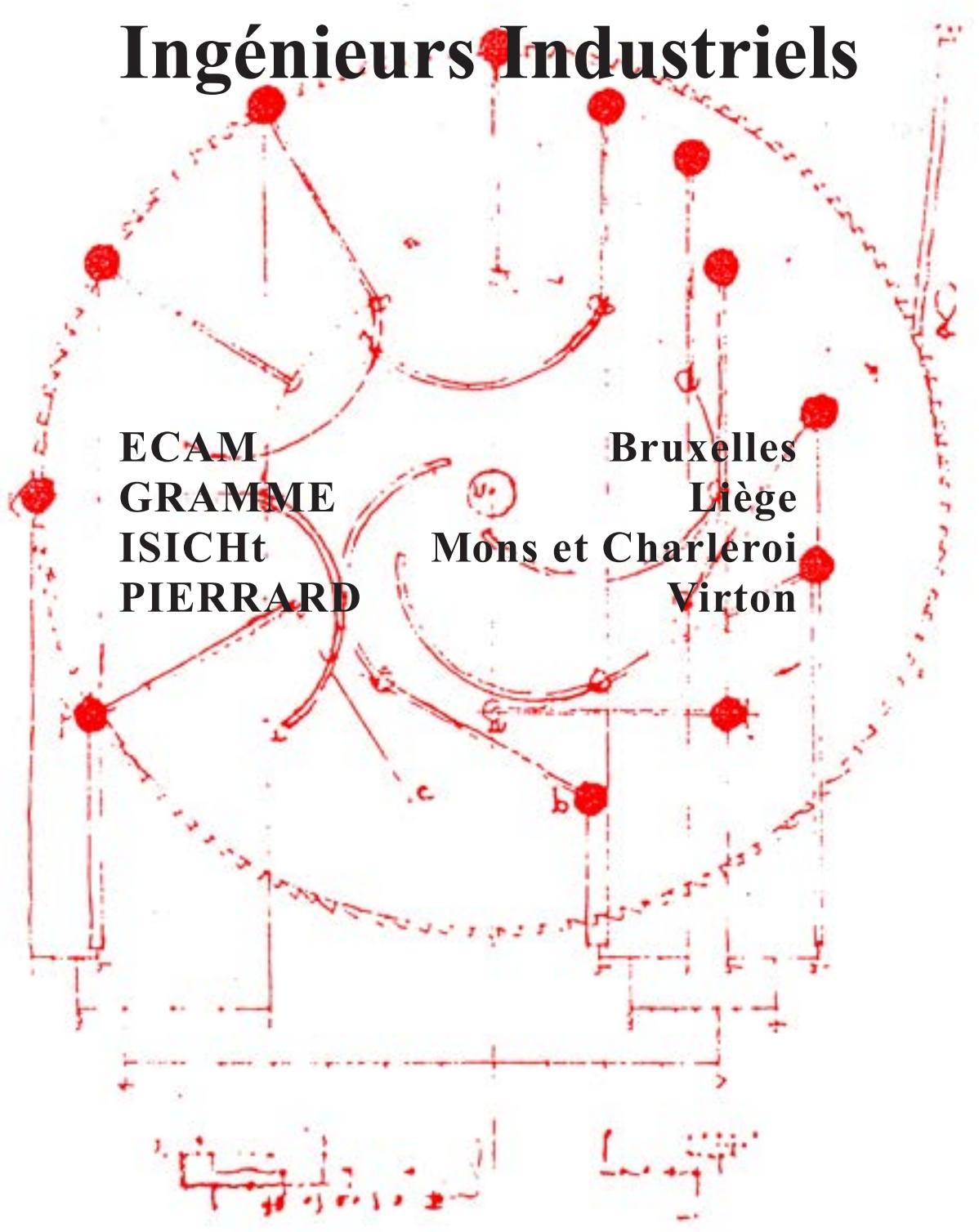
Revue Scientifique

des

Ingénieurs Industriels



ECAM	**Bruxelles**
GRAMME	**Liège**
ISICHt	**Mons et Charleroi**
PIERRARD	**Virton**

Edition n°32 - Mai 2018
www.isilf.be

Revue scientifique n°32 – Mai 2018

Revue Scientifique

des

Ingénieurs Industriels

ECAM	**Bruxelles**
GRAMME	**Liège**
ISICHt	**Mons et Charleroi**
PIERRARD	**Virton**

Edition n° 32 - Mai 2018
www.isilf.be

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

ECAM
Haute École Léonard de Vinci
Promenade de l'Alma, 50
1200 BRUXELLES
Tél : +32 (0)2/541.48.50 www.ecam.be
Fax : +32 (0)2/541.48.59 E-mail : secretariat@ecam.be

GRAMME
Haute École Libre Mosane
Quai du Condroz, 28
4031 ANGLEUR (LIEGE)
Tél : +32 (0)4/340.34.30 www.helmo.be/gramme
Fax : +32 (0)4/343.30.28 E-mail : gramme@helmo.be

ISICHt
Haute École Louvain en Hainaut
Chaussée de Binche, 159
7000 MONS
Tél : +32 (0)65/40.41.46 www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel
Fax : +32 (0)65/34.04.52 E-mail : tech.mons@helha.be

Grande-Rue, 185
6000 CHARLEROI
Tél : +32 (0)71/41.94.40 www.helha.be/master-en-ingenieur-industriel
Fax : +32 (0)71/48.92.29 E-mail : tech.mons@helha.be

PIERRARD
Haute École de Namur-Liège-Luxembourg
Pierrard, rue d'Arlon, 112
6760 VIRTON
Tél : +32 (0)63/58.89.40 www.henallux.be/ingenieur-pierrard
Fax : +32 (0)63/57.67.62 E-mail : ingenieur.virton@henallux.be

Site de la revue : www.isilf.be

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

Prix : 10 euros.

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

Ingénieur, un métier trop peu souvent conjugué au féminin

Le nombre d'ingénieurs industriels a diminué ces dernières années plutôt que d'augmenter. Le métier d'ingénieur est pourtant un métier d'avenir qui offre un excellent taux d'insertion professionnelle.

Cela s'explique par le départ en retraite des ingénieurs nés après la seconde guerre mondiale et il faut être clair, on peine à les remplacer d'autant plus que l'on constate depuis quelques années déjà une désaffection des jeunes pour les études scientifiques.

La compétitivité face à d'autres pays requiert un nombre suffisant d'ingénieurs. La pénurie porte préjudice au bon fonctionnement d'importants secteurs car les jeunes ingénieurs sont impliqués dans des enjeux fondamentaux comme la communication, les nouvelles technologies, la mobilité, la santé …
Il est urgent d'accroître les effectifs scientifiques et techniques.

Un moyen rapide d'arriver à augmenter la population d'ingénieurs est de former davantage de femmes.
La féminisation de la profession progresse en effet lentement et elle semble aujourd'hui atteindre un palier. Depuis plus de vingt ans, la moyenne des diplômées dans les écoles d'ingénieur industriel est de 10%, et le passage des études en cinq ans n'y a rien changé. C'est d'autant plus préoccupant que ces dernières années, la plupart des professions se sont féminisées ; c'est, par exemple, net chez les médecins.
Différentes études démontrent que les filles ne décrochent pas plus dans les études d'ingénieurs que les garçons, le problème vient essentiellement du faible nombre d'étudiantes inscrites dans la formation d'ingénieur.

Les matières scientifiques sont souvent identifiées à des concepts tels que : la logique, la rigueur, la difficulté et assez peu à des concepts tels que la créativité, l'inventivité, l'imagination ce qui est une manière très caricaturale et exclusive de représenter la profession. On se pose ainsi la question essentielle de l'identité professionnelle et il n'est pas facile de choisir un métier que l'on se représente peu ou mal. En effet il n'y a pas de séries télévisées ou de films à grand spectacle sur les ingénieurs et on en parle peu dans les médias.

Les responsables des ressources humaines affirment de plus qu'il n'est pas bon de n'avoir que des hommes dans une équipe car les femmes ont généralement un meilleur sens de la diplomatie et de la communication.

Dans nos pays occidentaux, le métier d'ingénieur semble rester une affaire d'homme.

Le métier d'ingénieur est souvent associé à son caractère technologique souvent dépourvu de dimension sociale.
Or les femmes sont plus enclines à se diriger vers les métiers qui leur semblent représenter un enjeu de société. La preuve en est que, quand elles choisissent des études d'ingénieur, on les retrouve plus nombreuses dans les orientations des sciences de la vie que dans d'autres orientations.
Les femmes et les hommes qui pratiquent ce métier peuvent cependant témoigner que la profession demande autant des compétences humaines et sociales que de compétences techniques.

Le deuxième point qui explique la désaffection des femmes est lié à ce qu'on appelle des stéréotypes auxquels les enfants, garçons ou filles, sont soumis depuis leur enfance et les guident implicitement vers certaines carrières et professions.
Quand on demande à des enfants de dessiner un scientifique, ils représentent généralement un homme « d'un certain âge », avec des lunettes, les cheveux en désordre et tout à fait hermétique au monde qui l'entoure. Les images véhiculées dans les bandes dessinées ou les médias renforcent cet aspect peu moderne et peu dynamique du scientifique.
Ce métier manque de modèles et de représentation professionnelle féminins. Si on demande de citer une femme scientifique, à part Marie Curie, peu de noms peuvent servir de représentation. Or le choix d'un métier est souvent lié à un modèle de représentation professionnelle : un enfant croise souvent un médecin, un dentiste, un enseignant au cours de sa vie, pas forcément un ingénieur. La présence de modèles capables d'incarner une « promesse » ou tout au moins une possibilité est trop rare.

Les clichés sur le métier d'ingénieur sont en effet nombreux : « Ingénieur c'est pas un métier de fille » « les ingénieures ne sont pas très féminines » « Un homme est plus compétent techniquement » …

La société encourage donc plus les femmes à se tourner vers des professions centrées sur le soin et le social qui les attirent davantage. Ces métiers sont, de plus, souvent moins bien rémunérés ce qui entretient les inégalités professionnelles.

Cet aspect est renforcé par les croyances des enseignants qui pensent que les filles sont plus douées dans les matières littéraires, qu'elles sont plus calmes et plus appliquées et qu'elles travaillent. Les filles ont donc généralement moins confiance en elles dans les matières scientifiques et quand elles échouent, elles pensent qu'elles

sont moins compétentes alors qu'un garçon se dira qu'il n'a pas assez travaillé. Ce fait a tendance à détourner les filles des études scientifiques pensant qu'elles n'en sont pas capables.

Les instituts de formation, la société, les médias ne sont pas les seuls en cause : il faut prendre en compte les perspectives offertes par les entreprises. Les femmes exerçant des responsabilités, ce qui est souvent le cas des ingénieures, subissent souvent des tensions entre vie de famille et vie professionnelle.

Attention, ce ne sont pas seulement les femmes qui ont du mal à s'y retrouver ou à s'y faire une place, mais aussi une part croissante des jeunes pères qui vivent des situations familiales différentes de leurs aînés, avec un plus grand partage des tâches conjugales. C'est moins le métier proprement dit qui peut souffrir d'un manque d'attractivité que ses conditions d'exercice.

On constate en plus qu'après plusieurs années, un certain pourcentage des ingénieures quitte le métier. Des décrochages dans les courbes de carrière, apparus à l'occasion des grossesses, se conjuguent au caractère peu tolérant du métier d'ingénieur à l'égard des contraintes de la vie familiale.

Pour les entreprises, il y a d'autres modèles à inventer car l'enjeu est important. Faut-il récompenser les carrières conformes au modèle qu'on s'en fait ou valoriser les compétences et le potentiel ?

Nul ne peut être tenu pour seul responsable des différents points de blocage et c'est une action conjointe sur les différents freins qui peut débloquer la situation. Il convient donc :

- De promouvoir les parcours d'ingénieurs dès le secondaire en passant par la confrontation des étudiants avec le monde de l'entreprise.
- De mettre en place dans les entreprises une politique des carrières et une gestion des temps plus attentives aux questions de société.
- De valoriser la femme ingénieure en insistant sur sa féminité.
- De se poser la question : qu'est-ce qu'un ingénieur aujourd'hui ? car il semble que les représentations soient en retard sur l'évolution réelle du métier.
- De combattre les stéréotypes.

Le manque d'ingénieurs et ingénieures n'est pas une fatalité mais il est grand temps d'y travailler.

