

Revue Scientifique  
des  
**Ingénieurs Industriels**

**ECAM  
GRAMME  
ISICHT  
PIERRARD**

**Bruxelles  
Liège  
Mons et Charleroi  
Virton**

Edition n°33 - Mai 2019  
[www.isilf.be](http://www.isilf.be)

Revue scientifique n°33 – Mai 2019



**Revue Scientifique**  
des  
**Ingénieurs Industriels**

**ECAM  
GRAMME  
ISICht  
PIERRARD**

**Bruxelles  
Liège  
Mons et Charleroi  
Virton**

**Edition n° 33 - Mai 2019**  
**[www.isilf.be](http://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](http://www.ecam.be)

Fax : +32 (0)2/541.48.59

E-mail : [secretariat@ecam.be](mailto: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](http://www.helmo.be/gramme)

Fax : +32 (0)4/343.30.28

E-mail : [gramme@helmo.be](mailto: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](http://www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel)

Fax : +32 (0)65/34.04.52

E-mail : [tech.mons@helha.be](mailto:tech.mons@helha.be)

Grande-Rue, 185

6000 CHARLEROI

Tél : +32 (0)71/41.94.40

[www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel](http://www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel)

Fax : +32 (0)71/48.92.29

E-mail : [tech.mons@helha.be](mailto: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](http://www.henallux.be/ingenieur-pierrard)

Fax : +32 (0)63/57.67.62

E-mail : [ingenieur.virton@henallux.be](mailto:ingenieur.virton@henallux.be)

Site de la revue : [www.isilf.be](http://www.isilf.be)

Éditrice 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)*



# **L'internationalisation de nos formations d'ingénieur**

## **Effet de mode ou atout majeur ?**

L'enseignement supérieur traverse depuis quelques années déjà une période de transformation, de mutation significative, et ce à de nombreux niveaux : le décret du 07 novembre 2013<sup>1</sup> a bousculé le « paysage de l'enseignement supérieur », dans son organisation structurelle et temporelle, dans les critères et seuils de réussite, etc. L'émergence des moyens technologiques mis au service de la créativité de nos enseignants a donné naissance à des pratiques pédagogiques renouvelées, les processus de gestion de la qualité ont pris une place plus officielle incarnée par l'AEQES<sup>2</sup> et les évaluations décennales des cursus et des établissements d'enseignement supérieur.

Nos formations d'ingénieur ne sont pas en reste et ont su emboîter le pas de ces évolutions. J'en veux pour preuve la démarche d'accréditation de nos formations par la CTI, Commission des Titres d'Ingénieur, organisme français habilité à auditer et certifier les formations d'ingénieur partout dans le monde et à délivrer le label EUR-ACE®. Cette démarche dans laquelle nos instituts se sont inscrits de leur propre initiative a conduit en 2016 à la certification de tous les diplômes d'ingénieur industriel délivrés par nos quatre écoles d'ingénieur du réseau.

Parallèlement, ces dernières années ont vu l'amplification d'une tendance de fond, communément qualifiée d'« internationalisation de l'enseignement supérieur ». Formant avant tout à des métiers ouverts sur le monde, il est en effet *a fortiori* logique que nos formations d'ingénieur se questionnent et se positionnent devant cette tendance émergente. Ce n'est un secret pour personne : très tôt dans leurs parcours professionnels, nos jeunes diplômés ingénieurs auront à activer des compétences relevant d'un caractère international et multiculturel.

En effet, la mondialisation est un fait majeur de ces dernières décennies, qui ont vu s'étendre à l'échelle de la planète et des peuples les enjeux économiques, sociaux, environnementaux. Nos ingénieurs, aussi bons soient-ils sur les plans scientifique et technique, doivent désormais être préparés à évoluer dans des environnements multiples et variés, à communiquer selon les codes, us et coutumes de leurs interlocuteurs, à saisir les indicateurs économiques et culturels propres aux marchés nationaux, à scruter et anticiper des tendances tantôt globales tantôt locales, à respecter

---

<sup>1</sup> « Décret définissant le paysage de l'enseignement supérieur et l'organisation académique des études », Décret de la Communauté Française, 07 novembre 2013

<sup>2</sup> « Agence pour l'Évaluation de la Qualité de l'Enseignement Supérieur »

les normes et autres règlements spécifiques aux zones économiques, à prendre en compte les dimensions géopolitiques souvent contraignantes, à maîtriser la diversité des langues et langages pratiqués dans les régions du monde.

En résumé, nos ingénieurs doivent être capables de prendre en compte l'interdépendance et la diversité des facteurs technologiques, socioéconomiques et culturels, dans des contextes tant intercommunautaires qu'internationaux. Cette dimension internationale fait par ailleurs partie des exigences que la CTI a inscrites dans son référentiel d'accréditation. Ainsi les instituts qui souhaitent pérenniser leur accréditation devront démontrer la dimension internationale de leur gouvernance et de leurs formations, en détaillant leur stratégie basée sur des objectifs qualitatifs et quantitatifs<sup>3</sup>.

En pratique, nos instituts mettent en œuvre de multiples mécanismes afin de cultiver l'ouverture scientifique, professionnelle et culturelle de nos ingénieurs pendant leurs études. Cela concerne tous les niveaux de la formation ainsi que tous les acteurs, étudiants, enseignants, personnels administratifs et techniques, entreprises partenaires, ...

Avant tout, on pense aux mécanismes de mobilité soutenus principalement par le bien connu programme Erasmus, qui finance la mobilité des étudiants et membres du personnel sous forme de bourses. La mobilité étudiante la plus classique consiste à suivre un quadrimestre complet, y compris les évaluations, en immersion totale dans une institution partenaire. Ce programme, initialement confiné à la Communauté Européenne, s'est aujourd'hui étendu à tous les continents. Cela nécessite pour la cellule « Relations Internationales » des écoles d'ingénieurs de développer un réseau d'écoles partenaires et de vérifier la compatibilité des programmes, tout en s'assurant du niveau qualitatif de la formation. Sur ce dernier critère, on comprend l'intérêt et les avantages qu'apporte la labellisation liée à une accréditation internationale, lorsqu'il s'agit de négocier de nouvelles conventions de partenariat.

Si elles offrent des opportunités à nos étudiants de partir se former à l'étranger (étudiants OUT), ces conventions bilatérales prévoient également l'accueil d'étudiants étrangers dans nos murs (étudiants IN), de telle sorte que l'internationalisation s'intègre dans le quotidien de nos étudiants. La mobilité entrante participe au développement de la culture internationale de l'institution d'accueil, favorise son ouverture et contribue à la mixité internationale au sein même de nos cohortes d'étudiants.

Depuis que nos cursus d'ingénieurs industriels sont passés en 5 ans, la présence de deux périodes de stages et du travail de fin d'études offre également des possibilités

---

<sup>3</sup> Voir le document « RÉFÉRENCES ET ORIENTATIONS - LIVRE 1 » sur <https://www.cti-commission.fr/fonds-documentaire/document/25>

de mobilité internationale. Nos étudiants sont de plus en plus nombreux à réaliser leur stage et/ou TFE à l'étranger, en entreprise ou dans un laboratoire de recherche d'un partenaire académique, n'hésitant pas à étendre la durée minimale de 7 semaines à parfois plus de trois mois. Pour encourager et faciliter ce type d'immersion, nos institutions s'appuient sur leur réseau d'entreprises partenaires afin de développer une offre de stage internationale.

La mobilité, tant étudiante qu'enseignante, peut aussi prendre des formes plus courtes et plus ponctuelles : participation à un colloque ou une conférence, mission d'enseignement de quelques jours, mission exploratoire, concours ou challenges internationaux, visite d'un salon à l'étranger, ...

À l'instar de la formation, la recherche et le développement gagnent également à s'ouvrir à des partenariats étrangers et nombreux sont les dispositifs de financement public, qui par ailleurs imposent que les projets soient construits et déposés en consortium. À travers ces projets d'envergure, les équipes d'étudiants et d'« enseignants-chercheurs » sont ainsi confrontées à toutes les dimensions emblématiques dont le futur diplômé devra tenir compte dans sa vie professionnelle future : les premiers pour mieux s'y préparer, les seconds pour mieux en prendre conscience.

Car, si bien entendu une cellule « Relations Internationales » est un maillon indispensable, voilà avant tout le facteur de réussite d'une internationalisation efficace et pertinente : une prise de conscience de l'ensemble des acteurs. À tous les niveaux de nos processus institutionnels, ceux-ci, tant académiques qu'administratifs, sont amenés à soutenir le développement international : définition institutionnelle d'objectifs et de moyens, existence d'une structure d'accueil, développement d'une offre de cursus en anglais, mise à disposition des fiches de cours traduites dans d'autres langues, transposition de cours sous forme de SPOCs ou MOOCs, facilitation des parcours pédagogiques personnels, formation des étudiants et des enseignants aux langues, mise en place d'une communication ciblée, prise en compte de critères spécifiques lors du recrutement d'enseignants, développement de doubles diplômes, intégration de projets internationaux dans les programmes de cours, valorisation des initiatives internationales des étudiants, reconnaissance de l'ouverture internationale des membres du personnel, etc.

Une telle dynamique peut cependant faire débat et susciter des questions. Pourquoi détourner les étudiants vers une langue étrangère au détriment d'une seconde langue nationale pourtant incontournable en Belgique ? À quel point peut-on imposer une mobilité internationale quand on connaît les situations parfois précaires de nos étudiants ? Comment s'assurer, malgré la diversité des parcours sous-traités, que les objectifs d'une formation avant tout scientifique et technique sont atteints sans préjudice à la qualité du diplôme ?

Ces questions sont nombreuses et légitimes. Elles montrent qu'une internationalisation de nos formations ne souffre aucune improvisation. Il s'agit de bien en déterminer les conditions de réussite mais aussi d'être conscient des risques, de prendre les précautions nécessaires et de réaliser régulièrement des mesures afin de s'assurer contre toute dérive, pour que, contrairement à un effet de mode éphémère, l'internationalisation de nos cursus constituent un atout majeur pour nos futurs ingénieurs.

Xavier VAN DEN DOOREN  
ECAM  
Directeur

*Cerise sur le gâteau, notre revue accueille pour la première fois des articles en anglais : signe, s'il restait à le démontrer, que l'internationalisation est en marche...*



## TABLE DES MATIERES

<b>Éditorial : L'internationalisation de nos formations d'ingénieur – effet de mode ou atout majeur ?</b> <i>par X. VAN DEN DOOREN</i>	
<b>Développement d'un digesteur de surface pour l'intégration alternative du biogaz au Burkina Faso,</b> <i>par B. HAUSMAN, C. D. KONSEIBO, C. CHARLIER</i>	1
<b>Développement d'un échangeur – accumulateur de chaleur pour une maison basse consommation,</b> <i>par Y. VAISSAUD, V. HANUS</i>	19
<b>Renewable energy for sea water reserve osmosis desalination plants: World-wide screening for implementation potential,</b> <i>par A. COOLEN</i>	43
<b>Développement de membranes de pervaporation pour l'extraction de composés organiques volatils en solution aqueuse,</b> <i>par J. SCHRUYERS, S. PIRARD</i>	61
<b>Développement d'un système complet de mesure de la qualité de l'air au sein de l'Internet des objets,</b> <i>par S. DI STEFANO, M. DUMORTIER, S. EGGERMONT, F. TRIQUET</i>	83
<b>Optima technico-économiques d'installations frigorifiques selon leur réfrigérant,</b> <i>par L. PAQUET, V. HANUS</i>	105
<b>Electrical machines modeling for hybrid vehicle applications,</b> <i>par N. HEINDRYCKX, L. MINE</i>	119
<b>Intégration énergétique et optimisation économique d'une installation de cogénération,</b> <i>par A. BERTRAND, P. DEWALLEF, V. KELNER</i>	137

**Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée de microsatellite,**  
*par A. BILOCQ, T. DELAITE* 153

**Étude de la problématique de qualité d'eau des chaudières à condensation aluminium-silicium,**  
*par T. MARLIERE, P. THIRY, G. VANDERVEKEN* 175

LISTE DES TRAVAUX DE FIN D'ETUDES 189

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

Remerciements 215



# Développement d'un digesteur de surface pour l'intégration alternative du biogaz au Burkina Faso

Ing. B. HAUSMAN  
Ir Charles D. KONSEIBO  
Ir C. CHARLIER  
CEAS Burkina  
HELMo Gramme – Liège

*Cet article traite du développement d'un nouveau type de biodigesteur domestique en voie humide et en fonctionnement continu pour répondre aux besoins des populations rurales du Burkina Faso. Ce nouveau modèle de digesteur permet d'élargir l'éventail des possibilités notamment grâce à sa complémentarité par rapport aux technologies existantes. Ce travail constitue la deuxième phase du projet démarré l'an dernier par Nicolas Zimmermann (voir Revue n° 32, 2018).*

*Mots-clefs : biométhanisation, digesteur domestique, voie humide, Burkina Faso, biogaz, traitement des déchets.*

*This article presents the development of a new kind of wet process domestic digester operating continuously to meet the needs of the rural population of Burkina Faso. This new model makes the market scope wider due to its complementarity in regard of the other existing technologies. This work is the second step of a project started last year by Nicolas Zimmermann (Revue n° 32, 2018).*

*Keywords : methanisation, domestic digester, wet process, Burkina Faso, biogas, waste treatment.*

## **1. Introduction**

L'énergie représente un enjeu majeur dans le développement. La progression des pays émergents est directement liée à leur capacité à produire ou à se fournir en énergie. Pour que le développement de ceux-ci soit durable, il est essentiel de proposer et de promouvoir des solutions adaptées et accessibles pour encourager le recours aux énergies renouvelables en leur sein.

En effet, toutes les énergies renouvelables ne conviennent pas aux contextes des pays en voie de développement. Parmi les solutions retenues, le solaire photovoltaïque prend une place de plus en plus importante notamment sur le continent africain. Cependant, cette technologie reste onéreuse et donc difficile d'accès pour les populations les plus pauvres. De plus, dans le contexte rural de l'Afrique, les principaux besoins énergétiques sont de l'énergie thermique pour la cuisine et l'énergie lumineuse pour l'éclairage.

Au vu de cela, la biométhanisation apparaît comme une technologie capable de répondre adéquatement aux besoins des populations rurales d'Afrique ainsi que dans d'autres régions du tiers-monde. Reste alors à mettre au point un dispositif adapté permettant de réaliser le processus biochimique de la méthanisation de manière à produire du gaz utilisable dans les milieux ruraux d'Afrique.

## **2. État des lieux**

Avant toute chose, il est indispensable de s'intéresser un peu plus en détails à la question du biogaz en Afrique car il est important de saisir l'ampleur des enjeux et des intérêts que présente cette énergie verte pour l'Afrique. Par la suite, nous verrons de manière succincte les technologies et les structures déjà opérationnelles sur le continent africain. Le projet réalisé au Burkina Faso en 2018 constitue en réalité la deuxième phase d'un projet initié en 2017. Il est donc également nécessaire de revenir sur le contexte du projet et son état d'avancement au commencement de la deuxième phase.

### **2.1. Intérêts du biogaz au Burkina Faso**

Les intérêts du biogaz et en particulier des biodigesteurs domestiques sont multiples. C'est pourquoi, il semble indispensable de commencer par un tour d'horizon des enjeux de cette technologie afin de bien saisir l'importance de son développement en Afrique et en particulier au Burkina Faso.

Le premier intérêt semble évident. Comme mentionné dans l'introduction, le biogaz semble être une énergie renouvelable potentiellement bien adaptée pour répondre

aux besoins des populations rurales. Il permet en effet d'alimenter deux équipements très simples que sont le bec à gaz et la lampe à gaz. Par l'intermédiaire de ceux-ci, le biogaz est capable de fournir aux paysans la chaleur et la lumière dont ils ont besoin et qui jusque-là n'étaient pas toujours faciles à produire.

En outre, aujourd'hui encore, la plupart des paysans utilisent du bois qu'ils trouvent dans la nature pour se chauffer. Cette pratique participe activement à la déforestation et à la progression du désert en particulier dans le nord du Burkina Faso. Pour ce qui est de l'éclairage, les campagnes n'étant pas desservies par le réseau électrique, les gens utilisent le plus souvent des lampes de poche à piles. Ce moyen d'éclairage engendre une production de déchets nocifs qui ne sont pas recyclés et qui finissent le plus souvent dans la nature. La promotion du biogaz à grande échelle permettrait sans aucun doute de remédier à ces deux phénomènes dommageables pour l'environnement.

Il est permis d'ajouter que le processus de biométhanisation offre une solution pour le traitement des déchets organiques. De plus, il peut également être alimenté par des matières fécales humaines ou non. Cette particularité permet des progrès sanitaires considérables dans les villages africains.

Pour finir, les biodigesteurs domestiques sont à l'origine de progrès sociaux et économiques. Pour ne citer que quelques exemples, ils permettent une amélioration de la condition de la femme grâce à une réduction des tâches pénibles et un environnement plus sain pour cuisiner, ils sont bon marché ce qui facilite l'accès à l'énergie même aux plus démunis, ils procurent un coproduit (l'effluent) qui est utilisé comme engrais agricole ce qui permet d'augmenter significativement les rendements des cultures, etc.

Au regard de tous ces intérêts, il est aisé d'imaginer à quel point la promotion des biodigesteurs domestiques peut avoir un impact favorable sur le développement de l'Afrique et sur les conditions de vie de ses populations.

## **2.2. Technologies et structures existantes**

Bien sûr, ce projet n'est pas le premier du genre et de nombreuses technologies et structures existent déjà au Burkina Faso comme ailleurs en Afrique et en Asie. De plus, il existe un grand nombre de dispositifs pour réaliser la biométhanisation que ce soit à grande échelle de manière industrielle ou à la plus petite échelle c'est-à-dire à celle d'un ménage. Dans le cadre des pays en voie de développement, ce sont surtout les unités domestiques de petites tailles qui nous intéressent.

Parmi celles-ci, il y a actuellement 3 technologies qui sont le plus largement répandues. Il s'agit du digesteur enterré à dôme fixe, du digesteur à dôme en fibre de verre

et du digesteur en bâches flexibles. Chacune de ces technologies a ses avantages et ses inconvénients. Celui en bâche étant le moins cher mais également le plus fragile. Malgré cela, ce sont les digesteurs enterrés à dôme fixe (voir figure 1) qui semblent les plus productifs et les plus durables. Ils ont donc servi de base à plusieurs grands programmes de promotion.



*Figure 1 : Construction d'un digesteur à dôme fixe*

En effet, dans certains pays d'Afrique et en particulier au Burkina Faso, il existe des programmes nationaux pour la promotion des biodigesteurs. Au Burkina, celui-ci a vu le jour en 2009 grâce à l'aide de la SNV<sup>1</sup> qui fut le principal activateur du projet. Depuis lors, un peu plus de 10000 biodigesteurs à dôme fixe ont été construits et sont fonctionnels pour la plupart (au moins 90 %) sur le territoire burkinabè. Le programme national ainsi que la SNV ont été des partenaires clé pour la deuxième phase de ce projet.

### **2.3. État initial du projet**

Comme déjà mentionné précédemment, la première phase du projet a été réalisée en 2017 par Nicolas Zimmermann au sein du Centre Écologique Albert Schweitzer de Ouagadougou (CEAS Burkina)<sup>2</sup>. Lors de cette première phase, plusieurs unités pilotes ont été conçues et testées. Ce travail a servi de base pour la suite du projet.

L'objectif de départ était de proposer une solution alternative aux digesteurs à dôme fixe car ceux-ci demandent un chantier ainsi qu'un investissement de départ relativement conséquents. De plus, leur construction nécessite un espace important.

<sup>1</sup> La SNV est une ONG néerlandaise pour l'aide au développement.

<sup>2</sup> Pour plus de détails sur la première phase du projet se référer à l'article de Nicolas Zimmermann dans le n°32, 2018 ou à son mémoire [10].

L'idée était donc de concevoir une petite unité le meilleur marché possible et compacte qui pourrait s'adapter à un grand nombre de situations. C'est cela qui a été recherché lors de la première phase.

De février à mai 2017, Nicolas Zimmermann en collaboration avec le CEAS Burkina a développé plusieurs petites unités de biométhanisation à partir de fûts métalliques de 200 litres. Ceux-ci ont l'avantage d'être bon marché et disponible en abondance au Burkina Faso. Ces prototypes se sont montrés fonctionnels et capables de produire du gaz de bonne qualité (jusqu'à 60 % de méthane). Cependant, du point de vue quantitatif, la production restait trop faible. D'autre part, une petite révision de l'ergonomie était nécessaire afin de rendre l'utilisation moins laborieuse.

En résumé, le projet était déjà bien entamé au terme de cette première phase. Toutefois, le travail de conception était loin d'être achevé pour obtenir une unité performante et répondant aux objectifs de départ.

### **3. Conception du nouveau modèle**

Fort des avancées réalisées lors de la première phase, le projet a été poursuivi en suivant les mêmes objectifs et en se concentrant spécialement sur la résolution des problèmes.

#### **3.1. Identification des problèmes**

Pour commencer, une analyse de l'ensemble des points à améliorer sur les unités existantes a été entreprise. Parmi ceux-ci, nous pouvons par exemple citer : permettre une production de gaz plus importante, simplifier le système de manière générale, faciliter l'utilisation et réduire le coût de revient. C'est en se basant sur les principaux éléments à améliorer qu'une nouvelle configuration bien meilleure que les précédentes a pu être imaginée.

#### **3.2. Analyse du fonctionnement des digesteurs enterrés**

La deuxième source d'idées qui a également alimenté la réflexion sur le nouveau concept est l'analyse du fonctionnement du digesteur à dôme fixe. En effet, celui-ci étant en même temps le plus performant et le plus robuste il était nécessaire de chercher à comprendre à quoi était due sa supériorité. C'est en réalité son principe de fonctionnement extrêmement simple mais également très ingénieux qui donne l'avantage au dispositif enterré. Le schéma ci-dessous illustre ce principe de fonctionnement.

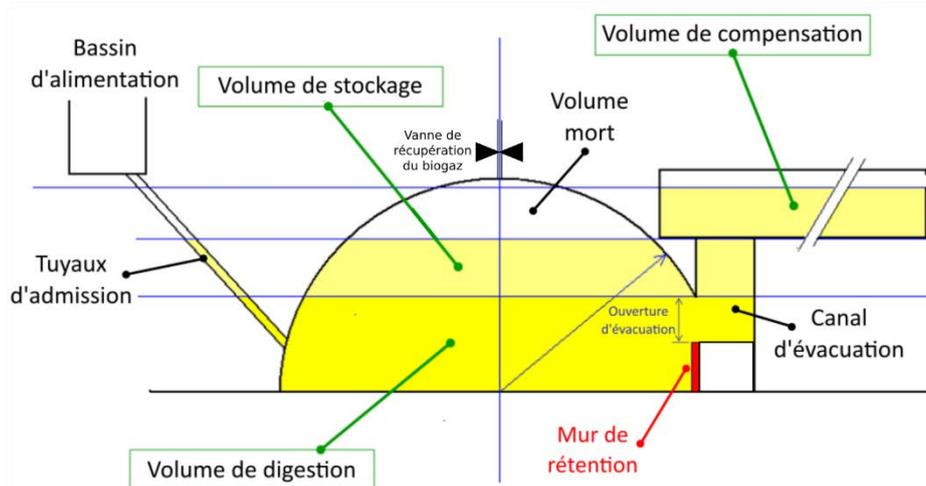


Figure 2 : Schéma de principe du digesteur enterré à dôme fixe [9]

Comme le montre la figure 2, le digesteur à dôme fixe ne possède aucune vanne (sauf pour la récupération du gaz). Il est exclusivement constitué de bassins et de canalisations. Il n'y a donc aucune pièce sujette à l'usure ou à l'encrassement. L'évolution de la matière dans le système se fait simplement par le principe des vases communicants et grâce aux variations de pression.

Le substrat (matière organique mélangée la plupart du temps avec de l'eau) est introduit par le bassin d'alimentation (à gauche sur le schéma). Il passe ensuite dans le volume de digestion par le tuyau d'admission. Une fois dans le digesteur, le substrat est privé d'oxygène étant donné que l'ensemble des canaux sont remplis de liquide et que donc l'entrée d'air est quasi impossible. Le processus de méthanisation peut se mettre en place naturellement et perdurer de manière continue aussi longtemps que le milieu restera anaérobie. Du gaz va donc être produit. Celui-ci est stocké dans le dôme qui surplombe le volume de digestion. Au fil de la production, la pression de ce volume de stockage va progressivement augmenter. Cela va avoir pour effet de faire baisser le niveau de substrat dans le digesteur car celui-ci va s'échapper via le canal d'évacuation afin de remplir le bassin de compensation (à droite sur le schéma). Une fois ce bassin totalement rempli, la pression au sein du digesteur sera maximale et elle équivaudra à la hauteur de la différence de niveau entre le digesteur et le bassin d'évacuation. Le surplus de matière dans le système s'évacue donc de manière passive grâce au trop-plein de ce dernier.

Dans ce fonctionnement, la seule tâche de l'utilisateur est d'alimenter le digesteur. Le gaz quant à lui peut facilement être récupéré pour alimenter un bec de cuisson ou une lampe en ouvrant la vanne au sommet du dôme. Ce sont principalement la simplicité d'utilisation et de fonctionnement de conception qui nous ont séduits dans ce

modèle. En outre, voyant la résolution potentielle de la majorité des problèmes identifiés sur les prototypes précédents, il a été tenté d'adapter ce fonctionnement aux digesteurs constitués de fûts métalliques.

### **3.3. Adaptation de ce fonctionnement à un dispositif constitué de fûts métalliques**

Pour adapter le principe de fonctionnement des digesteurs à dôme fixe aux petites unités constituées de fûts, il a fallu modifier leur disposition afin de pouvoir induire des différences de niveaux entre différents bassins.

Pour commencer, il a été décidé de positionner les fûts constituant le digesteur l'un à côté de l'autre à même le sol. C'est d'ailleurs dans cette position qu'ils sont le plus résistants. Afin d'obtenir un seul volume de digestion, ces fûts ont été percés dans le bas et raccordés entre eux à l'aide d'un tube métallique (via des soudures étanches). Dans l'exemple illustré à la figure 3, le digesteur à proprement parlé se compose de 5 fûts.

Ensuite, un dernier fût ouvert a été ajouté et également raccordé aux autres afin qu'il serve de bassin de compensation. Pour l'alimentation, il a été choisi de la faire grâce à un entonnoir relié dans le bas du premier fût par un tuyau incliné. La figure 3 illustre la nouvelle configuration imaginée.



*Figure 3 : Schéma 3D du nouveau concept de digesteur domestique*

Pour terminer, la récupération du gaz se fera par des tuyaux de petit diamètre placés sur le dessus des fûts. Ceux-ci seront raccordés entre eux par du tuyau souple afin de réaliser le circuit de gaz.

Cette configuration permet d'apporter les différentes améliorations nécessaires aux unités précédentes. La suppression des vannes simplifie grandement la conception

générale ainsi que l'utilisation et permet également de réduire les coûts de manière considérable (plus de 30 %). Dans cette configuration, l'étanchéité, qui constitue un facteur clé, est également bien meilleure étant donné que la plupart des ouvertures dans les fûts sont immergées. Il s'agit dès lors non plus qu'elles soient étanches à l'air mais au substrat. De plus, cette disposition permet d'assembler un grand nombre de fûts et ainsi d'augmenter le volume du digesteur, le volume de substrat traité et donc la quantité de gaz produite.

### **3.4. Ajout de la modularité**

Pour perfectionner encore la conception, il a été décidé d'ajouter une caractéristique propre à ces digesteurs, à savoir la modularité.

En effet, en réalisant des assemblages démontables entre les différents fûts, ceux-ci devenaient interchangeables. Mis à part le fût d'alimentation et le fût d'évacuation, tous les fûts intermédiaires sont identiques. Le fait de pouvoir démonter le digesteur facilite non seulement sa construction et son transport mais permet également de moduler le nombre de fûts dont il est constitué. De cette manière, le volume de digesteur peut être adapté à chaque situation.

De plus, du point de vue de la maintenance, il est possible de réparer ou de remplacer un seul fût lorsqu'il présente une défaillance au lieu de remplacer tout le système.

En résumé, le nouveau modèle de digesteur conçu lors de cette deuxième phase semble répondre adéquatement aux objectifs de départ tout en résolvant certains problèmes des prototypes précédents. A ce stade, il était indispensable de vérifier en pratique si la réalisation et le fonctionnement de ce modèle étaient possibles.

## **4. Expérimentations et résultats**

Lors du stage réalisé au sein du CEAS Burkina, il a été possible de réaliser et d'expérimenter un premier prototype de ce nouveau concept de « digesteur modulable ». Le travail accompli ainsi que les résultats obtenus au terme des expérimentations sont ainsi développés ci-après.

### **4.1. Réalisation du prototype**

Pour commencer, un prototype tel que celui présenté sur le modèle 3D à la figure 3 a été réalisé. La figure 4 montre celui-ci une fois terminé.



*Figure 4 : Photographie du prototype réalisé au CEAS Burkina*

Pour réaliser ce prototype, 6 fûts métalliques ont été utilisés. Chacun de ceux-ci a été percé et équipé des différentes canalisations. Un orifice de plus petit diamètre a également été prévu sur le dessus de chaque fût afin de récupérer le gaz produit.

Une fois les fûts réalisés, ils ont été disposés et raccordés entre eux de manière étanche grâce à des morceaux de chambre à air. La seule condition indispensable pour l'installation d'un tel digesteur est que le sol doit être plan et horizontal.

En construisant ce dispositif, il a été permis de constater que la réalisation était relativement simple et rapide. Celle-ci ne demande aucune technique particulière. La seule difficulté réside dans la réalisation des soudures dans les parois des fûts car celles-ci se composent de tôles extrêmement minces mais la main d'œuvre suffisamment qualifiée ne manque pas au Burkina.

Le digesteur ainsi réalisé a un volume de digestion de 1 m<sup>3</sup> et un volume de stockage d'un peu moins de 200 litres (égal au volume de compensation).

## **4.2. Expérimentation**

L'expérimentation du prototype a été réalisée à la température ambiante du Burkina Faso (environ 40 °C en avril). Le substrat utilisé était de la bouse de vache fraîche mélangée à 50 % d'eau en volume. Ce substrat a été choisi pour l'expérimentation car il s'agit du plus propice au lancement du processus de méthanisation. De plus, il fallait conserver les mêmes conditions expérimentales que pour les expériences précédentes afin d'obtenir des résultats comparables. Cependant, tel qu'il est conçu, le digesteur modulable peut être alimenté par bien d'autres substrats comme par exemple des déchets verts broyés ou encore des restes de cuisine.

Le digesteur a été testé de manière continue. Après avoir procédé au remplissage initial, il a été alimenté quotidiennement avec une quantité donnée de substrat. Celle-ci a été calculée afin que l'ensemble du contenu du digesteur soit renouvelé au bout de 40 jours. Lors des différentes recharges du digesteur, la réelle facilité d'utilisation de celui-ci a été constatée. Cette observation confirmait déjà l'amélioration de l'ergonomie.

Lors de l'expérimentation, plusieurs paramètres ont été suivis à savoir la température extérieure, la pression au sein du digesteur<sup>3</sup>, la composition du gaz et la quantité de gaz produite. La composition du biogaz a pu être déterminée grâce à un analyseur de gaz spécialement conçu à cet effet. Pour cette mesure, un peu de gaz doit être prélevé hors du digesteur par l'appareil. Pour mesurer la quantité de biogaz produite, faute d'un compteur, le gaz était stocké dans un contenant (des chambres à air) dont le volume, la pression et la température étaient relevés. Sur base de cela, la quantité de gaz produite pouvait être calculée.

Les paramètres cités ci-dessus ont été relevés et consignés quotidiennement. Ces données ainsi recueillies permettent d'évaluer les performances de ce nouveau digesteur.

### **4.3. Analyse des résultats**

Pour commencer, le fonctionnement du digesteur a été analysé. Pour ce faire, la composition du gaz produit a été suivie. Le graphique ci-dessous reprend l'ensemble des mesures réalisées.

---

<sup>3</sup> Celle-ci varie en fonction de la production et de la consommation du biogaz. Elle est comprise entre 0 et 60 mbars (en pression relative).

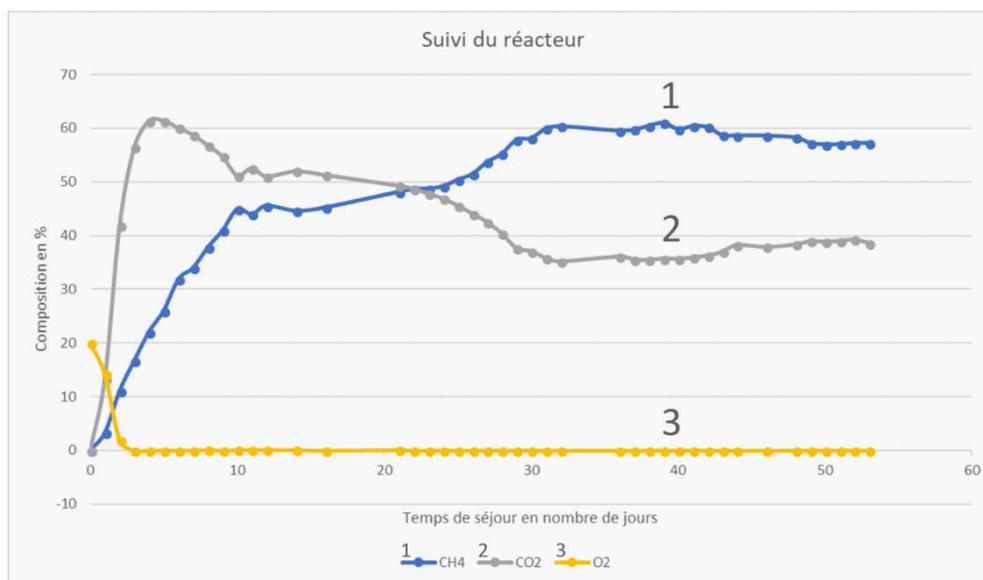


Figure 5 : Suivi de la composition du gaz du digesteur modulable<sup>4</sup>

Ce graphique montre que l'augmentation du taux de méthane (courbe 1) s'est pratiquement faite en 2 étapes. Il y a tout d'abord eu une augmentation « ordinaire » qui était attendue au lancement du digesteur (les 10 premiers jours). Cette forte croissance suggérerait un bon démarrage sans doute dû à l'inoculation qui avait été effectuée. Cependant, cette croissance s'est arrêtée aux alentours de 45 % de CH<sub>4</sub>. Ce taux est ensuite resté à peu près constant pendant les 10 jours suivants puis il s'est remis à augmenter plus lentement pour finalement atteindre les 60 % peu après le 30<sup>ème</sup> jour. Ce ralentissement de l'augmentation s'explique par le remplacement progressif du substrat qui a débuté à partir du 8<sup>ème</sup> jour.

Après environ 30 jours, la composition du gaz se stabilise autour de 60 % de méthane. Cela offre une production continue et constante (variation de moins de 1,5 %). Au-delà du 42<sup>ème</sup> jour, une légère chute du taux de méthane est observée mais celui-ci se maintient tout de même aux alentours des 58 %.

En ce qui concerne le fonctionnement et la qualité du gaz produit, il est permis de dire que le digesteur a fait ses preuves. Son fonctionnement s'est avéré meilleur que les unités précédentes. Il est maintenant comparable à celui d'un digesteur à dôme fixe.

<sup>4</sup> Le graphique montre uniquement l'évolution des principaux constituants du biogaz. Le reste de cette phase gazeuse est composé d'azote provenant de l'air présent au départ dans le digesteur.

Pour poursuivre, la quantité de gaz produit a également été analysée<sup>5</sup>. L'évolution de celle-ci est reprise sur le graphique suivant.

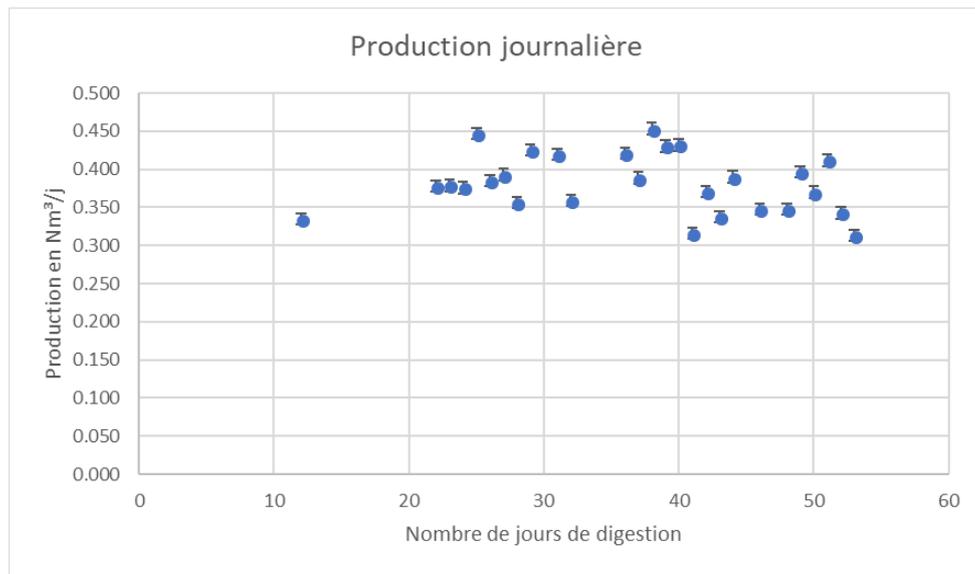


Figure 6 : Production de biogaz du digesteur modulable en  $\text{Nm}^3$

Le graphique montre qu'une fois la phase de lancement passée, l'unité construite produit en moyenne 0,4  $\text{Nm}^3$  de biogaz par jour. Cette production dépasse toutes les espérances. Elle permet aisément de couvrir les besoins journaliers d'une famille burkinabè.

Cependant, l'expérimentation n'a pas duré assez longtemps pour que le digesteur entre réellement en régime stationnaire. Selon les prévisions cette production devrait se stabiliser aux alentours de 0,2  $\text{Nm}^3$  par jour. L'expérience est toujours en cours afin de valider cette valeur. Dans ce cas, la production permettrait de couvrir la moitié des besoins d'un ménage. Cependant, cette même unité serait capable de multiplier sa production et ce en fonction du substrat utilisé.

En résumé, l'expérimentation a montré que le modèle est fonctionnel et que ses performances sont bonnes. Une batterie d'autres expériences avec différents substrats permettrait de déterminer si une unité de 1  $\text{m}^3$  ou moins est capable de fournir l'ensemble de l'énergie dont a besoin un ménage africain.

<sup>5</sup> Mesures réalisées en stockant le gaz dans des chambres à air (comme expliqué au point 4.2.)

#### 4.4. Pistes d'améliorations

À ce stade, la principale piste d'amélioration envisagée concerne l'amélioration des performances. En effet, le taux de remplissage du digesteur modulable est à peine de 30 % alors que celui des digesteurs à dôme fixe est de plus de 75 %. Un remplissage plus important des fûts permettrait de traiter une plus grande quantité de matière et donc d'augmenter la production de gaz pour un même volume de digesteur. Un des moyens pour mettre en place cette amélioration serait d'augmenter la hauteur du fût de compensation afin de permettre des pressions plus élevées<sup>6</sup> au sein du digesteur.

### 5. Comparaison des technologies biodigestives

Comme mentionné au point 2.2, le digesteur à dôme fixe semble être jusqu'à présent la meilleure technologie dans le domaine des digesteurs domestiques rustiques. Afin d'évaluer la pertinence du digesteur modulable sur le marché, une comparaison entre ce dernier et le digesteur à dôme fixe est proposée. De manière succincte, les résultats de cette comparaison sont repris dans le tableau ci-dessous.

Paramètres de comparaison	Unité	Digesteur modulable	Digesteur à dôme fixe
Capacité de production max*	Nm <sup>3</sup> /j	~0,200	0,250 – 0,375
Performance <sup>7</sup>	L/kg	?	36,47
Pression de sortie moyenne	mbars	20 – 30	45
Facilité d'utilisation	/	=	=
Facilité de montage	/	++	-
Robustesse	/	-	++
Facilité de maintenance	/	+	-
Flexibilité	/	+	-
Taux de remplissage	/	40 %	75 %
Capacité de stockage interne	h	22	12
Coût*	francs CFA	115 000	75 000

\*Calculé pour 1 m<sup>3</sup> de digesteur

En conclusion, les principaux avantages du digesteur à dôme fixe sont sa grande capacité de production, sa robustesse et son coût relativement faible<sup>8</sup>. Du côté du

<sup>6</sup> N.B. : la pression maximale admissible au sein du digesteur est directement liée à la hauteur de la colonne de substrat présent dans bassin de compensation.

<sup>7</sup> La performance d'un biodigesteur est sa capacité à transformer une matière organique donnée en biogaz. Elle s'exprime en litres de gaz par kg de matière digérée.

<sup>8</sup> Certes il reste plus élevé que celui du digesteur à dôme fixe mais généralement les installations sont plus petites, donc l'investissement de départ est moins important.

digesteur modulable, les principaux points forts sont sa facilité de montage, sa flexibilité et son adaptabilité à une diversité de contextes. Il reste cependant des améliorations à apporter afin d'atteindre les performances des digesteurs enterrés (comme cela est suggéré dans les pistes d'améliorations). Une fois cet objectif réalisé, le digesteur modulable aura sa place sur le marché car il offre une alternative pertinente et une complémentarité indéniable aux digesteurs à dôme fixe.

## 6. Perspectives envisagées

Le prototype actuel a le grand avantage d'être compact. Son utilisation pourrait donc être étendue au milieu urbain. Cependant, en milieu urbain le substrat disponible est différent. En effet, une partie moins importante de la population urbaine vit de l'agriculture. La principale source de matière organique serait donc les déchets de cuisine et les déjections humaines.

Pour ce qui est des déchets organiques ménagers, les sections de passage plus importantes permettent leur insertion dans le digesteur. Cependant, pour assurer une bonne méthanisation, il est préférable de les broyer le plus finement possible afin de maximiser la surface de contacts entre les matières et les microorganismes. Ceci est également valable pour les déchets verts. Il est à noter que les déchets organiques ont un potentiel méthanogène largement supérieur à celui de la bouse de vache. Avec un digesteur plus petit (moins de fûts) il serait dès lors possible de produire bien plus de gaz que ce qui a été obtenu jusqu'ici de manière à pouvoir couvrir l'ensemble des besoins d'un ménage.

Ensuite, concernant les déjections humaines, il faudrait envisager un raccordement direct des toilettes sur le digesteur<sup>9</sup>. Cela devra faire partie de la suite du développement même pour une utilisation rurale. L'enjeu pour rendre l'utilisation des déjections humaines possible est d'arriver à éviter toutes manipulations. Celles-ci sont désagréables et seraient rapidement abandonnées par les utilisateurs du digesteur.

Le digesteur modulable de par sa compacité et sa simplicité pourra être intégré dans un grand nombre de contextes surtout là où les digesteurs à dôme fixe ne peuvent être construits. Il faudra cependant veiller à apporter les adaptations nécessaires à chaque cas.

---

<sup>9</sup> Comme cela est déjà possible avec les digesteurs enterrés à dôme fixe.

## 7. Conclusion

Au-delà de la poursuite du développement et des avancées dans la conception, ce travail aura permis d'élargir le champ de vision sur l'étendue de ce qui existe déjà en matière de biogaz domestique et sur l'intégration de celui-ci aux différents contextes et cultures des pays du sud.

En effet, à la suite des investigations, nous avons appris à connaître le Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso et avons échangé à de nombreuses reprises avec celui-ci. Cela a permis non seulement de mieux appréhender la technologie des digesteurs enterrés à dôme fixe ainsi que le rôle et le fonctionnement du PNB-Bf mais également de découvrir les nombreuses autres actions menées partout dans le monde pour le développement et la promotion du biogaz domestique soutenus entre autres par la SNV.

C'est également au travers de ces échanges qu'il a été possible de prendre conscience plus sérieusement des limites et des contraintes intrinsèques à la production et à l'utilisation du biogaz. À partir de là, un regard nouveau sur les premiers prototypes a été posé. Nous avons ensuite repris à bras le corps la poursuite des travaux de développement du CEAS Burkina.

Afin de répondre aux objectifs fixés, la conception des biodigesteurs à base de barriques métalliques a été entièrement revue, ce qui a abouti à la réalisation d'un digesteur modulable de 1 m<sup>3</sup>. L'expérimentation de celui-ci s'est avérée très prometteuse. Son utilisation est aisée et son prix a pu être réduit par rapport aux précédents prototypes. De plus, une production constante a été obtenue et d'une bonne qualité bien que celle-ci reste un peu faible.

En conclusion, il est permis de dire que ce travail et ce stage, de par la multiplicité des activités et des tâches réalisées, ont permis bien plus que de simples avancées dans les travaux de développement. Ils ont surtout élargi le regard sur le biogaz domestique, son développement, son intégration et l'étendue de son implantation dans le monde. Toutes ces précieuses informations vont nous permettre plus que jamais de poursuivre de manière efficace, orientée et adaptée le développement et l'intégration des technologies liées au biogaz.

## 8. Sources

- [1] BANQUE AFRICAINE DE DEVELOPPEMENT & WWF, *Rapport sur l'empreinte écologique de l'Afrique*, Banque Africaine de développement & WWF, mai 2012.
- [2] CENTRE ÉCOLOGIQUE ALBERT SCHWEITZER BURKINA (page consultée le 6 mars 2018), *CEAS Burkina – Accueil*, <http://www.ceas-burkina.org/>
- [3] CHARLIER, C., *Chimie industrielle durable : introduction et procédés*, Institut Gramme de Liège, 2017.
- [4] DOMANSKI, L., HAUSMAN B. & LEFEBVRE J., *Poursuite du développement de digesteurs à biogaz au sein de l'Institut Gramme*, HELMo-Gramme (section Génie Energétique Durable), 2017.
- [5] GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE (page consultée le 6 mars 2018), *Données – Burkina Faso*, <https://donnees.banquemondiale.org/pays/burkina-faso>
- [6] NGOGA E., *Suivi du fonctionnement des digesteurs domestiques au Rwanda*, Arlon, Université de Liège, Département des sciences et gestion de l'environnement, mémoire inédit (présenté en vue de l'obtention du grade de master en sciences et gestion de l'environnement, option énergie-environnement), 2011.
- [7] PNB-BF, *Conférence internationale sur la technologie du biodigester – Rapport général*, Ouagadougou, PNB-Bf, novembre 2017.
- [8] PROGRAMME NATIONAL DES BIODIGESTEURS DU BURKINA FASO (page consultée le 6 mars 2018), *PNB-Bf – Accueil*, <http://www.pnb-bf.org/>
- [9] SNV & PPRE, *Compact course on Domestic Biogas Technology and mass dissemination*, version Avril 2017, University of Oldenburg, 2017.
- [10] ZIMMERMANN N., *Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso*, Liège, HELMo-Gramme, mémoire inédit (présenté en vue de l'obtention du grade de master en sciences de l'ingénieur industriel, finalité industrie), 2017.





# Développement d'un échangeur-accumulateur de chaleur pour une maison basse consommation

M. Sc. Y. VAISSAUD  
Dr Ir. V. HANUS  
PIERRARD – Virton

*Cet article détaille la conception et le test d'un échangeur-accumulateur de la chaleur intégré dans la ventilation pour le chauffage d'une maison basse consommation. Une simulation permet de guider le choix d'un design de l'échangeur. Le design final est sélectionné en respectant les contraintes de fabrication. Ensuite, le prototype de l'échangeur est couplé à une pompe à chaleur (PAC) avec un système de ventilation en laboratoire, permettant d'évaluer sa performance (puissance échangée et capacité de stockage) et de la comparer à la simulation.*

*Mots-clefs : simulation thermodynamique, échangeur de chaleur, pompe à chaleur.*

*This article explains the development process of a heat accumulator-exchanger integrated in a ventilation system for modern low consumption house. Thermodynamic simulation is done to obtain fundamental design parameters. The final design is selected based on fabrication constrains. The exchanger is connected to a heat pump with ventilation system in laboratory, in order to evaluate its performance and compare to the simulations.*

*Keywords : thermodynamic simulation, heat exchanger, heat pump.*

## 1. Contexte et objectifs

### 1.1. Contexte

La pompe à chaleur (PAC) est un système thermique qui extrait la chaleur d'une source froide et la transfère dans le milieu chaud. La chaleur obtenue est la somme de la chaleur extraite par la source (froid) et l'énergie requise pour alimenter le compresseur. Le coefficient de performance (COP) est défini comme le rapport entre la quantité d'énergie délivrée au milieu chaud par rapport à l'énergie consommée par le compresseur. Le COP se dégrade quand l'écart de température entre les deux échangeurs (condenseur et évaporateur) augmente [1].

Aujourd'hui, la consommation d'énergie dans une maison individuelle diminue au fur et à mesure que les standards d'isolation évoluent. Une maison passive (15 kWh/m<sup>2</sup>an) consomme 250 W en moyenne pour chauffer une maison de 150 m<sup>2</sup> à l'aide des technologies d'isolation thermique et de la Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) Cette évolution permet d'utiliser la PAC comme une source de chauffage (et rafraîchissement) à la place d'un chauffage classique (système combustible ou radiateur électrique).

L'accumulateur est un appareil stockant de la chaleur pour la restituer ensuite, utilisé souvent avec le chauffage pour optimiser la consommation (notamment lisser la production en comparaison des pics de consommation, éviter des arrêts-démarrages intempestifs, etc.). Ainsi, dans une pompe à chaleur délivrant de l'eau chaude, un stockage de cette eau chaude est généralement organisé à cette fin.

L'idée innovante de la société Cesi Power Exchanger est d'intégrer cet accumulateur dans l'échangeur de chaleur même et de diminuer ainsi la consommation totale pour le chauffage d'une maison moderne de basse consommation avec une PAC air-air en supprimant le fluide intermédiaire utilisé habituellement pour le stockage de chaleur (classiquement, un ballon tampon). Ce type de PAC puise la chaleur directement dans l'air extérieur via son évaporateur pour l'injecter directement à l'air intérieur via son condenseur. Ce faisant, on peut réduire l'écart de température entre le fluide frigorigène dans le condenseur et l'air ambiant de la maison, vu que l'introduction d'un fluide intermédiaire tel que l'eau augmente cet écart de température. Cela a pour incidence d'augmenter le COP de la pompe à chaleur.

### 1.2. Objectif et approche

L'objectif de la recherche est de concevoir et réaliser un système d'accumulateur-échangeur de chaleur intégré avec un système de PAC, au niveau de son condenseur, qui redistribue sa chaleur dans l'habitation au moyen d'une VMC (voir figure 1).

Comme l'air a une faible capacité thermique, ce système ne convient que pour des habitations à faible besoin en puissance thermique. La chaleur est stockée dans une masse importante d'un béton réfractaire qui possède une capacité de stockage thermique importante. Sa densité (environ  $3000 \text{ kg/m}^3$ ) permet de stocker la chaleur et il peut être facilement moulé pour fabriquer l'échangeur.

Dans ce but, la première étape est une simulation 1D thermodynamique pour quantifier l'échange en tenant compte des contraintes de fabrication dans le but d'obtenir les designs possibles pour un échangeur. La simulation par éléments finis (2-3 D) est réalisée pour confirmer les performances d'échange et de déstockage. Ces performances sont évaluées et confirmées par les moyens expérimentaux au laboratoire en utilisant une PAC commerciale et un système de ventilation.

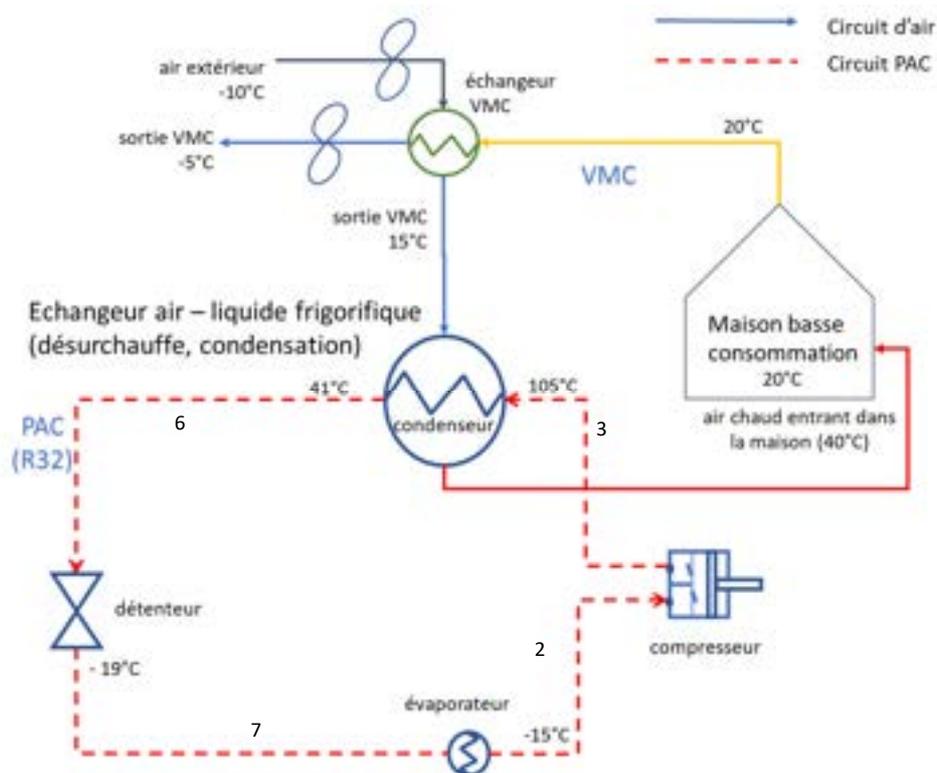


Figure 1 : Schéma de l'échangeur-accumulateur dans le circuit de la PAC

## 2. Modélisation du système

### 2.1. Chauffage avec une PAC et une VMC double flux

La source de chaleur (imposée par le cahier des charges) est une pompe à chaleur utilisant un liquide frigorigère, en l'occurrence le R32.

L'état de R32 à chaque position d'un cycle de PAC est défini comme suit (voir également figure 1) :

- 1 : Fin de l'évaporation dans l'évaporateur
- 2 : Sortie surchauffée de l'évaporateur, entrée du compresseur
- 3 : Sortie surchauffée du compresseur, entrée du condenseur (entrée d'échangeur)
- 4 : Début de condensation dans le condenseur
- 5 : Fin de condensation dans le condenseur
- 6 : Sortie sous-refroidie du condenseur, entrée du détendeur (sortie d'échangeur)
- 7 : Sortie du détendeur, entrée de l'évaporateur

Considérant une maison passive moderne, cette dernière est équipée d'une VMC double flux avec récupération de la chaleur sur l'air vicié. L'air qui entre dans la PAC est plus chaud que celui de l'extérieur ( $T_{\text{air [6]}} = 15^\circ\text{C}$ ). La puissance thermique de la PAC est de 3 kW. Le pincement de condenseur (position 4) est choisi égal à  $6^\circ\text{C}$ .

