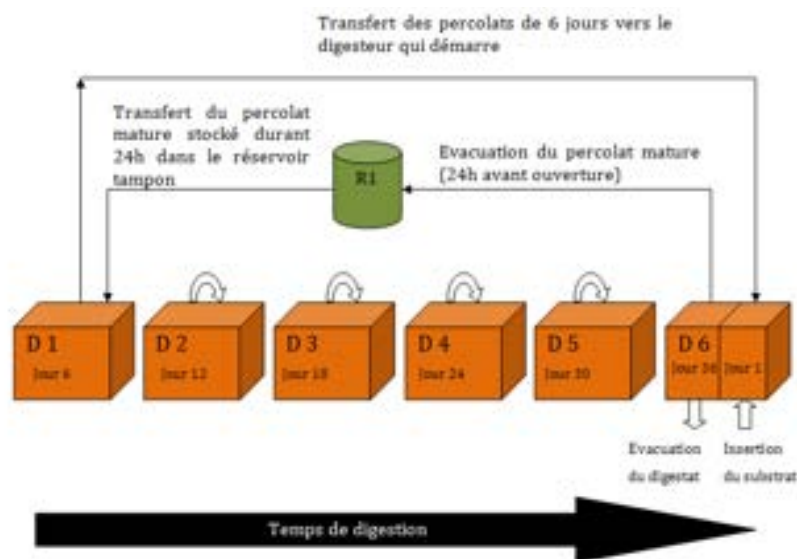


Figure 2: Fonctionnement de la recirculation au sein de l'unité de BSP Construction.

Les paragraphes qui suivent décrivent les étapes nécessaires pour faire tourner l'installation correctement.

Il convient de retirer les percolats 24 heures avant de vider un digesteur en fin de cycle (D6) pour diminuer la siccité du digestat et en faciliter ainsi l'épandage [3]. Les percolats matures contiennent de nombreuses bactéries méthanogènes et constituent un parfait inoculum. Ces jus extraits du digesteur en fin de cycle (D6) seront stockés dans un réservoir tampon (R1) durant 24h.

Lorsqu'un digesteur atteint 36 jours de digestion (D6), la benne est retirée par l'exploitant qui va vider le digestat dans la zone de stockage prévue à cet effet. L'exploitant procède ensuite au remplissage de celle-ci avant de la remettre dans le container. Une fois que les portes du container sont fermées, la digestion peut démarrer.

Pour stimuler l'hydrolyse de la matière, les jus présents dans le digesteur précédemment lancé (D1), sont transférés dans le digesteur qui vient d'être rempli de substrat frais (D6).

Le digesteur D1 est maintenant prêt à recevoir un inoculum plus mature. Après six jours de digestion, la phase d'hydrolyse a créé beaucoup d'acides gras volatils. Les bactéries méthanogènes provenant du réservoir tampon vont pouvoir les assimiler. On devrait en principe constater une augmentation du débit de méthane à partir de ce stade.

Pour les digesteurs ayant plus de douze jours de digestion, une recirculation est organisée en interne. Grâce à un jeu de vannes, les percolats des différents digesteurs passent tour à tour par la pompe du container technique.

Pour optimiser la production, la fréquence de recirculation doit être adaptée en fonction du temps de digestion. L'expérience de Mr Brosset¹, contacté dans le cadre de recherche sur la recirculation en voie sèche discontinue a été d'une grande utilité pour trouver la bonne fréquence de recirculation et les quantités optimales de percolats à recirculer. Dans son installation, la quantité de jus quotidiennement recirculée est de 150 litres/tonne de matière brute. Une recirculation discontinue a également été préférée à la recirculation continue.

En associant les connaissances pratiques de Monsieur Brosset à la théorie portant sur la gestion des percolats, il est possible d'établir le schéma de recirculation à suivre en termes de quantité et de fréquence. Les recommandations sont développées en prenant en compte le temps de digestion.

Du premier jour au sixième, la quantité de percolats exactement générée est inconnue, mais les jus présents sont recirculés deux fois par jour pour favoriser les opérations d'hydrolyse de la matière. Durant les six jours suivants, l'inoculum liquide mature vient s'ajouter aux jus. Une fréquence de recirculation faible (une fois par jour) permet l'établissement des centres méthanogènes.

A partir du douzième jour, les poches méthanogènes sont en principe stabilisées. Pour les alimenter suffisamment en acides gras volatils, on peut donc revenir à une recirculation plus intense à savoir deux fois par jour jusqu'au vingt-quatrième jour.

Au bout d'un certain temps, la matière digérée s'imperméabilise, le flux principal de percolats atteint moins facilement les zones d'échange [2]. Une recirculation trop

¹ Exploitant d'une installation de biométhanisation en voie sèche en Vendée.

intense est par conséquent inutile. On revient donc à une seule recirculation quotidienne à partir du vingt-quatrième jour et ce jusqu'à la fin de la digestion.

4. Unité de laboratoire

Après avoir étudié et mieux maîtrisé les différents paramètres de la digestion en voie sèche, il paraissait utile de réaliser des tests de production sur une unité de laboratoire.

4.1. Adaptation d'une unité existante

Dans le cadre d'un projet de chimie industrielle d'année de finalité génie énergétique durable, une unité de biométhanisation de laboratoire a été réalisée.

L'installation devait de base fonctionner en semi-continu, la matière première liquéfiée pouvant ainsi pénétrer dans le digesteur à tout moment via une ouverture de vanne. Pour étudier la biométhanisation en voie sèche discontinue, toute la matière a été insérée dès le début de la digestion et la vanne d'alimentation est restée fermée tout au long de l'expérience.

Adaptation du bidon

Le digesteur utilisé est un bidon en PEHD d'une capacité de soixante litres équipé d'une vanne d'alimentation placée sur le couvercle, d'une vanne d'évacuation du digestat placée sous celui-ci ainsi que du tuyau d'évacuation du biogaz produit.

Pour pouvoir récolter les jus produits durant la digestion, une pente a été créée dans le fond du bidon et celui-ci a été étanchéifié. Une grille placée dans le fond a permis de séparer la phase solide de la phase liquide.

Pour pouvoir répandre correctement les jus sur le dessus de substrat, un aspergeur a été placé sous le couvercle. A la base, cet aspergeur est simplement un petit récipient en plastique trouvé dans le commerce. De petits trous ont été percés dans son fond. Ces trous sont répartis de façon non symétrique pour palier le fait que le trou d'arrivée des jus n'est pas positionné au centre.



Figure 3: Aspergeur

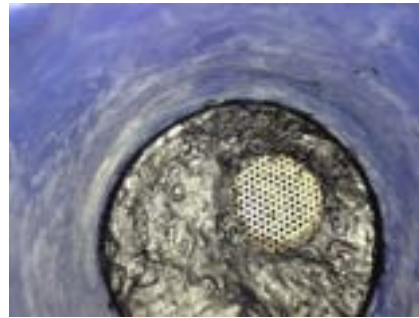


Figure 4: Fond du bidon

Vérification de l'étanchéité à l'air

Les bactéries méthanogènes sont des anaérobies strictes, ainsi la présence d'oxygène est non souhaitable parce que cela tue tout simplement ce type de bactéries. Des tests d'étanchéité ont donc eu lieu. Pour repérer les fuites, le bidon a été placé en immersion dans une baignoire, la pression étant amenée par un compresseur.

Mise en température

Pour effectuer la digestion anaérobie dans de bonnes conditions, il nous fallait un système permettant de maintenir la réaction à la température de 37°C (régime mésophile). Nous nous sommes dirigés vers un caisson mis à température à l'aide d'une résistance électrique. Le digesteur est donc chauffé par de l'air qui circule dans le caisson autour de lui. Cette circulation d'air chaud amène une certaine homogénéité de la température dans le digesteur et est réalisée grâce à un ventilateur. Le caisson a bien entendu été isolé. La figure ci-dessous montre le système de chauffage et ventilation installé dans le caisson.

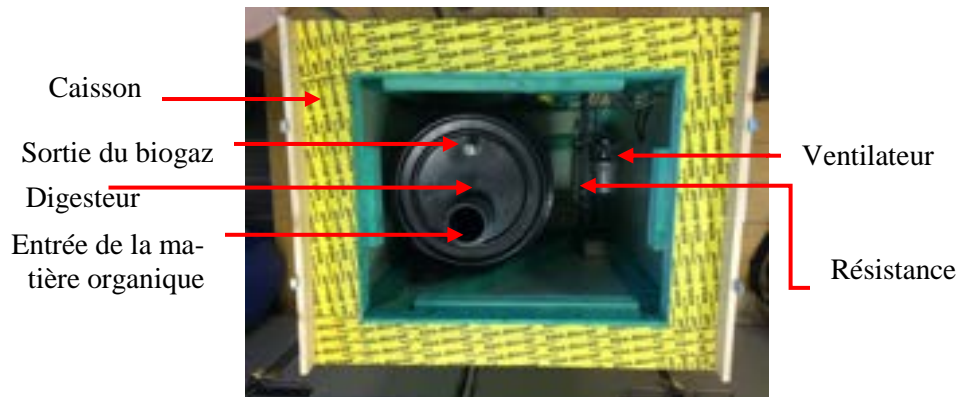


Figure 5: Système de chauffage mis en place

Le système de régulation est quant à lui dérivé d'un système de régulation de chaudière.

Evacuation du biogaz

Pour pouvoir mesurer le débit produit en temps réel un débitmètre a été installé. Pour éviter de faire entrer de l'oxygène par le tuyau de sortie du gaz, l'embout de ce dernier a été placé sous 1cm d'eau.



Figure 6: Système d'évacuation du biogaz

4.2. Mise en route de l'installation

Une fois que la mise en place des différentes adaptations a été faite, les tests ont pu débuter. Mais avant de démarrer la production du biogaz, il a fallu caractériser le fumier bovin utilisé pour les tests, en terme de matière sèche, de matière organique, d'éléments chimiques présents et de masse volumique pour pouvoir comparer nos résultats avec d'autres études (voir point 4.4.).

Pour suivre l'évolution de la production, les mesures de débit et de température ont été prises en continu alors que le contenu du biogaz a, quant à lui, été évalué ponctuellement.

Caractérisation du fumier bovin

Pour évaluer le taux de matière sèche du fumier, trois échantillons représentatifs de la matière placée dans le bidon ont été chauffés à l'étuve à une température de 105°C durant plusieurs heures. La température supérieure à 100°C oblige l'eau libre présente dans la matière à s'évaporer. Au fil des heures la masse diminue pour finalement se stabiliser.

Plusieurs échantillons ont été prélevés afin d'établir une moyenne compte tenu de l'hétérogénéité du fumier bovin. Ces tests ont révélé que la teneur moyenne en matière sèche du fumier était de 24% pour ce type de fumier. On se trouve bien dans des conditions de digestion en voie sèche (MS > 20%).

La matière sèche obtenue à l'étape précédente est composée de substances minérales (calcium, magnésium,...), mais aussi de substances organiques (glucides, lipides, protides, acides nucléiques). Ces molécules complexes sont constituées majoritairement des éléments C, H, O et N. Un chauffage puissant dans un four à 550°C permet de dégrader la matière organique en matière minérale qui s'échappe ensuite du creuset sous forme gazeuse. Dans le creuset, il reste alors les sels minéraux sous forme de cendres blanches.

En ayant mesuré les masses de l'échantillon avant et après calcination et en connaissant la teneur en matière sèche de l'échantillon, on peut déterminer le taux de matière organique. Dans notre cas, on passe d'une masse initiale de 94 g à une masse de 3,8 g. La teneur en poids de matière sèche de l'échantillon valant 22,8%, on a pu déterminer une teneur en matière organique de 82,3%.

Cette teneur en matière organique est assez élevée sachant qu'en moyenne pour ce type de substrat on retrouve près de 78,6% dans la matière sèche (voir tableau 3). Ce résultat est plutôt de bon augure quant à la production de méthane puisque la part de matière sèche potentiellement dégradable est plus élevée qu'à la normale.

La masse volumique apparente du fumier a été calculée lors du chargement de la matière dans le bidon. La valeur approximative de 328 kg/m³ a été obtenue en faisant le rapport entre la masse de fumier présente dans une caisse en plastique et le volume de celle-ci.

Après cette dernière manipulation, 10,003 kg de fumier ont été chargés dans le bidon. Une fois le système fermé et étanche, de l'azote a été envoyé dans le bidon pour occuper les espaces vides et ainsi chasser l'oxygène (mortel pour les bactéries anaérobies). Après cette vidange réalisée à l'azote, tout était en place, la production pouvait débiter.

Réalisation des mesures

Pour obtenir des informations exhaustives sur la production de biogaz, il fallait disposer d'un système pouvant enregistrer des mesures de débit et de température en continu, un datalogger à quatre voies analogiques Hobo² a donc été loué.

Pour mesurer le débit de biogaz produit, un débitmètre Brooks a été utilisé. Le débitmètre ayant été calibré à l'azote, une série de coefficients de corrections ont été utilisés pour corriger le débit mesuré lorsqu'un autre gaz passe dans ce même débitmètre (dans notre cas le biogaz contient outre l'azote, de l'oxygène, du gaz carbonique et du méthane). Ces coefficients ont été appliqués pour pouvoir générer les courbes de résultats.

La biométhanisation est un procédé sensible à la température et ce à cause des bactéries qui régissent les réactions tout au long du cycle de digestion. Idéalement, la température devrait être maintenue continuellement entre 37°C et 40°C, ceci afin de travailler en régime mésophile. Pour ce faire, une régulation de température a été mise en place sur le caisson.

Pour des raisons de sécurité, cette régulation ne peut pas fonctionner en continu. En effet, on n'est jamais à l'abri d'un faux contact ou d'une surchauffe de la résistance. Si cela se produit, il faut que quelqu'un puisse intervenir. En soirée et la nuit, la régulation et le chauffage sont éteints. Malgré la présence d'isolant autour du digesteur, une diminution de la température et donc de l'activité bactérienne est inévitable. Suivre l'évolution de cette diminution au cours de la nuit et pouvoir corrélérer celle-ci à la diminution de débit s'est avéré obligatoire pour mener à bien l'expérience.

Une sonde PT 100 a donc été placée le long du bidon pour ramener une information de température qui se veut être la plus proche possible des conditions dans lesquelles se trouve le fumier en digestion.

² Le modèle est le suivant : HOB0 UX120 4-Channel Analog Logger by Onset.

Grâce à ce montage, on peut obtenir des courbes de températures sur le logiciel Hoboware.

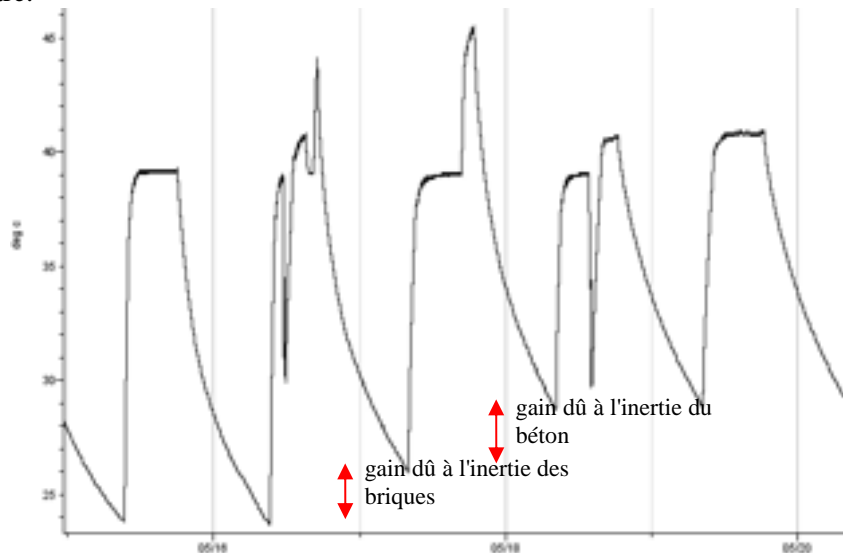


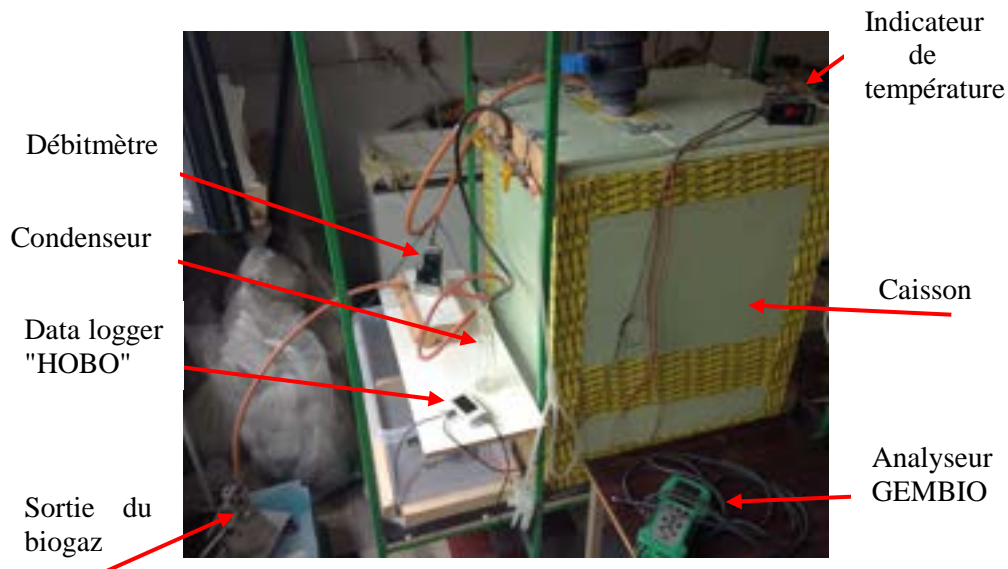
Figure 7 : Évolution de la température en fonction du régime de chauffage et de l'inertie du caisson

On peut constater que la température chute assez fortement la nuit dans le caisson, puisqu'elle est passée de 39°C à 24°C lors de la nuit du 15 au 16 mai. Pour atténuer la chute de température durant la nuit, on peut envisager d'augmenter l'inertie dans le caisson. Pour ce faire, 22 kg de briques ont d'abord été ajoutés le 16 mai. L'effet s'est fait sentir dès la nuit d'après, puisque le 17 mai au matin la température du bidon était de 26°C, soit 2°C de plus que la veille. L'ajout de briques ayant bien fonctionné, 26 kg de briques en béton ont encore été ajoutés, précisément le 18 mai. On constate que ce gain d'inertie permet de maintenir la température au-delà de 29°C, soit 5°C de plus qu'au démarrage de l'expérience.

Pour analyser le biogaz et ainsi déterminer le volume de méthane produit, l'analyseur GEMBIO de la société *Gruter et Marchand* a été utilisé. La prise de mesure est cette fois réalisée manuellement. Les prises de mesures ont été réalisées 7 jours/7. Durant les neuf premiers jours, la composition du biogaz étant fort variable, deux mesures ont été prises quotidiennement. Par la suite, nous nous sommes limités à une prise de mesure journalière.

En effet, la mesure consomme du gaz produit et il a fallu l'évaluer. L'analyseur pompe le biogaz avec un débit de 0,8 l/min. Etant donné que le volume moyen généré quotidiennement est de cinq litres de méthane, on comprend aisément l'importance

prise par les ponctions de l'analyseur sur les résultats finaux. Le temps de mesure a par conséquent été mesuré pour rajouter le volume de biogaz adéquat aux résultats.



40

Figure 8: Unité de laboratoire réalisée à l'institut HELMo Gramme

4.3. Résultats

Les résultats fournis dans cette section correspondront à la biométhanisation de dix kg de fumier bovin en voie sèche discontinuée sans ajout d'inoculum et sans recirculation.

Production de jus

Après trois jours de digestions, la vanne sous le digesteur a été ouverte pour récolter les jus. Seuls 2 ml de percolats ont pu être récupérés. Après cette récolte peu fructueuse, il a été décidé d'étudier la décomposition du fumier sans recirculation des percolats. Une recirculation aurait pu être envisagée si le fumier avait été inoculé à l'aide d'un liquide³ adéquat, sans quoi, le volume d'eau libre dans le réacteur n'est pas suffisant. Après les 35 jours de digestion, le volume de jus produits était de 58 ml pour 10 kg de fumier soit 5,8 ml/kg de matière.

³ Pour disposer d'un inoculum liquide, il faut avoir réalisé une digestion au préalable et récolté les jus produits. Dans notre cas, ce n'était pas possible puisque l'installation fonctionnait pour la première fois.

Influence de la température

On a pu constater que la température influence l'activité microbienne. Sur le graphe reprenant les informations enregistrées sur le datalogger durant les sept derniers jours, on peut voir clairement que le débit de biogaz diminue durant la nuit. Cependant celui-ci n'est pas nul, on peut voir l'existence d'un plateau aux alentours de 2-3 ml/min durant certaines nuits. Cette activité nocturne laisse sous-entendre qu'une partie des bactéries méthanogènes possèdent une certaine tolérance aux variations de température et peuvent donc produire du biogaz à des températures plus faibles mais en moindres quantités.

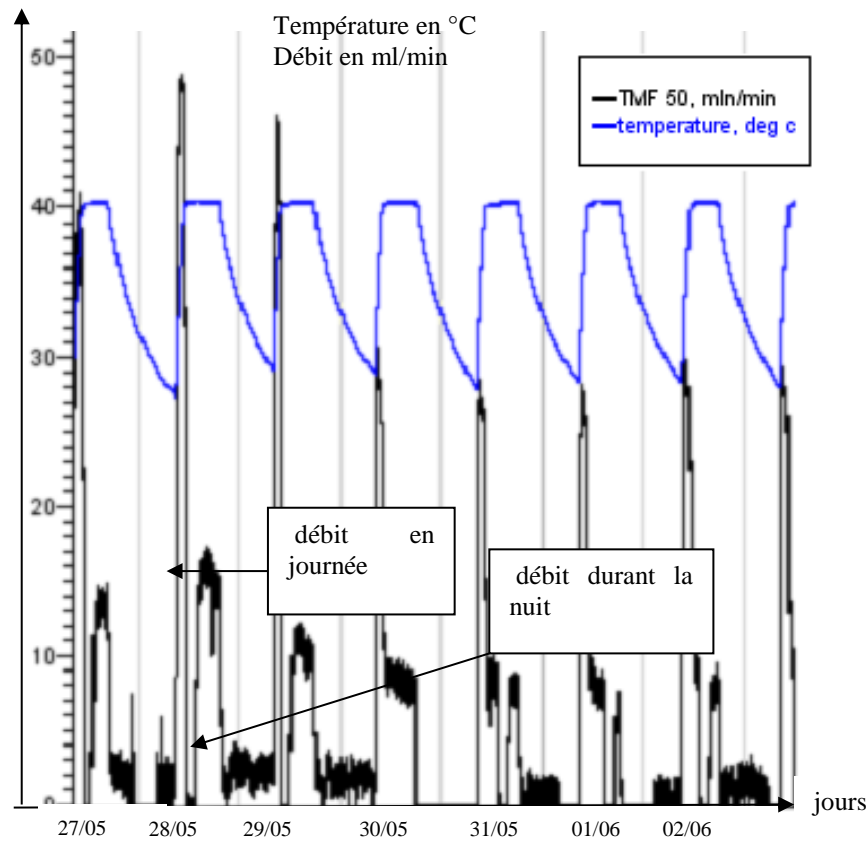


Figure 9: Evolution du débit de biogaz en fonction de la température

Production de méthane

Il a été décidé de s'attarder sur le volume de méthane produit en 21 jours et l'évolution du débit de ce même gaz.

La production de méthane obtenue en 21 jours à partir de 10 kg de fumier bovin a fourni 53 litres de méthane.

Pour arriver à une telle production, le débit de méthane journalier n'a pas toujours été constant, comme on peut le voir sur la figure 10. Sur cette figure, on peut distinguer deux pics de production de méthane successifs, respectivement le quinzième et le vingtième jour, ainsi qu'un creux entre le dixième et le quinzième jour⁴.

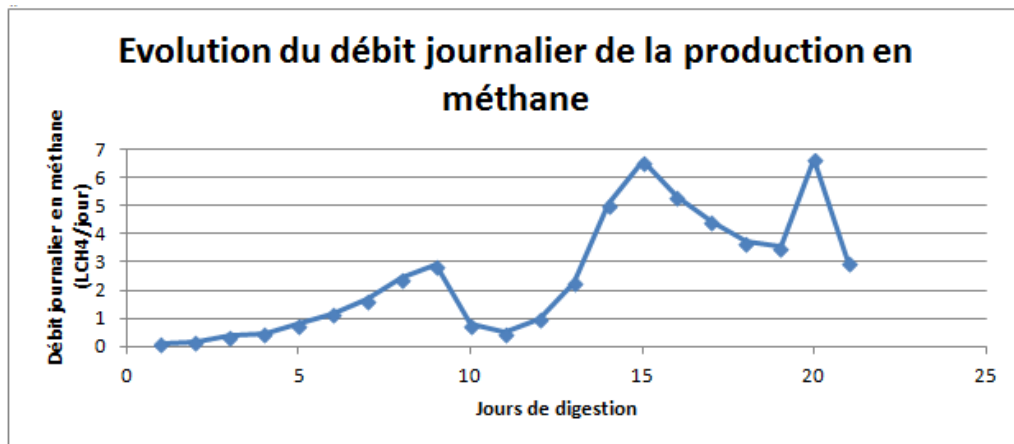


Figure 10: Evolution du débit journalier de la production en méthane

La présence de ces deux pics est une chose communément rencontrée en voie sèche discontinue. Les pics proviennent de la différence de cinétique de dégradation qui sépare les matières plus facilement hydrolysables (premier pic de production) des matières plus lentement dégradables (deuxième pic de production).

4.4. Interprétation des résultats

Les points développés dans cette partie vont permettre de placer l'expérience dans un certain contexte d'étude.

Les résultats obtenus ont prouvé qu'une production de méthane à partir de fumier bovin était possible sans recirculation et sans ajout d'inoculum⁵. C'est la nature même

⁴ Ce creux de production était dû à la présence d'eau à l'entrée du débitmètre qui empêchait le passage du biogaz, il n'est donc pas dû à un arrêt de la production. Dès lors si l'on fait abstraction de ce creux, la présence de 2 pics de production est bien visible.

⁵ On pouvait s'y attendre vu la littérature sur le sujet mais le prouver par une réalisation en pratique constituait un autre challenge.

du substrat qui permet de démarrer le processus. En effet, le fumier bovin contient déjà le consortium⁶ bactérien nécessaire à la biométhanisation.

On pourrait dès lors se demander quel est l'intérêt d'ajouter un inoculum lors de la méthanisation de fumier bovin car cela ne simplifie pas le système et son utilisation. C'est justement la question que se sont posée des chercheurs de *l'Université Européenne de Bretagne* au travers d'une étude sur le rôle biotique⁷ et abiotique des percolats dans la digestion de fumier bovin [4].

Dans cette étude, du fumier bovin a été digéré avec apport initial d'un inoculum liquide. Pour étudier l'effet des bactéries présentes dans l'inoculum liquide, deux inoculums différents ont été sélectionnés, ceci dans le but de mener deux expériences de front et pouvoir comparer les résultats. Les deux inoculums avaient la même origine, ils étaient tous deux issus d'une digestion précédente, la différence résidait dans le fait que l'un d'eux avait été stérilisé, n'apportant plus que des facteurs abiotiques tels le pouvoir tampon et les éléments nutritifs.

Il est à noter qu'une recirculation d'un volume de 500 ml a été appliquée toutes les heures durant les deux expériences menées en Bretagne.

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus dans l'expérience bretonne avec les résultats issus de notre propre expérience, ceux-ci ont été ramenés en litres de méthane produit par kg de matière organique. Le pouvoir méthanogène total en matière organique du fumier breton étant de 175 litres de CH₄/kgVS⁸, un pouvoir méthanogène similaire a été considéré pour le fumier liégeois. Une fois ces hypothèses prises en compte, on obtient le graphique suivant :

⁶ Association de bactéries qui agissent ensemble.

⁷ Les facteurs abiotiques représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème influençant sur une biocénose donnée. C'est l'action du non-vivant sur le vivant.

⁸ VS (volatile solids) représente la matière organique d'une substance.

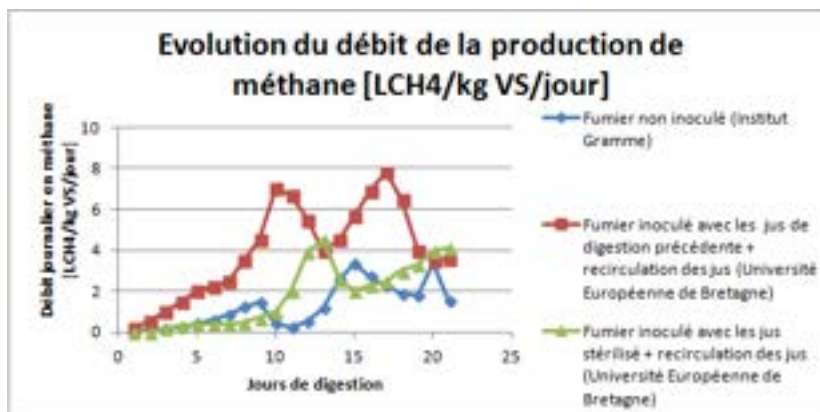


Figure 11 : Comparaison entre les débits de productions issues des différentes expériences

Sur les courbes de l'Université bretonne, on aperçoit de nouveau les deux pics de production caractéristiques d'une digestion en voie sèche discontinue. Concernant les résultats de notre expérience dans laquelle le fumier n'a donc pas été inoculé, on peut voir qu'ils sont clairement en dessous des résultats obtenus dans les expériences menées par les chercheurs bretons. Cette différence est encore plus nette lorsque l'on somme les volumes produits sur les 21 jours (voir figure ci-dessous).

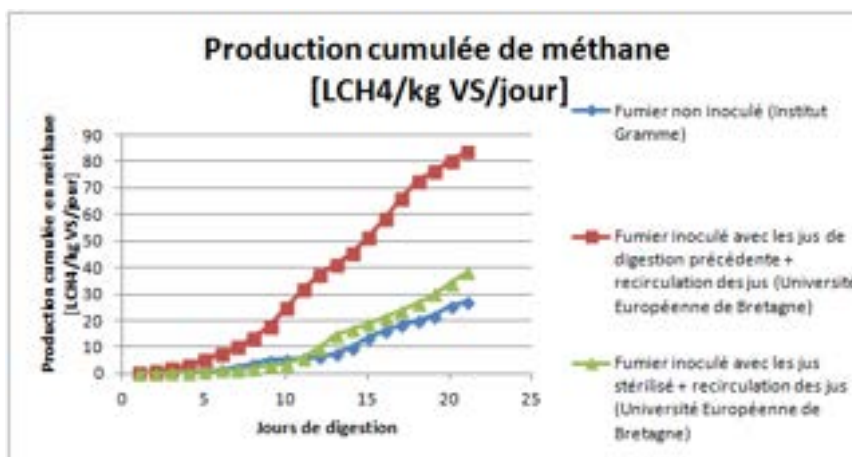


Figure 12 : Comparaison entre les productions cumulées issues des différentes expériences

On peut voir que dans le cadre de notre expérience, 27 litres de CH₄/kgVS ont été générés en 21 jours. Ce volume est équivalent à 70% du volume libéré par le fumier inoculé avec les jus stérilisés. Dans ce cas, 38 litres de CH₄/kgVS sont produits, soit

une production supplémentaire de 28%. Ce gain de production est uniquement lié aux bénéfices apportés par les facteurs abiotiques de l'inoculum et la recirculation.