Ir Valérie Seront
Directrice de l'Ecole d'Ingénieurs
HELHa – ISICHt

TABLE DES MATIERES

Éditorial : Ingénieur, un métier trop peu souvent conjugué au féminin
par V. SERONT

Conception d'une turbine hydraulique de type Pelton à axe vertical,
par R. VERMEULEN, V. KELNER 1

Quelles alternatives pour le trafic automobile en cas de démolition du viaduc Herrmann-Debroux ?
par P. MAUDOUX, C. HUENAERTS, Y. HANIN 17

Caractérisation d'un extrait de café vert en vue du développement d'une boisson à vertu énergisante,
par N. LEBEAU, C. SAUSSEZ, V. JERKOVIC *35*

Développement de la technique de nanoindentation en température,
par G. GERADON, D. MERCIER, C. CHARLIER 53

Développement de la méthode hédonique en matière d'évaluation immobilière en région bruxelloise,
par A. THAUVIN 77

Conception d'une nouvelle centrale d'énergie pour un processus de brassage,
par T. DELAITE 93

Equipements aérauliques de laboratoire : méthodologie de sélection et application de celle-ci dans un projet réel de pharmacie hospitalière,
par J. NORTIE, J.-C. MARBAIX 111

Applications de streaming vidéo sur Hololens,
par G. VANVINCKENROYE, F. SENNY 129

L'économie circulaire dans le secteur de la construction,
par E. DELCOURT, A. ROMNÉE, J.-P. LAHAYE 143

Discrétisation d'un gradient de température lors d'un déplacement liquide à travers un mélange solide,
par J.-A. CARNEVALI, V. HANUS 159

Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso,
par N. ZIMMERMANN, D. KONSEIBO, C. CHARLIER 173

Implémentation d'un test médical dans un environnement 3D virtuel et réalisation d'une application d'enregistrement de données,
par W. ESTIEVENART, L. JOJCZYK 187

Les planchers mixtes bois-béton : Etat de l'art, méthodologie et outil de calcul, domaines d'application,
par C. VANDERROOST, Y. GOBERT 209

Scénarios futurs pour des bâtiments basse consommation dans les Alpes suisses : consommation et production énergétiques,
par L. DACOS, J. KAEMPF 231

LISTE DES TRAVAUX DE FIN D'ETUDES 247
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 269

Conception d'une turbine hydraulique de type Pelton à axe vertical

Ing. R. VERMEULEN
Ir V. KELNER
GRAMME – Liège

La conception d'une turbine hydraulique tend à concilier trois objectifs primordiaux : la faisabilité, un rendement compétitif et des coûts maitrisés. Cet article a pour but de proposer une conception viable de turbine Pelton pour un site spécifique au Rwanda. Une étape de dimensionnement hydraulique est destinée à la définition des grandeurs caractéristiques de la turbine. Ensuite vient la conception mécanique des pièces et assemblages qui, de manière itérative, conduit à un design probant.

Mots clés : Pelton, turbine, énergie, débit, pression, injecteur, auget, rendement.

The design of a water turbine tends to conciliate three primary objectives: feasibility, competitive efficiency and contained costs. The purpose of this thesis is to suggest a feasible Pelton turbine design for a specific site in Rwanda. First, a hydraulic sizing step is intended to define the characteristic quantities of the turbine. Afterwards comes the mechanical design of the parts and assemblies which iteratively leads to a convincing design. Finally, this thesis deals with a short competitive study in terms of micro Pelton turbines.

Keywords: Pelton, turbine, energy, flow rate, pressure, injector, bucket, efficiency.

1. Introduction

Le but de ce travail est d'expliquer le dimensionnement et la conception d'une turbine Pelton à axe vertical pour un site bien précis. Ce site, localisé au Rwanda, dispose d'un chute nette (H_n) de 110 mètres (dénivelé entre la chambre de mise en charge et l'entrée de la turbine défalqué des pertes de charges dans les conduites au débit de dimensionnement). Le débit de dimensionnement est pris comme étant le débit disponible pendant au moins 30 % du temps, il a été estimé à 300 l/s.

Il existe déjà de nombreuses sociétés européennes disposant d'une gamme de turbines Pelton pouvant satisfaire aux caractéristiques du site rwandais. Il ne s'agit donc pas ici de réinventer la roue mais de concevoir une turbine pouvant concurrencer ses homologues européens sur le plan du rendement, de la robustesse ainsi que du coût. Cependant, très peu d'informations filtrent parmi les industriels, ce qui nécessite une conception propre à chaque entreprise.

Dans la suite de ce document, il sera question du dimensionnement hydraulique de la turbine, c'est-à-dire la définition des grandeurs caractéristiques de celle-ci. Ensuite, une brève description des choix posés lors de la conception mécanique est présentée.

1.1. La turbine Pelton

Le brevet pour la toute première roue Pelton fut déposé par Lester Pelton en 1878. Ce brevet décrit la forme de l'auget ainsi que les différentes manières de les fixer sur la roue. Le nom de Pelton a traversé les âges, mais rendons justice à un autre acteur important dans l'histoire de cette turbine : W. Abna Doble. Doble est en réalité l'inventeur de la conception de l'auget moderne en 1899. Il a également imaginé l'injecteur constitué d'un pointeau.

La turbine Pelton est une machine à action, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de différence de pression entre l'entrée (la sortie de l'injecteur) et la sortie de la roue. En réalité, la pression à l'intérieur du bâti est la pression atmosphérique[1]. Le principe de fonctionnent est le suivant : l'eau est canalisée par une conduite forcée entre la chambre de mise en charge et l'entrée du distributeur qui conduit l'écoulement vers le ou les injecteurs. L'injecteur est chargé d'accélérer l'écoulement, c'est-à-dire de transformer l'énergie potentielle de pression en énergie cinétique via la loi de conservation de l'énergie. Généralement, l'injecteur est constitué d'une buse, responsable de la

[1] Il existe des turbines Petlon dites à contre pression, où la pression dans le bâti est choisie par l'utilisateur. Ces turbines sont très utilisées dans les réseaux de distribution d'eau par exemple.

convergence du jet, et d'un pointeau, chargé de la régulation du débit. L'injecteur dirige ainsi un jet cylindrique à haute vitesse vers la roue constituée d'un certain nombre d'augets. L'auget a la lourde responsabilité de récupérer un maximum de l'énergie cinétique du jet et de la transformer en puissance mécanique à l'arbre. Un auget a une forme de double cuillère avec au centre une crête appelée aussi splitter. Le splitter divise le jet en deux parties égales pour qu'il s'écoule dans la section concave de l'auget, là où a lieu la récupération d'énergie. Pour finir, une fois que l'eau est passée dans la roue, il faut la canaliser vers le canal de sortie. C'est l'un des nombreux rôles du bâti.

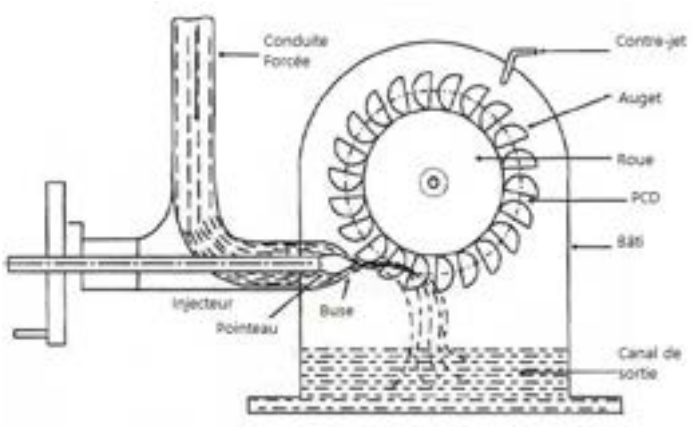


Figure 1 : Vue schématique d'une turbine Pelton à axe horizontal [1]

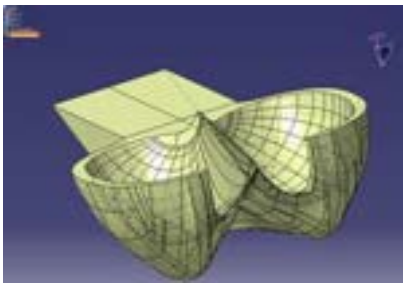


Figure 2 : Auget Pelton [2]

Cette turbine est particulièrement appréciée pour sa capacité à réguler le débit sur une grande plage tout en conservant un excellent rendement. De plus, cette régulation peut se faire de manière très précise grâce au pointeau. En réglant avec soin la position du pointeau dans la buse (via un vérin hydraulique, un moteur électrique, manuellement, etc.) le diamètre du jet est adapté et par conséquent le débit également (à hauteur du chute supposée constante).

2. Dimensionnement hydraulique

Cette section explique l'ensemble des démarches et calculs réalisés dans le but de dimensionner les différents éléments de la turbine du point du vue hydraulique. Nous nous limiterons ici à la méthode mise en place pour déterminer les caractéristiques d'une turbine Pelton à axe vertical. La roue est donc directement montée sur l'arbre de la génératrice, ce qui entraine que la vitesse de rotation est fixée par la génératrice choisie.

Le dimensionnement d'une turbine Pelton ne demande pas énormément de données (en tout cas pour les calculs préliminaires). Les données relatives au site d'installation sont les suivantes :

- Débit de dimensionnement Q_{design} en [l/s]
- Hauteur de chute nette (en entrée de turbine) H_n en [m]
- Vitesse de rotation souhaitée par la génératrice N en [tr/min]

Il existe trois grandeurs principales qu'il convient de déterminer en premier lieu afin de définir la turbine Pelton qui s'accorde le mieux aux caractéristiques du site d'exploitation. Il s'agit du diamètre Pelton (PCD soit Pitch Circle Diameter), du nombre d'injecteurs et du nombre d'augets. Il est de bonne pratique de déterminer ces paramètres de manière itérative dans le but d'obtenir le meilleur compromis possible. En effet, de nombreuses contraintes telles que le rendement, l'encombrement, le coût, les contraintes mécaniques etc., imposent des compromis dans la détermination des trois grandeurs principales.

2.1. Diamètre Pelton (PCD)

Étant donné l'axe vertical de la machine, la roue sera directement montée sur l'arbre de la génératrice. La roue Pelton est donc dimensionnée de telle manière que la vitesse angulaire soit celle demandée par la génératrice.

Le PCD (Pitch Circle Diameter), c'est à dire le diamètre Pelton, est calculé sur base de la vitesse moyenne de la veine de fluide en sortie d'injecteur (V_1 en [m/s]). En appliquant la loi de la conservation de l'énergie nous avons :

$$V_1 = C_v \sqrt{2\, g\, H_n}$$

Où g est la constante de gravité et Cv le coefficient de vitesse traduisant les pertes de charges dans l'injecteur (sa valeur est soit 0,97 soit 0,98 pour l'injecteur présenté dans la section 3.3, nous prendrons 0,97)

Connaissant la vitesse V_1, nous appliquons l'équation de la vitesse d'entrainement Pelton, soit :

$$\frac{\pi\, N\, D}{60} = \chi\, V_1$$

Où N est la vitesse de rotation de la génératrice, D le diamètre Pelton (en mètres) et χ le rapport de vitesse $\frac{U2}{V_1}$. U_2 est la vitesse d'entrainement de l'auget ; elle se calcule en multipliant la vitesse angulaire (en radians par seconde) de la roue par la moitié du diamètre Pelton. La valeur optimale de ce rapport (pour un rendement optimal) se situe entre 0,41 et 0,5 [3]. Généralement, la valeur optimale vaut 0,48 [2] ; nous nous baserons donc dans un premier temps sur cette valeur pour la suite du dimensionnement.

2.2. Nombre d'injecteurs

Cette valeur est déduite du diamètre idéal du jet au débit de dimensionnement. Ce diamètre dépend des dimensions des augets ainsi que du diamètre Pelton et est censé garantir un rendement optimal.

Dans un premier temps, un nombre idéal d'injecteurs est déterminé suivant la méthode Thake [5]. Thake définit le diamètre idéal du jet comme étant une fraction du diamètre Pelton, soit :

$$d_{jet\ idéal} = 0{,}11\ D$$

Sachant que le débit total vaut la vitesse en sortie d'injecteur multipliée par l'aire du jet et leur nombre, le nombre idéal de jet est calculable via :

$$n_{jet\ idéal} = \frac{Q}{V_1\ A_{jet\ idéal}}$$

Fort de cette information, il incombe au concepteur de choisir le nombre d'injecteur qui lui convient le mieux en fonction de sa propre gamme d'auget, des contraintes d'encombrement, etc. Il est néanmoins important, pour le bon fonctionnement de la machine, que le rapport entre le diamètre de jet (au débit de dimensionnement) et le diamètre Pelton, reste compris entre 0,067 et 0,125 avec la possibilité d'aller jusqu'à 0,14 pour de faibles puissances [3].

[2] Déterminé sur base de la théorie présentée par Damien Lodomez dans son rapport de stage [4]. Étant directement liée aux augets Thake [5], la valeur du rapport pourrait être modifiée une fois l'auget final défini.

Il y a cependant une certaine limite au nombre de jets. L'expérience montre qu'il faut une rotation de la roue d'environs 70°entre le moment où le jet impacte l'auget et le moment où toute l'eau a été évacuée de celui-ci. Pour cette raison, on préconise un espacement de minimum 75°entre chaque jet pour garantir aucune perte d'efficacité. Des turbines à axe vertical à 6 jets existent (soit un espacement de 60°entre les injecteurs) mais il faut concéder une certaine partie du rendement. De plus, ces turbines présentent des difficultés de conception pour des fabricants non expérimentés. Pour finir, le coût d'un injecteur est assez élevé. Il est donc plus sage de se limiter à 4 jets pour des entreprises qui ne disposent pas encore d'une grande expérience en matière de turbines Pelton.