Le calcul du cycle permet d'obtenir la figure 2. Les valeurs des propriétés physiques du liquide frigorigène sont synthétisées dans le

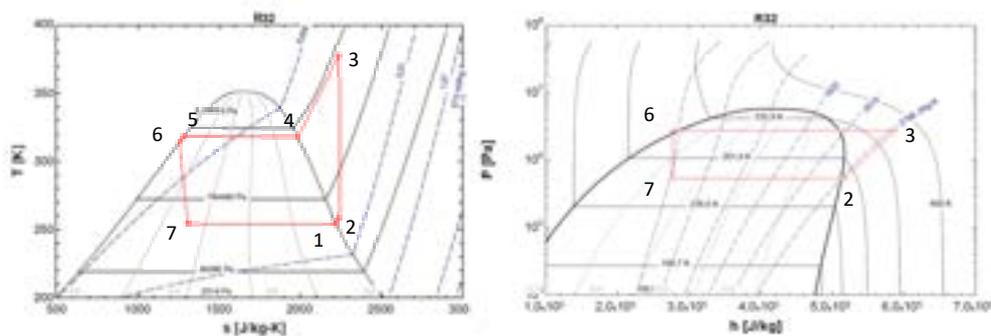


Figure 2 : Cycle de la PAC avec le R32

	h [J/kg]	p [bar]	T [C]
point 1	510,3	4,21	-18,9
point 2	514,6	4,19	-14,9
point 3	598,4	27,91	104,7
point 4	510,3	27,91	45
point 5	286,2	27,91	45
point 6	277,3	27,91	41
point 7	277,3	4,21	-18,9
point 8	510,3	4,21	-18,9

Tableau 1 : Propriétés des points du cycle avec le réfrigérant R32

## 2.2. Conception de l'échangeur (condenseur) et simulation 1D

### Concept

L'échangeur est situé au niveau du condenseur dans la PAC (entre les points 3 et 6). En traversant le circuit du condenseur, le liquide frigorigène R32 transfère son énergie à l'air et change de phase, passant par la désurchauffe (entre 3 et 4), la condensation (entre 4 et 5) et le sous-refroidissement (entre 5 et 6). Des tubes sont insérés dans un milieu en béton pour le passage de l'air. Au moyen d'un circuit frigorifique, la chaleur de la PAC est transférée du liquide au béton, stockée partiellement dans celui-ci et transférée à l'air (voir figure 3). Comme l'air passe de manière rectiligne, l'échangeur est à la fois co-courant et contre-courant. Pour simplifier la modélisation, il est modélisé comme un échangeur à contre-courant.

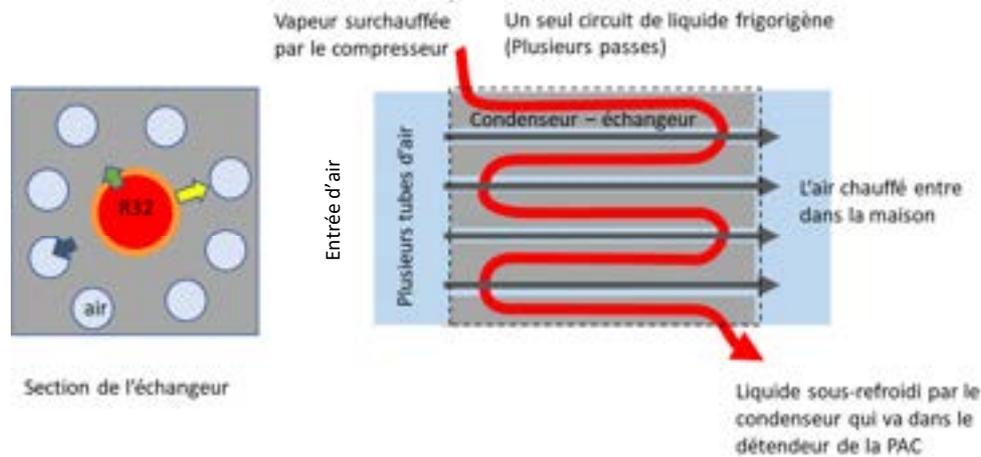


Figure 3 : Conception de l'échangeur

Les circuits de R32 et d'air sont isolés physiquement du béton respectivement par des tuyaux en cuivre et en aluminium (diamètre intérieur de 6 mm et diamètre extérieur de 8mm). Les tuyaux pour R32 sont pliés dans l'échangeur pour avoir la longueur suffisante pour condenser. Le rayon de cintrage est limité à 22 mm, du fait des contraintes mécaniques et de l'appareil de cintrage.

La paroi de l'échangeur en béton doit être suffisamment épaisse pour pouvoir couler le béton entre les tuyaux. Une étude de fabrication oriente le choix vers un espace de 7 mm.

Pour le côté de l'air (côté chauffé) :

- La perte de pression d'air est limitée à un maximum de 30 Pa. Ceci est raisonnable, comparé à la différence de pression générée par une VMC (300-400 Pa). La solution pour garantir cette limite de perte est de diminuer la longueur ou d'augmenter la surface de passage de l'air.
- Le débit d'air est de 400 m<sup>3</sup>/h (maison moyenne, basse consommation).
- Le transfert de la chaleur requis est de 3000 W (pour limiter la température de l'air à maximum 40°C lorsqu'il est soufflé dans l'habitation, suite à des considérations de sécurité ; il faut évidemment éviter de pulser cet air directement dans un volume occupé).

### **Modélisation de l'échangeur**

Le flux de chaleur total est donné par la conductance (inverse de la résistance  $R$ ) totale de l'échangeur [1, 2] :

$$Q = UA\Delta T (= 3000 W) \quad (1)$$

$\Delta T$  : différence de température moyenne logarithmique [K], et

$AU = R^{-1}$  : conductance [W/K].

Cette chaleur est consommée pour désurchauffer, condenser et refroidir le R32 dans le condenseur (2). Ce bilan énergétique est applicable pour chaque phase (désurchauffe, condensation, sous-refroidissement) :

$$Q = \dot{m} \times (h_{r[3]} - h_{r[6]}) (= 3000 W) \quad (2)$$

$\dot{m}$  : flux [kg/s], et

$h_{r[i]}$  : enthalpie de chaque point  $i$  [J/kg].

La résistance thermique est la somme de la résistance de chaque échange (convection ou condensation du R32, conduction des parois en béton, convection entre le béton et l'air).

$$(UA)^{-1} = R_{R32} + R_{conduction-béton} + R_{air} \quad (3)$$

Soit un exemple de la zone désurchauffée (points 3 à 4) : pour les 2 surfaces d'échange (air -béton et R32-béton), le coefficient échange est obtenu comme suit.

Pour l'air :

$$\begin{aligned} R_{air\_34}^{-1} &= h_{air\_34} A_{air\_34} \\ A_{air\_34} &= \pi D_{air} \times L_{air\_34} \times N_{air} \\ (L_{air\_34} &= L_{echangeur} \times Ratio_{34}) \end{aligned} \quad (4)$$

$A_{air\_34}$  : surface totale d'échange d'air de la zone de désurchauffe [m<sup>2</sup>],  
 $Ratio_{34}$  : ratio de la zone de désurchauffe par rapport à la surface totale, et  
 $L_{echangeur}$  : longueur d'un bloc d'échangeur.

Pour le R32,

$$\begin{aligned} R_{R32\_34}^{-1} &= h_{R32\_34} A_{R32} \\ A_{R32\_34} &= \pi D_{R32} \times L_{R32\_34} \times N_{R32} \\ (L_{R32\_34} &= L_{R32} \times Ratio_{34}) \end{aligned} \quad (5)$$

$L_{R32}$  : longueur d'un circuit de R32 (le débit de R32 est réparti entre différents circuits),

$N_{R32}$  : nombre de circuits de R32, et

$h_{R32\_34}$  : coefficient de convection [W/m<sup>2</sup>K], obtenu pour de la convection forcée dans un tube.

Pour la conduction de béton, on considère un échange cylindrique (voir figure 4) :

$$\frac{1}{R_{conduction}} = \frac{2\pi\lambda_{béton} \times L_{echangeur} \times Ratio_{L\_vapeur} \times N_{air}}{\ln\left(\left(\frac{D_{R32}}{2} + \text{Distance}_{R32-Air}\right) / \frac{D_{R32}}{2}\right)} \quad (6)$$

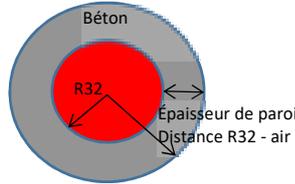


Figure 4 : Échange cylindrique

Le bilan énergétique de la phase de désurchauffe est obtenu comme suit :

$$Q_{34} = \frac{1}{R} \Delta T_{34} = AU \Delta T_{34} = \dot{m} \times (h_{r[3]} - h_{r[4]}) \quad (7)$$

Le ratio de désurchauffe  $Ratio_{34}$  reste inconnu. Il est obtenu par les équations suivantes (voir figure 5) :

$$\begin{aligned} Q &= Q_{34} + Q_{45} + Q_{56} \\ Ratio_{34} + Ratio_{45} + Ratio_{56} &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Il existe plusieurs designs d'échangeur qui satisfont l'échange requis. Le design final est proposé en considérant la limite de poids de chaque échangeur.

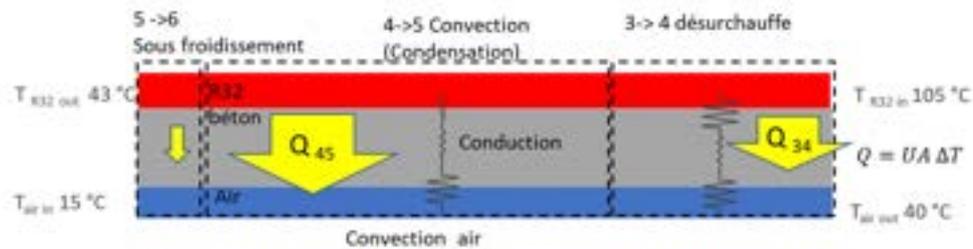


Figure 5 : Image de la simulation 1D pour échangeur

### 2.3. Design final de l'échangeur

Le design d'un seul échangeur satisfaisant l'échange de 3kW pèse près de 300kg, ce qui est difficile à transporter. En divisant l'échangeur et le circuit de R32 en plusieurs unités (ou blocs) et en acceptant l'assemblage au moment d'installation, une unité pesant moins que 50 kg est réalisable (mais cela a pour conséquence d'augmenter le poids de l'ensemble). Plusieurs designs sont étudiés selon la démarche de la figure 6.

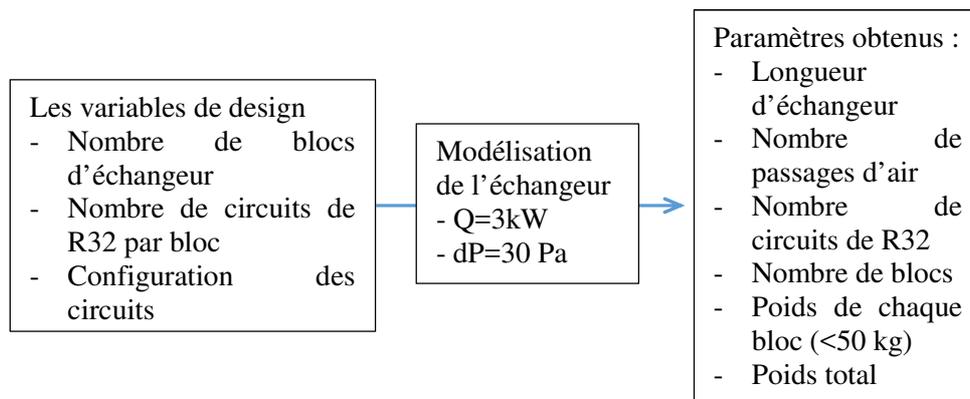


Figure 6 : Exemples de designs proposés et les paramètres étudiés

Le design de la figure 7 est proposé comme modèle final. Il se compose de 15 unités de 50 kg, placées verticalement, prévues pour être transporté par 2 opérateurs. Au total, 1260 passages d'air (en aluminium) et 45 circuits parallèles de R32 cintrées sont insérés. Le nombre important de passages d'air est dû à la modeste conductance du côté de l'air (19 W/m<sup>2</sup>K) et la contrainte de limiter la perte de charge d'air à 30 Pa. Avec ce design, le transfert de la chaleur estimé est de 3,15 kW.

Les détails des paramètres de l'échangeur (conductance, transfert et longueur de chaque phase) sont donnés dans le tableau 2.

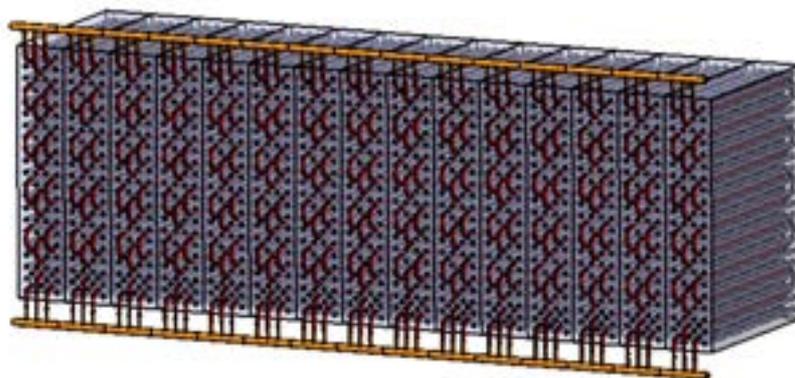


Figure 7 : Aspect de l'échangeur

	Unité	Désur- chauffe	Condensa- tion	Sous-re- froidissement	Total
Chaleur transférée	W	875	2251	26	3152
Longueur	m	48	151	3	203

Tableau 2 : Résultats du design de l'échangeur

#### 2.4. Estimation du transfert (par éléments finis 2D et 3D)

Pour la géométrie proposée, des simulations par éléments finis (avec le logiciel ABAQUS) sont effectués en 2D et en 3D dans le but d'affiner l'estimation de transfert en dimensions réelles (plus précises que la modélisation 1D précédente) et d'évaluer le déstockage. La modélisation 2D est faite pour 3 plans (entrée-centre-sortie du point de vue de l'air) et la température et le transfert moyennés à chaque plan sont extraits. La taille de maillage en 2D est environ 2,5 mm.

##### *Conditions limites*

Le logiciel utilisé (ABAQUS) permet de modéliser la convection au moyen de la condition « interaction » de chaque surface. La température du fluide et le coefficient de transfert sont à définir (figure 8). Le calcul thermodynamique 1D précédent donne les paramètres nécessaires pour la modélisation thermodynamique (répartition de la zone de désurchauffe, condensation et sous refroidissement, coefficient de transfert). Ainsi, les conditions limites de chaque surface sont appliquées pour une première étape de calcul afin d'évaluer la chaleur transférée par l'échangeur, puis la condition limite du R32 est modifiée comme une condition adiabatique ( $h=0$ ) pour simuler le

déstockage de la chaleur dans l'air. Cela simule l'arrêt de la PAC et le refroidissement avec l'air à chauffer (performance de l'accumulateur).

Les propriétés du béton réfractaire sont :

- Conductivité : 7,05 [W/m.K]
- Capacité thermique : 700 [J/kg.K]
- Densité : 2680 [kg/m<sup>3</sup>]

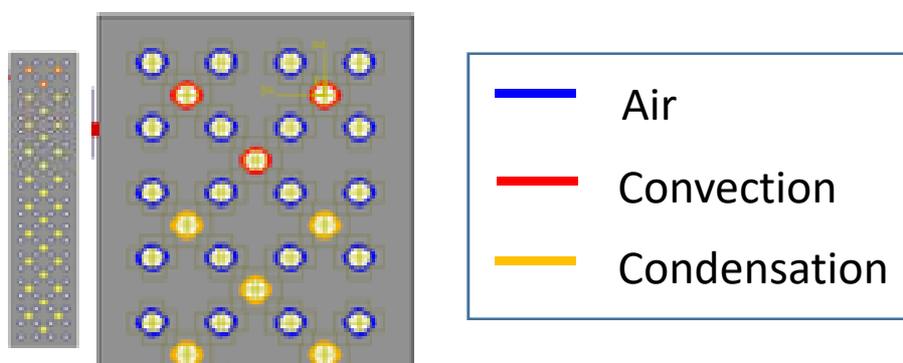


Figure 8 : Conditions limites dans ABAQUS

### Résultats

La température moyenne est plus élevée à la sortie de l'échangeur (plan 3) à cause de la température de l'air plus élevée à cet endroit. Comme la différence de la température entre l'air et le R32 diminue, le transfert de chaleur diminue selon la longueur de l'échangeur. Le transfert moyenné des 3 plans simulés (la somme des flux de chaque plan est pondéré (entrée  $\frac{1}{4}$ , centre  $\frac{1}{2}$ , sortie  $\frac{1}{4}$ )) au moment de stabilisation est 4,36 kW (étape 1), proche de la valeur du plan au centre (4,41 kW). Vu la faible différence avec le modèle 3D (4,66 kW), la modélisation d'un plan 2D au centre semble suffisamment précise. L'échangeur peut transférer la chaleur produite par la PAC de 3 kW (figure 9). Ce résultat confirme la précision de la simulation 1D, comparée à la simulation plus précise.

### Le déstockage et le besoin de contrôle

Le transfert pour tous les modèles en état de déstockage est extrait de la même manière. L'échangeur dissipe beaucoup sa chaleur stockée au début du déstockage, vu la différence de température importante entre l'air et l'échangeur. Le transfert entre 0 et 1240 s est supérieur à 3 kW, puis au fur et à mesure que l'échangeur refroidit, le transfert diminue. Ce déstockage doit rester inférieur à 3kW pour chauffer la maison de manière régulière. Pour cela, le contrôle par le débit d'air chauffé au moyen d'un by-pass est installé dans le système de laboratoire : ce by-pass servira de régulation pour adapter la puissance de l'accumulateur au besoin de l'habitation.

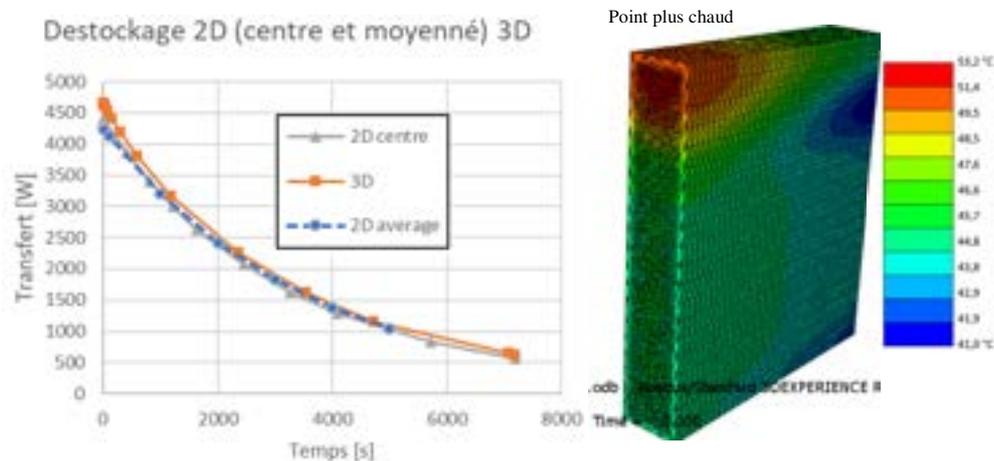


Figure 9 : Résultats des simulations éléments finis

### 3. Réalisation du système de chauffage en laboratoire

#### 3.1. Fabrication de l'échangeur et du système de ventilation

##### *Fabrication*

Les blocs d'échangeur sont fabriqués par coffrage. 15 coffrages sont montés avec les tuyaux insérées dedans, puis le béton est coulé et étuvé. Les tuyaux en cuivre sont soudés par un système de répartition parallèle appelé « clarinette ». L'échangeur est installé au sein du laboratoire et connecté à la PAC et le système de ventilation en extraction avec les systèmes de mesure appropriés.

##### *Gaine, isolant, conduit*

L'échangeur est enveloppé par un isolant de 5 cm d'épaisseur en PIR (Polyisocyanurate ;  $\lambda=0,022$  W/m.K). La connexion de tuyaux en cuivre est recouverte également par un isolant de conduites de chauffage en polyéthylène. Le caisson et les pièces de forme de l'échangeur ont été dessinées sur mesure pour correspondre à la dimension exacte de l'échangeur après la livraison.



Figure 10 : Échangeur couvert par l'isolant (gauche), puis enveloppé dans la gaine

### **Extraction d'air**

Le système de mesure d'étanchéité « BlowerDoor Minifan » est utilisé pour réaliser un flux de l'air de 400 m<sup>3</sup>/h en mode d'extraction. Selon le calcul obtenu via la simulation 1D, la perte de charge attendue devrait tourner autour de 28 Pa. Le diamètre des conduits est fixé à 355 mm pour faciliter la connexion avec le ventilateur Duct Blaster (ventilation de BlowerDoor mini, environ 345 mm).

### **By-pass**

Selon la simulation par éléments finis, l'échangeur dissipe beaucoup sa chaleur stockée au début du déstockage. Afin de reproduire une chauffe régulière et d'augmenter la durée de chauffage par déstockage, une partie de l'air entrant à l'échangeur est by-passé et son débit est ajusté par le clapet pour fournir l'air à une température constante après le mélange entre le flux passant dans l'échangeur et le flux du by-pass.

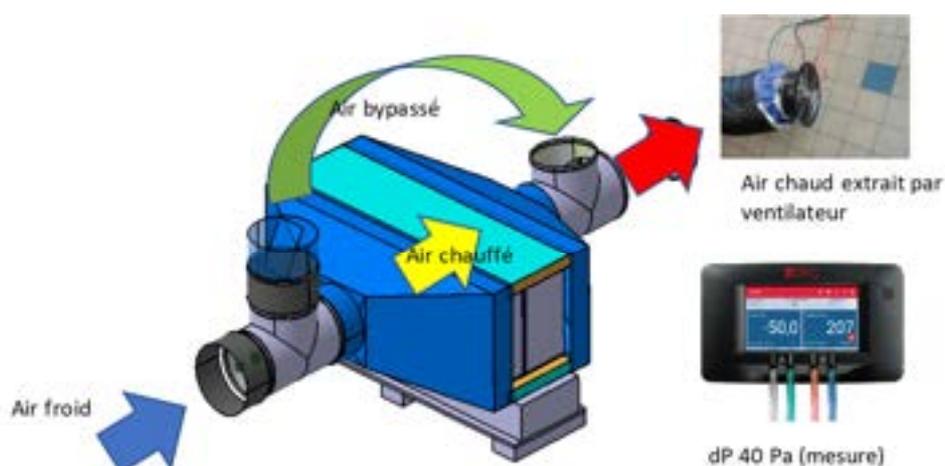


Figure 11 : Ventilation et conduit d'air

### 3.2. Connection à la PAC

Une PAC commerciale a été sélectionnée : Panasonic Etherea (ZCU-Z35TKE) R32 (3,5 kW). Elle est composée de 2 unités : l'unité intérieure (échangeur-condenseur) et l'unité extérieure (compresseur, détenteur et échangeur évaporateur).

Pour l'usage présent, l'échangeur et le système de ventilation remplacent l'unité intérieure. Cette dernière reste connectée électroniquement à l'unité extérieure pour la contrôler, mais la liaison frigorifique avec n'est pas mise en place.

### 3.3. Système de mesure de température

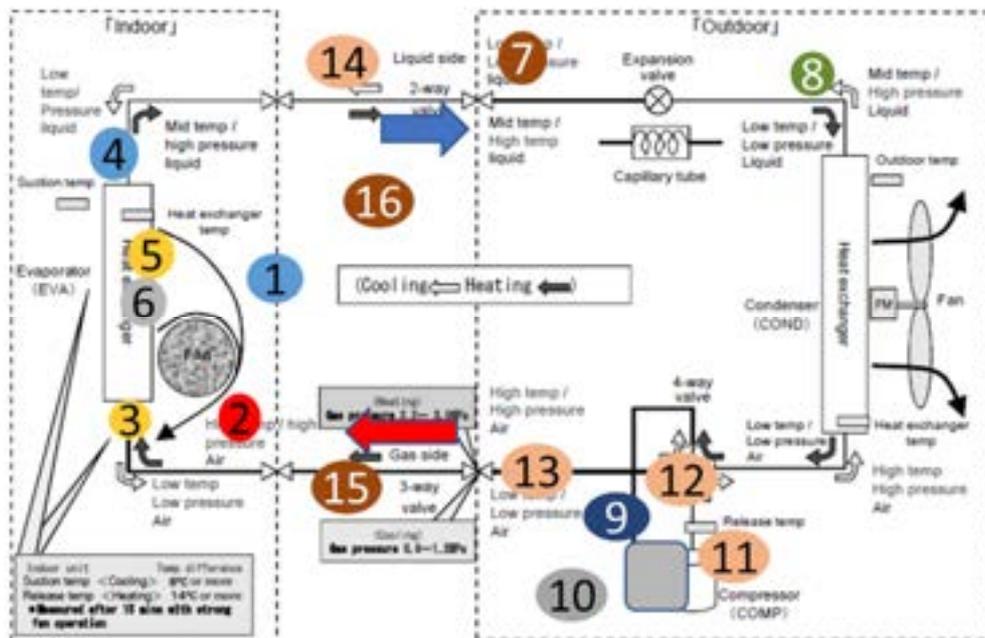


Figure 12 : Position des Pt100 dans le circuit de la PAC [4]

La mesure de température est réalisée par Pt100 pour les positions suivantes (figure 11) :

- L'entrée (1) et la sortie (2) d'air ;
- L'entrée (3) et la sortie (4) de R32 ;
- Entre des blocs de l'échangeur (x 2) (5), (6) ;
- Les autres points :
  - o PAC : vanne 2 voie (7), après le détenteur (8) (position 7 dans la figure 2), à l'aspiration du réservoir (9), au réservoir (10), au

- compresseur (11), au refoulement du compresseur (12), à la vanne de 3 voies (13) ;
- La connection entre l'unité intérieure et l'unité extérieure (côté gaz et côté liquide) (14), (15) ;
  - L'air dans le laboratoire (16).

## 4. Test de l'échangeur

### 4.1. Fonctionnement du banc de test

#### *Modes de mesure*

3 modes de mesures sont appliqués pour évaluer l'échange et le déstockage :

- Mode de chauffage : la PAC fonctionne.
- Mode de déstockage libre : la PAC est arrêté, le by-pass est fermé.
- Mode de déstockage à température constante : la PAC est arrêté, le by-pass est contrôlé par le clapet pour maintenir l'air chaud à une température fixe après le mélange entre l'air de l'échangeur et l'air du by-pass.

Un exemple de mesure de chauffage – déstockage libre est montré à la figure 13.

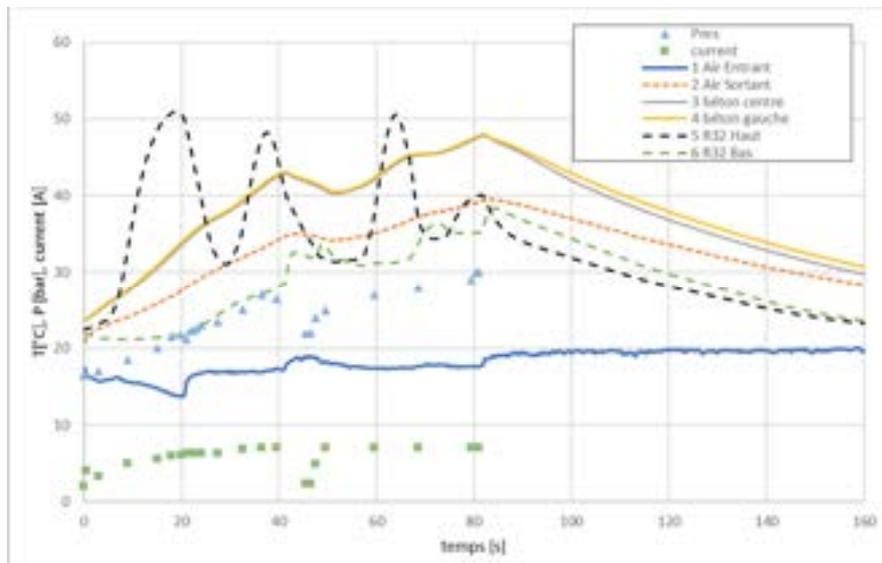


Figure 13 Exemple de mesure : chauffage par la PAC (0-84 minutes) et déstockage (après 84 min)

### Oscillation de la PAC

L'opération de la PAC de manière constante est difficile à réaliser et à analyser à cause d'oscillation de la température du côté du gaz R32 (voir figure 13). Elle atteint un maximum toutes les 15-20 minutes, puis baisse. Ceci peut être à cause de déclenchement du variateur de fréquence du compresseur ou un couplage inadéquat entre le design de l'échangeur et cette PAC. De plus, la pression de R32 dépasse le niveau maximum conseillée dans la documentation technique. La PAC est arrêtée toutes les 40 minutes pour faire baisser la pression.

### 4.2. Transfert en mode chauffage

La chaleur utilisée pour chauffer l'air est calculé par la formule suivante.

$$q_{air} = \dot{m}C_{air}\Delta T_{air} = \dot{m}C_{air}(T_{air\_sortie} - T_{air\_entrée}) \quad (9)$$

$\dot{m} \approx 0,134 \text{ kg/m}^3$  : débit massique d'air, et  
 $C_{air} = 1007 \text{ J/kg.K}$  : capacité thermique isobare.

La chaleur stockée ou restituée dans le béton est évaluée comme suit :

$$q_{béton} = m_{béton}C_{béton} \frac{dT_{béton}}{dt} \quad (10)$$

$m_{béton} = 750 \text{ kg}$ , et  
 $C_{béton} = 700 \text{ J/kg.K}$ .

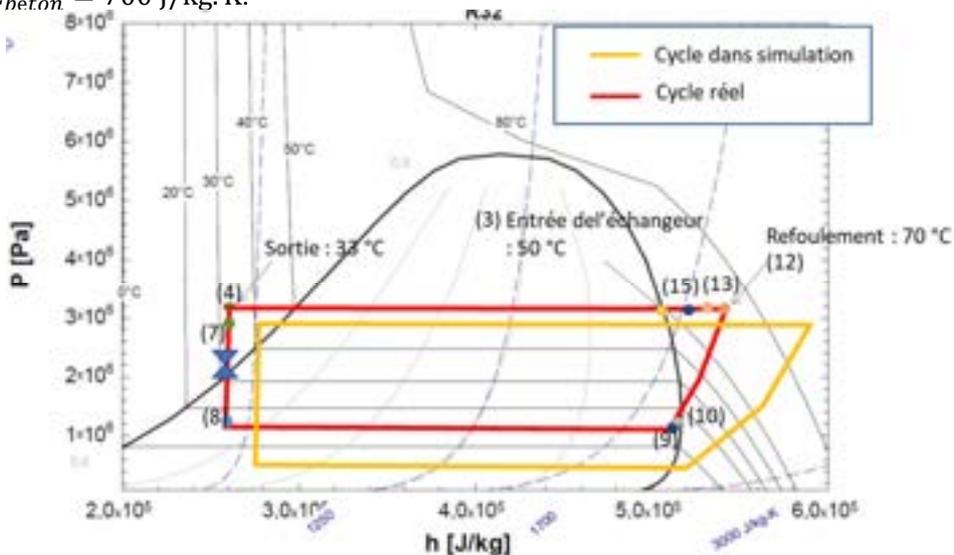


Figure 14 Cycle réel et cycle simulé de la PAC

Après 15 minutes de fonctionnement, l'air peut déjà être chauffé de 15 °C à 26°C (1,5 kW). La puissance transférée maximum (environ 3 kW) est plus modeste que l'estimation par éléments finis (4,6 kW). Ceci est dû à la température de refoulement et d'entrée d'échangeur plus basse (70°C et 55 °C au lieu de 105°C) que dans la simulation (positions 12 et 3 dans la figure 14). De l'isolant entoure les conduites contenant le R32, mais il n'est pas suffisant pour éviter cette perte. Selon l'étude comparative dans la documentation technique [4], cette perte est raisonnable, comparée aux autres séries de la PAC commerciales.

### 4.3. Déstockage libre et déstockage constant

#### *Puissance de déstockage constante*

Après le mode chauffage, la PAC est arrêtée et la mesure de déstockage commence. La température initiale de l'échangeur en début de déstockage est d'environ 48 °C. La puissance du mode constant appliqué est de 1,92 kW. Ceci équivaut à une différence de la température de l'entrée et de la sortie 15 °C. (entrée à 20°C et sortie à 35 °C).

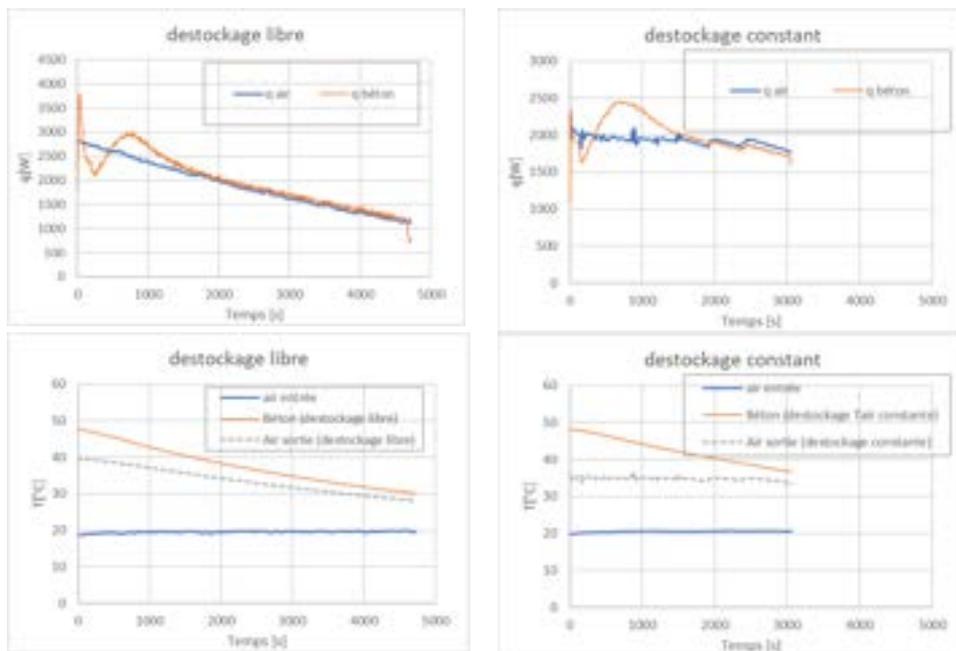


Figure 15 Température (haut) et puissance (bas) pour le déstockage libre (gauche) et à température constante (droite)

### ***Aperçu de mesures de déstockage***

Dans les parties à droite de la figure 15, la puissance de déstockage à température constante est maintenue environ 40 minutes. Avec la décharge libre (figures de gauche), la puissance atteint à ce même niveau après environ 30 minutes de déstockage. La perturbation est observée au début du déstockage mais les puissances s'équilibrent après 25 minutes, du fait de la stabilisation du R32.

### ***Déstockage mesuré et estimé par la simulation***

Mis à part les pertes au travers de l'isolation (vérifiées comme négligeables), la chaleur restituée par le béton est totalement utilisée pour chauffer l'air et les puissances dans les équations (9) et (10) sont identiques. L'énergie totale déstocké vaut :

$$E_{total\_destock} = \int_0^{t_{end}} q_{béton} dt [J] = \int_0^{t_{end}} q_{air} dt [J] \quad (11)$$

Pour le mode de déstockage à température constante, cette énergie est proportionnelle au temps de déstockage.

$$E = q \times t_{end} [J] = \dot{m}C_{air}\Delta T \times t_{end} \quad (12)$$

La puissance correspondante (pente) vaut 1,92 kW (figure 16). La mesure du déstockage à température constante est proche de cette pente. La courbe obtenue par éléments finis surestime le déstockage par rapport à la mesure.

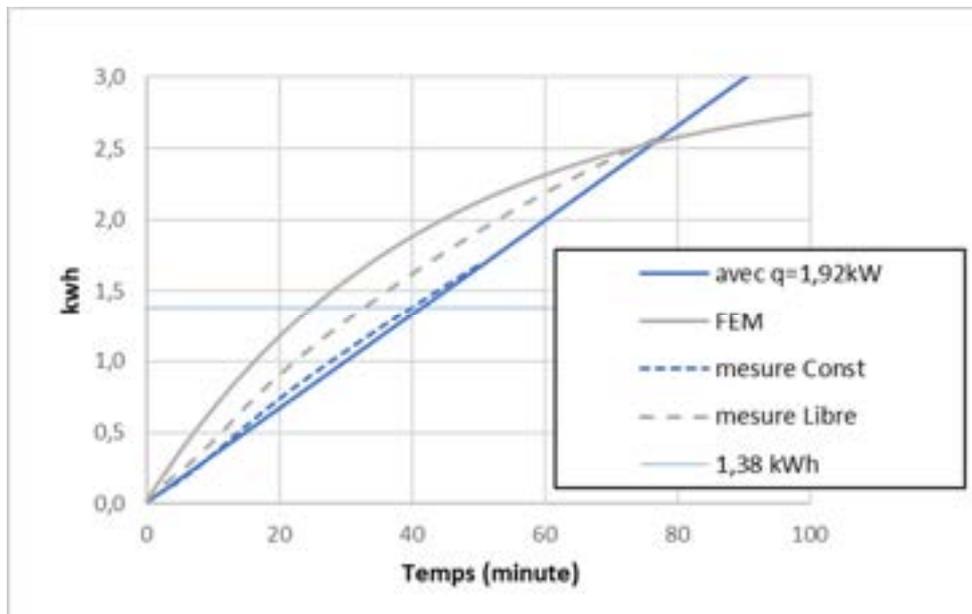


Figure 16 : Énergie restituée pour différentes conditions

L'énergie restitué en 39 minutes de déstockage à température constante est de 1,38 kWh (4968 kJ). En déstockage libre, cette chaleur s'épuise en 32 minutes. L'avantage de la régulation du déstockage représente 7 minutes supplémentaires sans source de chaleur. Quant à la simulation, ce gain est 17 minutes (de 25 min à 42 minutes). Cette différence, qui vient probablement de la somme d'erreur de mesure, est expliquée dans la suite.

#### 4.4. Estimation du temps de déstockage contrôlé à partir du déstockage libre

Le déstockage à puissance constante s'arrête au moment où l'échangeur ne peut plus fournir la chaleur requise. Le temps effectif de déstockage à puissance constante peut être estimée à partir du déstockage libre mesuré expérimentalement.

Sans considérer la perte, la chaleur perdue par le béton est identique à celle transférée à l'air (puissance  $q(t)$ ). La différence entre la puissance requise ( $q_{fix}$ ) et la puissance de mode libre ( $q(t)$ ) jusqu'à ce que l'accumulateur s'épuise ( $t_0$ ) peut être consommée pour chauffer en puissance ( $q_{fix}$ ) jusqu'à la fin de déstockage ( $t_1$ ).

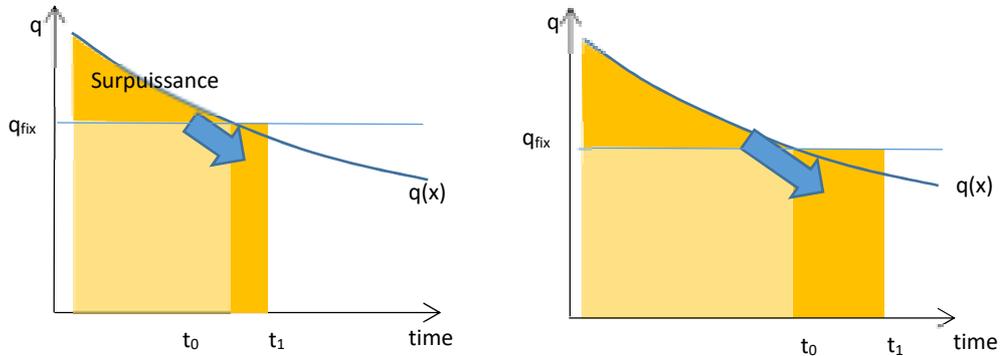


Figure 17 : Puissance en déstockage libre et contrôlé

Le bilan de cette 'surpuissance' jusqu'à  $t_0$  peut être transformée comme une puissance après décharge entre  $t_0$  et  $t_1$  :

$$\int_0^{t_0} (q(t) - q_{fix}) dt = q_{fix} \times (t_1 - t_0) \quad (13)$$

La puissance requise  $q_{fix}$  est calculée par l'équation (9) à partir des mesures (débit total, température d'air à l'entrée et à la sortie).  $q(t)$  est la chaleur perdue par le béton en déstockage libre (simulation ou mesure) selon l'équation (10) .

$$\int_0^{t_0} \left( m_{sic} c_{sic} \frac{dT_{beton}}{dt} \right) dt = q_{fix} \times t_1 \quad (14)$$

$$t_1 = \frac{\int_0^{t_0} \left( m_{sic} c_{sic} \frac{dT_{beton}}{dt} \right) dt}{q_{fix}}$$

Ce temps estimé pour décharger de manière constante diminue avec la puissance requise (voir figure 18).

Le temps maintenu en mode de déstockage à une puissance constante de 1,9 kW est de 39 minutes. Ceci se trouve sur la courbe de l'estimation réalisée à partir du mode en déstockage libre. Avec une mesure réalisée dans d'autres conditions (à une autre date), la puissance de 2,6 kW est maintenue pendant 25 minutes. Ce point est décalé de la courbe d'estimation, car les conditions de la mesure n'étaient pas identiques (les températures à l'entrée, à la sortie, et l'incertitude de mesure l'influencent). En conclusion, le temps de déstockage à puissance constante à partir de la mesure du déstockage libre peut être estimé si les conditions de la mesure sont identiques.

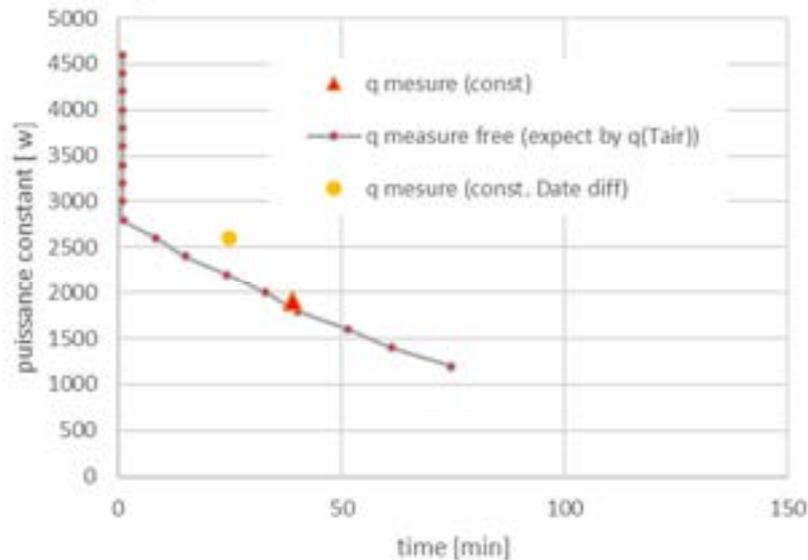


Figure 18 : Estimation du temps pour un déstockage à température constante, à partir d'un déstockage libre.

#### 4.5. Incertitudes potentielles

La différence entre la mesure et la simulation peut être expliquée par plusieurs raisons :

- la perte de chaleur dans le conduit d'air ;

- le calcul de la chaleur dans le béton (capacité thermique) ;
- la mesure du débit d'air qui n'est pas stable (de 380 à 430 m<sup>3</sup>/h, perte dans la conduite).

### **Perte de chaleur**

La perte de chaleur dans le conduit est négligée dans l'équation (11). Cependant, l'isolant ne couvre que les 4 côtés de l'échangeur et l'air chaud est au contact de l'acier de la pièce de forme et cause une perte de chaleur en convection (voir figure 19). Plus précisément, le bilan doit être corrigé comme suit :

$$q_{\text{béton}} = q_{\text{air}} - q_{\text{perte}} [J] \quad (15)$$

Cette surface non-isolée peut dissiper environ 50 à 300 W en mode de chauffage, ce qui présente 2 à 15 % d'erreur sur la mesure totale. Le coefficient U peut varier entre 0,5 et 3 selon les différentes mesures.

$$q_{\text{perte}} = UA\Delta T = \left( \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{e}{\lambda} (\approx 0) + \frac{1}{h_{\text{ext}}} \right)^{-1} A \times (T_{\text{chauffé}} - T_{\text{labo}}) \quad (16)$$



Figure 19 : Températures de la conduite et la pièce de forme en mode chauffage

### **Les propriétés physiques dans les calculs**

La capacité thermique de béton n'était pas fournie par le fabricant. Selon différentes sources, cette propriété varie entre 550 et 750 J/kg.K [5, 6]. La propriété influence directement sur le calcul de la chaleur restituée selon l'équation (10). Il est

donc possible d'inclure 10% d'erreur dans la mesure. La conductivité du béton est probablement surestimée (fournie à 1000 °C par le fabricant); cela peut surestimer la vitesse de déstockage.

### ***La mesure du débit d'air***

Le débit d'air n'était pas stable lors des mesures. La ventilation est réglée pour avoir un débit de 400 m<sup>3</sup>/h et est fixe au cours de la mesure. En réalité, la valeur affichée varie entre 380 et 430 m<sup>3</sup>/h (+/-7 %). Ceci peut être expliqué par l'espace insuffisamment ouvert par rapport au conseil d'utilisation du système de ventilation DuctBlaster [7]. À cause de la limite de place dans le laboratoire, l'espace ouvert requis d'au moins de 2 pieds n'était pas disponible. L'autre cause de l'instabilité est le changement des pertes de charge quand on modifie le by-pass.

### ***Incertitude totale***

Ces incertitudes potentielles peuvent expliquer la différence du déstockage par mesure et par simulation (environ 17%).

## **5. Conclusions et perspectives**

Un accumulateur-échangeur de chaleur fabriqué avec un béton réfractaire qui combine une PAC et un système de ventilation VMC est conçu à l'aide de différents outils de simulation thermodynamique (1D, 2D et 3D). L'échangeur fabriqué démontre ses performances d'échange et de déstockage.

La capacité de transfert mesurée est de 3kW, suffisante pour chauffer de l'air avec un débit de 400m<sup>3</sup>/h, mais à 2/3 de l'estimation initiale (4,6 kW), à cause de la température plus basse que prévue à la sortie de la PAC. Comme accumulateur, l'échangeur restitue une chaleur de 1,3 kWh en 32 minutes sans contrôle de la température par le by-pass d'air. En puissance constante à 1,9kW, la durée de déstockage est 39 minutes. Le gain de temps estimé par modélisation était 17 minutes. La différence entre la simulation et la mesure (environ 17 %) est expliquée par la somme de plusieurs incertitudes.

La précision de l'estimation peut s'améliorer ; toutefois, le concept de « échangeur-accumulateur » est confirmé comme réalisable. La proposition d'actions futures pour le client est plus orientée à l'industrialisation et à l'intégration de l'échangeur dans le système de chauffage réel (méthodes de fabrication, systèmes de ventilation pour contrôler le déstockage, PAC adaptée ou redimensionnement de l'échangeur de la PAC réversible et exploration du mode de rafraîchissement).

## 6. Sources

- [1] AUZENET, E., CLERC-REANUD, M., *Pompes à chaleur - Systèmes à compression de vapeur.*, Technique de l'ingénieur, 2005  
Adresse URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [2] NELLIS, G. & KLEIN, S., *Heat Transfer*  
New York, Cambridge University Press, 2009, pp. 829-838
- [3] HOLMAN, J., P., *Heat transfer*, 7<sup>e</sup> éd.  
New York, MacGraw-Hill, 1990, pp. 141-144
- [4] PANASONIC CORPORATION, *Service Manual for air conditioner*, 2017, pp. 101-103
- [5] AZO MATERIALS, *Properties and Applications*, (consulté en octobre 2018).  
Adresse URL : <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=42>
- [6] ACCURATU, *Ceramic Properties*, (consulté en octobre 2018).  
Adresse URL : <https://accuratus.com/silicar.html>
- [7] MINNEAPOLIS DUCT BLASTER®, *Operation manual*, 84 p.

## 7. Remerciements

Nous remercions MM. Alain PAULUS et Danny CAPIAU pour leur soutien financier et leur soutien technique pour installation de l'équipement de la PAC, et M. PAULUS pour son idée innovante d'échangeur-accumulateur.

Nous remercions également la région Wallon DGO6, pour son aide financière.





# Renewable Energy For Sea Water Reverse Osmosis Desalination Plants : Worldwide Screening For Implementation Potential

Ing. A. COOLEN  
ECAM - Bruxelles

*Cet article porte sur l'identification de différentes régions, par l'utilisation d'un logiciel d'information géographique (Geographical Information System - GIS), où l'on peut satisfaire la demande en eau par une installation de dessalement d'eau de mer de taille moyenne par le principe de l'osmose inverse (50-100 MLD), le tout alimenté électriquement par des énergies renouvelables (par exemple l'énergie solaire et éolienne). À travers différents scénarios, le coût global de l'eau sera comparé pour déterminer si cette installation constitue un investissement valable. Ce coût regroupe les coûts de l'installation, des énergies renouvelables, du terrain et des interconnexions.*

*Mots-clefs : SIG, cartographie, SWRO, eau, coût, énergie renouvelable*

*This article focuses on the idea to identify different locations, by using a Geographical Information System (GIS), where the demand for water could be met by mid-size sea water by reverse osmosis (SWRO) desalination plant (50-100 MLD) running on renewable energy (for example solar and wind energy). Through different scenarios, the global water cost will be compared to determine if this installation is worth the investment. This cost regroups the plant costs, the renewable energy costs, the land, and the interconnections.*

*Keywords : GIS, mapping, SWRO, water, cost, renewable energy*

## 1. Introduction

### 1.1. Water desalination

Water represents approximately 60% of the human body and the human body needs roughly 2,4 litres per day.

To produce drinking water, fresh water is mostly used. However, in some regions, the access to fresh water is more complicated. Therefore, other techniques have been invented. The most known technique is water desalination. As the ocean covers about 70% of the earth, many techniques exist :

- Reverse Osmosis (RO)
- Multi Stage Flash (MSF)
- Electrodialysis Reversal (ED)
- Ion eXchanges (IX)
- Distillation

Choosing one technique above another strongly depends on the salinity of the water, as shown in figure 1. The technique of reverse osmosis is considered nowadays as the most efficient and reliable. It can be used with either brackish water (mix of fresh and salt water) or sea water.

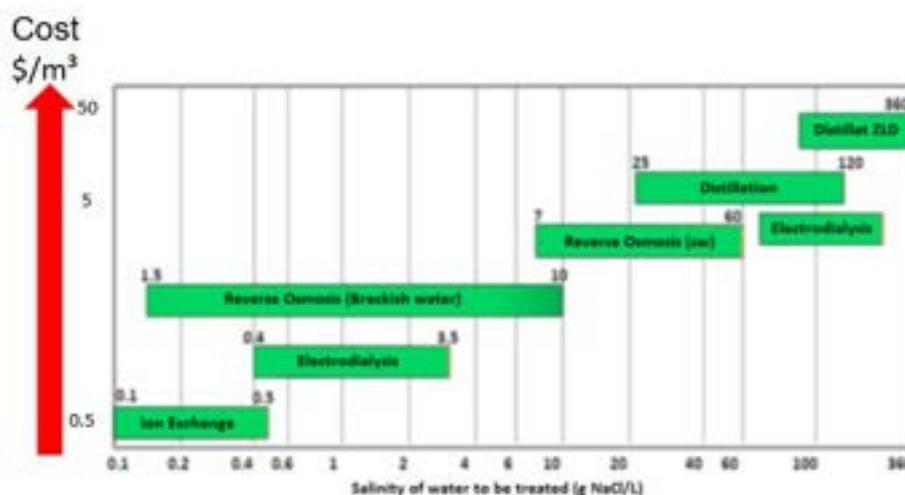


Figure 1 : Price of the water according to its salinity<sup>[1]</sup>

## 1.2. Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) desalination plant

The principle of reverse osmosis is to force a hypertonic solution to cross a semi-permeable membrane to a hypotonic solution, using a pump or a plunger. The pressure needed is higher than the osmotic pressure<sup>1</sup>.

A SWRO desalination plant consists of four main parts, as shown in figure 2 :

- Pre-treatment : used as a first chemical treatment of the sea water ;
- High Pressure Pump (HPP) : used to raise the pressure of the treated water above the osmotic pressure ;
- Membranes : used to apply the reverse osmosis principle ;
- Post-treatment : depending on the use of the water, it will be treated to match the requirements of the application.

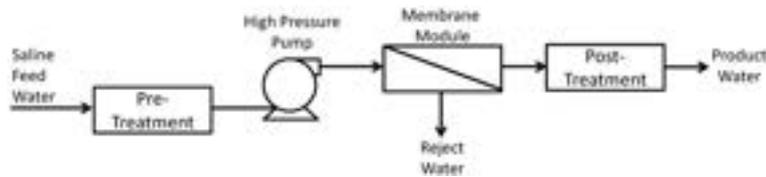


Figure 2 : Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) desalination plant schematics<sup>[10]</sup>

## 2. Power supply

The power supply analyzed in this study will focus on the Photo Voltaic (PV) solar panels and wind turbines.

The technology used for the solar panels will be Cadmium-Telluride for their lower carbon footprint compared to the Carbon-Silicon technology.

For this study, a 2 MWp (Mega Watt peak) wind turbine technology has been desided, since it is a classical value for today's technology.

---

1. The osmotic pressure is the equilibrium pressure necessary to cancel the exchange between the clean water and the concentrated solution.

### **3. Approach**

#### **3.1. The preparation**

First we identify the key technical parameters of the renewable-powered desalination plant impacting the cost of the water.

Then these parameters are derived for a location screening and gather maps in Geographical Information Software (GIS).

#### **3.2. Screening for a reference scenario**

The different target ranges for the screening parameters corresponding to the target water cost will be defined in the reference scenario.

By using ArcGIS, we will screen for locations where all the parameters are in the target range :

- Macro screening : water salinity, solar/wind resources, etc., i.e. reducing the screening domain;
- Micro screening : cities size, unconstructed land proximity & area, etc.

#### **3.3. scenarios**

For alternative scenarios, the previous point will be repeated. This will lead to a sensitivity analysis.

### **4. Key parameters**

There are 2 kinds of key parameters : those depending on the region of the world where the plant will be installed and those depending on the plant itself.

#### **4.1. Region**

The location influences the following parameters :

- Annual irradiation : stands for the irradiation over 1 year. This parameter is important for the installation of solar panels. Therefore the values of the irradiation will be for an optimal tilt angle and an azimuth of 0[°C] (oriented South).
- Annual wind speed
- Interest rate : is important to calculate the different costs. We will assume in the study that the interest rate does not vary.
- Electricity grid : represents the cost and percentage of electricity needed from

the grid.

- Total Dissolved Solids (TDS) : stands for the salinity of the water (its ion composition). A sea water with a high TDS will require a large amount of energy and pre-treatment (+ post-treatment) than a lower composition. An example of the composition of different types of sea water can be found in appendix A.

#### **4.2. Desalination plant**

For the desalination plant, these following parameters are important :

- Nominal power : the power required to supply the desalination plant ;
- Annual energy consumption.

### **5. Location screening**

The location screening will be carried out in 2 stages : first on a world scale, and then on a local scale (country map).

To determine the different locations, a GIS (Geographical Information System) software will be used, Arcmap, owned by esri<sup>®</sup>. This software combines layers to create a map. For this study, the maps that inform about wind (onshore), solar, water crisis, and sea water salinity conditions have been used.

By using this software, it is possible to visualize the data of the different maps and adapt them (ranges values, visibility, colors, etc.).

#### **5.1. World map**

A world map will be used to gather maps to determine the countries where there is a need for desalination/water treatment, the regions where solar or wind (onshore and/or offshore) energy is sufficient, and the global ocean salinity.

#### **5.2. Country map**

To select a country, the parameters of the world scale will have to be met first. The best countries will be those that meet all the criteria of the world scale. Once a country meets the parameters, the same analysis will be carried out but on a national scale : determine the cities where the demand matches the range of production of the desalination plant, determine where the desalination plant could be installed (unconstructed space) close to the city, determine an area for a solar farm within 10 km.

## 6. Reference scenario

The reference scenario will analyse the screening parameters to target the water cost. These different parameters are the access to water, the salinity of the water, the power required, the power generation plant, the area range of the desalination plant, the range of the acceptable water cost, and the range of the acceptable electric cost.

### 6.1. Access to water

According to the 2011 report of the World Health Organization (W.H.O.)<sup>[12]</sup>, one person should have access to 20 litres per day. This study will focus on the water consumption for an optimal access of water per person, which is, according to W.H.O., i.e. 100-200 L/capita/day<sup>[12]</sup>. For a desalination plant of 50 MLD, it is possible to determine the target population :

- 50 Mega liters per Day (MLD) = 50.000 m<sup>3</sup>/day
- 100 L/capita/day = 0,1 m<sup>3</sup>/day
- The city population will be  $\frac{50.000}{0,1} = 500.000$  persons

Therefore the target retained will be a population of 0,5 to 1 million people.