Par rapport au volume de méthane libéré par le fumier inoculé grâce aux jus d'une digestion précédente contenant les bactéries méthanogènes à maturité, notre production ne représente plus que 32% du volume généré lors de l'expérience bretonne. On comprend dès lors que l'utilisation d'un inoculum contenant des bactéries méthanogènes matures ajouté à une recirculation horaire permet d'obtenir plus rapidement une quantité de méthane plus conséquente. En effet, avec des conditions optimales, la dégradation du fumier produit 47,5% du potentiel méthanogène total disponible en 21 jours, alors qu'on arrive à 15% dans notre cas et ce dans le même laps de temps. On voit clairement que la première configuration est la plus rentable en termes de cinétique de production.

A l'examen de la figure 12, on prend conscience de l'importance de l'inoculation et de la recirculation pour augmenter les rendements de productions en méthane. Cependant, la mise en place d'une recirculation des jus complexifie l'installation de biométhanisation. Sur des unités de taille conséquente, elle se justifie amplement vu la rentabilité recherchée pour rembourser les investissements. Dans le cas d'une unité plus petite telle que celle développée au laboratoire, on est en droit de se poser la question sur la nécessité d'une recirculation. Certes, sans elle, la production est diminuée mais on constate que celle-ci reste en cohérence avec les moyens simples mis en œuvre.

5. Conclusion

Pour ce type d'installation, l'utilité d'une recirculation n'est plus à démontrer. Encore faut-il que cette recirculation soit menée de la bonne façon et c'est là tout le challenge.

On retiendra que la fréquence de recirculation et le volume d'inoculum doivent être adaptés au mieux au type de substrat dégradé. Une recirculation continue des percolats est en tout cas à éviter pour limiter les risques d'acidification du digesteur.

Cependant le substrat étudié, à savoir le fumier bovin, est un cas un peu à part puisqu'il peut produire du méthane sans être inoculé et sans recirculation des jus. Et ce sont les conclusions que l'on peut tirer de l'expérience menée à partir de ce substrat au sein de l'unité de laboratoire de l'Institut HELMo-Gramme. Le fumier bovin possède en effet le consortium bactérien nécessaire pour démarrer le processus de biométhanisation. Une inoculation ne fait qu'améliorer la cinétique puisque dans ce cas,

les bactéries méthanogènes sont présentes directement en nombre. La recirculation provoque elle aussi une accélération du processus.

La cinétique de production est un paramètre important dans le cas d'installations de plus grandes tailles comme pour celle développée en containers maritimes. Dans ce cadre, ce travail donne des pistes quant à la quantité d'inoculum et la recirculation adaptée pour optimiser la digestion.

Pour les petites installations par contre, et notamment celles à promouvoir dans les pays en voie de développement, l'expérience a montré que l'on peut se passer d'inoculum liquide et de recirculation, le procédé sera plus lent, mais aura l'avantage d'être plus simple.

En conclusion, la biométhanisation en voie sèche, avec ses différentes applications possibles, est une filière d'avenir, tant dans nos pays industrialisés en recherche d'alternatives aux énergies fossiles, que dans les pays en voie de développement où l'accès à l'énergie est à la fois une nécessité et une priorité, tout en permettant la gestion de déchets organiques.

6. Sources

[1] ANDRÉ, L. (2016). *Methane production improvement by modulation of solid phase immersion in dry batch anaerobic digestion process: Dynamic of methanogen populations*. Université de Technologie de Compiègne.

[2] ANDRÉ, L. (2015). *Quantifying physical structure changes and non-uniform water flow in cattle manure during dry anaerobic digestion process at lab scale: Implication for biogas production*. Université de Technologie de Compiègne.

[3] BIOMASSE NORMANDIE. (2010). *Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly*.

[4] DEGUEURCE, A. (2015). *Biotic and abiotic roles of leachate recirculation in batch mode solid-state anaerobic digestion of cattle manure*. Université Européenne de Bretagne.

[5] KUSCH, S. (2007). *Biogas production with horse dung in solid-phase digestion system*. University of Hohenheim.

[6] KUSCH, S. (2012). *Effect of various leachate recirculation strategies*. University of Hohenheim.

[7] LABEYE, C. (2015). *Développement d'une unité de micro-biométhanisation en voie sèche à partir de containers maritimes*. HELMo Gramme.

Librairie en C/Python pour communiquer entre une Raspberry Pi et un Arduino dans le projet CASPER

Ing. J. DELVAUX
Dr ir L. JOJCZYK
ISICHT - Mons

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le développement d'un robot nommé CASPER à destination d'enfants hospitalisés. Le projet a été lancé récemment par plusieurs universités barcelonaises. Ce TFE fait partie d'une preuve de concept destinée à démontrer la faisabilité de l'architecture électronique imaginée. Il se focalise sur la communication entre les deux plateformes utilisées (Arduino et Raspberry Pi) ainsi que sur l'envoi des données recueillies par les capteurs vers une base de données.

Mots-clefs : C, Python, Raspberry Pi, Arduino, ROS, base de données.

This thesis is part of a project to create a robot called CASPER to help children hospitalized. At its beginning, the goal of the proof-of-concept is to highlight the pros and cons of the electronic architecture. More precisely, it focuses on making the communication between the two electronic boards (Arduino and Raspberry Pi). The other part of this thesis is to send sensors data to a distant database.

Keywords : C, Python, Raspberry Pi, Arduino, ROS, database.

1. Introduction

1.1. Contexte

CASPER (*Cognitive Assistive Social PEt Robot for Hospitalized Children*) est un projet lancé en 2015 par plusieurs universités barcelonaises¹. L'objectif est de développer un robot nommé CASPER à destination d'enfants hospitalisés afin de les divertir et de les instruire. L'architecture électronique (deux cartes remplissant des fonctions distinctes) ayant été décidée par les responsables du projet, la première étape (preuve de concept) est de la développer, vérifier si elle est fonctionnelle, quelles sont ses limitations, ses avantages ...

1.2. Architecture du robot CASPER

L'idée initiale du projet est de combiner deux plateformes matérielles : la première (A) fournit la puissance de calcul pour l'intelligence artificielle tandis que la seconde (B) permet d'interfacer facilement capteurs et actuators. De plus, le robot est également capable d'envoyer des données par wifi à une base de données distante. Celles-ci, après analyse par des psychologues, permettront d'améliorer le comportement de CASPER.

Les cartes électroniques choisies sont les suivantes :

- A. Raspberry Pi 2 : de la taille d'une carte de crédit, la Raspberry repose sur un processeur ARMv7 avec 4 coeurs fonctionnant chacun à 900MHz. En plus de cette puissance de calcul, elle possède 1GB de RAM. Elle utilise un système d'exploitation basé sur Debian (Linux) nommé Raspbian. La Raspberry Pi était initialement destinée à pouvoir être utilisée dans des pays émergents afin de donner accès à l'informatique pour un plus grand nombre. Elle s'est vite imposée comme étant une plateforme électronique attrayante vu son faible coût. Toutefois, de base, elle lui manque certaines fonctionnalités l'empêchant d'être efficace pour des applications temps-réel.
- B. Arduino UNO : bien connue des étudiants et hobbyistes, cette carte permet d'interfacer capteurs et actuators très rapidement. Elle bénéficie d'un grand nombre de bibliothèques grâce à son immense communauté. De plus, une bibliothèque Arduino pour communiquer avec les moteurs Dynamixel a déjà été développée dans le cadre d'un autre projet de l'URL. Le microcontrôleur est un Atmel 324P-PU.

¹ Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) sous la direction de Cecilio Angulo Bahón, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) sous la direction de Marta Díaz Boladeras et Universitat Ramon Llull (URL) sous la direction de Jordi Albó Canals.

La Figure 1 présente le projet CASPER². Celui-ci est constitué :

- Robot :
 - Raspberry Pi : elle communique avec une base de données distante et l'arduino. Elle est interfacée par un écran tactile (via un programme développé pour commander les moteurs et afficher les valeurs des capteurs) ainsi qu'une caméra (pour permettre un futur traitement d'images) ;
 - Arduino : il commande des moteurs (dans ce cas-ci des Dynamixel et moteurs DC) mais récupère des informations de toute une série de capteurs (IMU, capteur de pulsation ...).
- Base de données : développée sous MySql, elle permet d'améliorer le comportement du robot après analyse.

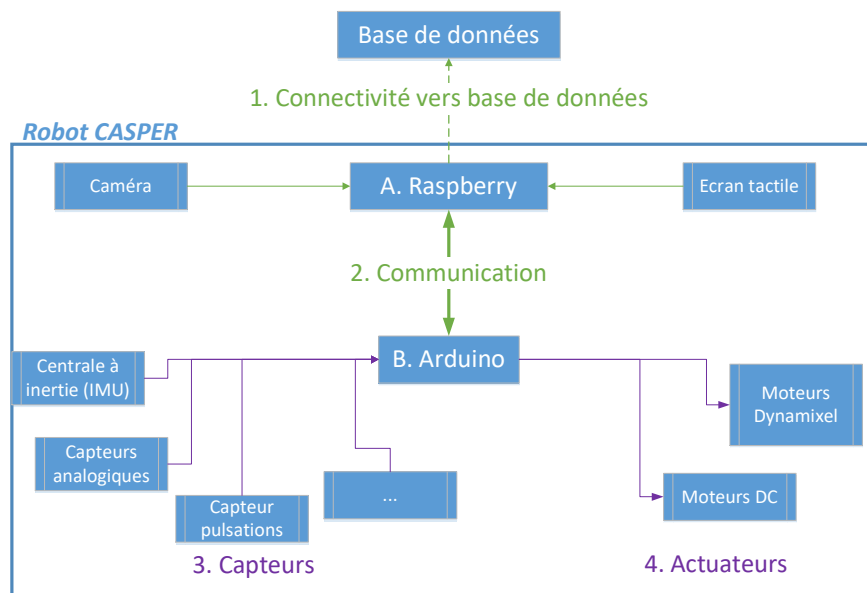


Figure 1 : Architecture du projet CASPER

Les algorithmes cognitifs vont être implémentés au travers de ROS sur la Raspberry Pi. ROS (*Robot Operating System*) [5] est un outil principalement destiné à la robotique. Son intérêt réside dans sa philosophie : ne pas réinventer la roue à chaque fois. Initié par le *Stanford Artificial Intelligence Laboratory* en 2007, il s'est imposé dans bon nombre de projets de par cette structure interne. Il permet de développer des algorithmes sans avoir à se soucier des composants et de la carte électronique utilisés. La portabilité du code en est son atout majeur.

² Tous les périphériques inclus y ont été d'une initiative personnelle afin que la prototype de preuve de concept soit le plus complet possible.

Le développement de ce projet étant relativement conséquent, le travail a été divisé en deux parties :

- La communication entre la Raspberry Pi et l'Arduino ainsi que l'envoi des informations des capteurs ont été réalisés dans ce TFE [2].
- L'interfaçage des capteurs et actuateurs avec l'Arduino a été réalisé par un autre étudiant [1].

1.3. Spécifications avancées

Afin que l'intégration de ces deux parties se passe bien, il était important de les rendre compatibles. Les choix suivants ont été décidés :

- L'**Arduino** est **maître** et la **Raspberry** est **esclave** car l'Arduino contrôle directement les moteurs. Afin d'éviter un comportement erratique du robot, c'est l'Arduino qui décide quand ceux-ci sont mis en marche suivant les mouvements générés par l'algorithme cognitif tournant sur la Raspberry.
- Le protocole de communication choisi entre Raspberry Pi et Arduino est l'I²C car l'adressage est facile. Toutefois, la **Raspberry** doit être **maître de la communication I²C**. En effet, le driver I²C du noyau Linux (fin 2015) ne supportait pas le mode esclave. L'Arduino interroge également en I²C des capteurs qui lui sont reliés. C'est donc une situation de multi-maîtres.

2. Développement de la librairie

2.1. Vue d'ensemble

Python est le langage de programmation choisi sur la Raspberry pour des raisons de rapidité de développement et de bibliothèques déjà existantes³. Le C/C++ a été choisi pour l'Arduino car à l'heure actuelle, les outils de compilations sont bien optimisés.

La librairie présente différentes couches d'abstraction dans une optique de *modularité* : l'utilisateur/développeur peut facilement remplacer un des modules au besoin ou réutiliser l'ensemble pour un autre projet. Par exemple, deux interfaces peuvent être utilisées : l'I²C ou l'UART⁴.

³ Pypi est le gestionnaire de paquets pour python. Il permet d'accéder à pas moins de 87000 bibliothèques développées par la communauté. Cependant, celles-ci sont portées sur l'informatique et non l'électronique. Lien : <https://pypi.python.org/pypi>.

⁴ L'utilisateur peut même choisir entre l'HardwareSerial ou SoftwareSerial sur l'Arduino.

Voici une liste des principales fonctionnalités :

- Compatible avec ROS ;
- Choix de l'interface : UART ou I²C ;
- Communication bidirectionnelle : la Raspberry transmet les commandes à l'Arduino et l'Arduino envoie les données des capteurs à la Raspberry ;
- Communication avec une base de données : la Raspberry envoie des données par wifi ou Ethernet à celle-ci;
- Protection contre les erreurs de transmission : CRC⁵ de 8 bits pour la longueur des données et CRC de 16 bits pour les données ;
- Gestion des erreurs ;
- Options permettant de déboguer très facilement ;
- Facile à installer ;
- Modulaire et adaptable à des développements futurs.

La Figure 2 présente une vue d'ensemble de la librairie qui est composée de deux implémentations chacune composée de classes en C++ et de modules en Python :

A. Raspberry Pi(Python) :

1. Module *Interfaces* : il gère le bas-niveau en s'occupant de mettre les chaque byte de trame sur le bus choisi et de récupérer les données reçues dans le buffer de l'interface ;
2. Module *Framing* : il récupère les données à transmettre et les incorpore dans des trames ;
3. Module *CRC* : il calcule le CRC de 8bits et 16bits qui vont être incorporés dans chaque trame ;
4. Module *Communications* : il est l'interface haut-niveau avec le développeur. Ce dernier peut choisir aisément l'interface sur laquelle il veut envoyer ses données et transmettre celles-ci ;
5. Module *Database* : il permet de facilement interagir avec la base de données en donnant des fonctions simples d'utilisation.

B. Arduino(C++) :

1. Classe *Interfaces* : identique au module Python ;
2. Classe *CRC* : cas particulier du module Python afin d'économiser de la mémoire Flash ;
3. Classe *Communications* : regroupe les modules *Communications* et *Framing* pour des raisons d'optimisation et de gain de mémoire.

⁵ Cyclic Redundancy Check.

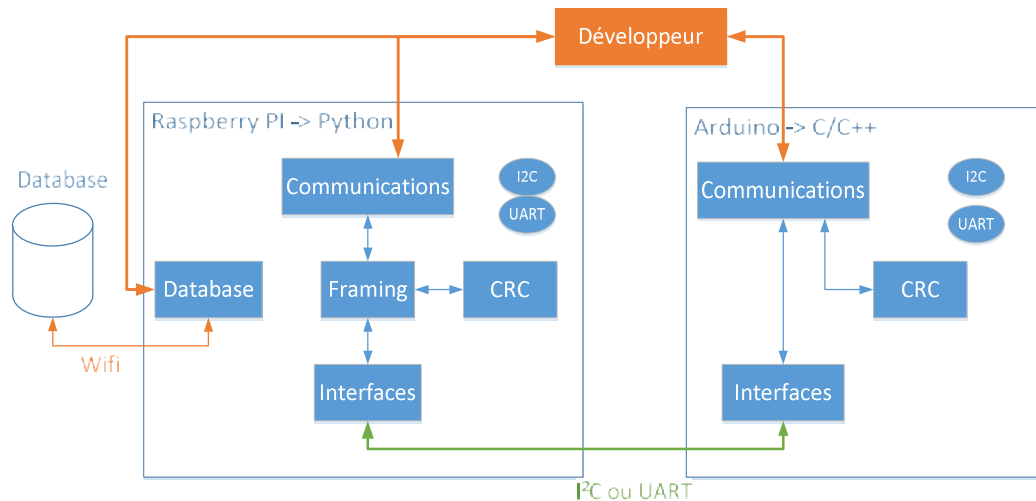


Figure 2 : Vue d'ensemble de la librairie

2.2. Formats des trames de communication

La structure de la trame est l'élément crucial dans la communication. Pour ce projet, elle est basée sur un *character-oriented protocol*[3] : des caractères de contrôles (DLE, STX, ETX⁶) permettent de savoir où sont les données. Le CRC facilite la détection des erreurs. Le CRC sur 8bits permet de protéger le nombre de bytes de données ou la commande tandis que celui sur 16bits permet de protéger les bytes de données. Deux types de messages s'échangent :

1. *Arduino* → *Raspberry* : données

DLE	STX	Nombre de bytes de données	CRC 8 bits	Bytes de données	CRC 16 bits	DLE	ETX
0x10	0x02	1 byte	1 byte	x bytes	2 bytes	0x10	0x03

2. *Raspberry* → *Arduino* : commandes

DLE	STX	Commande	CRC 8 bits	DLE	ETX
0x10	0x02	1 byte	1 byte	0x10	0x03

⁶ DLE: Data Link Escape, STX: Start of Text, ETX: End of Text

2.3. Envoi de données de l'Arduino à la Raspberry en UART⁷

L'envoi de données de l'Arduino à la Raspberry Pi est simple et efficace, car la Raspberry écoute en permanence sur le port de réception UART via un thread dédié. La méthode `send_datas` (de la classe `Communications`) permet d'envoyer un tableau de données. Celles-ci sont directement récupérées sur la Raspberry comme l'illustre la Figure 3.

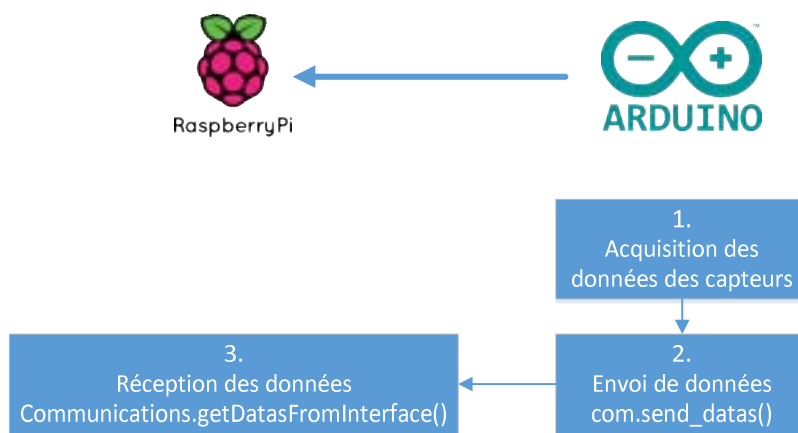


Figure 3 : Transmission de l'Arduino à la Raspberry en UART

2.4. Envoi de données de la Raspberry à l'Arduino en UART

La Figure 4 montre l'envoi de données de la Raspberry à l'Arduino. Celui-ci est plus complexe car l'Arduino est le maître de la Raspberry : l'Arduino doit autoriser la Raspberry à transmettre. Dans le cas où la Raspberry n'a rien à dire, un message spécial est envoyé afin que l'Arduino puisse effectuer d'autres tâches. Dans l'autre cas, l'arduino vient lire son buffer jusqu'au moment où elle décide qu'elle a assez de données à traiter. Dans ce cas, il fait appel à la fonction `send_raspberryStop`.

⁷ À des fins de meilleure compréhension, l'envoi et la réception sont expliqués pour l'UART. Se référer au 2.5 pour plus d'informations sur les différences UART-I²C.

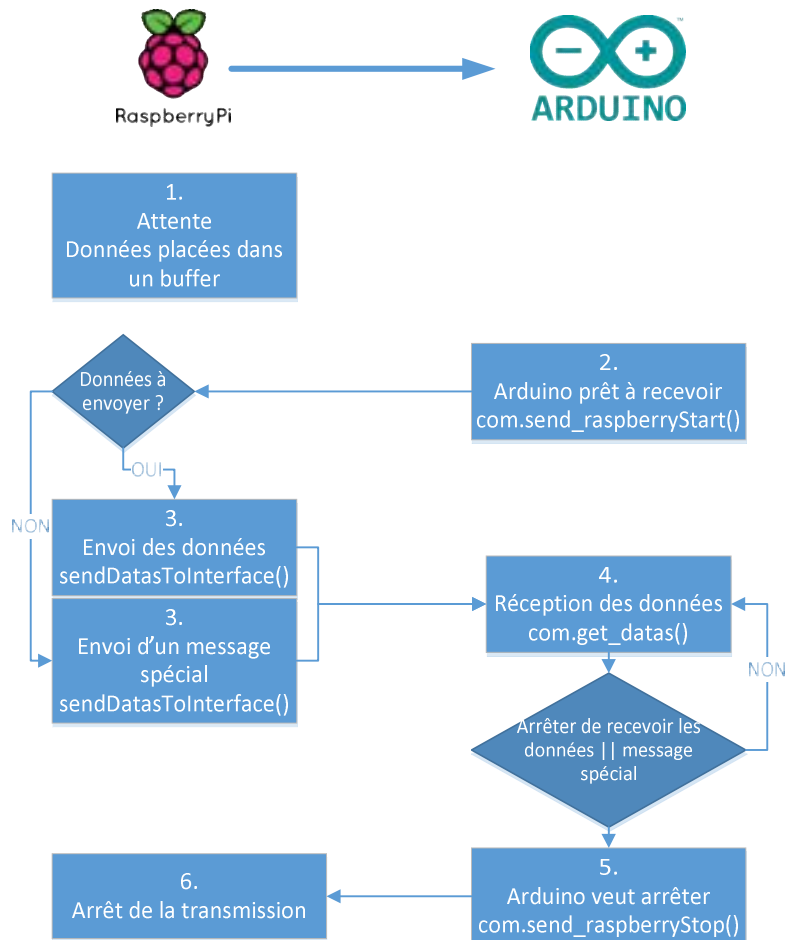


Figure 4 : Transmission de la Raspberry à l'Arduino en UART

2.5. Spécificités UART et I²C

Le schéma de la Figure 5 illustre les différences entre la manière de communiquer en I²C et en UART. La complexité inhabituelle avec l'I²C est due à une limitation de la Raspberry avec son driver linux I²C. Celui-ci ne supporte pas d'être esclave. La librairie développée tient donc compte de cette particularité.

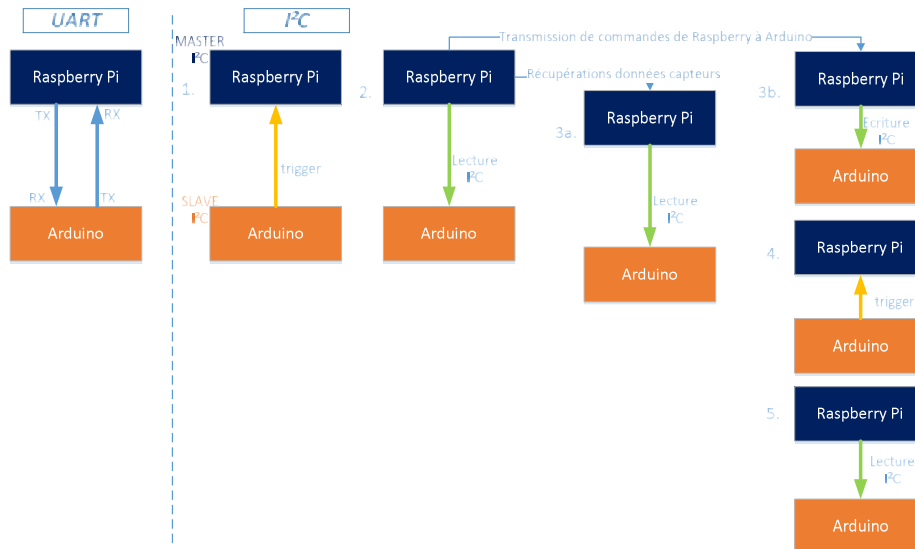


Figure 5 : Différences de procédure de communication entre UART et I²C

UART

La procédure de communication en UART est simple et rapide. Les données sont mises sur le port TX et reçues sur le port RX. Aucune particularité n'est à noter.

I²C

La solution trouvée pour faire fonctionner la Raspberry Pi en maître de la communication I²C tout en gardant l'Arduino maître est l'utilisation d'un trigger. Ce trigger correspond à une pin que vient changer l'Arduino en la passant de BAS à HAUT avant de la repasser, quelques millisecondes plus tard, à l'état BAS. La procédure est la suivante :

1. Arduino envoie un trigger à la Raspberry ;
2. Celui-ci est détecté par la Raspberry qui interroge l'Arduino en I²C;
3. Dans le cas d'une récupération d'informations de capteurs (3a), la Raspberry continue la lecture I²C de l'Arduino pour un nombre d'octets donné. Dans celui d'une transmission de commandes (3b), la Raspberry vient écrire sur le bus I²C ;
4. Lorsque l'Arduino souhaite arrêter de recevoir des commandes, il envoie à nouveau un trigger;
5. La Raspberry vient lire le bus I²C dans lequel un message de stop apparaîtra.

2.6. Tests et validation

Afin de valider le comportement de la librairie, quatre tests ont été développés :

1. CRC : ce test a notamment pour but de vérifier le CRC en affichant le résultat de l'opération. Celui-ci est ensuite comparé avec un outil en ligne. Il peut être également utilisé pour générer une lookup-table qui peut être comparée à un livre de référence (afin de vérifier les résultats de 0 à 255) ou copiée et implémentée dans un micro-contrôleur par exemple.
2. Robustesse : ce test s'attache à chercher des failles dans le codage/décodage des trames en s'attaquant au module *Framing*.
3. Communication : par l'exécution d'un sketch⁸ spécifique sur l'Arduino, ce test permet de s'assurer que le décodage/encodage des données s'effectue correctement aussi bien sur l'Arduino que sur la Raspberry.
4. Base de données : ce test permet de vérifier la bonne configuration de la Raspberry en tentant d'accéder à la base de données.

Les tests 1, 2 et 4 sont spécifiques à la Raspberry.

3. Intégration de la librairie dans CASPER

3.1. Vue d'ensemble

Après le développement de la librairie Python, l'étape suivante était d'intégrer celle-ci dans ROS sur la Raspberry. La communication avec l'Arduino étant bidirectionnelle et l'Arduino pouvant transmettre quand il le souhaite, la Raspberry doit être à l'écoute en permanence.

La Figure 6 illustre l'intégration de cette librairie dans CASPER. Deux scripts sont dédiés à la communication avec l'Arduino. Ceux-ci utilisent des fonctions « hauts-niveaux » de la classe *Communications*.

- Le premier, *casper_down*, a un double rôle : stocker les messages à transmettre venant de l'algorithme principal et démarrer/arrêter la communication avec l'Arduino.
- Le second, *casper_up*, écoute en permanence soit le port RX de l'UART soit la pin de trigger pour l'IPC. En fonction du message reçu de l'Arduino, il l'envoie au travers de ROS au bon destinataire. Dans le cas d'une commande pour démarrer ou arrêter la transmission de la Raspberry à l'Arduino ce sera *casper_down* ; dans le cas de données ce sera l'algorithme principal.

⁸ Nom donné à un programme Arduino.

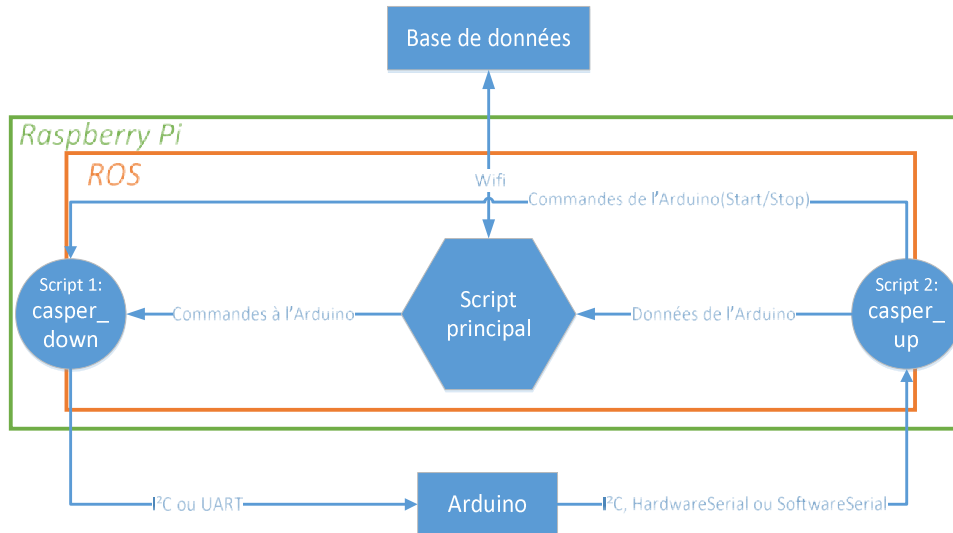


Figure 6 : Relations entre les différents scripts dans ROS

3.2. Démonstration technique

L'envie de partager ce travail et de donner un aperçu des résultats atteignables avec cette librairie s'est matérialisée par la réalisation d'une démonstration technique. Celle-ci est composée des éléments suivants (repris dans la Figure 7) :

- Une base de données qui recueille toutes les informations des capteurs. Celle-ci a été désignée expressément pour la démonstration ;
- Une caméra reliée à la Raspberry Pi ;
- Un écran tactile relié à la Raspberry. Avec cet écran et grâce à une interface graphique développée sous PyQt, l'utilisateur peut commander les moteurs et gérer l'acquisition de mesures par les capteurs. Il a également la possibilité de voir ce que filme la caméra ;
- Des capteurs et moteurs Dynamixel reliés à l'Arduino.