2.3. Nombre d'augets

En règle générale, le nombre d'augets placé sur une roue se situe entre 18 et 24. Cependant, il est important de déterminer cette valeur avec précaution pour éviter tout problème de faufilement. Ce phénomène apparait lorsqu'une partie du jet incident ne parvient à rentrer en interaction avec aucun auget. Cette portion du jet se faufile entre les augets pour terminer sa course contre le bâti de la turbine. Le faufilement est, par conséquent, très néfaste pour le rendement de la machine étant donné que l'énergie contenue dans la portion de jet qui se faufile est tout bonnement perdue.

Pour éviter tout faufilement il faut que la condition suivante soit remplie (fig. 3) :

$$\widehat{AB} + \widehat{BC'} \leq \widehat{AC}$$

avec

$$\widehat{AC} = D_p \, \alpha$$

où D_p représente le diamètre de pointe de la roue et α est l'angle entre la perpendiculaire à la génératrice du jet passant par le centre de la roue Pelton et la droite rejoignant le point C au centre.

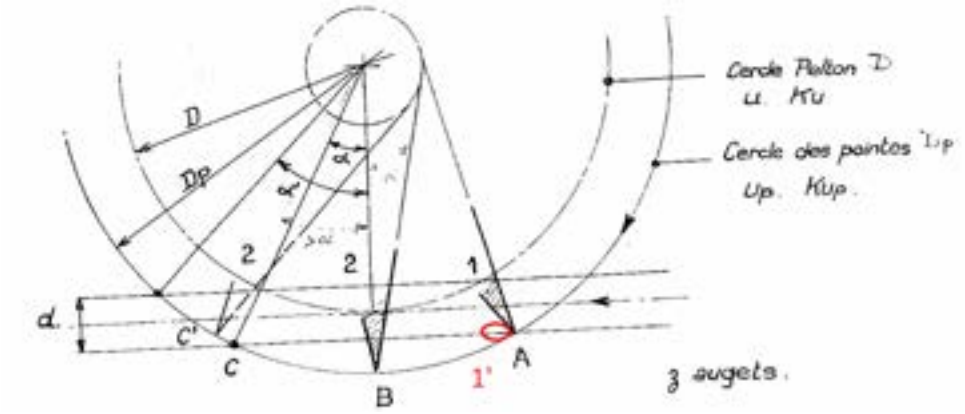


Figure 3 : Illustration géométrique d'une roue Pelton [3]

La condition de non faufilement nous indique le nombre minimal d'augets à installer sur la roue. Le nombre maximum d'augets n'est pas défini théoriquement mais dépend de l'encombrement ainsi que du coût de fabrication d'un auget.

2.4. Résultats

Au terme de ce processus itératif, nous obtenons une turbine dont les grandeurs caractéristiques sont :

- PCD : 550 mm
- Nombre de jets : 4
- Nombre d'augets : 18

sachant que le débit de dimensionnement est de 300 l/s, la hauteur de chute nette 110 m et la vitesse de rotation choisie 750 tr/min.

3. Conception mécanique

La conception d'une machine est un processus hautement itératif qui débouche sur une multitude de versions différentes. Il sera donc présenté ici certaines pièces capitales ainsi que les choix qui ont influencé leur design. Nous n'abordons pas l'entièreté de la conception afin de rester succinct et de respecter la confidentialité de ce travail.

À la figure 4 est présenté un rendu général de la turbine conçue dans le cadre du travail de fin d'étude.

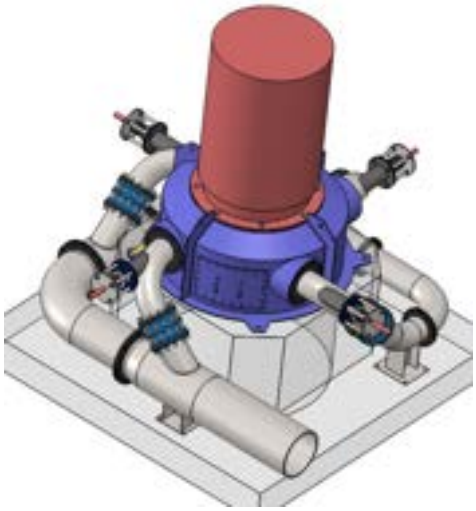


Figure 4 : Rendu général de la turbine conçue [1]

3.1. Bâti

La conception du bâti d'une turbine peut paraitre banale et peu complexe. Or, il s'agit pourtant d'un élément crucial ayant pour rôle de canaliser l'eau vers la sortie de la machine. Il existe donc des règles de bonne pratique concernant les dimensions minimales du bâti, comme par exemple le diamètre intérieur, ou encore l'espace entre la roue et le sommet du bâti, qui garantissent la bonne évacuation de l'eau. Dans le cas de figure où le bâti ne remplit pas correctement sa fonction, des pertes de rendement seront observées au niveau de la turbine. En effet, après que la veine de fluide soit passée dans un auget de la roue, elle ne contient plus d'énergie. Si elle vient à entrer à nouveau en intersection avec la roue, cela engendre des pertes significatives (cela peut également altérer la qualité du courant électrique produit).

Dans la conception du bâti de la turbine Pelton, les dimensions minimales issues des règles de bonne pratique ont été légèrement rehaussées pour les raisons suivantes :

- Ces dimensions sont des valeurs empiriques issues de l'expérience des constructeurs pour des micro-turbines Pelton au rendement acceptable, mais pas excellent (de l'ordre de 80 %).

- L'encombrement des différents organes de la turbine (mécanisme de déflection, injecteurs, étanchéité, chambre de visite, etc.) impose un diamètre de bâti élevé.
- Vu les 4 injecteurs, le débit pour cette turbine peut être conséquent. Il faut donc prévoir des dimensions à la hausse pour garantir une bonne évacuation pour toute la plage de débit.

Un autre élément important dans la conception de cette pièce est la flèche, c'est-à-dire la déformation du sommet du bâti après l'installation de la génératrice et la roue. Minimiser cette flèche permet un alignement parfait entre les splitter des augets et l'axe des injecteurs.

3.2. Distributeur

La conception du distributeur tient compte de 3 contraintes principales : la faisabilité en termes d'installation sur site, le coût de fabrication et la réduction des pertes de charge. Ce dernier point n'est pas le plus important car la différence de rendement du distributeur entre un bon design hydraulique et un mauvais est très faible (de l'ordre du pourcent). Pour de faibles puissances, telles que dans notre cas (environ 300 kW), il faut pouvoir concéder une partie du rendement au profit d'un coût de développement et de fabrication plus faible. Cependant, la concurrence présentant de très bon rendement (avoisinant les 90 %) : il ne faut pas négliger cet aspect de la conception pour autant.

Nous avons opté pour une géométrie de distributeur telle qu'à la figure 4 car elle tient la route hydrauliquement. En effet, les bifurcations et les coudes sont modérés pour introduire peu de pertes de charges mais aussi maintenir un écoulement stable (peu turbulent). Ceci est important pour garantir un jet homogène jusqu'à son interaction avec les augets. Une attention particulière à également été portée à l'assemblage des éléments. Il ne faut pas oublier qu'une pièce de chaudronnerie peut avoir des tolérances allant jusqu'au centimètre. Le distributeur a donc été conçu en différente pièces dont l'assemblage permet de récupérer les jeux. Des joints de démontage sont aussi prévus entre le corps du distributeur et les injecteurs pour permettre un ajustement précis du positionnement des injecteurs. De plus, la conception par modules facilite énormément le transport de la machine. Le site étant au Rwanda avec une accessibilité réduite, il est bon de ne pas s'encombrer de pièces trop volumineuses.

3.3. Injecteur

L'injecteur est un organe phare de la turbine Pelton. Cet organe a deux fonctions principales : opérer la transformation d'énergie de pression en énergie cinétique en créant un jet homogène et réguler avec précision le débit en introduisant peu de pertes de charges.

Pour permettre à l'injecteur de remplir correctement ses fonctions, il faut s'inspirer dans sa conception des conclusions tirées au cours des décennies qui ont vu évoluer la turbine. Aux figures 5 et 6 sont représentées les proportions proposées par Thake [5] et Vivier [3] pour un injecteur ayant largement fait ses preuves. En réalité, la littérature propose beaucoup de designs différents, mais qui fonctionnent tous aussi bien les uns que les autres. C'est pourquoi l'injecteur conçu dans le cadre de ce travail respecte les proportions indiquées par ces deux auteurs.

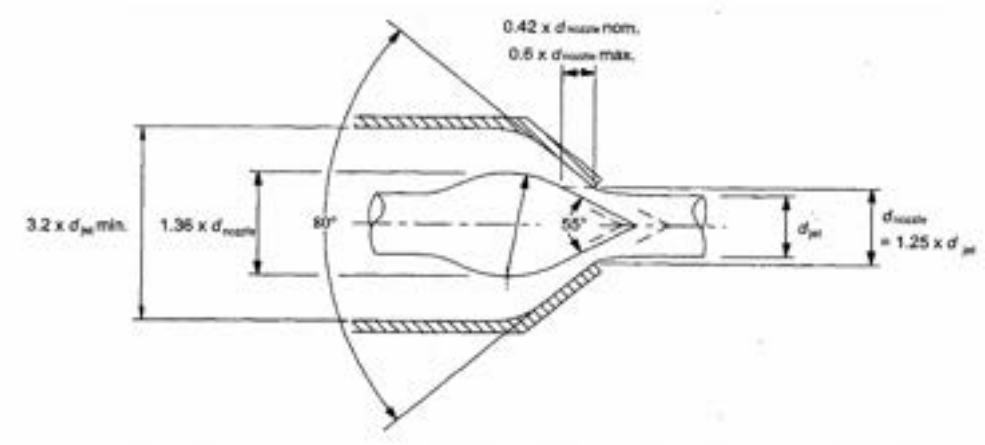


Figure 5 : Injecteur type proposé par Thake [5]

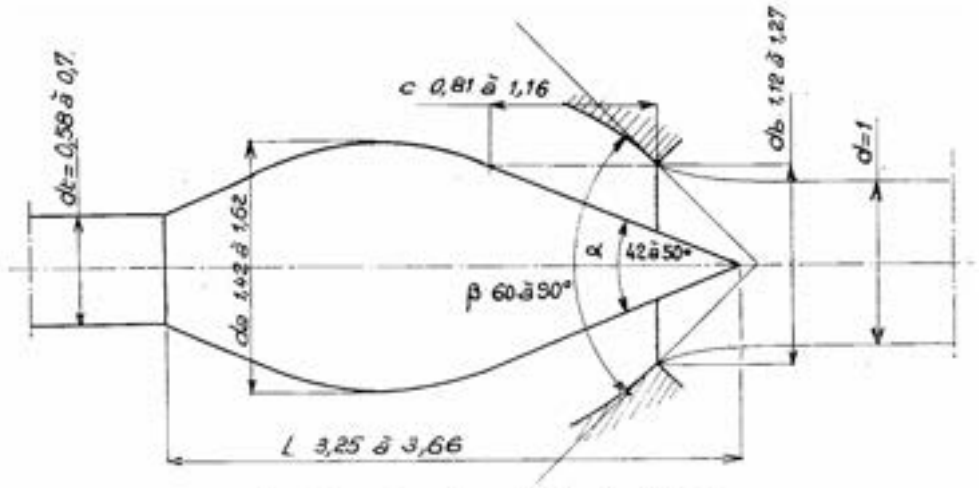


Fig. 3.18. — Proportions de l'aiguille d'injection.

Figure 6 : Pointeau type proposé par Vivier [3]

Certains détails, non énoncés sur les représentations, sont tout de même à souligner. Comme expliqué plus haut, il est capital pour le rendement que l'injecteur crée un jet le plus uniforme et net possible. Une des règles de conception pour obtenir un bon résultat est d'avoir une arête tranchante en sortie d'injecteur (comme schématisé à la figure 6). Or, cette arête sera très vite sujette à de l'abrasion, d'autant plus que l'eau risque d'être légèrement chargée en sable et autres impuretés, ce qui entrainera une rapide dégradation de la qualité du jet. Nous avons donc opté pour une arête « plate » (l'arête de la figure 6 est donc chanfreiné dans notre cas), légèrement moins efficace mais bien plus résistante à l'usure.

L'actionnement des pointeaux se fait par l'intermédiaire de vérins hydrauliques. Le choix de vérins hydrauliques et non électriques est motivé par la sécurité de fonctionnement de la machine. En effet, si le pointeau permet de réguler le débit, il permet aussi de l'annuler complétement. En cas de dysfonctionnement de la turbine (par exemple un emballement de la roue), il faut pouvoir fermer les injecteurs indépendamment de tout problème électrique. Cette fermeture est régie par un ressort qui tend à pousser le pointeau vers le bout de l'injecteur et un étrangleur sur le circuit hydraulique qui évite une fermeture trop brusque afin de ne pas engendrer un coup de bélier dans les conduites.