### 6.2. Salinity of the water

A sea water with a high ion composition will require a larger amount of energy and pre-treatment (+ post-treatment) than a lower composition. This is why treating river water requires less energy than sea water. The table in Annex A represents the average composition of the sea water. The regions in the Middle East are known for having more salty seawater than the worldwide average composition of sea water.

Since the region of installation has not been determined, this study will focus on a TDS value of the typical sea water, i.e. 34.483 mg/L<sup>[5]</sup>.

### 6.3. Power requirement

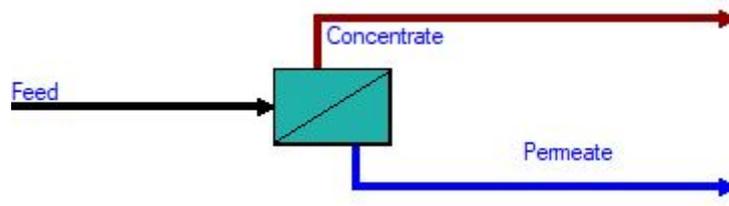
The desalination plant's power will not only vary on the output but also on its input.

These input values are :

- Ion composition : TDS = 34.483 mg/L
- Feed temperature :  $T_{\text{feed}} = 25[^\circ\text{C}]$
- pH = 8
- Recovery :  $v = 43\%$
- Stages in pass : 1
- Flow factor : 0,85
- Membranes : BW30-440i

Figure 3 represents the configuration for one membrane used in this study. To determine the power required, the ROSA<sup>2</sup> software has been used. To calculate the power consumption, the input values for the software are the values discussed previously.

The output values indicated by the software corresponds to an energy consumption of 3,96 kWh/m<sup>3</sup> for a typical seawater value. This means that for a 50 MLD desalination plant, the energy required should be about 198 MWh/day.



*Figure 3 : ROSA System configuration*

#### **6.4. Power generation plant**

This study focuses on the sustainability of the energy used to power the desalination plant. Nowadays, different technologies exist to create sustainable energy, such as solar, wind, hydropower, etc.

This study will focus on only 2 of these technologies, the solar and wind energy. The main advantage of using these 2 technologies is their maturity and their cost. As represented by Table 1, the levelized cost of electricity (LCOE) and the installation cost are one of the lowest in comparison to other technologies.

---

2. ROSA is a software developed by the american company Dow Water & Process Solutions

	CSP	PV solar	Wind turbine	Hydro	Geothermal
<b>Advantages</b>	- Can use the thermal storage to better match supply with demand - High efficiency	- Low operating cost - Decreasing prices	- The wind blows almost all the time - Land can still be used for farming	- Only uses a small fraction of the available resources - Can help improve environmental quality	- Constant energy source - Mostly underground
<b>Disadvantages</b>	- Ground space - Transmission lines	- Fragile materials - Storage or grid connection for a continuous use	- Not always steady and predictable - Bird lives	- Destruction of natural habitats - High installation costs	- Can cause Earthquakes - Location specific
<b>Installation cost (\$/kW)</b>	\$6050 - \$12600	\$1200	\$1477	\$1535	\$2000 - \$5000
<b>LCOE<sup>3</sup> (\$/kWh)</b>	\$0,14 - \$0,35	\$0,07 - \$0,31	\$0,06 - \$ 0,10	\$0,02 - \$30	\$0,04 - \$0,14
<b>Efficiency (%)</b>	18%	15%	35%	90%	15%

*Tableau 1 : Comparison of renewable power generation technology*

## 6.5. Area range

The area ranges depend strongly on the scenario. However, based on a similar project realized by Engie Laborelec, the average area is estimated about  $0,25 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{day})$ . In this study, it has been decided to focus on mid-size installation : between 50 and 100 mega litres per day (MLD).

With these parameters set, we can approximately determine the area range :

- For a 50 MLD, the area range would be about  $12.500 \text{ m}^2$  or  $1,25 \text{ ha}$  ;
- For a 100 MLD, the area range would be about  $25.000 \text{ m}^2$  or  $2,5 \text{ ha}$ .

These areas correspond to the physical area of the plant.

In this study, the availability of land will be based on satellite images (non-constructed zones).

## 6.6. Range of the water and electrical cost

The water price depends on multiple factors such as the drinking demand, the type of desalination technology used, the power required, etc. All these parameters are influenced by the region where the desalination plant is installed. For reverse osmosis technology, the water is usually tried to be kept under  $2\$/\text{m}^3$ .

To determine whenever the electrical cost is interesting or not, it must be compared with the electrical cost of the grid. If the electrical cost of the combination of renewable energy with the grid is more expensive than buying it from the grid, it means that it is not interesting to use this combination.

## 7. Different scenarios

For this study, some possible scenarios will be analyzed :

- Sizing a solar farm to meet the maximum power required by the desalination plant (scenario 1a)
- Sizing a wind farm to meet the maximum power required by the desalination plant (scenario 1b)
- Sizing a solar farm to meet 50% of the annual consumption of the desalination plant (scenario 2a)
- Sizing a wind farm to meet 50% of the annual consumption of the desalination plant (scenario 2b)

For the scenario 2 (2a & 2b), batteries might be needed since the solar farm will be oversized regarding the maximum power required by the desalination plant. The addition of the batteries will only be interesting if the cost permits it. Figure 4 regroups all the scenarios analyzed in this study.

Scenario	Grid	Battery Storage	Solar panels	Wind turbines
1a	Yes	No	Yes (CdTe)	No
1b	Yes	No	No	Yes (2MW)
2a	Yes	Yes	Yes (CdTe)	No
2b	Yes	Yes	No	Yes (2MW)

*Figure 4 : Different scenario configuration*

## 8. Results Summary

With the choice of Sao Paulo in Brazil as the reference scenario, a map can be made in Arcmap to determine the regions where the wind speed and the solar irradiation are greater than the reference scenario, as shown in the figures 5 and 6.

The target regions identified are :

- South America : Peru and Chile
- Caribbean Sea : Jamaica
- Africa : Morocco and South Africa
- Asia : Middle East (Red Sea)



Figure 5 : Different scenario configurations - Wind



Figure 6 : Different scenario configurations - Solar

### 8.1. Sao Paulo, Brazil

The region of Sao Paulo will be considered as the reference scenario.

Figure 7 represents the results for the different scenarios.

The best scenario seems to be the scenario 2b. However, for the scenarios 2a & 2b installing batteries were analyzed to be too expensive.

The analysis over the year 2016 has shown that the wind speed was not sufficient to recharge the batteries while supplying the desalination plant. In short, for scenario 2b, installing batteries will rise the overall cost and recover the cost of the batteries will not be possible. The same problem has been realized for the scenario 2a (solar). Therefore it has been decided to keep the sizing of the installation to provide 50% of the desalination plant consumption but without installing batteries. The excess of production will be sent to the grid without any cost.

Reference		Reference	1a	1b	2a	2b
Location	Brazil, Sao Paulo	RES installed	Solar PV (CdTe)	Wind	Solar PV (CdTe)	Wind
GHI	1666 kWh/m <sup>2</sup>	RES capacity	8.25 MW	8.25 MW	18.88 MW	18.83 MW
Utilization factor wind turbines	20%	RES generation & share	15.793 MWh/y 22%	16.000 MWh/y 22%	36.135 MWh/y 50%	36.125 MWh/y 50%
Grid electricity price	0.14 \$/kWh	RES electricity cost	0.055 \$/kWh	0.057 \$/kWh	0.071 \$/kWh	0.057 \$/kWh
Water TDS	34.403 mg/l	RES CAPEX	8.25 M\$	8.25 M\$	18.88 M\$	18.83 M\$
Interest rate	6.5%	SWRO CAPEX	83.05 M\$	83.05 M\$	83.05 M\$	83.05 M\$
SWRO specific consumption	50 MLD 3.96 kWh/m <sup>3</sup>	SWRO OPEX (53% power)	18.8 M\$/y	16.6 M\$/y	14.4 M\$/y	13.4 M\$/y
Nominal power	8.25 MW	Water cost	1.36 \$/m <sup>3</sup>	1.36 \$/m <sup>3</sup>	1.28 \$/m <sup>3</sup>	1.24 \$/m <sup>3</sup>
Yearly consumption	72.27 GWh/y					

Figure 7 : Summary results for Sao Paulo, Brazil

## 8.2. Peru

Figure 8 represents the results for another region in the world where a possible installation could be possible.

Compared to the reference scenario, we can see that the irradiation is 6% higher and that the wind speed is over 10% higher than the reference scenarios. This will result in a lower cost since the required renewable energy installation will be lower.

As we can see in the Figure 8, the cost of the water for every scenario is lower than the reference scenario! However, the interest rate and the cost of electricity are lower than those of the reference scenario. These parameters have a bigger influence on the variation of the water cost, as the TDS value.

Peru (compared to reference)		Reference	1a	1b	2a	2b
Location	Peru – Callao	RES installed	Solar PV (CdTe)	Wind	Solar PV (CdTe)	Wind
Population	~800,000 p.	RES capacity	8.19 MW	8.19 MW	17.75 MW	18.35 MW
GHI (Callao)	1779 kWh/m <sup>2</sup> +8 kWh/m <sup>2</sup> (+6%)	RES generation & share	16.538 MWh/y 23%	16.000 MWh/y 22%	35.861 MWh/y 50%	35.861 MWh/y 50%
Wind speed (Chilcaya)	8.58 m/s 0.89 m/s (+13.3%)	RES electricity cost	0.041 \$/kWh	0.057 \$/kWh	0.052 \$/kWh	0.057 \$/kWh
Grid electricity price	0.12 \$/kWh -0.02 \$/kWh	RES CAPEX	8.19 M\$	8.19 M\$	17.75 M\$	18.35 M\$
Water TDS	34.892 mg/l +588 mg/l (+1.7%)	SWRO CAPEX	83.05 M\$	83.05 M\$	83.05 M\$	83.05 M\$
Interest rate	3% -3.5% (-54%)	SWRO OPEX (53% power)	13.77 M\$/y	14.33 M\$/y	11.64 M\$/y	11.95 M\$/y
SWRO specific consumption	50 MLD 3.96 kWh/m <sup>3</sup>	Water cost	1.09 \$/m <sup>3</sup>	1.24 \$/m <sup>3</sup>	0.89 \$/m <sup>3</sup>	1.14 \$/m <sup>3</sup>
Nominal power	8.25 MW					
Yearly consumption	72.27 GWh/y					

Figure 8 : Summary Results Peru

Table 2 represents the influence of each parameter of the water cost analysis. The most influencing one will be the interest rate.

The influence of the wind speed and the irradiation do not have that big of an influence compared to the interest rate. However, this does not mean that the installation of a desalination plant can be done everywhere, but that it is important to discuss with the local authorities about the interest rate to lower the country.

As shown in the maps in the Figures 5 and 6, there are some regions where an installation could be realized but it is not everywhere (compared to the reference scenario).

	<b>Interest rate</b>	<b>Electricity grid cost</b>	<b>TDS</b>	<b>GHI</b>	<b>Wind speed</b>
<b>Water cost 1a (\$/m<sup>3</sup>)</b>	10%	8%	<1%	1%	N/A
<b>Water cost 1b (\$/m<sup>3</sup>)</b>	10%	8%	<1%	N/A	<1%
<b>Water cost 2a (\$/m<sup>3</sup>)</b>	15%	6%	1%	2%	N/A
<b>Water cost 2b (\$/m<sup>3</sup>)</b>	14%	6%	1%	N/A	<1%

*Tableau 2 : Influencing terms*

## 9. Conclusion

The combination of renewable energy with sea water desalination by reverse osmosis is known to be possible since it already exists. Therefore this study set out to determine what the costs are when combining renewable energy with a mid-size SWRO desalination plant (50.000m<sup>3</sup>/day over drinking water).

The world population is growing and the accessibility to drinking water becomes more and more crucial in certain regions in the world. Desalination plants are being constructed to answer this crisis. Desalinating water can be done by different methods, such as the reverse osmosis, ion exchanges, distillation, and many more. In this study, it has been decided to focus only on the reverse osmosis technique because it is the most common technique, the most reliable, and has the largest range of the salinity of water that it is suited to treat (up to 60.000 mg/L). The reverse osmosis technique was also chosen because this analysis is in partnership with the company Suez which is specialized in reverse osmosis desalination.

The renewable energy market is growing every year and renewable energy installations are more and more built around the world. This is because their costs are reduced every year while their performance is improving.

Nowadays, solar panels and onshore wind turbines are considered as the most mature technology in the renewable sector. The total capacity installed is growing every year, which results in cost reductions. However, the performances of other technologies, such as the concentration solar power (CSP), are also reaching performances and maturity every year.

The combination between renewable energy and SWRO desalination plant results in a competitive water cost. However, oversizing the renewable energy installation and installing batteries to store the overproduction and reduce the dependency of the grid might result in higher costs, because of the cost of the batteries. The reduction of the dependency might be reached, but if the equivalent cost of electricity from the batteries is more expensive than the electricity cost from the grid, there is no interest in installing batteries. Furthermore, installing batteries would only be interesting if selling the overproduced energy to the grid is not interesting (e.g. it costs more to buy from the grid than selling to the grid).

The scenarios analyzed in this study do not represent all the existing possibilities that combine renewable energy with water desalination plants.

With the scenarios that have been studied, some changes may be done to adapt the cost prices, such as selling the overproduction of energy to the grid (which means that it is interesting to sell the overproduction to the grid), or reducing the sizes of the batteries to avoid the over cost and still reduce the grid dependency.

However, other scenarios can also be possible. In these scenarios, installing other renewable energy technologies such as the CSP are also a possibility, since their cost becomes as interesting as solar panels.

In this study, the solar panels used were Cadmium-Telluride panels. But this study could be realized with crystalline-Silicon (cSi) panels. To go even further, an analysis could be realized where the electricity is produced off-grid by combining multiple renewable energy technologies (and adding batteries to provide constant energy to the plant). All the possible combinations ensure that there are a lot of choices to supply desalination plants.

## References

- [1] Adionics. (2017). *Reinventing desalination*. Powerpoint. Laborelec, Linkebeek.
- [2] Magali Gontier. (2018). *Renewable Energies for Sea Water desalination plant by reverse osmosis : Worldwide screening for implementation potential*. Powerpoint. Laborelec, Linkebeek.
- [3] IRENA. (2018). *Renewable Power Generation Costs in 2017*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.
- [4] Electropaedia. (n.d.). *Energy Efficiency*. Online [http://www.mpoweruk.com/energy\\_efficiency.htm](http://www.mpoweruk.com/energy_efficiency.htm), Consulted on 02/05/2018.
- [5] Holding, Air Purification. (2005). *Composition of seawater : Major ion composition of seawater (mg/L)*. Online <https://www.lennotech.com/composition-seawater.htm>, Consulted on 15/03/2018
- [6] Nikolay Voutchkov. (2013). *Cost Estimating of SWRO Desalination plants [pdf]*. (chapter 3.2 Example of SWRO Project Cost Estimate, 35 pages).
- [7] Nikolay Voutchkov. (2013). *Cost Estimating of SWRO Desalination plants [pdf]*. (chapter 1.1 Project Cost Estimating - Overview, 42 pages).
- [8] Upeksha Caldera, Dmitrii Bogdanov, Mahdi Fasihi, Arman Aghahosseini, and Christian Breyer. (2016). *Renewable energy powered desalination : a sustainable solution to the Iranian water crisis [pdf]*. 21 pages. Lappeenranta University of Technology, Finland.
- [9] Tractebel. (2009). *Technology and Cost Evolution Forecasting [pdf]*. Brussels : Laborelec
- [10] mdpi. (2012). *Comparison of Configurations of High-Recovery Inland Desalination Systems*. Online

<http://www.mdpi.com/2073-4441/4/3/690/htm>, Consulted on 30/04/2018

- [11] J. Environ. (2007). Environmental concerns of desalinating seawater using reverse osmosis. *Journal of Environmental Monitoring*, 9, 805-813
- [12] World Health Organization (W.H.O.). (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality (4<sup>th</sup> Edition)*. Geneva, Switzerland : World Health Organization (W.H.O.). 631 p.
- [13] Ali Al-Karaghoul and Lawrence L. Kazmerski. (2012). *Comparisons of Technical and Economic Performance of the Main Desalination Processes with and without Renewable Energy Coupling*. United States. 8 p.
- [14] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). *The Power to Change : Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025 [pdf]*. IRENA. ISBN : 978-92-95111-97-4

# Appendices

## A Addition information

	Typical Seawater	Eastern Mediterranean	Arabian Gulf of Kuwait	Red Sea at Jeddah
<b>Chloride (<math>Cl^-</math>)</b>	18.980	21.200	23.000	22.219
<b>Sodium (<math>Na^+</math>)</b>	10.556	11.800	15.850	14.255
<b>Sulfate (<math>SO_4^{2-}</math>)</b>	2.649	2.950	3.200	3.078
<b>Magnesium (<math>Mg^{2+}</math>)</b>	1.262	1.403	1.765	742
<b>Calcium (<math>Ca^{2+}</math>)</b>	400	423	500	225
<b>Potassium (<math>K^+</math>)</b>	380	463	460	210
<b>Biocarbonate (<math>HCO_3^-</math>)</b>	140	-	142	146
<b>Strontium (<math>Sr^{2+}</math>)</b>	13	-	-	-
<b>Bromide (<math>Br^-</math>)</b>	65	155	80	72
<b>Borate (<math>BO_3^{3-}</math>)</b>	26	72	-	-
<b>Fluoride (<math>F^-</math>)</b>	1	-	-	-
<b>Silicate (<math>SiO_3^{2-}</math>)</b>	1	-	1,5	-
<b>Iodide (<math>I^-</math>)</b>	<1	2	-	-
<b>Total Dissolved Solids (TDS)</b>	<b>34.483</b>	<b>38.600</b>	<b>45.000</b>	<b>41.000</b>

Tableau 3 : Major ion composition of Seawater [mg/L]<sup>5</sup>





# Développement de membranes de pervaporation pour l'extraction de composés organiques volatils en solution aqueuse

Ing. J. SCHRUYERS  
Dr Ir S. PIRARD

GRAMME – Liège

*Cet article détaille le développement d'une méthode permettant d'étudier la cinétique d'extraction du toluène dans l'eau par une membrane. Les mesures ont été effectuées par spectroscopie UV-Vis. Le but de cet article est de comparer le coefficient de partage d'une membrane de référence avec celui d'une membrane synthétisée par le procédé sol-gel pour une solution de concentration en toluène égale à 200 ppm.*

*Mots-clefs : toluène, membrane, extraction, sol-gel, spectroscopie UV-Vis*

*This article describes the development of a method to study the kinetics of extraction of toluene in water by a membrane. Measurements were made using UV-Vis spectroscopy. The goal behind this article is to compare the partition coefficient of a toluene solution whose concentration is equal to 200 ppm, for a reference membrane with that of a membrane synthesized by the sol-gel process.*

*Keywords : toluene, membrane, extraction, sol-gel, UV-Vis spectroscopy*

## 1. Introduction

L'accroissement des activités humaines et industrielles, en parallèle d'une démographie toujours en hausse, est une source d'émission de substances chimiques toujours plus nombreuses et complexes dans l'environnement. En particulier, la dégradation des ressources en eau est devenue un enjeu crucial de notre société. En effet, en Belgique, l'eau qui est fournie par le réseau public provient pour environ 70 % de captages souterrains. La présence de polluants dans ces ressources entraîne des risques non seulement pour la santé humaine, mais également pour les écosystèmes.

Le benzène et ses dérivés (toluène, éthylbenzène et xylènes), connus collectivement comme étant les BTEX, sont parmi les polluants les plus toxiques. Les BTEX sont des composés organiques volatils provenant du raffinage du pétrole. On les retrouve dans les carburants (essence, diesel, etc.) et ils sont toujours utilisés dans certaines industries comme solvants (peintures, déodorants) ou réactifs. Une exposition aux BTEX peut provoquer des effets nocifs sur la santé humaine (lésions neurobiologiques, respiratoires ou génétiques) et pour l'environnement aquatique. Le benzène a notamment été classé substance cancérigène. Ainsi, les réglementations autour de la durée et du niveau d'exposition aux BTEX sont de plus en plus précises, obligeant les industriels à contrôler la qualité de leurs solvants et réactifs, ainsi que les collectivités territoriales à doser la présence de BTEX dans les eaux ou sols contaminés. On peut également citer les solvants halogénés, et en particulier les solvants chlorés (chloroforme, DCM, etc.), utilisés en abondance dans l'industrie chimique et désormais soumis à de strictes réglementations.

À l'heure actuelle, les mesures de concentration en polluants dans les eaux sont réalisées de manière discontinue en prélevant ponctuellement des échantillons qui sont ensuite analysés par des techniques très sensibles, mais également très coûteuses, encombrantes, énergivores et caractérisées par un long temps de réponse. Par conséquent, ces techniques ne sont pas adaptées à une mesure en continu de la concentration en polluants. Dans ce contexte, il y a un besoin croissant de disposer de moyens et d'outils techniques opérationnels visant à assurer le monitoring, la surveillance et le contrôle des concentrations de ces matières polluantes dans les eaux, depuis l'aval direct des émetteurs connus ou supposés jusqu'aux récepteurs exposés. La détection en temps réel d'un flux de polluant constituerait donc un avantage important pour limiter la pollution des eaux par une analyse préliminaire aux techniques classiques, analyse moins coûteuse et ayant une empreinte énergétique et environnementale faible.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet visant à l'élaboration d'une sonde permettant de mesurer en continu les concentrations en composés organiques volatils dans les eaux souterraines, en particulier les composés BTEX. Le système est basé sur un capteur à fibre optique muni d'une membrane permettant d'extraire et de concentrer les polluants de l'eau, augmentant ainsi la sensibilité du capteur. L'ensemble du système repose donc sur la synthèse d'une membrane adaptée au revêtement de la fibre optique. L'affinité envers les polluants organiques et le caractère hydrophobe de la membrane sont des paramètres clés pour d'une part effectuer une extraction sélective de ces composés, et d'autre part pour éviter que le signal subisse l'influence de l'eau.

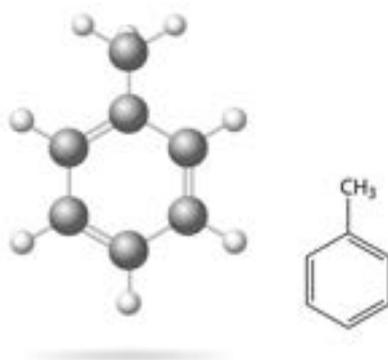


Figure 1 : Structure du toluène, le polluant aromatique de la classe des BTEX étudié dans le cadre de ce travail. (Source : [www.vectorstock.com](http://www.vectorstock.com))

Cet article détaille l'étude cinétique de l'extraction d'un polluant organique aromatique cible dissous dans l'eau. Le toluène, dont la structure est représentée sur la figure 1 a été choisi comme marqueur des BTEX.

L'objectif de ce travail est de développer une membrane innovante pour l'adsorption du toluène par le procédé sol-gel. Les performances de cette membrane seront comparées aux performances d'une membrane de référence obtenue à partir d'un kit commercial, en termes de coefficient de partage et de vitesse d'adsorption.

## 2. Dispositif expérimental

La spectroscopie UV-Vis a été utilisée pour étudier la cinétique d'extraction du toluène par une membrane. Cette technique permet l'identification et la quantification de composés par l'absorption de lumière UV et/ou de lumière visible.

La quantification de la concentration du composé à analyser est réalisée à l'aide de la loi de Beer-Lambert qui exprime la proportionnalité entre l'absorbance du signal à une longueur d'onde donnée et la concentration du composé en solution [1]:

$$A = \varepsilon_{\lambda} l C$$

où  $A$  est l'absorbance à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $\varepsilon_{\lambda}$  est le coefficient d'extinction du composé à cette même longueur d'onde (en  $M^{-1}.cm^{-1}$ ),  $l$  est le chemin optique (en cm), et  $C$  est la concentration de l'analyte dans la solution (en M).

Concrètement, ce que l'appareil mesure est la transmittance  $T$ , c'est-à-dire le rapport de l'intensité lumineuse reçue (après le passage par l'échantillon) sur l'intensité lumineuse envoyée (avant le passage par l'échantillon). L'absorbance est ensuite calculée à partir de l'équation suivante :

$$A = -\log T$$

Les échantillons sont contenus dans des cellules d'absorption traversées par le faisceau lumineux, appelées cuvettes. Ces cuvettes, de section le plus souvent carrée, sont construites dans un matériau transparent à toutes les longueurs d'onde utilisées lors de l'analyse (pour éviter les interactions parasites). Elles sont généralement en plastique ou en verre pour travailler avec la lumière visible, et en quartz pour travailler dans une gamme de longueurs d'onde étendue à la lumière UV. Le chemin optique  $l$  est ainsi l'épaisseur de la cuvette traversée par le faisceau de lumière de longueur d'onde  $\lambda$ .

Le coefficient d'extinction  $\varepsilon$  représente quant à lui la capacité d'un composé en solution à absorber la lumière. C'est une propriété intrinsèque au composé. En effet, comme montré par la loi de Beer-Lambert, il est indépendant de la concentration du composé dans la solution et de l'épaisseur traversée par la lumière. En revanche, il dépend de la nature du solvant, de la longueur d'onde et de la température.

La figure 2 présente les différents composants du montage expérimental utilisé pour mesurer la concentration en toluène dans la solution aqueuse.

Ce montage servira à établir la droite d'étalonnage et à réaliser l'étude de la cinétique d'extraction de toluène par une membrane dans l'eau, en suivant l'évolution au cours du temps de la concentration en toluène d'une solution mise au contact avec une membrane. On pourra ainsi déterminer le moment où la membrane aura atteint la saturation et évaluer ses performances en termes de cinétique et de capacité d'extraction.

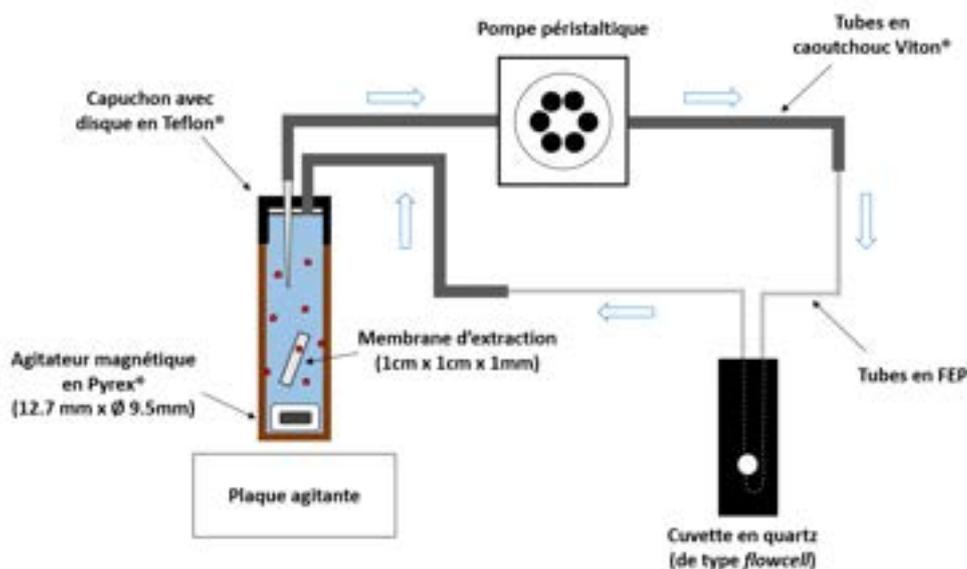


Figure 2 : Schéma de principe du montage expérimental pour l'étude de la cinétique d'extraction des polluants par une membrane.

La pompe péristaltique (ISMATEC® IPC-N 4) sert à réaliser des prélèvements d'une solution de toluène contenue dans un flacon ambré fermé hermétiquement par un capuchon muni d'un disque inerte en Téflon®. Ce capuchon est percé de trous permettant d'insérer deux tuyaux en caoutchouc Viton® (ce matériau est résistant aux solvants aromatiques). Chaque tuyau est connecté à une cuvette en quartz de type flowcell (Hellma® 178.710-QS) par l'intermédiaire de tuyaux inertes en FEP. Ce type de cuvette permet de réaliser une mesure d'échantillons en continu. La membrane qui adsorbe le toluène est insérée initialement dans le flacon, ainsi qu'un agitateur magnétique enrobé dans du verre borosilicaté (Bel-Art® Pyrex® Spinbar®). La solution est constamment agitée entre chaque prélèvement. Lors d'un prélèvement, l'agitation est arrêtée pour laisser la solution se stabiliser et la pompe est activée pour remplir la cuvette en quartz. La mesure du spectre d'absorption se fait par un spectromètre GENESYS™ 10S UV-Vis. Après avoir effectué la mesure, la solution prélevée est ensuite réinjectée dans le flacon en remettant l'agitation en marche pour homogénéiser la solution.

### 3. Établissement de la droite d'étalonnage

Le toluène est très peu soluble dans l'eau, sa solubilité étant en effet d'environ 500 ppm (ou mg/L) à 20°C. Comme toute substance hydrophobe, il ne se forme pas une solution parfaitement homogène lorsqu'on le mélange à l'eau. Le toluène est également assez volatil, sa pression de vapeur saturante étant environ 40 % plus élevée que celle de l'eau à température ambiante, comme montré sur la figure 3.

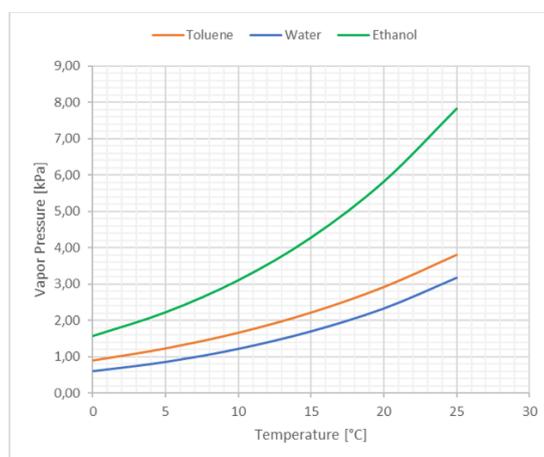


Figure 3 : Pression de vapeur saturante en fonction de la température pour le toluène, l'eau, et l'éthanol. (Données issues de : <https://webbook.nist.gov/chemistry>)

Réaliser des solutions de concentrations parfaitement identiques est donc une opération assez délicate. Cependant, la reproductibilité peut être facilement améliorée en incluant un agent dispersant. Il s'agit d'une molécule qui a à la fois une affinité pour l'eau et pour les composés hydrophobes. L'éthanol a été utilisé dans le cadre de ce travail. En effet, le toluène est entièrement miscible dans l'éthanol, qui lui-même est entièrement miscible dans l'eau (voir figure 4).

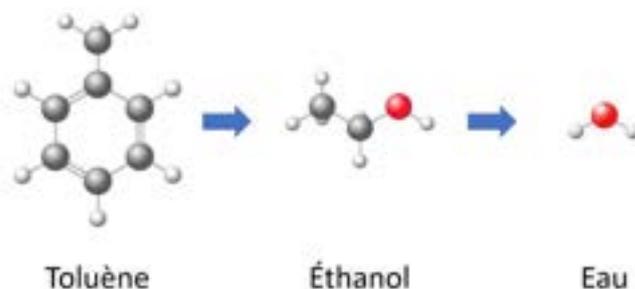


Figure 4 : L'éthanol agit comme un agent dispersant : sa partie polaire a une affinité pour l'eau, et sa partie apolaire a une affinité pour le toluène. (Infographie réalisée à partir d'images provenant de : [www.vectorstock.com](http://www.vectorstock.com))

Puisque l'on travaille avec des substances volatiles, il est nécessaire de prendre quelques précautions lors de la préparation des échantillons. En effet, il est indispensable de réfrigérer constamment les différentes solutions réalisées afin de réduire le risque d'évaporation, ce risque étant présent même lorsqu'un flacon est fermé mais qu'il existe une couche d'air au-dessus de la solution. Dans le même ordre d'idée, il vaut mieux éviter de transférer directement une solution d'un flacon à un autre, mais plutôt utiliser une pipette Pasteur en verre pour réaliser les prélèvements.

Pour commencer, une solution de 5 % de toluène dans l'éthanol servant de stock pour la série d'expériences a été réalisée. Ensuite, une solution de 200 ppm a été obtenue en diluant 1 g de la solution précédente dans un flacon rempli de 250 mL d'eau dé-ionisée et dont le capuchon est muni d'une feuille en Téflon®. La solution n'est pas instantanément homogène, et il est nécessaire de bien mélanger pour forcer la solvation des molécules d'éthanol entourant le toluène par les molécules d'eau. Il faut continuer à mélanger tant que l'on aperçoit la phase organique flotter à la surface de l'eau (elle remonte en effet à la surface comme le ferait une huile). Une fois que la surface apparaît claire, on laisse reposer le flacon au frais pendant quelques minutes avant de préparer le reste des échantillons par dilutions successives. Les échantillons sont analysés par UV-Vis à l'aide du montage présenté sur la figure 2.

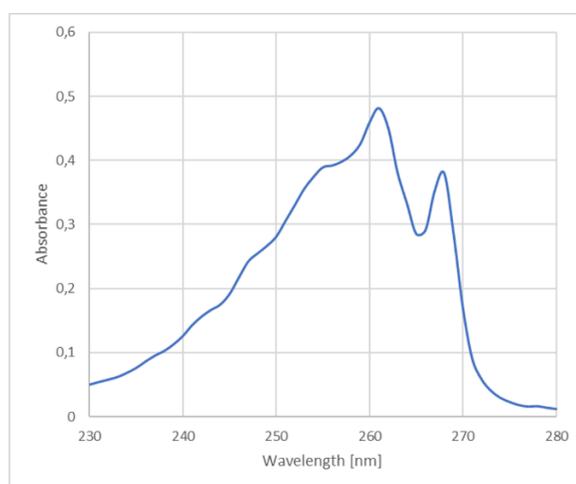


Figure 5 : Spectre d'absorption UV d'une solution aqueuse ayant une concentration de 200 ppm en toluène et contenant moins de 1 % en masse d'éthanol.

La figure 5 montre le spectre d'absorption UV d'une solution de 200 ppm en toluène. La valeur d'absorbance maximale (à 261 nm) sert de référence pour établir la droite d'étalonnage. On relève cette valeur pour chaque échantillon et on la reporte sur un graphique en fonction de la concentration correspondante.

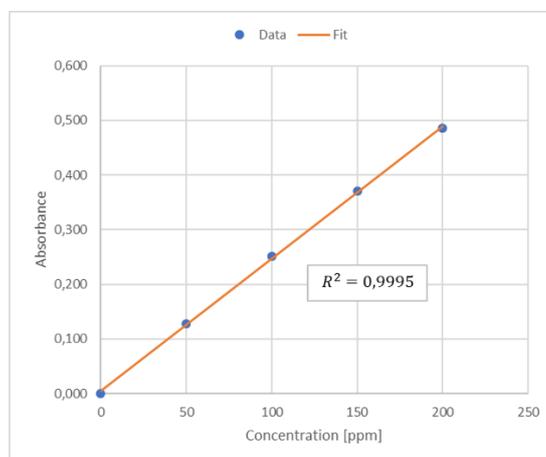


Figure 6 : Droite d'étalonnage pour la quantification du toluène dans l'eau par spectroscopie UV-Vis.

On réalise ensuite un ajustement linéaire entre les valeurs d'absorbance et de concentration. La figure 6 montre la droite d'étalonnage obtenue par régression linéaire simple sur la moyenne de 3 séries d'échantillons allant de 200 ppm à 50 ppm. Cette droite a pour équation :

$$A = 0,0024 C + 0,0044$$

La valeur 0,0044 est l'ordonnée à l'origine, et représente concrètement la déviation de la relation linéaire par rapport à la loi de Beer-Lambert. En effet, la loi établit que l'absorbance est directement proportionnelle à la concentration. L'absence de composés devrait donc mener à une absorbance nulle. Cependant, la loi de Beer-Lambert est une loi empirique supposant des conditions idéales. Elle ne tient donc pas compte des imperfections de mesure dues à l'instrument. On serait tenté de forcer la valeur de l'ordonnée à l'origine à 0 pour mieux correspondre à la loi mais, statistiquement, c'est une ordonnée à l'origine non nulle qui représente le mieux nos données, puisqu'elle tient compte de l'erreur de l'instrument. On verra plus loin qu'elle sert également à déterminer la limite de détection de l'appareil.

La valeur 0,0024 est la pente de la droite, autrement dit il correspond au produit  $\epsilon l$  dans la loi de Beer-Lambert. Comme le chemin optique  $l$  de la cuvette est connu et vaut 1 cm, le coefficient d'extinction du toluène dans l'eau et l'éthanol à une longueur d'onde de 261 nm peut être calculé.

La droite d'étalonnage ainsi déterminée permet de relier l'absorbance à la concentration en toluène dans l'eau pour la gamme de concentration allant de 50 à 200 ppm. Dans cette gamme, la linéarité entre valeur d'absorbance et concentration est respectée. En effet, la valeur du coefficient de corrélation est de  $R^2 = 0,995$ , ce qui respecte la condition minimale  $R^2 \geq 0,9950$  [1]. Il est également important d'avoir une idée des limites basses de la méthode, ce qui se fait en déterminant la limite de détection et la limite de quantification.

La limite de détection (LOD) est le signal correspondant à la concentration à laquelle il y a une probabilité de 50 % de conclure qu'un échantillon ne contient pas d'analyte (faux négatif) et une probabilité de 1 % d'indiquer qu'un analyte est présent alors qu'il est absent dans l'échantillon (faux positif). Cette limite dépend de l'analyte et de l'appareil utilisé. La limite de détection peut être évaluée à partir de la régression linéaire effectuée sur les données selon l'équation [1] :

$$LOD \approx b + 3 s_y$$

où  $b$  est l'ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage et  $s_y$  l'écart-type sur  $y$ , c'est-à-dire la mesure de la dispersion du modèle par rapport aux données expérimentales. Il peut être défini comme suit :

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum(d_i)^2}{n-2}}$$

avec  $\sum(d_i)^2$  la somme des écarts au carrés entre les valeurs d'absorbance issues des données et les valeurs d'absorbance calculées aux mêmes concentrations par le modèle, et  $n$  le nombre d'observations.

Concrètement, la valeur  $b$  représente la mesure du "bruit" d'une solution de référence, c'est-à-dire le signal produit en l'absence de composés (dû aux perturbations aléatoires du signal électrique au niveau du détecteur). Il est communément admis qu'un signal 3 fois plus grand que le bruit est détectable de manière fiable par l'appareil. Cependant, ce signal est trop faible pour être utilisé en quantification. Il faut donc estimer la limite basse de notre modèle.

Un signal 10 fois plus grand que le bruit est défini comme étant la limite de quantification (LOQ), c'est-à-dire la plus petite concentration qui peut être mesurée avec une certaine précision. On peut la déterminer à partir de l'écart-type sur la valeur d'absorbance d'un échantillon de faible concentration [1] :

$$LOQ \approx \frac{10 s}{m}$$

où  $s$  est la mesure de la dispersion sur l'absorbance de l'échantillon de plus faible concentration (ici, 50 ppm), et  $m$  est la pente de la droite d'étalonnage. Le calcul de ces limites a donné :

$$\begin{aligned} LOD &\approx 0,022 \\ LOQ &\approx 18 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Autrement dit, un signal donnant une absorbance plus petite que 0,022 peut être considéré comme du bruit. À partir de 0,022, on peut affirmer de manière relativement fiable que le toluène est effectivement détecté par l'appareil, mais que sa concentration est trop faible pour pouvoir être quantifié de manière précise par notre modèle. La concentration minimale à laquelle la droite d'étalonnage est toujours valide est quant à elle estimée à 18 ppm. Afin de vérifier que la valeur d'absorbance prédite par le modèle est correcte, trois solutions de 20 ppm ont été préparées à partir d'une solution de 200 ppm.

Le modèle indique que la valeur d'absorbance à 261 nm devrait être égale à :

$$A = 0,0024 \times 20 + 0,0044 = 0,052$$

L'analyse des trois échantillons a donné une absorbance moyenne de  $0,053 \pm 0,005$ . Le modèle est donc bien valide jusqu'à 20 ppm. Concernant la limite haute de quantification, il faut savoir que la linéarité de la loi de Beer-Lambert est en général conservée pour des solutions diluées (c'est-à-dire  $\leq 10$  mM) dans la gamme d'absorbance 0,1 – 1, ce qui correspond à des valeurs de transmittance de 10 à 80 % [1]. Sachant qu'une concentration de 200 ppm correspond à une molarité d'environ 2 mM et que la valeur d'absorbance à cette concentration est de presque 0,5, on peut supposer qu'une concentration de 400 ppm vérifiera le modèle linéaire que l'on a précédemment établi. La méthode devrait donc permettre de quantifier, en théorie, des concentrations allant de 20 à 400 ppm.

#### 4. Modélisation de la cinétique d'extraction

Le modèle à deux compartiments a été utilisé pour décrire la cinétique d'extraction du toluène par une membrane en phase aqueuse [2]. Ce modèle est notamment utilisé en pharmacocinétique pour étudier le devenir d'une substance active contenue dans un médicament après son administration dans l'organisme. C'est un modèle cinétique de premier ordre [3, 4]. L'idée est de représenter l'eau et la membrane comme étant, au sein du flacon, deux compartiments dans lesquels le toluène va circuler librement. Initialement, tout le toluène est contenu dans le compartiment "eau". Ensuite, en négligeant les pertes par évaporation ou par extraction dans les tuyaux, le toluène va

s'écouler dans le compartiment "membrane" jusqu'à atteindre une situation d'équilibre.

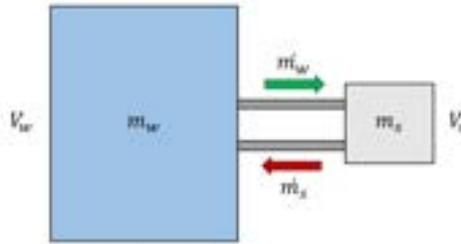


Figure 7 : Modèle à deux compartiments appliqué à l'extraction de toluène par une membrane en phase aqueuse.

La figure 7 illustre le modèle à deux compartiments appliqué à notre cas.  $V_w$  et  $V_s$  sont les volumes de chaque compartiment (l'eau en mL et la membrane en  $\text{cm}^3$ ) au sein du flacon.  $m_w$  et  $m_s$  représentent respectivement la masse de toluène dans l'eau et la masse de toluène dans la membrane à un temps donné (en mg).  $\dot{m}_w$  et  $\dot{m}_s$  sont respectivement le flux massique entrant dans la membrane et le flux massique sortant de la membrane (en mg/min), et sont définis par :

$$\begin{aligned}\dot{m}_w &= k_a m_w \\ \dot{m}_s &= k_d m_s\end{aligned}$$

avec  $k_a$  et  $k_d$  les vitesses d'adsorption et de désorption de la membrane (en  $\text{min}^{-1}$ ). Ces constantes sont liées par la relation à l'équilibre des flux :

$$\frac{k_a}{k_d} = \rho K_{sw}$$

où  $\rho$  est le rapport entre le volume de la membrane et le volume d'eau, et  $K_{sw}$  est le coefficient de partage de la membrane.

De façon générale, le coefficient de partage décrit la distribution d'un composé entre deux phases immiscibles. Dans notre cas il s'agit du rapport, à l'équilibre, entre la concentration de toluène dans la membrane ( $C_{s,eq}$ ) et la concentration de toluène dans l'eau ( $C_{w,eq}$ ). Plus le coefficient de partage est grand, et plus la membrane est performante pour extraire le toluène de l'eau.

En négligeant les pertes et en supposant que tout le toluène est contenu dans l'eau à l'instant initial, l'écriture du bilan de matière global au sein du flacon donne :

$$C_w(t) + \rho C_s(t) = C_{w,0}$$

où  $C_w(t)$  et  $C_s(t)$  sont respectivement les concentrations en toluène dans l'eau (en mg/L) et dans la membrane (en mg/cm<sup>3</sup>) à l'instant  $t$ , et  $C_{w,0}$  est la concentration initiale de toluène présent dans l'eau.

Cette relation permet donc de calculer la concentration en toluène dans la membrane à partir de la mesure de la concentration en toluène dans l'eau. La dérivée première selon  $t$  établit une relation entre les taux de variation au cours du temps de la concentration en toluène dans chaque compartiment :

$$\frac{dC_s}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dC_w}{dt}$$

Autrement dit, une diminution de la concentration en toluène dans l'eau implique une augmentation de la concentration en toluène dans la membrane qui sera proportionnelle à l'inverse du rapport des volumes.

L'écriture du bilan de matière dans chaque compartiment mène vers le système d'équations différentielles homogènes de premier ordre suivant :

$$\begin{cases} \frac{dC_w}{dt} = -k_a C_w(t) + k_d \rho C_s(t) \\ \frac{dC_s}{dt} = k_a \frac{1}{\rho} C_w(t) - k_d C_s(t) \end{cases}$$

Ce système vérifie bien la relation précédemment établie. Comme le système est linéaire et invariant, on peut le résoudre par les transformées de Laplace [5]. Les conditions initiales sont :

$$\begin{aligned} C_w(0) &= C_{w,0} \\ C_s(0) &= 0 \end{aligned}$$

La résolution du système donne :

$$\begin{aligned} C_w(t) &= \frac{C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 + \rho K_{sw} e^{-(1+\rho K_{sw}) k_d t}] \\ C_s(t) &= \frac{K_{sw} C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 - e^{-(1+\rho K_{sw}) k_d t}] \end{aligned}$$

Comme la cinétique est du premier ordre, l'évolution de la concentration en toluène au cours du temps suit donc une loi exponentielle [3, 4].

Il est possible de vérifier que la valeur finale de chaque équation est bien la concentration à l'équilibre :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_w(t) = \frac{C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 + 0] = \frac{C_{w,0}}{C_{w,eq} + \rho C_{s,eq}} C_{w,eq} = C_{w,eq}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} C_s(t) = \frac{K_{sw} C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 - 0] = \frac{C_{s,eq}}{C_{w,eq} + \rho C_{s,eq}} C_{w,eq} = C_{s,eq}$$

Dans le même ordre idée, vérifions les conditions initiales :

$$C_w(0) = \frac{C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 + \rho K_{sw}] = C_{w,0}$$

$$C_s(0) = \frac{C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 - 1] = 0$$

ainsi que le bilan de matière global :

$$C_w(t) + \rho C_s(t) = \frac{C_{w,0}}{1 + \rho K_{sw}} [1 + \rho K_{sw} + 0] = C_{w,0}$$

Le terme  $(1 + \rho K_{sw}) k_d$  que l'on retrouve dans chaque équation est le paramètre d'intensité de la fonction exponentielle. Il représente la "vitesse" à laquelle les concentrations vont tendre vers leur valeur à l'infini (la saturation de la membrane). On peut également le réécrire sous la forme :

$$(1 + \rho K_{sw}) k_d = k_a + k_d$$

C'est donc la somme des constantes de vitesse d'absorption et de désorption de la membrane qui dicte la dynamique de la loi exponentielle.

## 5. Synthèse de membranes pour l'extraction de toluène en phase aqueuse

Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères constitués d'une chaîne de liaisons siloxanes Si-O dont les atomes de silicium sont connectés à des groupements organiques [6]. Les polysiloxanes existent sous la forme de résines, d'élastomères ou

d'huiles. Ils sont notamment appréciés pour leur résistance à la chaleur et leur relative inertie chimique. Le polydiméthylsiloxane linéaire (PDMS, voir figure 8) est le plus important représentant de la famille des silicones. Il est disponible sous la forme d'huiles de différentes viscosités qui dépendent de la longueur de la chaîne du polymère. En effet, plus la chaîne est longue, plus le composé est visqueux. Le nombre de répétitions du monomère peut varier de 10 à plus de 10 000.

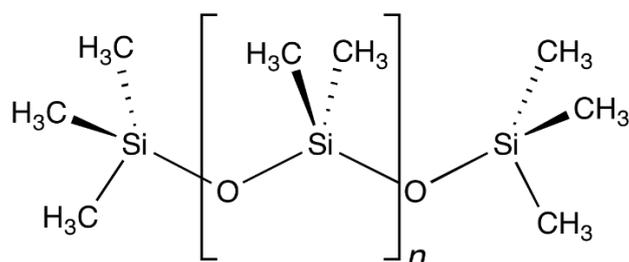


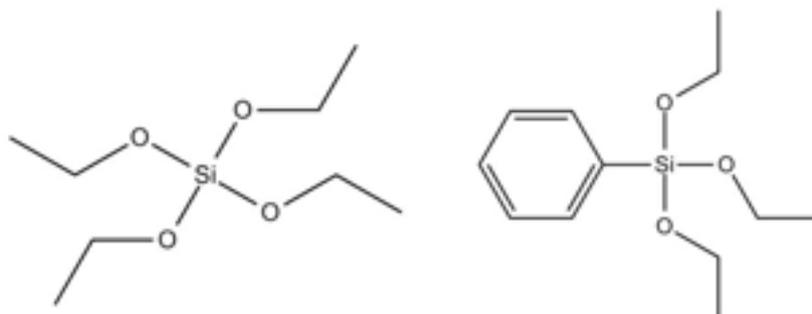
Figure 8 : Structure du polydiméthylsiloxane (PDMS), le composant principal du silicone commercial. (Source : <https://www.wikipedia.org>)

La technique sol-gel est un procédé dit de "chimie douce" permettant l'élaboration de matériaux tels que les verres et les céramiques, par une polymérisation de précurseurs en solution [7]. Ces précurseurs peuvent être des sels inorganiques ou des alcoxydes métalliques. Cette méthode de synthèse permet également d'associer des espèces organiques à des espèces minérales afin de développer des matériaux hybrides aux nouvelles propriétés.

Le procédé repose sur une succession de réactions d'hydrolyse-condensation qui se produisent à des températures nettement plus basses (proches de l'ambiante) que celles des voies de synthèse classiques de réseaux d'oxydes, ces dernières s'effectuant en effet par frittage et fusion à haute température (plus de 1000°C). En résulte un procédé bien moins énergivore et moins polluant permettant de synthétiser des matériaux à structure contrôlée avec une plus grande homogénéité et une plus grande pureté.

Dans le cadre de ce travail, des alcoxydes de silicium (ou alcoxysilanes) ont été utilisés. L'un des précurseurs de silice (SiO<sub>2</sub>) les plus utilisés est le tétraéthoxysilane (TEOS, figure 9). Celui-ci est composé d'un atome de silicium central entouré de groupement éthoxy (EtO-, ou CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>O- dans sa forme développée) pour former une structure tétraédrique. Le TEOS est hydrophobe et immiscible dans l'eau. Sa température d'ébullition est assez élevée (environ 160°C), ce qui s'explique par la particulière force de la liaison Si-O. Le TEOS (et les autres précurseurs de silice) est cependant sensible à l'humidité, dû aux groupements éthoxy qui subissent une réaction d'hydrolyse.

Le groupement éthoxy réagit en effet avec une molécule d'eau pour former un groupement silanol (Si-OH) particulièrement réactif (une molécule d'éthanol est produite durant cette réaction). Ces nouvelles espèces réactives peuvent ensuite condenser entre elles pour former une liaison siloxane (Si-O-Si) en relâchant une molécule d'eau. Les réactions d'hydrolyse et de condensation du TEOS sont décrites sur la figure 10.



*Figure 9 : Alcoxydes métalliques précurseurs de silice utilisés dans ce travail. A gauche, le tétraéthoxysilane (TEOS). A droite, le phényltriéthoxysilane (PTES). (Source : <https://www.gelest.com>)*

Les réactions d'hydrolyse et de condensation sont des réactions avec une cinétique relativement lente, c'est pourquoi on ajoute un catalyseur. En effet, sans catalyseur, il faudrait deux jours pour former un réseau de silice à partir de TEOS. Les catalyseurs ajoutés peuvent être de type acide ou basique, selon la structure du réseau désirée. En catalyse acide, on utilise le plus souvent des acides minéraux volatils comme l'acide chlorhydrique (HCl), mais les acides organiques sont également rencontrés. L'acide trifluoroacétique (TFA) est notamment utilisé pour obtenir des réseaux de silice denses. L'hydroxyde de sodium (NaOH) était historiquement utilisé en catalyse basique, mais il est désormais remplacé par l'ammoniaque (NH<sub>4</sub>OH), étant plus facilement éliminé du réseau.

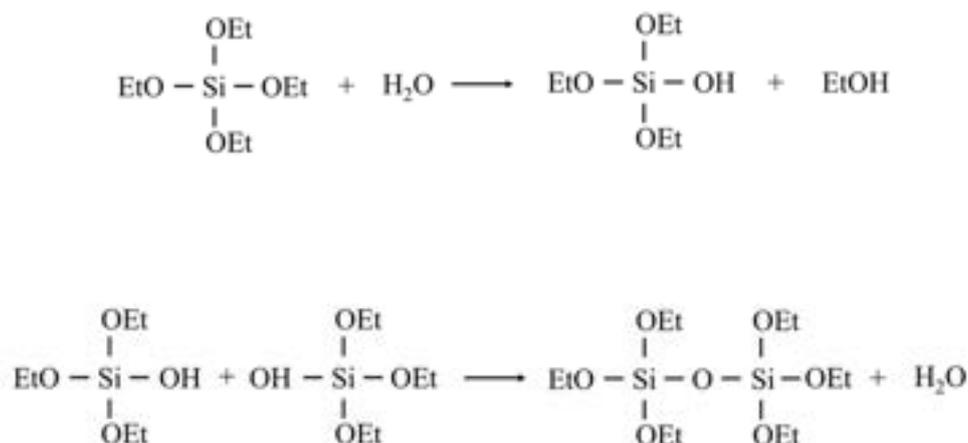


Figure 10 : Principe du procédé sol-gel de formation de silice à partir de TEOS. La réaction d'hydrolyse crée des espèces réactives qui peuvent ensuite condenser entre elles (polymérisation).

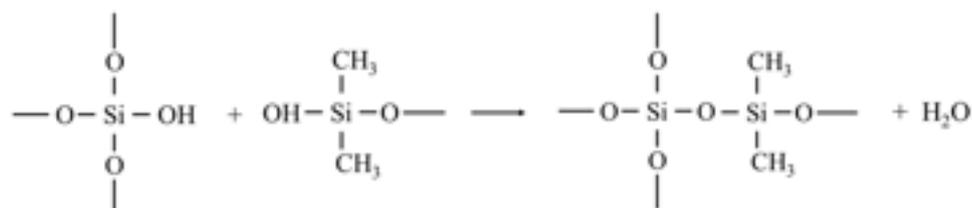


Figure 11 : Principe de la réaction de condensation de type RTV-2.

Le réseau de silice produit par sol-gel peut servir d'agent réticulant pour un polysiloxane fonctionnalisé hydroxyle. En effet, les groupements silanols peuvent condenser et former une liaison siloxane entre la silice et le PDMS (figure 11). Cette réaction est la réaction de condensation de type RTV-2. La notation "RTV-2" vient de *2-part Room Temperature Vulcanization*, car le couplage croisé s'effectue à température ambiante et qu'il nécessite deux composants, contrairement à la réaction de condensation de type RTV-1 dans lequel le PDMS est réticulé par réaction avec l'humidité ambiante. Cette réaction peut être catalysée par les mêmes catalyseurs utilisés dans le procédé sol-gel de production de silice ou par ceux utilisés pour la réaction de couplage déhydrogénatif (sels d'étain).

Le procédé sol-gel permet également le développement de nouveaux matériaux hybrides en incorporant des composés organiques durant la réaction de polymérisation de la silice [4]. Cette famille de matériaux porte le nom d'ORMOSILs (pour *organically modified silica*). Les polysilsesquioxanes sont une classe d'ORMOSILs dont la

structure est composée d'un réseau siloxane entouré de groupements organiques. Les polysilsesquioxanes peuvent adopter plusieurs structures qui sont montrées sur la figure 12. Dans le cadre de ce travail, la synthèse de polyphénylsilsesquioxane (PPSS) à partir de phényltriéthoxysilane (PTES, figure 9) a été utilisée. Le PPSS est un polysilsesquioxane adoptant une structure en échelle.