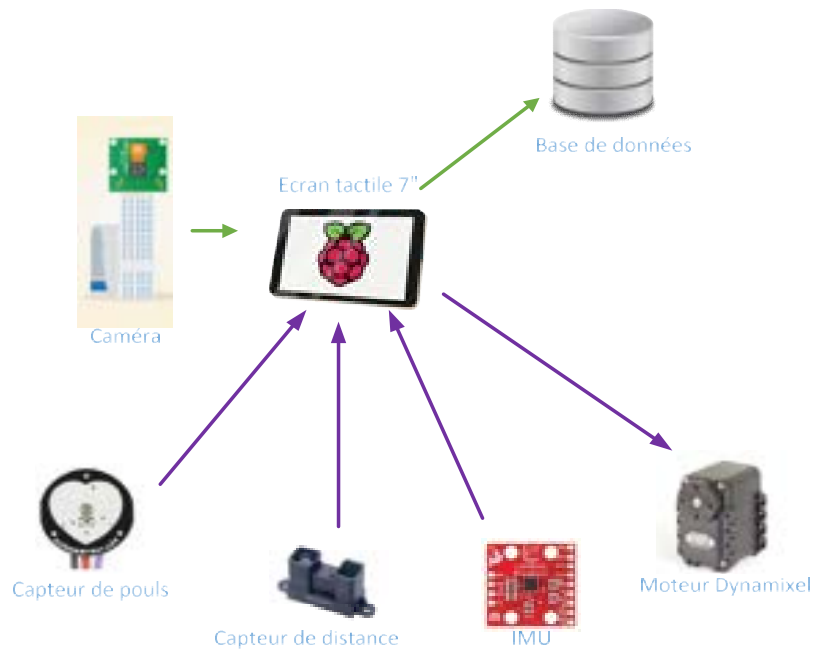


Figure 7 : Démonstration technique

L'Arduino, en plus de traiter les demandes effectuées par l'interface graphique (commande de moteur(s) et/ou demande d'acquisition d'un ou plusieurs capteurs), possède une fonction de feedback automatique⁹. À une fréquence définie, il interroge l'ensemble des capteurs et envoie ces informations à la Raspberry. L'algorithme utilisera ces données afin de contrôler le robot. Mais celles-ci seront également envoyées à la base de données pour permettre d'améliorer les algorithmes de CASPER.

3.3. Configuration et mise en place

L'installation et la mise en place de la librairie Python ainsi que la démonstration technique peuvent poser des soucis dans le cas où le développeur n'est pas familiarisé avec Linux. En effet, certaines difficultés peuvent se poser :

- Problèmes de permissions ;
- Paquets à installer ;
- Compilation de ROS et de son workspace ;
- Utilisation de l'UART, I²C ;
- ...

⁹ Cette fonctionnalité est décrite dans [1].

Dans ce cadre, il est important de faciliter le déploiement ainsi que la compréhension de la librairie.

Deux scripts shells ont été développés pour répondre au premier besoin. Ceux-ci permettent notamment d'installer les paquets Linux nécessaires, configurer l'accès à la base de données, créer un dossier où sont stockés les logs, changer les permissions des scripts ou encore compiler le workspace ROS.

La compréhension de la librairie est possible grâce aux schémas fournis et aux commentaires dans le code. Chaque fonction est ainsi détaillée avec son but, ses arguments et ce qu'elle renvoie.

De plus, deux fichiers textes sont présents. Le premier détaille la procédure d'installation avec les scripts ainsi que certains problèmes couramment rencontrés et leur résolution. Le second détaille chaque point de la configuration avec, par exemple, la manière de configurer l'UART, l'IPC, le wifi ...

4. Résultats

4.1. Première phase de tests

La première phase de tests a concerné la validation de la librairie développée pour la communication entre la Raspberry et l'Arduino. Ces tests ont été lancés via l'environnement `py.test`¹⁰ présent sur la Raspberry (et plus spécifiquement celui de communication). Voici la procédure utilisée :

1. Lancement du test sur la Raspberry ;
2. La Raspberry envoie x messages avec des données aléatoires à l'Arduino ;
3. L'Arduino attend ces x messages puis les décode ;
4. L'Arduino encode ceux-ci, les copie dans son buffer avant de les renvoyer vers la Raspberry ;
5. Réception des messages par la Raspberry, décodage puis comparaison entre les données envoyées et celles reçues. Le test est réussi si celles-ci concordent.
6. Répétition des étapes 1 à 5 autant de fois que voulu.

L'ensemble de ces tests (aussi bien avec l'UART que l'IPC) étant concluants, l'étape suivante a été la validation du prototype grâce à la démonstration technique. Celle-ci combine le travail réalisé autour de l'Arduino ainsi que celui de ce TFE.

¹⁰ `Py.test` est un module de python qui permet de réaliser des tests unitaires. Son point fort est de fournir beaucoup d'informations sur le debug bien que, dans certains cas très particuliers, il ralentit voire fait planter le script testé.

4.2. Test de la démonstration technique

Dès le premier essai, des problèmes sont apparus. Après une quinzaine de secondes, la Raspberry n'a plus reçu les valeurs des capteurs par la fonction de feedback. De plus, la réactivité de la Raspberry après le trigger de l'Arduino s'est avérée lente (8msec) et l'Arduino ne répondait qu'après, en moyenne, 10 tentatives de lecture I²C. Comme la source du problème était difficile à déterminer, l'investigation a été scindée en deux points :

1. Réexaminer le code de l'Arduino et comprendre pourquoi l'Arduino n'a pas répondu tout de suite à la commande de lecture I²C;
2. Tenter de comprendre pourquoi l'un des triggers n'est pas détecté par la Raspberry et d'où vient le temps de réaction important aux triggers de l'Arduino.

4.3. Résultats de l'investigation avec l'Arduino

L'idée dans cette investigation a été de remplacer la Raspberry par un Arduino et d'écrire un sketch afin de simuler le comportement de la Raspberry. Le détail complet de ces résultats est consultable dans [1]. Voici néanmoins une liste succincte de ceux-ci :

- La librairie de communication pour l'Arduino fonctionne correctement ;
- L'Arduino répond immédiatement à une lecture I²C ;
- La cohabitation avec le code Arduino pour contrôler les moteurs et effectuer la lecture des capteurs ne pose aucun souci ;
- Aucun problème de communication dans le temps.

Les échecs de lecture sur le bus I²C apparaissent uniquement avec la Raspberry. Après des recherches poussées, il est apparu que le phénomène est connu sous le nom de *clock stretching*[6].

La librairie en python effectuée, dans le cadre d'une lecture I²C, une écriture puis une lecture. Ce qui correspond en réalité au protocole SMBus[7] qui est un dérivé de l'I²C. L'Arduino maintient la ligne SCL à l'état bas, le temps de traiter l'instruction I²C (dans ce cas une écriture).

Cependant, la Raspberry n'est pas capable de ralentir la génération de l'horloge I²C de manière adaptée. Elle considère donc ça comme un échec de lecture, ce qui résulte par un NACK¹¹. Afin de ne pas avoir ces problèmes, il ne faut donc pas utiliser la librairie standard I²C mais une autre librairie Python : Pigiopio. À l'essai de cette dernière, il est apparu que les lectures I²C étaient des lectures et non des écritures/lectures.

¹¹ Negative acknowledgment ou not acknowledged.

4.4. Résultats de l'investigation avec la Raspberry

Afin de déterminer avec certitude pourquoi un des triggers n'était pas détecté par la Raspberry, l'idée a été d'écrire un script spécifique à cette tâche. Dans un premier temps, celui-ci ne faisait que compter le nombre de flancs montants. Il est apparu que dans le cas d'un grand nombre de triggers (lancés à 1-2 ms d'intervalle), la librairie la plus connue et utilisée qu'est *RPi.GPIO* s'est avérée inefficace : certains triggers n'étaient pas détectés.

Il existe pourtant deux méthodes pour réagir aux triggers :

1. La fonction bloquante qui attend le flanc correspondant pour continuer le programme : *wait_for_edge()*. Elle prend en argument la pin et le type de flanc (montant, descendant ou les deux) ;
2. La fonction de callback : une fonction est appelée à chaque fois qu'un flanc est détecté.

Aucune de ces méthodes ne fonctionne à 100% dans la détection de triggers. Toutefois, il existe, dans la librairie *Pigpio*¹², des fonctions du même acabit. Après quelques expérimentations, 100% des triggers envoyés ont été détectés.

L'étape suivante a été d'effectuer une lecture I²C de l'Arduino après chaque trigger. Bien que parfaitement fonctionnel avec un délai de réaction de la Raspberry aux triggers inférieurs à 500 µs, la Raspberry ratait, après une trentaine de secondes, un des triggers.

Le problème ne pouvait venir que de l'ajout de cette lecture I²C. Une des solutions aurait pu être l'utilisation d'un thread dédié à la détection de triggers. Hélas, la communication se bloquait à nouveau après peu de temps.

Au final, l'origine du problème doit venir de la Raspberry et de son inhabilité à agir en temps réel. L'Arduino, lui, avec son microcontrôleur à 16MHz, est capable de réagir à un trigger et d'effectuer une lecture I²C. Raspbian, l'OS de la Raspberry, n'est pas un OS temps réel. Ce qui implique que le système d'exploitation effectue ses opérations propres et que, lorsqu'il a fini, il effectue les tâches demandées par l'utilisateur.

De plus, la Raspberry n'est pas conçue pour fonctionner comme système temps-réel dû à son absence d'une horloge temps réel (RTC¹³). Il existe pourtant certaines distributions comme ChibiOS/RT[5] , qui par l'ajout de cette RTC, le transforme en OS

¹² *Pigpio* est une librairie développée par *joan2937* permettant de contrôler le GPIO de la Raspberry Pi. Son implémentation est différente des librairies communément utilisées (*RPi.GPIO* et *SMBus*) ce qui dans certains cas est utile (par exemple le READ I²C).

¹³ Real-time Clock.

temps-réel. Mais celle-ci n'est pas basée sur Linux. Or, ROS nécessite un système basé sur Linux pour pouvoir fonctionner.

L'I²C n'est donc pas un moyen de communication efficace et sûr pour ce projet et dans la façon dont il a été désigné. C'est pourquoi il a été décidé de basculer sur l'UART qui lui, ne nécessite pas de triggers.

4.5. UART

L'UART avait été mis de côté car les moteurs Dynamixel fonctionnent en UART. Mais, dorénavant, toutes les trames vers les Dynamixel sont reçues par la Raspberry. La librairie doit donc être capable de distinguer ce qui est pour la Raspberry de ce qui ne l'est pas. Après modification et amélioration de celle-ci, ce fut chose faite.

Outre ce problème, il y a également le fait que le Raspberry travaille en 0-3.3V alors que l'Arduino et les moteurs Dynamixel sont en 0-5V. Afin d'éviter tout problème sur le long terme, le circuit électronique a été modifié et les tensions séparées¹⁴. Voici un bref aperçu/récapitulatif de celui-ci :

- Arduino ↔ Raspberry Pi : bus à 3.3V, les Dynamixel ne reçoivent rien ;
- Arduino ↔ Dynamixel : bus à 5V, la Raspberry reçoit les commandes en 3.3V.

Le baudrate de l'UART a été fixé à 115 200 bps. Lors des tests, il est apparu qu'en passant à 1Mbps, un phénomène étrange se passait lorsque la Raspberry transmettait. Bien que les trames soient correctement détectées et décodées par l'Arduino, un délai de 26µs à 129 µs apparaît entre chaque envoi de caractère. Cette particularité n'apparaissant pas avec l'Arduino, la théorie de l'OS non temps-réel se renforce encore.

En restant à 115 200 bps, le projet fonctionne correctement. La fonction feedback fixée à 1Hz a amené plus de 13 000 enregistrements dans la base de données. De plus, à aucun moment il n'y a eu de perte de communication. Enfin, il était possible de contrôler les moteurs sans aucun souci.

¹⁴ Dans ce cas c'était à base de transistors mais des convertisseurs de niveaux de tensions (*level shifter*) auraient pu faire l'affaire.

5. Conclusion

Ce travail a pour premier objectif d'établir un protocole de communication entre la Raspberry Pi et l'Arduino dans le cas d'une preuve de concept pour le robot CASPER. Il est également important de communiquer avec une base de données distante afin de recueillir les données des capteurs à des fins d'analyse et d'amélioration.

La première grande étape a été de développer la librairie de communication. Ensuite, celle-ci a été intégrée dans le projet afin de réaliser une démonstration technique. Il est donc possible de commander des moteurs et de recevoir des informations des capteurs ainsi que d'afficher les images prises par la caméra connectée à la Raspberry.

Lors des tests d'intégration, il est apparu que l'I²C n'est pas une solution viable à cause des triggers qui ne sont pas détectés à 100% par la Raspberry. La cause évoquée est que l'OS et la Raspberry n'ont pas vocation à être temps-réel. Après changement vers l'UART, tout fonctionne comme espéré : aucune perte de communication n'est à signaler.

Comme ce travail n'est qu'une preuve de concept, beaucoup de documentations et scripts ont été écrits afin d'en faciliter la compréhension et la reproductibilité. En effet, d'autres personnes vont reprendre le projet où je l'ai laissé afin d'aller vers une solution commerciale.

Bien sûr, certains choix techniques peuvent être discutés. Notamment, l'Arduino maître n'est pas la meilleure solution car l'I²C ne peut être utilisé. De plus, les capteurs I²C peuvent être directement reliés à la Raspberry, ce qui fera économiser du temps et des bytes de communications inutiles.

Enfin, l'aspect consommation doit être pris en compte car le robot est destiné à être autonome. Dès que la Raspberry est utilisée avec un module wifi, un écran ... sa consommation grimpe en flèche jusqu'à atteindre entre 1 et 2A. Les concurrents de la Raspberry se situent également dans cette fourchette. Le poids du robot influencera également la consommation en courant des moteurs et donc la consommation totale.

6. Sources

- [1] LHOIR, Matthieu, *Using an Arduino board to centralize actuators & sensors for robotic applications*, Mons, Travail de fin d'études, HELHa, 2016.
- [2] DELVAUX, Julien, *C/Python library to communicate between a raspberry PI and an Arduino in the casper project*, Mons, Travail de fin d'études, HELHa, 2016.
- [3] TANENBAUM A. & WETHERALL D., *Computer Networks Fifth edition* 2011, 962 p.
- [4] MARTINEZ A. & FERNANDEZ E., *Learning ROS for Robotics Programming* 2013.
- [5] BATE, Steve, (consulté le 20 novembre 2015), *ChibiOS/RT on the Raspberry Pi*.
Adresse URL : <http://www.stevebate.net/chibios-rpi/GettingStarted.html>
- [6] HOBBYTRONICS, (consulté le 20 novembre 2015), *Raspberry Pi I2C Slave Read (clock stretching) Problem*.
Adresse URL : <http://www.hobbytronics.co.uk/raspberry-pi-i2c-clock-stretching>
- [7] SYSTEM MANAGEMENT INTERFACE FORUM, (consulté le 21 novembre 2015), *System Management Bus (SMBus) Specification*.
Adresse URL : <http://www.smbus.org/specs/>

Fiabilité de transistors industriels HEMTs de puissance basés sur la technologie AlGaN/GaN

Ing. J. Bartholomeus
ECAM - Bruxelles

Cet article fait l'étude de la fiabilité de transistors industriels HEMTs basés sur la technologie AlGaN/GaN. Afin d'évaluer cette fiabilité, une analyse des pièges au sein du transistor a été effectuée. Le premier test, en double Pulsed IV, permet de déterminer la présence de ces pièges. Le second, en courant transitoire, d'en établir les caractéristiques. Les tests ont été effectués sur des transistors GIT produits par GaN System.

Mots-clefs: Gallium nitride (GaN), High Electron Mobility Transistor (HEMT)

This article investigates the reliability of GaN-based high-electron mobility transistors (HEMTs) designed by semiconductor industry. To evaluate this reliability, traps tests were performed in double pulse IV and current transient. The first one detects the presence of the traps, the second evaluates their characteristics. The tests were done on GIT devices produced by GaN System.

Keywords: Gallium nitride (GaN), High Electron Mobility Transistor (HEMT)

1. Introduction

Durant les dernières décennies, le marché a demandé une constante amélioration des dispositifs électroniques. Ces derniers se doivent d'être toujours plus rapides, plus performants et plus économes en termes de consommation d'énergie. Depuis les panneaux solaires jusqu'aux téléphones portables et en passant par les voitures électriques, aucun de nos outils n'échappe à cette tendance. Afin d'en assurer la qualité, il est primordial de faire des tests de fiabilité sur ces dispositifs. Ces tests permettant également de déterminer où se situent les points à améliorer afin d'obtenir des appareils de plus en plus optimisés.

Quels pourraient être les bénéfices de telles démarches ? Prenons le cas d'un transistor de puissance assurant le transfert d'énergie depuis la batterie vers le moteur d'une voiture électrique. Si ce transistor commutait plus rapidement et/ou possédait une résistance interne plus petite, alors il dissiperait moins de chaleur. Par conséquent, le système de refroidissement nécessaire pourrait être plus restreint, ce qui diminuerait ainsi la masse totale de la voiture et donc, la quantité d'énergie pour la déplacer. Au final, le véhicule disposerait ainsi d'une plus grande autonomie, d'où l'intérêt d'améliorer ces technologies.

Afin de répondre aux critères en termes de hautes fréquences et de hautes puissances, la recherche de nouveaux matériaux s'est avérée nécessaire à cause des limites atteintes par les dispositifs à base de silicium. Les qualités intrinsèques et les charges fixes induites par dopage en font des candidats peu performants pour des applications en hautes puissances et fréquences. Les travaux effectués au cours des dernières années ont permis l'élaboration de nouveaux transistors afin d'arriver finalement aux transistors HEMTs (High Electron Mobility Transistors), d'abord à base d'Arséniure de Gallium (GaAs) et ensuite à base de Nitrure de Gallium (GaN). Ceux-ci sont à présent suffisamment performants pour être utilisés dans des applications de puissance. Votre téléphone et votre ordinateur en comportent probablement déjà.

Cependant, malgré tous les avantages promis par la technologie au Nitrure de Gallium, celle-ci possède aussi ses propres limites. Cet article présente quelques exemples de phénomènes restreignant les performances des transistors HEMTs à base de GaN.

2. Propriétés du nitrure de Gallium

Comme le montre la Figure 1, l'intérêt du GaN réside dans ses qualités intrinsèques supérieures par rapport à d'autres semi-conducteurs. Le GaN est un matériau avec un fort espacement entre sa bande conductrice et sa bande de valence ; dit '*band gap*'. Ce band gap permet de travailler à haute température, d'avoir une tension de claquage ainsi qu'une densité de porteurs élevée et permet également de fournir une résistance au rayonnement alpha. Une tension de claquage élevée permet la miniaturisation des composants tandis que la résistance au rayonnement alpha en fait un matériau de choix pour les applications spatiales. Le GaN possède également une très bonne conductivité thermique lui permettant de dissiper la chaleur et d'éviter ainsi l'auto-échauffement. Il présente aussi de bonnes caractéristiques en termes de mobilité et de vitesse de saturation des porteurs [1]. La structure du cristal de GaN la plus utilisée est la structure hexagonale dite '*Wurzite*'. Ce cristal, selon l'axe d'orientation avec lequel il a grandi, présente une polarisation spontanée et piézoélectrique. L'effet de ces polarisations est la présence de charges à la surface du cristal. Le choix des charges présentes d'un côté et de l'autre du cristal dépend de la polarisation. Le cristal peut également être dopé négativement avec du silicium, germanium ou oxygène jusqu'à 10^{19}cm^{-3} positivement avec du magnésium jusqu'à un taux de concentration de 10^{18}cm^{-3} . Le dopage positif est cependant très difficile et nécessite une 'activation' des atomes de magnésium, ceux-ci formant des liaisons avec l'hydrogène à l'intérieur du cristal. [2].

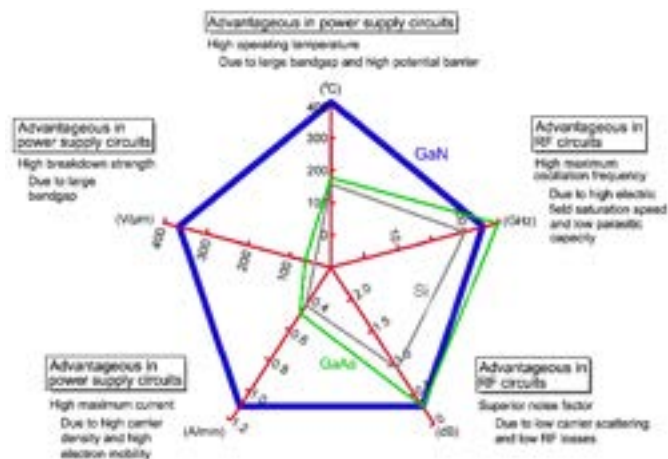


Figure 1 : Avantages du GaN par rapport à d'autres semi-conducteurs

3. Hétérostructure et Transistors HEMTs AlGaIn/GaN

Lors de la mise en conduction de transistors traditionnels au silicium, les charges fixes, issues des dopages, induisent des interactions de Coulomb avec les porteurs

majoritaires et en réduisent la mobilité. Cependant, le dopage est nécessaire afin de créer les porteurs libres.

Dans le cas des transistors HEMTs, la structure principale est formée par la jonction de deux couches, appelée hétérojonction. Le principe est le suivant : une couche assure la densité des porteurs libres tandis que l'autre leur permet de circuler sans entraver leur mobilité. La juxtaposition de deux matériaux présentant un band gap et des propriétés différentes 'plie' les bandes d'énergie au niveau de la jonction et forme un puit de potentiel. Ce puit de potentiel permet aux électrons d'y circuler dans deux directions, tel un canal. On appelle ce canal 2-deg pour 'Two Dimensional Electron Gaz'. [3].

Afin de limiter les dislocations et les défauts, il est nécessaire d'employer des matériaux avec des propriétés similaires. Dans le cas des transistors HEMTs à base de GaN, on utilise une hétérojonction formée par une couche combinant un alliage d'aluminium et de GaN (AlGaN) et une couche de GaN. L'hétérojonction ainsi formée est dite jonction AlGaN/GaN. Il existe d'autres types d'hétérojonctions, comme GaAsP/GaAs ou encore AlGaAs/GaAs. [3].

Suite à l'ajout d'aluminium, l'alliage AlGaN possède un paramètre de maille différent du cristal de GaN pure. Placé sur une couche GaN suffisamment grande, il se retrouve contraint en tension tandis que la couche GaN peut être considérée comme relaxée. Cette contrainte augmente la polarisation piézoélectrique et par conséquent, la densité de charge présente à la jonction des deux couches. Durant la jonction, les niveaux de Fermi des deux matériaux s'alignent. [2].

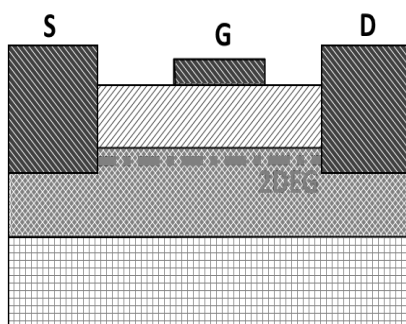


Figure 2 : couches basiques d'un transistor AlGaN/GaN.

Ce phénomène, couplé à la présence des charges fixes et des différents band gap induit la formation d'un canal bidimensionnel dans la couche GaN.

Pour réaliser cette hétérojonction, on procède par épitaxie en faisant grandir les cristaux sur un substrat (□□). La difficulté technique et le coût de la procédure ne permettent pas d'avoir des substrats en nitrure de gallium suffisamment grands et suffisamment abordables pour envisager une production industrielle. On utilise à la place des substrats tels que le saphir ou encore le silicium. [4].

Le choix du substrat dépend entre autres du coût, de la conductivité thermique du matériau et de son paramètre de maille. Une fois l'hétérojonction construite (AlGaN : ▨▨ ; GaN : ▩▩) sur substrat, en rajoutant des contacts ohmiques (▨▨)

pour le drain et la source et un contact Schottky pour la grille, nous obtenons un transistor HEMT comme montré à la Figure 2.

Le transistor ainsi formé est théoriquement fonctionnel mais présente la particularité d'être naturellement passant.

4. Pièges dans les transistors HEMTs AlGaIn/GaN

Les pièges sont un des effets parasites que l'on peut rencontrer avec les transistors HEMTs AlGaIn/GaN. Ils sont capables à la fois d'émettre des électrons et d'en capturer. Ces pièges sont dus à la présence d'impuretés dans les matériaux, des dislocations, des défauts dans les cristaux, des états de surface, etc. [3] [4].

Les pièges créent des états énergétiques dans la bande interdite du matériau et augmentent le taux de recombinaison électrons-trous ou sont occupés par des électrons durant un laps de temps dépendant de la nature du piège. L'activation de ces pièges se fait par un apport thermique, lumineux électrique ou autre. Ils sont classés en deux catégories, les donneurs et les accepteurs. Les donneurs, positivement ionisés, émettent un trou ou capturent un électron afin de retourner à un état neutre. Ils peuvent ensuite retourner à un état ionisé. Les accepteurs, négativement ionisés, en font de même avec les trous. [3].

On distingue les pièges encore en deux catégories, les pièges de surface et les pièges de substrat. Les pièges de surface sont responsables de l'effet appelé 'grille virtuelle' correspondant au gate-lag. Les pièges de substrat sont eux responsables du drain-lag. L'effet des pièges est la baisse de performance. Ils peuvent être en partie responsables de l'effondrement du courant et avoir un impact significatif sur l'augmentation de la résistance du transistor en régime linéaire. [3] [4].

En plus des pièges, on retrouve aussi l'effet de la température sur la mobilité, la vitesse de saturation et la densité des porteurs ou encore d'autres phénomènes tels que la distance grille-canal et les éléments passifs comme les capacités et inductances. Ces éléments parasites contribuent eux aussi à la perte de performances du transistor. [4]. Afin de les limiter, les industriels ont incorporé au transistor de base des couches supplémentaires comme montré à la Figure 3.

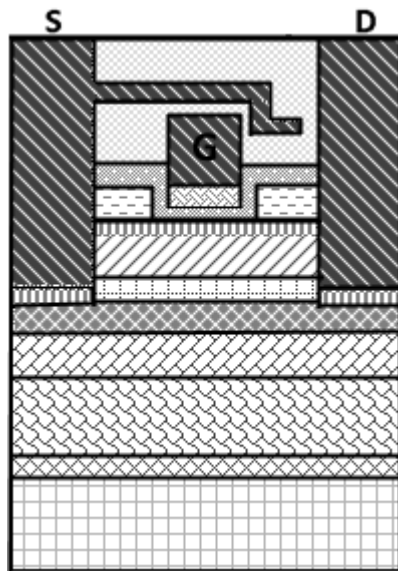


Figure 3 : Couches communément rencontrées dans un HEMT AlGaN/GaN

De bas en haut :

- (▣) Le substrat.
- (⊗) La couche de nucléation, cette couche permet de réduire les défauts issus de la différence de maille entre le substrat et la couche GaN. Un exemple de couche de nucléation est une alternance de couches AlN et GaN.
- (⋈) La couche de GaN 'Buffer' dopée. Elle permet de réduire les courants de fuite à travers le substrat.
- (⋈) La couche AlGaN back-barrière, alternative à la couche précédente.
- (▨) La couche GaN précédemment décrite.
- (⋈) La couche espaceur, réduisant l'effet de Coulomb entre les charges fixe de la couche AlGaN et les électrons du canal 2-deg.
- (//) La couche AlGaN précédemment décrite elle aussi.
- (■) Les couches 'CAP'. Ces couches améliorent les contacts ohmiques et le contact Schottky.

(- -) La couche de passivation, réduisant les effets des pièges de surfaces. Elle permet également de modifier les lignes de champs électriques et par conséquent, la tension de claquage. Elle modifie aussi la densité des porteurs dans le canal de par son effet sur la tension exercée sur la couche AlGaN.

(⋈) La couche de passivation de grille, a le même effet que la précédente si ce n'est qu'elle se rencontre aussi sous la grille. Elle augmente la tension de seuil du transistor et peut être utilisée pour créer/améliorer un transistor naturellement bloqué.

(⋈) La couche P-GaN généralement utilisée pour obtenir lesdits transistors naturellement bloqués.

(⋈) La couche d'isolation, semblable à la couche de passivation.

(■) Connecté à la source, au-dessus de la grille, les barrettes de champs. Les barrettes permettent de réduire les pics des champs électriques autour de la grille.

[3].

5. Détection et caractérisation des pièges dans les transistors HEMTs AlGaIn/GaN

5.1 Détection des pièges par mesure en double impulsionnel



Figure 4 : Série GS66508P

L'objectif de cette mesure consiste à mesurer le comportement du transistor dans un régime dynamique. Le transistor se retrouve plusieurs fois à l'état passant et à l'état bloqué. Durant la période où le transistor est bloqué, on applique une tension entre le drain et la source afin d'activer les pièges. Une fois ceux-ci activés, on mesure le comportement du transistor en conduction.

Une variation dans les résultats permet de déterminer la présence de pièges dans le transistor ainsi que l'amplitude de leur impact sur le courant.

Pour ces mesures, un transistor en provenance de GaN System des séries GS66508P représenté à la Figure 4 a été testé.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'appareil de test 'MC²' de MC2 Technologies. Le transistor a été monté sur un PCB afin de faciliter les mesures et a ensuite été fixé sur un Peltier. Le contact avec le Peltier est assuré par une fine feuille de carbone afin d'obtenir une répartition homogène de la température. Les paramètres, des multiples de 10ns, encodés pour le type d'impulsion sont pour la grille de 10000, 20000 et 2000000. Ces valeurs correspondent respectivement au retard, au temps et à la période d'impulsion. Pour le drain, dans le même ordre, 5000, 30000 et 2000000. Pour les mesures prises durant les impulsions, 100 et 2 pour le pas et la moyenne. 500 et 1.500 pour le début et la fin de la mesure de la tension en mode bloquant. 25000 et 27000 pour le début et fin de la mesure instantanée.

La tension d'off-state appliquée est pour la grille de 0V. Pour le drain, elle va de 0V à 300V par pas de 100V puis de 300V à 550V par pas de 50V. La dernière mesure est effectuée à 595V étant donné que le dispositif a pour limite 600V, 5A et 3300W de sécurité. Les températures appliquées vont de 30°C à 90°C par pas de 10°C.

Pour la mise du transistor en mode passant, le drain est fixé à 1V tandis que la tension de grille varie de 0V à 7V par pas de 0,2V. Le transistor est également protégé et se voit limité à une puissance de 40W, un courant de grille entre 80mA et -80mA et un courant de drain entre -500mA et 10000mA.

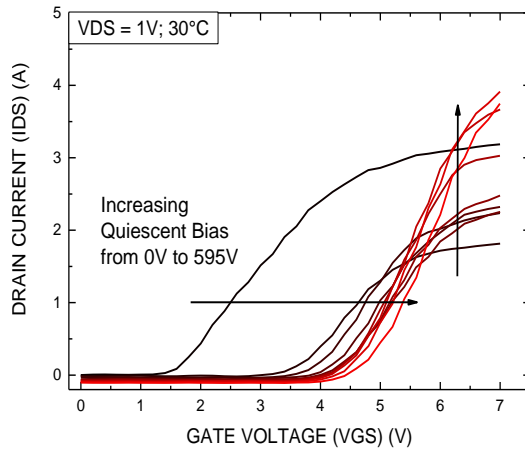


Figure 5 : Test en 'IDVG'

de seuil à 0V. Il apparait très clairement que la tension de seuil est plus sensible à la tension qu'à la température. Quelle que soit la valeur de cette dernière durant les tests, on observe un comportement semblable pour toutes les courbes. Une distinction est à faire pour les courbes au-delà de 60°C et de 450V où un effet combiné de la température et de la tension induit une variation d'autant plus grande de la tension de seuil.