3.4. Déflecteur

Le déflecteur est un organe de sécurité, il est chargé de dévier le jet hors de la roue Pelton en cas d'emballement de la turbine. Il fonctionne donc de pair avec le pointeau, mais a l'avantage de pouvoir être actionné très rapidement sans aucun risque de coup de bélier et ainsi permettre au pointeau de se refermer doucement par la suite.

La vitesse d'emballement est la vitesse maximale que peut atteindre la turbine lorsqu'elle n'a aucun moyen de dissiper l'énergie qu'elle produit. Ce cas de figure se produit quand la charge sur le générateur devient nulle suite à un dysfonctionnement quelconque dans l'installation électrique.

Cette vitesse est définie comme étant 1,8 $\times N_{nominale}$. Une telle vitesse est susceptible d'endommager la turbine mais surtout le générateur dont les bobinages risquent de céder sous l'effet de la vitesse angulaire élevée. C'est pourquoi la sécurité est généralement enclenchée pour une vitesse 1,25 fois supérieure à la vitesse nominale.

Les deux principaux types de déflecteurs sont représentés ici (voir fig. 7) :

1. Le premier type possède une arête tranchante sur le dessus pour venir couper puis dévier une partie du jet de plus en plus importante au fur et à mesure de la rotation.
2. Le deuxième type s'insère par le dessus du jet. Il suffit de couper environ la moitié du jet pour que l'ensemble de l'eau soit déviée hors de la roue (la pénétration exacte dépendra de la géométrie du déflecteur ; toutefois, de manière générale, une pénétration de 50 % du jet suffit).

La plupart des turbines utilisent le second type car bien que cette solution augmente la distance injecteur-auget, l'action de celui-ci est plus rapide étant donné qu'il suffit de couper seulement une fraction du jet. De plus, en positionnant le déflecteur au-dessus du jet, il protège partiellement celui-ci des gouttelettes d'eau voltigeant dans tout le bâti et pouvant perturber son l'homogénéité.

C'est donc le deuxième type de déflecteur qui a été retenu dans la conception de la turbine.

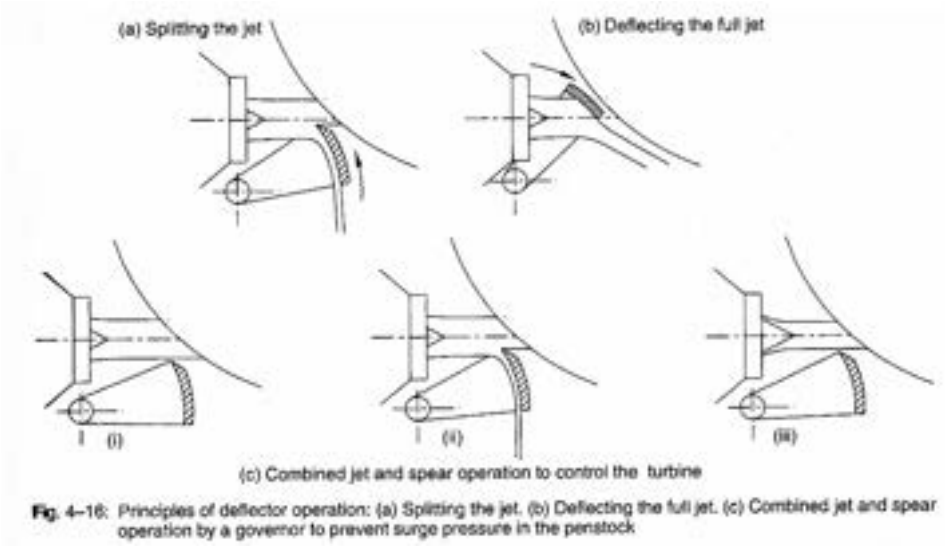


Fig. 4–16: Principles of deflector operation: (a) Splitting the jet. (b) Deflecting the full jet. (c) Combined jet and spear operation by a governor to prevent surge pressure in the penstock

Figure 7 : Types de déflecteurs les plus communs [5]

4. Conclusion

Ce travail débouche sur une conception de turbine Pelton encourageante pour un développement futur. En effet, la cohérence hydraulique et mécanique de la machine est validée par de nombreuses bases de comparaison, tels que les turbines proposées par les autres constructeurs[3], ainsi que par la théorie et les règles de bonne pratique. Cependant, des étapes cruciales de prototypages et essais, suivis inéluctablement par des corrections au design de la machine, sont encore à faire avant que JLA ne puisse proposer une turbine Pelton à la hauteur de sa réputation. Par ailleurs, le choix des matériaux, non exposé dans ce papier, devra être revu pour concorder avec les procédés de fabrication et la sous-traitance.

[3] De nombreuses demandes d'offres pour une turbine similaire ont été faites auprès d'autres constructeurs européens. Cela a permis une rapide étude de la concurrence mais aussi de servir de base de vérification pour la conception de notre turbine.

5. Sources

[1] VERMEULEN, R., *Conception d'une turbine hydraulique de type Pelton à axe vertical*, Mémoire de master, Liège, Belgique : HELMo Gramme, juin 2017, pp.8, 53.

[2] Mhylab, (consulté en septembre 2017), *Mhylab : mini-hydraulic laboratory* Adresse URL : http://www.mhylab.com/r&d/conception-hydraulique.html

[3] VIVIER, L., *Turbines hydraulique et leur régulation* Paris, Albin Michel, 1966, pp. 120, 122, 139.

[4] LODOMEZ, D., *Immersion en entreprise* Rapport technique, Liège, Belgique : Helmo Gramme, février 2014, 50 p.

[5] THAKE, J., *The micro-hydro Pelton turbine manual – Design, Manufacture and Instalation for Small-scale Hydropower* Warwickshire, Practical Acrion, 2000, pp.14, 29, 46, 78.

Quelles alternatives pour le trafic automobile en cas de démolition du viaduc Herrmann-Debroux ?

Ing. P. MAUDOUX
Ing. C. HUENAERTS
ECAM – Bruxelles

Dr Y. HANIN
CREAT – UCL

La ville de Bruxelles est actuellement l'une des plus embouteillée d'Europe. C'est pourquoi la Région Bruxelloise a pour objectif à l'horizon 2040 de réduire de 20% la pression routière entrante et sortante de la capitale. Le viaduc Herrmann-Debroux est situé sur l'un des 6 principaux axes entrants et les autorités régionales souhaitent le remplacer par un boulevard urbain. Cet article propose une étude de solutions de report de trafic face à la démolition du viaduc.

Mots-clefs : parcs relais, viaduc Herrmann-Debroux, pression routière à Bruxelles, réduction des flux de trafic, évaporation de trafic.

The city of Brussels is currently one of the most congested in Europe. This is why the Brussels Region aims to reduce the incoming and outgoing road pressure of the capital by 20% by 2040. The Herrmann-Debroux viaduct is located on one of the 6 main entrances and the regional authorities wish to replace it with an urban boulevard. This article attempts to propose a solution to carry traffic in front of the demolition of the viaduct.

Keywords : Park and ride facilities, viaduct Herrmann-Debroux, road pressure in Brussels, traffic flows reduction, disappearing traffic.

1. Introduction

De nos jours, l'accès à la Capitale est difficile. Afin de résoudre cette problématique, la Région Bruxelloise a dans son Plan Régional de Développement Durable (PRDD, 2017) définit comme objectif à l'horizon 2025-2040 de réduire de 20% la pression routière.

Concrètement, il s'agit de :

- Transformer les 6 principaux axes pénétrant routiers en boulevards urbains (large voie de circulation située dans une ville dont la vitesse est limitée) ;
- Créer 25.000 places de parkings relais (P+R) ;
- Accompagner ces mesures pour éviter le report de trafic dans les quartiers.

La Région de Bruxelles Capitale projette donc de démolir le viaduc Herman-Debroux et de le remplacer par un boulevard urbain. Le viaduc est situé dans la commune d'Auderghem. Il est l'un des éléments de la pénétrante routière venant du Ring 0 et de la E411 Namur-Bruxelles. La figure 1 permet de mieux situer les axes pénétrant la capitale.

Figure 1 : Localisation des 6 axes pénétrant la capitale (Fond de plan : Brugis)

A ce stade les autorités régionales n'ont pas encore arrêté les mesures complémentaires à la démolition du viaduc et les modalités de la transformation en boulevard urbain. Cette transformation réduira substantiellement l'offre routière. Le présent article dresse la synthèse d'un travail de fin d'étude visant à cerner l'ampleur du trafic existant et son évolution probable en cas de démolition. Dans cette perspective, des mesures compensatoires doivent être envisagées, comme par exemple l'implantation d'un parking relais. Un parking relais est un parking connecté à des transports collectifs ou à des réseaux de mobilités alternatifs. Concrètement, les automobilistes ont la possibilité de laisser leur véhicule en entrée de ville et de poursuivre leur trajet, en utilisant un transport alternatif.

Les objectifs principaux des parkings relais sont les suivants : développer le transport public, restreindre l'utilisation de l'automobile, et permettre une redistribution de l'espace urbain.

Mais les parkings relais doivent faire face aux difficultés suivantes :

- Le coût élevé pour la réalisation et l'exploitation d'une telle infrastructure ;
- La nécessité de disposer d'une superficie de terrain suffisante sur site stratégique (en entrée de ville et à proximité du réseau autoroutier existant) ;
- La perplexité des différents acteurs et des pouvoirs publics à propos de l'efficacité de la solution.

2. Infrastructure existante et inventaire des flux de trafic

2.1. Infrastructure existante

Comme représenté sur la figure 2, le viaduc Herrmann-Debroux est l'un des éléments de la pénétrante autoroutière de la E411.

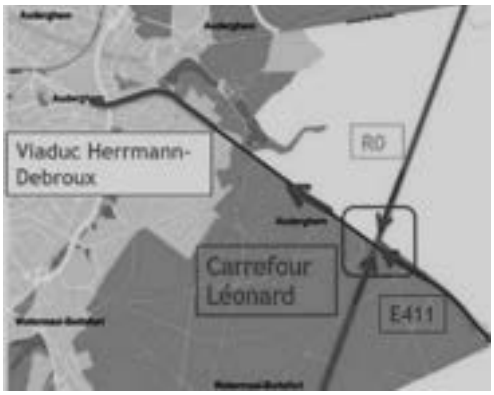


Figure 2 : Carrefour Léonard (Fond de plan : Brugis)

A partir du carrefour Léonard, le tronçon autoroutier comporte dans chaque sens deux voies de circulation automobile et un couloir de bus dans sa traversée de la forêt de Soignes. L'autoroute est au niveau du sol naturel sauf pour le franchissement du chemin des Trois Fontaines où un premier viaduc est aménagé. La figure 3 permet de localiser des éléments importants se situant en amont du Viaduc Herrmann-Debroux, notamment le complexe sportif de l'ADEPS et le site classé du Rouge-Cloitre.

Figure 3 : situation du Viaduc Herrmann-Debroux

Au niveau du site du Rouge Cloître, l'infrastructure routière se divise en une double voie de desserte à deux voies : le viaduc d'une longueur de 950 m et les voiries sous celui-ci.

Le viaduc construit en 1973 est entaché de l'absence d'un permis de bâtir. Il permet de dédoubler la surface réservée aux circulations automobiles, d'offrir en partie une aire de stationnement sous l'ouvrage et d'assurer le franchissement supérieur de trois carrefours dont celui du boulevard du Souverain qui fait partie de la grande ceinture ouest de la capitale.

A hauteur de ce carrefour est implantée la station de métro Herrmann-Debroux de la ligne 5, de même qu'un arrêt de la ligne de tramway 94, ainsi que les arrêts de plusieurs lignes de bus urbains et interurbains.

Depuis le Rouge-Cloître, l'axe autoroutier est bordé d'immeubles, principalement de bureaux, de deux hypermarchés et d'habitations. Le viaduc se termine à hauteur de la station de métro Demey. L'infrastructure autoroutière aboutit ensuite au dépôt des transports urbains de Delta (à proximité du carrefour Cockx-Triomphe), proche du campus des Universités Libres de Bruxelles (ULB-VUB). La figure 4 permet de

mieux visualiser l'itinéraire des véhicules entrant dans la Région Bruxelloise par la pénétrante du Carrefour Léonard.