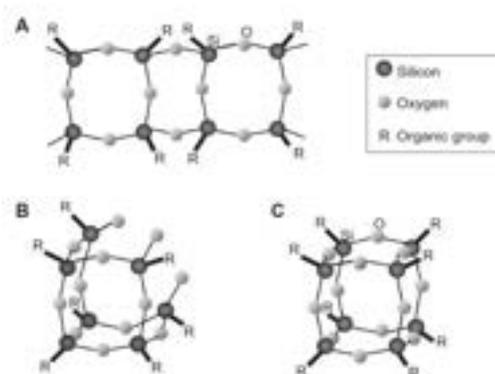


Figure 12 : Différentes structures de polysilsesquioxanes : en échelle (A), en cage partielle (B), et en cage (C). (Source : [8])

Dans ce travail, la membrane sol-gel avec groupements phényles a été synthétisée en utilisant du PTES comme co-agent réticulant avec le TEOS pour le couplage croisé d'un PDMS fonctionnalisé hydroxyle (PDMS-OH). Le but de cette étude est de montrer que l'incorporation de groupements phényles (figure 13) au sein de la structure polysiloxane permet d'améliorer l'extraction du toluène par interactions aromatique-aromatique (appelé  $\pi$ -stacking). Les membranes sont ensuite préparées de manière similaire pour obtenir des carrés de 1 cm x 1 cm x 1 mm.

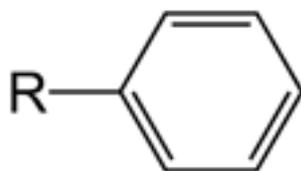


Figure 13 : Le groupement phényle interagit avec le toluène par interactions par  $\pi$ -stacking. (Source : <https://www.wikipedia.org>)

La membrane qui servira de référence est produite à partir d'un PDMS commercial, le kit Sylgard® 184 du fabricant Dow Corning. C'est un kit silicone suivant une réticulation au platine (réaction d'addition). La membrane est réalisée en mélangeant les deux composants selon le rapport en masse recommandé par Dow Corning.

## 6. Étude cinétique d'extraction et résultats

L'étude de la cinétique d'extraction a été réalisée avec la membrane de référence (Sylgard® 184) et la membrane phenyl-PDMS produite en utilisant le PTES comme co-agent réticulant. Les membranes sont des carrés d'environ 1 cm de côté sur 1 mm d'épaisseur, ce qui donne un volume  $V_s = 0,1 \text{ cm}^3$ . Le montage présenté sur la figure 2 a servi à réaliser cette étude. Les membranes sont ajoutées à une solution de 200 ppm maintenue entre 10-15°C et agitée à 200 RPM durant l'expérience. Le volume de solution étant de  $V_w = 16 \text{ mL}$ , on obtient un rapport volumique  $\rho = 0,006$ .

Une première mesure est prise avant de mettre la solution sous agitation comme étant l'instant initial ( $t = 0 \text{ min}$ ). Par la suite, une mesure du spectre est prise toutes les 15 minutes pendant 1 heure, puis une mesure après 2 heures, et enfin après 3 heures. On relève ainsi l'évolution de la concentration en toluène dans l'eau au cours du temps. La concentration en toluène dans la membrane est déterminée grâce à l'équation du bilan de matière global.

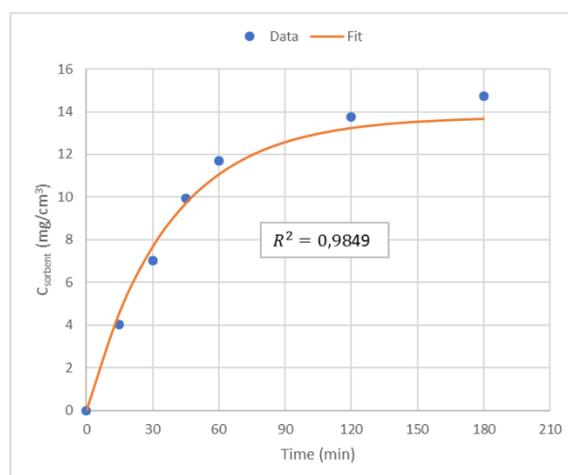


Figure14 : Évolution de la concentration en toluène dans la membrane de référence. Les points représentent les données, la courbe représente l'ajustement réalisé avec le modèle.

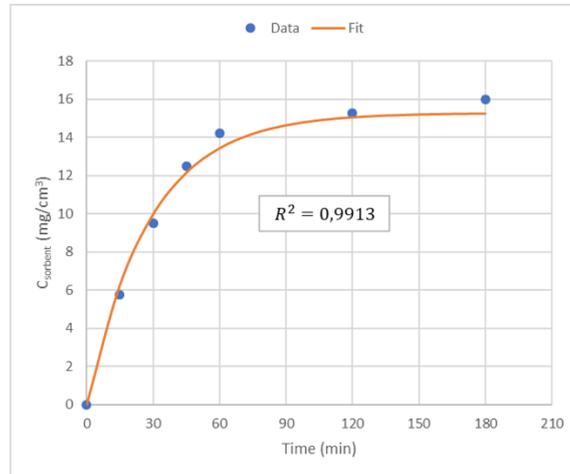


Figure 15 : Évolution de la concentration en toluène dans la membrane phenyl-PDMS.

Les figures 14 et 15 représentent respectivement l'évolution au cours de temps de la concentration en toluène pour la membrane de référence et pour la membrane phenyl-PDMS (moyenne sur deux essais). On constate que la concentration varie peu entre les points de données à 120 min et à 180 min, on suppose donc que l'on a atteint l'équilibre après 2 heures (même si l'écart semble réduit entre 60 min et 120 min dans le cas de la membrane phenyl-PDMS).

En faisant le rapport entre la concentration dans la membrane et la concentration dans l'eau à  $t = 120$  min, on détermine le coefficient de partage  $K_{sw}$ . Par un ajustement du modèle exprimant l'évolution de la concentration en toluène au cours du temps dans la membrane selon la méthode des moindres carrés, on peut trouver la vitesse de désorption  $k_d$ . Connaissant  $K_{sw}$ ,  $\rho$  et  $k_d$ , on détermine enfin la vitesse d'adsorption  $k_a$ .

Tableau 1 : Résumé des performances de chaque membrane.

	$K_{sw}$	$k_a$
Sylgard® 184	119	0,012
phenyl-PDMS	141	0,017

Le tableau 1 donne la valeur de  $K_{sw}$  et  $k_a$  de chaque membrane. Une augmentation du coefficient de partage de 18 % est à noter entre la membrane de référence et la

membrane développée synthétisée par le procédé sol-gel. La vitesse d'adsorption est également améliorée de 42 %.

## 7. Conclusion

Une méthode pour quantifier les performances d'extraction du toluène dans l'eau par une membrane en silicone a été développée. Cette méthode permet de travailler en continu et à volume constant. Le modèle à deux compartiments a été utilisé pour décrire la cinétique d'extraction. Celui-ci permet de déterminer la vitesse d'adsorption de la membrane à partir d'un ajustement réalisé par la méthode des moindres carrés sur le modèle pour trouver la vitesse de désorption. Le coefficient de partage est lui calculé directement à partir des données expérimentales.

Une augmentation du coefficient de partage de 18 % est à noter entre une membrane de référence réalisée à partir d'un kit silicone commercial, et une membrane synthétisée par le procédé sol-gel et contenant des groupements phényles permettant une meilleure interaction avec le toluène. La vitesse d'adsorption est également améliorée de 42 %. Rajouter des fonctions phényles semble donc être une solution simple pour augmenter les performances d'une membrane silicone pour l'extraction des BTEX en phase aqueuse. Idéalement la vitesse de désorption devra être mesurée dans une expérience indépendante pour valider définitivement le modèle à deux compartiments.

## 8. Sources

- [1] HARRIS, D. C., & LUCY, C. (2015). *Quantitative Chemical Analysis*. W. H. Freeman.
- [2] NAM, G.-U., BONIFACIO, R. G., KWON, J.-H., & HONG, Y. (2016). Kinetics and equilibrium partitioning of dissolved BTEX in PDMS and POM sheets. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, pp. 18901-18910. doi:10.1007/s11356-016-7098-y
- [3] ATKINS, P., & PAULA, J. D. (2010). *Atkins' Physical Chemistry*. Oxford University Press.
- [4] ROSENBAUM, S. E. (2012). *Basic Pharmacokinetics and Pharmacodynamics: An Integrated Textbook and Computer Simulations*. John Wiley & Sons.

- [5] KALBAUGH, D. V. (2017). *Differential Equations for Engineers: The Essentials*. CRC Press.
- [6] MARK, J. E., SCHAEFER, D. W., & LIN, G. (2015). *The Polysiloxanes*. Oxford University Press.
- [7] INNOCENZI, P. (2016). *The Sol to Gel Transition*. Springer.
- [8] GHANBARI, H., MEL, A. D., & SEIFALIAN, A. M. (2011). Cardiovascular application of polyhedral oligomeric silsesquioxane nanomaterials: a glimpse into prospective horizons. *6*, pp. 775-786. Dove Press. doi:10.2147/IJN.S14881



# Développement d'un système complet de mesure de la qualité de l'air au sein de l'Internet des objets

Ing. S. DI STEFANO  
Ing. M. DUMORTIER  
Dr Ir S. EGGERMONT  
Ing. F. TRIQUET  
CERISIC – Mons

*De nos jours, l'industrialisation rapide, la croissance explosive de la population et les développements de l'agriculture intensive sont un ensemble d'éléments impactant négativement la qualité de l'air. Il est donc une priorité de connaître et de maîtriser son environnement. Pour ce faire, le projet IMMERSION propose une solution autonome, « plug and play », low-cost et faible consommation permettant de donner une image de la qualité de l'air. Ce dispositif électronique muni d'une unité de traitement (microcontrôleur) intègre des capteurs de gaz au sein d'une plateforme communicante via les réseaux de l'internet des objets (IoT), et plus précisément les LPWAN (Low Power Wide Area Network).*

*Mots-clefs : Environnement, Capteurs, IdO, LPWAN, villes intelligentes, pollution, LoRa, Sigfox, capteurs de gaz, faible consommation d'énergie.*

*Currently, environment is a major concern. The explosive growth of the population, the development of industries and development of intensive agriculture are a set of elements impacting negatively the quality of the air. It's a priority to know and master the environment. To do this, the IMMERSION project offers a plug and play, low-cost and low consumption solution to give an image of the air quality. This system (device) equipped with a processing unit (microcontroller) integrates gas sensors within a communicating platform via IoT networks, specially LPWAN (Low Power Wide Area Network) and BLE (Bluetooth Low Energy), to collect environmental data.*

*Keywords: Environment, sensors, IoT, LPWAN, smart cities, pollution, LoRa, Sigfox, gas sensors, low power consumption.*

## 1. Introduction

### 1.1 Contexte

Le projet IMMERSION est un projet FIRST Hautes Écoles développé au CERISIC [1], le Centre d'Études et de Recherche des catégories agronomique, paramédicale et technique de la Haute École Louvain en Hainaut. Ce projet vise le développement d'un dispositif électronique permettant de mesurer la qualité de l'air au sein d'un système communicant.

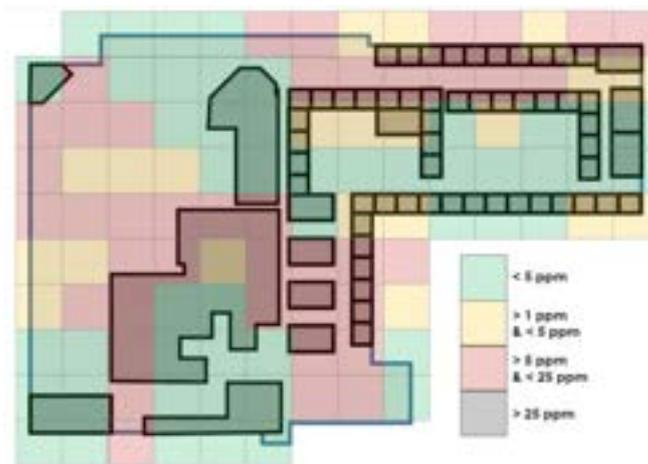
Depuis de nombreuses années, la lutte contre la pollution de l'air, les villes intelligentes et les plateformes environnementales sont au centre des préoccupations. Les activités économiques comme les transports, l'industrialisation rapide, les développements de l'agriculture intensive ainsi que la croissance explosive de la population produisent des polluants atmosphériques nocifs impactant négativement la qualité de l'air. Parmi les différents gaz aux effets directs ou indirects nocifs pour la santé, voire cancérigènes, on retrouve principalement les composés organiques volatils (COV), tels que les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) ou le formaldéhyde [2]. La présence de tous ces éléments, tant en intérieur qu'en extérieur, peut affecter le système respiratoire, entraîner des maladies ou encore des décès prématurés [3][4].

Les méthodes classiques de détection et mesure des COV font le plus souvent appel à des techniques de prélèvement d'échantillons qui sont ensuite analysés en laboratoire. Ces méthodes sont précises mais onéreuses et lentes [5][6]. Il existe également des stations de mesure mobiles [7]. Toutefois, celles-ci ont généralement la taille d'un conteneur de transport et coûtent plusieurs dizaines de milliers d'euros [8]. Leur déploiement dans les villes ou sites industriels devient alors compliqué. D'autres méthodes, plus légères, ont été mises au point et intégrées dans des appareils portatifs, et commercialisés, mais ces systèmes restent inadaptés pour un suivi en continu dans l'industrie ou pour des mesures ponctuelles chez le particulier qui recherche une mesure à moindres frais.

La mise au point de plateformes environnementales facilement transportables, à faible coût et à faible consommation se justifie dès lors. Actuellement, de nouveaux développements et produits sont apparus sur le marché des capteurs de gaz et des nœuds de capteurs sans fil (Wireless Sensor Nods ou WSN) ou autres capteurs intelligents (smart sensors) [9] en vue d'améliorer la détection de composés présents dans l'air.

Grâce à l'*Internet des objets* (*IdO*, *english* : *IoT*), les dispositifs peuvent fournir des rapports de maintenance et s'auto-diagnostiquer. Ces Objets permettent donc d'envoyer des données au travers de réseaux IoT tels que les technologies Lora [10], Sigfox [11], NB-IoT [12], etc. L'utilisation de ces technologies à l'avantage de

fournir des données sur de grandes distances, n'obligeant donc pas une entreprise ou un particulier d'installer son propre réseau interne et sa propre antenne. Plusieurs dispositifs ou nœuds de capteurs peuvent alors être placés au sein d'une entreprise afin de réaliser le quadrillage d'un site (fig.1) en vue d'un monitoring. Vu leur petite taille, les dispositifs peuvent être placés dans des endroits où l'accès est restreint et non aisé. Le but de ces appareils est d'avoir des éléments purement autonome et durable qui effectuent une mission de surveillance environnementale.



*Figure 1 – Illustration du quadrillage d'un site industriel en vue d'obtenir une cartographie environnementale en fonction des concentrations d'un gaz exprimées en partie par million volume (ppm).*

Cet article présentera dans un premier temps les objectifs du projet. Ensuite viendront les parties théoriques relatives à la bonne compréhension de celui-ci. Parmi celles-ci, on retrouvera dans un premier temps l'explication des différentes technologies de détection de gaz à interfacer sur le dispositif. On se focalisera dans un deuxième temps sur les technologies de transmission de données utilisées et leur protocole. En dernier lieu, viendront les méthodes d'implémentation du système et les premiers résultats obtenus.

## 1.2. Objectifs du projet

L'objectif du projet IMMERSION est de développer une plateforme de communication sans fil pour capteurs sur base des protocoles LoRaWAN. Ces protocoles, issus des technologies LPWAN permettent l'envoi de petites quantités de données (débits de l'ordre de 0,25 à 10 kbit/s) sur de longues distances (de 15 à 20 km en extérieur) et à faible consommation (de l'ordre de la dizaine de mW) [13]. Il s'agira de l'étude du développement d'une solution complète compatible avec des microcapteurs de composés volatils à ultra-basse-consommation pour des

applications de surveillance industrielle et environnementale. Ces derniers sont développés dans le cadre du projet FIRST Spin-off SENSEVOC [14] à l'Université catholique de Louvain (pôle ELEN, Institut ICTEAM), partenaire scientifique du projet IMMERSION, en vue d'une future commercialisation. Outre le développement de l'acquisition des données des capteurs, il s'agit d'implémenter le protocole de communication, puis l'intégration et la mise en œuvre du nœud de récupération et d'envoi des données au travers de cette plateforme en respectant des contraintes fortes de consommation et de faibles coûts. La plateforme développée devra être capable de communiquer avec les deux protocoles Sigfox et LoRaWAN afin de répondre à un maximum de réseaux commerciaux et permettre une meilleure valorisation.

La Figure 2 est un concept du produit final proposé par le projet IMMERSION. Comme on peut le voir, des capteurs mesurant différents paramètres seront présents sur la plateforme. Le tout correspondra en un dispositif alimenté via une batterie.

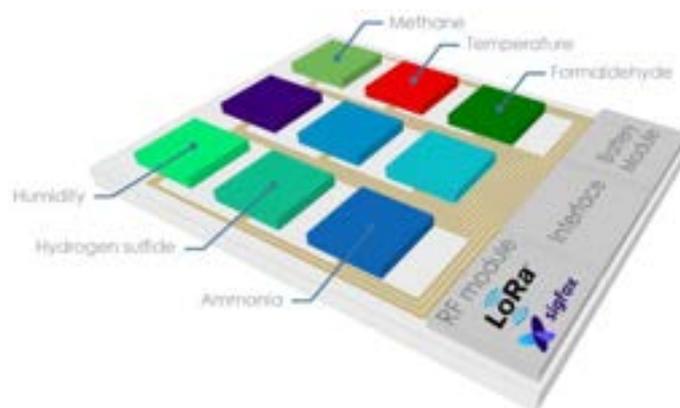


Figure 2 - Concept du produit EnviCam®. [©Gilles Scheen][14].

L'ensemble des développements devront être réalisés en respectant des contraintes de coûts, d'encombrement mais surtout de consommation étant donné que le système doit être autonome et doit avoir une durée de vie de 5 ans.

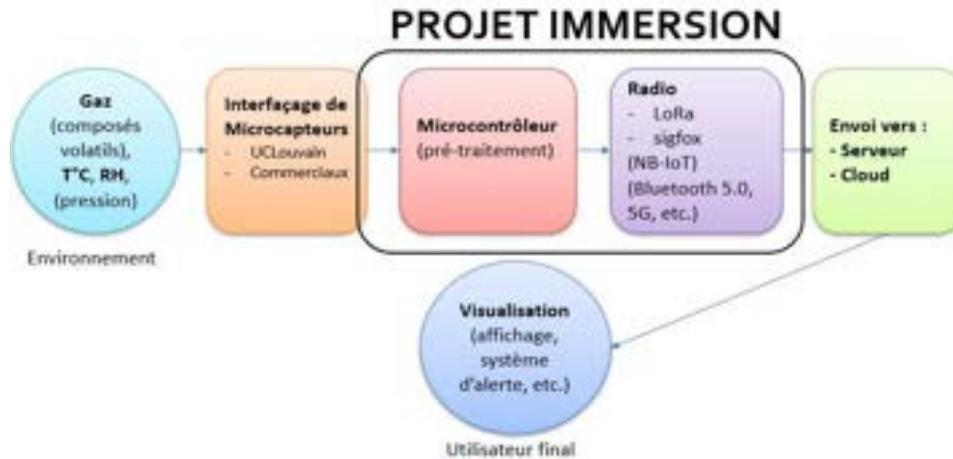


Figure 3 – Positionnement du projet IMMERSION au sein de la chaîne d'acquisition.

## 2. Les technologies de détection de gaz

Les capteurs sont les premiers éléments que l'on retrouve dans la chaîne d'acquisition. Les informations issues de ces capteurs seront traitées par un microcontrôleur muni d'un processeur ARM M0+ basse consommation et envoyées via les réseaux de télécommunication expliqués dans le chapitre suivant de cet article.

Parmi les différentes technologies de capteurs existants, on s'intéresse aux catégories suivantes détaillées dans les prochaines parties de ce chapitre :

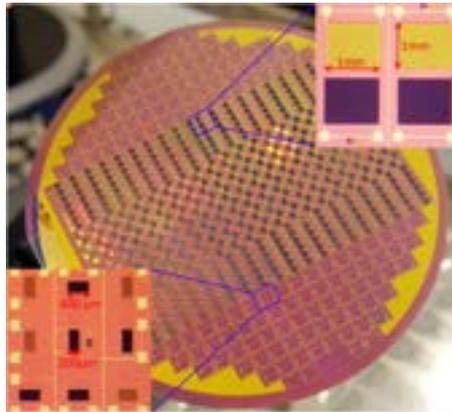
- Les capteurs de types résistifs fabriqués à l'UCLouvain,
- les capteurs MOX (métal oxyde) [15],
- les capteurs électrochimiques [16],
- les capteurs infra-rouge (NDIR) [17].

### 2.1. Les capteurs de types résistifs UCLouvain

Dans le cadre de ses activités de recherche en microsystèmes, l'UCLouvain développe de nouveaux microcapteurs sur substrat silicium (Si), à ultra-basse-consommation et faible coût, pour des applications de détection de gaz dans l'Internet des objets. La partie sensible, ou transducteur, est composée d'un tableau de microélectrodes interdigitées fonctionnalisées à l'aide de matériaux interagissant

aux gaz à température ambiante de manière plus ou moins sélective (fig.4). Ces derniers sont de type polymères (exemple : Polypyrrole ou PPy, à empreinte moléculaire ou non) ou hybrides à base de nanomatériaux (exemple : graphène) ou nanocomposites. Les premiers gaz d'intérêt sont l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), certains composés organiques volatils comme l'acétaldéhyde, le formaldéhyde et certains BTEX, l'ozone ( $\text{O}_3$ ) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), entre autres.

Une optimisation de l'architecture du dispositif, ainsi que l'intégration de matériaux sensibles, permettent d'atteindre des consommations par transducteur inférieures à  $20 \mu\text{W}$  en continu, donc trois ordres de grandeurs inférieures aux capteurs commerciaux de type MOX ou infrarouges [18].



*Figure 4 - Photographie et image au microscope optique d'une tranche de Si en cours de fabrication et fonctionnalisée avec du PPy pour des applications de détection d'ammoniac [19].*

## **2.2. Les capteurs de gaz MOX**

Les capteurs MOX sont des capteurs permettant la détection de différents types de gaz. Ce capteur voit sa conductivité (et donc sa résistance) varier en fonction du gaz auquel il est sensible. Pour que ce type de capteur ait une sélectivité suffisante ainsi qu'une bonne sensibilité, ils doivent fonctionner à des températures élevées pouvant varier de l'ordre de  $200^\circ\text{C}$  à  $600^\circ\text{C}$ . Pour ce faire, un circuit résistif additionnel amenant le substrat à haute température est ajouté à proximité du transducteur, rendant dès lors les capteurs énergivores. L'utilisation de ces capteurs se justifie par leurs meilleures sensibilités et pour des mesures plus précises lorsque cela est nécessaire.

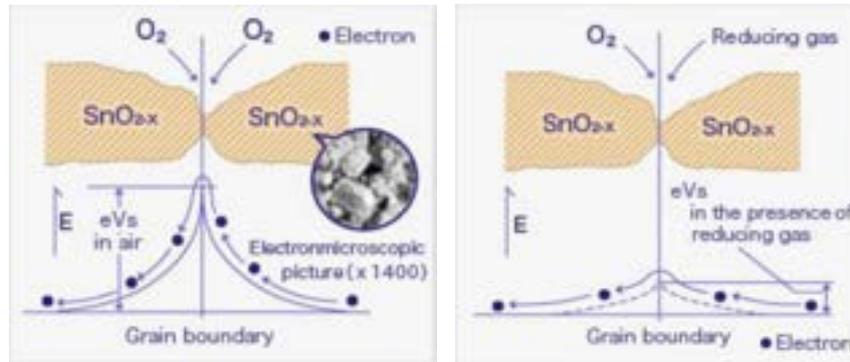


Figure 5 - Principe de fonctionnement d'un capteur à oxydes métalliques [15].

Dans le cas où la concentration d'oxygène est de 0% et lorsque le matériel (typiquement le dioxyde d'étain [ $\text{SnO}_{2-x}$ ]) est chauffé à haute température (environ  $400^\circ\text{C}$ ), les électrons libres circulent à travers les parties jointes de cristaux de dioxyde d'étain. Dans l'air (environ 21% d' $\text{O}_2$ ), l'oxygène est adsorbé sur la surface de l'oxyde métallique. C'est grâce à son affinité élevée pour les électrons que l'oxygène adsorbé attire les électrons libres à l'intérieur de l'oxyde métallique, formant une barrière de potentiel (eVs dans l'air fig. 5). Cette barrière de potentiel empêche le flux d'électrons, provoquant une résistance élevée du capteur dans l'air. (Partie gauche de la fig. 5).

Lorsque le capteur est exposé à un gaz combustible ou à un gaz réducteur (tel que le monoxyde de carbone), la réaction d'oxydation de ce gaz avec l'oxygène adsorbé se produit à la surface du dioxyde d'étain. En conséquence, la densité de l'oxygène adsorbé sur la surface du dioxyde d'étain diminue et la hauteur de la barrière de potentiel est réduite. Les électrons circulent facilement au travers de la barrière de potentiel de hauteur réduite, et la résistance du capteur diminue. La concentration de gaz dans l'air peut être détectée en mesurant le changement de résistance des capteurs de gaz de type MOX. La réaction chimique des gaz et de l'oxygène adsorbé sur la surface du dioxyde d'étain varie en fonction de la réactivité des matériaux de détection et de la température de fonctionnement du capteur. (Partie droite de la fig. 5) [15].

### 2.3. Les capteurs de gaz électro-chimiques

Les capteurs électrochimiques fonctionnent en réagissant avec le gaz d'intérêt et en produisant un signal électrique proportionnel à la concentration de gaz. Un capteur électrochimique typique se compose d'une électrode de détection (ou électrode de travail), et une contre-électrode séparée par une fine couche d'électrolyte (fig.6).

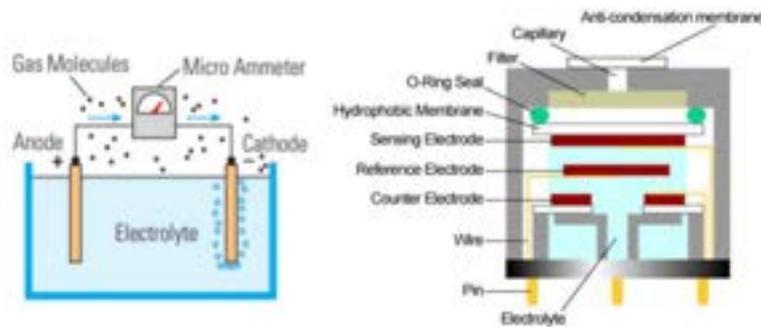


Figure 6 – Schéma de principe d'un capteur électrochimique (à gauche)  
[16] Représentation d'un capteur électrochimique (à droite) [20].

Le gaz qui entre en contact avec le capteur traverse d'abord une petite ouverture de type capillaire, puis diffuse à travers une barrière hydrophobe et finit par atteindre la surface de l'électrode. Cette approche est adoptée pour permettre à la quantité appropriée de gaz de réagir à l'électrode de détection pour produire un signal électrique suffisant tout en empêchant l'électrolyte de s'échapper du capteur.

Le gaz qui diffuse à travers la barrière réagit à la surface de l'électrode de détection impliquant un mécanisme d'oxydation ou de réduction. Ces réactions sont catalysées par les matériaux d'électrode développés spécifiquement pour le gaz d'intérêt.

Avec une résistance connectée à travers les électrodes, un courant proportionnel à la concentration de gaz circule entre l'anode et la cathode. Le courant peut être mesuré pour déterminer la concentration de gaz [16].

Cependant, la valeur de courant est tellement faible (de l'ordre du nA) qu'il est nécessaire d'utiliser un circuit de conditionnement analogique « *Analog Front End* » afin de convertir le courant en une tension. Ceci est réalisé à l'aide d'un amplificateur de transimpédance.

#### 2.4. Les capteurs de gaz infrarouges non dispersifs

Les capteurs infrarouges, aussi appelés capteurs infrarouges non dispersifs (NDIR) sont hautement sensibles et sélectifs. Ces capteurs sont souvent des capteurs de CO<sub>2</sub>. Le dioxyde de carbone présente une bande d'absorbance caractéristique dans l'infrarouge à la longueur d'onde de 4,26 μm. Au moment où le rayonnement infrarouge traverse un gaz contenant du CO<sub>2</sub>, les molécules de CO<sub>2</sub> absorbent une partie du rayonnement. La quantité de rayonnement qui traverse le gaz dépend de la concentration en CO<sub>2</sub>. Un capteur infrarouge qui comporte un détecteur, une source IR et un chemin optique vient alors quantifier le phénomène [17].

### 3. Les technologies LPWAN

Il s'agit de réseaux sans fils basse consommation, bas débit et longue portée étant optimisé pour des dispositifs aux ressources limitées qui sont implémentés dans le but d'avoir une autonomie de plusieurs années ainsi qu'une portée lointaine, comme on peut le voir sur la figure 7. Ces réseaux conviennent dès lors parfaitement à la plupart des applications IoT qui n'exigent pas de débit élevé [22].

Cette famille utilise des bandes de fréquences à usage libre ISM (Industriel, Scientifique et Médical) [21] disponible dans le monde entier. Ces bandes ISM implique le partage de ressources avec d'autres concurrents présents sur le marché, à savoir les technologies RFID, ZigBee et autres. Toutefois des règles d'utilisation ont été créées afin de ne pas marcher sur le pied des autres.

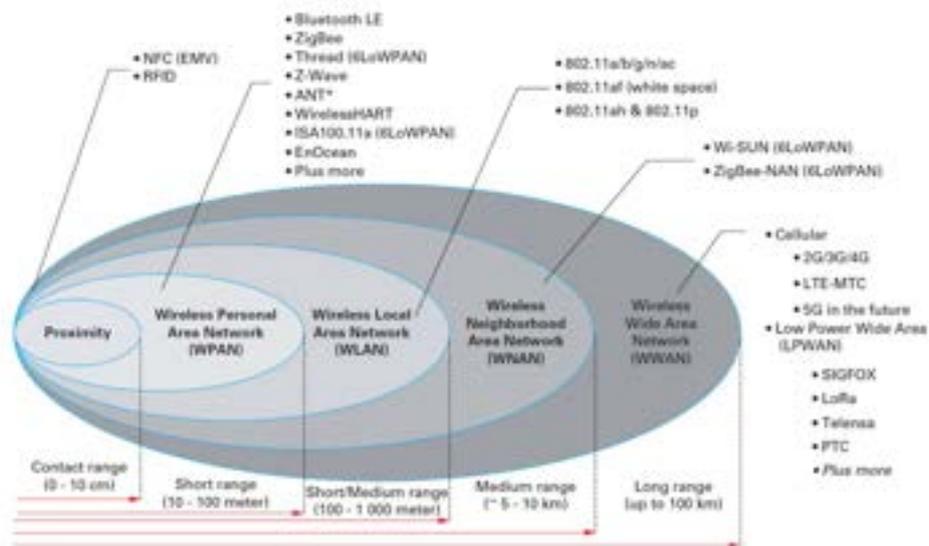


Figure 7- Comparaison des différentes technologies radio pour l'IoT en fonction de leur portée. [21]

Protocoles	Fréquence	Portée	Autonomie sur batterie	Débit
Zigbee	2,4 GHz	10 - 100 m	Années	20 - 250 kbps
WiFi	2,4 GHz	1000 m	Jours	54 Mbps
LTE(4G)	900/1800/1900/2100 MHz	100 km	Jours	3 - 10 Mbps
Sigfox	868 MHz	3 - 10 km	Années	1 bps - 1 kbps
LoRaWAN	868 MHz	1 - 10 km	Années	1 - 50 kbps

Tableau 1- Comparaison des protocoles IoT.

Parmi les différents protocoles de communication le plus adapté aux applications IoT basse consommation, on citera le LoRa. Ce protocole est optimisé pour une basse consommation et pour atteindre des distances plus importantes.

Ce chapitre s'intéresse aux technologies LPWAN et plus précisément à la technologie LoRa, son protocole de communication LoRaWAN et ses spécificités.

### 3.1. Architecture des réseaux LPWAN

La topologie du réseau, comme on peut le voir sur la figure 8, est en étoile. Les objets communiquent avec les passerelles (gateways). C'est donc à cet endroit que sont centralisés les messages destinés à être transmis au serveur de gestion de réseau. La liaison entre les concentrateurs et le serveur de gestion repose sur des technologies haut débit comme l'Ethernet ou la 4-G. Toutefois, la particularité d'un réseau comme celui-ci est qu'un équipement ne communique pas seulement à travers un concentrateur mais tous les concentrateurs sont capables de recevoir l'information transmise par un équipement.

Les données sont reçues sur des clouds « sigfox, MyThings Proximus ou The Things Network ». Ces clouds assurent le traitement des messages. Ceux-ci peuvent par la suite être envoyés via des interfaces web permettant de visualiser les données.

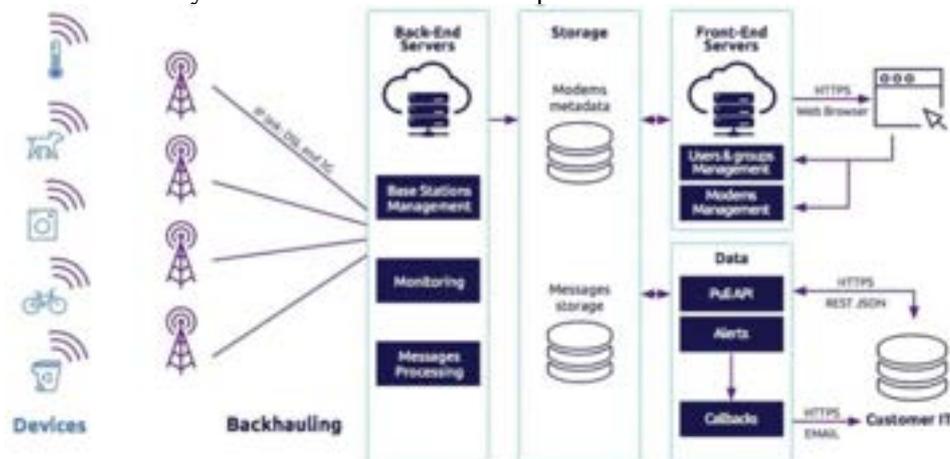


Figure 8- Architecture des réseaux LoRaWAN et Sigfox.

### 3.2. Le protocole LoRaWAN

LoRaWAN signifie Long Range Wide Area Network. Il s'agit d'un protocole réseau bas débit et longue portée basée sur la technologie radio LoRa. Soutenu par l'association d'industriels LoRa Alliance, il vise une couche physique développée par Semtech utilisant la technique de modulation radio par étalement de spectre (repris sous le terme anglais *Chirp Spread Spectrum* ou technologie LoRa) et une couche MAC nommé le LoRaWAN. Ce type de modulation consiste en une méthode de transmission d'un signal dans laquelle l'énergie émise est distribuée dans le domaine fréquentiel. Cette technique de transmission transmet un signal sur une largeur de bande plus grande que l'ensemble des fréquences qui compose le signal d'origine. Ceci permettant de réduire considérablement la consommation. [23]

Les fréquences d'utilisation sont les gammes : 433, 868 et 915 MHz en fonction de la législation du pays d'utilisation [27]. La taille d'une transmission est entre 2 et 255 octets, le débit peut atteindre 50 kbps. La modulation LoRa est donc propriétaire, contrairement au standard LoRaWAN qui, lui, est une solution ouverte.

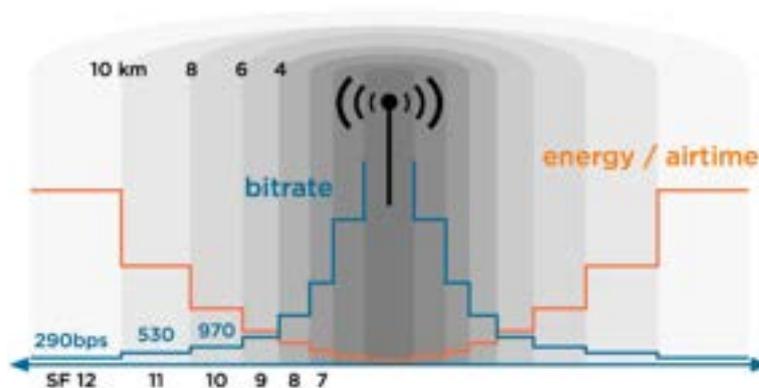


Figure 9- Lien entre Facteur d'étalement, débit et énergie. [25]

La portée de la communication est déterminée par sa bande passante, la puissance du signal de sortie et le facteur d'étalement utilisé (SF pour Spreading Factor). Le réseau LoRa supporte 7 facteurs d'étalements allant de SF6 à SF12. [23][24]. Le facteur d'étalement est déterminé en fonction de plusieurs paramètres. Celui-ci se traduit par la qualité de liaison d'un équipement « end-node » à une passerelle « gateway » (fig.8). Ce qui signifie que le facteur d'étalement travaille sur la robustesse. Il est directement lié à la distance séparant le dispositif d'une passerelle. En fonction du facteur d'étalement, un système sera plus ou moins rapide. En effet, la particularité du LoRa est qu'il s'adapte à sa situation et envoi de l'information à

des débits différents suivant le facteur d'étalement. La figure 9 permet de visualiser le lien entre le SF, le débit et l'énergie consommée.

#### *Les classes du protocole LoRaWAN*

Le protocole LoRaWAN assure des communications bidirectionnelles et définit 3 classes d'équipements end-node (fig.10) [26].

La première classe, appelée « Classe A », concerne les équipements à très faible consommation d'énergie. Elle permet une communication bidirectionnelle par l'allocation de deux canaux de réceptions après chaque émission. Il s'agit de l'application la moins énergivore. La « classe B » possède plus de créneaux de réceptions que la classe A. la planification de créneaux se réalise à la réception d'une balise de synchronisation émise par le réseau. L'inconvénient de ce mode est sa consommation plus importante car la liaison radio est plus sollicitée. La dernière classe, appelée « Classe C », se différencie par le fait que les équipements sont constamment à l'écoute d'une donnée émise par le réseau. Les créneaux de réception ne se ferment que lorsque le dispositif transmet. La consommation de ce mode est encore plus élevée que les deux modes précédents.

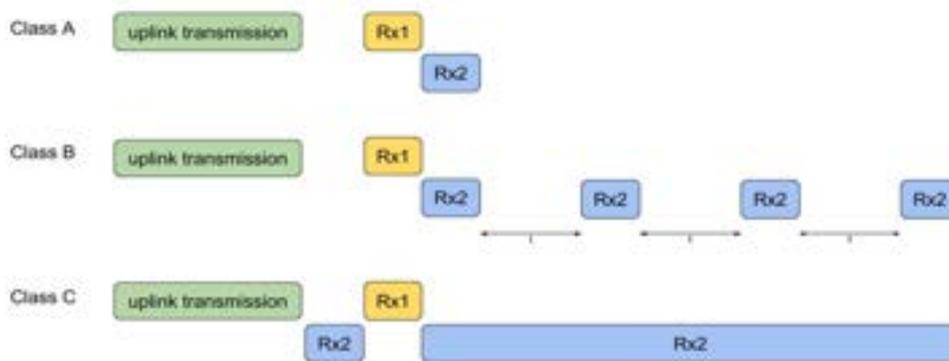


Figure 10- Diagramme TX/RX des différentes classes du protocole LoRaWAN [25].

La classe A du protocole LoRaWAN est choisie pour ce projet étant donné les faibles consommations liées à celle-ci.

## 4. Implémentation du système

### 4.1. Outil de traitement

Le microcontrôleur est la partie maitresse du projet. Il s'agit de l'organe de traitement des données provenant des capteurs. Il faut donc que le choix d'un type de microcontrôleur par rapport à un autre soit justifié. Il existe deux types d'approches :

#### 1) Première approche

Celle-ci consiste à utiliser un microcontrôleur et un modem émetteur-récepteur RF de manière séparée. Cette première solution a été testée afin d'obtenir un *proof of concept*.

La plateforme NUCLEO-L073RZ reprise à la figure 11 a été choisie afin de bénéficier d'un démarrage rapide. Celle-ci provient de ST et utilise un organe de traitement ou microcontrôleur d'architecture ARM Cortex M0+. Le choix s'est porté sur cette solution vu le côté très faible consommation du microcontrôleur ARM.



Figure 11- Board de développement NUCLEO-L073RZ de STMicroelectronics [28].

Comme le montre la figure 11, le circuit possède 51 GPIO dont des connecteurs Arduino ainsi que des connecteurs Morpho permettant d'utiliser facilement les fonctionnalités d'entrée et de sortie du microcontrôleur présent. Il est également constitué d'entrées analogiques, des ports de communication SPI, I<sup>2</sup>C, UART, ULP-UART, des sorties PWM, et des ADC [28].

Cette carte possède un processeur ARM CORTEX M0+ 32 bits de 32 MHz, 192 Kbytes de mémoire flash et 20 kBytes de mémoire vive, 6 kBytes de EEPROM. Il peut être alimenté via un port d'alimentation micro USB (alimenté en 5V) ou bien via une batterie externe ayant pour valeur minimale 1,8V. Ce système est également

pourvu d'oscillateurs internes ainsi que de PLL pour la gestion de l'horloge. En termes de contrôle, il possède un compteur de 16 bits ultra basse consommation ainsi que 6 compteurs (Timer) de 16 bits classiques.



Figure 12- Emetteur/ Transmetteur LoRa (SX1272) [29].

Le module SX1272, présenté à la figure 12, est un modem émetteur-récepteur RF. La plateforme SX1272MB2DAS est contrôlée à l'aide d'un BUS SPI dont la vitesse maximale est de 10 Mbps. Ce module possède des broches permettant de se connecter directement sur la plateforme Nucleo. On peut également remarquer que certaines broches ne sont pas utilisées. Ceci est intentionnel car il existe un grand nombre de capteurs qui utilisent des protocoles tels que l'I<sup>2</sup>C ou encore l'UART et le fait de laisser ses broches libres permet de les connecter au board de développement Nucleo-L073RZ. Cet émetteur/récepteur possède les caractéristiques suivantes :

- 157 dB de bilan de liaison.
- Puissance de transmission de 14 dBm.
- Débit programmable jusqu'à 300 kbps.
- Grande sensibilité, inférieure à -137 dBm.
- Modulation LoRa ou FSK.

## 2) Deuxième approche

La deuxième consiste, quant à elle, à utiliser un module qui inclus microcontrôleur et émetteur-récepteur radio fréquence. Il est donc plus simple d'intégrer ce type de module dans un design

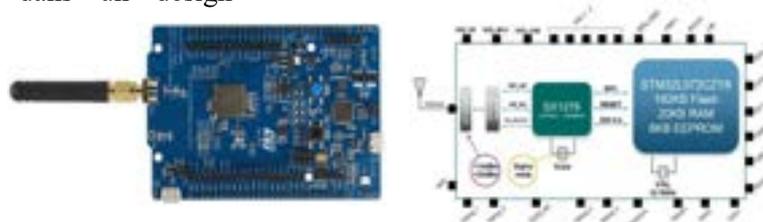


Figure 13- Lora Discovery board intégrant le module Radio + MCU MuRata [30].

complet. Le module s'avère, cependant, être plus coûteux que l'achat d'éléments séparés mais les coûts liés au design ne sont plus à prévoir.

La figure 13 représente le module LoRa Discovery board de STMicroelectronics [30]. Ce kit reprend le module intégrant donc le microcontrôleur STM32L072, ayant des caractéristiques semblables au STM32L073 cité précédemment, et un modem émetteur-récepteur RF SX1276 de chez Semtech permettant d'envoyer des données via le réseau LoRa.

Le module prévoit quelques I/O mais également des broches pour tous les types de communication tels que les standards RS232, SPI, I<sup>2</sup>C. Des broches peuvent également être utilisées en entrée pour l'utilisation d'un ADC.

Dans ce module, le design RF n'est pas à réaliser. Il suffit simplement de placer une antenne.

## 4.2. Interfaçage des capteurs

Un algorithme est développé permettant l'activation des capteurs de gaz en fonction des conditions de fonctionnement et du besoin d'effectuer une mesure. Ces mesures de gaz sont combinées à d'autres paramètres environnementaux tels que l'humidité et la température. Les données provenant de ces capteurs sont mesurées toutes les 5 secondes et envoyées toutes les 5 minutes par l'intermédiaire d'un module RF présenté ci-dessus.

## 5. Résultats

### 5.1. Mesure de consommation du système de communication

	Conditionneur R2F	MCU	LoRa (SF 7)	LoRa (SF 12)	Sigfox
<b>Tension d'alimentation (V)</b>	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
<b>Courant (mA)</b>	200 $\mu$ A à 1,2 mA	+/- 10	25	40	20
<b>Durée (ms)</b>	Continu	Continu	60	1300	6300
<b>Puissance (mW)</b>	660 $\mu$ W à 3.96 mA	33	82,5	132	66
<b>Énergie par envoi (mJ)</b>	/	/	5	171,6	415,8

Tableau 2- Tableau comparatif des mesures de consommation du système.

Le tableau 2 représente les différentes mesures de consommation du système en fonction de l'utilisation du protocole LoRa ou Sigfox. Les données utiles envoyées sont de **12 Bytes** (payload). La totalité de la trame envoyée faisant quant à elle **38 Bytes**. (Identifiant + header + payload).

En termes de consommation, il est plus avantageux d'utiliser le protocole LoRa que le Sigfox. En effet, la consommation de ce deuxième est plus importante pour un même nombre de bytes envoyés. De plus, une limitation de 12 bytes de données oblige à envoyer la donnée utile en plusieurs parties.

Si on imagine que la Payload est de 24 bytes, le protocole Sigfox devra découper la donnée en 2. Ce qui consommera donc 831.6 mJ. Soit quatre fois plus élevé qu'un envoi en LoRa.

En ce qui concerne le microcontrôleur, celui-ci fonctionne en mode run classique avec une fréquence d'horloge à **32 MHz**. Ceci correspond donc aux **10 mA** de manière continue.

Toutefois, il est possible de diminuer cette consommation en utilisant les mode « **sleep** » ou « **stop** » du microcontrôleur. Ce qui amène la consommation du MCU de l'ordre du **µA**. Si on imagine qu'après chaque mesure, le MCU entre dans un mode de veille, celui-ci verra alors sa consommation considérablement diminuée.

## 5.2. Mesures environnementales

Les données envoyées à partir du dispositif sont stockées dans un cloud (serveur) appartenant au fournisseur de réseau. Ces données sont par la suite redirigées vers une base de données interne et envoyées vers les serveurs d'un partenaire pour la visualisation des données. Chaque fichier envoyé est de type *json*. (fig.14).

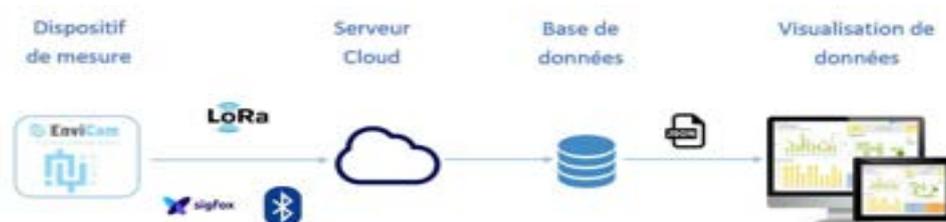


Figure 14- Système complet d'envoi de données.

Des tests ont été réalisés avec le prototype décrit dans la première approche afin de vérifier la solution actuellement proposée. Les données sont envoyées au moyen du système électronique conçu à cet effet. Le protocole utilisé est le LoRaWAN et les

données sont envoyées via le réseau Proximus. Comme dit précédemment, les données sont ensuite envoyées vers une base de données via la méthode « POST » et vers un site de visualisation d'informations via un fichier « .json ».

La figure 15 représente une mesure de la concentration de dioxyde d'azote et d'ozone, mesurées à partir de capteurs électrochimiques, près du rond-point N4-N25 à Louvain-la-Neuve entre le 17 septembre 2018 et le 26 septembre 2018. Le dispositif étant placé près d'un rond-point permet néanmoins de vérifier le lien entre la mobilité et le dégagement de ces gaz. Un capteur de température et d'humidité est également placé dans le but d'obtenir des informations environnementales complètes. Lors de ces mesures, on peut constater la présence de pics d'ozone liée à de forte température.



Figure 15- données provenant d'une plateforme EnviCam près du rond-point N4-N25 à Louvain-la-Neuve.

Ce type de graphique peut être réalisé pour tout type de gaz en fonction des émanations présentes sur un site particulier.

## 6. Conclusion et perspectives

La mise en avant des risques et des dangers liés à la pollution sur la santé et l'environnement a permis de montrer l'importance de déployer des plateformes environnementales dans les villes, entreprises ou encore les exploitations agricoles.

Ce projet a donc pour objectif de réaliser un système portable, peu encombrant et à faible coût permettant de mesurer de manière précise l'émanation de gaz nocif pour la santé et l'environnement. Pour ce faire, le choix de l'utilisation d'un protocole issu des technologie LPWAN et permettant d'envoyer sur de longues distances a été réalisé. Ce type de système a l'avantage qu'aucune infrastructure réseau ne doit être déployée par un client ou bien par les villes pour pouvoir obtenir des données. De plus, l'élément basse consommation rendrait l'appareil autonome et durable, évitant donc les coûts de maintenance.

La version actuelle du prototype montre des résultats plutôt prometteurs. Les données sont dans un premier temps récupéré à partir de kit de développement présentés au cours de cet article. Le dispositif se trouve quant à lui alimenté à partir de 4 piles AAA ou AA, respectivement de 1100 ou 2800 mAh. Les envois sont réalisés toutes les 5 minutes via le réseau LoRa. Les données sont par la suite rapatriées vers les serveurs d'un partenaire afin de visualiser les données de manière graphiques et d'en tirer des conclusions en fonction des mesures réalisées.

Bien que le produit soit déjà en partie fonctionnel, de nouveaux interfaçages de capteurs ainsi que des améliorations sont cependant à prévoir. Au niveau des améliorations, l'autonomie du système doit être optimisée de sorte à répondre à une durée de vie allant jusqu'à 5 ans. De la même manière, les méthodes d'acquisition et les envois doivent être étudiés dans le but d'obtenir un dispositif ultra basse consommation.

Afin d'obtenir un grand nombre de données et dans le but de valider le prototype, des campagnes de mesures sur sites et en laboratoires sont en cours de réalisation. Les prochaines étapes du projet sont dès lors l'optimisation du dispositif et l'intégration de l'entièreté du système en une carte électronique. Cela permettant alors de ne plus utiliser les kits d'évaluations.

## 7. Sources

- [1] CERISIC, Projet IMMERSION  
<https://www.cerisic.be/technique/projet-cerisic/integration-et-mise-en-oeuvre-de-microcapteurs-environnementaux-a-ultra-basse-consommation-au-sein-de-linternet-des-objets-et-de-lindustrie/>

- [2] Legout C., Trouillet M., Institut de veille sanitaire, *Exposition environnementale aux composés organiques volatils des riverains d'un ancien site industriel, Val-d'Oise (95)*. Évaluation des risques sanitaires et appui à la décision sanitaire.
- [3] A. Masih, A.S. Lall, A. Taneja, & Singhvi, R. (2016), *Inhalation exposure and related health risks of BTEX in ambient air at different microenvironments of a terai zone in north India*. Atmospheric Environment, 147, pp 55–66.
- [4] Air Climat, Agence wallonne de l'air & du climat, *effet néfaste sur la santé humaine*, Thématiques : qualité de l'air.  
<http://www.awac.be/inNdex.php/thematiques/qualite-de-l-air/les-consequences/effet-sur-la-sante-humaine>
- [5] CPTO, AirPACA Qualité de l'air (2017), *Atelier de sensibilisation : Quel air je respire au bureau ?*  
[http://www.cypres.org/wp-content/uploads/171127\\_Petit\\_Dejeuner\\_QAI\\_BureauxISPIRA\\_AIRPACA\\_CPTO.pdf](http://www.cypres.org/wp-content/uploads/171127_Petit_Dejeuner_QAI_BureauxISPIRA_AIRPACA_CPTO.pdf)
- [6] INERIS, Rapport d'étude 21/12/2004, *Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air. Sources, mesures et concentrations*. Ministère de l'Écologie et du développement durable. N°INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZd
- [7] T. Hosay, ISSeP – Environnement, Qualité de l'AIR (2002), *Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air en Région Wallonne*.
- [8] N. Castell, F.R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, A. Bartonova (2017). *Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?* Environment International, 99, 293–302.
- [9] C. Perera, C.H. Liu, S. Jayawardena, Min Chen. (2014), *A Survey on Internet of Things from Industrial Market Perspective*. IEEE Access, 2, 1660–1679.
- [10] Semtech, *What is LoRa®?*, <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (consulté en Octobre 2017)
- [11] Sigfox, *Sigfox Technology Overview*, <https://www.sigfox.com/en> (Consulté en octobre 2017)
- [12] NB-IoT HUAWEI, *NB-IOT Enabling new business opportunities*  
[https://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb\\_iot\\_whitepaper\\_en.pdf](https://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb_iot_whitepaper_en.pdf)
- [13] P.S. Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel, J. Famaey (2017). *Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption*. 2017 IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT).

- [14] Vocsens <http://vocsens.com>  
EnviCam <http://envicam.io>
- [15] Figaro Engineering inc, *Operating principle – MOX Sensors*  
<http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/principle/mos-type.html>
- [16] International Sensor Technology, *chapter 2. Electrochemical sensors*  
<http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>
- [17] Vaisala, *Les technologies de capteurs infrarouges et leur impact sur la précision de la mesure du CO2 dans les applications CVC*, Note d'application.  
<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/HVAC-CO2-Measurement-Accuracy-B211311FR-A.pdf>
- [18] D. Gibson, C. MacGregor (2013). *A Novel Solid State Non-Dispersive Infrared CO2 Gas Sensor Compatible with Wireless and Portable Deployment*. Sensors, 13(6), 7079–7103.
- [19] N. Marchand, T. Walewyns, D. Lahem, M. Debliquy, et L. A. Francis (2017), *Ultra-low-power chemiresistive microsensor array in a back-end CMOS process towards selective volatile compounds detection and IoT applications*, ISOCs/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), Montreal, QC, Canada, 2017, p. 1-3.
- [20] Membrapor, *Electrochemical gas sensors: Working principle*  
<http://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/>
- [21] M.P. Oдини, *Objets connectés : enjeu de la 5G*, Techniques de l'ingénieur, TE8000, Novembre 2016
- [22] K.A.A. Rabaieci, S. Harous, S. (2016). *Internet of things: Applications and challenges*. 2016 12th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT).
- [23] R.S. Sinha, Y. Wei, S.H. Hwang, (2017). *A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT*. ICT Express, 3(1), 14–21.
- [24] A. Lavric, V. Popa. (2017). *Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey*. 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS).
- [25] Witekio, *LoRaWan, a dedicated IoT Network* (consulté en Aout 2018)  
<https://witekio.com/blog/lorawan-dedicated-iot-network/>
- [26] LoRa Alliance, *LoRaWAN: What is the LoRaWAN™ Specification?*  
<https://lora-alliance.org/about-lorawan>

- [27] Proximus EnCo, *LoRaWAN device Classes* (consulté en Aout 2018)  
<https://enablingsupport.zendesk.com/hc/en-us/articles/206069491-LoRaWAN-device-classes>
  
- [28] STMicroelectronics, *NUCLEO-L073RZ : Ultra-low-power Arm Cortex-M0+ MCU with 192 Kbytes Flash, 32MHz CPU, USB, LCD*  
<https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32l073rz.html>
  
- [29] STMicroelectronics, *I-NUCLEO-SX1272D : High-performance RF transceiver expansion board featuring FSK, OOK and the LoRa long range modem for STM32 Nucleo-64*  
[https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-eval-tools/stm32-mcu-eval-tools/stm32-3rd-party-evaluation-tools/i-nucleo-sx1272d.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-eval-tools/stm32-mcu-eval-tools/stm32-3rd-party-evaluation-tools/i-nucleo-sx1272d.html)



# Optima technico-économiques d'installations frigorifiques selon leur réfrigérant

Ing. L. PAQUET  
Dr Ir. V. HANUS  
PIERRARD – Virton

*De par la législation européenne, les réfrigérants utilisés actuellement sont appelés à disparaître. Cet article a, dès lors, pour but de comparer d'un point de vue technique et économique plusieurs solutions possibles pour une même installation frigorifique de manière à déterminer vers quels réfrigérants s'orienter dans le futur pour les chambres froides.*

*Mots-clefs : réfrigérants, installation frigorifique, technique et économique.*

*Following European policies, the refrigerating fluids which are used nowadays are going to disappear. The purpose of this article is to compare, from a technical and economic view, several possible solutions for a frigorific installation in order to determine which refrigerating fluids should be used in the future for cooling rooms.*

*Keywords : refrigerating fluids, frigorific installation, technical and economic.*

## 1. Introduction

Le présent article traite de la problématique des gaz réfrigérants à l'heure actuelle. En effet, du fait de la législation environnementale européenne de plus en plus stricte, les réfrigérants actuels sont appelés à disparaître d'ici peu pour être remplacés par des substituts. Le problème qui demeure est de savoir lesquels parmi ces derniers seraient les plus avantageux en fonction de l'application à laquelle ils sont destinés. Le but de cet article est donc de tenter de répondre à cette question par le dimensionnement de 7 chambres froides sur un chantier du C.H.U. de Liège.