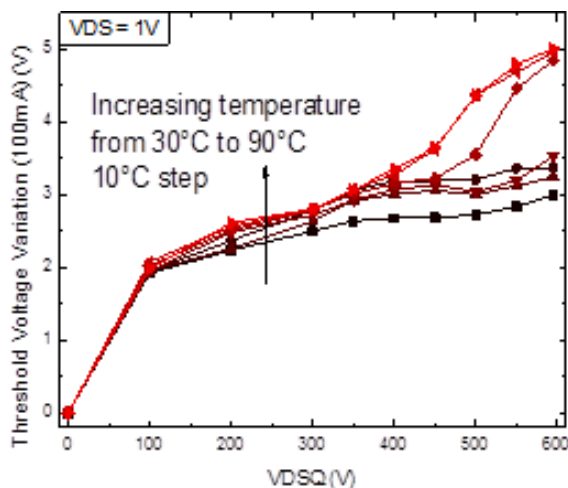


Figure 6: Variation de la tension de seuil du transistor de la série GS66508P

A la Figure 5, le test à 30°C montre que la tension de seuil subit un déplacement en lien avec la tension VDS appliquée. Pour une valeur de 0V à 100V, celle-ci se déplace de 2V. La pente de la courbe en IDVG, c'est-à-dire la transconductance, augmente avec la tension VDS en mode bloqué.

La Figure 6 reprend la variation de la tension de seuil à différentes températures et pour différentes tensions VDS appliquées en mode bloquant. Les variations sont indiquées par rapport à la tension

L'effet des pièges a ainsi eu un impact sur plusieurs caractéristiques du transistor. Une variation de la tension de seuil et de la transconductance implique la présence de ceux-ci sous la grille, mais aussi dans la région entre la grille et le drain ainsi qu'entre la grille et la source.

En conclusion, la présence des pièges dans le transistor a clairement été démontrée au travers des différents résultats.

L'objectif du prochain test sera de déterminer les caractéristiques des pièges au moyen de l'analyse du courant transitoire.

5.2 Caractérisation des pièges par mesure du courant transitoire.

Le principe de la mesure du courant transitoire consiste à échantillonner dans un délai spécifique les variations de courant d'un dispositif sous tension. Pour la mesure des pièges, celle-ci peut être effectuée en mettant sous tension et à différentes températures la grille ou le drain selon les pièges à caractériser. Il est également possible de polariser le substrat, afin de mettre en évidence les pièges de substrat. Les mesures peuvent aussi être effectuées sans mise sous tension, permettant de mesurer la désactivation des pièges.

Une fois les échantillons collectés, des fonctions exponentielles peuvent être utilisées pour en établir les courbes approximatives selon la formule (1) [5].

$$I_{DS}(t) = I_{DS,\infty} - \sum A_i e^{-\left(\frac{\tau_i}{t}\right)^{\beta_i}} \quad (1)$$

Avec $I_{DS}(t)$, le courant transitoire; $I_{DS,\infty}$, le courant final ou initial selon la référence utilisée; A_i , le coefficient; τ_i , la constante de temps; t , le temps et β_i , le degré. Les minima et maxima de ces fonctions représentent un piège capturant ou libérant des électrons. A des températures différentes, ces phénomènes apparaissent plus ou moins rapidement avec la même constante de temps. Ces constantes de temps permettent de définir les énergies d'activations E_a selon l'équation (2).

$$\ln(\tau * t^2) = E_a * \frac{q}{kt} + \ln\left(\frac{1}{\gamma + \sigma_{\infty}}\right) \quad (2)$$

où k est la constante de Boltzmann. Le terme logarithmique est inversement proportionnel à la densité des pièges, la vitesse thermique et la section efficace.

Le résultat final est l'obtention des niveaux d'énergie de différents pièges, capturant et libérant des électrons selon certaines constantes de temps. Ces pièges peuvent ensuite être représentés à la Figure 7.

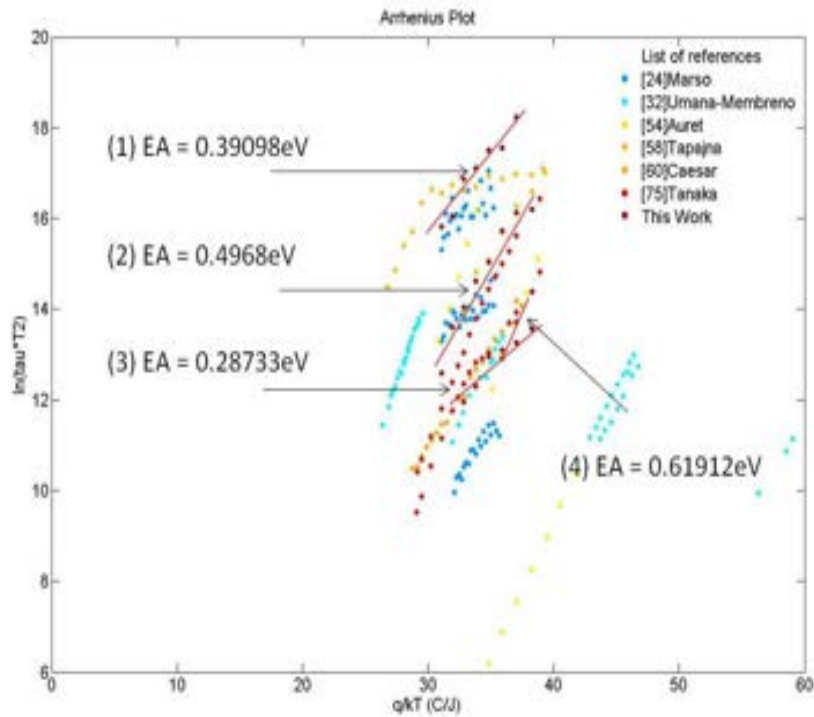


Figure 7: Comparaison des énergies d'activation des pièges avec d'autres travaux

Une comparaison avec les travaux réalisés par différents chercheurs sur le sujet permet de trouver des corrélations avec les pièges obtenus au travers des mesures. Cette comparaison a permis de mettre en évidence que les pièges présentaient des similitudes avec ceux de Tanaka [6], Tapajna [7], Umana-Membreno [8] et Marso [9]. Ainsi, les pièges présents dans le transistor peuvent être situés profondément entre la grille et le drain ou juste à côté d'eux. Les résultats permettent également de supposer que les pièges ne sont pas présents en surface. Les pièges peuvent être l'interaction des électrons avec les défauts de cristal et/ou les impuretés présentes.

En conclusion, des pièges se situent sous le canal et dans les couches profondes du transistor.

6. Conséquence de la translation de seuil sur les systèmes électroniques

Au vu des résultats précédents, il paraît légitime de se poser la question de la fiabilité de tels transistors. L'impossibilité du transistor à conserver une tension de seuil fixe aussi bien en température qu'en tension oblige les concepteurs à se demander s'il est bien judicieux d'utiliser de tels composants dans des circuits électroniques de puissance. Ces circuits étant soumis à de fortes variations de tensions et à de fortes puissances, les effets de translations, pour ne citer qu'eux, seront irrémédiablement présents. En prenant l'exemple d'un transistor employé dans un convertisseur de puissance DC/DC dans une voiture électrique, il serait dommage pour le conducteur de ne plus pouvoir commander son moteur correctement dès que celui-ci demande une tension supérieure à 100V...

Cependant, il aurait été dommage à ce niveau de renoncer à une telle technologie ; c'est pourquoi des solutions simples ont été implémentées afin de pallier les divers défauts des GaN. La tension de seuil n'étant pas soumise à une translation constante, cette dernière apparaît comme ne dépassant jamais les 6V dans les résultats (voir figure). Ainsi, le transistor étant commandé par sa grille, une tension de commande de 6V ou plus est suffisante pour ne pas devoir se soucier des tensions appliquées entre le drain et la source. Cette solution est d'ailleurs celle adoptée par le fabricant GaN Systems [10]

7. Conclusions

Au travers des tests, la présence des pièges, telle qu'établie par hypothèse, a été démontrée durant les tests en double impulsif. Les tests en courant transitoire permettent ensuite de caractériser les pièges et de les localiser. Dans le cas exposé ici, les pièges se situent sous le canal et dans les couches profondes du transistor. Il devient dès lors possible de définir à quelles étapes de fabrication des améliorations sont à apporter. Ceci afin d'optimiser les performances des dispositifs. Une amélioration de la qualité du cristal peut être une solution, l'ajout de couches et d'éléments compensatoires une autre. Cependant, cette dernière solution peut présenter un désavantage en perturbant d'autres aspects du transistor, à l'image de la couche de passivation.

Malgré leurs défauts, les transistors GaN présentent une technologie plus qu'intéressante pour l'avenir de l'électronique. Les satellites Proba-V utilisent déjà des transistors à base de cette technologie dans leurs convertisseurs et les futures applications prévoient une utilisation à grande échelle dans les domaines tels que les énergies renouvelables, les voitures électriques, voire même les chargeurs

d'ordinateurs portables. Ces composants commencent à peine à faire leur percée dans le secteur industriel public mais leur avancée et le fait qu'ils apportent une solution à nos besoins en énergie en font de parfaits candidats. Au même titre que le silicium fut nommé matériau du 20^{ème} siècle en matière d'électronique, certains chercheurs surnomment d'ores et déjà le GaN comme étant le composant du 21^{ème} siècle.

Sources

- [1] GaN Systems, (consulté en janvier 2016), *Why Gallium Nitride*, http://www.gansystems.com/why_gallium_nitride_new.php
- [2] Meneghesso G. et al., *First Reliability Demonstration of Sub-200-nm AlN/GaN-on-Silicon Double-Heterostructure HEMTs for Ka-Band Applications*, in IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 13, no. 4, pp. 480-488, Dec. 2013.
- [3] MISHRA Umesh K., SINGH Jasprit, *Semiconductor device Physics and design*, Springer edition, ISBN 978-1-4020-6481-4 (e-book)
- [4] TARTARIN Jean-Guy, *La technologie GaN et ses applications pour l'électronique robuste, haute fréquence et puissance*, Rapport LAAS n 08644, Veille technologique sur la filière GaN, 2008, hal-00341009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00341009/document>
- [5] BISI Davide et al, *Deep-Level Characterization in GaN HEMTs-Part I: Advantages and Limitations of Drain Current Transient Measurements*, iee, DOI: 10.1109/TED, 2013, 2279021.
- [6] Tanaka Kenichiro et al, 'Effects of deep trapping states at high temperatures on transient performance of AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors', Japanese Journal of Applied Physics 52, 2013, 04CF07
- [7] Tapajna Milan et al, *Integrated Optical and Electrical Analysis: Identifying Location and Properties of Traps in AlGaIn/GaN HEMTs During Electrical Stress*, DOI: 10.1109/LED.2010.2047092
- [8] Umana-Membreno G.A. et al, *Electrically Active Defects in GaN Layers Grown With and Without Fe-doped Buffers by Metal-organic Chemical Vapor Deposition*, Journal of Electronic Materials, May 2008, Volume 37, Issue 5, pp 569-572

- [9] Marso M. et al, *Investigation of buffer traps in an AlGaIn/GaN/Si high electron mobility transistor by backgating current deep level transient spectroscopy*, Appl. Phys. Lett. 82, 633 (2003), DOI 10.1063/1.1540239
- [10] GaN Systems, (consulté en janvier 2016), *650 2 kW GaN E-HEMT half bridge*, <http://www.gansystems.com/gs66508t-evbhb.php>

Développement d'un simulateur de centrale inertielle dédié aux systèmes de navigation par satellites

Ing. C. DEMELENNE
Dr J. LECOINTRE
PIERRARD – Virton

Cet article présente la réalisation d'un simulateur de centrale inertielle à neuf degrés de liberté. Une centrale inertielle est un instrument utilisé en navigation, capable d'intégrer les mouvements d'un mobile pour estimer son orientation, sa vitesse linéaire, sa position et le champ magnétique ambiant. La centrale inertielle associe des capteurs tels que les gyromètres, les accéléromètres et les magnétomètres. Le simulateur présenté dans cet article va permettre de générer un signal simulant le comportement d'une « vraie » centrale inertielle. L'intérêt d'un simulateur de centrale inertielle est notamment de pouvoir tester l'hybridation de plusieurs systèmes de positionnement.

Mots-clefs : Centrale inertielle, simulateur GNSS (Global Navigation Satellite System), Signal GPS, Inertial Measurement Unit, Distance Measuring Equipment.

This article presents the implementation of a nine degrees of freedom inertial measurement unit. An inertial measurement unit is an electronic device that measures and reports a body's specific force, angular rate, and the magnetic field surrounding the body, using a combination of accelerometers, gyroscopes, and magnetometers. The simulator presented in this article will help to generate a signal simulating the behavior of a “real” inertial measurement unit. The purpose of such simulator is to test the hybridization of several positioning.

Keywords: Inertial Measurement Unit (IMU), GNSS simulator (Global Navigation Satellite System), GPS Signal, Inertial Measurement Unit, Distance Measuring Equipment.

1. Introduction

La géolocalisation est omniprésente dans la vie de tous les jours (GPS, objets connectés, etc.) mais aussi au niveau industriel (mouvement automatisé, transport de matériaux, etc.). La rentabilité d'une entreprise peut donc être influencée directement par ses services de localisation.

Dans le but de maintenir le meilleur service (haute précision et service constant) dans chaque composant essentiel d'une plateforme de géolocalisation, certaines sociétés se sont spécialisées dans la recherche et le développement de ces composés et les moyens de les expérimenter (par exemple : M3 Systems Belgium, Galaxia Business Park, Transinne).

Il s'agit ici de développer un simulateur GNSS (Global Navigation Satellite System) dans le but de simuler d'autres systèmes de positionnement. Les systèmes GNSS ont un rôle primordial dans le positionnement aussi bien terrestre qu'aérien. En effet, un récepteur compatible peut récupérer sa position et ainsi obtenir une localisation en trois dimensions (longitude, latitude et altitude). Cette géolocalisation est rendue possible grâce à un ensemble de satellites formant une constellation orbitale autour de la terre.

A l'heure actuelle, le système GNSS englobe quatre systèmes de positionnement par satellites globaux :

GPS : Système Américain

Galileo : Système Européen

GLONASS : Système Russe

Compass-Beidou : Système Chinois

De nos jours, seuls les systèmes GPS et GLONASS sont totalement opérationnels ; Galileo et Compass-Beidou étant en cours de développement. [1]

La géolocalisation satellitaire utilise des radiofréquences pour transmettre ces informations via une bande porteuse vers le récepteur. A l'origine, deux bandes étaient utilisées L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,60 MHz). Due à la modernisation du système, une nouvelle bande fut créée : L5 (1176,45 MHz).

L'utilisation d'un tel système de géolocalisation permet un transfert rapide entre émetteur et récepteur, mais la propagation du signal est entravée par tout obstacle entre ces derniers. Pour contrer toutes perturbations (tunnel, bâtiment, etc.), les entreprises de géolocalisation recherchent de nouvelles solutions.

Un exemple de solution est l'hybridation d'une centrale inertielle avec les systèmes utilisant le GNSS. Les centrales inertielles sont un moyen de définir la position d'un mobile de façon autonome (sans apport de signaux extérieurs), aussi bien pour les véhicules terrestres que les mobiles aéronautiques. Une fusion de données entre

GNSS et IMU (Inertial Measurement Unit) offre une solution de navigation plus robuste et permet d'en améliorer la continuité de fonctionnement (par exemple, lors du passage dans un tunnel). En effet, le système de centrale inertielle n'utilise que des capteurs internes (accéléromètre, gyromètre, etc.) n'est donc pas influencé par des erreurs externes. Mais ce type de capteurs engendre avec le temps des erreurs grandissantes demandant un recalibrage. Ces erreurs proviennent des mesures des rotations et des accélérations (biais, bruit, facteur d'échelle, etc.).

Une autre solution pourrait être via l'utilisation de signaux DME (Distance Measuring Equipment) dans le domaine de l'aviation. En effet, le système DME permet à un avion de mesurer sa distance (en trois dimensions) le séparant d'une station au sol, ceci en mesurant le temps d'émission aller/retour d'une impulsion radio (avion/station, station/avion). Cette approche offre une solution de positionnement indépendante améliorant le niveau global de sécurité par redondance.

L'objectif global est d'intégrer au simulateur GNSS, un simulateur IMU et/ou un simulateur DME afin de fournir un banc de tests pour divers systèmes de navigation, pour divers domaines (navigation terrestre ou aéronautique, domaine militaire, etc.).

Pour réaliser au mieux cet objectif, il est primordial que les simulateurs GNSS, IMU et/ou DME fonctionnent de manière harmonieuse. En effet, le positionnement calculé par les différents simulateurs se doit d'être similaire, quel que soit le choix ou la combinaison des capteurs, ceci entraînant une utilisation des mêmes données de base (vitesse, trajectoire, etc.), mais aussi un fonctionnement synchrone des différents simulateurs.

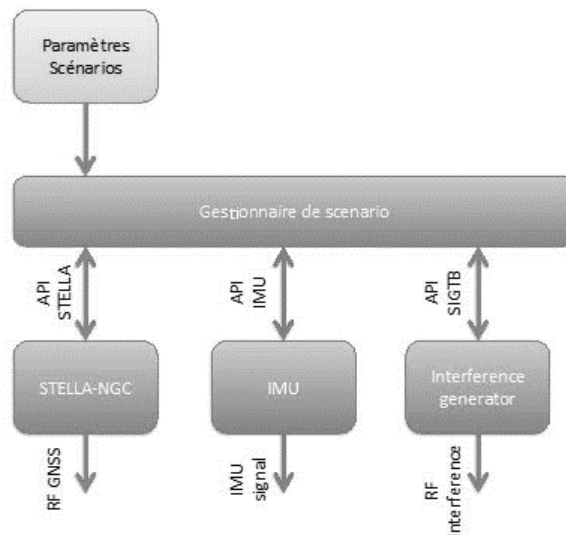


Figure 1 : Architecture du banc de test de navigation.

L'architecture souhaitée suit la figure 1. Le pilotage des différents simulateurs se fait via une « surcouche » logicielle appelée « Gestionnaire de scénario » et permet d'assurer la cohérence des données simulées. Elle prend en entrée divers paramètres qu'elle utilise pour piloter les divers simulateurs via leur API respective (Application Programming Interface) : STELLA est un simulateur GNSS (M3 Systems Belgium), et SIGTB, une plateforme GNSS (M3 Systems Belgium)

La partie développée dans cet article concerne essentiellement la partie IMU, suivie d'une partie pour le développement du gestionnaire de scénario.

Ceci se fera :

1. D'une part par la compréhension du fonctionnement intrinsèque des systèmes IMU, permettant le développement d'un simulateur de centrale inertielle réaliste. Le modèle IMU doit reproduire le comportement d'une centrale inertielle 9 axes (accéléromètre, gyroscope et boussole) fidèle à une trajectoire donnée en entrée.
2. Et, d'autre part, dans la participation au déploiement du gestionnaire de scénario. Ce dernier permet le pilotage synchrone et cohérent du simulateur IMU, du simulateur GNSS et d'autres simulateurs de positionnement.

Les spécifications techniques sont les suivantes :

- Le simulateur IMU prend en compte le bruit et le biais sur les neuf axes (a minima)
- Le simulateur IMU doit pouvoir fonctionner à 100 Hz
- Le pilotage du simulateur IMU peut être effectué à un rythme deux fois plus lent (50 Hz)
- Une API dédiée au simulateur IMU sera développée
- Le simulateur IMU est intégré au gestionnaire de scénario au moyen de son API spécifique
- Le Gestionnaire de scénario utilise en entrée les paramètres nécessaires au pilotage du simulateur GNSS, du simulateur IMU et du simulateur DME
- La synchronisation du simulateur GNSS et du simulateur IMU est inférieure à 0,02 seconde

2. Théorie

Pour mieux appréhender la création d'une centrale inertielle de type IMU, il est important de poser les bases d'un tel système.

Une centrale inertielle est un instrument de localisation ayant la capacité d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération, vitesse angulaire, etc.). Le principal avantage d'un tel instrument de mesure est dans son fonctionnement par capteurs internes ne demandant pas de signaux extérieurs, ceci limitant les perturbations ex-

ternes. Les désignations habituelles pour une centrale inertielle sont : Inertial Reference System (IRS), Inertial Navigation System (INS) et IMU. La centrale inertielle IMU est un système de capteurs sans calculateur. Le positionnement par système de centrale inertielle va donc permettre de déterminer la position, la vitesse et l'accélération d'un véhicule.

Les trois gyromètres permettent de mesurer les trois composants du vecteur vitesse angulaire (roulis, lacet et tangage). Les trois accéléromètres permettent de mesurer les trois composants du vecteur force spécifique. Cette dernière est l'addition de forces extérieures divisée par la masse du mobile. On peut donc qualifier cette valeur comme la dimension d'une accélération.

Les gyromètres et les accéléromètres sont, de manière générale, la base de prise de mesures d'une centrale inertielle. Pour améliorer la précision ou le nombre d'informations mesurées par une centrale inertielle, certains capteurs sont parfois ajoutés : par exemple, un ou plusieurs magnétomètres qui vont permettre de connaître l'altitude ou la position du mobile en fonction du champ magnétique terrestre, un baromètre pour connaître la pression ambiante, un capteur de température pour connaître la température ambiante, etc.

2.1. Capteurs

La précision des capteurs ainsi que leurs mensurations varient en fonction des technologies employées, le prix étant directement proportionnel à la précision voulue.

Accéléromètre

Un accéléromètre est un dispositif permettant de mesurer l'accélération linéaire d'un mobile sur lequel il est fixé. La norme SI (Système International) définit l'accélération en m/s^2 , tandis qu'un accéléromètre donne majoritairement ses mesures en « g » ($\approx 9,81 m/s^2$). De façon simplifiée, un accéléromètre se schématise comme un système de masse-ressort.

Il existe deux grandes familles d'accéléromètre : non-asservis et à asservissement.

Non-asservis

Ces capteurs fonctionnent en « boucle ouverte », c'est à dire que la mesure en sortie est une image directe du déplacement de la masse d'effort du capteur, pour atteindre une égalité entre la force de rappel et la force d'inertie. Il existe différents procédés de détection : piézo-électrique, piézo-résistif, capacitive, inductive, optique...

A asservissement

Dans le cas des accéléromètres asservis, l'objectif du système est de maintenir la masse d'effort en position, indépendamment de l'accélération subie. Pour ce faire,

une force de rappel est créée avec un actionneur électromagnétique commandé en courant (électrique). Lorsque la masse est en position d'équilibre, le courant nécessaire pour engendrer la force de maintien donne la force d'accélération. La force de rappel peut être de type électromagnétique ou électrostatique.

Gyromètre

Un gyromètre est un capteur mesurant une vitesse angulaire ; il est utilisé principalement dans les avions, les bateaux, sous-marins pour déterminer leur vitesse et leur position. Il y a deux grandes classes de gyromètres, utilisant soit l'effet Sagnac (fibre optique et laser), soit l'effet inertiel (force de Coriolis).

Magnétomètre

Un magnétomètre permet de mesurer l'intensité et/ou la direction d'un champ magnétique. Il utilise un capteur de champ magnétique qui, combiné à un dispositif électronique, permet d'extraire la mesure du champ magnétique. Plusieurs types existent suivant divers principes physiques.

L'utilisation principale des magnétomètres est dans un cadre géologique et lors de la détection d'anomalies magnétiques ou d'objets ferreux. Au cours des dernières années, les magnétomètres ont été miniaturisés au point de pouvoir être intégrés en tant que boussole à l'intérieur de composants (GPS, téléphone mobile, etc.).

Famille de magnétomètres

Un champ magnétique pouvant interagir de différentes manières avec un système physique, il existe une grande variété de magnétomètres. Cette interaction peut être sous la forme d'une force, mesurant ainsi le champ magnétique via le moment de cette force. Un champ magnétique peut aussi interagir avec un système électronique (effet hall, fluxgate, SQUID, etc.). Il peut également interagir avec les photons, utilisant divers effets (effet Zeeman, effet Kerr, effet Faraday) pour mesurer le champ magnétique. On recense ainsi plusieurs types de magnétomètres :

- Effet Hall
- Magnétomètres scalaires
- Magnétomètres à résonance de protons
- Magnétomètres à pompe optique
- Magnétomètres vectoriels (à induction magnétique, SQUID, etc.)

3. Développement du simulateur : partie théorique

Le simulateur IMU doit pouvoir donner les informations de déplacement du mobile suivant neuf degrés de liberté, communément appelé 9 DOF (Degrees of Freedom). Ces derniers sont répartis sur les trois capteurs et leurs trois axes (x, y et z). Les capteurs utilisés sont : (i) le gyromètre, (ii) l'accéléromètre et (iii) le magnétomètre.

Pour pouvoir convertir un déplacement en neuf degrés de liberté, il faut passer par quatre étapes principales (figure 2) :

1. Extraction et conversion du mouvement du mobile
2. Traitement et conversion des données
3. Introduction erreurs
4. Envoi des données

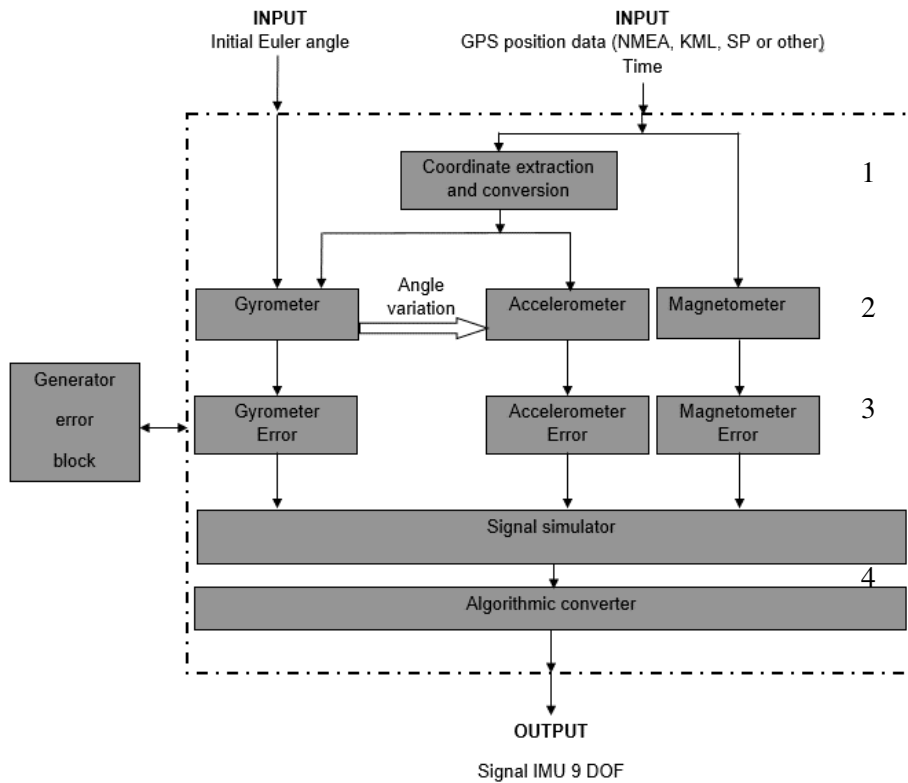


Figure 2 : Schéma général simulateur IMU

3.1. Extraction et conversion du mouvement du mobile

Extraction du mouvement du mobile

Avant de pouvoir convertir le mouvement du mobile suivant les différents capteurs, il faut commencer par définir ce mouvement. Pour ce faire, il faut utiliser les données du mobile réceptionnées en entrée, données pouvant avoir plusieurs formats et provenant du simulateur existant.

Le choix s'est porté sur le format d'entrée NMEA (National Marine Electronics Association), car ce dernier possède les informations de latitude, longitude, date, heure,

hauteur etc. Ces données permettent de passer d'une trame NMEA de positionnement de mobile à des données liées aux 3 axes de l'accéléromètre, aux 3 axes du gyromètre et aux 3 axes du magnétomètre (les autres informations ne sont pas utiles dans le cas présenté).

GGA	Système de positionnement global données Corrigées
123519	Correctif pris à 12 h 35 min 19 s UTC
4807.038, N	Latitude : 48 degrés 07.038' N
01131.000, E	Longitude : 11 degrés 31.000' E
1	Qualité du correctif : 1=GPS corrigé
08	Nombre de satellites poursuivis
545.4, M	Altitude en mètre par rapport au niveau de la mer

Tableau 1 : trame NMEA

La trame NMEA fonctionne selon le format suivant [2] :

\$ GPGGA, 123519,4807.038, N,01131.000, E, 1,08, 0.9, 545.4, M,46.9, M,,*47

Pour extraire les données, un programme Labview® a été réalisé pour lire le premier symbole de la trame (\$ GPGGA) puis aller à chaque « , » extraire la donnée suivante (figure 3). Ce programme permet de sortir la longitude, latitude etc. Ces données sont traitées dans les algorithmes aux points suivants.

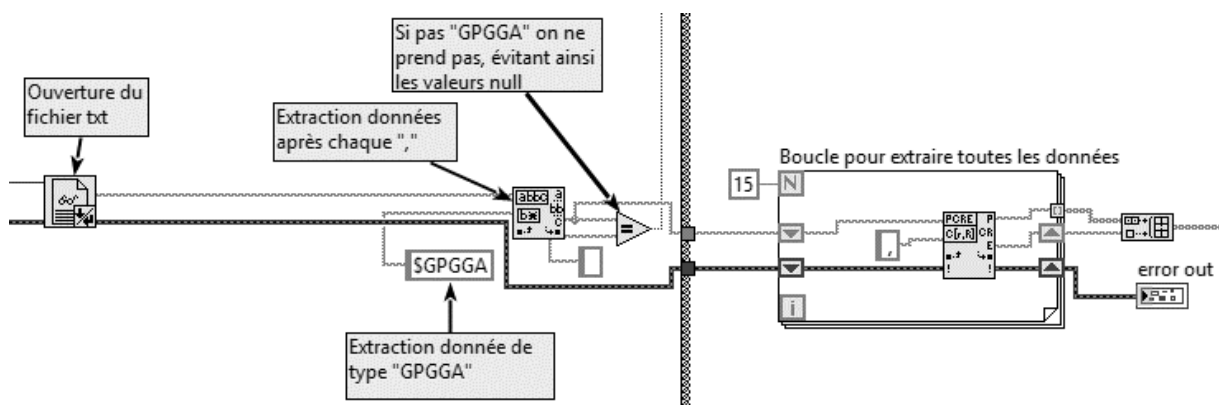


Figure 3 : Extraction NMEA-GPGGA

Conversion du mouvement du mobile

Une fois les données de latitude, longitude, date et heure extraites, il faut les convertir suivant les différents capteurs.

Notion de référentiel

En physique, un référentiel représente un système de coordonnées de l'espace permettant de repérer un point dans cet espace. Si on ajoute le facteur temps aux trois

coordonnées d'espace, on peut quantifier la position, la vitesse et l'accélération du mobile suivant ce référentiel. Dans le cas présent, on quantifie les coordonnées suivant deux référentiels : le référentiel « fixe » et « mobile ».