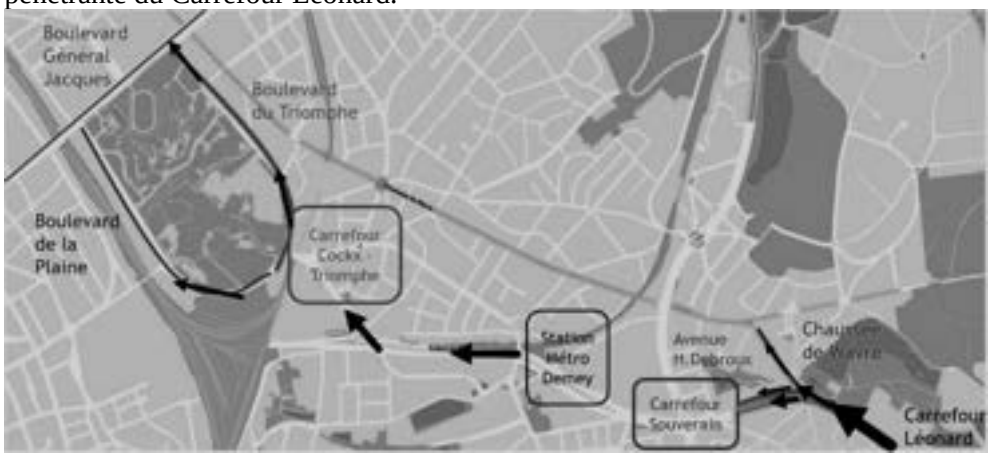


Figure 4 : Itinéraire de la pénétrante via le Carrefour Léonard

Sur le site de Delta, la Région envisage également la construction d'un pôle d'activités qui intensifiera encore le trafic routier dans le quartier. Les autorités bruxelloises ont dès lors décidé d'aménager l'axe routier et de démolir le viaduc à l'horizon 2025.

2.2. Comptage des flux routiers

Selon les responsables de la mobilité (voir page 17 source 5), la capacité d'une voie rapide est de l'ordre 1.800 UVP par heure (Unités Voitures Particulières = somme pondérée des véhicules selon leur encombrement : 1 camion = 2UVP, 1 voiture = 1UVP, 1vélo/moto = 0,5 UVP). On peut donc estimer que le viaduc a une capacité maximale de l'ordre de 3.600 UVP par heure et par sens de circulation.

Selon les comptages réalisés par la Région flamande à l'heure de pointe du matin, en octobre 2016 quelques 3.650 UVP empruntent la E411 depuis le carrefour Léonard vers la Région bruxelloise. Parmi ceux-ci 60,2 % empruntent déjà l'E411 tandis que 23,3 % proviennent du sud via le R0 et 16,4 % du nord via également le R0. La figure 5 permet de visualiser ces flux de même que les 1.950 UVP sortants.

Vu la capacité théorique de 1.800 UVP et la présence à cet endroit d'un couloir de bus et de deux voies de circulation, on peut estimer que cette section de l'infrastructure (à hauteur de la Forêt de Soignes) est saturée.

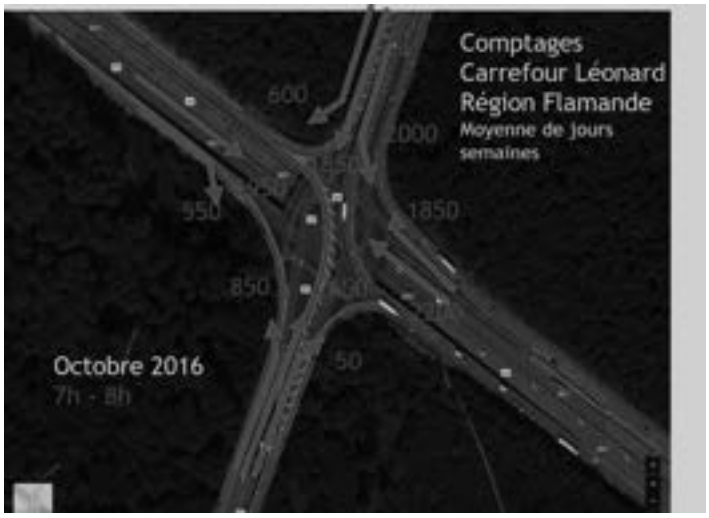


Figure 5 – Source : Michèle Populer – Bruxelles Mobilité

Au sein de la Région de Bruxelles capitale, un recensement quinquennal a été établi par le Service Public Régional entre le 3/10/2012 et le 11/10/2012. Les résultats de ces comptages sont représentés à la figure 6. Ils démontrent que le viaduc supporte un flux entrant d'environ 2.300 UVP à l'heure de pointe du matin alors que l'avenue Herrmann-Debroux (voirie sous le Viaduc) est fréquentée par près de 1.000 UVP. A l'heure de pointe du soir, la pénétrante supporte un peu moins de 3.000 UVP via le viaduc et 1.000 UVP via l'avenue Herrmann-Debroux.

Figure 6 : Modélisation des comptages

Un comptage effectué par la Région de Bruxelles capitale a permis d'examiner la charge de trafic tout au long d'une journée à l'entrée de la Région Bruxelles Capitale. En 2012, on retrouve les estimations de flux aux heures de pointes avec plus de 3.600 UVP entrant et plus de 4.500 UVP sortant. Les estimations pour les autres moments de la journée sont mentionnées dans la figure 7.

2.3. Evolution du trafic ces dernières années

Les graphiques de la figure 7 indiquent une tendance à la diminution du trafic ces dernières années. Cette diminution est plus marquée au matin dans le sens entrant vers Bruxelles (- de 40% du trafic depuis 2003). En revanche, on constate une légère augmentation des navetteurs sortant de Bruxelles au matin.

On perçoit d'emblée que la charge de trafic est très faible entre 23 heures et 5 heures du matin. Elle augmente ensuite dès 5 heures pour les flux entrants et à partir de 6 heures pour les flux sortants. La pointe du matin dans les deux sens est enregistrée entre 7 et 8 heures. Le volume de trafic se tasse quelque peu mais reste important avec quelques 2.000 UVP sortants et entrants entre 10 et 16 heures. La pointe du soir culmine vers 18 heures et ensuite le trafic fléchi pour se limiter à quelques 1.000 UVP par sens en soirée. Quotidiennement, on estime que 40.000 UVP empruntent le viaduc Hermann-Debroux.

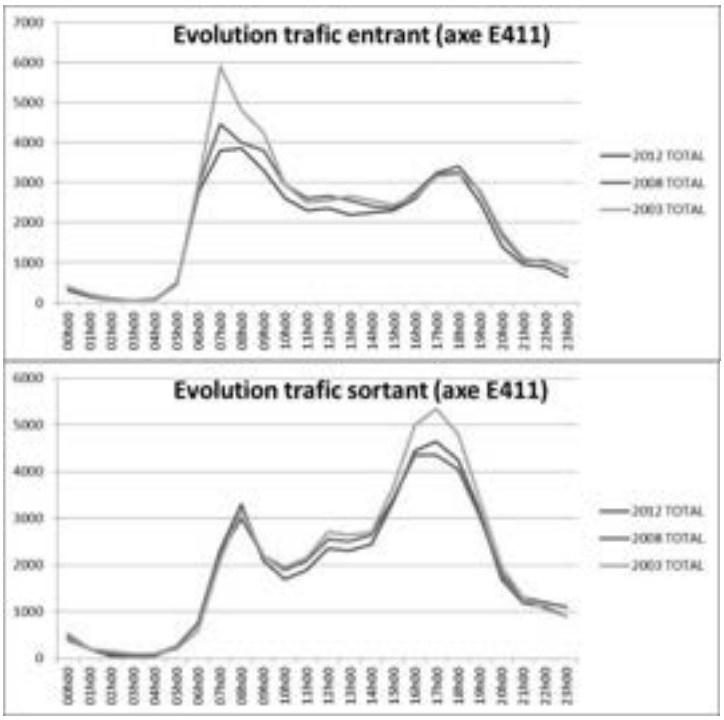


Figure 7 : UVP par heure – Source : Michèle Populer – Bruxelles Mobilité

On peut en déduire qu'il faut apporter des alternatives aux navetteurs entrant dans la capitale au matin mais aussi à ceux qui en sortent. En outre, il est nécessaire de s'interroger sur l'impact des automobilistes se déplaçant en dehors des heures de pointe. Enfin, une dernière réflexion laisse à penser que le futur parking relais ne devrait pas nécessiter d'extension à long terme vu la tendance générale à la diminution du trafic.

3. Impact de la démolition du viaduc et de l'aménagement en boulevard urbain

Pour évaluer la capacité de saturation des voies sous le viaduc, il faut prendre en compte le double rôle du viaduc. En effet, celui-ci permet non seulement un dédoublement des voies mais aussi un soulagement du carrefour du croisement de l'avenue Herrmann-Debroux et du Boulevard du Souverain. Quel que soit le réaménagement du nouveau boulevard urbain, sa capacité de saturation sera limitée par celle de ce carrefour.

Selon les experts (voir page 17 source 1), un boulevard urbain, avec des carrefours gérés par des feux tricolores, a une capacité maximale d'environ 1.500 UVP par heure et par sens de circulation. Si l'on déduit cette offre potentielle à la charge actuelle de la tranche horaire 6h-20h, on peut estimer l'impact de la démolition sur la nouvelle voirie. Cette estimation est représentée en graphique à la figure 8, la ligne horizontale représente la capacité maximale de 1.500 UVP.

Si l'on somme l'ensemble des véhicules journaliers au-delà de la capacité maximale, on obtient 23.350 UVP. On conclut qu'il faut trouver une solution de report de mode pour plus de la moitié de la charge de trafic journalière. Plutôt que de supposer d'emblée que le trafic se réduira encore de 40 % au cours des quinze prochaines années, on opte pour une analyse fine des alternatives.

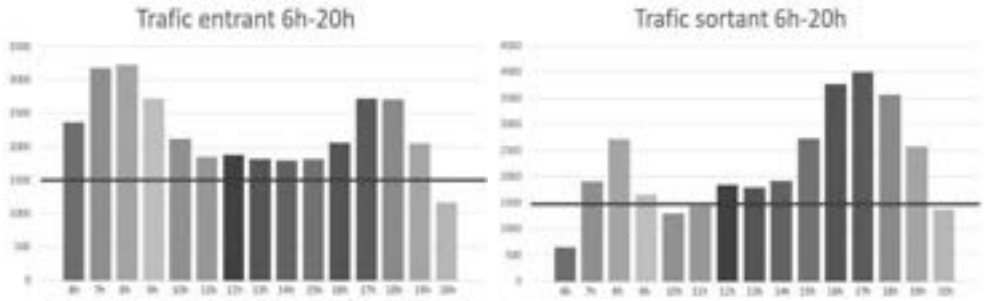


Figure 8 : Nombre d'UVP empruntant par heure le viaduc et les voiries latérales

4. Alternatives pour compenser la réduction de l'offre routière

Avant de prévoir l'implantation du parking relais, il est important de déterminer les autres alternatives envisageables. De la sorte, on pourra réduire le plus possible la taille du parking en mobilisant notamment différentes mesures pour limiter les déplacements individuels motorisés.

Pour déterminer l'offre de report, il faut prendre en compte 2 hypothèses :

- Le RER opérationnel à l'horizon 2025 ;
- Le phénomène d'évaporation de trafic, c'est-à-dire le pourcentage du trafic qui « disparait » naturellement face à un obstacle ;

Pour chaque cas, on émet des hypothèses maximales-minimales afin d'obtenir une fourchette des flux de trafic à l'horizon de la démolition du viaduc et de l'aménagement du boulevard urbain. Il en résulte l'obtention de deux types de scénarios, l'un optimiste et l'autre pessimiste.

4.1. L'offre alternative du RER (Réseau Express Régional)

Pour déduire le nombre d'automobilistes empruntant la pénétrante E411 et qui utiliseraient le RER comme alternative en 2025, on a recensé les parkings présents en amont de la Région de Bruxelles capitale le long de la ligne 161 de la SNCB (voir figure 9).

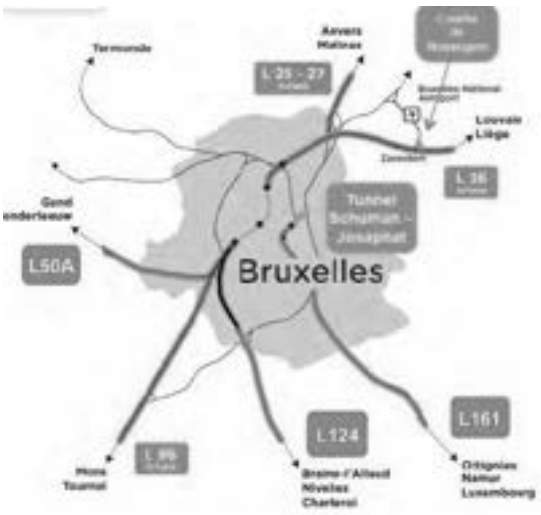


Figure 9 : Projet RER - Source : editionsetseminaires.be

Comme constaté sur la figure 9, la ligne 161 est celle qui emprunte un itinéraire similaire à la E411. Les parkings mis en place dans le projet RER[1] ont permis de recenser un total de 4.815 places de stationnement.

Pour le scénario optimiste, on prend pour hypothèse que 80% de ces parkings seront effectivement remplis par des utilisateurs du futur RER. Cela permet de déduire que 3.852 automobilistes changeront de mode de déplacement et réduiront d'autant la charge en trafic.

Pour le scénario pessimiste, on prend pour hypothèse que seulement 50% de ces parkings seront réellement remplis par des utilisateurs du RER. Cela permet de déduire 2.408 automobilistes changeront de mode de déplacement.