## 2. Interdictions et politique des quotas

Comme mentionné auparavant, les normes environnementales sont de plus en plus strictes. Les fluides frigorigènes qui ont un impact sur l'environnement (destruction de la couche d'ozone pour les CFC<sup>1</sup> et les HCFC<sup>2</sup> et réchauffement climatique pour les CFC, les HCFC et les HFC<sup>3</sup>) sont donc soumis à de nombreuses législations (contrôle d'étanchéité, installation par des frigoristes uniquement, etc.) et des mesures visant à leur interdiction sont mises en place :

- Le 1<sup>er</sup> janvier 2015 voit l'apparition de l'interdiction de mise sur le marché de systèmes domestiques pour lesquels le gaz utilisé aurait un pouvoir de réchauffement global (GWP<sup>4</sup>) supérieur à 150.
- Le 1<sup>er</sup> juillet 2016, la récupération et la destruction des CFC deviennent obligatoires, y compris pour les gaz contenus dans des équipements. Seuls les systèmes étanches et sans orifice de recharge échappent à cette mesure à condition qu'un test d'étanchéité soit effectué chaque année.
- En 2020, il est prévu l'interdiction de mise sur le marché de systèmes pour la réfrigération commerciale avec un GWP>2500. En outre, il sera également interdit d'utiliser des fluides ayant un GWP>2500 pour la maintenance de systèmes de réfrigération contenant une quantité de fluide de plus de 40 tonnes équivalents CO<sub>2</sub> (soit 16 kg d'un fluide ayant un GWP de 2500).
- 2022 verra la fin de mise sur le marché de systèmes contenant des HFC, car la limite maximale de PRG autorisée pour les systèmes de réfrigération neufs passera à 150 (ce qui est inférieur à tous les HFC existants).

---

<sup>1</sup> CFC : chlorofluorocarbure

<sup>2</sup> HCFC : hydrofluorocarbure

<sup>3</sup> HFC : hydrofluorocarbure

<sup>4</sup> Le global warming potential (GWP) ou, en français, potentiel de réchauffement global (PRG) est le rapport entre l'effet sur le réchauffement climatique dû à un fluide frigorigène et celui dû au CO<sub>2</sub> à quantité égale de matière sur une période de temps définie (par défaut, 100 ans).

- En ce qui concerne les HCFC, leur disparition est prévue pour 2020 dans les pays industrialisés et pour 2030 dans les pays en voie de développement.

L'approche de ces interdictions a pour conséquence une diminution progressive des quantités de gaz mise sur le marché et donc une augmentation des prix via une politique de quota.

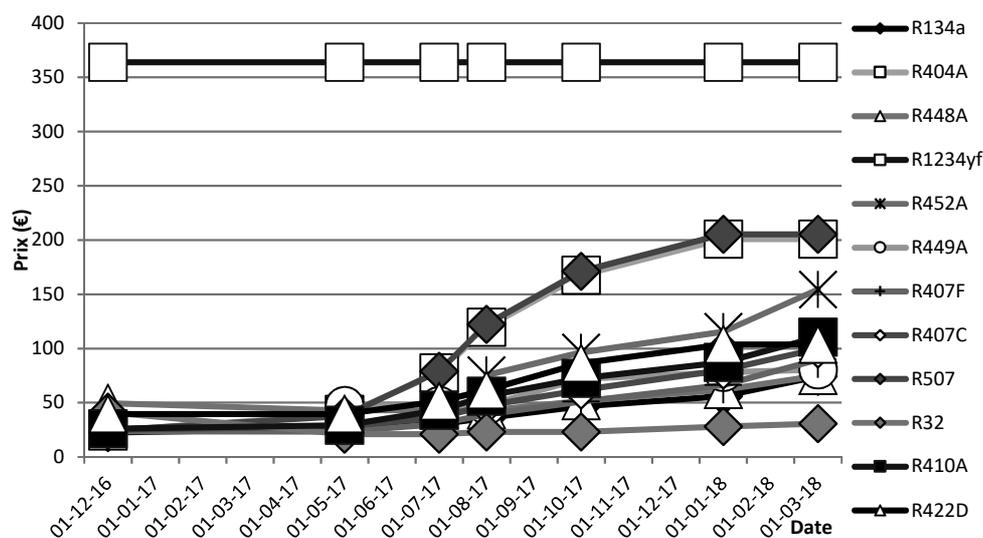


Figure 1 : Évolution du prix brut HTVA (en €) des réfrigérants entre décembre 2016 et mars 2018

Sur la figure 1, on peut voir l'évolution, entre décembre 2016 et mars 2018, du prix de certains réfrigérants. On peut observer que les réfrigérant ayant un fort GWP voient une forte augmentation de leur prix entre la fin de l'année 2016 et mars 2018 (le R404A et le R507 par exemple). On peut aussi voir que le R1234yf a un prix constant sur la période étudiée. Cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'un HFO (hydrofluorooléfine) qui est encore peu utilisé.

### 3. Présentation des réfrigérants [1-7]

#### 3.1. Chlorofluorocarbures (CFC)

Il s'agit des hydrocarbures halogénés de première génération. Ils font leur apparition en 1930 et sont alors une véritable révolution dans le domaine de la production de froid. Cependant, en 1980, les scientifiques découvrent que le chlore contenu dans ces composés affecte énormément la couche d'ozone. Plus tard, il apparaîtra

qu'ils participent également à l'effet de serre. De nouveaux réfrigérants sont dès lors apparus : les HCFC.

### **3.2. Hydrofluorocarbures (HCFC)**

Les hydrocarbures halogénés de deuxième génération comportent de l'hydrogène dans leur formule chimique, ce qui fait qu'ils contiennent moins de chlore, et qu'ils attaquent moins la couche d'ozone que leurs prédécesseurs. Toutefois, leur impact sur la couche d'ozone n'étant pas encore négligeable, une troisième génération voit le jour : les HFC.

### **3.3. Hydrofluorocarbures (HFC)**

Ces hydrocarbures halogénés ne possèdent plus d'atomes de chlore et ne participent donc plus à la destruction de la couche d'ozone. En outre, ils présentent une efficacité énergétique supérieure à celle des CFC pour des propriétés techniques fort proches. Étant donné leur contribution à l'effet de serre, il a cependant été décidé de diminuer progressivement leur utilisation jusqu'à leur suppression complète. Plusieurs solutions sont maintenant susceptibles de s'imposer : les HFO, les hydrocarbures et les fluides inorganiques.

### **3.4. Hydrofluorooléfines (HFO)**

Ces hydrocarbures halogénés de quatrième génération sont constitués d'un squelette carboné contenant au moins une double liaison. Cela les différencie des HFC qui n'en possèdent pas. De plus, ils ont l'avantage, par rapport à ces derniers, d'avoir un PRG très faible : la double liaison assure une décomposition rapide une fois relâché dans l'atmosphère.

### **3.5. Hydrocarbures**

Ce sont des composés organiques constitués uniquement d'atomes d'hydrogène et de carbone. Ils possèdent de bonnes propriétés thermodynamiques mais sont hautement inflammables. Il est donc nécessaire de prendre des précautions lors de leur utilisation. Les 3 fluides de cette catégorie utilisés comme réfrigérants sont le propane, le butane et l'isobutane.

### **3.6. Ammoniac (NH<sub>3</sub>)**

Il s'agit de l'un des premiers réfrigérants à avoir été utilisé dans les cycles frigorifiques. En effet, il possède de nombreux avantages en tant que tel et permet d'obtenir un coefficient de performance (COP) très élevé. On l'utilise principalement dans les installations industrielles commerciales. Néanmoins, bien qu'on

l'utilise depuis 1860, il s'agit d'un composé toxique et irritant qui peut présenter des risques d'explosions dans certaines conditions. Par ailleurs, il est corrosif pour le cuivre et ses alliages, ainsi que pour le zinc. Il nécessite donc l'utilisation de tuyauteries en acier.

### 3.7. Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

Étant donné que l'impact environnemental des gaz est calculé en prenant le CO<sub>2</sub> comme base, celui-ci se révèle intéressant car son PRG vaut 1. Il fait donc son retour en tant que gaz réfrigérant. Cependant, l'utilisation de ce gaz implique de surmonter de nombreux problèmes. En effet, non seulement il nécessite des compresseurs qui consomment plus d'électricité que ceux utilisés avec d'autres fluides, mais en plus, les pressions d'utilisations de ce gaz sont très élevées (de l'ordre de 80 bars) et il faut donc refaire les installations avec des tuyauteries plus épaisses. Par ailleurs, le CO<sub>2</sub> ayant une température critique très basse (31°C), il nécessite de travailler en cycle transcritique<sup>5</sup>.

## 4. Les chambres froides

Les chambres froides sont des locaux à basse température qui permettent de conserver divers produits tels que les vaccins, les aliments, etc. On peut retrouver deux types de chambres froides :

- Les chambres positives dont la température intérieure est supérieure à 0°C.
- Les chambres négatives dont la température intérieure est inférieure à 0°C.

### 4.1. Principe

La production de froid fonctionne grâce au principe des cycles frigorifiques qui permettent de refroidir un milieu froid tout en réchauffant un milieu chaud au travers d'une dépense d'énergie mécanique, celle-ci étant d'origine électrique.

### 4.2. Fonctionnement

Les cycles frigorifiques fonctionnent suivant 4 étapes (voir figure 2) :

- Compression : Le fluide à l'état gazeux arrive à basse pression et basse température. Le compresseur permet ensuite d'augmenter la pression et la température du gaz via un apport de travail au système. La température de condensation<sup>6</sup> s'en trouve augmentée. En effet, cette dernière est fonction

---

<sup>5</sup> Cycle thermodynamique dans lequel le fluide utilisé peut se trouver en-dessous et au-dessus de son point critique.

<sup>6</sup> Température à laquelle le fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide.

de la pression du fluide. Le fluide circule dans le circuit grâce à la différence de pression.

- Condensation : Une fois le gaz comprimé, il entre dans le condenseur où il cède sa chaleur à un autre fluide (tel que l'air ou l'eau) qui a une température moindre. En effet, lorsque 2 corps sont mis en présence l'un de l'autre, le plus chaud cède de l'énergie au plus froid sous forme de chaleur ; lorsqu'il a cédé suffisamment de chaleur, le réfrigérant passe à l'état liquide (du fait de sa pression élevée, il condense à une température élevée).
- Détente : La détente est le principe inverse de la compression. En effet, lors de cette troisième étape, la pression du fluide diminue, et avec elle, le point d'évaporation.
- Évaporation : À l'intérieur de l'évaporateur, le fluide frigorigène emmagasine de la chaleur en s'évaporant grâce à l'énergie cédée par l'air se trouvant à l'intérieur de la chambre froide. Cela permet à cette dernière de rester à basse température. Il est à noter que cette opération s'effectue à pression constante. L'évaporateur doit être dimensionné pour que la chambre cède une quantité voulue d'énergie. En effet, si elle cède trop de chaleur, elle est à une température trop basse et à l'inverse, si elle n'en cède pas assez, il fait trop chaud à l'intérieur. Une fois sorti de l'évaporateur, le fluide se dirige vers le compresseur et le cycle recommence.

Une surchauffe et un sous-refroidissement peuvent également être introduits afin de s'assurer que tout le fluide soit gazeux après l'évaporation et qu'il soit entièrement liquide après la condensation.

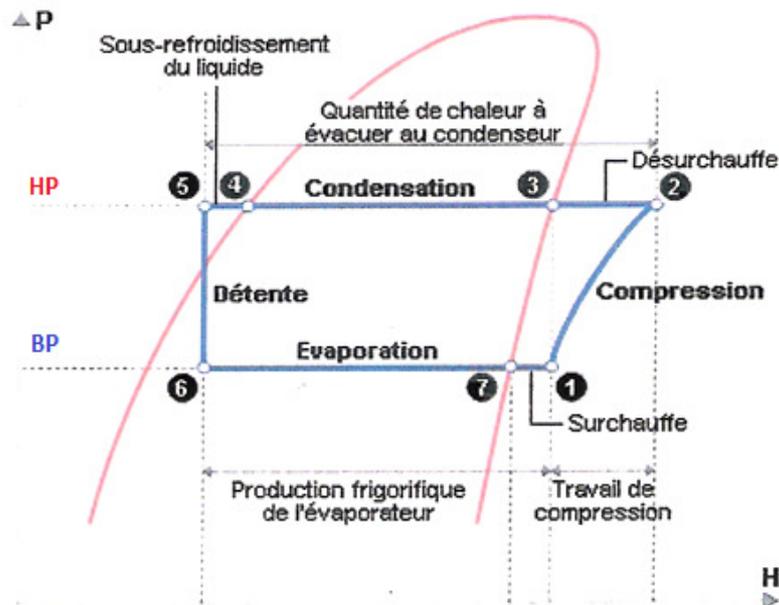


Figure 2 : Diagramme pression-enthalpie d'un cycle frigorifique [8]

## 5. Installation étudiée

Le C.H.U. de Liège, dans une phase d'expansion, a commandé la construction d'un nouveau bâtiment. Ce dernier doit être pourvu de 7 chambres froides qui serviront à conserver divers produits (vaccins, sang, organes, etc.). Elles sont réparties sur 3 étages différents : il y a 2 chambres à l'étage -4 (CF1 et CF2), 2 autres (CF3 et CF4) se situent à l'étage 1 et les 3 dernières sont à l'étage 2. Le tableau 1 reprend les caractéristiques de chacune de celles-ci : les puissances sont obtenues via un bilan thermique des pièces, avec un fonctionnement journalier de 16 heures du compresseur.

	Température intérieure	Besoin frigorifique (W)	Dimensions (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
CF1	4°C	1897	4,5 x 2,4 x 2,1	22,7
CF2	-20°C	4151	2,7 x 2,4 x 2,1	13,6
CF3	4°C	1855	3,9 x 2,7 x 2,1	22,1
CF4	-20°C	4194	2,7 x 2,7 x 2,1	15,3
CF5	4°C	3053	4,8 x 4,5 x 2,1	45,4
CF6	-20°C	4238	4,8 x 1,5 x 2,1	15,1
CF7	-30°C	1398	1,2 x 1,5 x 2,1	3,8

*tableau 1 : Caractéristiques des chambres froides étudiées dans cet article*

Plusieurs contraintes sont prises en compte lors des dimensionnements des composants nécessaires au fonctionnement des installations. Il faut, en effet, tenir compte des longueurs de tuyauteries, de l'encombrement du toit par les compresseurs mais aussi du bruit et de l'aspect esthétique. Au niveau technique, les logiciels des fabricants permettent de choisir séparément tous les composants au moyen d'un cycle modélisé comme suit :

- La température d'évaporation est inférieure de 8 à 9 K à la température de la chambre froide, et la surchauffe choisie est de 7 K.
- La température de condensation est choisie égale à 38°C, avec 3K de sous-refroidissement.

## 6. Comparaison des solutions collectives et individuelles

### 6.1. Solutions collectives et individuelles [9]

La différence entre ces deux solutions réside dans le nombre de compresseurs et de condenseurs utilisés pour l'ensemble de l'installation. En effet, on parle de centrale frigorifique (solution collective) lorsqu'un même compresseur comprime le fluide alimentant plusieurs chambres. Lorsqu'on choisit cette option, le compresseur doit

être suffisamment puissant pour alimenter l'ensemble des chambres choisies. On se retrouve alors avec un condenseur qui reprend les gaz en sortie de compresseur. Une fois redevenu liquide, le fluide frigorigène est détendu puis envoyé dans les évaporateurs de chacune des chambres.

La seconde solution, quant à elle, nécessite un compresseur individuel par chambre, d'où son appellation de solution individuelle.

## 6.2. Comparaison

Afin de pouvoir comparer laquelle des deux solutions mentionnées ici est la plus intéressante, les dimensionnements ont été effectués en utilisant un même réfrigérant (R448A) pour chacune d'elles. Ainsi, pour la première solution, le choix s'est porté sur trois compresseurs différents (car il y a trois températures intérieures différentes) et sur un condenseur commun à toutes les chambres, tandis que, pour la seconde, on retrouve 7 groupes de condensation<sup>7</sup>. On peut remarquer sur le tableau 2 que la solution sous forme de centrale est plus intéressante que les compresseurs individuels et permet d'économiser environ 3500 € pour l'installation étudiée.

	Compresseur	Condenseur	Evaporateur	Détendeur	Accessoires
Centrale	3987€	2442€	5150€	443€	3333€
Individuel	9995€	/	5150€	443€	3333€

Tableau 2 : Comparatif des coûts pour une solution collective et une combinaison de solutions individuelles

## 7. Fronts de Pareto

Le front de Pareto est l'ensemble des solutions les plus intéressantes lorsqu'on cherche à maximiser un rapport entre deux caractéristiques. Ici, les caractéristiques prises en compte sont le prix de l'installation (coût d'investissement) et son COP (lié au coup de fonctionnement). Plusieurs fluides peuvent donc convenir en fonction de la combinaison de caractéristiques que le client veut maximiser : soit le prix en dépit de la performance, soit l'inverse.

### 7.1. Chambres positives

La figure 3 reprend le front de Pareto pour les dimensionnements effectués avec différents gaz pour l'ensemble des 3 chambres positives de l'installation. On peut voir que selon le graphique, les réfrigérants les plus adaptés pour les chambres positives sont le R134a, le R450A, le R1234ze et l'ammoniac.

<sup>7</sup> Il s'agit d'un compresseur groupé avec un condenseur.

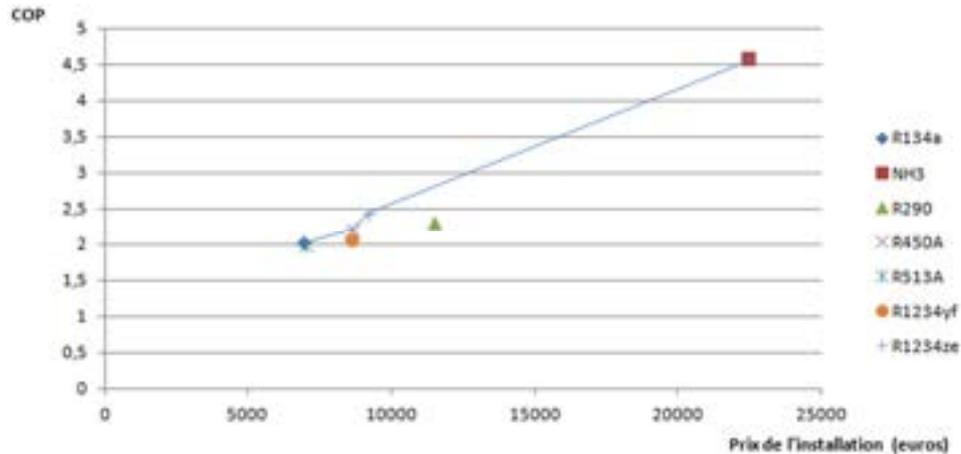


Figure 3 : Rapport COP/prix pour les chambres positives

## 7.2. Chambres négatives

La figure 4 reprend le front de Pareto pour les dimensionnements effectués avec différents gaz pour l'ensemble des chambres négatives de l'installation. On peut voir que selon le graphique, les réfrigérants les plus adaptés pour les chambres négatives sont le R448A, le R449A et les solutions reprenant le propane et un autre gaz pour la chambre à  $-30^{\circ}\text{C}$  (le R449A ou le  $\text{CO}_2$ ).

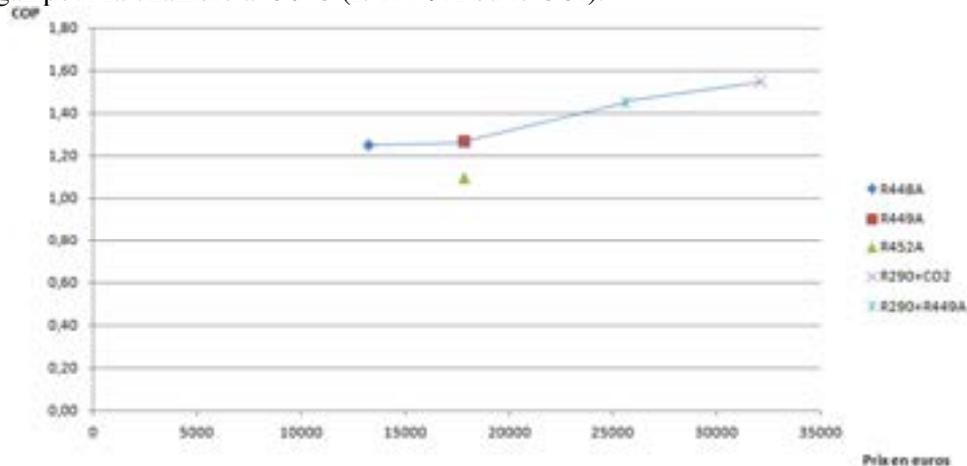


Figure 4 : Rapport COP/prix pour les installations en froid négatif

## 7.3. Toutes les solutions

Sur la figure 5, on peut voir le front de Pareto pour l'ensemble de l'installation dont le dimensionnement a été effectué avec différents gaz. Selon le graphique, les solutions optimales sont les centrales au R448A, au R449A et l'ammoniac.

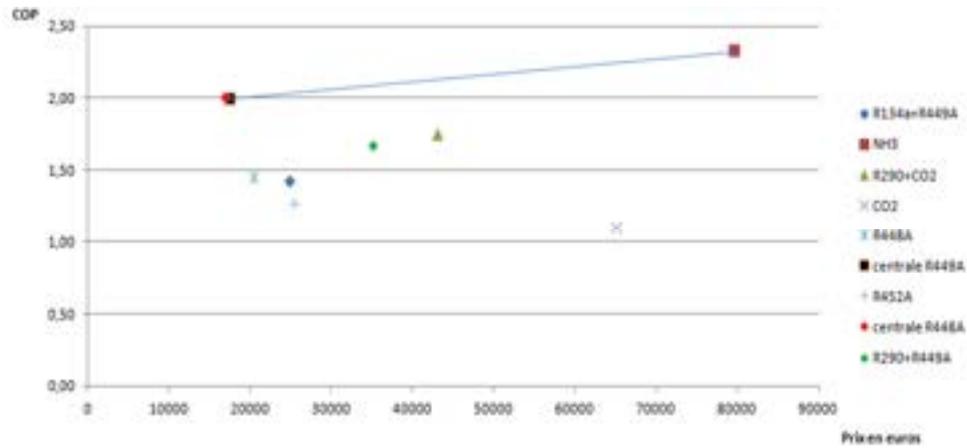


Figure 5 : rapport COP/prix pour les solutions globales

## 8. Perspectives en 2022

En conclusion, on remarque qu'il existe diverses alternatives aux HFC qui, bien que difficile à mettre en œuvre, permettront de continuer à utiliser les chambres froides.

On remarque également dans cet article que les solutions sous forme de centrales sont plus intéressantes au point de vue rapport prix/COP que les solutions individuelles.

Par ailleurs, en 2022, plusieurs fluides seront interdits. Les fronts de Pareto exposés sur les figures ci-dessus changeront donc, car les réfrigérants ne seront plus les mêmes. Cela se traduit par une diminution des choix de réfrigérant possibles pour chacune des trois applications possibles.

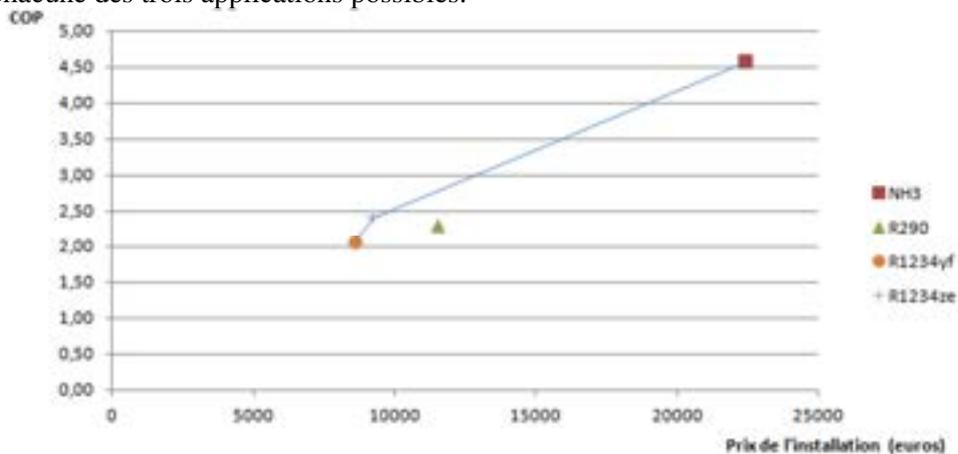


Figure 6 : Rapport COP/prix pour les chambres positives

### 8.1. Chambres positives

On peut donc remarquer sur la figure 6 que le R1234yf, le R1234ze et l'ammoniac seront les solutions optimales pour les installations reprenant uniquement des chambres positives.

### 8.2. Chambres négatives

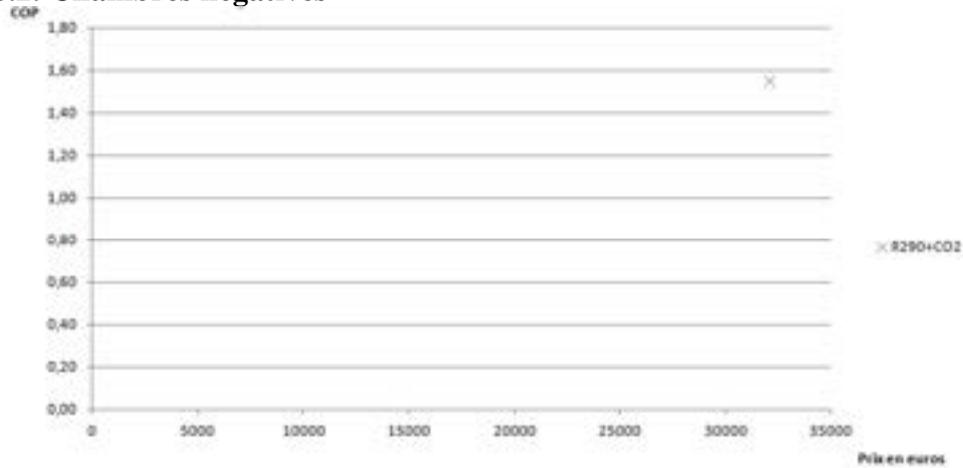


Figure 7 : Rapport COP/prix pour les installations en froid négatif

Pour les installations reprenant uniquement des chambres négatives, la seule solution qui demeure est la solution au propane avec la chambre à  $-30^{\circ}\text{C}$  qui fonctionne au  $\text{CO}_2$ .

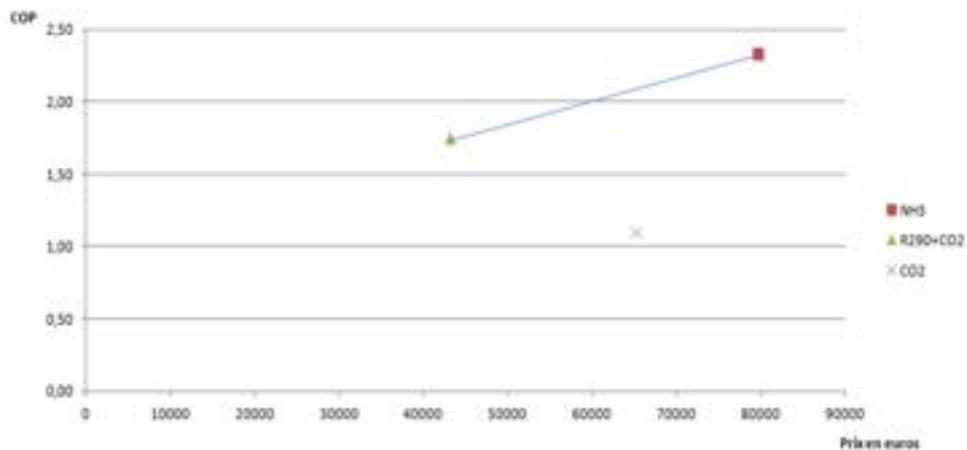


Figure 8 : Rapport COP/prix pour les solutions globales

### 8.3. Toutes les solutions

En 2022, on peut voir sur la figure 8 que si l'on choisit de favoriser le prix au dépend des performances, la solution reprenant le propane et le CO<sub>2</sub> est la plus intéressante. Toutefois, si la performance est ce que l'on choisit de favoriser, alors l'ammoniac est la meilleure solution.

## 9. Conclusion

En 2018, on constate au tableau 3 que pour un dimensionnement reprenant uniquement des chambres positives, le R134a est la solution la moins chère, tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante pour le prix le plus élevé. Pour une installation de chambres négatives uniquement, le R448A est la solution la moins chère tandis que la solution reprenant le propane et le CO<sub>2</sub> est la plus performante. Enfin, si l'on choisit de dimensionner une installation reprenant à la fois des chambres positives et négatives, les centrales au R448A ou au R449A sont les plus intéressantes si l'on veut favoriser le prix tandis que l'ammoniac est la solution la plus intéressante si l'on veut favoriser la performance.

2018			
	Positive	Négative	Global
Solution la moins chère	R134a	R448A	Centrale R448A Centrale R449A
↓	R450A	R449A	
	R1234ze	R290+R449A	NH <sub>3</sub>
Solution la plus chère	NH <sub>3</sub>	R290+CO <sub>2</sub>	

Tableau 3 : Récapitulatif des solutions avantageuses en 2018

2022			
	Positive	Négative	Globale
Solution la moins chère	R1234yf	R290+CO <sub>2</sub>	R290+CO <sub>2</sub>
↓	R1234ze		NH <sub>3</sub>
Solution la plus chère	NH <sub>3</sub>		

Tableau 4 : Récapitulatif des solutions avantageuses en 2022

En 2022, on peut remarquer au tableau 4 que pour un dimensionnement reprenant seulement des chambres positives, la solution la plus intéressante est le R1234yf si l'on décide de favoriser le prix, tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante. Pour les installations reprenant des chambres négatives, la seule solution

qui demeure est la solution reprenant le propane et le CO<sub>2</sub>. Pour les installations reprenant à la fois des chambres positives et négatives, la solution reprenant du propane et du CO<sub>2</sub> est la solution la moins chère tandis que l'ammoniac est la solution la plus performante. L'absence de solutions multiples pour les chambres négatives suggère que les fabricants de fluide vont en développer de nouveaux dans les années à venir.

## 10. Sources

- [1] GFF (consulté le 7 février 2018), *F-Gas, on fait le point !*  
Adresse URL : <http://www.lagff.com/actualites/la-reglementation-f-gaz/>
- [2] PIC BLEU (consulté le 7 février 2018), *Fluides frigorigènes, HCFC, HFC supergaz effet de serre environnement.*  
Adresse URL : <https://www.picbleu.fr/page/fluides-frigorigenes-hcfc-hfc-supergaz-effet-de-serre-environnement>
- [3] DECHETS PICARDIE (consulté le 7 février 2018), *CFC/HCFC*  
Adresse URL : <http://www.dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique43>
- [4] AD-ENVIRONNEMENT (consulté le 7 février 2018), *F-gas : vers une interdiction européenne des fluides frigorigènes fluorés.*  
Adresse URL : <http://www.ad-environnement.fr/breves/f-gas-vers-une-interdiction-europeenne-des-fluides-frigorigenes-fluores/>
- [5] ENERGIEPLUS (consulté le 7 février 2018), *Les fluides frigorigènes.*  
Adresse URL : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11179#c5932>
- [6] ENERGIEPLUS (consulté le 9 février 2018), *Choisir un fluide frigorigène.*  
Adresse URL : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11125#>
- [7] Frigoristes.fr (consulté le 26 mars 2018), *Le CO<sub>2</sub> transcritique.*  
Adresse URL : <http://www.frigoristes.fr/article.php?sid=106#.Wwn2uu4iOM9>
- [8] ENERGIE FACTEUR 4 ASBL (consulté le 9 octobre 2018), *Cycle frigorifique détaillé.*  
Adresse URL : <http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html>
- [9] KELVION (consulté le 14 février 2018), *RT SELECT.*  
Adresse URL : <https://rtselect.kelvion.com/quotation/#390bcd33-4e7e-4e32-9011-7c7067d82f01?OP=select&TS=1527382177877>



# Electrical machines modeling for hybrid vehicle applications

Ing. N. HEINDRYCKX  
Ing. L. MINE  
Ing. D. ROUCHARD  
ECAM – Bruxelles

*Deux des moteurs électriques les plus prometteurs pour l'automobile hybride sont les moteurs asynchrones et les moteurs à réluctance variable. Pour leur conception, des modèles mathématiques précis sont nécessaires afin d'évaluer leurs performances avant de disposer du prototype. Diverses techniques de modélisation existent, dont le circuit magnétique équivalent. Nous appliquerons cette technique aux deux machines citées, évaluerons sa précision et tenterons de l'améliorer.*

*Mots-clefs : véhicule, voiture, hybride, machine, moteur, électrique, réluctance, variable, asynchrone, modélisation, circuit, magnétique, équivalent, éléments, finis.*

*Two of the most promising electric motors for hybrid vehicle applications are asynchronous motors and switched reluctance motors. For their design, accurate mathematical models are necessary to evaluate their performance before having the prototype. Various techniques of modelization exist, including the magnetic reluctance network. We will apply this technique to the two machines mentioned, evaluate its accuracy and try to improve it.*

*Keywords : vehicle, car, hybrid, machine, motor, electric, reluctance, variable, induction, modelization, circuit, magnetic, equivalent, elements, finite.*

## 1. Introduction

Electric machines (EMs) are indispensable components in different industrial drivetrains. Thanks to their robust control, induction machines (IMs) are still considered one of the most used EMs in industrial applications [1]. On the other side, switched reluctance motors (SRM's) and their unbeatable efficiency and power density could very soon disrupt the market [8].

In order to design EMs, accurate models are needed. Finite element (FE) is often used to model EMs. However, the computational time, as well as the huge memory usage, make the use of FE not preferable, especially in the early design phase where a lot of iterations are needed. On the other hand, lumped parameter models can be used, which are simple but lack the accuracy.

Alternatively, fast analytical models based on magnetic reluctance network (MRN) principle can be used. This technique was used to model two machines: IM and SRM. As FE results are infallible, they offer a good base to judge the quality of the MRN model. The models have been realized on the Matlab software.

The MRN principle is to convert a magnetic structure (i.e the rotor of an electric motor) in a network of interconnected flux tubes and reluctances. This magnetic circuit will then be solved in the same way as an electric circuit, applying Kirchoff laws.

MRN-modelling can be illustrated with the simple example of a coil making  $N$  turns around a rectangular frame (length “ $l$ ” and cross section “ $A$ ”) made of magnetic material (permeability  $\mu_r$ )

The following equations can be written [9]:

$$\mathcal{F} = NI$$

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\lambda} = \frac{l}{S\mu_0\mu_r}$$

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

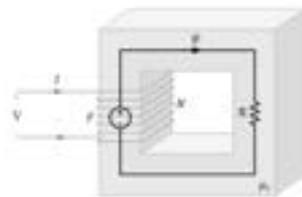


Figure 1: Magnetic circuit

## 2. SRM

### 2.1. Introduction

SRM's, standing it a passive rotor an active stator, have an easy working principle: When 2 opposite stator pole windings are powered, magnetic induction  $B$  appears, a flux is created.

When a magnetically salient rotor is subject to the flow of flux in the magnetic circuit, it tends to rotate toward the position of minimum reluctance. Because of the relation  $\mathcal{F} = \mathcal{R}\phi$  moving to the minimum reluctance position means also to move in order to maximize the flux  $\phi$  thus moving to the powered pole. When finally 2 rotor poles are aligned with the powered stator poles, the reluctance is minimum and the rotor will stay at this place, producing 0 torque. It is therefore time to power 2 other opposite stator pole windings, which not have rotor pole aligned with them, to continue the rotation of the rotor. [11]

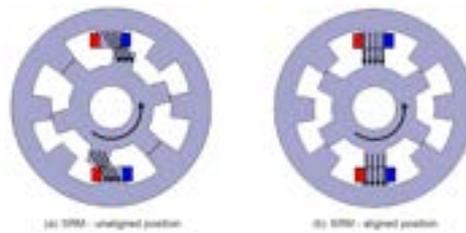


Figure 2: SRM principle

The fact that each stator pole produces consecutively an independent torque, combined with the highly symmetry of the machines, makes the SRM particularly suitable for MRN-based models. We can effectively model the values for one pole, and then extrapolate them for the other poles and thus for the whole rotation.

However, getting a precise MRN model of an SRM is still a challenge, namely for what concerns the air gap reluctance values and the non-linear permeability of the magnetic material which requires an iteration process. We will here discuss about the precision of the obtained model through a FE comparison, as well as the applied (or no) ways of improvement.

First, the solving of the MRN network of the SRM's will be tackled. Secondly, its precision will be discussed through a FE comparison. Finally, conclusions are made, and we will discuss the possible future improvements.

## 2.2. MRN model

The model should be parametrized and thus work with any number of stator and rotor poles. By designing only one pole phase of the motor and shifting the characteristic curves for other pole phases in function of their number, this MRN is universal.

The SRM's MRN consists in 4 main ferromagnetic parts: The stator yoke, the rotor yoke, the stator pole, the rotor pole.

When adding the 2 air gaps between the rotor and stator poles, we obtain the circuit represented on the figures bellows. Further simplification can be done by summing similar reluctances [10]:

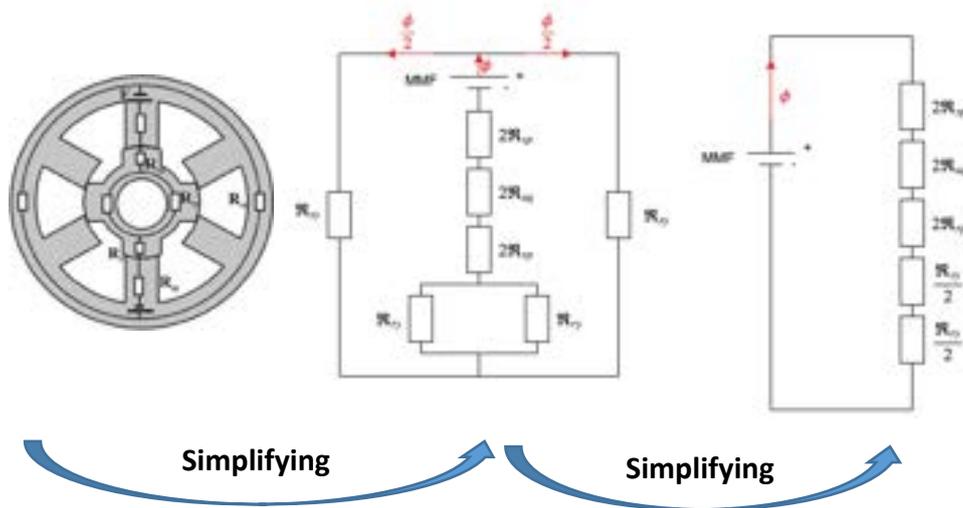
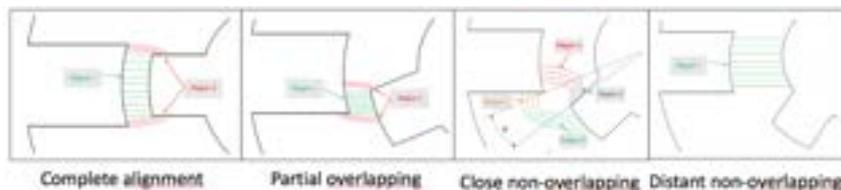


Figure 3: MRN simplification

The first reluctance to be calculated is the air gap reluctance and its calculation is complicated since position dependent. First, different phases are assumed to be independent. Next, the model is divided into 4 regions according to the position of the rotor regarding the position of the stator [10]:



An air gap permeance is for each region calculated by  $\lambda = \mu_0 S l^{-1}$  with  $S$ , cross section of the flux lines and  $l$ , length of the flux lines. Both of these variables are in the model dynamic functions of  $\theta$ , the rotor position angle. By gathering those different reluctances, we can assemble the matrix of the total air gap permeance. The figure below represent the evolution of the air gap permeance evolution around one pole. This evolution applies on every stator pole of the SRM since it is highly symmetric.

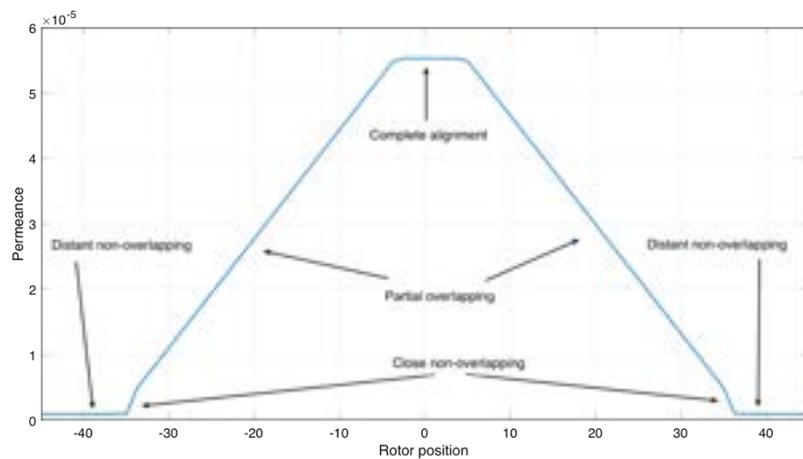


Figure 4: Air gap reluctance

The next reluctances to compute from our MRN are the stator yoke reluctance, the rotor yoke reluctance, the stator pole reluctance and the rotor pole reluctance. The formula is again given by  $\lambda = \mu S l^{-1}$  but this time  $S$  and  $l$  are constant values. On the other hand, because of the saturation of the magnetic parts of the motor, the magnetic permeability  $\mu$  is not constant and the following loop has to be taken in account:

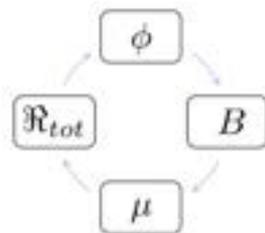


Figure 5: Iterative loop

The following iterative schema has therefore been implemented in the model. "Tol" is the tolerance value for the iterations: when the step value is lower than "tol", iterations will stop and the last result of the  $\phi$  matrix will be considered correct.

The flux  $\phi$  is given by  $\phi = 2 * NrWindings * \mathcal{F} \mathcal{R}^{-1}$  with the magnetomotive force  $\mathcal{F} = 2 * nWindings * Current$ . A factor 2 is applied because 2 poles are active. [9]:

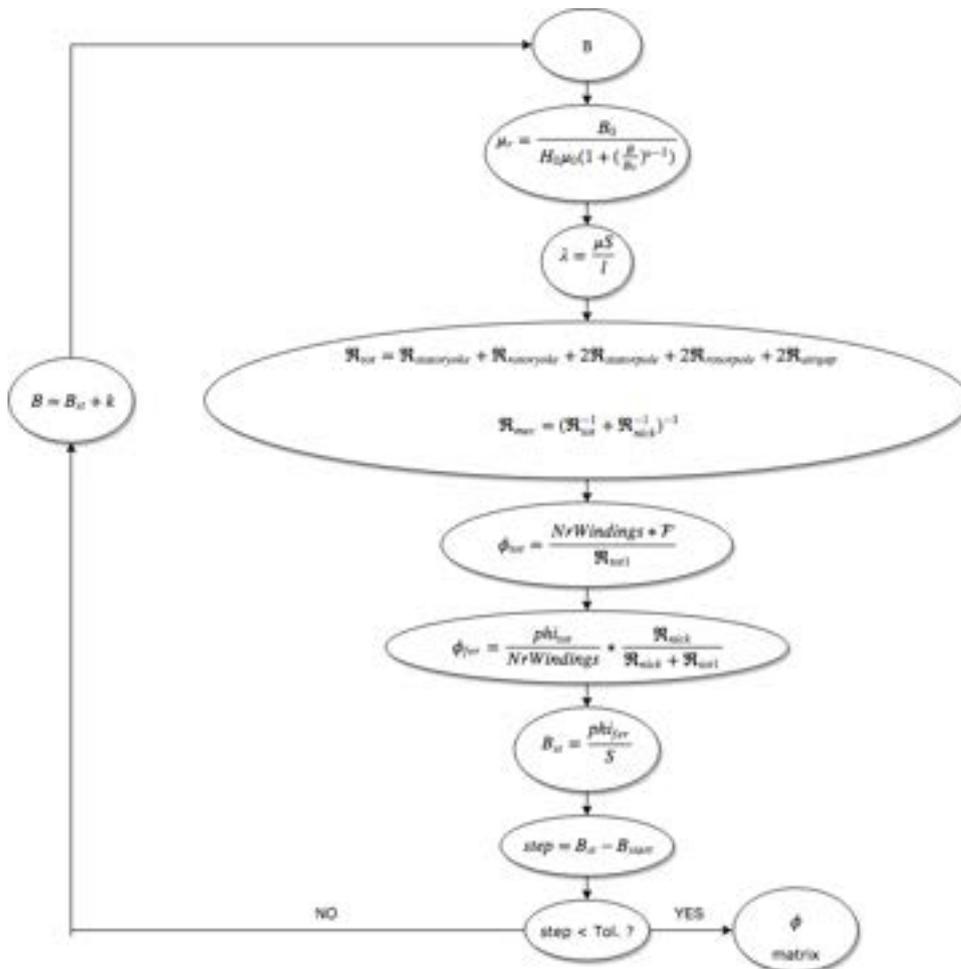


Figure 6: Iterative scheme

With “i”, the applied current and “ $\theta$ ” the rotor position, the obtained  $\phi$  matrix leads through the following formula to the torque matrix:

$$T = \frac{\partial W'}{\partial \theta} = \frac{(\sum_{j=0}^{i_2} \phi_j * i_2) - (\sum_{j=0}^{i_1} \phi_j * i_1)}{\theta_2 - \theta_1}$$

### 2.3. Results precision analysis

The precision of the model can be highlighted by testing it with different topologies and dimensions of machines and comparing the obtained MRN results with FE results. In particular, the “8/6” and “6/4” topologies were tested. This means that in the first case, the machine stands in 8 stator poles and 6 rotor poles, and in the second case, 6 stator poles and 4 rotor poles.

A first sample of the relative permeability result shows a slight difference with the finite elements results. The iterative scheme higher the value faster than it should.

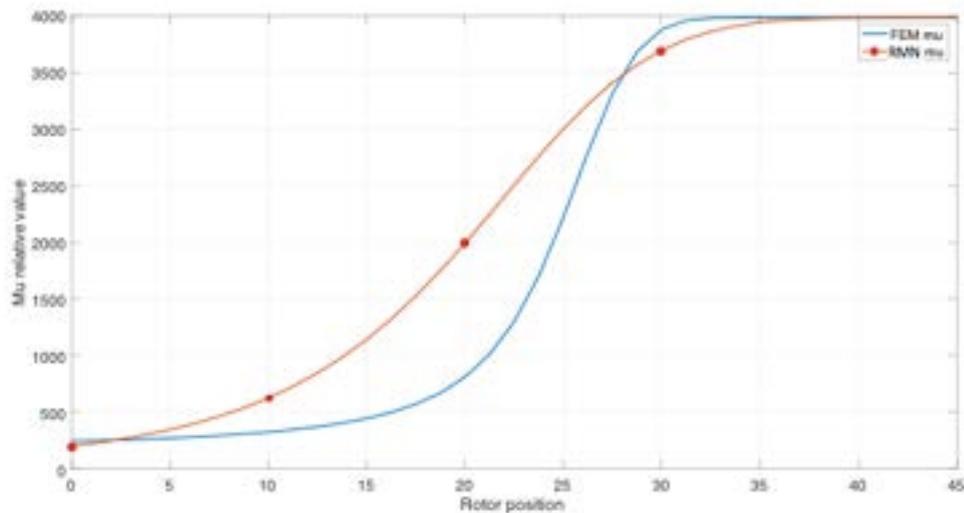


Figure 7: Mu values comparison

It will result on overestimated flux values. But as the torque only depends on the flux variations, we can still expect a good accuracy on the overall machine behaviour, which is confirmed by the torque curves analysis:

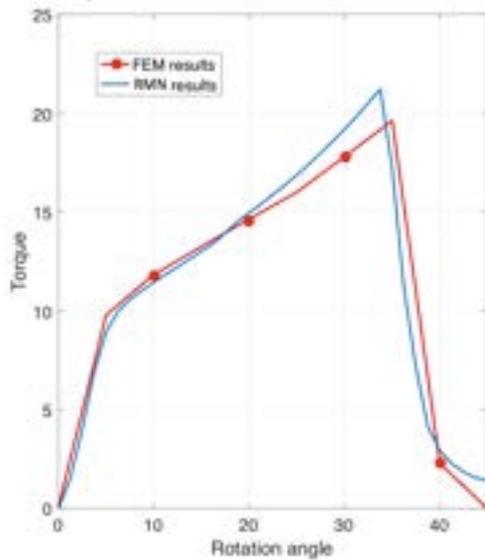


Figure 9: 6/4 SRM - Linear conditions

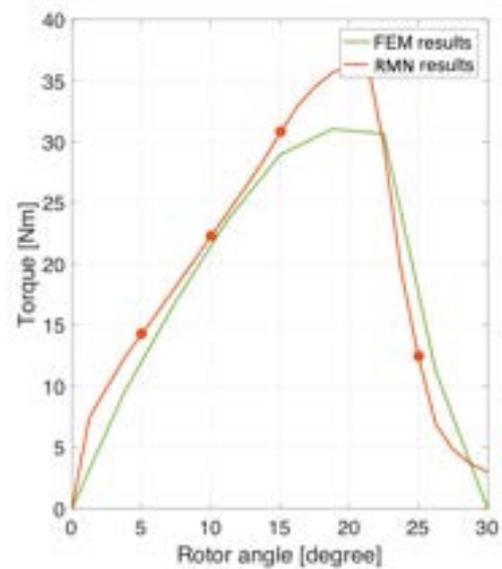


Figure 8: 8/6 SRM - non-linear conditions

## 2.4. Conclusions

The realized MRN model gives a good approximation of the overall performances of the SRM in less than 0.2s, which is easily 150 times faster than a FE model. The correctness of the output torque values have been repeatable over 2 motors of different topologies.

On the other hand, there is still room for improvement in the permeability values. The iterative scheme for the relative permeability in the magnetic parts can be improved, but the main problem remains the air gap reluctance which is reputed as being very difficult to modelize for the SRM's. A way to increase the precision of the model would then be to use a FE model only for this reluctance, and the RMN for all the other magnetic values of the machine.

It could lead to a good compromise between computation time and precision.

### 3. Induction Machine

#### 3.1. Introduction

The MRN models of IMs were previously presented in literature, see for example [2]. However, the implementation of these models is not straight-forward for IM's. For example, a lot of tuning is needed to overcome the matrices bad conditioning. In this work, an efficient approach was provided to improve the quality of the MRN dynamic models of IMs. In order to validate the developed approach, a comparison with FE results is given.

In the subsequent section, an overview about the MRN of IMs is given. In the third section, the proposed model improvement is shown and explained. The use case and the associated analysis, including validation using the FE model, is discussed in section 4. Finally, the conclusions are drawn in section 5.

#### 3.2. MRN model

Basically, the MRN of any electromagnetic device is constructed in such a way that each geometrical part of the magnetic circuit, in which a uniform field pattern may be assumed, is replaced by its corresponding reluctance element, while the electromagnetic sources can be represented by lumped magnetomotive forces (MMF), see Fig. 1 where a schematic diagram of the MRN of an IM is shown.

The methodology detailed in this paragraph has already been presented in [2]. Therefore, the novelty of this present work is not related to the MRN approach itself, but rather to the improvement of such dynamic model so as to reduce the model complexity.

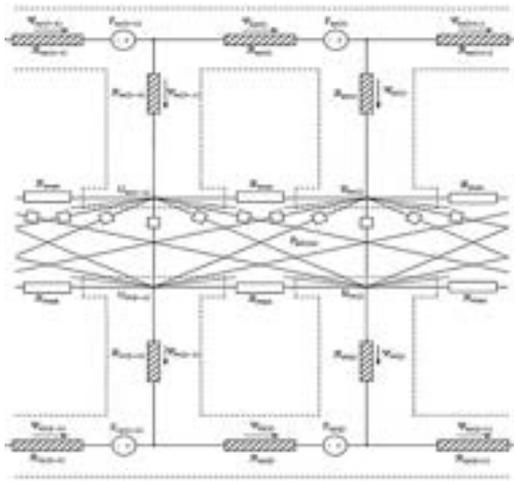


Figure 10 : Schematic diagram of the MRN of a squirrel-cage IM.

By the analogy between electric and magnetic circuits [3], the equivalent MRN circuit can be analyzed using Kirchhoff's current (KCL) and voltage laws (KVL) which leads to equation (1) modeling the magnetic behaviour of the machine:

$$\mathbf{A}_{magn} \mathbf{X}_{magn} = \mathbf{Y}_{magn} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M1} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ust} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M2} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{urt} \\ -\mathbf{A}_{syt} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ss} & \mathbf{A}_{sr} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{ryt} & \mathbf{A}_{rs} & \mathbf{A}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sy} \\ \Psi_{ry} \\ U_{st} \\ U_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{sy} \\ F_{ry} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

where  $\mathbf{X}_{magn}$ ,  $\mathbf{A}_{magn}$ , and  $\mathbf{Y}_{magn}$  are respectively the vector of magnetic unknowns (containing the stator and rotor yoke fluxes ( $\Psi_{sy}, \Psi_{ry}$ ) and the stator and rotor node potentials ( $U_{st}, U_{rt}$ )), the matrix of magnetic coefficients (where  $\mathbf{M1}$  and  $\mathbf{M2}$  are matrices containing the MRN core reluctances,  $\mathbf{A}_{ss}$ ,  $\mathbf{A}_{sr}$ ,  $\mathbf{A}_{rs}$  and  $\mathbf{A}_{rr}$  are matrices containing the MRN airgap permeances and  $\mathbf{A}_{syt}$ ,  $\mathbf{A}_{ryt}$ ,  $\mathbf{A}_{ust}$ ,  $\mathbf{A}_{urt}$  are coefficient matrix composed by ones and zeros) and the input vector containing the stator and rotor yoke MMFs  $F_{sy}$  and  $F_{ry}$ .

By using Faraday's, Lenz's and Ampere's laws, this magnetic model can be linked to the electrical circuits of the machine. Ampere's law allows to find a relation between the MMFs in the yokes and the current in the corresponding slot (i.e. stator currents and rotor bar currents). In addition, Faraday's and Lenz's laws were used to take the voltage drop created by flux linkage variation into account on the stator coils and to generate equations for the rotor electric meshes.