Référentiel fixe

La conversion du mouvement du mobile permet de convertir les coordonnées du référentiel géodésique LLA (pour Latitude [°], Longitude [°] et Altitude [m ou km]) en coordonnées géodésiques cartésiennes (x,y,z) (aussi appelées ECEF-(Earth Centered Earth Fixed)) [3] . Ces données de localisation suivent un format spécifique (WGS84, GRS80, etc.) qui définit les différents paramètres de l'ellipsoïde de révolution. Les formules de passage du format LLA en ECEF sont reprises ci-dessous :

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda & N(\phi) &= a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} \\ Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda & f &= \frac{a - b}{a} \\ Z &= [N(1 - e^2) + h] \sin \phi & e^2 &= 2f - f^2 \end{aligned}$$

Où :

ϕ, λ, h sont la latitude géodésique, la longitude et l'altitude au dessus de l'ellipsoïde

X, Y, Z sont les coordonnées cartésiennes fixes centrées au centre de la Terre

N est le rayon de courbure en vertical

a est l'axe semi-majeur de la Terre (rayon équatorial de l'ellipsoïde)

b est l'axe semi-mineur de la Terre (rayon polaire de l'ellipsoïde)

f est l'aplatissement

e est l'excentricité

Dans le cadre de cette étude, le format utilisé est le WGS84, ce qui donne les valeurs de paramètres suivantes :

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}, b = 6\,356\,752,314 \text{ m} \text{ et } f = 1/298,257$$

Le référentiel obtenu suit les référentiels géodésiques classiques : l'origine (0,0,0) est au centre de la terre, l'axe Z pointe vers le pôle nord, l'axe X pointe vers le croisement entre le méridien de Greenwich et l'équateur, et l'axe Y finit le repère ortho-normé.

Référentiel mobile

Le référentiel mobile est fixé au niveau de la centrale inertielle et suit l'orientation de cette dernière. De manière « classique », le centre de la centrale inertielle représente le point (0, 0, 0), l'axe X pointe vers l'avant du mobile, l'axe Z pointe vers le bas et l'axe Y pointe vers la droite.

Changement de référentiel

Pour pouvoir utiliser les données d'une centrale inertielle (analyse, hybridation avec un système GPS, etc.), il est important de respecter les référentiels utilisés. Pour passer d'un référentiel mobile à un référentiel fixe, et inversement, il faut passer par une matrice de rotation.

Pour chaque matrice de rotation, plusieurs notions sont utilisables : quaternion, angle d'Euler... Dans notre cas, seuls les angles d'Euler et les cosinus directeurs sont utilisés.

3.2. Traitement et conversion données

Simulation du gyromètre

La simulation du gyromètre permet de générer un signal de trois variations de vitesse angulaire. Cette génération se fait via quatre étapes.

Conversion coordonnée LLA en coordonnée cartésienne

Pour commencer, il est important de convertir les données latitude, longitude et hauteur en référentiel ECEF. Ceci permet de travailler avec des distances en mètres et non avec un mélange entre des données en degrés (latitude, longitude) et en mètres (hauteur).

Changement de référentiel

Pour pouvoir utiliser les coordonnées suivant le bon référentiel, il est important de faire passer ces coordonnées du référentiel fixe vers le référentiel propre au mobile. Dans le cas du gyromètre, ce changement de référentiel se fait via l'utilisation des angles d'Euler initiaux.

Ces angles d'Euler sont définis au début de la simulation du simulateur et restent fixes au cours de celle-ci. Cette initialisation simule le positionnement initial de la centrale inertielle.

Le changement de référentiel utilise la matrice de rotation [4] :

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(\theta)c(\Psi) & s(\phi)s(\theta)c(\Psi) + c(\phi)s(\Psi) & -c(\phi)s(\theta)c(\Psi) + s(\phi)s(\Psi) \\ -c(\theta)s(\Psi) & -s(\phi)s(\theta)s(\Psi) + c(\phi)c(\Psi) & c(\phi)s(\theta)s(\Psi) + s(\phi)c(\Psi) \\ s(\theta) & -s(\phi)c(\theta) & c(\phi)c(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Avec :

- Φ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe X (Roulis)
- Θ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe Y (Tangage)
- Ψ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe Z (Lacet)
- c = cosinus et s = sinus

(x, y, z) : Coordonnée dans le référentiel mobile

(x'', y'', z'') : Coordonnée dans le référentiel fixe

Calcul de la variation de vitesse angulaire

Une fois les coordonnées passées dans le référentiel du mobile, il faut maintenant calculer les variations de vitesse angulaire. Ces variations permettent de définir l'attitude relative (par rapport au référentiel initial) du mobile en fonction du temps. Cette dernière est importante pour pouvoir calculer la position relative du mobile au cours du temps.

Pour pouvoir déterminer la variation de vitesse angulaire au temps t , il est nécessaire de passer par plusieurs étapes :

- Calculer le vecteur pour les trois axes au temps t
- Calculer la norme de ce vecteur
- Calculer l'angle entre chaque axe (x , y et z initiaux) et le vecteur au temps t
- Calculer la variation d'angle entre le temps t et le temps $t - 1$.
- Calculer la variation de vitesse angulaire au temps t

Ajout d'erreurs

Une fois la variation de vitesse angulaire calculée, il faut maintenant ajouter diverses erreurs pour simuler le comportement d'un capteur réel. En effet, ce dernier ne représente jamais une valeur « parfaite ».

Simulation de l'accéléromètre

La simulation d'un accéléromètre réel se fait également via quatre étapes.

Conversion des coordonnées

La conversion des coordonnées se fait via les informations données dans la section 3.1.

Calcul des différentes accélérations

Le calcul des accélérations se fait sur base des formules de cinématique classiques.

Changement de référentiel

L'accélération calculée représente l'accélération du mobile dans le référentiel fixe (ECEF). Pour simuler l'accélération à chaque temps dans le référentiel du mobile et ainsi simuler un accéléromètre, il faut faire passer ces valeurs dans le référentiel du mobile au temps t . Le référentiel du mobile étant lié au corps en mouvement, il se modifie à chaque instant. Pour suivre ce changement de référentiel, il faut utiliser les valeurs du gyromètre calculées précédemment pour le changement de référentiel. Ceci donne comme matrice de rotation :

$$\begin{pmatrix} cy.cp - co.sp.sy & cy.sp + co.cp.sy & sy.so \\ -sy.cp - cp.sp.cy & -sy.sp - co.cp.cy & cy.so \\ so.sp & -so.cp & co \end{pmatrix}$$

Avec:

c = cosinus et s = sinus

p = Angle du gyroscope suivant l'axe x

o = Angle du gyroscope suivant l'axe y

y = Angle du gyroscope suivant l'axe z

Ajout d'erreurs

Comme pour le gyromètre, il faut maintenant ajouter diverses erreurs à l'accéléromètre pour simuler le comportement d'un capteur réel.

Simulation du magnétomètre

Contrairement aux précédents capteurs, le magnétomètre mesure le champ magnétique terrestre et non une valeur relative. Le champ magnétique terrestre est dû aux caractéristiques de la composition de la Terre. Pour quantifier ce dernier, différents modèles mathématiques ont été développés ; les plus connus sont le modèle WMM (World Magnetic Model) et le modèle IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Le champ magnétique terrestre est variable dans le temps ; pour palier à cette variation, les modèles sont mis à jour tous les cinq ans. Les quatre étapes de travail sont les suivantes.¹

Extraction coefficient WMM

Le modèle WMM utilise ses coefficients mathématiques propres [5]. Les fichiers correspondant à l'année voulue sont disponibles librement sur les différents sites officiels. L'extraction de ces fichiers suit la logique d'extraction des données de trajectoire des fichiers NMEA.

Conversion coefficient WMM

Une fois les coefficients extraits de la base de données du modèle voulu, on peut déduire le champ magnétique à un point voulu.

Formule pour le modèle WMM

Pour définir le champ magnétique terrestre comme un magnétomètre, il faut le calculer suivant les différents axes du repère fixe. Pour ce faire, il faut utiliser les formules :

$$X = -B_{\theta} \cos \varepsilon - B_r \sin \varepsilon$$

$$Y = B_{\phi}$$

$$Z = B_{\theta} \sin \varepsilon - B_r \cos \varepsilon$$

Avec : ϵ terme correcteur pour l'aplatissement de la terre.

V potentiel magnétostatique [6] : $\vec{B} = -\nabla V$

$$V = a \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

B_θ , B_r et B_ϕ les forces du champ magnétique en coordonnées tangentiels :

$$B_r = \frac{-\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

$$B_\theta = \frac{-1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = - \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta}$$

$$B_\phi = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{-1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (-g_n^m \sin m\phi + h_n^m \cos m\phi) P_n^m(\theta)$$

Avec g_n^m et h_n^m : Facteur Schmidt quasi-normalisé dans la forme récursive :

$$S_{0,0} = 1 \quad \text{et} \quad g^{n,m} = S_{n,m} g_n^m$$

$$S_{n,0} = S_{n-1,0} \left(\frac{2n-1}{n} \right) \quad h^{n,m} = S_{n,m} h_n^m$$

$$S_{n,m} = S_{n,m-1} \sqrt{\frac{(n-m+1)(\partial_m^l + 1)}{n+m}}$$

Avec ∂_m^l : delta de Kronecker défini tel que $\partial_m^l = 1$ si $l = m$ sinon $\partial_m^l = 0$ si $l \neq m$.

$P_n^m(\theta)$ et $\frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta}$: coefficients de Gauss normalisés et dérivés avec Legendre :

$$P^{0,0} = 1 \quad \text{et} \quad \frac{\partial P^{0,0}}{\partial \theta} = 0$$

$$P^{n,n} = \sin \theta P^{n-1,n-1} \quad \frac{\partial P^{n,n}}{\partial \theta} = \sin \theta \frac{\partial P^{n-1,n-1}}{\partial \theta} + \cos \theta P^{n-1,n-1}, n \geq 1$$

$$P^{n,m} = \cos \theta P^{n-1,m} - K^{n,m} P^{n-2,m} \quad \frac{\partial P^{n,m}}{\partial \theta} = \sin \theta \frac{\partial P^{n-1,m}}{\partial \theta} + \sin \theta P^{n-1,m} - K^{n,m} \frac{\partial P^{n-2,m}}{\partial \theta}$$

Où le coefficient K est donné par :

$$K^{n,m} = 0, n=1 \quad \text{et} \quad K^{n,m} = \frac{(n-1)^2 - m^2}{(2n-1)(2n-3)}, n > 1$$

Variables :

a : rayon de référence de la terre (6371.2km)

Θ, r et Φ : coordonnées géocentriques (r le rayon [km], Θ la co-latitude (90° -latitude) [$^\circ$] et Φ la longitude [$^\circ$])

n : degrés du facteur Schmidt quasi-normalisé

m : ordre du facteur Schmidt quasi-normalisé

Ajout d'erreurs

Comme pour les capteurs précédents, il faut maintenant ajouter diverses erreurs au magnétomètre pour simuler le comportement d'un capteur réel.

3.3. Choix des erreurs

Pour simuler au mieux les capteurs réels, il convient d'ajouter aux différentes valeurs calculées diverses erreurs. Ces erreurs sont les suivantes :

- Bruits des différents capteurs aléatoires, blancs et gaussiens.
- Biais pour chaque capteur (erreurs fixes dans le temps).

Un bruit blanc est une réalisation d'un processus aléatoire dans lequel la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences de la bande passante. Le bruit blanc gaussien est un bruit blanc qui suit une loi normale de moyenne et variance données. Des générateurs de signaux aléatoires (« signal de bruit ») sont utilisés pour des essais de dispositifs de transmission et, à faible niveau, pour l'amélioration des systèmes numériques. Dans notre cas, l'étude consiste à mesurer l'influence du bruit sans le filtrer.

La valeur des différentes erreurs provient de la constitution de chaque capteur. Si on prend comme exemple pour des valeurs réelles le capteur de type MEMS MAG, ce dernier possède les caractéristiques d'une IMU 9 DOF, le tout de dimension faible ($18 \times 18 \times 12$ mm). Les caractéristiques des trois capteurs sont données aux tableaux 2, 3 et 4.

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 2 g$
Bande passante	0 - 50 Hz
Précision	$< 4 \mu g$
Bruit (X et Z)	$92 \mu g / \sqrt{Hz}$
Bruit (Y)	$110 \mu g / \sqrt{Hz}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 2 : Caractéristiques accéléromètre capteur MAG³ de MEMsense

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 150 \text{ }^\circ/\text{s}$
Dérive	$< 0.01 \text{ }^\circ/\text{h}$
Bande passante	0 - 50 Hz
Densité de bruit	$0.1 \text{ }^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 3 : Caractéristiques gyromètre du capteur MAG³ de MEMsense

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 1.9 \text{ Gauss}$
Bande passante	0 - 50 Hz
Densité de bruit	$0.14 \text{ mGauss}/\sqrt{\text{Hz}}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 4 : Caractéristique magnétomètre du capteur MAG³ de MEMsense

4. Développement du simulateur : partie pratique

Les différentes parties du programme Labview® final du simulateur IMU suivent le plan suivant.

4.1. Programme de contrôle général (Main)

But du programme Main

Le programme de contrôle général (communément appelé « main ») permet de gérer les différents programmes et sous-programmes.

Ce contrôle permet :

- D'exécuter les différents programmes suivant un ordre précis ; par exemple, convertir les coordonnées avant de calculer les accélérations, etc.
- De dispatcher les données à chaque programme ; par exemple, envoyer les coordonnées format LLA à la conversion, les coordonnées converties à l'accéléromètre, etc.
- D'activer ou non l'ajout d'erreurs : l'utilisateur peut activer ou non les erreurs à la sortie des capteurs.
- De choisir le modèle du magnétomètre : IRGF ou WMM.
- De choisir la fréquence de sortie : si l'utilisateur souhaite une fréquence de sortie supérieure à la fréquence d'entrée, le programme principal va boucler les valeurs de sorties pour générer diverses valeurs.

Entrée programme Main

Pour ce faire, le programme principal prend en entrée :

- La position du mobile en format LLA.
- Le fichier avec les coefficients WMM (toutes années confondues).
- Le fichier avec les coefficients IGRF (toutes années confondues).
- Le temps entre deux données.
- La date des données de positionnement.
- Les angles d'Euler initiaux.
- Une information pour connaître le choix de l'utilisateur sur l'activation ou non des erreurs sur les capteurs, ainsi que leurs valeurs.
- Une information pour connaître le choix de l'utilisateur sur le modèle du magnétomètre voulu (IRGF, WMM ou automatique).
- La fréquence d'entrée et de sortie des données.

Sortie programme Main

En sortie du programme main, on retrouve :

Les valeurs (avec erreurs ou non) des trois capteurs de l'IMU (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre) avec leurs unités respectives.

4.2. Programme d'extraction coefficients WMM et IGRF

But du programme d'extraction

Le programme d'extraction des coefficients WMM et IGRF permet d'extraire des fichiers textes correspondants aux valeurs des coefficients de l'année voulue. Ils sont sauvegardés dans diverses variables pour être utilisés par le magnétomètre tout au long du cycle. L'intérêt d'extraire les données une seule fois permet de gagner du temps et de la puissance pour le programme.

Entrée programme d'extraction

Pour ce faire, le programme d'extraction des coefficients prend en entrée :

- Le fichier texte avec les valeurs pour chaque année (1900-2015 pour le modèle IGRF et 2000-2015 pour le modèle WMM).
- L'année voulue.

Sortie programme d'extraction

Le programme renvoie dans diverses variables les coefficients extraits pour chaque modèle suivant l'année en entrée.

4.3. Programme de conversion des coordonnées

But du programme de conversion

Le programme de conversion des coordonnées permet le passage des coordonnées LLA en coordonnées cartésiennes (ECEF) dans le référentiel fixe. L'appel de ce programme se fait à chaque nouvelle position en entrée pour permettre des calculs avec le bon format et référentiel des différentes positions.

Entrée programme de conversion

Pour convertir les données, le programme de conversion prend en entrée la position du mobile, en format LLA (Latitude [°] ; Longitude [°] et Altitude [m]) suivant la norme WGS84.

Sortie programme de conversion

En sortie, le programme de conversion fournit la position du mobile en format cartésien (x,y,z) avec comme unité le mètre.

4.4. Programme de simulation accéléromètre***But du programme simulation accéléromètre***

Le but du programme de simulation accéléromètre est de simuler le signal d'un accéléromètre « parfait ». En effet, il calcule l'accélération du mobile dans son référentiel propre sans compter les erreurs du capteur réel.

Entrée programme simulation accéléromètre

Pour calculer l'accélération du mobile dans son référentiel, le programme prend en entrée deux types de données :

- La position du mobile : en format cartésien (sortie du programme de conversion) avec le temps entre deux mesures (position [m] et temps [s])
- Les angles du gyromètre : les angles du gyromètre [rad] vont permettre le passage de l'accélération du repère fixe (ECEF) vers le repère.

Sortie programme simulation accéléromètre

En sortie de l'accéléromètre, on retrouve l'accélération du mobile dans son repère relatif [m/s²].

4.5. Programme de simulation gyromètre***But programme de simulation gyromètre***

Le programme de simulation du gyromètre permet de simuler le comportement d'un gyromètre « parfait » ; les erreurs sont rajoutées ultérieurement.

Entrée programme de simulation gyromètre

En entrée, le programme de simulation du gyromètre prend la position du mobile (sortie du programme de conversion) en mètre.

Sortie programme de simulation gyromètre

En sortie, le programme renvoie les données de variation de vitesse angulaire en rad/s. Ces données se limitent aux variations de tangage (axe y) et de lacet (axe z).

En effet, il est impossible de définir une rotation du mobile sur lui-même avec des données GPS classiques. La valeur du roulis (axe x) est donc nulle.

4.6. Programme de simulation magnétomètre modèle WMM

But du programme de simulation magnétomètre WMM

Le magnétomètre WMM permet de simuler le champ magnétique d'un point quelconque sur la terre. Ce champ magnétique est basé sur le modèle mathématique WMM.

Entrée du programme de simulation magnétomètre WMM

Pour ce faire, le simulateur du magnétomètre WMM prend en entrée :

- Les coefficients WMM de l'année voulue (2000 à 2015)
- La position du mobile en formant LLA (Latitude [°], Longitude [°] et Altitude [m])

Sortie du programme de simulation magnétomètre WMM

En sortie, le magnétomètre fournit les valeurs du champ magnétique suivant les trois axes (x,y,z) en nano-tesla. Cette valeur est en format d'un simple point ou sous forme de vecteur (différence entre le point au temps t et t-1), les limites du simulateur étant les mêmes que les limites du modèle WMM.

4.7. Programme de simulation magnétomètre modèle IGRF

Comme pour le programme de simulation magnétomètre WMM, la simulation du magnétomètre IGRF reprend la même logique, mais avec les coefficients propres au modèle IGRF.

4.8. Programme d'ajout d'erreurs

But du programme d'ajout d'erreurs

Le programme d'ajout d'erreurs permet de simuler les erreurs de capteurs réels sur base des informations demandées par l'utilisateur.

Entrée du programme d'ajout d'erreurs

Le programme d'ajout d'erreurs prend en entrée les valeurs suivantes :

- Valeurs calculées pour chaque axe de chaque capteur (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre).
- Valeurs d'erreurs : minimum et maximum du capteur, dérive et amplitude du bruit blanc gaussien.

Sortie du programme d'ajout d'erreurs

En sortie du programme, on retrouve la valeur d'entrée de chaque capteur ajoutée de leurs erreurs respectives. Ces erreurs sont calculées suivant les formules ci-dessous :

- $Si x < min \rightarrow x = min$
- $Si x > max \rightarrow x = max$
- $x' = x + dérive + amplitude \times erreur\ gaussienne$

Avec :

- x : valeur du capteur en entrée
- x' : valeur du capteur en sortie
- min : valeur que le capteur peut mesurer au minimum
- max : valeur que le capteur peut mesurer au maximum
- $dérive$: erreur constante dans le temps (par exemple accélération gravité sur l'accéléromètre)
- $amplitude$: valeur définie par l'utilisateur pour l'amplitude de l'erreur gaussienne
- $Erreur\ gaussienne$: bruit de gauss généré aléatoirement par Labview®.

4.9. Programme de génération valeurs

But du programme de génération valeurs

Comme demandé dans les spécifications, les capteurs de la centrale IMU doivent en sortie pouvoir générer des données suivant une fréquence supérieure ou égale à la fréquence en entrée. Pour ce faire, la même valeur calculée doit fournir plusieurs valeurs en sortie.

Entrée du programme de génération valeurs

Le programme génération de valeurs nécessite diverses informations :

- La valeur de sortie du capteur
- La fréquence des valeurs en entrée
- La fréquence des valeurs en sortie
- La sensibilité des valeurs à générer : cette valeur représente l'amplitude voulue des valeurs de sorties
-

Sortie du programme de génération valeurs

En sortie du programme, on retrouve la valeur en entrée suivant la fréquence voulue. Le calcul est le suivant :

$$x' = x + sensibilité \times valeur\ random$$

Avec :

- x' : Valeur de capteur en sortie
- x : Valeur de capteur en entrée
- $sensibilité$: valeur choisie par l'utilisateur
- $valeur\ random$: valeur générée aléatoirement entre -1 et 1

5. Gestionnaire de scénario

Le gestionnaire de scénario permet de paramétrer et contrôler les différents simulateurs. Le fonctionnement des différents simulateurs se déroule suivant les étapes suivantes.

5.1. Choix du/des simulateurs

Le gestionnaire de scénario peut travailler avec un ou plusieurs simulateurs. L'activation ou non d'un simulateur se fait au début du cycle. Un simulateur ne peut être activé pendant un cycle.

5.2. Définition des paramètres

Chaque simulateur possède ses propres paramètres, repris ci-dessous.

Paramètres IMU

Pour le simulateur de centrale inertielle, les différents paramètres sont ceux développés précédemment (fréquence d'entrée, fréquence de sortie, angles d'Euler initiaux, paramètres d'erreurs, etc.)

Choix différentes valeurs

Pour configurer la simulation, il faut définir certains paramètres d'entrée :

- Date de la simulation
- Durée de la simulation
- Vitesse de la simulation
- Choix des constellations activées
- Fichier des constellations activées
- Fichier trajectoire

Formation des trames

Une fois un paramètre défini, il faut le compiler en format lisible. Pour ce faire, une partie du gestionnaire de scénario a été programmée, ce qui permet de compiler chaque paramètre au bon format.

Connexion

Une fois l'envoi, la réception la lecture, des différentes trames, il convient de fermer la connexion. Le système complet est repris dans la figure 4.

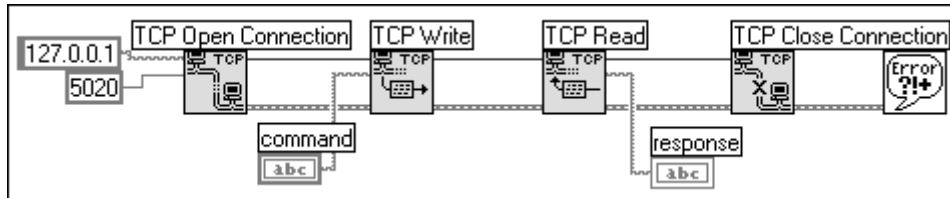


Figure 4 : TCP/IP

Lancement de la simulation

Une fois les différents paramètres et fichiers définis aux points précédents, la simulation peut se lancer. Pour se faire, chaque simulateur possède son lancement.

Exécution simulateur IMU

La simulation de la centrale inertielle fonctionne suivant les étapes suivantes :

- Calcul des variations angulaires et des vitesses angulaires (gyromètre)
- Calcul des accélérations en utilisant les coordonnées ECEF et les angles de l'étape 1 (accéléromètre)
- Calcul du champ magnétique (magnétomètre)
- Enregistrement des données dans un fichier texte (tableau 5).

Heure [hhmmss.ss]	Latitude [°]
Longitude [°]	Hauteur [m]
Position ECEF axe x [m]	Position ECEF axe y [m]
Position ECEF axe z [m]	Accélération axe x [m/s ²]
Accélération axe y [m/s ²]	Accélération axe z [m/s ²]
Variation vitesse angulaire axe x [°/s]	Variation vitesse angulaire axe y [°/s]
Variation vitesse angulaire axe z [°/s]	Champ magnétique axe x [nT]
Champ magnétique axe y [nT]	Champ magnétique axe z [nT]
Variation champ magnétique axe x [nT]	Variation champ magnétique axe x [nT]
Variation champ magnétique axe x [nT]	

Tableau 5 : Données issues de l'exécution du simulateur IMU

6. Validation et conclusion

6.1. Validation intermédiaire

La validation intermédiaire regroupe toutes les validations individuelles réalisées lors du développement du simulateur étapes par étapes. L'intérêt de procéder de telle façon permet un suivi des tests et des limites de chaque programme et sous-programme. Cette dernière se présente comme suit :

- Titre du programme ou sous-programme
- Descriptif du programme ou sous-programme

- Données en entrée
- Données en sortie
- Procédure des tests et formules
- Valeurs obtenues
- Conclusion

6.2. Validation globale

La validation globale permet de vérifier le bon fonctionnement du programme total et des différentes interactions entre chaque sous-programme. Pour ce faire, un plan de validation basé sur les spécifications, a été mis en place. Si on reprend les spécifications, on a les points principaux suivants :

- Simulation d'une centrale inertielle 9 DOF
- Simulation d'une centrale inertielle 9 DOF bruitée
- Pilotage en minimum 50hz
- Fonctionnement en minimum 100hz
- Fonctionnement centrale inertielle 9 DOF simulé avec une synchronisation inférieur à 0.02s

La simulation d'une centrale inertielle non bruitée permet de vérifier si les données générées permettent de calculer une position semblable à la position en entrée. Pour pouvoir vérifier le bon fonctionnement de la centrale inertielle, les données générées ont été utilisées pour calculer une position (figure 5).

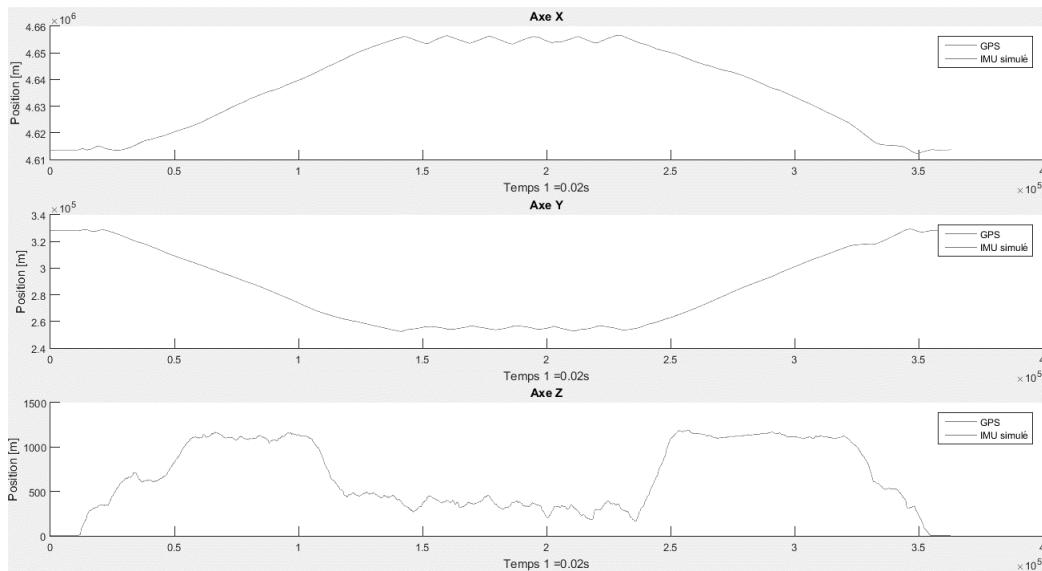


Figure 5 : Position non bruitée

Centrale inertielle non bruitée

Comme on peut l'observer, aucune différence visible n'apparaît sur les différents graphiques. La différence de position entre les données en entrée et les données calculées en sortie est de l'ordre du 10^{-9} mètre. Cette différence étant négligeable, le simulateur 9 DOF sans erreur est validé.

Centrale inertielle bruitée

La simulation d'une centrale inertielle 9 DOF bruitée doit reproduire les différents signaux d'une centrale inertielle ajoutée de bruit aléatoire Gaussien. La position calculée sur de telles données doit dériver dans le temps (les erreurs d'une centrale inertielle réelle augmentant avec le temps).

Comme pour le simulateur 9 DOF sans bruit, les données de sorties sont retransformées en trajectoires pour pouvoir être comparées avec les entrées (figure 6).

Pilotage en minimum 50hz

Lors des différents tests et génération de valeurs, le système a été piloté à son maximum pour un gain de temps. Ce maximum a comme valeur 1000Hz, ce qui valide le minimum de 50 Hz.

Fonctionnement en minimum 100hz

Comme pour le pilotage, le fonctionnement lors des tests a été poussé à son maximum qui correspond aussi à 1000 Hz ; la valeur de fonctionnement minimum de 100 Hz est donc validée.

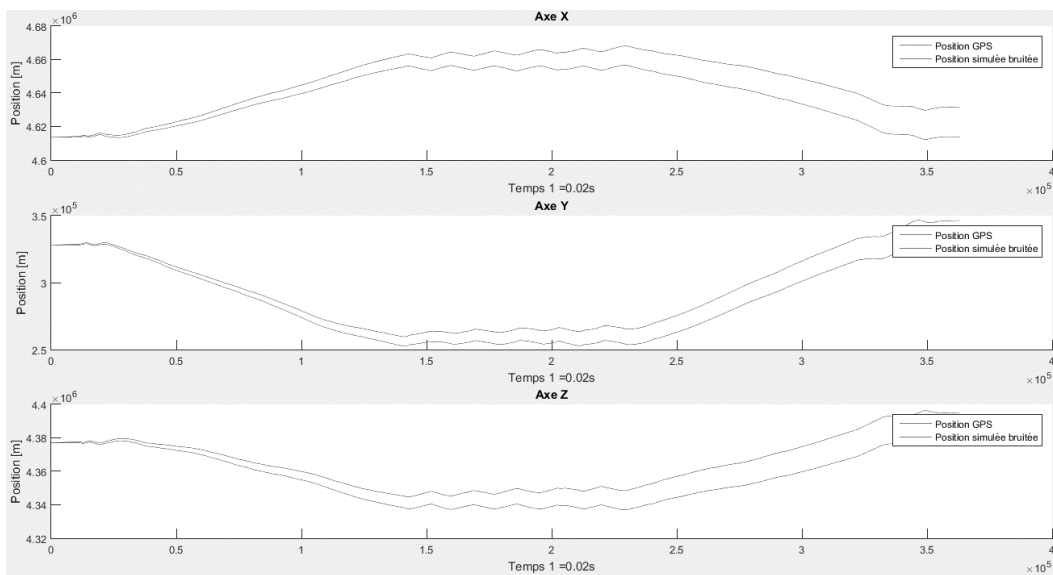


Figure 6 : Position bruitée

7. Sources

- [1] VAN DE VYVERE, L., *Détection des sauts de cycles en mode multifréquence pour le système Galileo*, Mémoire de master, Liège, Belgique : Université de Liège, juin 2015.
Adresse URL : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/184238>
- [2] DEPRIEST, D., (consulté le 3 mars 2016), *NMEA data*.
Adresse URL : www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm
- [3] FEATHERSTONE, W. E.; CLAESSENS, S. J., *Closed-Form Transformation between Geodetic and Ellipsoidal Coordinates*
Stud. Geophys. Geod., 52 (1), 2008, pp. 1-18.
- [4] KWON, Y.-H., (consulté le 14 février 2016), *Orientation Angles*.
Adresse URL : www.kwon3d.com/theory/euler/euler_angles.html
- [5] NOAA, (consulté le 26 février 2016), *NCEI Geomagnetic Calculators*.
Adresse URL : www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/?model=igrf#igrfwmm
- [6] WERTZ J. R., *Spacecraft Attitude: Determination and Control*
Dordrecht, Pays-Bas, D. Reidel Publishing Company, 1978, 858 p.