4.2. L'évaporation de trafic comme alternative

L'évaporation du trafic est observée suite à la somme de trois phénomènes : les déplacements sur d'autres axes routiers, le report vers les transports collectifs et le télétravail. On prend en compte l'hypothèse de l'existence d'une campagne promotionnelle favorisant le co-voiturage.

Pour le scénario optimiste, on conclut, après références aux études sur le sujet que l'évaporation du trafic[2] et une campagne en faveur de l'écomobilité permettent, de réduire de 35 % les déplacements. Pour le scénario pessimiste, on conclut que seulement 20 % du trafic peut être réduit.

4.3. Impact des hypothèses

Après avoir pris en compte les hypothèses des alternatives, on obtient une nouvelle estimation du nombre de véhicules qui emprunteraient la pénétrante Herrmann-Debroux en 2025. Ces résultats sont représentés à la figure 10.

On peut conclure que la capacité du futur parking relais (correspondant au surplus de trafic par rapport à la capacité du futur boulevard urbain) doit être de 1.832 places pour un scénario optimiste et de 9.289 places pour un scénario pessimiste.

---

[1] Les nouvelles infrastructures RER en Brabant Wallon, Ir. Henri Detandt,TucRaill/Infrabel

[2] P. Goodwin, C. Hass-Klau and S. Cairns – Evidence on the effects of roads capacity reduction on traffic levels, 1998
OCDE (Orgaisation Française de Coopération et de développement Economiques) publishing : La demande du trafic routier – relever le défi, 2002
CPCP (Centre Permanent pour le Citoyenneté et le Participation), ASBL d'Education permanente reconnue par la Fédération Wallonie-bruxelles

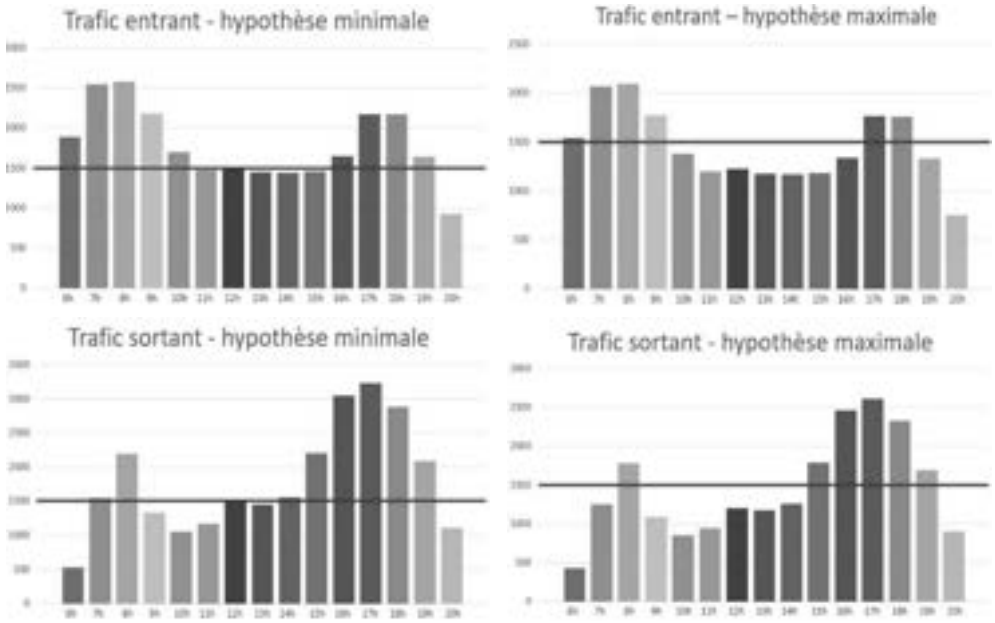


Figure 10

5. La réalisation d'un parking relais

5.1. Le dimensionnement du P+R

Selon les études du CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques), pour que les parking relais soient efficaces, ils doivent répondre aux critères suivants :

- La surface par automobile équivaut à la place de stationnement et aux circulations inhérentes à son accès. Ce qui correspond approximativement à 25 m² par véhicule.
- La capacité optimale est de l'ordre de 1.000 places afin d'atteindre une massification suffisante (optimalisation des coûts de construction, d'exploitation et de report vers les transports en commun). Si le parking n'est pas en ouvrage et contient plus de 1000 places, la distance à parcourir et le temps de déplacement à pied vers le transport public deviennent dissuasifs.

En conséquence, un parking relais de 1.000 places nécessite une surface au sol de l'ordre de 25.000 m² soit 2,5 hectares. Le coût d'un emplacement de parking relais, aménagé sur le sol naturel, est de l'ordre de 3.000 euros (estimation de l'agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise). Le coût de la gestion (entretien, maintenance, sécutité etc) est estimé à 480€/place/an.

Pour augmenter le nombre d'emplacements, l'ouvrage peut être construit sur plusieurs niveaux, mais le coût de l'emplacement devient très onéreux (de l'ordre de 15.000 euros)[3]. A titre d'exemple, on peut se référer au parking RER de Louvain-La-Neuve qui prévoit 30 m² pour une place de parking vu que les mouvements internes nécessitent des couloirs de circulations entre les étages. Dans ce cas la surface plancher est de 30.000 m² pour 1.000 places.

Selon le scénario optimiste, le P+R (parking relais) devrait avoir une capacité de l'ordre de 2.000 places ce qui équivaut à pouvoir disposer d'un terrain de 30.000 m² avec un parking en ouvrage sur 2 niveaux. Par contre, selon le scénario pessimiste, le P+R devrait offrir près de 9.300 places soit un parking en ouvrage de 30.000 m² sur près de 10 niveaux !

5.2. Localisation potentielle du P+R

La localisation du parking relais doit idéalement se trouver : à proximité directe de la pénétrante autoroutière ; en amont du viaduc Herrman Debroux ; à proximité d'un réseau de transports en commun de grande capacité ; à proximité d'infrastructures et équipements connexes qui peuvent utiliser le parking relais en soirée et le week-end ; et sur le territoire de la Région de Bruxelles capitale.

Un examen des sites potentiels a été mené. La figure 11 indique l'emplacement (voir encadré) répondant au mieux à l'ensemble des critères évoqué en amont pour accueillir le nouveau parking relais. Sur ce site, il reste à examiner les surfaces disponibles et constructibles.

Figure 11 – Emplacement idéal

[3] La Revue Foncière, La nouvelle économie du stationnement, 2014

Dans la zone identifiée, on situe, au nord de la pénétrante autoroutière, des terrains de sport du complexe sportif de l'ADEPS et, au sud, des habitats, des bureaux du service public (ADEPS) qui nécessitent des expropriations. Les autres terrains sont considérés à haute valeur biologique ou bien sont protégés (NATURA 2000 et patrimoine des monuments et sites ; Voir figure 12).

Selon le PRAS (Plan Régional d'Affectation du Sol), les terrains sont affectés en : « zone de sport et de loisir en plein air ». Une modification de l'affectation du plan de secteur devrait être envisagée afin d'affecter ces terrains au P+R. Toutefois, il serait peut-être souhaitable de maintenir ces terrains de sports et de créer le parking relais en souterrain.

Le sous-sol à cet endroit est caractérisé par un niveau de nappe assez élevé (voir figure 12). Pour éviter des surcoûts de réalisation il convient de limiter le nombre de niveaux. La surface des terrains de football est de l'ordre de 40.000 m² ce qui est suffisant si les besoins sont de l'ordre de 30.000 m² pour un parking en ouvrage sur 2 niveaux. Par contre, cette superficie est insuffisante dans le cas du scénario pessimiste. Tout au plus, on peut estimer que le site pourrait accueillir au maximum un double parking de 20.000 m² sur 3 niveaux soit une offre de l'ordre de 4.000 places contre les 9.300 nécessaires.

Figure 12 : Source : RRU (Règlement Régional d'Urbanisme)

Le parking souterrain sur 2 niveaux permet de totaliser la surface suffisante et l'aménagement de terrains de sport en toiture. Le maintien des terrains de sports sur le site est sans doute plus improbable dans le cas d'un double parking sur 3 niveaux.

En conclusion, le site potentiel du Rouge Cloître–ADEPS permet de répondre aux besoins estimés selon le scénario optimiste. Un parking relais de 2 niveaux pour 2.000 places nécessiterait un investissement d'environ 30 millions d'euros.

A l'inverse, pour le scénario pessimiste, moins de la moitié des besoins seraient rencontrés. Dans ce second cas de figure, il faudrait donc envisager d'autres alternatives pour réduire la charge de trafic en 2025.

5.3. Connexion aux transports en commun

Le site du Rouge Cloître-ADEPS permet d'offrir un parking de près de 2.000 places. Pour éviter les contraintes dissuasives, il sera donc nécessaire d'optimiser la distance d'accès aux transports alternatifs et garantir des fréquences de desserte élevée. La sécurité des cheminements et la fiabilité du parking devront également être pris en compte. Afin de rendre le parking attractif, il est important de diversifier les transports alternatifs par le biais des connexions suivantes :

- Connexions STIB : Prolongation du métro 5 (Hermman-Debroux – Erasme ; estimation d'un coût minimum de 170 millions d'euros) ; Bus : prolongation des lignes existantes + augmentation de la fréquence ; Bus de Lijn et TEC : prolongation des lignes existantes + augmentation de la fréquence).
- Aire de co-voiturage à prévoir dans le parking.
- Parkings-vélos : permettre une location de vélos électriques et « Villo ».

6. Alternatives complémentaires pour compenser la capacité limitée du P+R

Dans le cas du scénario pessimiste, il est en effet impossible de trouver une surface suffisante sans exproprier et démolir des immeubles. Par ailleurs, une telle taille de parking relais présente de grands risques du point de vue de la rentabilité, tout comme le coût d'une telle infrastructure.

Il faut alors se tourner vers d'autres solutions. On propose les pistes de réflexion suivantes :

- Implantation de plusieurs P+R plus petits en amont le long de l'axe du R0 et de la E411 disposant de connexions avec un système de bus rapide (bandes réservées sur le Ring et autoroutes).
- Système de bus avec un site propre dans la zone RER desservant des stations tous les 500 à 700 mètres (à l'image du Transmilieno en Amérique du Sud[4])
- Bandes de circulation exclusives pour le co-voiturage sur les axes R0 et E411

[4] Jean Paul LERIVEREND, CGEA-Connex, Les potentialités su système Trasmilenio du bus en site propre de Bogota en Colombie

7. Critique des parkings relais

Comme déjà constaté, la volonté de la Région Bruxelloise de créer 25.000 places de parkings de transit n'est peut-être pas la solution la plus pertinente. Ce constat est d'ailleurs renforcé par des études[5] qui montrent les effets négatifs des parkings relais. D'abord, certains usagers stationnant plus en amont de la périphérie des grandes villes vont désormais se rendre dans le parking relais qui est plus proche du centre-ville. Ensuite, d'autres usagers qui avaient opté pour des transports alternatifs (vélo, marche, RER etc) vont désormais utiliser leur voiture pour se rendre au P+R. Et enfin, il s'avère que la plupart des places de stationnement des parkings relais sont utilisées par des riverains ou des personnes dont le lieu de travail est à proximité. Cette dernière catégorie de personnes utilise le parking relais comme un parking de destination et non de transfert modal, ce qui est contraire à l'objectif recherché.

Afin de permettre au parking relais d'atteindre les objectifs voulus, il est primordial de mettre en place diverses conditions, dont voici les plus importantes :

- Le parking doit fournir un gain de temps et d'argent à l'usager (tarification attractive pour une connexion avec les transports alternatifs afin d'éviter que ce parking soit un parking de destination).
- La fréquence des transports en commun doit être inférieure à 15 minutes.
- L'usager doit pouvoir être informé en temps réel des places restantes, des correspondances avec les transports en commun, ainsi que du temps d'accès à ces derniers.
- La sécurité du parking doit être certifiée.
- Le stationnement en centre-ville doit être dissuasif (restriction des emplacements, augmentation des coûts, etc).
- Le parking relais ne doit pas être trop grand pour éviter la congestion du trafic en entrée/sortie du parking.

Une dernière considération est l'éventuelle reconversion de notre parking relais. Il l'est d'autant plus à envisager en considérant sa grande taille. En effet, vu la prise de conscience écologique actuelle, il semble réaliste de prévoir qu'à l'avenir les modes de déplacement vont changer. Les déplacements individuels motorisés vont faire place à des solutions plus durables et préférablement avec une emprunte carbone moindre. Mais que faire alors de ces kilomètres carrés d'asphalte destinés au stationnement ?

[5] Les effets pervers des parcs relais Frédéric HERAN, chercheur à l'IFRESI-CNRS, 2003
Créer des parkings de dissuasion à Bruxelles, une fausse bonne idée – ASBL ARAU, 2017

8. Conclusion

La volonté de la Région Bruxelloise, de réduire les déplacements individuels motorisés en créant des parkings relais et en réaménageant l'espace urbain, est une prise de conscience louable. En effet, cela permettrait de réduire les embouteillages dans la capitale et d'améliorer la qualité de vie des navetteurs. Ils seraient moins soumis au stress et également plus efficaces au sein de leurs entreprises.