A linear model of the IM can then be described using matrix-equation (2), where  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{A}$ , and  $\mathbf{Y}$  are respectively the vector of unknowns (containing the vector of magnetic unknowns ( $\mathbf{X}_{magn}$ ), stator currents ( $I_s$ ) and rotor ring currents ( $I_r$ )), the matrix of coefficients and the vector of input, i.e. stator voltage waveform. In the matrix of coefficients, one can find the MMF and the flux connection matrices ( $\mathbf{W}_{cs}$  and  $\mathbf{M}_{cfs}$ , which both depend on the winding distribution and the number of turns of the stator coils) and the stator and rotor resistance matrices ( $\mathbf{R}_s$  and  $\mathbf{M3}$ , respectively). For more details, see [2].

$$\begin{aligned}
& \mathbf{AX} = \mathbf{Y} \\
& \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{cfs} \mathbf{A}_{syt} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{dt}{2} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{ryt} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M3} \frac{dt}{2} \\ \mathbf{M1} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ust} & \mathbf{0} & -\mathbf{W}_{cs} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M2} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{urt} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ryt} \\ -\mathbf{A}_{syt} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{ss} & \mathbf{A}_{sr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{ryt} & \mathbf{A}_{rs} & \mathbf{A}_{rr} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sy} \\ \Psi_{ry} \\ U_{st} \\ U_{rt} \\ I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y1} \\ \mathbf{Y2} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)
\end{aligned}$$

with:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Y1} &= (\mathbf{V}_s + \mathbf{V}_{s(t-1)} - \mathbf{R}_s \mathbf{I}_{s(t-1)}) \frac{dt}{2} + \mathbf{M}_{cfs} \mathbf{A}_{syt} \Psi_{sy(t-1)} \\
\mathbf{Y2} &= -\mathbf{A}_{ryt} \Psi_{ry(t-1)} - \mathbf{M3} \frac{dt}{2} \mathbf{I}_{r(t-1)}
\end{aligned}$$

The obtained electromagnetic model can then be linked to the mechanics of the machine using (3) based on electromechanical energy conversion principle [3], where  $\tau_e$  is the electromagnetical torque,  $P_{AG(i,j)}$ , the airgap permeance between the  $i$ -th stator tooth and the  $j$ -th rotor tooth, and the rotor angular position  $\theta_m$ .

$$\tau_e = 0.5 \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_r} (U_{s(i)} - U_{r(j)})^2 \frac{dP_{AG(i,j)}}{d\theta_m} \quad (3)$$

Finally, in order to consider the core saturation in the model, the permeability of the iron in each reluctance of the MRN needs to be related to the flux density passing through it. In this work, an equation based on two parameters (i.e.  $a$  and  $b$ ) is used for saturation effect modeling and is presented in (4) [2]:

$$H(B) = \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{Erfi}(|B|\sqrt{-a})}{2b\sqrt{-a}} \quad (4)$$

When core saturation is considered, there is a circular relation between flux density, permeability and core reluctances of the MRN. An iterative method is needed and Newton-Raphson (NR) successive approach is well suited for that purpose [4]. Therefore, the non-linear model of the IM becomes:

$$\begin{cases} d\mathbf{X}_{k-1} = (\mathbf{J}_{k-1})^{-1} (\mathbf{A}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} - \mathbf{Y}_{k-1}) \\ \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + d\mathbf{X}_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

where  $k$  is the iteration identifier and  $\mathbf{J}_{k-1}$  is the Jacobian matrix. In the following section, the two techniques improving the model's accuracy will be shown.

### 3.3. Conditioning improvement

Due to bad conditioning, the inversion of the Jacobian matrix  $J_{k-1}$  is often imprecise and may produce numerical troubles. This bad conditioning is especially a problem when the motor operates in highly saturated conditions, the Jacobian matrix then becomes singular for inversion and the NR algorithm may not converge. Therefore, we propose a reduction technique to avoid this bad conditioning problem and improve the model accuracy.

We have observed that  $I_s$  and  $I_r$  are dependent states that can be extracted from the  $X$  vector. The linear model of the IM then becomes (6):

$$\begin{bmatrix} -A_{syt} & \mathbf{0} & A_{ss} & A_{sr} \\ \mathbf{0} & -A_{ryt} & A_{rs} & A_{rr} \\ A_1 & \mathbf{0} & -A_{ust} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & A_2 & \mathbf{0} & -A_{urt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{sy} \\ \Psi_{ry} \\ U_{st} \\ U_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \frac{2 \cdot R_s^{-1} W_{cs} Y1}{dt} \\ -\frac{2 \cdot A_{ryt} M3^{-1} Y2}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

with:

$$A_1 = \frac{2}{dt} R_s^{-1} W_{cs} M_{cfs} A_{syt} + M1$$

$$A_2 = \frac{2}{dt} A_{ryt} M3^{-1} A_{ryt} + M2$$

The two extracted state vectors can be calculated afterwards by means of the remaining states, obtained by NR algorithm, by using (7) and (8).

$$I_s = \frac{2}{dt} R_s^{-1} (M_{cfs} A_{syt} \Psi_{sy} + Y1) \quad (7)$$

$$I_r = \frac{2}{dt} M3^{-1} (A_{ryt} \Psi_{ry} + Y2) \quad (8)$$

Reducing vector  $X$  will also reduce coefficient matrix  $A$ , i.e. less spars and smaller matrix which leads to a better convergence and a faster computation. With a reduced model, the Jacobian matrix  $J_{k-1}$  can be presented as (9):

$$J_{k-1} = \begin{bmatrix} -A_{syt} & \mathbf{0} & A_{ss} & A_{sr} \\ \mathbf{0} & -A_{ryt} & A_{rs} & A_{rr} \\ A_1 + \frac{d(M1\Psi_{sy})}{d\Psi_{sy}} & \mathbf{0} & -A_{ust} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & A_2 + \frac{d(M2\Psi_{ry})}{d\Psi_{ry}} & \mathbf{0} & -A_{urt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

The derivative of matrix  $\mathbf{M1}\Psi_{sy}$ , with respect to the stator yoke fluxes ( $\Psi_{sy}$ ) is shown in (10). To obtain the derivative of the  $\mathbf{M2}\Psi_{ry}$  matrix over the rotor yoke fluxes  $\Psi_{ry}$ , the elements of stator (10) need to be replaced by their correspondent rotor elements, i.e.  $dA_{\Psi_{st}}/d\Psi_{sy}$ ,  $dA_{\Psi_{sy}}/d\Psi_{sy}$ ,  $\Psi_{sy,d}$  and  $\mathbf{M1}$  have to be replaced by  $dA_{\Psi_{rt}}/d\Psi_{ry}$ ,  $dA_{\Psi_{ry}}/d\Psi_{ry}$ ,  $\Psi_{ry,d}$  and  $\mathbf{M2}$  respectively.

$$\frac{d(\mathbf{M1}\Psi_{sy})}{d\Psi_{sy}} = \left( \frac{dA_{\Psi_{st}}}{d\Psi_{sy}} + \frac{dA_{\Psi_{sy}}}{d\Psi_{sy}} \right) \Psi_{sy,d}$$

with:

$$\frac{dA_{\Psi_{st}}}{d\Psi_{sy}} = \begin{bmatrix} \frac{d\mathcal{R}_{st(1)}}{d\Psi_{sy(1)}} - \frac{d\mathcal{R}_{st(N_s)}}{d\Psi_{sy(N_s)}} & \frac{d\mathcal{R}_{st(1)}}{d\Psi_{sy(1)}} & \dots & -\frac{d\mathcal{R}_{st(N_s)}}{d\Psi_{sy(N_s)}} \\ -\frac{d\mathcal{R}_{st(1)}}{d\Psi_{sy(1)}} & \frac{d\mathcal{R}_{st(2)}}{d\Psi_{sy(2)}} - \frac{d\mathcal{R}_{st(1)}}{d\Psi_{sy(1)}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{d\mathcal{R}_{st(N_s-1)}}{d\Psi_{sy(N_s-1)}} \\ \frac{d\mathcal{R}_{st(N_s)}}{d\Psi_{sy(N_s)}} & 0 & \dots & \frac{d\mathcal{R}_{st(N_s)}}{d\Psi_{sy(N_s)}} - \frac{d\mathcal{R}_{st(N_s-1)}}{d\Psi_{sy(N_s-1)}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\frac{dA_{\Psi_{sy}}}{d\Psi_{sy}} = \begin{bmatrix} \frac{d\mathcal{R}_{sy(1)}}{d\Psi_{sy(1)}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{d\mathcal{R}_{sy(N_s)}}{d\Psi_{sy(N_s)}} \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad \Psi_{sy,d} = \begin{bmatrix} \Psi_{sy(1)} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \Psi_{sy(N_s)} \end{bmatrix}$$

In addition to this reduction technique, the inversion of the Jacobian matrix presented in (9) can be damped. In other words, a Levenberg-Marquardt coefficient ( $c$ ) can be added to the diagonal of the  $\mathbf{J}_{k-1}$  matrix to smooth the inversion process [5]. The value of  $c$  coefficient needs to be carefully chosen as a trade-off between stability and precision.

### 3.4. Simulation results and validation

In this section, simulation and validation are shown with a 2 pair of poles 36/28 slots IM of 1500 W with parameters presented in table I. Corresponding dimensions are shown on the schematic cross-section, see Fig. 2. The magnetic core is modelled using the saturation curve shown in Fig. 3 obtained by using the two next constants:

$$a = -0.8, b = 1000 \quad (11)$$

TABLE I Machine properties

2P-36/28 IM – 1500 W		
<b>Dimen- sions</b>	$d_{so} = 130$ mm	$d_{ro} = 80$ mm
	$d_{sso} = 108$ mm	$d_{rsi} = 50$ mm
	$d_{ssi} = 80.76$ mm	$d_{shaft} = 25$ mm
	$h_{sfl} = 0.64$ mm	$h_{rfl} = 0.5$ mm
	$w_{sfl} = 5.05$ mm	$w_{rfl} = 7.98$ mm
	$w_{st} = 3.8$ mm	$w_{rt} = 4.4$ mm
	$l_{motor} = 100$ mm	
<b>Electric parame- ters</b>	$N_s = 36$	$N_r = 28$
	$R_{stat} = 5$ $\Omega$	$R_{ring} = 8.1$ m $\Omega$
	$N = 44$ turns/slot	$R_{bar} = 74$ m $\Omega$

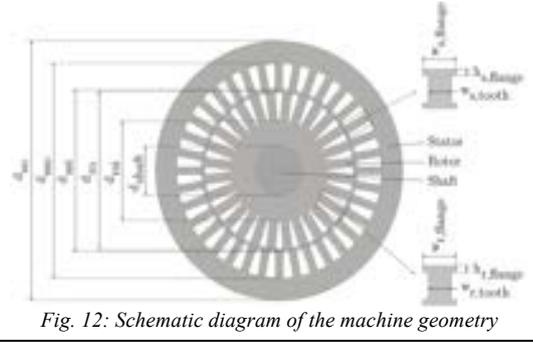


Fig. 12: Schematic diagram of the machine geometry

Fig. 4 to Fig. 7 depict the dynamic behaviour of the machine in saturated conditions. The motor is fed by a 200 V, 50 Hz voltage and the load-torque ( $\tau_L$ ) is considered as squarely dependent on the rotor speed ( $\omega_m$ ):

$$\tau_L = 35 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_m^2 \quad (12)$$

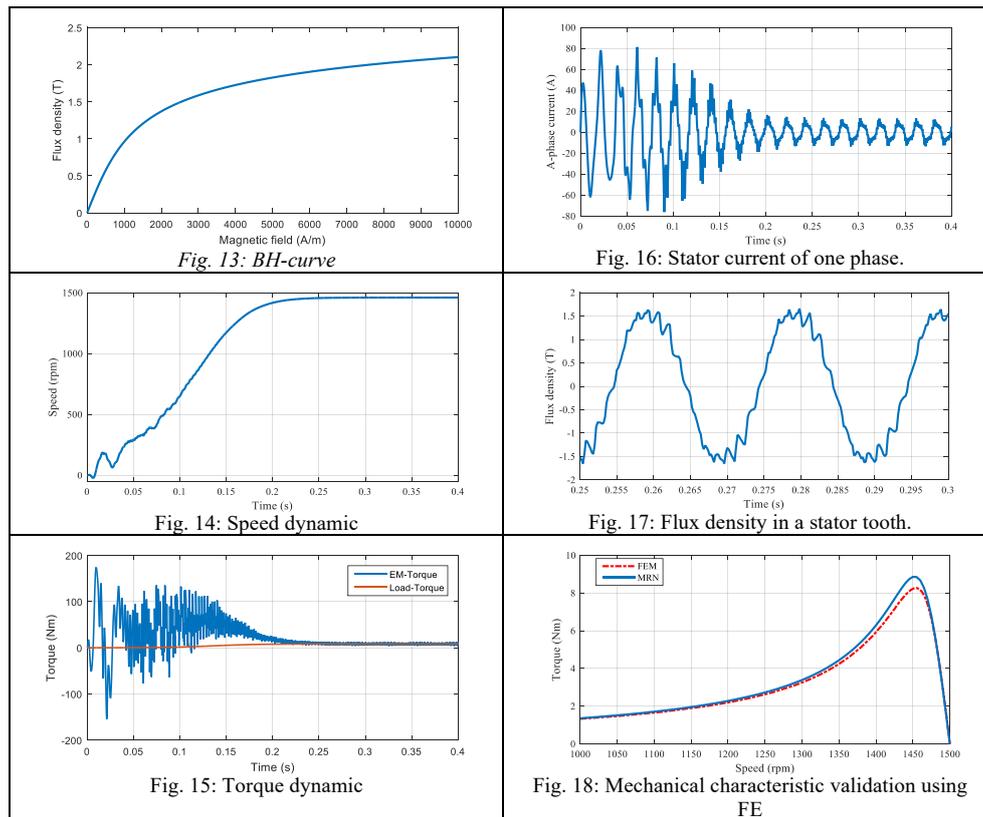
The transient speed behaviour of the simulation results can be observed in Fig. 4, while the electromagnetic and load torques are presented in Fig. 5. The steady-state operating point of this simulation is at 1461 rpm and 8.19 Nm. The stator current of phase A in time domain is depicted in Fig. 6, it reaches a peak value 13.65 A in steady-state. In addition, in Fig. 7 the stator tooth flux density is presented in steady-state. It can be observed that the maximum reached flux density is around 1.68 T, which is at the knee point defined by the  $B$ - $H$  curve, see Fig. 3. This shows the non-linearity is properly considered.

The presented MRN model was validated using FEM and showed a good accuracy as can be observed on the torque versus speed characteristic (Fig. 8). On the other hand, the computation time is strongly reduced when using MRN method rather than FEM. The showed validation was obtained by keeping a 5 A peak in the stator coils while making the speed vary between 1000 and 1500 rpm.

Due to its accuracy and low computation time, the MRN model can be used for online fault detection. The current spectrum can be analysed to detect broken bars in the squirrel cage [6] or inter-turn short circuits in the stator coils [2].

The model can also be used for efficiency map generation. Since a lot of operating points are needed to draw the efficiency map, a low computation time is required to obtain quick results. Efficiency can be obtained from the MRN model by the use of loss computation. Joule losses can be calculated from the currents and the iron loss from the flux densities by the use of separation principle [7]. To speed up the results, as well as to ease the implementation of the field-oriented control, this load-voltage

input model can be transformed into a speed-current input model by switching current and voltage from input to unknown and by putting the speed directly as input of the model. This makes it possible to lower the transient time of simulation and reach faster steady-state from which efficiency can be computed.



### 3.5. Conclusions

Two simple techniques were presented in this part in order to improve the transient MRN-model of a squirrel cage induction machine. The two techniques are based on reducing the system complexity by re-arranging the matrices, and speed up the convergence process by choosing a proper damping coefficient. The improved model is applied into a three-phase IM, with acceptable results validated by FE technique (5.2% error). It is worth mentioning that the developed model can be used in different applications, such as fault detection. Also, it is quite easy to invert the model input from voltage source to current source that may result in quick steady-state results.

Finally, we would like to thank the FlandersMake company for welcoming us during 10 months in the context of this research.

## 4. References

- [1] A. Zabardast and H. Mokhtari, “Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving,” DRPT, China, 6-9 April 2008.
- [2] P. Naderi, “Inter-turn short-circuit fault detection in saturable squirrel-cage induction motor using magnetic equivalent circuit model,” *COMPEL*, vol. 35, issue 1, pp. 245-269, 2016.
- [3] V. Ostovic, *Dynamics of saturated electric machines*. Springer, 1989.
- [4] G. Crevecoeur, *Numerical Methods for Low Frequency Electromagnetic Optimization and Inverse Problems Using Multi-Level Techniques*. PhD Thesis, Ghent University, Belgium, May 2009.
- [5] J. E. Gentle, *Matrix Algebra: Theory, Computations and Applications in Statistics*. Springer, 2017.
- [6] N. A. O. Demerdash, A. Sayed-Ahmed, G. Y. Sizov, C. Yeh, “Analysis and Diagnostics of Adjacent and Nonadjacent Broken Rotor Bar Faults in Squirrel-Cage Induction Machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 4627-4641, 2009.
- [7] G. Bertotti, “General properties of power losses in soft ferromagnetic materials,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 621–630, 1988.
- [8] “Switched reluctance motor aims to disrupt the market”, 27 February 2018, unknown, consulted on <http://drivesncontrols.com/news> the 30 September 2018.
- [9] A. M. A. Abdallah, “An Inverse Problem Based Methodology with Uncertainty Analysis for the Identification of Magnetic Material Characteristics of Electromagnetic Devices”, PhD, Ghent University, 2012
- [10] Dan Ilea, « Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers », PhD, Université de Lille, 2011
- [11] Lluís Colomo Guilera, “Analytical design of a Synchronous Reluctance motor (SRM)”, thesis, Treball de Fi de Grau, 2018





# Intégration énergétique et optimisation économique d'une installation de cogénération

Ing. A. BERTRAND  
Ir P. DEWALLEF  
Ir V. KELNER  
GRAMME – Liège

*Cet article traite de toutes les étapes réalisées pour mener à bien un projet de dimensionnement d'un système de cogénération au sein d'un réseau de chaleur situé sur le site du campus de l'entreprise Solvay à Bruxelles. La définition des besoins électriques et thermiques du site, la pertinence et la faisabilité d'un tel projet, le bilan énergétique et environnemental, et enfin, l'étude de la rentabilité économique de l'installation de cogénération, sont autant d'éléments pris en compte dans cette étude.*

*Mots-clés : Cogénération, réseau de chaleur, chauffage, combustible, gaz à effet de serre, dimensionnement, analyse de consommation, étude de rentabilité.*

*This paper details all the stages realized for the dimensioning of a cogeneration system on a district heating located on the site of the campus of the company Solvay in Brussels. The definition of the electrical and thermal needs of the site, the relevance and the feasibility of such a project, the environmental and energy record, and eventually the study of the economic profitability of the cogeneration installation, are so many elements considered in this study.*

*Keywords: Cogeneration or Combined Heat and Power (CHP), district heating, heating system, fuel, greenhouse gases, dimensioning, analysis of the energy consumption, cost-effectiveness survey.*

## 1. Introduction

La transition énergétique, qui prône une modification importante des moyens de production et de consommation de l'énergie, est l'un des grands défis de nos jours. Ce concept repose sur de nombreux enjeux tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diminution de consommation d'énergie, l'évolution vers un système énergétique moins centralisé, le passage à un système énergétique plus sûr, etc. Un moyen attrayant aidant à atteindre ces objectifs ambitieux est la cogénération.

Le principe de la cogénération est de produire de l'électricité et de la chaleur, de façon combinée, à partir d'un seul combustible. Cette solution énergétique permet de valoriser la chaleur générée lors de la production d'électricité. Le fait de récupérer cette chaleur maximise le rendement global du système, ce qui permet de réaliser des économies d'énergie par rapport à des systèmes séparés de production de chaleur et d'électricité. Ce rendement plus élevé réduit par conséquent la consommation d'énergie primaire. Ce moyen de production présente donc l'avantage de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. De plus, cette filière participe à la sécurité d'approvisionnement électrique vu que les pics de demande de chaleur coïncident généralement avec ceux de demande électrique et que le système permet de répondre à ces deux besoins simultanément.

Le sujet de cet article est le dimensionnement d'une cogénération qui va être intégrée dans la chaufferie gaz du réseau de chaleur du campus de l'entreprise Solvay situé à Bruxelles. La demande des responsables de cette entreprise est relativement simple : quel est le type de cogénération à installer, avec quelles puissances thermiques et électriques, afin que les coûts soient minimisés, c'est-à-dire que le temps de retour sur investissement soit le plus court possible ?

## 2. Présentation de l'établissement et analyse du besoin thermique

Avant d'étudier la faisabilité d'une installation de cogénération, il est important de cerner l'établissement étudié. De plus, la détermination du besoin thermique est une étape indispensable et primordiale pour effectuer un dimensionnement correct. Celui-ci s'effectue en analysant les consommations à partir de données réelles du site d'implantation.

Le contenu de cette section est consacré à la présentation du type d'établissement mais également à la description de l'installation thermique importante à connaître. En effet, une cogénération produit de la chaleur et de l'électricité mais est principalement dimensionnée à partir des besoins de chaleur car une production de chaleur

excédentaire sera perdue alors que de l'électricité en superflu peut être revendue sur le réseau.

## 2.1. Présentation de l'établissement étudié

Solvay est un groupe leader mondial de la chimie qui fabrique un grand nombre de produits chimiques et de plastiques. L'établissement étudié englobe une série de bâtiments puisqu'il s'agit du campus de l'entreprise, situé à Bruxelles. Celui-ci est le siège social de l'entreprise mais également un centre multi-sociétés. En effet, ce site loge le quartier général de Solvay, ainsi que des fonctions de supports et de recherches, mais également des entreprises externes. Ce campus est principalement composé de bureaux où près de 1 300 personnes travaillent.

## 2.2. L'utilisation des bâtiments et la régulation

L'utilisation des bâtiments est continue durant toute l'année mais uniquement en semaine. L'occupation des édifices correspond à un profil classique pour des bureaux, c'est-à-dire une utilisation principalement 5 jours sur 7, essentiellement de 7h à 18h.

Afin de connaître le type de régulation mis en place, une campagne de mesures a été menée. Des relevés des températures extérieures (via une sonde extérieure installée sur le site) et de l'eau de chauffage en sortie de chaudière, représentés sur la figure 1 ci-dessous, ont permis de connaître la régulation mise en place.

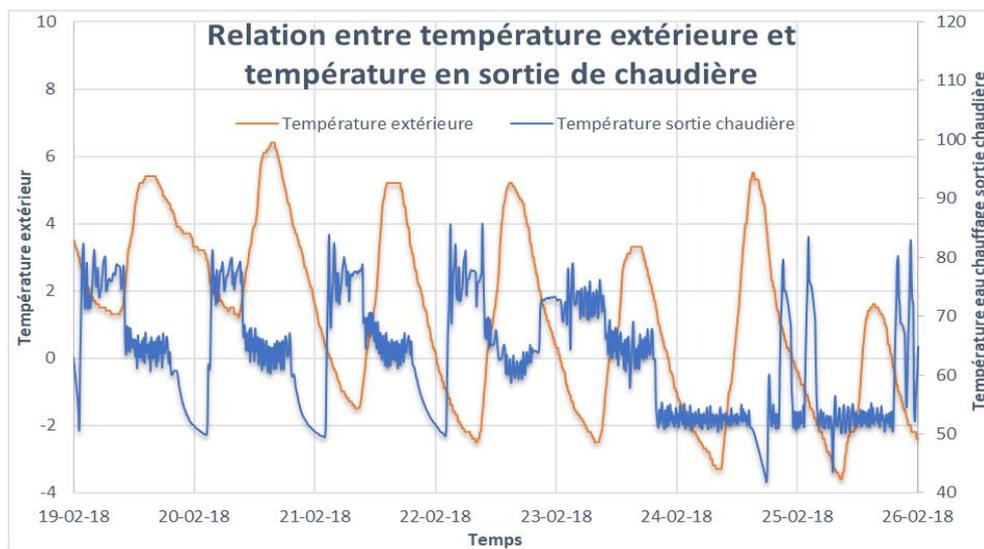


Figure 1 : Régulation

Ce graphique permet de constater que le profil de consommation diffère entre les jours de la semaine (du 19/02 au 23/02) et ceux du week-end. Du lundi au vendredi,

un arrêt nocturne a lieu : en effet, la production de chaleur se coupe vers 20h. Cet arrêt nocturne entraîne un pic de consommation matinal ayant pour but d'atteindre la température de consigne dans les locaux avant l'arrivée des premiers travailleurs.

Durant la matinée, la demande de chaleur est relativement constante et assez élevée, la température de l'eau en sortie de chaudière s'élève aux alentours des 80°C. Au cours de cette première période de la journée, les travailleurs arrivent. Les locaux doivent dès lors être maintenus à une certaine température alors que les parois des pièces sont relativement froides et que la température extérieure n'est pas fort élevée. Durant la seconde partie de la journée, la demande de chaleur est toujours plus ou moins constante mais est moindre par rapport au matin. En effet, ceci peut être expliqué par la température extérieure plus élevée et les apports internes réalisés par les occupants et les appareils électriques qu'ils utilisent, qui réchauffent en partie les locaux.

Durant le week-end, le mode de régulation diffère par rapport à celui des jours de la semaine. La température de l'eau dans le circuit est continuellement maintenue à environ 50°C. Cependant, lorsque la température d'un local descend en dessous d'un certain seuil, une alerte est envoyée pour redémarrer la production de chaleur par les chaudières. L'eau du circuit global ayant une température plus élevée, la pièce dépassant le seuil froid est réchauffée ainsi que tous les autres locaux reliés au circuit qui ne demandaient pas de chaleur supplémentaire.

### **2.3. La signature énergétique**

La signature énergétique est un outil graphique intéressant qui établit l'évolution de la consommation de l'établissement étudié en fonction du climat, c'est-à-dire en fonction des degrés-jours.

#### ***La notion de degré-jour***

La notion de degré-jour permet de quantifier le froid. Elle est indispensable pour la réalisation d'une comptabilité énergétique. En effet, l'apport d'énergie thermique par le chauffage est lié à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Le suivi de consommation d'énergie serait donc inutile sans considérer les permutations climatiques.

Les degrés-jours de chauffage (ou HDD pour Heating Degree Days) mesurent l'écart de degrés entre la température moyenne de l'air extérieur et une température de base dans le cas où la première est inférieure à la seconde. Dans le cas contraire (lorsque qu'il fait relativement chaud), les degrés-jours sont équivalents à zéro.

### *La signature énergétique*

La signature énergétique est le graphe présentant l'évolution des consommations en fonction des degrés-jours. Dessiner la signature énergétique revient à établir le lien entre la consommation d'un établissement et le climat. Sur le graphique, l'énergie consommée est représentée en ordonnée, tandis que l'abscisse indique les degrés-jours. Le rapport entre ces deux grandeurs est tracé par une droite de régression linéaire. Plus la pente de cette droite est importante, plus le bâtiment est sensible au climat, ce qui signifie par exemple que l'isolation est faible.

Comme expliqué précédemment, la régulation du chauffage diffère entre les jours de la semaine et ceux du week-end. Afin d'analyser au mieux les consommations de l'établissement, deux signatures énergétiques ont été dressées à partir des données disponibles.

#### *Signature énergétique propre aux jours de la semaine*

Le graphe ci-dessous représente la signature énergétique dessinée à l'aide des valeurs de consommation et de degrés-jours relatifs aux jours de la semaine. L'axe des y représente la consommation d'énergie thermique en kWh/jour tandis que les degrés-jours sont indiqués en abscisse. Le nombre de degrés-jours pour un jour donné correspond à la différence entre la température intérieure des bâtiments fixée dans ce cas-ci à 18°C et la moyenne des températures extérieures pour autant que celle-ci n'excède pas 18°C également. En d'autres termes, lorsque qu'il fait plus chaud que 18°C à l'extérieur, le nombre de degrés-jours équivaut à 0 et le système de chauffage est à l'arrêt.

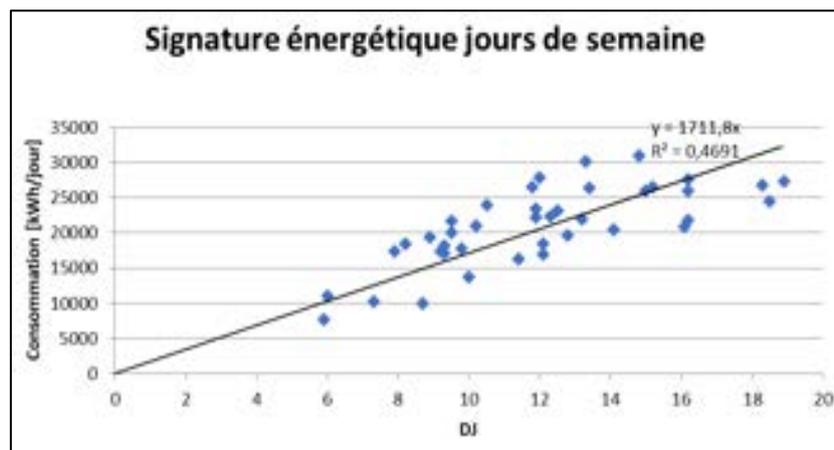


Figure 2 : Signature énergétique jours de semaine

Pour établir cette signature énergétique, nous sommes partis de données de consommation journalière de gaz sur une période de 4 mois. La droite de régression linéaire

est celle qui passe au mieux au milieu des différents points. On remarque sans grand étonnement que plus il fait froid, c'est-à-dire plus la valeur des degrés-jours est importante, plus la consommation des bâtiments augmente. On remarque que la droite passe par le point (0,0) car dans l'établissement le système de production de chaleur est uniquement dédié au chauffage. La production d'eau chaude pour d'autres consommations comme l'eau chaude sanitaire est réalisée autrement. Dans ce cas, en été, lorsque la température extérieure est suffisante, l'installation de chauffage est complètement à l'arrêt.

#### *Signature énergétique propre aux jours de week-end*

Durant le week-end la situation est différente. Nous avons vu que les bâtiments étaient légèrement chauffés afin de maintenir une température minimale à l'intérieur de ceux-ci. Ceci est évidemment vrai que lorsque la température extérieure est trop basse, autrement l'installation de chauffage est complètement à l'arrêt.

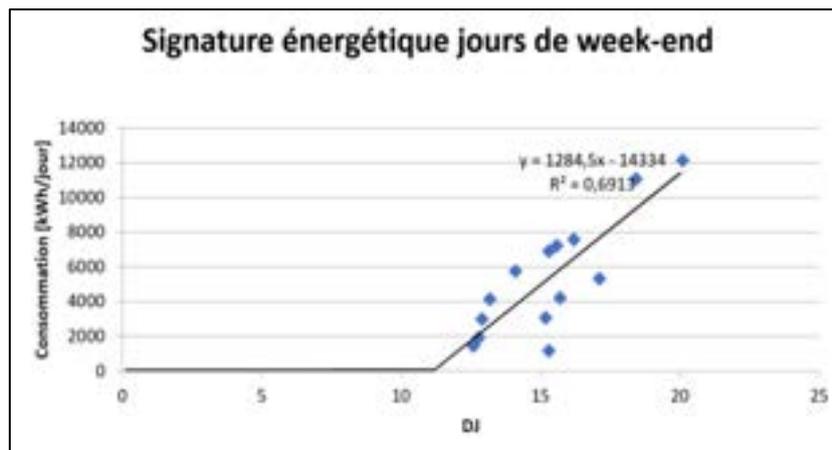


Figure 3 : Signature énergétique jours de week-end

La signature énergétique représentée ici, qui a été dessinée de la même manière que la précédente, nous prouve bien qu'au-dessus d'une certaine température le système de chauffe est à l'arrêt vu que la consommation y est nulle. On voit que la droite intercepte l'axe des x aux alentours de 11 DJ ce qui signifie que les locaux sont chauffés le week-end lorsqu'il fait moins de 7°C dehors.

## 2.4. La consommation annuelle

L'établissement de ces deux signatures énergétiques a permis de déterminer la consommation thermique annuelle. A partir des équations des deux droites de régressions, les consommations journalières ont été calculées en fonction des degrés-jours qui se rapporte à chaque jour de l'année. Ensuite l'addition de toutes ces valeurs journalières a permis de déterminer la consommation annuelle, qui équivaut en moyenne à 3740 MWh/an.

## 2.5. La monotone de chaleur

Le deuxième outil graphique réalisé est la monotone de chaleur qui représente la répartition des appels de puissance sur une année. Ce graphe représente le nombre d'heures durant lesquelles la puissance thermique est appelée durant l'année et ce pour chaque puissance comprise entre un arrêt du chauffage et la puissance thermique maximale. Afin que le graphique ait un degré de précision assez élevé, il a été construit à partir de données de consommation quart d'heure par quart d'heure.

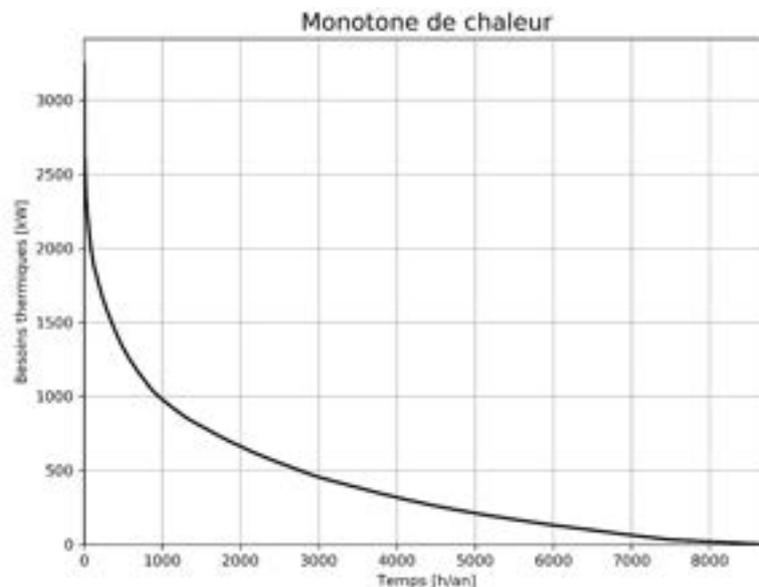


Figure 4 : Monotone de chaleur

La monotone permet de visualiser la proportion du temps durant laquelle la consommation est supérieure à un certain niveau de puissance. Par exemple : la consommation est supérieure à 500 kW durant 2 900 heures sur l'année, c'est-à-dire environ 120 jours. La surface sous la courbe représente les besoins de chaleur de l'établisse-

ment. Au sein du réseau de chaleur du centre 1 du campus Solvay la puissance appelée en été est très faible, c'est pourquoi le talon de la courbe se situe proche du zéro. Finalement, on remarque que le point culminant de cette courbe représente la puissance maximale qui peut être appelée. Elle se situe aux alentours de 3200 kW.

Ce graphique est nécessaire au dimensionnement d'une cogénération car il intervient dans le choix de la puissance de l'unité de cogénération. L'objectif du dimensionnement d'un système de cogénération est de maximiser la production d'énergie thermique. En d'autres termes, l'optimum énergétique de la cogénération est matérialisé par la plus grande surface sous la monotone de chaleur. On remarque qu'une faible puissance fonctionnera longtemps et de façon continue, alors qu'une grande puissance fonctionnera moins longtemps et de façon plus discontinue.

### **3. Dimensionnement de la cogénération**

Le besoin thermique étant défini et analysé, le dimensionnement de la cogénération à proprement parler peut avoir lieu. Celui-ci a été effectué à l'aide de 2 logiciels différents dont les solutions obtenues vont être présentées ci-après.

#### **3.1. Dimensionnement à l'aide du logiciel de la Région Wallonne COGENsim**

##### *Principe*

Le premier logiciel de dimensionnement utilisé est COGENsim (« COGENsim 3.11 - Dec 2011.xls »). Il a été développé par la région wallonne et est régulièrement utilisé par les entreprises qui veulent installer une cogénération. Il s'agit d'un logiciel de simulation pour le calcul du dimensionnement et de la rentabilité d'une installation de cogénération.

Comme pour tout logiciel de simulation, plus les données de base encodées seront proches de la réalité, plus les résultats de la simulation seront fiables. La première étape a donc consisté en l'encodage des profils de consommation d'électricité et de besoins en chaleur pour chaque quart d'heure d'une année entière. Ensuite certaines données technico-économiques comme le prix des énergies, le choix de la technologie de cogénération, le prix de vente des CV, etc. ont été introduites.

L'optimisation consiste à simuler le fonctionnement "en temps réel" de plusieurs tailles d'unités de cogénération. Le dimensionnement optimum cherche à définir les puissances thermiques et électriques les mieux adaptées aux caractéristiques du projet. L'utilisateur peut choisir le type de dimensionnement souhaité. Soit COGENsim

affiche la cogénération qui maximise le nombre de certificats verts, soit celle qui maximise la Valeur Actualisée Nette (VAN), soit celle qui minimise le temps de retour. C'est cette dernière option qui a été choisie pour le projet car il s'agit du souhait du client.

### Résultat

Selon le logiciel, la cogénération la plus intéressante qui minimise le temps de retour sur investissement possède une puissance électrique de 152 kW et une puissance thermique de 233 kW.

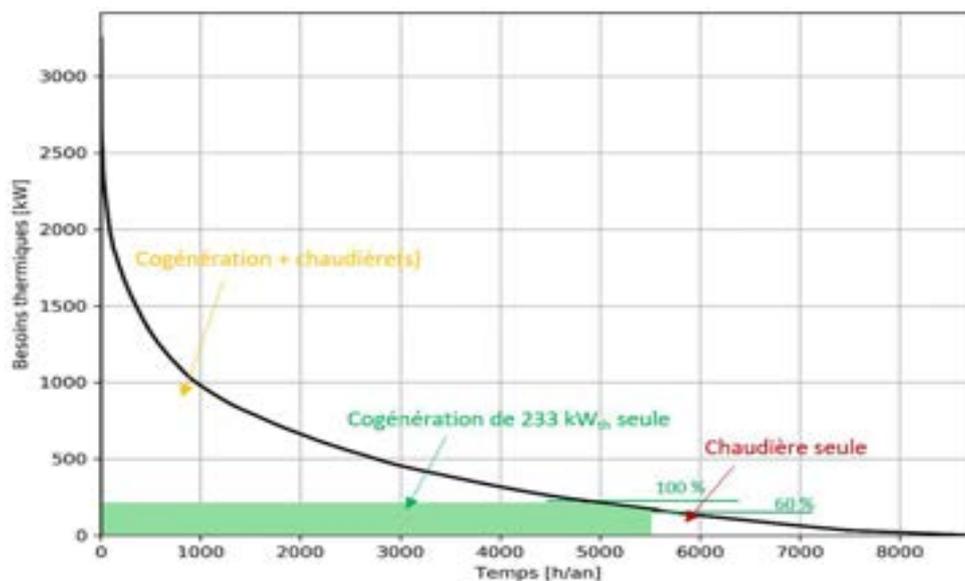


Figure 5 : Caractéristiques de l'optimum

Cette solution technologique peut être représentée sur la monotone de chaleur ci-dessus (figure 5). Le rectangle grisé illustre le fonctionnement de la cogénération de 233 kW thermique. On remarque que celle-ci pourra fonctionner durant 5717 heures par an et peut fonctionner jusqu'à 60% de sa charge maximale. Lorsque les besoins thermiques sont élevés, les chaudières fonctionneront en même temps que la cogénération comme représenté sur la partie gauche de la figure. En revanche lorsque les besoins thermiques sont trop faibles, la cogénération sera à l'arrêt et une chaudière apportera la chaleur nécessaire.

### 3.2. Dimensionnement à l'aide du logiciel développé par l'Université de Liège

#### *Principe*

Un second dimensionnement a été réalisé à l'aide d'un logiciel développé par l'Université de Liège. Celui-ci a été conçu spécifiquement pour le dimensionnement de la cogénération qui a été installée dans leurs établissements mais a été modifié et adapté à l'établissement concerné dans cette étude.

Après encodage de certains paramètres, le logiciel détermine l'optimum qui minimise le coût total du système.

#### *Résultat*

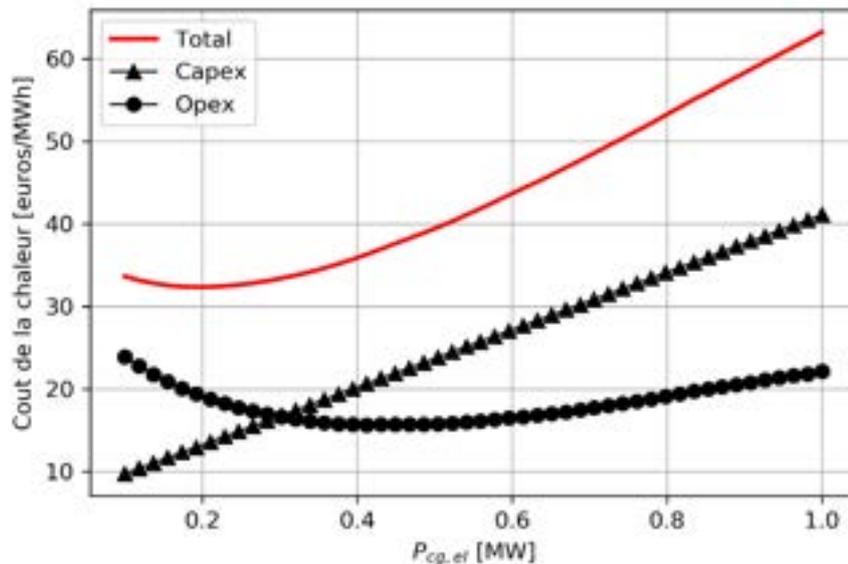


Figure 6 : Étude de coût en fonction de la puissance électrique

Le programme génère le graphique représenté à la figure 6. Il représente le coût de la chaleur en euros / MWh en fonction de la puissance électrique.

Les deux courbes inférieures représentent les différents coûts. L'une schématise les capex qui sont l'image des dépenses d'investissement tandis que la seconde représente les opex qui sont les dépenses d'exploitation. Finalement la courbe en trait continu représente le total de ces différents coûts et montre que l'optimum minimisant le coût total se situe aux environs de 200 kW électrique. On remarque par ailleurs que la courbe est relativement plate à ce niveau, ce qui signifie que la cogénération choisie peut se trouver dans un intervalle de puissance autour de ces 200 kW électriques. Cependant si cette puissance est trop grande, l'installation ne sera pas

rentable vu que les coûts seront plus élevés par rapport au scénario où aucune cogénération ne serait installée (puissance électrique équivalant à 0).

Ce second logiciel préconise donc d'installer une cogénération de 200 kW électrique et 340 kW thermique pour minimiser le coût total du système. Celle-ci fonctionnerait durant 4427 heures par an, dont 3900 heures en pleine charge.

### **3.3. La cogénération sélectionnée**

Les deux solutions trouvées ne sont certes pas identiques étant donné que la fonction objective des optimisations diffère, mais sont relativement proches l'une de l'autre. Ces dimensionnements ont pour but de connaître approximativement la puissance que doit posséder l'unité de cogénération. Lors de l'appel d'offre, la gamme de tailles des machines a été élargie autour des tailles estimées les plus rentables. L'optimum énergétique final ne peut être déterminé qu'à partir de valeurs technico-économiques spécifiques et garanties par des fournisseurs.

L'unité sélectionnée est de marque Viessmann et possède une puissance électrique de 140 kW avec un rendement de 36,1 % et une puissance thermique de 207 kW et un rendement de 53,9%

## **4. L'impact de la cogénération sélectionnée**

La machine étant choisie auprès d'un fournisseur, les impacts énergétique, économique et environnemental peuvent être définis avec certitude.

### **4.1. Le bilan énergétique**

L'unité de cogénération de 207  $\text{kh}_{\text{therm}}$  et 140  $\text{kW}_{\text{elec}}$  proposée produira une partie des besoins thermiques et électriques qui sont actuellement assurés par des chaudières et par le réseau. Les besoins thermiques ont été déterminés à partir de l'index données des années antérieures. Le tableau ci-dessous synthétise le bilan énergétique annuel de la cogénération qui fonctionnera durant 5727 heures sur l'année.

**Bilan énergétique**

<b>Situation avant cogénération</b>	
Consommation de combustible (gaz naturel)	4380 MW <sub>combustible</sub> /an
Besoins thermiques nets	3740 MWh <sub>therm</sub> /an
Consommation d'électricité	3334 MWh <sub>élec</sub> /an
<b>Situation après cogénération</b>	
Temps de fonctionnement de la cogénération	5727 heures/an
Énergie primaire consommée par la cogénération	2151 MW <sub>combustible</sub> /an
Chaleur produite par la cogénération	1164 MWh <sub>therm</sub> /an
Chaleur encore à produire par la chaufferie	2576 MWh <sub>therm</sub> /an
Production d'électricité par la cogénération	765,4 MWh <sub>élec</sub> /an

La machine permettra dès lors de produire 31,1 % du besoin en chaleur et environ 22,9 % de l'électricité.

**4.2. Le bilan économique**

Les caractéristiques technico-économiques étant connues, le bilan économique peut être réalisé. Le fonctionnement de la cogénération engendrera divers gains et dépenses qui sont représentés sur le graphique ci-dessous :

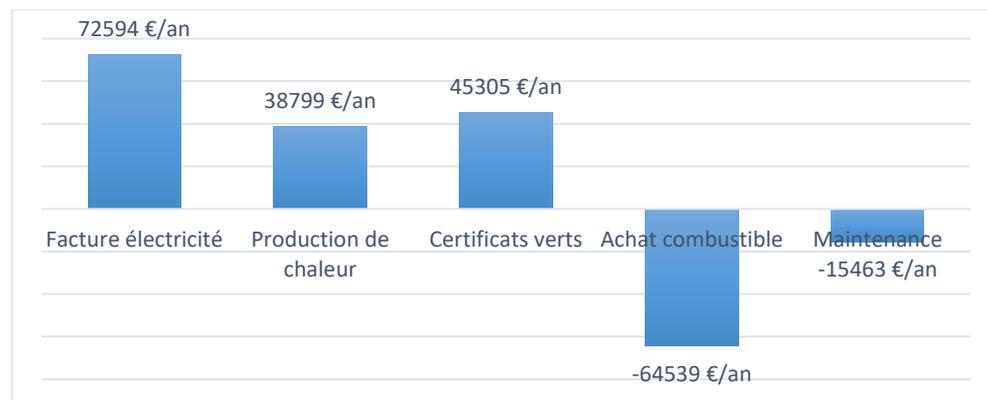


Figure 7 : Bilan économique

Vu qu'une partie de l'électricité sera produite en interne, il faudra en acheter moins sur le réseau et donc effectuer un gain sur la facture d'électricité. Le prix de l'électricité considéré est de 90,83 €/MWh. De même la chaleur produite par la cogénération ne sera plus à produire par les chaudières et donc un gain sur la facture d'achat de combustible sera aussi effectué, en considérant que le prix du combustible est de 30 €/MWh<sub>prim</sub>. Finalement la vente des certificats verts octroyé par l'IBGE apportera encore un gain non négligeable, vu que le prix octroyé est d'environ 85 € par certificat.

Évidemment des dépenses sont aussi associées au fonctionnement de la cogénération. D'abord le gaz naturel doit être acheté et finalement la maintenance et l'entretien engendreront des frais supplémentaires.

La différence entre les gains et les dépenses permet d'estimer le gain annuel à plus de 76686 €/an ce qui est relativement élevé puisque ceci correspond à environ 42 % de l'investissement estimé à un peu plus de 180 k€.

Concernant la rentabilité, le temps de retour sur investissement (RSI) est calculé ci-dessous :

$$RSI = \frac{\text{Investissement}}{\text{Gain d'exploitation annuel}} = \frac{180366 \text{ €}}{76686 \text{ €/an}} = 2,4 \text{ années}$$

Finalement la valeur actualisée nette, qui représente la différence entre les gains et les dépenses en tenant compte de l'évolution des prix, est estimée à 426264 € sur une période de 10 ans.

### 4.3. Le bilan environnemental

Le dernier impact de la cogénération passé en revue est le bilan environnemental.

Grâce à son rendement de transformation relativement élevé, la cogénération utilise moins de combustible pour produire une même quantité d'électricité et de chaleur que des filières traditionnelles.

Si la chaleur et l'électricité était produite par des filières classique que sont une chaudière pour la production d'eau chaude et une centrale TGV pour l'électricité, la quantité de combustible consommée serait plus importante. Dans ce cas-ci, l'économie en énergie primaire est supérieure à 533 MWh/an.

Cette économie permet d'éviter de rejeter dans l'atmosphère une grande quantité de CO<sub>2</sub> qui permet de gagner de l'argent vu que 533 CV/an pourront être octroyés.

## 5. Conclusion

Le principe de la cogénération est de produire de l'électricité et de la chaleur, de façon combinée, à partir d'un seul combustible. Cette solution énergétique permet de valoriser la chaleur générée lors de la production d'électricité.

La détermination du besoin thermique est une étape primordiale pour effectuer une intégration énergétique correcte au sein d'un établissement. Les données des bâtiments ont été analysées afin de déterminer la monotone de chaleur propre à l'établissement. Ensuite, le dimensionnement à proprement parler, a pu être effectué à l'aide de différents logiciels, et a permis de connaître la taille que doit avoir la cogénération pour rentabiliser au mieux la machine.

Cette étude a finalement permis de sélectionner une cogénération ayant des puissances thermique et électrique de respectivement 207 kW thermique et 140 kW électrique. L'étude de la rentabilité du projet a montré que le temps de retour sur investissement de l'installation est de 2,4 années. Cette valeur est tout à fait acceptable pour un projet de la sorte. Cette machine sera installée prochainement au sein du réseau de chaleur.

## 6. Sources

- [1] BOIDELLAL M., *Cogénération et micro-cogénération, solutions pour améliorer l'efficacité énergétique*, Paris, Dunod, 2013, 320 p.
- [2] RECKNAGEL H., SPRENGER E., SCHRAMEK E.-R., *Génie climatique*, Dunod, 2007, 2000 p.
- [3] ZELLNER S. & BURGTOF J., *Cogeneration and trigeneration, how to produce energy efficiently*  
Adresse URL : <https://www.giz.de/fachexpertise/downloads/2016-en-energy-cogeneration-trigeneration-guide.pdf>
- [4] BRUXELLES ENVIRONNEMENT IBGE DEPARTEMENT, (consulté en février 2018), *Réaliser une étude de faisabilité d'une cogénération dans les règles de l'art*.  
Adresse URL : [https://environnement.brussels/sites/default/files/user\\_files/cdcfaisabilite\\_cogen\\_juillet\\_2009\\_fr.pdf](https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/cdcfaisabilite_cogen_juillet_2009_fr.pdf)

- [5] KRARTI M., *Energy audit of building systems an engineering approach*, 2<sup>e</sup> ad. CRC Press, 2011, 454 p.
- [6] ENERGIEPLUS-LESITE, (consulté en avril 2018), *La cogénération*  
Adresse URL : [www.energieplus-lesite.be/index.php?id=19143](http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=19143)



# **Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée de microsatellite**

Ing. A. BILOCQ  
Ir T. DELAITE  
PIERRARD – Virton

*L'objectif de cet article est de démontrer l'utilité de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le secteur spatial. La méthodologie permet de développer simultanément un produit, une unité modulable pour microsatellite dans notre cas, et son procédé de fabrication tandis que les Smart Technologies permettent d'automatiser un travail réalisé de manière manuelle avant ce projet.*

*Mots-clefs : Lean 3P, Smart Technologies, Microsatellites*

*The purpose of this article is to demonstrate the utility of Lean 3P methodology and Smart Technologies in the space sector. The methodology makes it possible to simultaneously develop a product, a modular unit for microsatellite in our case, and its manufacturing process, while Smart Technologies could automated a job done manually before this project.*

*Keywords : Lean 3P, Smart Technologies, Microsatellites*

## 1. Introduction

Le but de ce travail est de démontrer l'utilité de la méthodologie Lean 3P<sup>1</sup> et des Smart Technologies<sup>2</sup> dans le processus de développement d'une cellule d'assemblage, intégration et de tests dans le cas d'une avionique intégrée de microsatellite. Tout d'abord, la méthodologie va permettre de définir rapidement le produit et son procédé de fabrication tandis que les Smart Technologies vont permettre d'optimiser la cellule de production pour passer d'une fabrication entièrement manuelle à une fabrication automatisée. Ensuite, la combinaison des deux permet de définir le processus idéal pour l'entreprise au niveau du capital, des coûts d'opérations et de son efficacité.

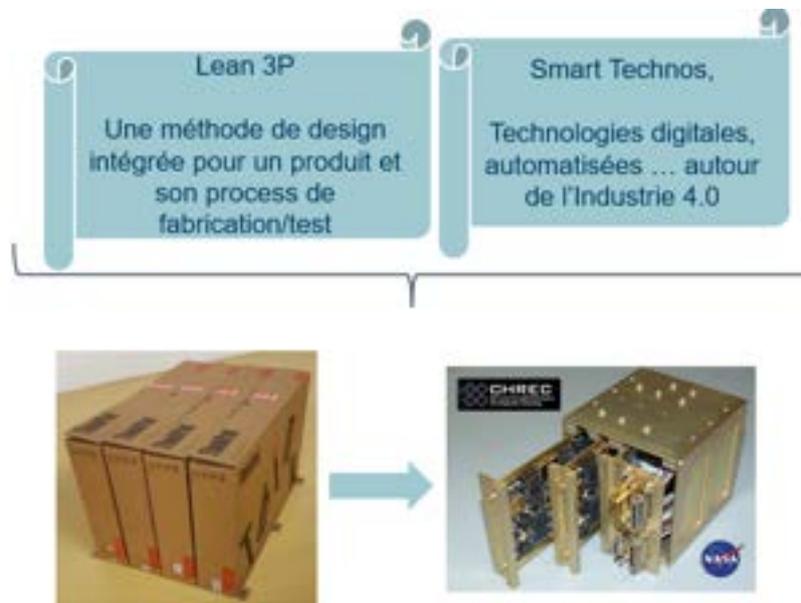


Figure 1 – Utilisation de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies pour le passage d'un prototype en carton à un produit final.

La figure 1 fait le lien entre les différentes étapes à mettre en oeuvre. Premièrement, un prototype du produit est réalisé grâce à la méthodologie. Deuxièmement, en combinant cette dernière avec les Smart Technologies, un procédé de fabrication optimal est établi pour réaliser le produit.

1. 3P : Production, Préparation, Processus

2. Dans le contexte imposé par l'entreprise, elles définissent les technologies digitales et automatisées induites par l'industrie 4.0.

## 1.1. Méthodologie Lean 3P

La méthodologie [1] propose le développement d'un produit et de son processus de fabrication de façon **simultanée** durant ce qui s'appelle le **Lean 3P Event**. Ce dernier se déroule sur une période d'une semaine par trois équipes pluridisciplinaires composées de 8 personnes. Dans le cadre de ce travail, l'événement est réalisé par une seule personne dans un délai de deux mois. Il se déroule en quatre phases :

- L'information : phase de recherche sur le produit à concevoir et son procédé de fabrication. Les informations recueillies viennent soit de l'expérience de l'entreprise soit de ce qui se fait sur le marché ;
- L'innovation : phase de développement d'alternatives par rapport aux attributs du produit ainsi que le processus. Sept alternatives sont ainsi considérées et notées en fonction de critères Lean comme l'espace requis, la valeur ajoutée à l'opérateur, etc. A la fin de cette étape, le produit et le diagramme des fonctions pour le réaliser sont fixés. Finalement, trois processus alternatifs sont définis et partagés entre les différentes équipes ;
- Le prototypage : les trois processus définis au point précédent sont développés et réalisés avec des matériaux peu coûteux comme du carton. En effet, cela permet de modifier et ajuster les erreurs rapidement à moindre frais ;
- L'optimisation : phase d'évaluation des prototypes, un processus hybride est déterminé en fonction des points forts des autres prototypes.