Récupération de tantale et d'étain d'un minerai namibien par une table densimétrique à air

Ing. J-A. GÉRÔME
Ir C. CHARLIER
GRAMME – Liège

Le métal étudié dans ce travail est le tantale. Il est intéressant pour sa haute résistance à la température, sa capacité à résister à la corrosion et sa grande permittivité. Ce matériau se trouve sur terre en très faibles concentrations. Ce travail vise à enrichir la concentration de tantale via une séparation gravimétrique par voie sèche. Les conclusions se porteront sur l'utilisation possible ou non de cette méthode dans l'exploitation de gisements en Namibie.

Mots clés : tantale, niobium, étain, concentration, séparation sèche, Namibie, enrichissement.

The metal studied in this work is tantalum. It is interesting for its high temperature resistance, its strong resistance against corrosion and its high permittivity. This material is found on earth at very low concentration. This work aims at enriching the concentration of tantalum via a dry gravimetric separation. The conclusions will contain the possible use of this method in the exploitation of deposits in Namibia.

Key words: tantalum, niobium, tin concentration, dry separation, Namibia, enrichment.

1. Introduction

1.1. Présentation de la société et localisation de la mine

Dauremas Mineral Development (DMD) est une petite société basée à Windhoek (Namibie) qui possède plusieurs licences d'exploration minière. Cette société est intéressée par deux minéraux, à savoir le tantale et l'étain. Jusqu'à présent un important travail a été réalisé sur un site appelé De Rust. Ce site est situé sur le côté nord de la plus haute montagne de Namibie appelé le Brandberg.

1.2. Situation de la société et but du travail

Tous les forages et les analyses nécessaires ont été réalisés. Le lit d'une rivière asséchée se situe à 700 mètres du site, l'eau est donc facilement accessible en la pompant. Tout le process, basé sur la disponibilité de l'eau, a été défini. Dauremas Mineral Development possède d'autres sites riches en tantale cependant pour ceux-ci l'eau n'est pas accessible et cela coûterait très cher de l'amener au site. Dans ce contexte DMD voudrait déterminer le meilleur procédé pour récupérer le tantale et l'étain sans utiliser d'eau.

Ainsi, une table de séparation densimétrique à air est un équipement qui peut être utilisé. Pour déterminer si ce type de table peut être employé efficacement, une table densimétrique de laboratoire est testée afin d'obtenir la meilleure récupération possible en cernant les meilleurs paramètres de fonctionnement, tout en déterminant la meilleure dimension des grains pour atteindre la plus haute concentration de tantale et d'étain. Les échantillons de minerai qui sont utilisés pour les tests proviennent du site De Rust, ils contiennent en moyenne 175 ppm de tantale et 410 ppm d'étain. Pour être vendu le tantale doit être séparé des minéraux légers pour obtenir un minerai avec une concentration en tantale de 300000 ppm (30%).

2. Tantale

2.1. Histoire

Dans le tableau périodique, le tantale (Ta) occupe la 73^{ième} position. Il a été découvert en Suède par un chimiste du nom d'Anders Gustaf Ekenberg. Beaucoup de scientifiques de cette période pensaient qu'Ekenberg n'avait pas trouvé un nouvel élément mais un allotrope du niobium. Le niobium a été découvert un an auparavant et c'est un élément chimique similaire au Tantale.

En 1809 un chimiste anglais, William Hyde Wollaston, compara le tantale et le niobium et conclut que même si les deux éléments avaient une densité différente, ils étaient identiques.

En 1844, Heinrich Rose détermina que les éléments avaient un état de valence différent, qui est +3 et +5 pour le niobium et seulement +5 pour le tantale. Il a aussi découvert que la tantalite était composée de niobium et d'un mélange de niobium et de tantale.

C'est finalement en 1866 que Marginaç mit au point le procédé pour séparer les deux éléments.

2.2. Propriétés

Le tantale est un métal rare très recherché qui a un très haut point de fusion (3017°C), une haute température d'ébullition (5458°C), il est très dur et a une très bonne résistance aux attaques chimiques en dessous de 150°C. Egalement ductile, gris-bleu et très bon conducteur de chaleur et d'électricité.

Le tantale peut être trouvé sous deux phases cristallines, alpha et beta.

La phase beta devient alpha à la température de 750-775°C. La majeure partie du tantale sur terre est sous la phase alpha.

2.3. Ressources

Le tantale présente de fort lien chimique avec le niobium et ils sont régulièrement trouvés ensemble sur terre. Le tantale et le niobium sont la plupart du temps liés avec l'oxygène et d'autres métaux tels que le Fer, le manganèse et l'étain, cela donne ainsi des oxydes pour former des tantalates, des niobates, des hydroxides, des silicates et des borates. Il y a 70 différentes compositions chimiques de minéraux de tantale sur terre. Les minerais les plus souvent minés sont la tantalite, la microlite et la wodginite. En Afrique le minerai de tantale que l'on peut trouver est le coltan qui est une abréviation de columbite-tantalite. C'est le minerai qui abordé dans ce travail.

Dans la plupart des cas la concentration en Ta₂O₅ estimé dans un minerai est comprise entre 0,01% (100 ppm) et 1% (10 000 ppm). La concentration moyenne dans les mines est plus proche des 100 ppm.

Concernant le gisement à De Rust en Namibie, des analyses ont été réalisées au centre *Terre et Pierre* de Tournai. Cela permet de dire que la gangue du minerai est principalement composée de Quartz (SiO₂) et d'albite (Na Al Si₃ O₈). La densité de la tantalite présente dans le minerai est l'une des plus importantes, entre 6,76 et 7,95 t/m³, ainsi que celle de la cassitérite (étain-SnO₂) avec une densité de 6,99 t/m³. Ces densités sont 2 fois plus grandes que la densité du Quartz qui est de 2,65 t/m³. Cette différence est très intéressante car c'est sur cette différence qu'est basée la séparation étudiée dans ce travail.

Une autre analyse réalisée par le CTP a révélé que le minerai doit être broyé à 250 µm pour que la plupart des minéraux recherchés (Columbite, Tantalite et Cassitérite) soient libérés des autres (Quartz, Albite, etc).

2.4. Ressources estimées

Le tableau suivant propose une revue des quantités connues de tantale dans le monde.

Source	Tons of tantalum	Percentage
South America	142500	40%
Australia	72500	21%
China and Southeast Asia	36500	10%
Russia and Middle East	34500	10%
Central Africa	31500	9%
Other Africa	23500	7%
North America	6000	2%
Europe	2500	1%
Total	349500	

Ressource probable de tantale. Source : TIC

Ces ressources de tantale (349500 tonnes) représentent 150 ans d'exploitation minière à la plus haute vitesse d'exploitation jamais enregistrée qui était de 2330 tonnes en 2001.

2.5. Domaines d'utilisation du tantale

Le tantale est utilisé dans beaucoup de domaines. La majorité du tantale est transformée dans l'industrie électronique pour environ 52% (condensateurs de petite taille), 21% est utilisé pour les superalliages, le traitement de surface utilise 11%, 10% pour les carbides et 6% est utilisé dans l'industrie chimique. Les avantages principaux du tantale sont sa haute température de fusion et sa haute résistance à la corrosion.

2.6. Prix du tantale

Le prix de référence du tantale est donné sous sa forme Ta₂O₅. Pour être vendable, le produit doit avoir une concentration de minimum 30% en poids de Ta₂O₅.

En 2000 il y a eu une forte augmentation du prix du tantale. Le prix a atteint le record de 695 EUR/kg. Entre 2005 et 2009 le prix du tantale obtenu lors des contrats était de 120 EUR/kg et de 80 EUR/kg sur le marché ouvert.

A présent le prix sur le marché ouvert est de l'ordre de 115 EUR/kg.

3. Procédé de séparation par gravitation

La séparation qui est testée dans ce travail entre les minéraux lourds recherchés (tantale ; niobium et étain) qui ont une haute masse spécifique comprise entre 6 et 7 t/m³ et les minéraux légers (Quartz, Albite and Mica) de faible masse spécifique comprise entre 2 et 3 t/m³ est basée sur la théorie d'Archimède.

3.1. Stratification

Le procédé de stratification s'appuie sur le mouvement de l'air. Afin d'obtenir ce phénomène, de l'air est insufflé par un ventilateur sur un mélange de différentes particules. En fonction de leur densité relative à l'air et aussi de la vitesse de l'air les particules vont soit s'élever soit chuter. Afin d'illustrer ce phénomène imaginons un mélange de deux particules différentes sur une table qui possède de minuscule trous et en dessous de celle-ci se trouve un ventilateur à l'arrêt.

Le ventilateur est alors mis en route et sa vitesse est contrôlée afin d'obtenir des couches différentes entre les particules lourdes qui restent sur la surface de la table et les particules légères qui se trouvent au-dessus et qui ne sont plus en contact avec la table. Ce phénomène est appelé stratification.

Le contrôle du débit d'air est très important pour le procédé de stratification. Il doit être maîtrisé. Si le débit d'air est trop faible les particules légères ne peuvent pas s'élever suffisamment et la séparation ne peut être faite. Dans l'autre cas si le débit d'air est trop important la plupart des particules s'élèvent et les matériaux sont remélangés.

La différence de densité entre les particules est la clé de la séparation, si cette différence n'est pas assez importante, la séparation est difficile à réaliser et la plus grande surface de table possible serait nécessaire. Plus la différence de densité est importante moins la surface de la table doit être importante.

Quand le phénomène de stratification est réalisé correctement, les particules les plus lourdes sont en contact avec la table et les particules légères sont au-dessus. Si la table présente une inclinaison et possède un système de vibration alors l'action de la vibration va permettre de faire avancer les particules lourdes en contact avec

la table vers le côté supérieur de la table. Pendant ce temps les particules légères vont tomber vers le côté inférieur de la table grâce à la gravité et l'inclinaison de la table. Le mouvement d'avancée est qualifié de séparation horizontale tandis que le phénomène de stratification est une séparation verticale. Sur le côté de la table se trouve des zones de déchargements afin de récupérer le lourd sur la partie haute de la table et le léger sur la partie basse. Entre les deux se trouvent les particules intermédiaires qui sont composés des grosses particules du léger et des petites particules du lourd.

Figure 4 represents a top view of the ideal situation in the operation of a gravity table.

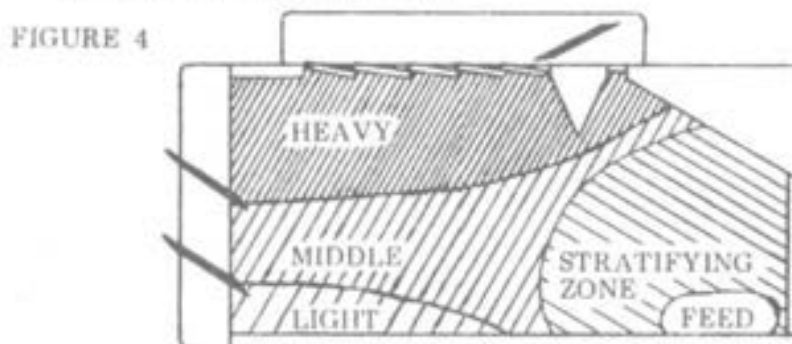


Figure 1 : Schéma d'une table densimétrique courante

La figure précédente est une représentation idéale de la répartition de la matière sur la table. En pratique, cette situation n'est pas aussi précise. La zone de stratification n'est pas aussi clairement définie mais elle doit se situer entre 0,6 et 1,8 m² en dessous de l'alimentateur. Cette surface de stratification dépend de la séparation à réaliser et du débit d'alimentation. Cette surface de doit pas dépasser 1/3 de la surface totale de la table. Le contrôle de cette surface ne peut être assuré que par observation, plus l'utilisateur sera expérimenté meilleur sera l'appréhension de cette surface.

La séparation horizontale induite par le mouvement vibratoire commence dès que la matière arrive sur la table, il est donc important que le phénomène de stratification soit réalisé le plus rapidement possible afin de ne pas retrouver des particules légères qui n'aurait pas eu le temps de s'élever de la fraction lourde. Afin d'avoir une stratification rapide la meilleure solution est d'utiliser un débit d'air plus grand à l'endroit d'alimentation de la matière plutôt qu'à l'endroit de déchargement se trouvant à la fin de la table.

Dans beaucoup de cas, il est difficile de faire la distinction entre la fraction lourde et la fraction légère. Pour vérifier que la séparation a été réalisée correctement, une

série de test est nécessaire en mesurant la densité des matériaux obtenus aux endroits de déchargement.

Aux déchargements se trouvent trois produits différents :

- la fraction lourde qui est généralement le produit désiré,
- la fraction légère qui est généralement le produit à éliminer,
- entre les deux il s'agit d'un mélange qui est composé de petites particules de lourd et de grosses particules de léger.

4. Méthode d'analyse

Pour mesurer la quantité de tantale et d'étain contenu dans le minerai avant et après traitement afin d'observer l'enrichissement du contenu, un instrument facile à utiliser est l'analyseur portable XRF. Les avantages de cet outil est qu'il peut être directement utilisé sur site, il est non destructeur et il permet de déterminer les éléments présents dans le minerai ainsi que leur concentration en mesurant du rayonnement fluorescent Xray émit par les éléments excités. C'est une analyse quantitative et qualitative.

Le bombardement induit une ionisation des métaux du minerai. Les atomes sont excités et des électrons sont éjectés sous forme de photons. Vu le déficit en électrons sur les couches inférieures, l'atome devient un ion plutôt instable. Afin de retrouver sa stabilité, des électrons des couches supérieures vont changer d'orbite et remplir les trous créés. A cause de cette transition une énergie est émise sous forme de radiation. C'est cette énergie qui est mesurée.

La taille idéale des grains doit être inférieure à 50 μm afin de réaliser une bonne analyse avec le XRF.

5. Préparation des échantillons

Les échantillons proviennent de la mine « De Rust ». Pour les tests 3 tailles de grains différentes ont dû être tamisées pour obtenir une fraction entre 1 mm et 500 μm , une autre entre 500 μm et 300 μm et la dernière en dessous de 300 μm . Le but est de trouver la meilleure taille pour la séparation.

6. Présentation de la table densimétrique à air

6.1. Présentation de la table

Sur la plupart des tables densimétrique, les différentes matières quittent la table du même côté mais à des niveaux différents. Pour rappel la figure précédente met en évidence (points 1 et 2) les différentes sorties de la matière. Toute la matière quitte la table du côté gauche.

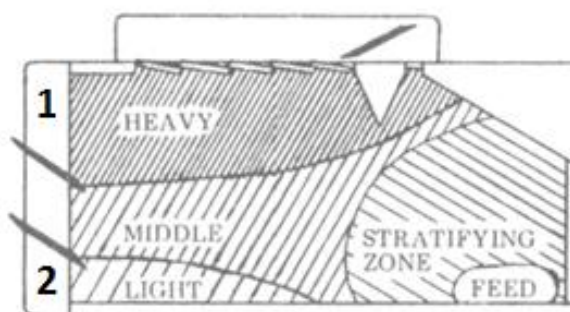


Figure 2 : Schéma d'une table densimétrique courante

Contrairement aux tables densimétriques courantes, sur la table utilisée lors de ce travail, les particules légères quittent la table d'un côté de la table tandis que les particules lourdes la quittent de l'autre côté. Il n'y a pas de sortie pour le produit mélangé. La table possède trois paramètres différents : le débit d'air, la vitesse de vibration et l'inclinaison de la table. Cette table a été choisie pour réaliser les tests car son prix était très compétitif par rapport à d'autres fabricants.

Débit d'air

L'air, dont le débit a été indiqué comme le paramètre le plus important, qui est utilisé pour permettre la fluidisation de la matière est soufflé par un ventilateur situé sous la table. Le ventilateur est équipé d'un variateur de fréquence afin d'ajuster l'intensité du débit, ce paramètre varie de 1845 à 6000 sur le variateur.

Vitesse de vibration

Le mouvement de vibration est réalisé grâce à un excentrique.

À une vitesse trop élevée le mouvement induira un mouvement de toute la matière vers la sortie plutôt dédiée au produit lourd tandis qu'une vitesse trop faible induira un mouvement de toute la matière vers la sortie dédiée au léger. Ce paramètre varie entre 1200 tr/min et 1800 tr/min. Durant les tests ce paramètre a été limité à 1600 tr/min dû à la forte vibration engendrée sur le sol du bâtiment.

Inclinaison

Sur cette table l'inclinaison varie entre 8° et 12° et se modifie manuellement. Une trop forte inclinaison engendre le mouvement de toute la matière vers le déchargement de la fraction légère tandis qu'une trop faible inclinaison engendre le mouvement de toute la matière vers le déchargement de la fraction lourde.

6.2. Alimentateur

L'alimentation est contrôlée par une vis sans fin qui est commandée par une commande externe. Afin de déterminer les meilleurs paramètres, les tests doivent être réalisés au débit minimum de 50 kg/h. Sur site, une fois ces paramètres définis, le débit est augmenté jusqu'à la production recherchée. Cette augmentation de débit engendre une perte d'efficacité, il faut alors choisir un bon compromis entre production et efficacité.

7. Plan des tests

Selon la méthode Taguchi de planification, nous avons trois facteurs différents avec le même nombre de niveaux, c'est-à-dire :

- La vitesse de vibration à trois niveaux : 1200, 1400 et 1600 tr/min.
- Le débit d'air à trois niveaux : 1845, 4000 et 6000. Ces niveaux ont été déterminés afin de limiter le nombre de tests et seront ajustés en fonction des observations obtenues durant les tests.
- L'inclinaison de la table à trois niveaux : 8° , 10° et 12° .

Le tableau orthogonal suivant est utilisé pour couvrir toutes les paires de combinaisons possibles. Au lieu de $3*3*3=27$ tests seulement neuf tests sont réalisés pour les trois dimensions de grain.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration
1	8°	1845	1200
2	8°	4000	1400
3	8°	6000	1600
4	10°	1845	1400
5	10°	4000	1600
6	10°	6000	1200
7	12°	1845	1600
8	12°	4000	1200
9	12°	6000	1400

8. Test sur la dimension de grain fin ($0 < x < 300\mu\text{m}$)

8.1. Plan des tests et données mesurées

Pendant le test numéro 2 (8°, 4000, 1400 tr/min du précédent tableau), toute la matière semblait partir par la sortie d'air. Les niveaux de débit d'air ont donc été ajustés. Le tableau reste le même pour les colonnes facteur 1 et facteur 3 mais pour le facteur 2, il faut remplacer 4000 par 2400 et 6000 par 3000.

Avant chaque test et sur chaque lot de matière, un échantillon est obtenu grâce à un diviseur échantillonneur et analysé par XRF.

Les résultats seront présentés selon les données recueillies suivantes :

- Concentration de tantale dans la fraction lourde en partie par million (ppm).
- Pourcentage en poids de la matière récupérée dans la fraction lourde sur la matière introduite au total.
- Pourcentage en poids du tantale récupéré dans la fraction lourde sur la quantité totale mesurée de tantale introduite au total.
- Un ratio entre ces 2 pourcentages pour mettre en évidence l'obtention du plus de tantale possible en poids dans le moins de matière possible. Ce ratio est bien sûr lié à la concentration.

$$\text{Ratio} = \frac{\% \text{ en poids de tantale récupéré dans la fraction lourde}}{\% \text{ en poids de matière récupéré dans la fraction lourde}}$$

Ce ratio doit être le plus grand possible et permettra de déterminer le meilleur test réalisé.

8.2. Tableau des résultats

Tests	Conc. en tantale (ppm)	Quantité de matière introduite sur la table (kg)	Quantité de tantale introduit sur la table (g)	Concentration en tantale dans la fraction lourde (ppm)	% poids de matière récupérée dans la fraction lourde	% poids de tantale récupéré dans la fraction lourde	Ratio (% poids Ta/% poids de matière)
1	201	42,80	8,60	187	24,24	22,55	93,03
2	151	7,27	1,10	131	34,81	30,20	86,75
3	159	9,17	1,46	103	22,95	14,86	64,78
4	181	21,07	3,81	192	91,17	96,71	106,08
5	166	16,07	2,67	171	89,76	92,47	103,01
6	181	20,15	3,65	367	2,02	4,11	202,76
7	161	8,49	1,37	151	87,20	81,78	93,79
8	192	18,99	3,65	235	12,22	14,95	122,40
9	171	14,04	2,40	176	28,04	28,86	102,92

8.3. Analyse des neuf premiers tests

Le meilleur résultat est obtenu pour le test numéro 6, le ratio est le plus élevé (202,76) de même que la concentration de tantale (367 ppm). La concentration en tantale est deux fois plus élevée que l'initiale cependant celle-ci reste très faible et fort loin de la concentration recherchée pour vendre le produit qui est de 300000 ppm. De plus seulement 4% du tantale en poids est récupéré.

Selon la méthode Taguchi, il est possible de déterminer les meilleurs paramètres. Le ratio pondéral est le paramètre le plus important car il traduit une grande quantité de tantale dans le moins de matière possible. Le minéral le plus recherché pour ce travail est le tantale, les résultats obtenus pour l'étain et le niobium suivent ceux obtenus pour le tantale et sont présentés dans la conclusion du travail pour le meilleur test obtenu. Pour cette raison la manipulation des résultats est réalisée en fonction du ratio obtenu dans la fraction lourde. Le tableau suivant résume les résultats des ratios obtenus pour les différents tests.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Résultat
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	Ratio du % poids fraction lourde
1	8°	1845	1200	93,03
2	8°	2400	1400	86,75
3	8°	3000	1600	64,78
4	10°	1845	1400	106,80

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Résultat
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	Ratio du % poids fraction lourde
5	10°	2400	1600	103,01
6	10°	3000	1200	202,76
7	12°	1845	1600	93,79
8	12°	2400	1200	122,40
9	12°	3000	1400	102,92

Grâce à ces résultats, la première analyse qui peut être réalisée est de calculer la moyenne des résultats pour chaque facteur en fonction de son niveau.

Moyenne du ratio du % poids fraction lourde			
Facteurs	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration
Niveau 1	81,52	97,63	139,40
Niveau 2	137,28	104,05	98,59
Niveau 3	106,37	123,49	87,19

Par exemple la cellule qui est surlignée en gris est calculée suivant la formule suivante et en utilisant les données surlignées en gris dans la colonne résultat du le tableau précédent :

$$\frac{86,75 + 103,01 + 122,40}{3} = 104,05$$

Ces résultats ont été obtenus en paramétrant le débit d'air à son niveau 2 (2400 surligné en gris colonne débit d'air)

La même moyenne est réalisée pour chaque facteur à chaque niveau différent pour remplir le tableau. Ce tableau peut être transformé en graphique (figure 3) pour être plus facilement interprété.

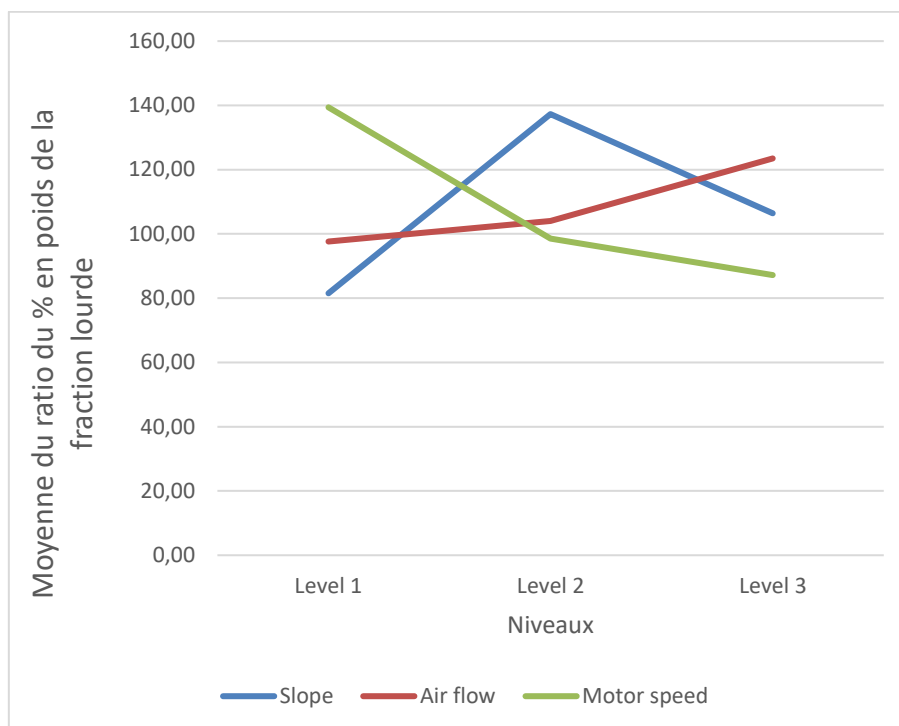


Figure 3 : Évolution du ratio du pourcentage en poids en fonction des niveaux pour chaque facteur

Chaque courbe est indépendante et doit être traitée comme telle.

La meilleure inclinaison semble être à 10°, le meilleur débit d'air au niveau 3 (3000) et la vitesse de vibration à 1200 tr/min (niveau 1).

Selon la méthode Taguchi, le meilleur résultat doit être obtenu en utilisant ces paramètres là (10°, 3000, 1200 tr/min). Le test numéro 6 a été réalisé selon ces paramètres.

Le débit d'air maximum avait été fixé à 3000 étant donné que toute la matière semblait sortir par la cheminée d'extraction de la table. Étant donné les résultats obtenus sur le graphique qui révèlent que plus le débit d'air est important meilleur est le résultat obtenu, quatre tests supplémentaires sont réalisés afin de valider la méthode à des débits d'air correspondants aux valeurs de 4500 et 6000.

8.4. Tests supplémentaires pour la dimension de grain fin

Pour ces tests, l'inclinaison de la table, étant celle où les meilleurs résultats sont obtenus, est de 10°.

La vitesse de vibration de 1200 tr/min a permis d'obtenir le meilleur ratio (202,76) et la meilleure concentration en tantale (367 ppm) au test numéro 6 cependant seulement 4.11% en poids de tantale a été récupéré. Afin d'essayer d'obtenir un meilleur pourcentage de récupération dans la fraction lourde, deux tests supplémentaires sont réalisés à 1400 tr/min et 1600 tr/min. Ces deux tests permettront de valider ou non la méthode Taguchi concernant la meilleure vitesse de vibration qui serait de 1200 tr/min.

Si le meilleur résultat obtenu est à une vitesse de vibration de 1400 tr/min, un test final sera réalisé à 1200 tr/min et au meilleur paramètre de débit d'air obtenu.

En résumé, les tableaux suivants présentent les tests supplémentaires et les résultats obtenus.

Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration
10	10°	4500	1400
11	10°	6000	1600
12	10°	4500	1600
13	10°	6000	1400

T	Conc. initial en tantale (ppm)	Quantité de matière introduite sur la table (kg)	Quantité de tantale introduit sur la table (g)	Conc. en tantale dans la fraction lourde (ppm)	% poids matière récupérée fraction lourde	% poids tantale récupérée fraction lourde	Ratio (%poids Ta/% poids matière)
10	188	8,07	1,52	271	4,56	6,57	144,15
11	188	7,28	1,37	764	1,19	4,85	406,38
12	188	7,16	1,35	168	7,96	7,11	89,36
13	188	7,46	1,40	578	1,03	3,17	307,45

Ces résultats sont concluants, le ratio et la concentration de tantale obtenus augmente de 367 ppm (résultat obtenu au test numéro 6) à 578 ppm pour le test numéro 13 et plus du double pour le test numéro 11 qui atteint une concentration de tantale dans la fraction lourde de 764 ppm.

Le ratio suit aussi les mêmes conclusions pour augmenter de 202,76 à 406,38 au test numéro 11. Ce ratio est le plus important car il permet de comparer les tests étant donné que la concentration initiale de tantale n'est pas la même pour tous les tests. Il est aussi très important car il met en évidence l'objectif principal qui est de récupérer le plus de tantale dans le moins de matière possible.

8.5. Validation des analyses XRF par comparaison des densités

Le test consiste à comparer le poids des matières récupérées dans la fraction lourde au poids des matières récupérées dans la fraction légère. Afin de réaliser ce test, un tube gradué est utilisé pour mesurer le même volume de matière à l'aide d'une balance précise au centième près.

Le test est réalisé pour les matières obtenues au test numéro 11.

Le poids de la matière légère est de 12,58 g pour 10 ml et le poids de la fraction lourde est de 14,44 g pour le même volume. Le poids de la fraction lourde est 15% plus grande que la fraction légère ce qui confirme les résultats obtenu avec le XRF qui est que les particules les plus lourdes (Tantale, niobium et étain) sont dans la partie lourde en plus grande concentration.

8.6. Analyses des résultats des tests supplémentaires pour la dimension de grain fin

Ces résultats confirment en partie la théorie de la méthode Taguchi. L'augmentation du débit d'air à 6000 permet d'augmenter la concentration de tantale et le ratio pour deux tests (11 et 13).

Cependant une augmentation du débit d'air à 4500 a diminué le ratio de 202,67 pour le test 6 à 114,15 pour le test numéro 10 et 89,36 pour le test numéro 12. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que pour le test numéro 6 le débit d'air réglé à 3000 et la vitesse de vibration à 1200 tr/min engendrent seulement le mouvement des très lourdes particules dans la fraction lourde et donc seulement 2,02% en poids de la matière introduite sur la table sont récupérés dans la fraction lourde. Tandis que les tests réalisés à 1400 tr/min (10 et 12) à un débit d'air plus élevé permettent d'obtenir une meilleure fluidisation de la matière mais qui n'est pas suffisante et qui est masquée par le fait qu'une plus haute vitesse de vibration induit que plus de matière arrive dans la fraction lourde pour atteindre 4,56% en poids pour le test 10 et 7,96% en poids de matière récupérée pour le test 12 ce qui dilue la concentration en tantale.