Mais avant de concrétiser de tels changements, cet article a démontré l'importance de réfléchir à l'impact de ce bouleversement sur le paysage urbain. Il faut en effet trouver des solutions de report de mode de transports pour les nombreuses personnes empruntant le Viaduc Herrmann-Debroux.

La solution proposée est basée sur un système d'hypothèses maximales et minimales donnant lieu à deux types de scénarios :

- Le premier permet de résoudre la problématique en optant pour l'utilisation des transports en commun et notamment du RER, de la promotion du télétravail et du co-voiturage, ou encore de l'étalement des horaires de travail des navetteurs ;
- Tandis que l'autre scénario permet de constater les inconvénients des parkings relais et l'importance primordiale de rendre le parking de transit attractif et rentable. Sans oublier qu'il faut également étudier des connexions avec les transports alternatifs. Celles-ci doivent permettre d'optimiser la distance d'accès et le temps d'attente.

Pour finir, les moyens que souhaitent mettre en œuvre la Région Bruxelloise ne sont peut-être pas les plus pertinents mais il faudrait des études plus précises sur les déplacements des navetteurs et surtout sur la rentabilité de telles infrastructures avant de pourvoir réellement poser un jugement.

9. Sources

[1] *Guide Carrefours urbains - Janvier 1999*, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, (consulté le 04/05/2017)
Adresse URL :
dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0001/Dtrf-0001930/DT1930.pdf

[2] *Les parcs relais urbains - Etude bibliographique – 2010*, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (fournis par Bruxelles Mobilité)

[3] *Impact du cycle de feux sur la capacité, l'acceptabilité de l'attente aux feux et la sécurité rapport d'étape phase 1 - Décembre 2014*, CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), (consulté le 11/05/2017)
Adresse URL :
http://www.territoires-ville.cerema.fr/IMG/pdf/141215impact cycles de feux sur capacite acceptabilite securite cle5ce45e.pdf

[4] Comptages cordons fournis par Bruxelles Mobilité, Service Public Régional de Bruxelles

[5] JEAN-MARC CHAUVIN, *Réserve de capacité d'un itinéraire - méthode de calcul - mai 2002*, Centre d'études techniques de l'équipement Normandie-Centre et Service d'études techniques des routes et autoroutes, (consulté le 13/05/2017)
Adresse URL :
http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0003/Dtrf-0003086/DT3086.pdf?openerPage=notice

[6] *Plan Régional de Développement Durable - soumis à enquête en 2017*, Région de Bruxelles Capitale, (consulté le 20/02/2017)
Adresse URL :
www.prdd.brussels/documents

[7] *Plan de transport 2017 SNCB - Rapport d'analyse - Cellule Ferroviaire - Mars 2017*, Service Public de Wallonie direction générale opérationnelle de la mobilité et des voies hydrauliques - Département de la stratégie de la mobilité, (consulté le 6/04/2017)
Adresse URL :
http://mobilite.wallonie.be/_les/politiques%20de%20mobilit%C3%A9/politique%20ferroviaire/plan%20de%20transport%202017/RAPPORT-Plan-de-Transport-2017.pdf

Caractérisation d'un extrait de café vert en vue du développement d'une boisson à vertu énergisante

Ing. N. LEBEAU
Ing. C. SAUSSEZ
Dr Ir V. JERKOVIC
CERISIC – Mons

Le présent projet a pour objectif la mise au point d'un extrait végétal à partir d'une mouture de café vert et, à partir de cet extrait, la formulation d'une boisson énergisante. L'article rédigé fait état du projet à mi-parcours et présente les étapes mises en place en vue d'obtenir un extrait de café vert concentré, limpide et stable.

Mots clefs : café vert, caféine, boisson énergisante, extrait végétal, acide chlorogénique, antioxydant

This project is about the development of a vegetal extract from ground green coffee and the formulation of an energy drink from this extract. This article talks about the progression of the project who is at its mid-point. The different steps will be shown to obtain a concentrated, clear and stable green coffee extract.

Key words : green coffee, caffeine, energy drink, vegetal extract, chlorogenic acid, antioxidant

1. Introduction

Le projet CAVENAT est un projet FIRST Haute École développé au CERISIC, le Centre d'Etudes et de Recherche des catégories agronomique, paramédicale et technique de la Haute École Louvain en Hainaut. Ce projet vise le développement d'une boisson énergisante à partir d'une mouture de café vert.

Le café est une boisson très populaire. En Belgique, c'est l'équivalent d'un peu plus de 1,1 milliard (2014) de dollars US de café vert qui sont importés par an [1] ce qui positionne la Belgique en cinquième position sur la liste des plus grands importateurs de café.

Le café, pour être consommé, est traditionnellement torréfié, moulu et infusé. Cette préparation a vu son côté marketing exploité de long en large avec, par exemple, l'apparition, cette dernière décennie, des pads et autres capsules de café. Mais qu'en est-il de la préparation en tant que telle ?

Le but du projet est de revenir aux origines du café en exploitant le café vert brut, sans torréfaction, afin de développer une nouvelle boisson. Cette boisson exploiterait le café en tant que source énergisante, grâce à la caféine présente, mais également en tant que source d'antioxydants grâce aux nombreux polyphénols et acides-phénols que le café vert contient [2].

L'élaboration de l'extrait est réalisée à l'aide d'un outil initialement prévu pour le brassage : le Braumeister. L'extraction à l'aide du Braumeister est optimisée afin d'extraire le maximum de composés d'intérêts de la mouture de café vert. Trois paramètres sont envisagés afin d'atteindre cet objectif : la température, le pH ainsi que la présence ou l'absence d'un gaz inerte en vue de protéger l'extrait de l'oxydation.

Une fois ces paramètres optimisés, une problématique est apparue : la formation progressive d'un trouble au froid, observée lors de la conservation de l'extrait. Cet article aborde la nature de ce trouble ainsi que la méthode mise en place pour l'éliminer.

2. Partie bibliographique et développement de méthodes d'analyses

2.1. Le café vert

Le café vert est l'état du grain n'ayant pas subi de torréfaction. La torréfaction est un processus thermique appliqué au grain de café. Ce processus a lieu à haute température, entre 200 et 300 °C pendant une vingtaine de minutes, et apporte au café ses arômes torréfiés. Lors de ce processus, un grand nombre de molécules sont décomposées. Certaines de ces molécules ont des propriétés bioactives [3].

Trois molécules bioactives retiennent l'intérêt quant à l'utilisation du café vert :

- La caféine : elle est à l'origine de la propriété énergisante du café. Elle est présente à une teneur comprise entre 0,5 et 3,5% de la masse sèche.
- La trigonelline : cette molécule fait l'objet d'études multiples et montre des effets bénéfiques dans de nombreuses maladies tels que le diabète et des maladies du système nerveux central [4]. Elle représente environ 1% de la masse sèche.
- L'acide chlorogénique : c'est un acide-phénol dont la propriété principale est son pouvoir antioxydant important [5].

De ces trois molécules bioactives, la trigonelline et l'acide chlorogénique sont en grande partie dégradés lors de la torréfaction. L'extraction à partir de la mouture de café vert est mise en œuvre en vue de récupérer ces molécules et de les valoriser dans un extrait végétal d'abord et dans une boisson ensuite.

Ces trois molécules bioactives identifiées, une méthode de dosage est envisagée en vue de suivre la concentration de ces différents composés. Ces dosages sont réalisés grâce à une méthode HPLC.

2.2. Méthode de quantification par HPLC-UV

Lors de recherches bibliographiques visant à déterminer une méthode de dosage de la caféine, de la trigonelline et des acides chlorogéniques, une technique de chromatographie liquide à haute performance (HPLC) a été identifiée pour séparer et doser ces trois composés. La technique HPLC étant maîtrisée au CERISIC, ce choix a été retenu. La technique de chromatographie appliquée ici est dite de l'« ion pairing » ou appariement d'ions [6].

Principe :

Cette technique permet de séparer sur une colonne de phase inverse (colonne apolaire) à la fois des composés polaire et apolaire.
L'« ion pairing » joue sur l'ajout, dans la phase mobile, d'un sel possédant une partie polaire et apolaire. Un des sels répondant à cette exigence est le sel de sodium de l'acide octane sulfonique (figure 1).

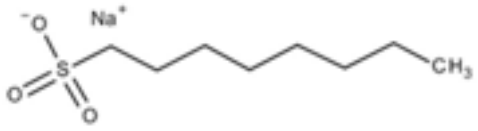


Figure 1 : formule du sel de sodium de l'acide octane sulfonique

Lorsque la phase mobile contenant ce sel est délivrée sur une colonne de phase inverse, la partie linéaire des ions octane-sulfonique interagi avec la phase stationnaire de la colonne. Cette dernière est alors remaniée de façon provisoire afin de pouvoir interagir avec des molécules polaires, mais également apolaires. En effet, tous les sites de la phase stationnaire ne sont pas saturés par le sel, ce qui permet de garder une liberté d'interactions entre la phase stationnaire et les molécules apolaires. L'acide chlorogénique et ses isomères sont détectés à 220 nm et la trigonelline et la caféine sont détectés à 320 nm. Les résultats sont traités par l'intermédiaire d'une droite d'étalonnage réalisée à l'aide des standards correspondant aux trois composés : la caféine, la trigonelline et l'acide chlorogénique.

2.3. Quantification par la méthode du Biuret

Il est nécessaire de préciser que 8 à 12 % de la masse sèche du café se trouve être des protéines et des peptides [7]. Une partie de ces protéines, suite à l'extraction aqueuse, se retrouve en solution dans l'extrait. La méthode du Biuret permet de quantifier ces protéines en solutions.

La méthode du Biuret est une méthode permettant de quantifier, à l'aide d'une droite d'étalonnage, la concentration en protéine présente dans une solution. La méthode est basée sur l'interaction qui peut exister entre un ion cuivrique et les protéines. L'importance de leur interaction est quantifiée selon une méthode colorimétrique et mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre.

Principe :

Lorsqu'un ion cuivrique se trouve en milieu alcalin en présence de protéines, un complexe se forme entre l'ion cuivrique et les doublets non liants des azotes aminés présents au niveau des protéines. Le complexe formé est de couleur violette (absorbance maximale à 540 nm) tandis que l'ion seul présente une coloration bleue, n'interférant pas avec l'absorbance du complexe. Le réactif mis en œuvre pour la réaction est le réactif de Gornall. Ce dernier est une solution alcaline qui se compose de sulfate de cuivre pentahydraté, de tartrate sodico potassique et d'iodure de potassium [8].

L'inconvénient de cette technique est qu'elle est peu sensible, elle ne réagit qu'aux concentrations importantes de protéines (de l'ordre du gramme par litre) et elle est soumise à des interférences avec, notamment, les polyphénols. L'avantage de cette méthode est qu'elle est peu spécifique et qu'elle réagit donc de la même façon pour l'ensemble des protéines.

Le café vert est une source de composés phénoliques dont les acides chlorogéniques sont les représentant majoritaires. Dès lors, il s'avère nécessaire de préparer l'échantillon d'extrait de café vert afin d'en supprimer ces composés phénoliques. La méthode retenue pour séparer les composés phénoliques des protéines est l'extraction sur phase solide C18 (solid phase extraction en anglais, acronyme : SPE). Le principe est celui de la chromatographie préparative : les composés apolaires sont retenus sur une phase stationnaire apolaire de type C18 (chaînes de 18 carbones permettant de retenir les composés apolaires sur la phase solide). Au contraire, les composés polaires, entre autres les protéines solubles dans le cas de l'extrait, sont élués à travers la phase solide sans être retenus. Cette méthode permet ainsi de récupérer les protéines solubles présentes dans l'extrait et de les doser par la suite par la méthode du Biuret.

3. Obtention de l'extrait végétal

3.1. Optimisation de l'extraction végétale

Évaluation de l'extraction en fonction de la présence de gaz inerte

Différentes cinétiques d'extractions ont été réalisées. Celles-ci permettent d'analyser le comportement des molécules d'intérêts au cours de l'extraction. Elles permettent de mettre en évidence différentes grandeurs d'importances : la concentration maximale atteignable avec un jeu de paramètres donnés, la durée de l'extraction afin d'atteindre cette valeur maximale ainsi que la détérioration potentielle de molécules d'intérêt.

Cinétique d'extraction sans gaz inerte

Une première cinétique d'extraction a été réalisée sans bullage d'azote, et ce afin de vérifier une hypothèse : l'oxygène présent dans l'eau d'extraction ainsi que dans l'atmosphère du Braumeister peut nuire à l'extraction de certaines molécules d'intérêts. Seul le graphique de la cinétique d'extraction de l'acide chlorogénique (figure 2) est présenté, mais les autres composés présentent une allure de courbe similaire.