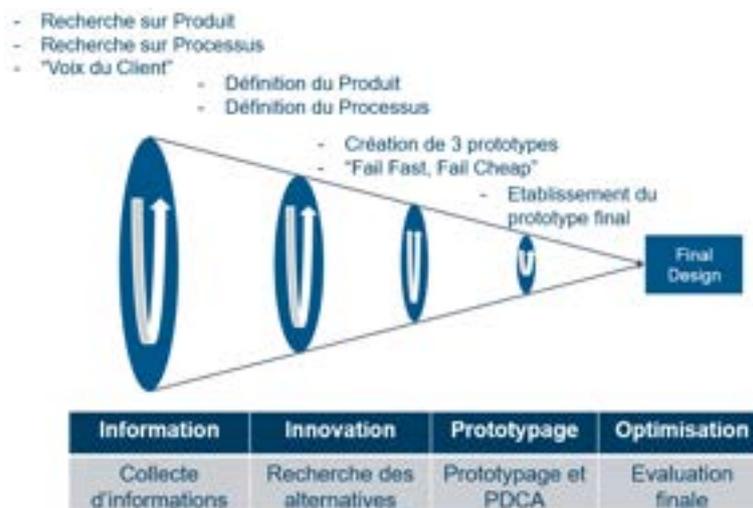


Figure 2 – Phases de la méthodologie Lean 3P [1]

## 1.2. Contexte

Dans la cadre du développement d'une nouvelle plateforme de microsattelites, l'entreprise Luxspace [2], membre du groupe OHB [3], ambitionne de produire des satellites abordables, adaptables et modulables en fonction de la mission, rapide à lancer sur le marché et permettant une production en série.

Pour le moment, l'entreprise conçoit ses satellites de façon "artisanale". Chaque produit est assemblé manuellement et est unique en son genre. En outre, chaque étape de fabrication est assurée par un ingénieur, du simple vissage, aux tests finaux. Pour permettre une mise sur le marché rapide et une production en série, l'objectif est donc double en matière de temps et d'argent.

Il faut, dans un premier temps, réduire les coûts non-récurrents en développant rapidement le produit ainsi que le procédé de fabrication. En effet, l'entreprise a montré qu'une de ses difficultés est le passage à la production. Les ingénieurs en charge de la conception du produit ne pensent pas forcément au moyen de le produire et cela entraîne des ralentissements, donc une hausse des coûts. Dans un deuxième temps, réduire les coûts récurrents en commençant à développer les moyens de production de l'entreprise. Plus le temps de production d'une unité est réduit, plus le bénéfice est intéressant pour l'entreprise.

Pour résumer, le tableau 1 reprend l'état des lieux initial au début du projet et ce qui est ambitionné par le travail.

	Initial	Final
Produit	Idée relativement floue	Produit établi
Fabrication	Inexistante pour le produit	Définition de chaque étape
Production	Entièrement manuelle Ingénieur à chaque étape Aucune production en série	Automatisée Opérateur et chargé de la qualité Production en série

*Tableau 1 – Etats des lieux initial et final reprenant le produit, son procédé de fabrication et la ligne de production de l'entreprise.*

## 2. Information

### 2.1. Unité modulaire

Une unité modulaire est composée de plusieurs modules dont le nombre est variable en fonction de la mission du microsatellite. L'unité en question gère la communication et la navigation. Il est possible de décomposer l'unité en trois niveaux [4] :

- L'unité : elle comporte tous les modules et les connexions nécessaires à la communication des équipements électroniques. Comme il est possible de le voir sur la figure 3, l'unité peut être soit un châssis fixe avec un nombre de modules défini, soit un châssis modulaire défini par les modules eux-mêmes ;

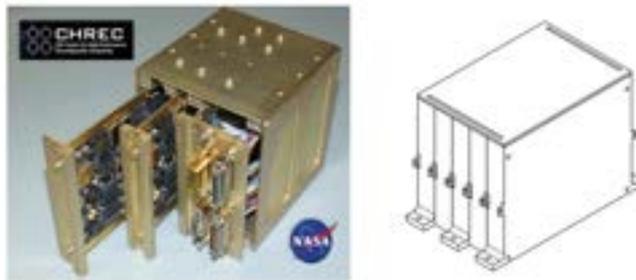


Figure 3 – A gauche, une unité à châssis fixe ; à droite, une unité à châssis modulaire [4]

- Le module : contient l'équipement électronique. Les dimensions des modules sont égales excepté pour la hauteur. Cette dernière peut varier en fonction du contenu du module ;



Figure 4 – A gauche, un module "avec oreilles", à droite, un module sans "oreilles" [5]

- Le contenu : Le type d'équipement électronique, soit une PCB, soit un composant électronique soit mixte.



Figure 5 – Différents types d'équipement possibles pour l'unité avionique [5]

Le tableau 2 reprend la totalité des attributs de l'unité avionique intégrée définis lors du processus de recherche sur le produit et les informations récoltées par le client <sup>3</sup>. Tous ces attributs devront être pris en compte lors de l'établissement du diagramme des fonctions dans la phase d'innovation.

Fonction	Attributs	Données
Unité modulable	Nombre de modules	Dépend de la mission
Adaptable	Type de module	Possible redondance
Châssis	Fixe, modulable	/
Empilement	Horizontal, vertical, hybride	/
Base commune	Commune, divisée	Dépend de l'empilement
Connexion interne	Câbles, carte mère	Carte mère
Forme	Avec/sans oreilles	Sans oreilles
Connecteurs	Nombre, position	2 , sur côtés opposés
Contenus	Equipement, PCB	PCB
Châssis du module	Ouvert, fermé	Dépend du module
Hauteur du module	Hauteur	/
Côtés utilisés de la PCB	Un ou deux	Deux
Fonction	Une, plusieurs	Plusieurs
Carte fille	Oui, non	Dépend de la PCB
Câbles	Rigide, flexible	/

Tableau 2 – Différentes caractéristiques de l'unité avionique et les attributs fixés par l'entreprise [4] [5]

3. En l'occurrence, dans ce cas-ci, l'entreprise elle-même.

## 2.2. Cellule de production

Une des contraintes de ce projet est la production en série du satellite comme mentionné dans la section 1.2.. Au niveau spatial, aucune maintenance n'est possible lorsque le satellite est placé en orbite. Pour être certain de son bon fonctionnement, les différents composants et ensuite le satellite passent par plusieurs modèles de développement [6] avant la conception finale :

- *Structural Model* : permet de qualifier la structure mécanique ;
- *Engineering Model* : permet de qualifier l'électronique ;
- *Flight Model* : modèle de vol final.



Figure 6 – Différentes étapes de qualification

Comme on peut voir, les modèles subissent différents tests avant d'aboutir au modèle final. Ces tests sont de deux types :

- Qualification : ces tests simulent un environnement plus hostile que la réalité pour éprouver le produit ;
- Acceptance : une fois le système qualifié, il s'agit de s'assurer que le produit est conforme aux spécifications.

Dans le cadre de la production en série et en fonction de ce qui a été défini au-dessus, les hypothèses suivantes sont fixées pour la cellule de production :

- L'unité avionique à produire est un *Flight Model* ;
- Les tests réalisés ne sont que des tests d'acceptance ;
- Les produits réceptionnés ont déjà été qualifiés.

Finalement, pour entièrement définir cette cellule de production nommée AIT (Assemblage, Intégration, Tests), voici les définitions [6] des étapes à réaliser :

- Assembler : combinaison physique de composants, pièces pour former une entité plus large ;
- Intégrer : combinaison fonctionnelle d'entités de plus bas niveau pour former une entité de niveau plus élevé ;
- Tester : méthode de vérification des fonctionnalités et performances d'un produit dans un environnement simulé.

### 3. Innovation

Maintenant que l'unité modulaire et la cellule de production sont définies globalement, il est important de définir précisément tous les attributs du produit. En effet, comme le projet n'en est qu'à son commencement, certains points ne sont pas encore établis et peuvent changer dans l'avancement du projet. Pour établir la cellule de production qui convient le mieux au produit, tous ces points doivent être pris en compte directement. Cette partie de la méthodologie suit la courbe en V.

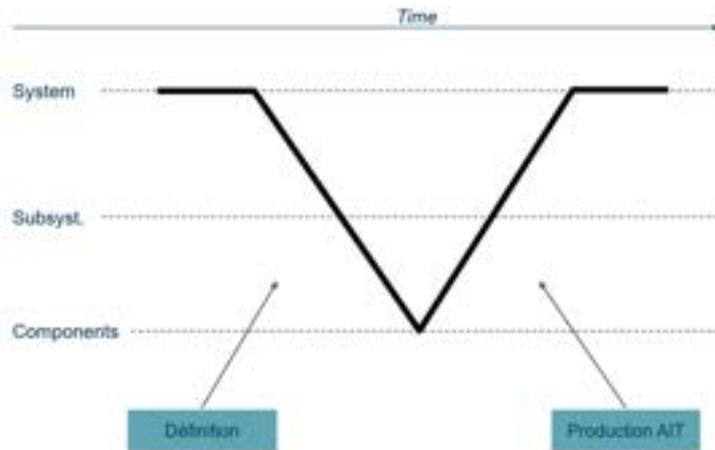


Figure 7 – Courbe en V. A gauche, la définition la plus plausible possible de l'unité modulaire, à droite, la production nécessaire pour concevoir le produit [5]

En premier lieu, l'unité avionique est décrite dans sa globalité et en suivant la courbe, l'unité est décomposée en fonction de ses modules et ensuite, des différents composants qui la constituent. Le principe est d'obtenir la définition la plus précise de l'unité, des différents sous-systèmes jusqu'aux plus petits composants.

En second lieu, la production des sous-systèmes est établie en remontant la courbe. A chaque étape, des vérifications sont effectuées pour s'assurer que le produit correspond aux spécifications définies dans le premier point. Cette partie est illustrée dans le diagramme des fonctions. (Fig.11)

### 3.1. L'unité avionique intégrée

Différents points sont à prendre en compte pour définir totalement l'unité avionique en plus de ceux donnés à la section 2.1. En effet, ces points peuvent varier d'une unité à une autre et d'une mission à une autre.

Voici quelques exemples de variables à considérer :

- L'empilement des modules : ces derniers peuvent être positionnés de trois positions différentes en fonction de certaines contraintes comme la dissipation thermique, l'interconnectivité entre modules, etc ;



Figure 8 – Empilement des modules. De gauche à droite, empilement horizontal, vertical et mixte [4] [5]

- La fixation au satellite : grâce à des pieds de fixation ou à une base commune pour les modules ;



Figure 9 – Fixation des modules. A gauche, des pieds de fixation ; à droite, une base commune [5]

- L'intérieur du module : dépend de la composition du contenu. Ce dernier est défini par la mission à réaliser.

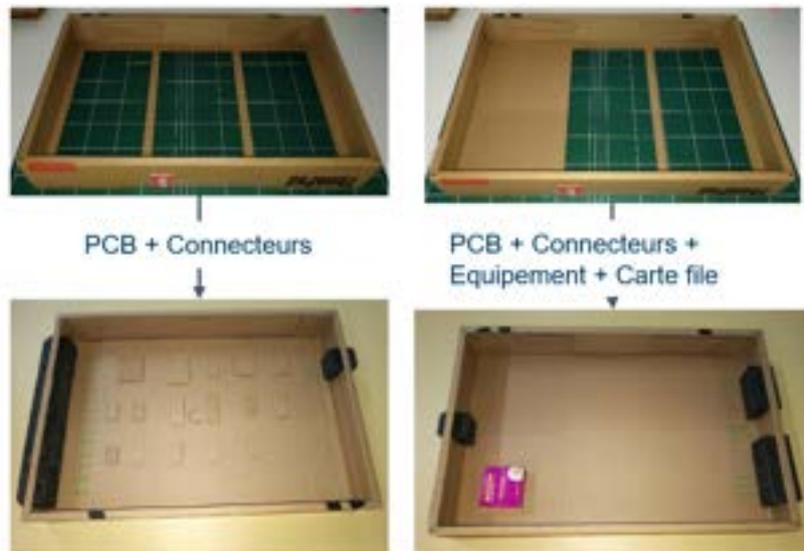


Figure 10 – Intérieur du module. A gauche, un module au fond ouvert pour PCB, à droite, un module au fond partiellement ouvert pour des équipements électroniques [4] [5]

Ensuite, l'intérêt de cette partie est de pouvoir déterminer les composants nécessaires à chaque étape de décomposition de l'unité avionique (unité, module, PCB). Le tableau 3 montre ces différents composants et à quel niveau ils sont intégrés.

Configuration	Unité	Module	PCB
Modules	X		
Structures		X	X
PCB Assemblée		X	
PCB Semi-Assemblée		X	X
PCB vide			X
Mezzanine		X	X
Connexion externe	X	X	X
OEM (Câble Coax, DC/DC, ...)		X	X
Parties mécaniques	X	X	X
EEE (Connecteurs, câbles, autres)			X

Tableau 3 – Réception des différents éléments par rapport au niveau d'intégration [5]

### 3.2. Diagramme des fonctions

Une fois toutes les parties du produit prises en compte, il est temps de le produire. Il est donc nécessaire de remonter la partie droite de la courbe en V. Le diagramme de la figure 11 représente toutes les étapes à réaliser pour obtenir l'unité finale à partir des composants indiqués dans le tableau 3. Il se décompose en quatre blocs :

- La partie logistique qui permet la réception, l'identification, le stockage et la planification de la fabrication (fonctions 1 à 5) ;
- La production de la PCB (fonctions 6 à 7) ;
- La production du module (fonctions 8 à 14) ;
- La production de l'unité (fonctions 15 à 20) ;

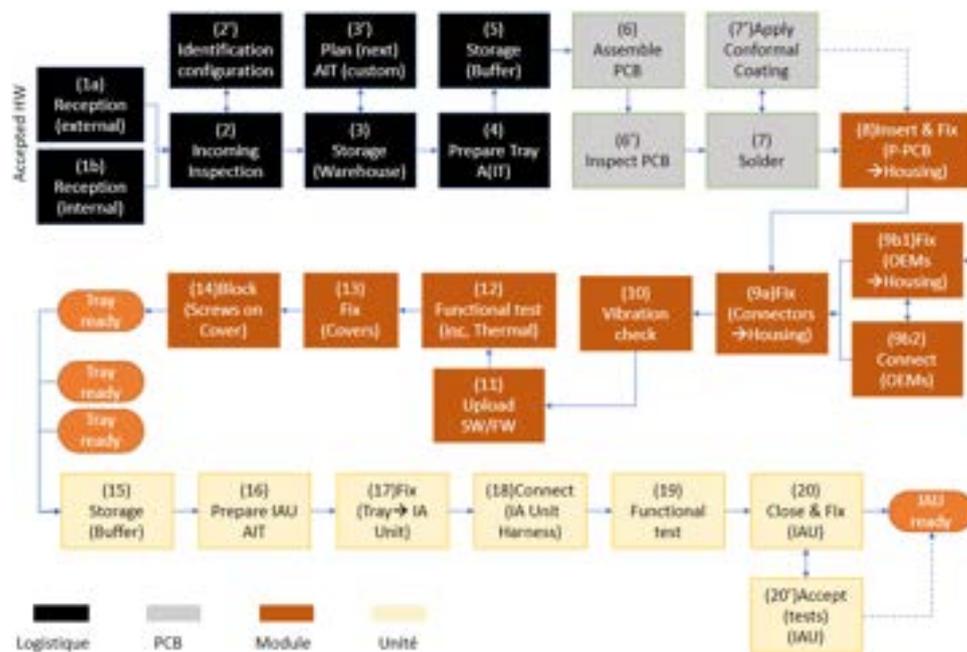


Figure 11 – Diagramme des fonctions, toutes les étapes nécessaires à la production de l'unité avionique sont représentées [5]

Les trois différents blocs de production représentent l'assemblage, l'intégration et les tests des sous-systèmes. Ils ont été conçus pour être indépendants les uns des autres. C'est-à-dire qu'une partie peut être supprimée sans modifier le comportement des autres. Par exemple, l'entreprise pourrait recevoir des PCB déjà assemblées si les fabriquer n'est pas rentable et dans ce cas, toute cette partie du diagramme pourrait être supprimée sans modifier la production du module et de l'unité.

Les parties suivantes de la méthodologie vont permettre de découvrir ce qui est intéressant à concevoir et ce qui est intéressant à acheter.

### 3.3. Processus Alternatifs

Une fois que les étapes sont définies, sept alternatives sont proposées pour les réaliser<sup>4</sup>. Le but étant d'établir trois processus alternatifs pour produire l'unité avionique avec les contraintes suivantes :

- Une alternative manuelle pour représenter la façon de procéder actuelle de l'entreprise ;
- Une alternative fortement automatisée ;
- Une alternative intermédiaire.

Sept processus pour: Identification							
Materiel		Alphanumerique	Optique	Optique	Radio	GPS	RTLIS
Méthode		étiquette et écrire dessus	Barcode 2D	Barcode 3D	RFID	GPS et antenne	capteurs pour localiser
Outils		Humain ou robot collaboratif	scanner	lecteur QR	RFID tag, récepteur		IR, UV, wifi ou bluetooth
Critère Evaluation	Poids						
Minimal Space Required	1	0	+	+	+	-	-
Takt Time	0,25	-	+	+	+	0	0
Pull System	1	-	0	+	+	0	0
Load Load Operations	0,75	-	0	0	+	0	0
Poka Yoke	0,5	-	+	+	+	0	0
Low Motion Waste	1	-	0	0	+	0	0
Maximum op. value-add	1	-	0	0	+	0	0
Changeover Time	1	0	+	+	+	-	+
Tool Room Maintenance	1	+	0	0	0	-	-
Safety, ergonomics, health	1	+	+	+	+	0	0
Known Process	0,75	+	0	0	-	-	-
Future Challenge	1	-	0	+	+	0	+
Scalability	1	-	+	+	+	0	+
Minimal Capex	1	+	0	0	0	-	-
Total +		3,75	4,75	6,75	9,5	0	3
Total -		6,5	0	0	0,75	4,75	3,75
Classement		5	3	2	1	6	4

Tableau 4 – Processus alternatifs pour la fonction "Identification"

Pour définir les technologies les plus intéressantes, les sept alternatives sont évaluées suivant divers critères Lean comme le takt time, la valeur humaine ajoutée, l'espace requis minimum, etc. Le tableau 4 illustre la méthode appliquée pour la fonction "Identification" du diagramme des fonctions. Dans ce cas, seulement six alternatives

4. Ce qui représente plus de 150 alternatives sur l'ensemble du diagramme.

ont été traitées <sup>5</sup>. Les poids sont attribués en fonction des besoins de l'entreprise. L'espace requis par une technologie est un des points les plus importants car l'entreprise dispose de peu d'espace au sol. De plus, comme le prix au sol dans le pays <sup>6</sup> de l'entreprise est élevé, il est d'autant plus important d'optimiser ce critère. A l'inverse, moins d'importance est accordée au takt time car la cadence de production de satellites est faible. <sup>7</sup> Une fois les alternatives évaluées, elles sont classées de la meilleure à la moins intéressante. Les trois premières sont utilisées dans la suite. Cette méthode est répétée à chaque étape du diagramme des fonctions.

Le tableau 5 représente les trois solutions retenues.

Value Added Function	First Selected Alternative	Second Selected Alternative	Third Selected Alternative
1a Reception (external)	Feet, trolley, lift	Mobile robot	Conveyor belt
1b Reception (internal)	Feet, trolley, lift	Mobile robot	Conveyor belt
2 Incoming Inspection	Eye, also with caliper	2D Camera	"Metrological" Cobot
2' Identify	Printed IdentTag	Bar code 3D (e.g. QR)	RFID
3 Storage(Warehouse)	Shelves	Vertical Carousel	Automatic Shelving
3' Plan	Manual	WMS	MES
4 Prepare Tray A(IT)	Bags and/or boxes	(Boxes in) Vertical Carousel	Pick & Drop by Robot
5 Storage (Buffer)	Shelves	Vertical Carousel	Automatic Shelving
6 Assemble PCB	Paper doc	Augmented Reality	Pick & Place Machine
6' Inspect PCB	Eye, also with microscope	2D Camera	"Inspection" Cobot
7 Solder	Paper doc	Augmented Reality	(void)
7' Apply Coating	Manual	Coating machine	(void)
8 Insert&Fix	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9a Fix (Connectors)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9b1 Fix (OEMs )	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
9b2 Connect (OEMs)	Manual	(void)	(void)
10 Vibration Check	Manual "Shake&Listen"	Cobot "Shake&Listen"	Vibrating Plate / Centrifuge
11 Upload SW/FW	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
12 Functional test	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
13 Fix (Covers)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
14 Block (Screws Cover)	Manual (glue)	Automated Glue Dispenser	Cobot
15 Storage (Buffer)	Manual (shelves)	Vertical Carousel	Automatic Shelving
16 Prepare IAU AIT	Manual (bags and/or boxes)	(Boxes in) Vertical Carousel	Pick & Drop by Robot
17 Fix (Tray )	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
18 Connect (Harness)	Manual	Cobot (Pick & Place)	(void)
19 Functional test	Manual with EGSE	With EGSE "Test Clamp"	(void)
20 Close&Fix (IAU)	Screwdriver + torquewrench	Automated Screwing (Cobot)	Automated Screwing (tool)
20' Accept (tests)	With EGSE Test Facilities	(void)	(void)

Tableau 5 – Trois processus alternatifs pour chacune des fonctions [5]

5. Sept est une moyenne donnée par la méthodologie Lean 3P [1]

6. Grand Duché du Luxembourg

7. Moins de 15 microsattellites par an dans le meilleur des cas.

## 4. Prototypage

Prototyper les lignes de production définies dans le point précédent a nécessité de développer toutes les fonctions du diagramme de la figure 11 en différentes tâches à accomplir. Leur élaboration a été possible grâce à la reconstitution d'unités en carton comme sur les figures 8 et 9. Ceci a été réalisé pour les trois processus alternatifs.

Une fois les étapes développées, tous les temps pour les effectuer ont été établis. Ces temps sont répartis en quatre catégories :

- Le travail réalisé par un opérateur ;
- Le travail réalisé par un QA<sup>8</sup> qui vérifie les résultats des tests effectués. En reprenant la courbe en V, il est le lien entre la partie production et les spécifications définies dans la partie définition ;
- Le travail réalisé par la technologie comme un robot collaboratif par exemple ;
- Les temps d'attente.

De là, le temps de travail humain total est déduit. Le dernier point est consacré au coût d'investissement nécessaire pour chacune des technologies.

Fonctions	Tasks	Process Duration	Tech		QA		Techno		Wait		Work Time	CAPEX (€)
			% Task	Effort	% Task	Effort	% Task	Use	%Task	Duration		
1	Delivery(via Mobile Robot)	00:03:10	0%	00:00	63%	00:02	37%	00:01:10	0%	00:00:00	00:02:00	20000
Stairs	Place the load on the robot	00:01:00	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
	Exterior to InclInsp (100m)	00:01:10	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:01:10	0%	00:00:00		
	Remove the load	00:01:00	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
2	Incoming Inspection	00:05:00	0%	00:00	80%	00:04	20%	00:01:00	0%	00:00:00	00:04:00	3200
	Unpack	00:02:30	0%	00:00	100%	00:02	0%	00:00:00	0%	00:00:00		
	Visual inspection	00:00:30	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:00:30	0%	00:00:00		
	Measure geometries	00:00:30	0%	00:00	0%	00:00	100%	00:00:30	0%	00:00:00		
	Report	00:01:30	0%	00:00	100%	00:01	0%	00:00:00	0%	00:00:00		

Tableau 6 – Une partie du prototypage du processus alternatif automatisé[5]

Après avoir déterminé ces paramètres, il est possible de représenter graphiquement le temps de travail nécessaire à un humain (opérateur ou QA) pour finir une fonction. Une première observation sur la figure 12 permet de voir que les durées de travail de la plupart des fonctions peuvent être fortement réduites. Cependant, les fonctions de 6 à 7' sont difficilement améliorables, il s'agit du bloc de production de la PCB.

8. Quality assurance.

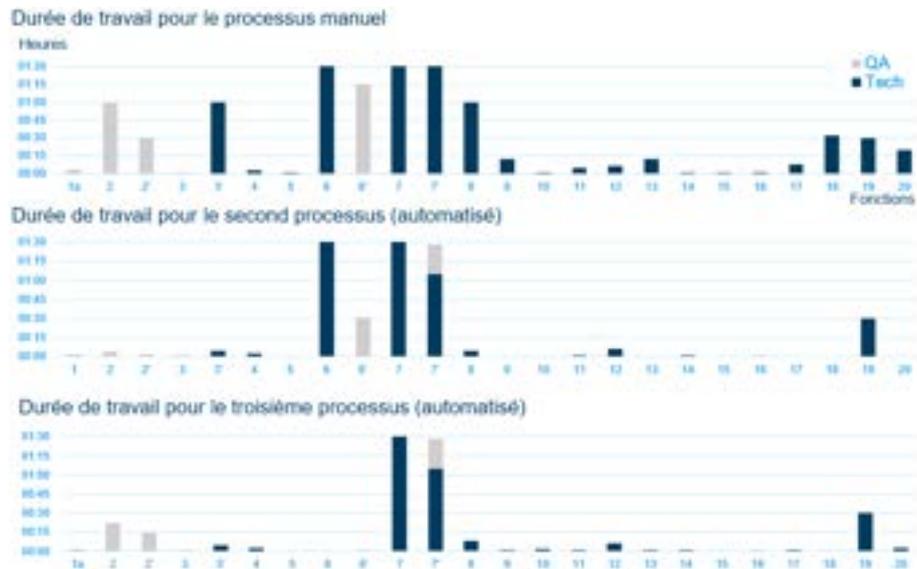


Figure 12 – Durée de travail humain (en heures) pour les différents processus [5]

## 5. Optimisation

L'évaluation du procédé de production optimale s'effectue en ayant conscience des contraintes de production imposées par le produit et le contexte :

- Une faible cadence de production (moins de 15 satellites par an) ;
- Une ligne de production flexible pouvant s'adapter aux besoins de la mission ;
- La présence d'un opérateur et d'un QA minimum ;
- Une minimisation des coûts d'investissement dans un premier temps.

Pour cette partie, l'objectif n'est pas de choisir un processus alternatif en entier mais de combiner le meilleur des trois procédés. Dans ce but, les prototypes sont évalués en fonction de trois niveaux : la stratégie du système, les personnes et les fonctions [1]. Les mêmes critères Lean que dans la sous-section 3.3. sont utilisés pour l'évaluation du dernier point à la différence qu'ils sont tous pondérés au même niveau.

### 5.1. Niveau des systèmes et des personnes

Tout d'abord, les résultats des graphiques à la figure 12 montrent un élément important : la fabrication de la PCB est la partie de production la plus longue. Une première caractéristique du processus optimal en découle, le bloc de PCB n'est pas intéressant à réaliser dans l'entreprise pour la cadence donnée. Il est plus intéressant de recevoir

cette carte électronique des fournisseurs.

Ensuite, comme les contraintes de base imposent au minimum deux personnes présentes dans la cellule de production et que l'automatisation "lourde" ne permet pas un gain de temps conséquent<sup>9</sup> [5], un intérêt primordial est accordé à l'optimisation du temps de travail des personnes.

## 5.2. Niveau des fonctions

Cette évaluation est réalisée de façon similaire à ce qui a été introduit à la sous-section 3.3. Les fonctions identiques des différents processus sont comparées et classées selon leur intérêt. A la fin de cette étape, les technologies retenues sont les suivantes :

- Le convoyeur pour acheminer les pièces ;
- La caméra 2D pour l'inspection d'entrée ;
- Le barcode pour l'identification des pièces lors du stockage ;
- Le carousel vertical pour une optimisation de la capacité de stockage ;
- Un logiciel WMS<sup>10</sup> pour la planification et la gestion des stocks ;
- Le tournevis automatique pour la fixation des nombreuses vis présentes dans l'unité [5].

Cette optimisation donne naissance à un processus tourné vers l'humain, commençant la production au niveau du module (comme référencé dans le diagramme des fonctions de la figure 11). Le tableau 7 expose les coûts préliminaires à l'acquisition de ces technologies. Ensuite, le tableau 8 présente le procédé de fabrication optimal de l'unité avionique intégrée. Finalement, la figure 13 illustre le temps de travail nécessaire pour réaliser une étape grâce aux technologies identifiées.

Technologie	Coût €
Convoyeur	2000
Caméra 2D	3200
Barcode	3250
Carousel Vertical	25000
WMS-ERP	20000
Tournevis Automatique	5000

*Tableau 7 – Coût des technologies pour le processus optimal*

9. Voir différence de temps entre processus 2 et 3 sur la figure 12

10. Warehouse Management System

Value Added Function	Optimal Process
1a Reception (external)	Conveyor belt
1b Reception (internal)	Conveyor belt
2 Incoming Inspection	2D Camera with Pattern Recognition
2' Identify	Bar code 3D (e.g. QR)
3 Storage (Warehouse)	Vertical Carousel
3' Plan	WMS : Warehouse Management System
4 Prepare Tray A(IT)	(Boxes in) Vertical Carousel
5 Storage (Buffer)	Vertical Carousel
6 Assemble PCB	Manual
6' Inspect PCB	Visual (eye, also with microscope)
7 Solder	Manual with paper doc
7' Apply Coating	Manual
8 Insert&Fix	Automated Screwing (tool)
9a Fix (Connectors)	Automated Screwing (tool)
9b1 Fix (QEMs)	Automated Screwing (tool)
9b2 Connect (QEMs)	Manual
10 Vibration Check	Manual "Shake&Listen" or "Shake&Look"
11 Upload SW/FW	Manual (all connections by hand) with EGSE
12 Functional test	Manual (all connections by hand) with EGSE
13 Fix (Covers)	Automated Screwing (tool)
14 Block (Screws Cover)	Manual (glue)
15 Storage (Buffer)	Vertical Carousel
16 Prepare IAU AIT	(Boxes in) Vertical Carousel
17 Fix (Tray)	Automated Screwing (tool)
18 Connect (Harness)	Automated Screwing (tool)
19 Functional test	Manual (all connections by hand) with EGSE
20 Close&Fix (IAU)	Automated Screwing (tool)
20' Accept (tests)	Manual (with EGSE and Test Facilities)

Tableau 8 – Processus optimal[5]

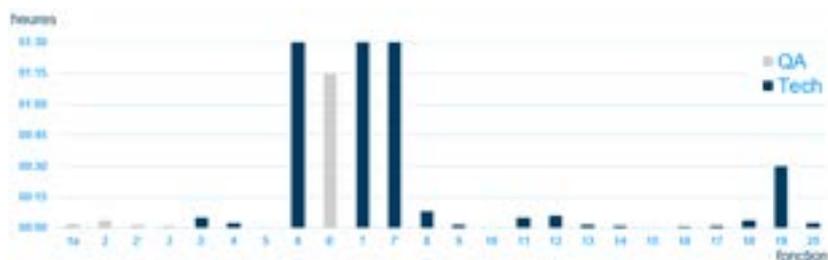


Figure 13 – Durée de travail humain pour le processus optimal [5]

## 6. Comparaison entre processus manuel et optimal

Une fois le processus idéal déterminé, il est possible de le comparer au procédé entièrement manuel.<sup>11</sup> Le but de cette partie est de mettre en avant les technologies permettant le meilleur gain de temps et ayant la meilleure rentabilité. Comme les paramètres de temps, de coûts d'opération et de coûts d'investissement sont connus, il est possible de modéliser les processus pour voir leur fonctionnement en fonction de différentes configurations de production [5]. Dans le cas présenté, la configuration d'entrée est la réception de pièces pour la production d'une unité de cinq modules.

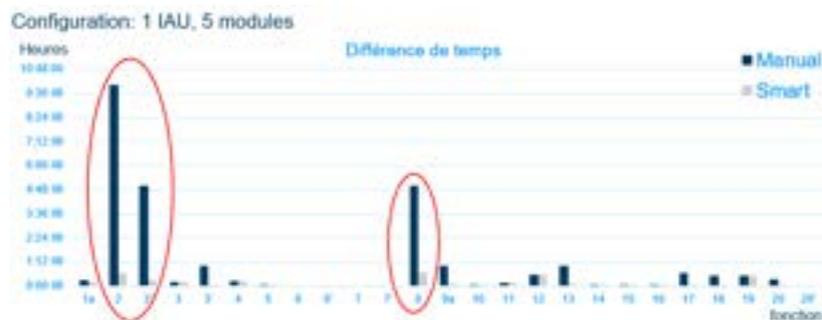


Figure 14 – Différence de temps (en heures) entre la production manuelle et la production optimisée [5]

Il ressort de la figure 14 que trois technologies permettent une plus forte amélioration de la durée de réalisation de leur fonction que les autres. Ces technologies sont respectivement la caméra 2D avec reconnaissance de formes pour l'inspection d'entrée des pièces, le système barcode pour leur identification et le tournevis automatique pour la fixation des vis de la PCB dans l'assemblage du module.

Maintenant que des technologies ont été pointées pour leur gain de temps, il est nécessaire de vérifier que la rentabilité de celles-ci est intéressante. En effet, si le coût d'investissement est trop important par rapport au gain effectué sur le coût d'opération, ces technologies ne seront pas développées.

La figure 15 prouve de nouveau que ces technologies sont les plus intéressantes à développer pour l'entreprise dans un premier temps car elles sont rentables à partir de quelques unités produites.

<sup>11</sup>. Ce procédé est basé sur les technologies actuelles de l'entreprise



Figure 15 – Nombre d'unités à produire pour rentabiliser la technologie en fonction de la tâche [5]

## 7. Pistes d'améliorations

Maintenant que le processus optimal a été défini et simulé une première fois, une simulation 3D de ce dernier permettrait de mieux le comprendre. En effet, ce type de simulation est utilisé pour observer le comportement dynamique d'une ligne de production. Des données, comme le temps de processus, les coûts d'opérations et le pourcentage de fonctionnement, peuvent être recueillies.

Une fois la simulation réalisée et maîtrisée pour l'unité avionique intégrée, il serait possible d'appliquer la méthodologie Lean 3P à l'entièreté du satellite puis de développer la simulation 3D totale de la production. Cette dernière permettrait de réaliser des tests de configurations en fonction des spécifications des satellites à produire.

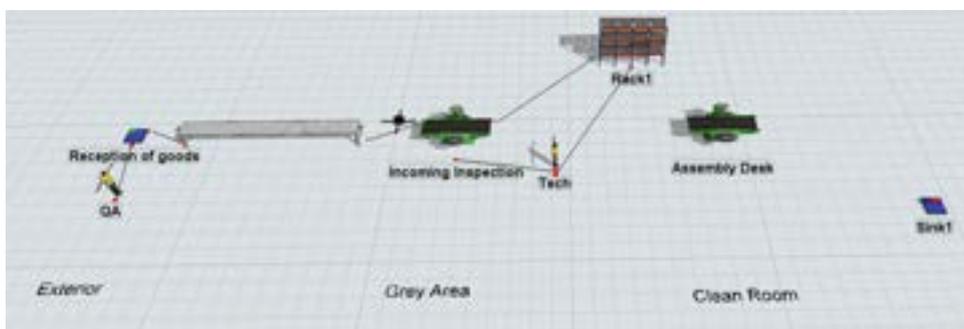


Figure 16 – Essai de simulation [7]

## 8. Conclusion

Le travail a permis de mettre en avant différents points clés pour la fabrication de l'unité avionique. Tout d'abord, une faible automatisation du système est plus intéressante dans un premier temps pour permettre de maîtriser le processus et de lisser<sup>12</sup> la production. Grâce à cela, il sera possible d'investir dans une automatisation plus lourde, optimisée par les besoins de la production lissée.

Finalement, le travail a démontré l'utilité de la méthodologie lors du lancement d'un projet. Elle a permis de définir un produit en fonction de ses caractéristiques et son procédé de fabrication de manière optimale. Grâce à cette démonstration, l'entreprise pourra réutiliser cette méthodologie pour développer de façon complète sa nouvelle plateforme de microsattellites.

## 9. Sources

- [1] COLLETA, A., *The Lean 3P Advantages : A Practitioner's Guide to the Production Preparation Process*  
Paris, Dunod, 2012, 336 p.
- [2] *Triton-X- our next generation multi-mission microsatellite designed to enable affordable regional and global LEO constellations* (consulté en février 2018).  
Adresse URL : <https://luxspace.lu/triton-x>
- [3] *First listed Space- and Technology Group in Germany* (consulté en février 2018).  
Adresse URL : <https://www.ohb.de/en/corporate/>
- [4] MOSER, H., *Systems Engineering for Modular Space Electronics Packaging*,  
Mémoire de master, Stuttgart, Allemagne : University of Stuttgart, 2008.
- [5] BILOCQ, A., *Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée pour microsatellite*, Trav. de fin d'ét., Virton, Belgique : Henallux, juin 2018.
- [6] BUURSINK, J., *Sat-A AIT Plan*, rapp. tech., Betzdorf, Luxembourg, 2015.
- [7] *Simulation de flux FlexSim* (consulté en mai 2018).  
Adresse URL : <https://www.flexsim.com/fr/>

---

<sup>12</sup>. Rendre la cadence de production constante dans le temps. Ceci permet de ne pas surutiliser les machines pendant une période puis de ne pas les utiliser pendant une autre période.





# Étude de la problématique de qualité d'eau des chaudières à condensation aluminium-silicium

Ing. T. MARLIERE  
Ing. P. THIRY  
Ing. G. VANDERVEKEN

ECAM – Bruxelles

*La mise en place de chaudières à condensation à corps de chauffe en aluminium-silicium est de plus en plus fréquente dans les bâtiments tertiaires. Ces chaudières, intéressantes techniquement et économiquement, nécessitent une maintenance particulière qui, si elle n'est pas correctement effectuée, risque d'endommager les composants de l'installation et entraîner ainsi des coûts élevés de remplacement.*

*Cet article a pour but de sensibiliser le lecteur à la problématique d'incompatibilité entre un circuit en acier et une chaudière à condensation en aluminium-silicium. Une solution pour pallier cette problématique sera développée en fin d'article afin d'assurer la pérennité de l'ensemble de l'installation.*

*Mots-clefs: chaudière aluminium-silicium, qualité d'eau, maintenance, chaudière à condensation, déminéralisation.*

*The installation of aluminium-silicon boilers is becoming more common in tertiary buildings. These boilers, which are technically and economically interesting, require special maintenance which, if not properly carried out, may damage the components of the installation and thus lead to high replacement costs.*

*This article aims to make the reader aware of the problem of incompatibility between steel circuit and an aluminium silicon condensing boiler. A solution to overcome this problem will be developed at the end of this article to ensure the sustainability of the entire installation.*

*Keywords: Aluminium-silicon boiler, water quality, maintenance, condensing boiler, demineralisation.*

## 1. Les chaudières à condensation

### 1.1. Principe de la chaudière à condensation

La technologie des chaudières à condensation a été développée pour maximiser le rendement thermique des chaudières. Cette maximisation est possible grâce à une diminution de l'écart de température entre les gaz brûlés en sortie et l'ambiance ainsi que l'utilisation du pouvoir calorifique supérieur (condensation de la vapeur d'eau).

Ces chaudières deviennent aujourd'hui la norme. Un schéma de principe d'une chaudière à condensation est illustré ci-dessous (figure 1).

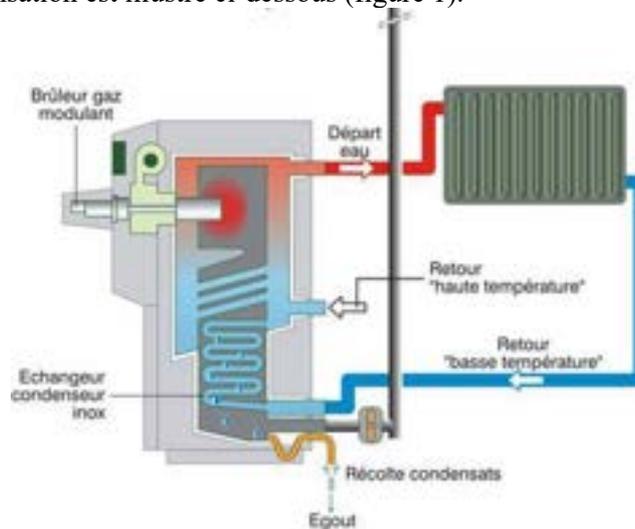


Figure 1: Schéma de principe d'une chaudière à condensation. [1]

### 1.2. Intérêt envers les chaudières à condensation en fonte d'aluminium

Il existe deux matériaux pouvant constituer le corps de chauffe des chaudières à condensation : l'acier inoxydable et un alliage d'aluminium-silicium.

Les chaudières aluminium-silicium ont différents avantages qui font d'elles une alternative intéressante lors de l'achat et de l'installation :

- Une meilleure réactivité thermique.
- Un poids et volume d'échangeur plus faible facilitant la manutention.
- Une meilleure conductivité thermique, minimisant les pertes.
- Une meilleure recyclabilité du matériau constituant le corps de chauffe.

Néanmoins, le principal avantage du corps de chauffe en aluminium-silicium est son prix d'achat qui est moins élevé que le corps de chauffe en acier inoxydable pour une puissance inférieure à 650 kW. Cette différence est illustrée à la figure 2.

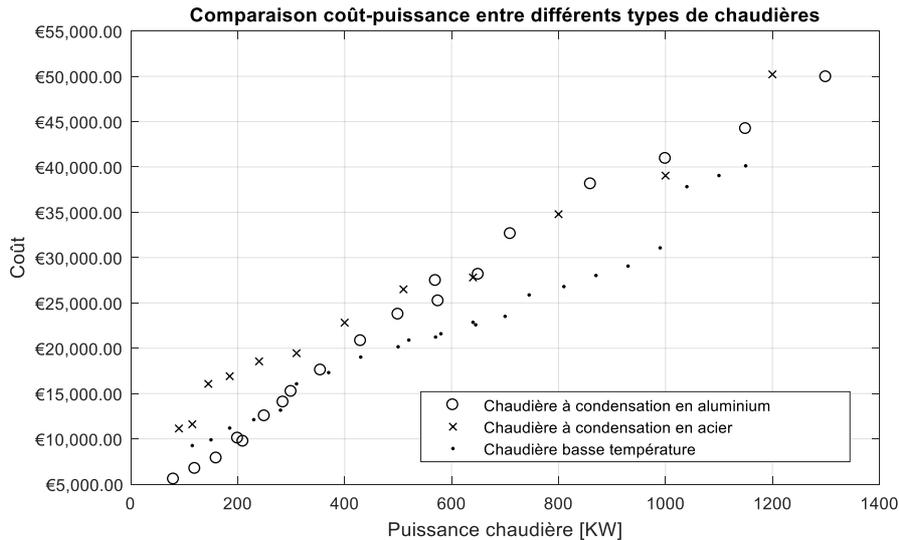


Figure 2: Étude comparative de coût entre différentes gammes de chaudières.

## 2. Exigences techniques propres à l'aluminium

### 2.1. Paramètres exigés par les fabricants

Les chaudières à condensation en aluminium ont des exigences très précises en ce qui concerne la qualité de l'eau parcourant la chaudière. Ces paramètres varient légèrement en fonction des fabricants et assurent un bon fonctionnement de la chaudière. Le non-respect de cette qualité d'eau va entraîner la dégradation rapide du corps de chauffe en aluminium, par corrosion localisée et/ou généralisée. La dégradation du corps de chauffe par des mécanismes de corrosion entraîne son percement.

Les différentes valeurs de qualité d'eau à respecter sont proposées ici à titre d'exemple classées par ordre décroissant d'importance [2][5]:

- Un pH compris entre 7 et 8,5 unités.
- Une conductivité à 25°C inférieure à 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Une concentration en chlorures inférieure à 150 mg/l.
- Une dureté inférieure à 0,2°F pour une installation de plus de 550kW.

## 2.2. Conséquences d'une mauvaise qualité d'eau

L'analyse de plusieurs corps de chauffe ayant percé a montré que la forme de corrosion généralement responsable du percement est une corrosion localisée dite « par piqûre ». Ce phénomène se déroule lorsqu'un défaut dans la couche d'oxyde d'aluminium (hautement adhérent à la paroi) apparaît. La piqûre s'amorce alors lorsque le pH de l'eau est trop élevé, qu'il y a présence d'oxygène ainsi que de chlorures en solution. Une couche de complexe soluble va se former à la place de la couche d'aluminium passivé et former un complexe soluble  $AlCl_4^-$ . Les ions  $Al^{3+}$  vont s'hydrolyser et ainsi acidifier l'espace confiné de la piqûre. Ceux-ci, en contact avec le milieu extérieur de la piqûre, à un pH moins acide, vont précipiter en  $Al(OH)_3$  et ainsi contribuer au confinement de la piqûre et donc à l'aggravation du phénomène.

La mécanique de cette corrosion locale est schématisée ci-dessous. Une fois ce phénomène amorcé et dans le cas où une piqûre reste active, le percement peut arriver rapidement.

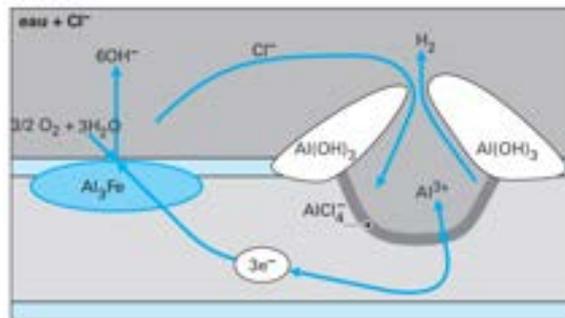


Figure 3 : Corrosion par piqûre [2]

Le résultat d'une corrosion de ce type est illustré ci-dessous (figure 4). Notons que d'autres produits de corrosion fortement adhérents à la paroi peuvent faire office de confinement à la piqûre à la place de l'hydroxyde d'aluminium  $Al(OH)_3$ .



Figure 4 : Piqûration d'un corps de chauffe de chaudière aluminium-silicium. Corrosion généralisée de l'aluminium et confinement de la piqûre par les oxydes d'aluminium. Illustration de l'auteur.

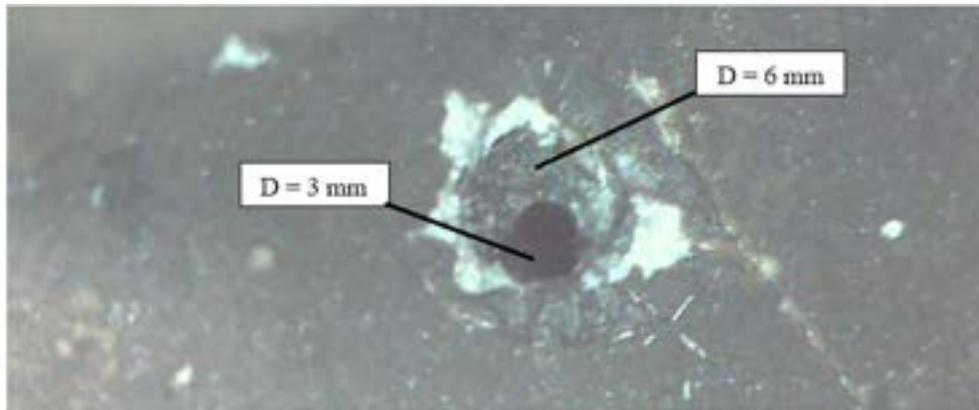


Figure 5 : Piqûration d'un corps de chauffe de chaudière aluminium-silicium. Corrosion généralisée de l'acier du circuit sous forme de magnétite s'étant déposée dans le corps de chauffe. Confinement par cette même magnétite de la piqûre. Illustration de l'auteur.

### 2.3. Autres catalyseurs de corrosion

Outre la problématique du pH, différents éléments sont également des facteurs de risque entraînant ces corrosions par piqûre :

#### *La conductivité du fluide caloporteur*

La corrosion est un phénomène électrochimique, la vitesse de corrosion va augmenter proportionnellement à la conductivité. Il y a donc lieu de diminuer cette conductivité pour réduire la vitesse de corrosion.

#### *La présence d'ions catalyseurs :*

En fonction des ions présents dans le circuit, ceux-ci peuvent jouer le rôle de catalyseur à la réaction de corrosion.

Enfin, notons que d'autres paramètres liés à la qualité d'eau, tels que la dureté, peuvent être responsables d'une dégradation de la chaudière. Nous ne nous attarderons dans cet article que sur les conséquences du pH.

### 3. La problématique des chaudières à condensation à corps de chauffe en aluminium-silicium

Le chapitre 2 a traité de l'importance de respecter les paramètres de qualité d'eau propres aux chaudières aluminium-silicium. Ce chapitre va illustrer les problèmes liés au maintien de cette qualité d'eau dans un circuit caloporteur réel.

#### 3.1. L'incompatibilité au niveau du pH de l'eau

En fonction du fabricant de chaudières et des différentes normes existantes, le graphique ci-dessous illustre les différents intervalles de pH assurant le bon fonctionnement des différentes chaudières et d'un circuit classiquement en acier, en minimisant le risque de corrosion.

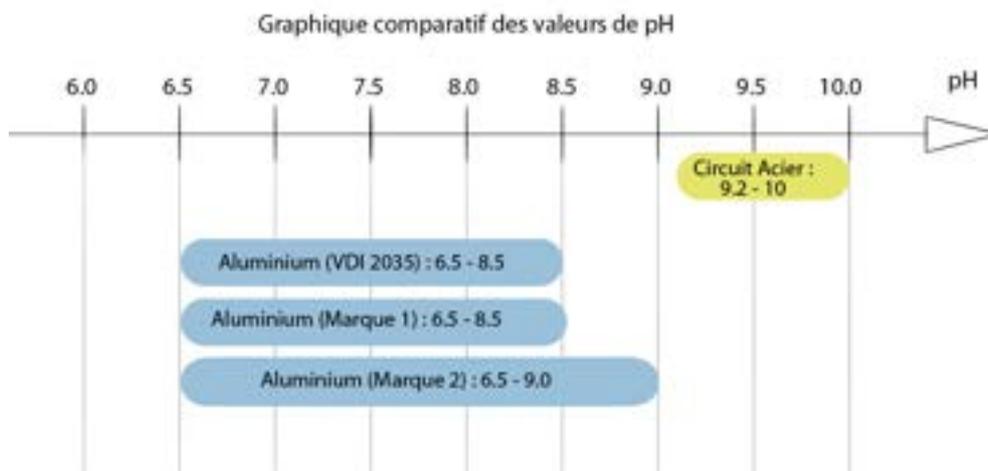


Figure 6 : Comparaison du pH de différents fabricants de chaudières aluminium-silicium et normes. Illustration de l'auteur. [5]

Il apparaît directement que les valeurs de pH d'un circuit en acier ne sont pas compatibles avec les valeurs de pH pour une chaudière en aluminium. Ce problème d'incompatibilité au niveau du pH est l'élément principal lié à la problématique d'incompatibilité des chaudières en aluminium-silicium avec un circuit de tuyauteries en acier.

### 3.2. Conséquences au niveau de la corrosion des métaux

Pour développer plus en détail cette incompatibilité, le diagramme de Pourbaix ci-dessous (figure 7) montre qu'à un pH supérieur à 8,5 unités, l'aluminium subit une forme de corrosion dans le domaine de stabilité de l'eau (zone comprise entre les droites (a) et (b) de la figure 7). La chaudière va ainsi être corrodée et a une plus grande probabilité de se dégrader localement et/ou globalement jusqu'à percement.

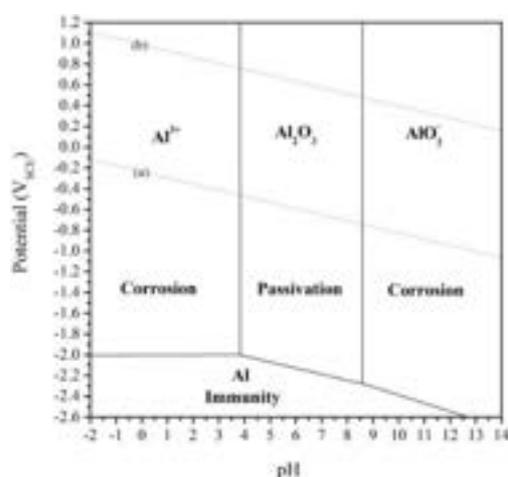


Figure 7 – Diagramme de Pourbaix de l'aluminium [3]

D'un point de vue de l'acier, les ions  $\text{Fe}^{2+}$  sont mis en solutions à une valeur de pH fonction de la concentration en fer déjà en solution. Une valeur de concentration en fer dans un circuit caloporteur classique se situe aux alentours de 0,05 mg/l, ce qui implique une corrosion à une valeur de pH en dessous de 9,2 unités.

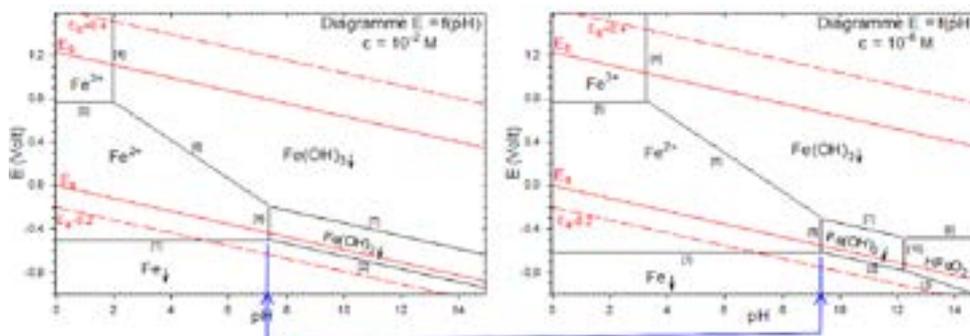


Figure 8 – Diagrammes de Pourbaix de l'acier à différentes concentrations [4].

L'acier va néanmoins toujours subir de la corrosion dans le domaine de stabilité de l'eau (intervalle  $E_a$ - $E_b$ ). Il est donc nécessaire de traiter l'eau des circuits avec des

inhibiteurs de corrosion pour prévenir toute dégradation et minimiser le risque de corrosion.

Il est donc possible de tirer les conclusions suivantes, explicites d'une incompatibilité entre les deux matériaux :

- Dans le cas d'un pH inférieur à 8.5 unités, le risque de corrosion du circuit en acier est accru. Le risque de corrosion de la chaudière aluminium-silicium est réduit. On va retrouver une couche d'oxyde d'aluminium stable et protectrice dans le corps de chauffe.
- Dans le cas d'un pH entre 8.5 et 9.2, le risque de corrosion du circuit en acier et de la chaudière aluminium-silicium est présent.
- Dans le cas d'un pH au-dessus de 9.2, le risque de corrosion de l'aluminium-silicium de la chaudière est accru. Le risque de corrosion du circuit en acier est réduit.

#### **4. Solutions techniques à l'incompatibilité acier aluminium.**

Les paragraphes précédents ont illustré théoriquement l'incompatibilité, essentiellement au niveau du pH, entre l'acier et l'aluminium. Des exemples de percements réels ont également été illustrés au point 2.2. On remarque donc que ce problème, bien que récent, est important et risque d'engendrer de nombreux frais s'il n'est pas pris en charge par les sociétés de maintenance.

Plusieurs solutions ont été trouvées et commencent à être mises en œuvre et proposées par les fabricants de chaudières ainsi que par les sociétés d'installation et de maintenance. Ces solutions vont être présentées ici d'un point de vue technique et économique.

##### **4.1. Mise en œuvre d'un échangeur**

L'idée est de séparer le circuit en acier de la chaudière en aluminium. Cela aura pour avantage de contrôler la qualité d'eau, dont le pH, des deux circuits de manière indépendante.

Cette solution est idéale d'un point de vue technique, car l'incompatibilité n'a plus lieu d'être. Cette solution commence à être proposée par les fournisseurs de chaudière. Néanmoins, elle présente un inconvénient majeur : son prix.

Une estimation financière du coût de mise en place d'un échangeur de chaleur a été réalisée. Elle illustre le coût d'achat et d'installation, mais également le coût total de l'échangeur de chaleur sur 10 ans en fonction de la puissance de la chaudière.

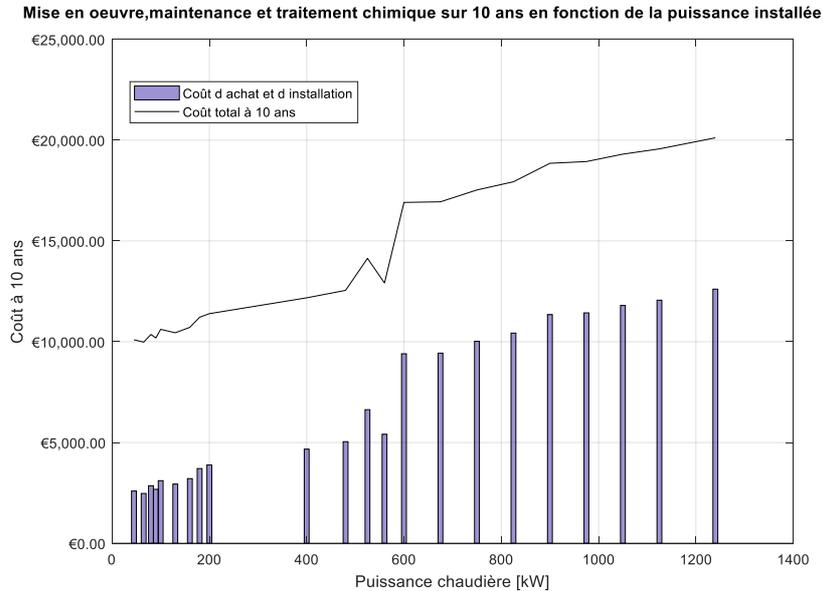


Figure 9 : Estimation du coût de placement d'un échangeur sur une installation en fonction de sa puissance de chauffe. Illustration de l'auteur.