Le meilleur résultat obtenu à un débit d'air de 6000 peut être expliqué par le fait que la fluidisation de la matière est nettement meilleure que les tests réalisés à un débit d'air de 3000 et 4500 mais une grande partie des particules légères sort par la bouche de sortie d'air de la table. Il est connu que plus la vitesse de vibration est importante plus la quantité de matière récupérée dans la fraction lourde est importante et cette matière est principalement constituée de particules lourdes (Tantale, niobium et étain). C'est pour cette raison qu'il y a un peu plus de matière dans la fraction lourde avec une vitesse de vibration de 1600 tr/min (1,19% en poids de matière) pour le test numéro 11 que pour le test numéro 13 qui récupère 1,03% en poids de la matière à une vitesse de vibration de 1400 tr/min.

Le test à 1200 tr/min et à un débit d'air de 6000 n'est pas réalisé à cause de la diminution de matière présente dans la fraction lourde expliquée au paragraphe précédent.

La méthode Taguchi est donc validée pour les débits d'air mais pas pour la vitesse de vibration car la concentration de tantale obtenu dépend, comme prévu dans la théorie, principalement du paramètre de débit d'air. Même si la méthode n'est pas totalement validée elle a permis d'augmenter fortement la concentration en quelques tests.

9. Tests sur la dimension de grain moyen ($300 \mu\text{m} < x < 500 \mu\text{m}$)

Comme la matière est plus lourde que les grains fins et que les tests ont été réalisés avant les tests complémentaires pour le grain fin, le débit d'air de ce plan de test a été augmenté jusqu'à une valeur de 5000 et non 6000 car les résultats pour les tests complémentaires sur le grain fin n'étaient pas encore disponibles.

9.1. Plan des tests et données mesurées

Il s'agit donc du même tableau présenté au paragraphe 7, il faut remplacer 4000 par 3500 et 6000 par 5000 en ce qui concerne le facteur 2. Les autres sont les mêmes.

A cause des résultats surprenants obtenus avec le XRF, en plus des données développées au chapitre 8.1 « Plans des tests et données mesurées », les données recueillies dans la fraction légère sont aussi analysées. Elles se présentent de la même manière que celle présentée au paragraphe 8.1.

9.2. Tableaux des résultats

Ci-dessous le tableau des résultats obtenus pour la dimension de grain moyen.

	Conc ini- tiale en tan- tale (ppm)	Quantité de matière intro- duite sur la table (kg)	Quantité de tantale intro- duit sur la table (g)	Conc. en tantale frac- tion lourde (ppm)	% poids de matière récupé- rée fraction lourde	% poids de tantale récupé- ré fraction lourde	Ratio fraction lourde (% poids Ta/% poids matière)	Conc. en tantale frac- tion légère (ppm)	% poids de matière récupé- rée fraction légère	% poids tantale récupé- ré frac- tion légère	Ratio fraction légère (% poids Ta/% poids matière)
1	142	15,15	2,15	105	92,81	68,63	73,94	328	4,44	10,26	230,99
2	142	15,36	2,18	127	84,32	75,41	89,44	309	12,64	27,51	217,61
3	111	7,75	0,86	122	25,81	28,37	109,91	111	75,66	75,66	100
4	115	14,56	1,67	114	98,75	97,89	99,13	297	2,20	5,69	258,26
5	151	9,79	1,48	90	90,88	54,16	59,60	324	8,89	19,07	214,57
6	142	10,01	1,42	166	12,64	14,77	116,90	130	84,05	76,95	91,55
7	118	7,94	0,94	104	96,46	85,02	88,14	329	2,95	8,21	278,81
8	111	9,58	1,06	85	58,13	44,51	76,58	138	36,65	45,57	124,32
9	106	8,98	0,95	347	2,66	8,72	327,36	113	91,54	97,59	106,60

9.3. Analyse des neuf premiers tests

Les résultats obtenus avec le XRF sont vraiment surprenants. Le seul test concluant et logique est le test numéro 9 avec une concentration de tantale dans la fraction lourde de 347 ppm et un ratio de 327,36.

Concernant les autres tests, étrangement, les plus hautes concentrations de tantale sont observées dans la fraction légère. Ces résultats sont étranges mais peuvent être expliqués par le fait que les grains ont une dimension entre 300 μm et 500 μm et que pour avoir une bonne analyse avec le XRF il faut que les grains aient une dimension de 50 μm . Pour le grain fin ce problème n'est pas apparu car la plupart des grains avaient une dimension proche des 50 μm tandis que pour les grains moyens on s'en éloigne fortement et l'analyse XRF n'est plus suffisamment correcte. Malheureusement, aucune méthode de broyage n'est disponible dans le laboratoire pendant ce travail. Tous les échantillons sont stockés dans des petits sachets en plastique et pourront être broyés et analysés dans le futur pour avoir une meilleure analyse par XRF ou pour réaliser une analyse chimique.

L'analyse visuelle est beaucoup plus concluante, pour le test numéro 2 et une différence forte se présente entre la fraction lourde et la fraction légère. Dans la fraction

lourde les grains sont beaucoup plus distants et consistants tandis que la matière recueillie dans la fraction légère est beaucoup plus volatile et les grains moins distincts.

Ces résultats visuels semblent être liés à une plus grande concentration de tantale obtenu dans les fractions légères par mesure avec le XRF. C'est pourquoi les analyses par la méthode Taguchi seront basées sur les résultats obtenus dans la fraction légère.

Selon la même technique développée pour les grains fins on obtient le graphique suivant :

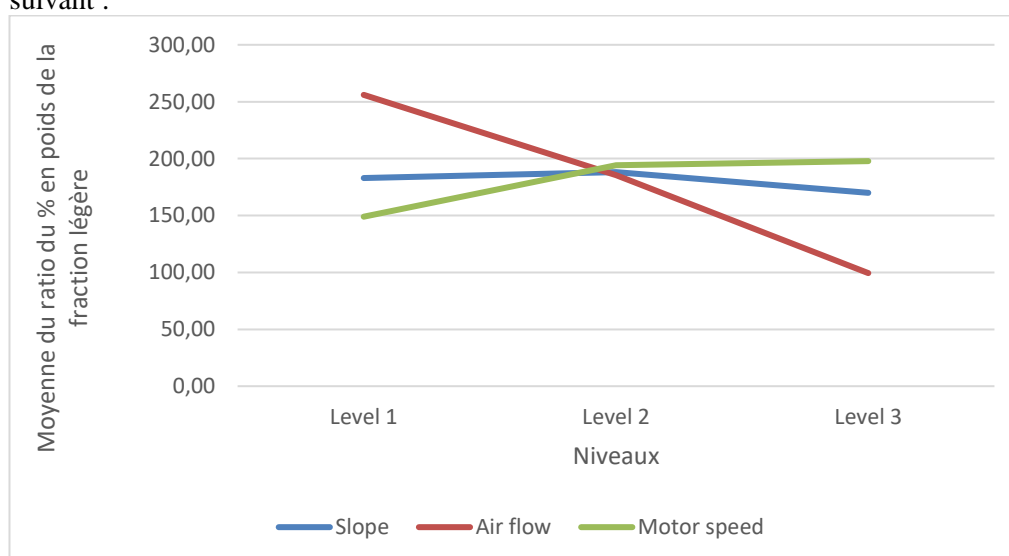


Figure 4 : Évolution du ratio du pourcentage en poids en fonction des niveaux pour chaque facteur

Chaque courbe est indépendante et doit être traitée comme telle.

La meilleure inclinaison semble être 8° et 10° , le meilleur débit d'air au niveau 1 (1845) et la vitesse de vibration à 1600 tr/min (niveau 3).

Suivant la méthode Taguchi, le meilleur résultat doit être obtenu en utilisant ces paramètres là (8° ou 10° , 1845, 1600 tr/min). Ces deux combinaisons de paramètres n'ont pas encore été testées et sont donc mises en place.

Un autre critère est le pourcentage en poids de matière récupérée dans la fraction légère combiné avec une bonne observation visuelle de séparation. La plupart des tests qui donnent un haut ratio du pourcentage en poids dans la fraction légère donnent aussi un faible pourcentage en poids de matière récupérée dans la fraction légère comme on peut le voir sur le tableau suivant :

Tests	Ratio fraction légère (%poids Ta/% poids de matière)	% poids de matière récupérée dans la fraction légère
1	230,99	4,44
2	217,61	12,64
4	258,26	2,20
5	214,57	8,89
7	278,81	2,95

Les tests numéro 1, 4 et 7 récupèrent seulement entre 2 et 4,5% en poids de la matière injectée sur la table. Tandis que les tests numéro 2 et 5 récupèrent 12,65% et 8,89% en poids de la matière injectée sur la table. Le tableau suivant rappelle les combinaisons de paramètres utilisés pour ces deux derniers tests.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration
2	8°	3500	1400
5	10°	3500	1600

Compte tenu de ces observations, un test supplémentaire est à réaliser. Le but est d'obtenir le même résultat visuel que pour les tests 2 et 5 mais en essayant d'augmenter le pourcentage de matière récupérée dans la fraction légère. Pour cela on peut essayer d'augmenter l'inclinaison ou de diminuer la vitesse de vibration mais la combinaison 12°, 3500 et 1200 tr/min a été réalisée lors du test numéro 8 et a donné un piètre résultat, les paramètres ne seront donc pas modifiés ensemble lors des deux tests. En plus des deux tests complémentaires définis par la méthode Taguchi, le troisième test complémentaire se fait à une inclinaison de 12°, 3500 et 1600 tr/min. Si l'inclinaison de la table augmente cela engendrera que plus de matière se retrouvera dans la fraction légère.

Un autre test qui pourrait être réalisé dans le futur aurait la combinaison suivante : 8°, 3500 et 1200 tr/min

9.4. Tests supplémentaires pour la dimension de grain moyen

Le tableau suivant présente les résultats des tests complémentaires. Les résultats présentent seulement les données recueillies dans la fraction légère comme développé pour le premier test pour cette dimension de grain.

Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	Ratio fraction légère (%poids Ta/% poids de matière)	% poids de matière récupérée fraction légère
10	8°	1845	1600	199,28	0,22
11	10°	1845	1600	207,97	0,57
12	12°	3500	1600	97,38	62,53

9.5. Analyses des résultats des tests supplémentaires pour la dimension de grain moyen

Aucun des tests complémentaires n'est vraiment concluant, les 2 premiers tests (10 et 11) ne donnent pas un mauvais ratio comparé au test numéro 9 cependant ce ratio est plus bas que pour le test numéro 1 (230,99) et le test numéro 7 (278,81), de plus la séparation n'est pas concluante car seulement 0,22% et 0,57% en poids de la matière injectée, est récupérée pour ces tests.

Concernant le test numéro 12, l'effet recherché est obtenu car 62,53% de la matière injectée est récupérée dans la fraction légère cependant l'observation visuelle n'est pas bonne, il semble que la séparation est loin d'être optimale car trop de matière est récupérée du côté de la fraction légère.

En conclusion la meilleure séparation obtenue basée sur l'observation visuelle et le pourcentage en poids de matière récupérée dans la fraction légère pour cette dimension de grain est obtenue lors des tests numéro 2 et 5. Le tableau suivant rappelle les combinaisons utilisées pour ces tests et le pourcentage de matière récupérée dans la fraction légère.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Résultats
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	% poids de matière récupéré fraction légère
2	8°	3500	1400	12,64
5	10°	3500	1600	8,89

Afin de valider les résultats obtenus lors de ces 2 tests, un test de comparaison densimétrique est réalisé.

9.6. Validation des observations visuelles par comparaison densimétrique

Le test est réalisé avec les matières récupérées dans la fraction lourde et la fraction légère du test numéro 2.

La masse de la matière dans la fraction légère est de 16,99 g pour un volume de 25 ml tandis que la matière récupérée dans la fraction lourde présente une masse de 34,06 g pour le même volume.

Ce résultat valide les observations visuelles et renforce l'idée que l'analyse XRF n'est pas considérée comme suffisamment correcte pour cette dimension de grain. Afin d'obtenir un résultat correct avec l'analyseur XRF il faudra broyer les particules afin d'atteindre 50 μm .

10. Test sur la dimension de grain épais ($500 \mu\text{m} < x < 1 \text{ mm}$)

Pour cette dimension de grain, le plan de test développé au paragraphe 7 « Plan des tests » est respecté.

10.1. Tableaux des résultats

Comme attendu les résultats obtenus avec le XRF sont aussi surprenants que ceux obtenus pour le grain de dimension moyenne. Dans ce sens les résultats présentés ci-après suivent le même principe que pour le grain moyen.

Ci-dessous se trouvent les résultats obtenus pour le grain épais dans les fractions lourde et légère.

	Conc ini- tial en tan- tale s t (ppm)	Quantité de matière intro- duite sur la table (kg)	Quantité de tantale intro- duit sur la table (g)	Conc. de tantale frac- tion lourde (ppm)	% poids de matière récupé- rée fraction lourde	% poids de tantale récupé- ré fraction lourde	Ratio fraction lourde (% poids Ta/% poids de matière)	Conc. de tantale frac- tion légère (ppm)	% poids de matière récupé- rée fraction légère	% poids de tantale récupé- ré fraction légère	Ratio fraction légère (%poids Ta/% poids de matière)
1	148	10,23	1,46	139	99,87	97,08	97,20	332	0,08	0,18	232,17
2	148	10,06	1,44	81	64,85	36,74	56,64	199	33,75	46,97	139,16
3	148	10,04	1,44	103	24,63	17,74	72,03	149	70,57	73,53	104,20
4	148	10,61	1,52	126	98,73	86,99	88,11	371	1,21	3,13	259,44
5	125	10,61	1,47	95	90,65	61,95	68,35	331	9,27	22,06	238,13
6	148	10,03	1,43	149	50,30	52,41	104,20	169	41,82	49,42	118,18
7	148	9,21	1,32	129	95,21	85,89	90,21	371	4,57	11,87	259,44
8	148	10,55	1,51	108	52,79	39,87	75,52	177	46,28	57,28	123,78
9	125	10,03	1,39	120	7,01	6,05	86,33	126	81,75	74,11	90,65

10.2. Analyse des neuf premiers tests

Les résultats obtenus avec le XRF ne sont donc pas logiques. Il n'y a pas de test concluant et logique étant donné que les concentrations en tantale mesurées dans la fraction lourde sont plus basses que les concentrations initiales en tantale. Cela peut s'expliquer par le fait que la matière récupérée dans la fraction légère contient plus de grains de tantale libérés qui sont plus facilement détectés par le XRF et que dans la fraction lourde il y a certainement une meilleure concentration en tantale mais que les grains ne sont pas libérés et donc non détectés convenablement par le XRF. De plus la dimension de la matière est située entre 500 µm et 1 mm et pour avoir une bonne analyse XRF cette dimension doit être de 50 µm. Les analyses par XRF ne sont donc pas suffisamment correctes.

Comme pour les grains moyens, une analyse par observation visuelle est envisagée. La différence de couleur et « texture » est très marquée pour le test numéro 5.

Les résultats visuels concluants sont aussi liés à une haute concentration en tantale dans la matière récupérée dans la fraction légère. L'analyse par la méthode Taguchi est donc basée sur les résultats obtenus pour la fraction légère. Le graphique suivant reprend les analyses selon Taguchi.

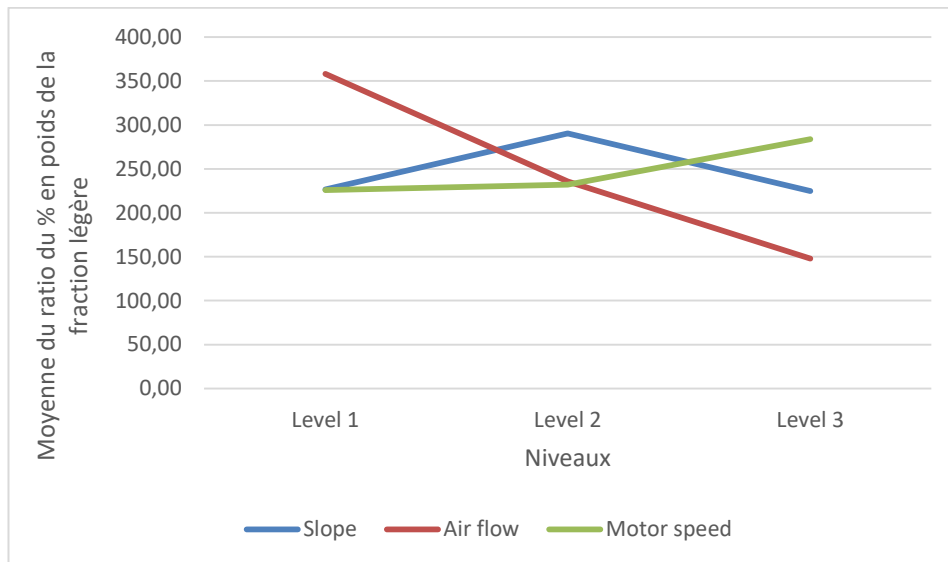


Figure 5 : Évolution du ratio du pourcentage en poids en fonction des niveaux pour chaque facteur

Chaque courbe est indépendante et doit être traitée comme telle.

La meilleure inclinaison semble être 10° , le meilleur débit d'air au niveau 1 (1845) et la vitesse de vibration à 1600 tr/min (niveau 3).

Selon la méthode Taguchi, le meilleur résultat doit être obtenu en utilisant ces paramètres là (10° , 1845, 1600 tr/min). Cette combinaison de paramètre n'a pas encore été testée et doit être mise en place.

Comme pour le grain moyen, un autre critère est le pourcentage en poids de matière récupérée dans la fraction légère combiné avec une bonne observation visuelle de séparation. La plupart des tests qui donnent un haut ratio du pourcentage en poids dans la fraction légère donnent aussi un faible pourcentage en poids de matière récupéré dans la fraction légère comme on peut le voir sur le tableau suivant.

Tests	Ratio fraction légère (% poids Ta/% poids de matière)	% poids de matière récupérée fraction légère
1	232,17	0,08
4	259,44	1,21
5	238,13	9,27
7	259,44	4,57

Les tests numéros 1 et 4 permettent de récupérer seulement 0,08% et 1,21% en poids de la matière injectée sur la table. Tandis que les tests numéro 5 et 7 récupèrent 9,27% et 4,57% en poids de la matière injectée. La quantité matière récupérée dans la fraction légère au test numéro 5 est deux fois plus grande que celle récupérée au test numéro 7. Même si le ratio est meilleur pour le test numéro 7, le test numéro 5 semble être le meilleur car le pourcentage en poids de matière récupérée est plus important. Le tableau suivant rappelle les combinaisons de paramètres utilisées pour ces deux tests.

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration
5	10°	4000	1600

Le seul test complémentaire qui est réalisé avec la combinaison suivante 10°, 1845 et 1600 tr/min a pour but d'augmenter le ratio et de valider la méthode Taguchi.

10.3. Test supplémentaire pour la dimension de grain épais

Le tableau qui suit présente le résultat obtenu pour le test complémentaire. Le résultat analysé est le ratio entre le pourcentage en poids de tantale récupéré et le pourcentage en poids de matière récupérée dans la fraction légère.

Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	Ratio (% en poids Ta / % en poids Matière)
10	10°	1845	1600	271,65

10.4. Analyses des résultats du test supplémentaire pour la dimension de grain épais

Le test complémentaire est concluant, le ratio augmente de 259,44 à 271,65. Ce résultat confirme que pour cette dimension de grain la méthode Taguchi reste efficace. Cependant ce résultat n'est pas vraiment intéressant car seulement 0,24% de la matière injectée sur la table est récupérée dans la fraction légère.

En conclusion la meilleure séparation, basée sur les observations visuelles et sur le rapport des pourcentages en poids obtenu dans la fraction légère pour la dimension de grain épais, est obtenue au test numéro 5 ! Le tableau suivant rappelle la combinaison de paramètres utilisée et le résultat obtenu.

Tests	Inclinaison	Débit d'air	Vitesse de vibration	% poids de matière récupérée fraction légère
5	10°	4000	1600	9,27

Pour valider les observations visuelles, un test de densité est de nouveau réalisé.

10.5. Validation des observations visuelles par comparaison densimétrique

La comparaison densimétrique est réalisée sur la matière récupérée au test numéro 5.

La masse de la matière récupérée dans la fraction légère est de 15,75 g pour 25 ml tandis que la masse de la matière récupérée dans la fraction lourde est de 33 g pour le même volume. C'est-à-dire 2,1 fois plus lourde que pour la fraction légère. Ce résultat confirme les observations et la théorie comme de quoi une bonne séparation est réalisée et que les analyses par XRF ne sont pas correctes pour cette dimension de grain. La matière doit absolument être broyée à 50 μm ou s'en rapproché pour effectuer une analyse par XRF.

11. Conclusion

11.1. Conclusion pour le grain fin

Le tableau suivant rappelle les meilleurs tests réalisés pour la dimension de grain la plus fine et présente les résultats obtenus pour le tantale et l'étain.

Dimension des grains	Tantale			Etain		
	Conc. initiale (ppm)	Conc. fraction lourde (ppm)	% poids tantale récup. fraction lourde	Conc. initiale (ppm)	Conc. fraction lourde (ppm)	% poids étain récupéré fraction lourde
x<300 μm	188	764	4,85	648	9736	17,95

La concentration de tantale augmente plus de quatre fois mais reste faible. Cette concentration est très loin de la concentration recherchée pour qu'il puisse être vendu. De plus seulement 4,85% en poids du tantale injecté sur la table sont récu-

pérés dans la fraction lourde. Pour la fraction légère l'utilisation d'une table densimétrique à air ne semble pas être une bonne solution à première vue. La concentration pourrait certainement augmenter un peu plus si l'on retraitait la matière récupérée dans la fraction lourde et réaliser une nouvelle campagne de tests afin de redéfinir les meilleurs paramètres pour obtenir une bonne séparation lors de ce retraitement.

Cependant même si la concentration de tantale augmenterait via cette technique, au maximum seulement 4,85% en poids de tantale pourront être récupérés ce qui engendre une énorme perte de tantale et donc une solution non viable économiquement. Cela serait intéressant d'utiliser un séparateur d'air à la bouche de sortie d'air de l'unité afin de savoir si l'on peut obtenir une meilleure récupération du tantale car cette sortie représente la perte de 52,4% en poids du tantale injecté dans l'unité.

11.2. Conclusion pour le grain moyen et épais

Le tableau suivant rappelle les meilleurs tests réalisés pour le grain de dimensions moyenne et épaisse. Les analyses réalisées par XRF n'étant pas concluantes, la conclusion est alors basée sur les résultats obtenus par les observations visuelles et le pourcentage de matière récupérée dans la fraction légère. Les observations visuelles sont confirmées par les tests de comparaison densimétrique qui ont été réalisés dans les paragraphes précédents.

Dimension des grains	% poids de matière récupérée fraction légère	Rapport masse entre fraction lourde et fraction légère pour le même volume
300<x<500µm	12,64	2,01
500<x<1000µm	9,27	2,55

En accord avec ces résultats, nous pouvons dire certainement qu'il y a bien une séparation entre les matières lourdes et légères et que les matières légères se retrouvent bien dans la fraction légère. Ces résultats mettent en évidence le fait qu'il semble être possible d'éliminer à peu près 10% de matière légère qui ne contient pas les éléments ciblés. Si l'idée d'une présence faible de grains de tantale dans la fraction légère se confirme, ce type d'unité pourrait être utilisé en début de processus afin d'éliminer des quantités significatives de matière stérile. Cependant les échantillons obtenus doivent être broyés et réanalysés au XRF ou par une méthode chimique afin de valider cette théorie. Si ces analyses révèlent qu'il reste une petite quantité de tantale et d'étain dans la fraction légère, un processus de retraitement pourrait être mis en place pour optimiser la récupération.

Les grains de tantale et d'étain ne sont pas totalement libérés pour les dimensions de grains moyens et épais ce qui rend la séparation par stratification difficile. Ef-

fectivement il se peut que les grains contenant différents éléments en proportions différentes aient la même densité mais pas la même taille. Ce qui engendre que l'on récupère dans la partie légère les petits grains impurs et les très petits grains purs de tantale et qui ont une faible masse.

En conclusion, même si l'utilisation d'une technique de concentration densimétrique par voie sèche donne des résultats, ceux-ci restent actuellement limités. L'utilisation de ce type d'unité serait justifiée dans le cas où les analyses plus précises révèlent une très faible concentration de tantale dans la fraction légère pour les grains de dimension moyenne et épaisse dans le but d'éliminer 10% de la matière non recherchée.

12. Sources

Seules les sources les plus utilisées sont mentionnées.

- [1] AGULYANSKY, A., *Chemistry of Tantalum and Niobium Fluoride Compounds*, Israel, Fluortech Ltd, 2004.
- [2] TAGGART, A., *Handbook of Mineral Dressing*, New York, John Wiley & Sons, 1967.
- [3] ELSEVIER (page consultée le 5 février 2016), *Hydrometallurgy*, <http://sourcedb.ipe.cas.cn/zw/lwlb/200909/P020090909608577123244.pdf>
- [4] TANTALUM-NIOBIUM INTERNATIONAL STUDY CENTER (T.I.C) (site consulté le 14 mars 2016), *About Tantalum*, <http://tanb.org/tantalum>
- [5] AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS (document consulté le 15 février 2016), *Introduction to Fluidization*, <http://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20141121.pdf>
- [6] CHAUVEAU, J.-C. & CHASSAING, J.-P. (document consulté le 21 mars 2016), *Introduction à la méthode des plans d'expériences par la méthode Taguchi*, http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/asserv/introTaguchi_CNED.pdf
- [7] ENGINEERING STATISTICS HANDBOOK (page consultée le 25 février 2016), *Three-level, mixed level and fractional factorial designs*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri33a.htm>
- [8] AMETEK (page consultée le 12 avril 2016), *Principe de fonctionnement d'un spectromètre ED-XRF*, <http://representatives.spectro.com/spectro-france/products/xrf/principe>

LISTE DES TRAVAUX DE FIN D'ETUDES

Année académique 2015 -2016

Le lecteur trouvera dans les pages suivantes la liste des travaux de fin d'études de Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel.

Ils sont répartis par spécialités et classés dans chacune d'elles par ordre alphabétique des noms d'auteurs.

Même si certains travaux de fin d'études émarginent à plusieurs rubriques, ils ne sont repris qu'une seule fois en fonction de l'orientation essentielle de leur contenu.

La lettre entre crochets permet de déterminer l'Institut au sein duquel le travail a été réalisé et auquel le lecteur intéressé peut s'adresser.