Le coût sur 10 ans prend en compte :

- L'achat de l'échangeur et son installation.
- L'entretien annuel.
- Le traitement anticorrosion des circuits, et le suivi de ceux-ci pour assurer une qualité d'eau optimale minimisant les risques de corrosion.

Dans cette étude financière, les pertes liées à la baisse de performance de la chaudière liée à l'ajout d'un échangeur ne sont pas prises en compte. Le coût énergétique des différents accessoires à l'échangeur, tel que les pompes de circulation, n'est également pas inclus.

On remarque donc que le coût de mise en œuvre et de la maintenance est élevé. De plus, au-delà de 650 kW, cette solution ne tient déjà plus la route financièrement. Comme illustré au point 1.2, au-delà d'une puissance de chauffe de 650 kW, la chaudière en aluminium est équivalente en termes de prix à une chaudière à condensation en acier. L'achat d'un échangeur va rendre la chaudière en aluminium inintéressante financièrement, en plus de diminuer son rendement. Cette solution est donc à écarter.

## 4.2. Déminéralisation de l'eau du circuit

Cette solution a pour avantage de réduire considérablement le risque de corrosion du circuit. En effet, l'eau déminéralisée apporte les avantages suivants :

- Une conductivité de l'ordre de  $50\mu\text{S}/\text{cm}$ , diminuant la vitesse des phénomènes électrochimiques, dont la corrosion.
- La mise en conformité de l'eau avec les paramètres requis par les fabricants : une dureté nulle et des concentrations en ions minimales.

Cette solution présente néanmoins des inconvénients :

- Le pH de l'eau déminéralisée a tendance, en contact avec l'air, à diminuer. Il va également varier avec les résidus et liquides présents dans l'installation lors de l'injection d'eau déminéralisée. Il a donc un caractère incertain.
- Le pH proche du neutre (valeur de 7) est très néfaste pour le circuit en acier et va provoquer sur celui-ci une corrosion acide (mise en solution d'ions fer due à un pH trop faible).

Pour contrer ces effets néfastes tout en maintenant les avantages de l'eau déminéralisée, celle-ci devra être conditionnée :

- Grâce à des alcalinisants, afin d'amener le pH à une valeur de 8,5 unités. Cela permet de rester dans les limites des fabricants de chaudières, tout en s'approchant des valeurs de pH adéquates à l'acier.
- Grâce à des inhibiteurs de corrosion, afin de prévenir la corrosion de l'acier due à un pH légèrement trop faible pour le circuit.

De cette manière, le circuit va être protégé, grâce aux inhibiteurs, et la chaudière sera protégée, grâce à la qualité d'eau maintenue dans les bonnes valeurs. Il est alors possible de concilier une chaudière en aluminium-silicium avec un circuit en acier, en gardant les garanties au niveau du fabricant et en s'assurant que l'installation complète ne soit pas endommagée. Néanmoins, vu que cette solution est nouvelle, personne ne connaît ses conséquences sur le circuit à 10 ans. L'ajout d'inhibiteurs de corrosion est donc une sécurité supplémentaire à cette solution technique.

Plusieurs méthodes de déminéralisation existent :

- De la résine jetable : facile d'utilisation, mais leur coût est élevé et elle est à usage unique.
- Un procédé d'osmose : le coût initial est élevé mais il n'y a pas de consommable. La durée de vie n'est que de 10 ans et le coût de l'entretien n'est pas négligeable.
- De la résine régénérable : ce procédé est facile d'utilisation, et le coût de régénération de la résine est faible.

Dans le cas de l'étude financière, la résine régénérable sera donc privilégiée, car elle est la moins coûteuse.

Le graphique ci-après (figure 10) illustre le coût d'une telle opération de déminéralisation et de traitement chimique à 10 ans. Le coût de cette opération sera fonction de la dureté de l'eau d'appoint du circuit.

Ce graphique permet d'estimer le coût lié à une déminéralisation d'un circuit et son traitement en fonction de la puissance de chauffe utilisée. Le lien entre la puissance et le volume d'une installation ont été estimés grâce à l'équation suivante :

Hypothèse de travail : 1 kW à la chaudière = 1 litre d'eau dans le circuit.

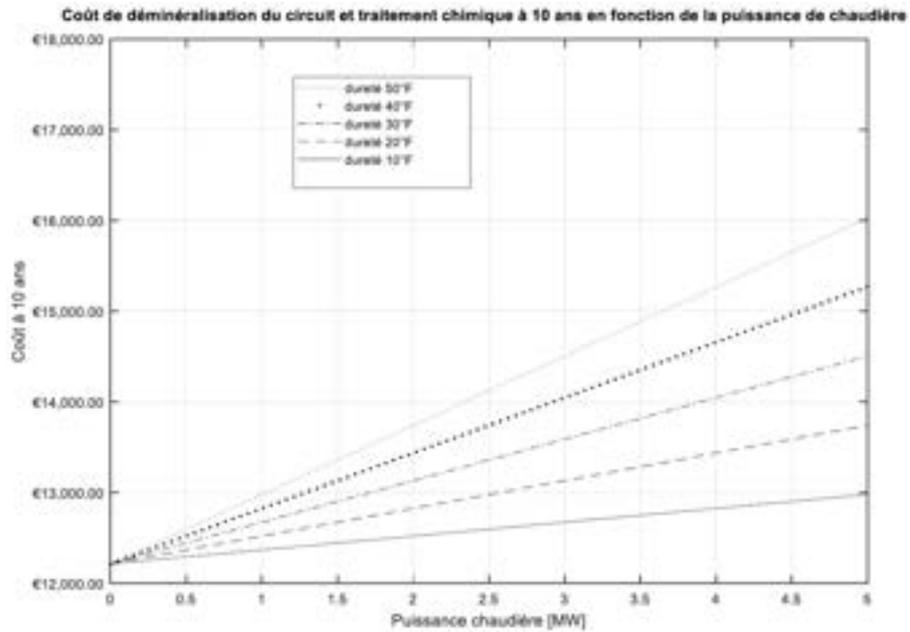


Figure 10 : Estimation du coût de déminéralisation par résine régénérable (solution la plus économique) en fonction de la dureté totale de l'eau de remplissage et de la puissance du circuit à 10 ans. Illustration de l'auteur.

### 4.3. Utilisation de la chaudière comme pièce sacrificielle

Dans cette troisième solution, la qualité d'eau du circuit va être maintenue dans les paramètres propres au circuit en acier. Cela aura bien entendu un impact négatif sur la durée de vie de la chaudière.

Il est plus intéressant de prolonger la durée de vie des canalisations en acier, car celles-ci sont plus coûteuses à remplacer que la chaudière. Cette solution reste néanmoins difficile à chiffrer d'un point de vue global. Le coût à 10 ans sera fonction du volume du circuit : des traitements et conditionnements à réaliser sur celui-ci pour assurer une qualité d'eau optimale.

Les chaudières seront donc, dans cette solution, remplacées lorsqu'elles sont défaillantes. Il y aura là un coût lié au remplacement, à la main-d'œuvre et aux éléments à remplacer, mais également un coût lié à l'indisponibilité de la chaudière. Ce coût étant prohibitif, cette solution ne sera pas développée.

## 5. Conclusions

Le graphique ci-dessous (figure 11) montre que l'ordre de grandeur financier entre les deux solutions techniques de déminéralisation et de mise en place d'un échangeur est très différent. En effet, en utilisant la relation liant la puissance et le cubage du circuit, on remarque que la solution d'échangeur est beaucoup plus onéreuse que la solution de déminéralisation, en fonction de la dureté totale de l'eau du circuit.

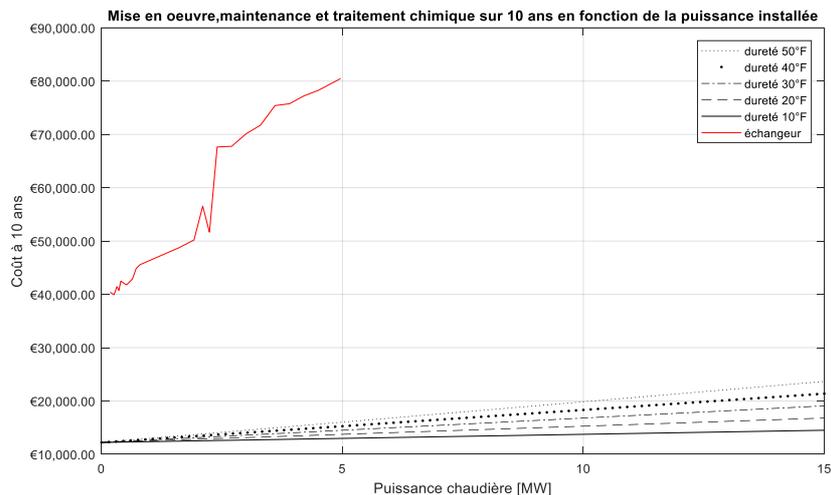


Figure 11 : Mise en œuvre, maintenance et traitement chimique sur 10 ans pour une déminéralisation et un échangeur de chaleur en fonction de la puissance de la chaudière. Illustration de l'auteur.

Dans le cas d'une installation existante, l'installation d'un échangeur s'avérera trop onéreuse ; la solution de déminéralisation sera donc privilégiée. Dans le cas d'une nouvelle installation, le prix initial de l'échangeur de chaleur étant très élevé, le retour sur investissement est trop long pour être une solution techniquement intéressante.

En conclusion, la solution de déminéralisation et de traitement chimique régulier est la plus intéressante tant techniquement qu'économiquement. Cette solution présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et permet d'être en conformité totale avec les prérequis des fabricants de chaudières. L'incertitude liée au comportement d'un circuit déminéralisé à long terme est contrebalancée par la présence du traitement anticorrosion qui va assurer que le circuit ne se dégrade pas.

Dans le futur, il faudrait donc établir un suivi d'installations où cette solution est mise en place afin de s'assurer de l'efficacité de la solution technique proposée dans cet article.

## 6. Sources

[1] : LES CHAUDIERES A CONDENSATION, in Energieplus-lesite.be, s.d., en ligne : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15580>. Consulté le 28 avril 2018.

[2] : M. REBOUL : « Corrosion des alliages d'aluminium », in *techniques-ingenieur.fr*, s.d., en ligne : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-resistance-a-la-corrosion-et-au-vieillissement-42373210/corrosion-des-alliages-d-aluminium-cor325/>. Consulté le 10 novembre 2017.

[3] : N.L. SUKIMAN, X. ZHOU et al. : «Durability and corrosion of aluminium and its alloys : overview, property space, techniques and developments » , in *intechopen.com*, s.d., en ligne : <https://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-new-trends-in-fabrication-and-applications/durability-and-corrosion-of-aluminium-and-its-alloys-overview-property-space-techniques-and-developm>. Consulté le 11 novembre 2017.

[4] : UNIVERSITE LEMANS, Diagramme E-pH du fer, in : univ-lemans.fr, en ligne : [http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/01/04-Chimie\\_descriptive/co/module\\_04-Chimie\\_descriptive\\_10.html](http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/chimie/01/04-Chimie_descriptive/co/module_04-Chimie_descriptive_10.html). Consulté le 6 mai 2018.

[5] : VDI 2035 : *Part 2 - Prevention of damage in water heating installations water-side corrosion*, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V, 43p.



# LISTE DES TRAVAUX DE FIN D'ÉTUDES

**Année académique 2017 -2018**

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. RÉGULATION

- [E] BLAISE Aliocha Position tracking for quadrotors based on a full-quaternion NMPC flight controller

### 1.2. SYSTÈMES SÉQUENTIELS

- [E] CIESLIK Lorent Étude et réalisation d'un système d'étiquetage spécifique avec chargement et déchargement automatisé et interface de traçabilité
- [E] DE LAMINNE de BEX Erard Étude et intégration d'une solution d'automatisation de processus de fabrication et de contrôle en temps réel
- [P] LAURENT Julien Automatisation des filtres à bougies d'une raffinerie de sucre en Algérie

### 1.3. ROBOTIQUE

- [E] BIDOT Célestin Affect recognition in a social robot
- [H] CROIX Alexandre Benchmarking of three SLAM algorithms on simulation
- [H] DEPOTTER Xavier Automatisation dans le domaine du verre
- [H] FÉVRIER Thomas Conception et réalisation d'une machine de démonstration équipée de trois axes de positionnement
- [E] WAIENGNIER Kevan Développement d'un banc d'essai motorisé destiné à l'évaluation de capteurs non invasifs ambulatoires pour la mesure en temps réel de la cinématique du genou au cours de la marche

### 1.4. AUTOMATES PROGRAMMABLES

- [H] BEDNARZ Thanh Mise en place d'une méthode générique d'identification des conditions nécessaires à l'autorisation de l'activation d'un procédé géré dans un automate
- [P] DAUSSAINT Julien Traçabilité et étude de la consommation de voile de verre dans la ligne de production
- [H] DE MONCEAU Nicolas Reprogrammation PLC d'une installation existante dans le cadre d'un procédé industriel et modifications de l'interface de supervision
- [P] DELAISSE Guillaume Réalisation d'une interface entre un automate de gestion de processus et une application Matlab d'optimisation des paramètres

[E]	DUJARDIN Thomas	Phased migration of an Allen-Bradley transport system of a glass coating production line
[H]	FAINGNAERT Yanaël	Automatisation d'un pilote de neutralisation de déchets chimiques
[E]	FRANCIS Simon	Intégration des protocoles Profibus, Profinet et Powerlink sur un banc d'essai qui contrôle la qualité d'équipements électriques chez IBA
[H]	GOBERT Johan	Upgrade d'un système de vision Systech sur étiqueteuse Groninger
[E]	ID-ALIKOUCHE Jawad	Centralisation et gestion d'onduleurs en sortie de panneaux photovoltaïques à partir d'un automate programmable industriel
[H]	LIPPENS Kevin	Étude de faisabilité sur l'utilisation d'une caméra infrarouge pour l'analyse de température dans un four tunnel de cuisson céramique
[P]	MONET Thomas	Développement d'une librairie d'objets Rockwell et mise en application dans un processus industriel simple
[H]	MORIAU Mickel	Étude et développement de l'automatisation d'une ligne d'analyse de déchets radioactifs par rayons X
[H]	SELLAMI Abdelilah	Conception d'une ligne de production " Délogotage" – Délogotage de logo sur le pare-brise
[E]	SEVIM Ozkan	Réalisation d'un support de formation, via un banc didactique, pour ingénieur non-automaticien
[E]	SOUMILLION Antoine	Étude et spécification software et hardware d'un système de contrôle et de supervision automatisé d'un processus industriel de culture cellulaire
[E]	THURION Jonathan	Intégration d'un système AGV (Automated Guided Vehicles) dans un système de supervision centralisé Wonderware
[E]	VAN JEAN Gilles	Conception et réalisation d'un panneau de démonstration de contrôle de mouvements par synchronisation d'axes visant à mettre en valeur une nouvelle gamme de PLC
[H]	VANUS François	Conception et programmation d'une interface et d'un service de communication entre un automate, un écran de supervision et un logiciel de simulation dans le cadre d'une fermentation de champagne

## 1.5. CAPTEURS ET INSTRUMENTATION

- [E] AKDEMIR Serdar Mise en place d'une comptabilité énergétique de la brasserie Lefebvre
- [P] DUBOIS Rémi Étude pour la mise en place d'une supervision sur les lignes de production de poêles et accessoires
- [E] THIRY Laurent Contribution à la calibration d'un panneau instrumenté composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques qui réalise des mesures d'homogénéité de l'intensité lumineuse

## 1.7. MODÉLISATION

- [E] NEIRINCKX Alexis Coupled parachute modelling for improved control of a steerable parachute system

## 1.8. APPLICATIONS DE L'AUTOMATIQUE

- [P] LATOUR Antoine Conception et automatisation d'un système de lingotière
- [G] LECOMTE Aurélien Automatisation de la nouvelle station de Nettoyage En Place de l'entreprise EDEL
- [P] SCHEEN Baudouin Développement d'un nouvel écran de pilotage pour Epandeuse New TS 5000 – modèle 2018

## 2. CHIMIE

## 2.1. CHIMIE INDUSTRIELLE ET PROCÉDÉS PILOTES

- [E] AKKAY Ismaïl Étude d'automatisation, de mise à niveau et de rationalisation hydraulique d'un réacteur chimique utilisé durant la production
- [G] BLEZER Charles-Antoine Établissement des bilans et optimisation des flux des différents types d'eau dans une installation de production de sels phosphatés
- [H] GUISLAIN Julian Optimisation des flux de stockage et d'acheminement de matières premières, du magasin vers les zones de production
- [H] MAES Aurore Design of a new brightener premix using Pluronic PE 9200 as non-ionic surfactant: study of batch making process, robustness and influence on finished products

- [H] PETROSINO Fabian Étude de la réaction entre le polyisobutène et l'anhydride maléique ainsi que des paramètres influençant la formation de dépôts goudronneux
- [H] SAY Salih Mise en œuvre de la réglementation ATEX pour le site INOVYN/SOLVAY de Jemeppe-sur-Sambre
- [H] THOMAS Julien Intensification de procédés de synthèse et de traitement de solides inorganiques en continu sous conditions hydrothermales
- [G] VERVIER Martin Étude sur l'extrusion du polyéthylène expansé

## 2.2. BIOCHIMIE – BIOTECHNOLOGIE

- [H] ANDRIOLO Marine Impact de la méthode de purification d'une leucaphérèse durant la production de cellules CAR-T allogéniques
- [H] DESTREBECQ Dimitri Amélioration du flux d'inspection visuelle des produits injectables soumis à la chaîne du froid de l'entreprise UCB Pharma selon les principes du Lean Management
- [H] NAVEZ Nicolas Étude de différents modes de culture sur la croissance de bactéries lactiques
- [E] WACQUEZ Alexis Tissue scaffold fabrication and structural characterization of a regenerative skin tissue mimic, SkinClay™
- [H] WILMAR Loane Étude des agents techniques utilisés pour une compression directe
- [H] ZICOT Denis Adaptation de la purification chromatographique à un modèle de système fonctionnellement fermé : étude exploratoire

## 2.4. CHIMIE DES MATÉRIAUX

- [G] HUMBLET Gauthier Analytical Approach for Vermiculite Fire-proof Board Thermal Resistance Estimation in Agreement with ISO Requirements
- [H] MATON Pierre-Alexandre Industrialisation d'une céramique technique usinable au laser
- [G] MISSE Kevin Fiabilisation d'un procédé d'impression 3D de pièces en céramique biocompatible par stéréolithographie
- [H] NGNINTEDEM Romain Étude de systèmes isolants huile/papier pour transformateurs immergés soumis à un vieillissement accéléré
- [H] REGULSKI Valentin Contribution to the development of a dry-mix additive for integral waterproofing of gypsum-based plasters

## 2.5. GÉNIE CHIMIQUE – OPÉRATIONS UNITAIRES

- |     |                |  |
|-----|----------------|--|
| [H] | FLYPO Antoine  | Étude du comportement à la lixiviation de liants hydrauliques routiers – Mise en place d'un essai de lixiviation sur colonne |
| [G] | HAUSMAN Benoît | Développement d'un digesteur de surface pour l'intégration alternative du biogaz au Burkina Faso                             |

## 2.7. CHIMIE ANALYTIQUE

- |     |                 |   |
|-----|-----------------|---|
| [H] | ARROTIN Loris   | Amélioration de la méthode de caractérisation des films multicouches par diverses techniques spectroscopiques au travers de la construction d'une base de données |
| [H] | WASCHKE Thomas  | Methods development for raw material specifications   |
| [H] | WILMET Nathalie | Mise au point d'une méthode de détection de traces de TATP par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse                               |

## 3. CONSTRUCTION

### 3.1. STABILITÉ ET RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

- |     |                          |   |
|-----|--------------------------|---|
| [E] | DECHENTINNES Adrien      | Développement d'un logiciel de dimensionnement de structure industriel de type colonne béton / poutre béton ou lamellé collé et portique métallique |
| [E] | EL YAHYAOUI Ibrahim      | Étude complète du remplacement d'un pont voute en maçonnerie désaffecté par un pont cadre en vue de l'extension du réseau RAVeL                     |
| [E] | GANSEMAN Jonathan        | Détermination des forces de vent sur un pipe rack complexe  |
| [E] | GÖNEN Abdullah           | Étude de l'influence de la relaxation en traction du béton dans le dimensionnement à la fissuration du béton armé suite aux déformations empêchées  |
| [E] | IWEINS DE WAVRANS Arnaud | Caractérisation d'une connexion innovante pour les planchers composites en bois-béton : étude expérimentale et conséquences sur la conception       |

- [E] MOTTOULLE Sébastien Optimisation structurelle d'une poutre en Té inversé, formée en base inférieure par un panneau CLT et en partie supérieure par une poutre en lamellé-collé, dans le cadre de l'étude acoustique d'un plancher
- [G] PIRLOT François Étude sismique et dimensionnement d'un immeuble de bureaux en béton armé
- [E] RANWEZ Madeleine Impact des effets différés du béton sur les raccourcissements différentiels dans les bâtiments de grande hauteur
- [P] RASE Sébastien Study of the Tyre Friction and the Correlation between Static Friction, Sliding Friction and Adhesion
- [G] THOMAS Florian Aile B2+ de l'hôpital de Marche-en-Famenne. Analyse en stabilité et aperçu des contraintes techniques liées à la présence de l'équipement IRM
- [E] VAN NIEUWENHOVE Sébastien Calcul des sections circulaires en béton armé

### 3.2. CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES

- [E] BENZIANE Hibat Ouarrahmane Développement d'une feuille de calcul pour le dimensionnement des cheminées métalliques soumises aux actions sismiques
- [E] DOSIN Laurent Application de l'Eurocode 3 – Partie 1.3 au calcul des éléments minces formés à froid et comparaison des résultats avec les valeurs indiquées dans les catalogues des fabricants
- [E] VAN DER HAERT Paul Numerical modeling of the effects of restrained boundary conditions on the fire behaviour of steel members

### 3.3. BÉTON ARMÉ ET PRÉCONTRAIT

- [E] BOUZARIOH Sofian Étude paramétrique des méthodes d'analyse au second ordre des éléments en béton armé

## 3.4. GÉOTECHNIQUE – MÉCANIQUE DES SOLS

- |     |                          |  |
|-----|--------------------------|--|
| [E] | CAPRADOSSI Mehdi         | Évaluation de l'impact vibratoire dans le sol engendré par des techniques de chantiers sur les bâtiments alentours   |
| [E] | DE WALEFFE Corentin      | Liquéfaction dans les sables   |
| [G] | DESCHUYTENEER Thibaut    | Réalisation d'une construction enterrée, située sous le niveau de la nappe phréatique  |
| [E] | HADJ-ABDELKADER Sanae    | Étude de l'influence des imperfections géométriques des pieux sur la capacité portante   |
| [G] | LAMBINON Michaël         | Analyse comparative de différentes méthodes de vérification de la stabilité d'ouvrages de soutènement. Application de la norme Eurocode 7 dans le cadre du brevet Redi-Rock® |
| [E] | MURET Julien             | Modélisation d'un ouvrage souterrain par la méthode des éléments finis   |
| [E] | SOUSSI MOUHSSIN Houssein | Proposition de solutions techniques en vue de stabiliser un talus naturel  |

## 3.5. HYDRAULIQUE – ASSAINISSEMENT

- |     |                |   |
|-----|----------------|---|
| [G] | DASSY Yorik    | Prise en compte des aspects géotechniques et hydrauliques dans le chantier de réfection des infrastructures municipales de la Rue Peel à Montréal |
| [E] | PETIT Valentin | La gestion des eaux pluviales comme outil de protection de la qualité de l'eau des lacs de villégiature et en milieu urbain                       |

## 3.6. MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

- |     |                      |   |
|-----|----------------------|---|
| [E] | BANKEN Nicolas       | Problématique d'utilisation de matériaux recyclés non-conformes au CCT Qualiroutes  |
| [P] | DEVILLET Sébastien   | Développement de la coulée à la poudre sur la coulée continue de l'aciérie de Belval  |
| [E] | GUYAUX Remy          | Composition optimale pour la réalisation de chapes drainantes servant de support pour des revêtements carrelés extérieurs           |
| [E] | KUBUSHISHI Merveille | Caractérisation expérimentale double-échelle d'une roche magmatique : comparaison entre propriétés microscopiques et macroscopiques |
| [E] | LARUELLE Thomas      | Étude énergétique d'un bâtiment tertiaire équipé de vitrages dynamiques   |
| [E] | SOETE Grégoire       | Création d'un outil permettant la comparaison technico-économique de différents types d'isolation de parois d'un bâtiment           |

[E]	TRINIANE Noé	Étude des méthodes de conception de solutions mixtes acier-béton pour les bâtiments suivant un dimensionnement à chaud et à froid
[E]	VIGNERON Jérémy	Conception de systèmes modulaires d'habitation en structure bois
3.7. PROCÉDÉS ET TECHNOLOGIE		
[E]	BOHLALA Bilal	Modélisation 3D et intégration BIM d'un système constructif bois
[E]	BOUSSAKOUR Yassin	Modélisation 3D et intégration BIM d'un système constructif bois
[E]	COSTENOBLE Henri	Étude de différents paramètres influençant la gestion de l'eau de pluie sur une toiture verte
[E]	CRAEYE Louis	Analyse de méthodologies de soudage pour certains travaux spécifiques et répétitifs en construction navale neuve ; recherche d'amélioration au niveau de la technique, du matériel de soudage et du métal d'apport
[E]	DELANDE Clément	Procédures de création d'un modèle analytique en vue d'automatiser la génération de notes de calcul et de métrés dans le logiciel de conception BIM Revit
[G]	FROGNET Juliette	Étude de l'extension des modules préfabriqués, exploration et analyse des solutions relatives aux problèmes de l'enveloppe
[G]	GILLARD Arnaud	La problématique de la gestion de l'eau dans une piscine publique
[G]	HERMAN Lionel	Développement d'un outil informatique évaluant la pertinence de la préfabrication d'éléments structuraux en béton
[E]	LAMBERT Clémentine	Étude de stratégies d'intégration des principes d'économie circulaire dans les techniques spéciales du bâtiment
[E]	LEGRAND François	« Urban mining » et construction : utopie ou potentialité ? Étude de la valorisation matérielle des stocks bâtis existants, dans une vision d'économie circulaire en Région de Bruxelles-Capitale
[E]	MARION Jérémie	Analyse du développement du produit Tom-Wood et adaptation de ses moyens de production au sein du groupe Thomas & Piron
[G]	MEERTENS Christophe	Optimisation de la gestion de chantier grâce au numérique

- [E] MÉLON Jordan Caractérisation acoustique de différents types de joints de dilatation d'ouvrages d'art suivant la méthode RTD1007-3 : analyse et comparaison des résultats en vue de la constitution d'une base de données et de la rédaction de clauses techniques dans le QUALI-ROUTES
- [G] SARLET Xavier Étude des variantes d'exécution pour les planchers du chantier Rive Droite et généralisation à d'autres bâtiments via une feuille de calcul
- [G] WYZEN François Étude, essais et analyse d'un assemblage bout-à-bout de deux éléments en bois grâce à un joint de colle épais.

### 3.8. PATHOLOGIE ET RÉHABILITATION DES OUVRAGES

- [E] FABRI Ludovic Mise en place d'une politique de gestion des ouvrages en Terre Armée®
- [E] IWEINS d'EECKHOUTTE Matthieu Comportement hygrothermique des constructions bois : cas des parois et des planchers sur vides ventilés
- [G] LORIAUX Thomas Estimation des rendements de restauration de pierres sur le chantier de la Cathédrale Saint-Paul à Liège
- [E] MATHIEU Alexandre Détérioration des claveaux en terre cuite dans les systèmes de planchers poutres-claveaux : Analyse de risques et interventions possibles
- [E] NADI Zakaria Dimensionnement, étude et conception d'un système HVAC d'un site appartenant à Bruxelles propreté
- [P] THOMISSE Marie Étude de la rénovation durable d'un bâtiment typique Belge

## 4. ÉLECTRICITE

### 4.1. ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE

- [E] COREMANS Philippe Dimensionnement d'une installation de balisage lumineux à l'aéroport de Charleroi
- [E] DIALLO Mamadou Elaboration d'une analyse de risques électriques d'un immeuble de bureaux
- [E] LAMAILLE Briec Study of the energy savings resulting from the renovation of the East Experimental Area

## 4.2. MACHINES ÉLECTRIQUES

- |     |                     |  |
|-----|---------------------|--|
| [H] | BARBAGALLO Giovanni | Modernisation de l'approvisionnement électrique de la Banque Nationale de Belgique |
| [E] | HEINDRYCKX Nicolas  | Electrical machines modeling for hybrid vehicle applications                       |
| [E] | MINE Lucien         | Electrical machines modeling for hybrid vehicle applications                       |

## 4.3. ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

- |     |                     |  |
|-----|---------------------|--|
| [E] | LANGUILLIER Maxence | Adaptation d'un convertisseur isolé 48VDC/350VDC vers 400VDC/350VDC en vue d'améliorer le rendement global d'une solution de télé-alimentation |
|-----|---------------------|--|

## 4.4. PRODUCTION – TRANSPORT – DISTRIBUTION - RÉSEAUX

- |     |                |   |
|-----|----------------|---|
| [E] | COENEN Antoine | Télégestion des postes moyenne tension alimentant l'éclairage, le chauffage et la force motrice           |
| [G] | PAQUAY Yohan   | Analyse et traitement de données de monitoring d'un poste HTA/BT pour favoriser la transition énergétique |

## 4.7. APPLICATIONS ÉLECTRIQUES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

- |     |                    |  |
|-----|--------------------|--|
| [G] | DOMANSKI Ludovic   | Autonomie en énergie électrique : exploration et conception                                      |
| [E] | LACHIRI Bylal      | Étude de faisabilité d'alimentation d'une station d'épuration via Biogaz                         |
| [G] | LORETI Adrian      | Impact of PV systems combined with home batteries and demand side management                     |
| [H] | VANDERHAEGHEN Paul | Sustainable and cost-effective power solutions on construction sites in the United Arab Emirates |

## 4.8. ÉLECTRICITÉ DU BÂTIMENT – DOMOTIQUE

- |     |                  |   |
|-----|------------------|---|
| [E] | MALHAIZE Quentin | Étude & conception de l'installation électrique de deux bâtiments stratégiques pour le compte de la Régie des bâtiments en partenariat avec d'autres entreprises membres du groupement momentané créé dans le cadre d'un marché public de type « design & build » |
|-----|------------------|---|

## 5. ÉLECTRONIQUE

### 5.1. SYSTÈMES EMBARQUÉS – COMPOSANTS PROGRAMMABLES

- |     |                       |  |
|-----|-----------------------|--|
| [G] | BOLYN Alex            | Design of an electronic device measuring latencies in an adaptive optics system  |
| [H] | BOUKRACH Mohamed      | Intégration d'une électronique embarquée autonome dans un vitrage intelligent  |
| [H] | CHEVALIER Laurent     | Étude et réalisation d'une carte d'acquisition pour le diagnostic et la maintenance du système de signalisation ferroviaire Bord (ETCS-EVC) d'Alstom |
| [H] | CLAREMBAUX Ludovic    | Réalisation d'un système autonome pour le contrôle d'accès conditionnel à distance   |
| [H] | DELBART Briec         | Development of a data acquisition system for the analysis of an electrical network   |
| [E] | EL JEBARI Yassine     | Optimisation d'une chaîne de production de capteur à ultrasons   |
| [E] | EL MOURABIT Abdoullah | Optimisation d'une chaîne de production de capteur à ultrasons   |
| [H] | MAERTEN Guillaume     | Étude et développement d'un système d'acquisition vibratoire   |

### 5.2. ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

- |     |                             |  |
|-----|-----------------------------|--|
| [E] | DEGRELLE Christophe         | Système d'injection et unité de contrôle pour une chaudière sèche de nouvelle génération       |
| [G] | DELMOT-VAN HOORDE Guillaume | Amélioration d'un système de contrôle pneumatique, visant l'optimisation du soufflage du verre |
| [E] | ENGELLEN Louis              | Performance Analysis of the Decentralized Regulation of a Power Bus                            |

### 5.4. MESURES – INSTRUMENTATION – SIMULATION

- |     |                     |  |
|-----|---------------------|--|
| [G] | GRAILET Antoine     | Implémentation d'un capteur de chocs dans un système à rayons X portable |
| [G] | HENIN Simon         | Réalisation de la compensation thermique d'un capteur de pression MEMS   |
| [G] | LAMBORELLE Thibault | Conception, fabrication et test d'un système d'essais magnétostatiques   |

### 5.5. TÉLÉCOMMUNICATIONS – TECHNIQUES DE TRANSMISSION

- |     |             |                                |
|-----|-------------|--------------------------------|
| [G] | GILON Louis | Viabilité du LoRa en industrie |
|-----|-------------|--------------------------------|

- [G] PIRARD Loïc Conception d'un système miniature de transmission sans fil de données provenant de capteurs analogiques

#### 5.6. TRAITEMENT NUMÉRIQUE DU SIGNAL

- [E] RUBENS Thibaut Conception d'algorithmes de traitement du signal en réception sur une plate-forme radio logicielle pour une balise ferroviaire ETCS (GNU Radio)

#### 5.7. SON – IMAGE – ÉCLAIRAGE – OPTOÉLECTRONIQUE

- [E] ISHIMWE Blaise Banc d'essai pour la comparaison des LED SMD et puce nue
- [H] MOLINARO Bryan Conception d'un luminaire design hermétique avec détection de présence et unité de secours à destination du marché des maisons de repos, hôpitaux et hôtels

#### 5.8. APPLICATIONS DE L'ÉLECTRONIQUE

- [E] BOUHADDI Zakariya Étude et développement d'un système de localisation et de guidage d'un drone basé sur la technologie UWB
- [G] DELVAUX Sylvain Réalisation d'une alimentation sans fil par induction avec communication bidirectionnelle pour les capteurs embarqués sur des vantaux mobiles
- [E] KAMENGA LUNGENI Moïse Design of a generic automotive electronic control unit
- [E] RIGA Lorenzo The LLC resonant converter – A practical research for the space industry

### 6. ENVIRONNEMENT

#### 6.2. POLLUTIONS ET NUISANCES

- [E] BAUDOUX Paul-Edouard Étude acoustique pour une école d'un concept Basler au Luxembourg
- [E] CARDONA PRADILLA Pablo Étude comparative de solutions visant à réduire les nuisances sonores dans le cadre de routes régionales wallonnes bordées d'habitations

## 6.3. DÉCONTAMINATION, PROTECTION ET ÉPURATION

- [H] BASTIN Thomas Étude comparative du traitement de déshydratation des boues de la station d'épuration de Dour

## 6.4. TRAITEMENT DES DÉCHETS

- [G] BEGUIN Marie Optimisation du cycle de traitement des produits non conformes de polyéthylène expansé
- [G] DEDERICHS Kenneth Étude de la rentabilité et des perspectives de la filière recyclage plastique au Burkina Faso
- [P] JOSKIN Arthur Amélioration du traitement des eaux usées d'une fromagerie industrielle

## 6.5. DÉVELOPPEMENT DURABLE

- [G] CHAMBERLAND Matthieu Stratégie de conception énergétique pour un atrium : simulations et analyses énergétiques réalisées sur le logiciel DesignBuilder
- [E] COOLEN Alexandre Renewable energy for sea water reserve osmosis desalination plants: Worldwide screening for implementation potential
- [E] DE FRANCE Arnaud Analyse de la conformité d'un bâtiment neuf aux futures exigences PEB Q-ZEN en région Wallonne
- [E] NICOLETTA David Caractérisation d'un site éolien urbain : estimation du potentiel théorique et analyse expérimentale d'effets locaux
- [E] PETERMANN Ludovic Étude de l'impact des murs végétaux urbains sur l'environnement et conception de mobilier urbain végétal
- [E] VANLOOKE Axel Étude sur l'efficacité énergétique des bâtiments de production WN10 et WN27 au sein de l'entreprise GlaxoSmithKline

## 7. GÉOMATIQUE

## 7.4. GESTION DES BIENS IMMOBILIERS

- [E] VANTHOURNHOUT Edwin Elaboration d'un outil de diagnostic de l'état physique des bâtiments de la Défense

## 7.6. EXPERTISES

- |     |                  |  |
|-----|------------------|--|
| [E] | GOLDFINGER David | Détermination du coefficient de situation dans l'application de la méthode hédonique en matière d'évaluation immobilière en région bruxelloise |
| [E] | KELLER Vincent   | Utilisation de zones de valeurs dans le modèle hédonique du cadastre fédéral   |

## 8. GESTION

## 8.1. ORGANISATION DU TRAVAIL – PLANIFICATION – LOGISTIQUE – MAINTENANCE

- |     |                      |  |
|-----|----------------------|--|
| [P] | BALSEAUX David       | Analyse de disponibilité et amélioration de process sur chaîne de montage automobile   |
| [E] | BOLAND Mathieu       | Industrialisation en flux tiré lissé des équipements de pilotage des tuyères et de sauvegarde pour le lanceur Ariane 6   |
| [E] | EECKMAN Lucas        | Optimisation et organisation de la chaîne de production de la PME Mobile Control Systems   |
| [P] | FASTRÉ Hugues        | Analyse préliminaire et modélisation des domaines d'application et des acteurs du Cloud Manufacturing  |
| [P] | FASTRÈS Pierre-Yves  | Optimisation du flux d'une ligne d'assemblage  |
| [P] | HOLLER Maxim         | Amélioration de la productivité des presses uniaxiales   |
| [G] | LEMPEREUR Damien     | Company Organization Revamping and Assembly of a Bending Metal Sheet Machine   |
| [H] | MALONNE Timothé      | Optimisation d'un atelier de préfabrication d'éléments structurels en béton armé et en acier par le biais de son extension                                       |
| [E] | MARLIERE Thomas      | Étude de la problématique de corrosion des chaudières en fonte d'aluminium et tentative de résolution en vue d'assurer la pérennité des installations concernées |
| [P] | NEMERY Florian       | Réalisation et intégration d'un processus de maintenance dans le domaine du tri des déchets  |
| [G] | SEYNAEVE Baptiste    | Analyse de méthodes de gestion de chantiers, adaptation et application à une PME en croissance   |
| [H] | VAN BAELEN Guillaume | Mise en place de méthodes d'amélioration de la production d'un atelier d'usinage   |

## 8.3. SYSTÈME QUALITÉ – ENVIRONNEMENT – HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

- [H] SERVAIS Clément                      Optimisation d'une presse de vulcanisation et limitation de la pollution dans une poche à vide

## 8.4. RENTABILITÉ DES INVESTISSEMENTS – GESTION DES COÛTS

- [P] BILOCQ Amaury                      Application de la méthodologie Lean 3P et des Smart Technologies dans le développement d'une avionique intégrée pour microsatellite
- [E] GALHAUT Louis                      Étude technico-économique de l'implantation d'un robot dans le processus de préparation de picking et de kitting des outils de coupe

## 8.7. MANAGEMENT – STRATÉGIE - PROBLÈMES GÉNÉRAUX

- [G] DE SMEDT François                      International organic growth strategy for the CMI environment sector: positioning study, market validation and commercial strategy recommendations
- [G] OGNIANOV Denislav                      Study of business intelligence applied to Vali
- [E] ROELENS Isaline                      Prototype d'un logigramme de processus de Design Change Management des Medical Devices adapté à IBA

## 9. INFORMATIQUE

## 9.1. ANALYSE – MODÉLISATION

- [H] PENNINCK Arnaud                      Application du Model Based Design au développement de fonctions pour boîte de vitesses automatique
- [H] SHEMEZA Bienvenu                      Étude et optimisation de la gestion des alarmes procédés des unités Nitrates de Yara Tertre
- [E] VANDEVOORDE Charles                      Hybrid Ordering Protocol for Partially-Replicated State Machine

## 9.2. PROGRAMMATION – LOGICIELS – SYSTÈMES D’EXPLOITATION

[H]	ALLEMAN Geoffrey	Développement d'une application JAVA destinée à la création de factures
[E]	BERCKMANS Yannick	Boitier électronique IoT de monitoring énergétique. Étude et programmation d'un prototype
[P]	BRASSEUR Maxime	Développement de la version mobile de l'application de gestion de l'organisation assistée par ordinateur
[G]	CANTAVENERA Giuseppe	Simulation de consommation de bâtiment en vue d'une optimisation énergétique
[H]	CHARTIER Fabienne	Étude et conception d'un prototype d'interface 4-20mA et 0-10V pour des capteurs sans fil de l'industrie 4.0 destinés à de la maintenance prédictive
[H]	DEVREESE Guillaume	Étude et conception d'un système automatisé de désempilement de caisses
[E]	GIORDANO Gaetano	« ARMT-Application Relationship Management Tool ». Études et développement d'une l'application web pour la gestion des candidatures de la société adva consult (RH)
[G]	KAILS Rémy	Pilotage de charges électriques industrielles en vue de maximiser l'autoconsommation d'énergie solaire photovoltaïque
[G]	LAMBERT Florent	Réalisation d'un analyseur software de flux vidéo non compressés sur IP
[H]	MYSTER Loïck	Automatisation du traitement des indicateurs de performance clés
[E]	TAYMANS Rémy	CoopDesk Guichet électronique basé sur Odoo faisant l'interface entre les coopérateurs et la coopérative
[E]	VANDER MEIREN Antoine	Développement de l'entièreté de la chaîne d'une solution de chiffrement sur Android basée sur un module hardware sécurisé

## 9.3. TRAITEMENT NUMÉRIQUE DES IMAGES

[G]	DEFROIDMONT Antoine	Détermination et mesure des caractéristiques structurelles du mat à filament continu par traitement et analyse d'images
-----	---------------------	---

## 9.4. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET SYSTÈMES EXPERTS

[G]	DEBOUGNOUX Jonathan	Optimisation méta-heuristique d'une installation de production d'énergie solaire photovoltaïque avec système de stockage d'énergie
-----	---------------------	--

- [G] GRIGNARD Martin Détection automatique de défauts en thermographie IR
- [G] LABOUREUR François Artificial Neural Network Control of a Tank Level at BioWanze

## 9.6. INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

- [E] ALONSO Sylvain Développement d'un système autonome d'alimentation et de suivi de la consommation hydrique de rhizotrons en support au projet de recherche Hydra-Maize
- [E] DIDOUH Mohamed An Industrial Internet of Things (IIoT) solution for collecting and managing doors logs
- [P] GODEFROID Thomas Conception et réalisation d'une pointeuse autonome

## 9.7. BASES DE DONNÉES

- [P] HUYSMANS Loïs Base de données sur les performances machines et outils de cotation

## 9.8. TECHNOLOGIE DE LA COMMUNICATION

- [E] COOLS Hadrien Développement d'une solution de surveillance des paramètres vitaux de patients
- [G] DESTEXHE Louis Programmation d'une Smart IoT Gateway : CloudGate
- [H] DUPONT Boris Supervision à distance d'une machine industrielle à l'aide de VPN

# 11. MÉCANIQUE

## 11.1. MÉTROLOGIE ET INSTRUMENTATION

- [E] DE GREEF Henri Optimisation mécanique du temps de cycle de mesure de PROTf
- [H] PIRET Baptiste Amélioration d'un système de mesure de niveau de liquide par contre-pression de bullage
- [G] TAZIAUX Antoine Qualification d'un banc d'essai tribologique destiné à l'étude statique des paliers lisses

## 11.2. FABRICATION MÉCANIQUE

- [E] BAKIOUI Soulaïman Procédure de dimensionnement pour des gaines exceptionnelles, diamètre > 3000 mm

[E]	BECKERS Médéric	Réduction des vibrations transmises par les bras de suspension de la Gillet Vertigo .5 Spirit
[E]	BEKAR Mohammed Amine	Conception, étude et réalisation d'un banc d'essai dédié à l'assistance en chirurgie prothétique du genou
[E]	BELHAJ Khalid	Étude, prototypage et test d'un dispositif d'aide à la réduction de fractures et luxations du complexe pied-cheville en chirurgie orthopédique
[E]	BOOTIA EL OUMAMI Achraf	Ajout d'un troisième axe de déplacement au système de positionnement de caméras d'un banc d'essai expérimental de soufflerie
[E]	EGGERICKX Robin	Intégration d'un module de simulation de pédalage instrumenté sur banc d'essai pour E-Bikes
[P]	GUIOT Arthur	Amélioration de la fiabilité des supports d'outillages d'un process de laminage
[E]	H'OUAOUI Soufiane	Conception et réalisation de fixateurs externes low-cost pour traiter les fractures du tibia pour la Côte d'Ivoire
[P]	LAMBERT Quentin	Optimisation de la production et de la mise en boîte sur presse à injection plastique
[G]	RUWET Thomas	Analyse des composants structurels d'une citerne par la méthode des éléments finis et amélioration de la conception selon le code AD 2000-Merkblatt
[E]	VAN DE WEGHE Lucas	Standardisation de programmation de l'usinage de pièces en titane
[E]	VANHOUTTE Robin	Design and optimization of the services of laminated yoke magnets, with pulsed powering mode, for the East Area Renovation Project at CERN

### 11.3. CONSTRUCTION DES MACHINES

[E]	AZAR Jonathan	Équilibrage d'un compresseur 40 bar à trois étages
[E]	BALAJ Arbnore	Étude d'optimisation d'un tour TO154 pour le travail à chaud du verre
[G]	BROUWERS Pierre	Conception et réalisation d'un démonstrateur pour un système de dépôts de pixels de poudre au moyen d'une tête d'impression vibrante
[G]	CLAES Arnaud	Intégration du Code XL dans le système modulaire de fronts avant pour semi-remorques TeleMAX et CargoMAX

- [G] DEDERIX David The feasibility of a palm fruit nut sampling and analysis system for deliveries to palm kernel crushing plants in Nigeria
- [E] DUQUENNE Pierre-Ambroise Unloading of Panamax sand bulk carriers. Preliminary study and basic design of a system made to unload large bulk carriers at sea
- [E] FOBASSO KONLACK Rodrigue Conception d'une pompe hydraulique en vue d'une fabrication et maintenance dans les pays en voie de développement
- [G] GERMAY Loïc Optimisation de la construction d'une rampe pour semi-remorques surbaissées
- [P] HAAS Pierre-Nicolas Optimisation de la précision de lissage et modernisation de l'interface de contrôle d'une niveleuse à béton
- [G] HACK Raphael Concept, Design, Installation and Commissioning of an Automated CO<sub>2</sub>-Cleaning Station
- [G] LECLERCQ Gilles Invention, conception et développement du module de positionnement et d'insertion de tubes dans un échangeur de chaleur
- [G] MORDANT Adrien Étude et conception d'un banc de test d'épreuve de pression pour valves
- [H] POTIER Julien Conception d'un système automatisé de convoyage interne à un autoclave
- [G] SCHOONBROODT Arnaud Conception mécanique d'un robot de coffrage destiné à la production d'éléments de prémurs préfabriqués en béton
- [G] SOLER LILLO Jonathan Conception d'un démonstrateur pour un design alternatif au système de dépôt de pixels de poudre développé par la société Aerosint
- [P] SURAY Nicolas Conception d'une balayeuse déportable munie d'un bac collecteur pour nettoyer les filets d'eau
- [E] TCHAKOUNTE DZOGENG Rodrigue Adaptation du moule à tiroir de mise en œuvre d'attaches fourchettes pour câbles électriques
- [E] VANDERLINDEN Martin Conception et réalisation d'équipements spécifiques aux salles de spectacle
- [H] VANLULLE Florian Étude et fabrication d'un banc de test destiné à évaluer l'efficacité d'un revêtement anti-condensation sur un verre
- [E] WOUTERS Quentin Adaptation d'une génératrice existante pour l'alimentation d'un capteur éolien et recherche d'alternative possible

## 11.4. TECHNOLOGIE – PRODUCTIQUE

- [G] JOUCK Lisa High-load full assembly testing of Multi Jackbolt Tensioners for the ITER magnet support structure
- [E] TRAN Minh Anh Étude et mise en service du procédé tribofinition REMCHEM pour pallier à la problématique de la rugosité de l'impression titane sortie machine
- [G] WIECLAWSKI Arnaud Characterisation of ignition phenomena in dual-fuel liquid-gaseous fuels combustion

## 11.5. MAINTENANCE

- [E] AMCHAÏCH MAZOUZ Mohamed Étude énergétique et sélection d'une solution HVAC la plus efficiente en énergie d'un bâtiment
- [E] HARDOUZI YEDRI Soulaïman Étude de faisabilité de la mise en place d'une maintenance conditionnelle des installations techniques des bâtiments du Parlement européen

## 12. MÉCANIQUE DES FLUIDES ET THERMODYNAMIQUE

## 12.1. INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITE ET/OU DE CHALEUR

- [G] BERTRAND Aline Intégration énergétique et optimisation économique d'une installation de cogénération
- [E] CHAABI Zakaria Synthèse des éléments de conception liés au chauffage d'un bâtiment durable en vue de réaliser une arborescence facilitant le choix de conception d'un projet
- [E] COLIN Sébastien Systèmes de production de chaleur dans le résidentiel collectif neuf. Développement d'un outil comparatif de solutions énergétiquement efficientes
- [P] DISTEXHE Maxime Conception de groupes hydrauliques pour installation solaire thermique à drainage gravitaire
- [E] DUBAIL Louis Two-dimensional numerical simulation of a scroll expander for ORC applications
- [G] LEFEBVRE Jérôme Étude et comparaison de solutions de systèmes de chauffage et refroidissement appliquées à un bâtiment administratif

## 12.2. PRODUCTION ET TRANSFERT D'ÉNERGIE CALORIFIQUE OU FRIGORIFIQUE

- |     |                      |   |
|-----|----------------------|---|
| [H] | BAUGNET François     | Remplacement du R134a dans les installations frigorifiques Lebrun suite aux nouvelles réglementations F-GAS |
| [P] | COURTOY Etienne      | Economies d'énergie sur la production d'air comprimé  |
| [H] | DANIELS Nicolas      | Accutherm : une technologie innovante de stockage d'énergie sous forme de froid                             |
| [H] | GILBERT Romain       | Étude de mise à niveau des cellules de stockages refroidies   |
| [G] | GOSSUIN Thomas       | Determination of the oil film's temperature in a Scroll compressor's bearings                               |
| [E] | IDRISSI YAZAMI Mehdi | Remplacement du groupe de production d'eau glacée, fonctionnant à l'ammoniac, d'un centre hospitalier       |
| [H] | JANUS Benjamin       | Optimisation d'un système de refroidissement de presses à injection plastique                               |
| [E] | MONTHE NJIKE Thierry | Economie d'énergie dans un entrepôt frigorifique  |
| [P] | PAQUET Lionel        | Optima technico-économiques de chambres froides selon leur réfrigérant                                      |

## 12.3. INSTALLATIONS DE CONDITIONNEMENT D'AIR – CHAUFFAGE

- |     |                   |   |
|-----|-------------------|---|
| [E] | AOUAMI Chahid     | Étude et optimisation énergétique et du confort thermique des installations HVAC du bâtiment AGC GLASS Europe                         |
| [E] | BOUJABED Othmane  | Développement d'un outil pour le dimensionnement des réseaux aéraulique et hydraulique d'une installation HVAC                        |
| [E] | FILALI Anas       | Réduction de la facture énergétique d'un bâtiment tertiaire européen  |
| [G] | GETS Justine      | Analyse comparative des systèmes de chauffage et ECS en construction passive, sur les plans énergétique, environnemental et financier |
| [H] | HAUTECOEUR David  | Étude de la régulation du taux d'humidité via une installation à détente directe en application CTA                                   |
| [H] | INDOVINO Giuseppe | Conception de l'installation HVAC de l'hébergement de l'hôpital Montlégia de Liège  |
| [P] | LAMBERT Arnold    | Le BIM (Building Information Modeling) appliqué à la conception d'un système HVAC   |

- [H] NIHOUL Simon Dimensionnement des installations HVAC d'un bâtiment de bureaux et analyse des paramètres et systèmes alternatifs en vue de l'optimisation de la consommation énergétique
- [H] PILLON Axel Optimisation et mise en fonctionnement des tours de refroidissement de l'hôpital Chirec Delta
- 12.4. ÉNERGIES RENOUVELABLES
- [E] AZIZ Daniel Energies renouvelables pour les entrepôts frigorifiques au Maroc
- [E] MEERT Louis Design of a measurement tool and protocols for the experimental study of the influence of process parameters on the moisture content of the gas produced by a NOTAR® gasifier
- 12.5. RÉGULATION ET GESTION DES INSTALLATIONS – PROCESSUS THERMIQUE
- [E] AZOUZI Sabri Étude de faisabilité de l'optimisation de la gestion d'un système de chauffage via le boîtier GreenBox afin de diminuer la consommation d'énergie au niveau du domestique
- [G] BAKHTI Youssef Ultrasonic load monitoring of bolts in a combustion engine
- [P] FERRO Germain Récupération de chaleur et assainissement de fumées industrielles
- [H] SUIVENG Pierre Régulation thermique d'une ligne de chromage dur
- 12.7. HYDRAULIQUE – PNEUMATIQUE – AÉRODYNAMIQUE
- [H] BEKKALI Lekman Étude du dimensionnement et du positionnement des « rotors de contrôle » d'un drone VTOL à rotors carénés
- [H] GALLET Joyce Étude complète de l'installation d'une pompe de surface automatisée en carrière
- [E] LAURENT Renaud Étude par modèle hydraulique informatisé du bassin versant Paruck-Broekbeek
- 12.8. THERMIQUE DU BATIMENT
- [H] BOUYAARA Mohamed Étude d'optimisation de l'installation de chauffage industriel de l'atelier SNCB de Charleroi

[H]	ESSADQI Zakaria	Étude du comportement thermique d'un immeuble de bureaux et optimisation de son système énergétique
[H]	MOULTON Donovan	Gestion durable des besoins énergétiques d'un bâtiment tertiaire
[G]	PAQUAY Romain	De la mise en place à l'analyse : monitoring et commissioning énergétiques appliqués à un bâtiment
[P]	PIERARD Noémi	Étude et intégration des techniques spéciales sur un immeuble à appartements
[P]	PIRLOT Damien	Audit et comptabilité énergétiques de bâtiments tertiaires
[E]	SNAPPE Thomas	Adaptation de la méthodologie d'audit mixte à un bâtiment tertiaire
[E]	ZEKKOURI Bilal	Étude de l'optimisation de la consommation énergétique d'un atelier de la STIB et réalisation d'un logiciel d'estimation de coût d'une installation photovoltaïque

### 13. PHYSIQUE

#### 13.1. PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET APPLICATIONS

[G]	BODSON Denis	First Mirror Mock-up Design for an Optical Diagnostic in the International Thermonuclear Experimental Reactor
-----	--------------	---

#### 13.2. OPTIQUE – ACOUSTIQUE

[G]	VENDRAMINI Alexandre	Optimization of the end-to-end performance modelling interface (EMIOS) for application to large telescopes
-----	----------------------	--



Tous nos remerciements aux membres du Comité d'édition :

Le Père Laurent CAPART s.J. (GRAMME), Messieurs Benjamin BERGER (ECAM), Michel LEQUEUX (ISICht) et Vincent HANUS (PIERRARD).

Madame Valérie SERONT (ISICht), Messieurs Xavier VAN DEN DOOREN (ECAM),  
Juan HERRERA (GRAMME) et Michel BERNARD (PIERRARD),  
Directeurs



**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](mailto:segec@segec.be)  
D/2019/7362/4001