ECAM	[E]
GRAMME	[G]
ISICHt	[H]
PIERRARD	[P]

1. AUTOMATIQUE

1.1. REGULATION

- [E] ANGÉ Maxime Régulation sur la Meuse. Biefs en cascade et régulation non-linéaire
- [H] DESMECHT Mathieu Définition et configuration des applications de locaux avec un nouveau régulateur Bacnet pour un projet HVAC
- [E] PEREIRA FERNANDEZ Adrian Etude générale de la commande d'une turbine et application à la turbine de Tihange 2

1.2. SYSTEMES SEQUENTIELS

- [E] ONORATO Etienne Etude et application de solutions de bancs de tests

1.3. ROBOTIQUE

- [G] GROSJEAN Geoffrey Synchronisation de mouvements entre une presse électrique et un robot 6 axes
- [H] LHOIR Matthieu Using an Arduino board to centralize actuators & sensors for robotic applications
- [G] MOUTSCHEN Cédric Centrale inertielle ambulatoire pour l'analyse de la marche
- [E] NOUGOUE MONKAM Jean Jacques Manuel de protocole de tests pour validation des fonctionnalités des machines-outils trois axes après Retrofit
- [E] THIENPONT Raphaël Mechanical and Mechatronic Design for Body-Weight Support System

1.4. AUTOMATES PROGRAMMABLES

- [H] EECKHOUT Kris Supervision d'une centrale à béton sur serveur web intégré dans un automate
- [P] HEMBISE Antoine Elaboration d'une solution réutilisable de lecture de codes-barres pour le système Siemens DCS PCS7 avec Simatic Batch
- [P] MOUCHET Corentin Automatisation et supervision d'une tempèreuse
- [H] ROLAND Kévin Analyse et développement d'une installation de traitement des mâchefers
- [H] STEENHAUT Jordan Conception d'un outil fonctionnel pour améliorer des standards de programmation de l'entreprise dédiés aux softwares TIA Portal et WINCC de la gamme Siemens

- [G] TORETTE Laurent Automatisation d'une installation de top-rollers : développement d'un prototype dans un objectif de modernisation et de réduction des coûts

1.5. CAPTEURS ET INSTRUMENTATION

- [P] ANDRIN Marc Développement et installation d'un banc manuel de tests de performance de modules et pompes à carburant
- [H] DECRUYNAERE Arthur Etude et propositions d'amélioration d'un réseau d'eau glycolée afin d'optimiser la réfrigération de chambres 2°C-8°C
- [H] DELCROIX Guillaume Revamping du système de batch et de supervision d'une savonnerie

2. CHIMIE

2.1. CHIMIE INDUSTRIELLE ET PROCEDES PILOTES

- [G] BERNARD Simon Amélioration de la modélisation du bilan de matière et énergétique d'une installation de distillation de bioéthanol pour l'optimisation du processus
- [H] BOITTE Arnaud Zinc effect on primary water stress corrosion cracking in nuclear power plants and its application in Belgian plants
- [G] FALLA Samuel Study of Zinc Evaporation Vacuum Processes for Coating and Purification Methods
- [G] GÉRÔME Jean-Alexandre Tantalum and Tin Recovery from Namibian Ores with an Air Densimetric Table
- [G] HALKIN Olivier Thermodynamic Characterization Procedure for Petroleum Reservoir Fluid Prediction
- [G] LERUTH Hadrien Investigation in the Fluorine Recovery of a Phosphoric Acid Concentration Unit
- [H] MENEZ Guillaume Etude de l'influence de l'ajout d'un 3ème polyéthylène minoritaire dans un mélange de deux polyéthylènes
- [H] VOITURIER Aurore Optimisation d'une installation industrielle de potabilisation des eaux de l'Escaut et amélioration du processus de séchage des pulpes de chicorée
- [G] WARNIMONT Arnaud Dry Methods for Removal of Acid Compounds from Flue Gas from Municipal Solid Waste Incineration Plants

2.2. BIOCHIMIE – BIOTECHNOLOGIE

- [H] BEAUVOIS Marie Caractérisation des cellules progénitrices hépatiques H2STEM et études d'optimisation des conditions de culture de celles-ci
- [H] BRUNIN Stéphane Optimisation de la filtrabilité du gypse
- [H] HELLEBAUT Virginie Développement d'hydrogels à base de biopolymères en vue de l'obtention d'une formulation injectable à libération prolongée
- [H] LEBEAU Nicolas Elaboration de plan HACCP au sein de brasseries
- [H] LION Thomas Analyse de l'ergostérol dans des cultures fongiques à l'aide de la chromatographie en phase liquide associée à la spectrométrie de masse en tandem
- [H] PETRUCCI Luca Amélioration continue d'une ligne de production
- [H] RAPPE Laurent Impact de l'ajout de sucres au brassage : aspects physicochimiques et sensoriels sur la flaveur de la bière
- [H] SEMOULIN Aurélie Développement d'une extraction optimisée de prêle et de reine des prés : mise en fonctionnement et amélioration d'un extracteur-concentrateur assisté par ultrasons

2.4. CHIMIE DES MATERIAUX

- [G] DE CLERCQ Julien Design and development of an Approved World Health Organization One-Litre Vaccine Carrier
- [G] DUGUSHEV Azamat Etude de matériaux relative à l'embossage de bouchons à vin synthétiques
- [G] MICHEL PRIETO Diego Comment intégrer les ressources dans une ACV basée sur le cycle de vie réel de métaux - Cas de panneaux photovoltaïques
- [P] VANDOORNE Cédric Suppression de la coloration après Galvanisation sur des pièces en carbure frittées dans un lit d'alumine

2.7. CHIMIE ANALYTIQUE

- [G] SCHRUYERS Jérôme Development of analyte enriching thin films for toluene quantification in groundwater

3. CONSTRUCTION

3.1. STABILITE ET RESISTANCE DES MATERIAUX

- | | | |
|-----|-----------------|---|
| [E] | ANDRIEN Florian | Dimensionnement d'une passerelle piétonne et création d'outils d'optimisation pour le prédimensionnement |
| [E] | BARRAS Antoine | Développement d'une poutre hybride structurale en bois lamellé-collé. Optimisation des performances des lames extérieures par intégration de composite à base de feuillu indigène |
| [E] | DEPAUW Natacha | Comparaison des différentes méthodes de calcul des dalles en béton armé reposant sur des colonnes |
| [E] | ESSBAITE Ayoub | Étude du projet complet d'extension du couloir sous-voies en gare de Jurbise afin de le raccorder à un nouveau parking |
| [G] | MATAGNE Lionel | Etude, essais et analyses d'assemblages de cannes en bambou et lamellé-collé en bambou par des connecteurs à plaque métallique emboutie ou par pointes |
| [E] | NGUYEN Doan | Informatisation du dimensionnement de supports de tuyauteries secondaires à partir de standards |

3.2. CONSTRUCTIONS METALLIQUES

- | | | |
|-----|-----------------|--|
| [G] | DE PRYCK Thomas | Analyse et dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux |
| [E] | LÉONARD Jean | Calcul statique et dynamique d'un système d'écran pare-pierres en vue d'en améliorer son dimensionnement |
| [E] | PARON Maxime | Calcul des cheminées métalliques soumises au séisme |

3.3. BETON ARME ET PRECONTRAIT

- | | | |
|-----|--------------|--|
| [G] | MODAVE Robby | Etude environnementale et économique d'une future centrale à béton |
|-----|--------------|--|

3.4. GEOTECHNIQUE – MECANIQUE DES SOLS

- | | | |
|-----|------------------|--|
| [G] | BUCCOLERI Damien | Pieux sous charges axiales et latérales: analyse et dimensionnement suivant l'Eurocode 7 |
|-----|------------------|--|

- [E] DUCHÊNE Stavy Contribution à l'étude du battage des pieux tubulaires pour des éoliennes offshores au travers d'une couche de roche
- 3.5. HYDRAULIQUE – ASSAINISSEMENT
- [E] DURVAUX Romain Cavitation au droit des vannes de sasement d'une écluse : étude d'un système d'aération sur modèle réduit
- 3.6. MATERIAUX DE CONSTRUCTION
- [E] BAH Mamadou Lamine Conception et étude d'une passerelle piétonne accessible aux véhicules de service au-dessus de la ligne 161 de chemin de fer à côté de la future station de Verboeckhoven
- [E] BOUCQUÉAU Olivier Cross Laminated Timber (CLT) – Vérifications particulières : Compression perpendiculaire, poinçonnement, assemblage, comportement au feu, aux vibrations et acoustique. Etat de l'art, analyse et comparaison des méthodes de calcul, conception d'un outil de dimensionnement
- [E] EL GHAFKI Maïssam Analyse de l'influence des fentes dans des poutres en bois à partir d'une approche 1D vérifiée par des essais expérimentaux
- [E] NOU Vorleak Proposition d'adaptation de la composition du SMA en vue de diminuer le brouillard d'eau à l'arrière des véhicules
- [H] PENSIS Benjamin Réalisation d'un choix d'isolant pour les toitures de bâtiments et amélioration de leur critère passif
- [E] TAMWO TOHOGUEM Ivan Développement d'une membrane d'étanchéité à l'air pour utilisation en intérieur
- 3.7. PROCÉDES ET TECHNOLOGIE
- [E] CLAUDOT Adrien Le refroidissement adiabatique et son intérêt pour la climatisation en Belgique
- [E] DOMBRET Dylan Analyse globale de la méthodologie de calcul des structures en bois dans le but d'une optimisation
- [E] HORMAN Mathilde Comment intégrer un outil de « risk management » dans un processus de développement durable ?
- [H] HOSSEY Charles Etude de protections passives contre les incendies sur diverses structures

- | | | |
|-----|-------------------|--|
| [G] | LEPOT Alexandre | Elaboration d'une méthode générale de préparation de chantier appliquée à un cas réel |
| [E] | MAHAUX Harold | Développement de manipulations pratiques et réalisation de matériel didactique en lien avec l'acoustique du bâtiment |
| [E] | ORIGER Joy | Mise au point d'un outil informatique capable de pré-dimensionner et de classer économiquement les différentes solutions de parois de soutènement en fonction des conditions de chantier |
| [G] | REGINSTER Maxime | Building Informations Modeling (BIM), finalité ou moyen d'argumenter l'efficacité dans la construction? |
| [E] | TOUSSAINT Thomas | Amélioration des performances acoustiques des menuiseries intérieures in situ |
| [E] | VAN BEERS Maxime | Audit et optimisation énergétique d'un hôpital |
| [E] | VANCANNEYT Martin | Systèmes innovants de chauffage par le sol. Mise en œuvre et protocole de mise en route |
| [E] | VERGHOTE Antoine | The Interdependency of Information Display, Spatial Cognition and Demographic Background on Individual Wayfinding |

3.8. PATHOLOGIE ET REHABILITATION DES OUVRAGES

- | | | |
|-----|-----------------|---|
| [E] | BONAERT Quentin | Développement d'un système de gestion des ouvrages de soutènement en cohérence avec le système de gestion des ouvrages d'art existant au Service Public de Wallonie |
| [E] | DAWIR Cyrille | Analyse des dégradations des chaussées en enrobés bitumineux et béton de ciment |
| [E] | PACE Alessandra | Caractérisation acoustique des joints de dilatation d'ouvrage d'art : Application de la méthode RTD - 1007-3 et d'une variante sur plusieurs types de joints |

4. ELECTRICITE

4.1. ELECTRICITÉ GÉNÉRALE

- | | | |
|-----|------------------|--|
| [P] | HENROT Guillaume | Analyse des besoins électriques en industrie et détermination d'un groupe électrogène de secours |
| [P] | NOËL Corentin | Etude d'une installation électrique d'une résidence |

4.2. MACHINES ÉLECTRIQUES

- [E] CHAMASSI TOWO Joseph Conception d'une fiche de reporting d'essais de machines asynchrones triphasées à cage générée à partir de LabVIEW
- [G] SCHMITZ Mario Recherche d'alimentation électrique adaptée pour des ateliers artisanaux dans les pays en voie de développement

4.3. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

- [E] BARTHOLOMEUS Jérémy Reliability of commercial AlGaN/GaN high power HEMTs Transistor and power application
- [E] DOESBURG Alexandre Réalisation d'une feuille de calcul de dimensionnement électrique et thermique des composants d'un redresseur à diodes destiné à la traction électrique
- [E] MERTENS Kevin Étude de la conformité aux normes spatiales ECSS d'un dispositif de protection électrique pour systèmes de distribution de puissance

4.4. PRODUCTION – TRANSPORT – DISTRIBUTION - RÉSEAUX

- [E] CURRAJ Kevin Dimensionnement d'une installation électrique et mise en place d'une solution assurant la gestion des flux énergétiques
- [E] KAMISY ZAFY Ricky Modernisation d'un banc d'essai didactique pour alternateur

4.5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ELECTRICITE

- [G] GAVAGE Gilles Étude de faisabilité de l'implantation d'un four de fusion à induction dans le cadre de la relance de la Fonderie de Couvin
- [G] GODEFROID Tristan Étude et optimisation de l'apport énergétique électrique des fours verriers
- [P] MARBEHANT Jonathan Élimination de problèmes d'électroérosion dans des métalliseurs sous vide

4.8. ELECTRCITIE DU BATIMENT - DOMOTIQUE

- [E] MARZOLINO Luca Etude et développement d'un outil permettant d'identifier les consommateurs d'énergie sur un réseau électrique

5. ELECTRONIQUE

5.1. SYSTEMES EMBARQUES – COMPOSANTS PROGRAMMABLES

- | | | |
|-----|---------------------|--|
| [G] | CAPPELLE Damien | Réalisation d'un frontal de test pour le logiciel de vol du satellite Euclid |
| [H] | DELVAUX Julien | C/Python library to communicate between a raspberry PI and an arduino in the casper project |
| [H] | GAUTHIER Inès | Software development for control and analysis for on-wafer RF measurements |
| [H] | JOMAUX Maxime | Etude des systèmes de récupération d'énergie dans les capteurs sans fil |
| [H] | MOUSSET François | Implémentation hardware d'une déconvolution numérique pour pallier au problème de l'empilement des impulsions générées par le système de mesure dans le cadre de la détection de particules à haut débit |
| [H] | MURATORE Matthieu | Etude et réalisation d'un prototype de vérification semi-automatisé de câblage sur site dont les extrémités sont accessibles mais distantes |
| [E] | NEHRI Nabil | Conception d'un drone autonome destiné à la construction et réalisation d'un système de navigation en intérieur |
| [E] | PAQUES Alexis | Conception d'un drone autonome destiné à la construction et réalisation d'un système de navigation en intérieur |
| [P] | TAMGNO TABUE Joseph | Développement d'un Simulateur DME (Distance Measuring Equipment) |
| [E] | VERHOESTRAETE Tam | Développement d'un module de commande intelligent destiné aux actionneurs de type moteurs DC et AC pour la robotique |

5.2. ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

- | | | |
|-----|------------------|--|
| [E] | BOUZANIH Mounîme | Conception d'une carte de contrôle pour moteur synchrone à aimant permanent (QuimEC) intégrée et adaptée à un système existant |
| [H] | THOMAERE Maxime | Conception d'un boîtier d'encapsulation pour réseau chauffant de pare-brise automobile |

5.3. APPLICATIONS SCIENTIFIQUES – ELECTRONIQUE MEDICALE

- | | | |
|-----|----------------|--|
| [E] | BOSQUET Maxime | Etude et caractérisation de la flexibilité d'un électro-stimulateur implantable luttant contre l'obésité |
| [E] | DEFAUW Louis | Conception et développement d'un banc d'essais pour un instrument de résection et de remplacement de la valve aortique |
| [G] | JORIS Laura | Centrale inertielle ambulatoire pour l'analyse de la marche |

5.4. MESURES – INSTRUMENTATION - SIMULATION

- | | | |
|-----|-----------------|--|
| [G] | HENRARD Martin | Design and implementation of a test station to evaluate control valves performance |
| [E] | KOTATI Abdelhak | Création d'un environnement de développement pour banc de test automatique de modules de mesures industriels |
| [E] | LEEMANS Gaëtan | Automatisation des tests de compatibilité électromagnétique dans le domaine spatial |
| [G] | LOOZEN Simon | La comptabilité énergétique : du capteur de mesure à la transition énergétique |

5.5. TELECOMMUNICATIONS – TECHNIQUES DE TRANSMISSION

- | | | |
|-----|---------------------------|--|
| [E] | DA SILVA CASQUILHO Manoel | Développement d'un localisateur de coupures dans un fil périphérique de tondeuse robotisée |
|-----|---------------------------|--|

5.7. SON – IMAGE – ECLAIRAGE – OPTOELECTRONIQUE

- | | | |
|-----|----------------------------|--|
| [E] | ALVES da COSTA José-Carlos | Réingénierie d'un système de contrôle d'un goniophotomètre à miroir tournant |
|-----|----------------------------|--|

5.8. APPLICATIONS DE L'ELECTRONIQUE

- | | | |
|-----|-------------------|--|
| [P] | DEMELENNE Cédric | Simulation numérique d'une centrale inertielle |
| [E] | ISERENTANT Arnaud | Wireless Charging Robot: Development of a Resonant Wireless Power Transfer System for UAVs |
| [G] | LEROY Pierre | Conception d'un émetteur récepteur radar homodyne en bande K |

6. ENVIRONNEMENT

6.1. ASPECTS ECOLOGIQUES DES TECHNIQUES DE PRODUCTION

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [H] | DE SMET Rémi | Développement d'un prototype pour le traitement des déchets médicaux par procédé micro-ondes |
| [H] | DUDKOWIAK Thomas | Réutilisation des résidus de lavage dans le béton |
| [E] | ROLLAND Benoît | Etude de l'avantage économique d'une décentralisation de chaufferie : cas pratique de l'Institut des Arts et Métiers de la ville de Bruxelles |
| [E] | SAVEL Simon | Création d'un outil de conception et de dimensionnement de systèmes de production d'énergie renouvelable et alternative |

6.5. DEVELOPPEMENT DURABLE

- | | | |
|-----|--------------|--|
| [G] | DISPA Basile | Etude énergétique d'apport de lumière naturelle au sein des bâtiments: Héliostat |
|-----|--------------|--|

7. GEOMATIQUE

7.1. TOPOGRAPHIE-GEODESIE -SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

- | | | |
|-----|--------------|--|
| [E] | JOUREZ Simon | Détection et quantification des dégâts de cultures |
|-----|--------------|--|

8. GESTION

8.1. ORGANISATION DU TRAVAIL – PLANIFICATION – LOGISTIQUE – MAINTENANCE

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [P] | BECHET Jonathan | Optimisation du temps de changement de série sur une ligne de compression de couteaux et étude des causes de déformation de couteaux. |
| [H] | BERTRAND Pierre | Fiabilisation et sécurisation des installations de télécommunications ferroviaires |
| [P] | DAVREUX Gauthier | Renouvellement d'une station de préparation de solutions d'imprégnation |
| [E] | GOSSELIN Lionel | Création d'un service Fablab pour la conception et l'impression 3D au sein de l'ECAM |

- [E] MATOSSIAN Alexandre Optimisation industrielle : Dans quelle mesure la méthode des 5S influence-t-elle la rentabilité d'une opération ? Cas de l'entreprise Vietoptical
- [E] SEGHIN Paul Etude de la mise en réseau d'une ligne de production d'un moteur BLDC à l'aide d'un système MES (Manufacturing Execution System)

8.2. CONTROLE QUALITE - FIABILITE

- [H] DEPARIS Louis Etude et diagnostic de changement de série d'une ligne de production par la méthode "SMED"
- [G] HOFFMANN Daniel Improvement of the Reliability of the Lab Treadwear Machine
- [P] LECOMTE Quentin Analyse et résolution de la problématique « Collage bord(s) » sur une ligne d'assemblage de feuilles PVC
- [P] VILOUR Gaultier Processus de résolution de problèmes : Centrage du tableau de bord au sein de la chaîne de montage de l'Audi A1

8.7. MANAGEMENT – STRATEGIE – PROBLEMES GENERAUX

- [G] RENIER Pascaline Éveiller les jeunes aux métiers de l'Ingénieur

9. INFORMATIQUE

9.1. ANALYSE - MODELISATION

- [G] BULTOT Pierrick Adaptation d'un banc d'essais pour moteur aéronautique aux tests de production du Silvercrest
- [E] HELAERS David Migration et implémentation de l'outil de monitoring « End user expérience » IBM Tivoli à Infrabel & mise en œuvre d'une solution permettant la standardisation des logs des applications

9.2. PROGRAMMATION – LOGICIELS – SYSTEMES D'EXPLOITATION

- [H] AYDIN Mikail Développement d'une bibliothèque standard sous ControlBuild 2015 pour la conception et la mise en œuvre d'un émulateur

[E]	BUS Olivier	Création de catalogues process pour standardiser des opérations d'usinage sur CATIA V5
[H]	DESTRAIX Vincent	Etude de logiciels de Power Management et conception de plateformes de démonstration
[E]	EMONTS Donatien	Conception d'un système d'accueil informatisé intégré à "Skype For Business" pour la société Festo
[G]	GÉRON Christophe	Testing and modeling a non-circular vane expander used in an ORC system
[P]	PORNET David	Développement d'un logiciel de vérification conjointe des documents techniques sous format .pdf
[E]	VAN BERS Aurélien	Étude du workflow d'une société de services à la personne et développement de nouvelles fonctionnalités pour son ERP SaaS
[E]	VASSALLI Alessandro	Automatisering en volgsysteem van testen op mobiele apparaten

9.3. TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES

[G]	LESEUR Thibault	Développement et implémentation sous LabVIEW d'un software permettant de caractériser la qualité optique d'un télescope
-----	-----------------	---

9.5. RÉSEAUX INFORMATIQUES

[E]	VANHOVE Damien	Développement d'un Outil d'Analyse de la Topologie d'un Réseau Informatique Industriel
-----	----------------	--

9.6. INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

[E]	TESTAERT Sébastien	Modernisation du système de déplacement et de commande d'un anthropogammamètre sous LabVIEW
-----	--------------------	---

11. MECANIQUE

11.1. METROLOGIE ET INSTRUMENTATION

[G]	DOHOGNE Dylan	Développement d'un dispositif d'interférométrie de speckle de cisaillement (shearographie) pour la mesure des déformées hors du plan
-----	---------------	--

- [G] DUFOING Cyril Conception d'un banc de test en vue de caractériser le système de contrôle d'attitude du nanosatellite PicSat
- [G] LECLERCQ Thomas Création et développement d'un outil d'analyse permettant de quantifier le comportement d'un véhicule de compétition de type traction

11.2. FABRICATION MECANIQUE

- [E] BAUDET Jeremy Développement des outils de production pour la réalisation de vis imperdables par le procédé de matrices ouvrantes en frappe à froid
- [P] BURNOTTE Sébastien Avenant pour le remplacement des convertisseurs d'une antenne satellite
- [G] DELVILLE Simon Pré-développement d'une voiture de sport basée sur la Gillet Vertigo .5 Spirit
- [G] EVRARD Maxime Design to cost d'un bras de pale de rotor à entraînement direct par turbine
- [G] JANSSEN Laurent Déploiement d'un service d'impression 3D au sein d'AIRBUS Defence & Space
- [E] MASSANGE de COLLOMBS Arnaud Etude d'un kit de montage d'une trottinette électrique
- [G] MATHIEU François Etude d'un système de direction pour semi-remorque surbaissée à essieux pendulaires
- [E] MISSON Christophe Développement d'une SANDWICH® Valve de diamètre supérieur à 24 pouces conforme aux directives européennes 2014/68/EU et 2006/42/CE
- [H] NEUVILLE Jean-François Etude de faisabilité de découpe par jet d'eau de pièces aéronautiques
- [H] PARISIS Jean-Loup Improvement of the method and the tooling of slat's manufacturing
- [G] THUNUS Pol Optimisation d'un adaptateur à accouplement rapide pour semi-remorques surbaissées
- [G] VANHOVE Cédric Conception et étude d'un boîtier de départ interchangeable et standardisé pour les sous-gardes de fusils semi-automatiques
- [E] VEREERSTRAETEN Nicolas Plateformes suspendues motorisées

11.3. CONSTRUCTION DES MACHINES

- [E] BELBACHIR Fayçal Conception d'un dispositif industriel de fermeture de sac à « gueule ouverte » par repli du sommet et couture
- [E] DE SCHEPPER Michaël Conception et développement d'une machine multifonction permettant la fabrication de pièces par addition ou soustraction de matière

- [E] DOULFOUKAR Younes Conception mécanique et dimensionnement d'une affûteuse industrielle de 3400 mm de course
- [G] EL MOKHTARI Soufiane-Patrick Conception et réalisation d'une machine de frettage pour le canon d'une mitrailleuse à gaz
- [H] GODART Nicolas Etude et conception d'un injecteur de prairie de grande largeur
- [G] HUPPERTZ Thomas Etude et conception d'un appareil de levage par le vide pour le décoffrage et la maintenance d'éléments préfabriqués en béton
- [G] KESSLER Martin Mise en place de la production de moulin à canne à traction motorisée en Haïti et adaptation à la traction animale
- [H] LATOUR Olivier Etude de modèles de sol par éléments finis appliqués à la simulation numérique de crash-tests automobiles sur glissière de sécurité
- [E] LEWY Jérôme Analyse de faisabilité de l'implantation d'une cellule de réparation de cutter par technique de brasage à induction pour le perçage de pipeline
- [G] MATHY Jordan Conception d'une unité mobile de criblage de miscanthus à l'aide de brosses héliocoïdales
- [E] MEURISSE Guillaume Étude de conception de la structure mécanique d'un robot laveur de panneaux solaires
- [G] PAASCH Mathias Conception d'un système de filtration en milieu gazeux: Fly Filter
- [P] SEPTON Nicolas Conception d'une station de coating sur une ligne d'extrusion caoutchouc pour éléments d'essuie-glaces.
- [G] THONNARD Simon Prototype entièrement électrique d'un stacker/destacker - Etude mécanique
- [P] TOUSSAINT Emilien Industrialisation de la nouvelle presse rotative pour des produits minitips
- [E] VAN OOSTHUIJZE Nicolas Conception mécanique et dimensionnement d'une affûteuse industrielle de 3400 mm de course
- [G] VOZ Jérôme Conception d'une scie horizontale de valorisation des rebuts de scierie
- [P] WENKIN Maxime Etude de conception d'une station de remplissage automatique de containers

11.4. TECHNOLOGIE – PRODUCTIQUE

- [E] MERABET Samir Pré-étude, installation et aménagement d'un robot anthropomorphe dans un atelier d'usinage
- [E] TAHMAOUI Yousra Etude et améliorations des machines ensacheuses de thé TN1

11.5. MAINTENANCE

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [E] | GONZE Philippe | Conception et mise en place d'une méthode rapide de test de paramètres géométriques de fraiseuses 5 axes à commande numérique par palpéage d'artefact |
| [P] | KISZKOWSKI Anaïs | Amélioration du plan de maintenance préventive de presses à injection sur base d'une étude SMED |
| [G] | LODOMEZ Damien | Characterisation study of vibrations on the fiberglass chopped strand manufacturing process |
| [G] | NADRIN Vincent | Amélioration d'une ligne de triage et de réparation de palettes en bois |
| [G] | PAPART Julien | Management and revamping of a cement plant in Tanzania |

12. MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMODYNAMIQUE

12.1. INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE ET/OU DE CHALEUR

- | | | |
|-----|-----------------------------|--|
| [H] | ASTORI Alexandre | Dimensionnement HVAC et encodages PEB - Application sur une unité de biométhanisation |
| [E] | AZAHAF Hayat | Optimisations énergétiques d'un parc de bâtiments tertiaires |
| [H] | DUTHOIT Romain | Etude de rentabilité d'une cogénération pour une maison de repos |
| [E] | HABAY Alexandre | Optimization of the operating modes of the cooling energy production installations of a datacenter |
| [H] | LEDOUX Savinien | Etude technico-économique d'une unité de cogénération |
| [P] | MIAFFO WONANKE Jean-Terence | Optimisation et stabilisation de la production de la vapeur de l'usine Burgo Ardennes |

12.2. PRODUCTION ET TRANSFERT D'ENERGIE CALORIFIQUE OU FRIGORIFIQUE

- | | | |
|-----|-------------------|---|
| [E] | CHIAVARINI Andrea | Feasibility study of a wall temperature correction model as a strategy to adjust main injection timing in a diesel engine |
| [H] | COLART Steve | Etude et optimisation d'une installation frigorifique à l'ammoniac |
| [H] | DRALANTS Romain | Etude de l'ajout d'une machine frigorifique au Brussels South Charleroi Airport (BSCA) |

- [E] FICKERS Julian Étude d'Installation d'un circuit de récupération sur la cascade extérieure, au bâtiment LEX du Conseil de l'Union européenne
- [G] HAYEBIN Jonathan Relance de la production des plafonds froids
- [G] PANELLI Quentin Etude du Système de Production Frigorifique en Industrie: Upgrade d'un système HFC vers l'Utilisation d'un Fluide Naturel avec Optimisation Energétique
- [H] SIMON Kévin Cartographie, dimensionnement et pistes d'optimisation des installations de froid de la clinique et maternité Sainte-Elisabeth

12.3. INSTALLATIONS DE CONDITIONNEMENT D'AIR – CHAUFFAGE

- [E] MBAKOM DJAMGA Odilon Étude de rénovation de la production d'eau chaude
- [E] VRANCKEN Jean-François Optimisation énergétique des groupes de ventilation des unités de soins intensifs du CHU Brugmann

12.4. ENERGIES RENOUVELABLES

- [G] GRODENT Simon Extension du développement de la biométhanisation en voie sèche en container maritime avec recirculation des percolats
- [E] JANSSENS Kevin Etude et optimisation par simulations numériques du concept éolien GEMINI
- [E] QUERTENMONT Romain Développement d'une méthodologie d'audits énergétiques

12.5. REGULATION ET GESTION DES INSTALLATIONS – PROCESSUS THERMIQUE

- [E] MOREAU Grégoire Upgrade du système de refroidissement à l'hélium des cibles des cyclotrons d'IBA
- [G] NICOLAS Guillaume Dimensionnement, installation et automatisation d'un échangeur de chaleur fumée/eau
- [E] SEMINARA Carmélo Amélioration du dégivrage d'un évaporateur d'une chambre froide négative et mise à jour de la régulation des chambres froides des cuisines des Cliniques Saint-Luc

12.6. MACHINES THERMIQUES – THERMIQUE INDUSTRIELLE

- [H] CAUCHETEUX François Etude thermique de tubes enterrés utilisés pour du conditionnement d'air dans l'aéronautique
- [H] DUJARDIN Antoine Simulation des performances thermiques d'un outillage SQRTM

- [H] PARISSE Victor Technical review of the lift shaft pressurization system of the ADNOC Tower and solution seeking
- [P] THOMAS Thibault Bilans thermiques et optimisation énergétique de fours industriels

12.7. HYDRAULIQUE – PNEUMATIQUE – AERODYNAMIQUE

- [E] BAAR Quentin Modèle de dimensionnement aérodynamique d'un système de propulsion de technologie cyclogyro pour une application de drone
- [E] BODART Briec Characterization of the free stream flow quality in the test section of a subsonic wind tunnel
- [E] CALLENS Pierre Optimisation de systèmes générateurs d'aération d'huile (Air-Mix)
- [G] COLAUX Sébastien Développement d'un code de calcul destiné à la modélisation, l'analyse et la simulation de systèmes hydrauliques
- [P] DEHOUX Thibaut Installation d'une roue à aubes au Moulin Cambier à Chiny
- [P] GABRIEL Julien Réalisation d'une pompe centrifuge et conception d'un système d'aspiration Venturi pour les épandeurs de lisier
- [E] MÁRMOL CACUANGO Richard Fernando Validation of the aerodynamic force balance calibration using a load cell force measurement of a sphere in a subsonic wind tunnel and obtain a flow quality profile based Pitot tube rake and Stereo-PIV measurement
- [H] VAN DEN BOSSCHE Mickaël Etude de déposition de sédiments en conduite droite et optimisation du design du SCS System

12.8. THERMIQUE DU BATIMENT

- [E] ARNOULD Romain Analyse et contribution à l'amélioration du réseau de distribution de chaleur du campus d'ALMA
- [H] BOUAZZA Fayçal Etude de faisabilité d'une cogénération pour un séchoir industriel d'une briqueterie
- [H] DAME Adrian Rénovation du système de production d'eau chaude sanitaire d'une maison de repos et de soins
- [H] DECOT Sarah Systèmes HVAC et sanitaire pour MRS - études technique et de faisabilité de systèmes alternatifs
- [P] DEWIT Vincent Monitoring et analyse énergétique des bâtiments du campus Callemeyn

- | | | |
|-----|---------------------------|---|
| [H] | DI BARTOLO Angelo | Dimensionnement des installations HVAC et optimisation énergétique d'un nouveau bâtiment universitaire pour l'UMons |
| [H] | DUPONT Julien | Etude comparative de 3 systèmes de climatisation de la salle de restaurant de l'Holiday Inn Diegem |
| [E] | EL KHARRAZ Anas | Développement d'un outil de diagnostic réglementaire appliqué à la réglementation PEB Chauffage |
| [G] | ERNOUX Guillaume | Analyse multi-critères des éléments de conception influençant le confort thermique estival d'un bâtiment type " maison de repos et de soins " |
| [P] | HUBERT Emeline | Simulations d'un bâtiment tertiaire et solutions techniques visant le critère 'énergie positive' |
| [G] | LIMET Mathieu | Development of a methodology to assess buildings at the scale of a city following the norm ISO 13790 |
| [H] | TONDEUR Jeremy | Etude de l'optimisation énergétique de l'HVAC d'un bâtiment de production de vaccins par réduction des taux de renouvellement d'air |
| [E] | VAZ PINTO QUEIROZ Michael | Développement d'un logiciel d'aide au conseil énergétique pour les bâtiments résidentiels |
| [H] | VERTESSEN Geoffrey | Optimisation de la performance énergétique des maisons de repos à partir de la simulation thermique dynamique et d'un cas concret de bâtiment |

13. PHYSIQUE

13.1. PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET APPLICATIONS

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [G] | NONDONFAZ Alicia | Applicabilité de la méthode Complementary Frame Reconstruction pour un microtomographe à émission de positons |
|-----|------------------|---|

13.2. OPTIQUE - ACOUSTIQUE

- | | | |
|-----|----------------|---|
| [E] | DE LOBEL Marco | Conception et développement d'un dispositif laser permettant d'effectuer des mesures optiques sur du verre à chaud au sein d'un four de laboratoire |
| [G] | NOLS Philippe | Etude expérimentale de réflecteurs solaires pour satellites |

13.3. PHYSIQUE DE LA MATIERE

[G] HAJRA Mehdi

Etude de la variabilité des résultats d'essais de traction de mono-filaments de fibre de verre

Tous nos remerciements aux membres du Comité d'édition :

Le Père Laurent CAPART s.J. (GRAMME) et Messieurs Francis GUEUNING (ECAM),
Michel LEQUEUX (ISICht) et Vincent HANUS (PIERRARD).

Nos plus vifs remerciements à Monsieur Louis ROMANINI pour le travail de coordination
qu'il a assuré afin de mener à bien cette publication.

Messieurs Xavier VAN DEN DOOREN (ECAM), Juan HERRERA (GRAMME),
Dominique MASY (ISICht) et Vincent PAIRON (PIERRARD),
Directeurs de Catégorie Technique.

Secrétariat Général de l'Enseignement Catholique asbl
en Communautés française et germanophone
avenue E. Mounier 100 • 1200 Bruxelles
<http://enseignement.catholique.be> • segec@segec.be
D/2017/7362/4001