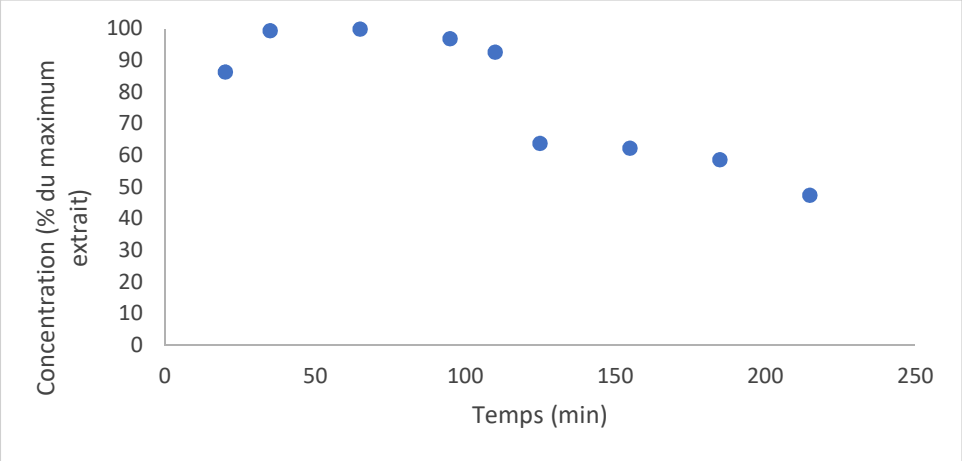


Figure 2 : Cinétique d'extraction de l'acide chlorogénique au cours du temps en absence de gaz inerte

Cette cinétique d'extraction, pour un jeu de paramètres donné en milieu non protégé, montre que, après une heure, la concentration maximale en acide chlorogénique est atteinte et qu'une dégradation progressive a lieu à partir de ce moment. Si une dégradation a lieu à partir du moment où la concentration maximale est atteinte, il est très probable que cette dégradation ait déjà lieu pendant la phase montante de l'extraction. Une partie de l'acide chlorogénique est déjà perdue.

Cinétique d'extraction avec bullage d'azote au sein de l'eau d'extraction

L'objectif est donc de protéger l'extrait. Le bullage d'azote a été choisi comme première approche (figure 3). Mis à part ce bullage, les autres paramètres sont inchangés.

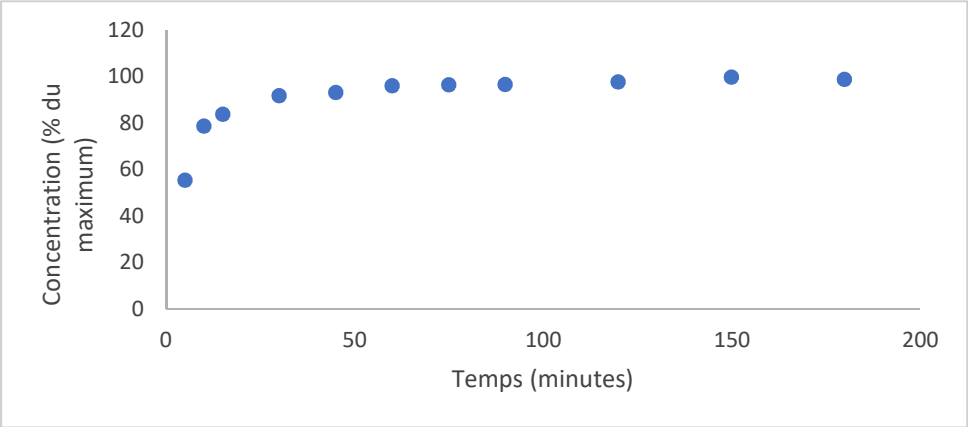


Figure 3 : Cinétique d'extraction de l'acide chlorogénique au cours du temps en présence de gaz inerte

La conclusion qui se dégage de cette extraction est qu'il n'y a plus de dégradation des composés avec le bullage d'azote. En conséquence de quoi, une concentration plus importante d'acide chlorogénique, mais également des autres composés d'intérêts, est atteignable en protégeant l'extrait de l'oxydation. L'hypothèse de départ, prônant la dégradation des acides chlorogéniques sans protection contre l'oxydation, est vérifiée. L'utilisation de l'azote pour protéger l'extrait est conservée.

Évaluation de l'extraction en fonction de la température à un pH donné

Les paramètres de cette expérience sont les suivants :

- Le pH : il est abaissé à l'aide d'acide citrique.
- Le temps d'extraction : il est fixé suite aux cinétiques d'extractions réalisées.
- Le volume d'eau introduit.
- La quantité de mouture de café vert introduite
- Le bullage à l'azote afin de préserver l'extrait de l'oxydation.

En réalisant neuf expériences sur un même lot de café vert (3 expériences pour 3 températures testées : T1, T2 et T3 où T1 < T2 < T3), une valeur moyenne de concentration des différents analytes a pu être définie et avec elle, des valeurs d'écart-type, et ce pour les trois températures testées. Les valeurs d'écarts-types représentent donc l'influence de la méthode d'extraction, de la méthode de préparation des échantillons et de l'analyse HPLC réalisée. Les résultats sont illustrés à la figure 4 pour un analyte, la trigonelline.

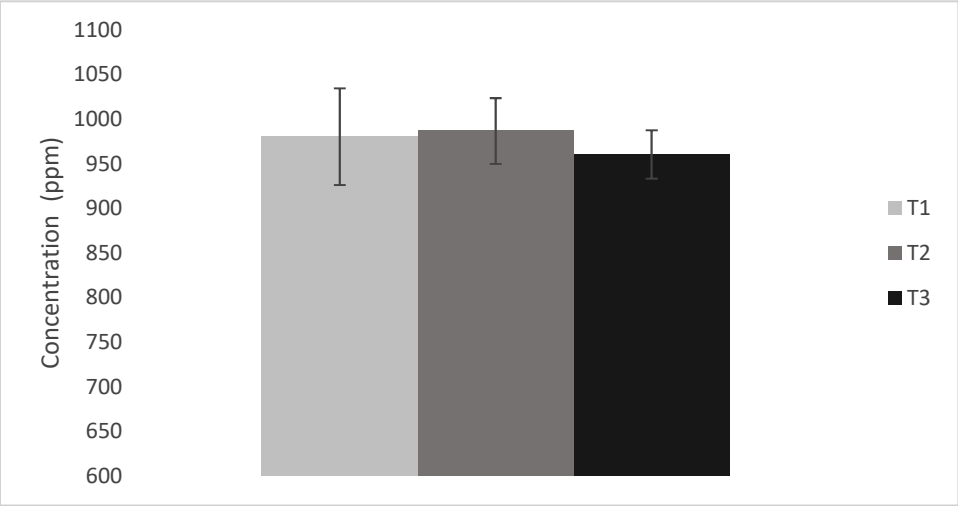


Figure 4 : graphique de la concentration moyenne en trigonelline : test de 3 températures d'extractions

Une étude visuelle des graphiques indique que l'ensemble des résultats, en considérant les écarts-types, se trouvent dans la même gamme de concentration. Une analyse statistique de ces résultats permet de confirmer cette observation, une analyse de la variance par la loi normale (ANOVA) est réalisée. Un test T de Student permet par la suite de montrer que les moyennes ne sont pas significativement différentes les unes des autres.

La conclusion qui se dégage de ces différents tests et observations est que la variation de température n'a pas d'impact sur la concentration en analytes : la température la plus faible évaluée, T1, est suffisante que pour extraire le maximum de composés de la mouture de café vert. Cette température sera donc retenue pour l'ensemble des extractions réalisées ultérieurement.

Évaluation de l'extraction en fonction du pH à une température donnée :

La même démarche est entreprise afin de visualiser l'influence du pH de l'eau d'extraction sur les concentrations finales d'analytes d'intérêts : Les paramètres fixés pour cette expérience sont :

- La température : elle est maintenue à T1 suite aux tests sur la température.
- Le temps d'extraction : il est fixé à la suite des cinétiques d'extractions réalisées.
- Le volume d'eau introduit.
- La quantité de mouture de café vert introduite.
- Le bullage à l'azote afin de préserver l'extrait de l'oxydation.

De la même manière que pour la température, neuf expériences sur un même lot de café vert (3 expériences pour 3 pH testés : un pH acide, un neutre et un dernier basique) ont été réalisées et les valeurs moyennes de concentration des différents analytes ont pu être définies et avec elles, des valeurs d'écarts-types. Ces valeurs d'écarts-types représentent donc l'influence de la méthode d'extraction, de la méthode de préparation des échantillons et de l'analyse HPLC réalisée. Les résultats sont illustrés à la figure 5 pour un analyte, la trigonelline.

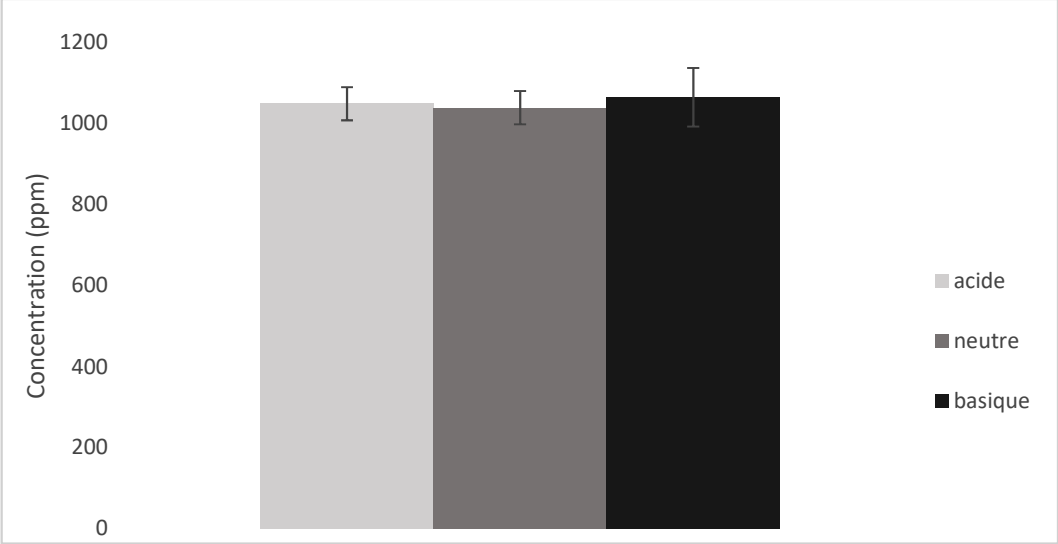


Figure 5 : Graphique de la concentration moyenne en trigonelline : test de 3 pH d'extractions

Comme dans le cas de la température, les valeurs ne divergent ni concernant les moyennes ni sur l'importance de leurs écarts-types. Les mêmes tests statistiques (ANOVA et T de Student) ont été réalisés afin d'appuyer ces résultats. Ces deux tests permettent de dire que les trois moyennes ne sont pas significativement différentes.

Ainsi, comme pour la température, le pH n'influence pas significativement l'extraction des différents composés d'intérêts (ces différents tests ont été réalisés également pour la caféine et les acides chlorogéniques).

Le pH de travail peut donc être défini comme celui le plus à même de répondre aux exigences du futur produit. Un pH acide permet de limiter le développement de moisissures et de certaines bactéries [9] dont des pathogènes tel que Salmonella. C'est pourquoi un pH acide sera utilisé pour la suite des extractions.

3.2. Le trouble au froid

Nature du trouble au froid

L'extrait obtenu, ce dernier est conservé à 4°C. Lors de cette conservation, un trouble, formant progressivement un dépôt, apparait. Des recherches bibliographiques ont eu lieu afin d'identifier la nature de ce dépôt et ont mis au jour le fait que la présence de protéine dans l'extrait pouvait être responsable de la précipitation, et ce en interagissant avec les polyphénols présents. Cette hypothèse est tirée de travaux traitant de la formation de sédiments réversibles et irréversibles dans le thé vert [10]. Certains de ces sédiments (réversibles) sont formés de polyphénols, de caféine, de protéines et d'autres substances minérales.

L'hypothèse formulée est celle d'une casse protéique. En effet, le café contient de 8 à 12 % de protéines [7]. La partie soluble de ces dernières est donc susceptible de passer en solution lors de l'extraction. Or le café vert contient également des tannins et autres composés phénoliques susceptibles de précipiter les protéines, expliquant la formation de ce trouble. Différents tests ont été mis en place afin de définir sa nature.

1) Déstabilisation du pH

Un premier moyen de visualiser la présence de protéines dans une solution consiste à modifier le pH de cette dernière. Les protéines ont leur maximum de solubilité à un pH bien précis. Ce pH est nommé point isoélectrique d'une protéine. Au point isoélectrique, la protéine est sous sa forme zwitterionique, sa forme neutre, elle est ainsi solvatée de manière maximale. Lorsque le pH est modifié de ce point isoélectrique, la protéine perd en solvatation, ce qui provoque la déstabilisation de la solution, la précipitation des protéines.

Protocole expérimental :

Ce test est mis en œuvre en ajoutant, dans le cas du café vert, un acide à l'extrait. Cet acide est de l'acide lactique alimentaire à 80 % W/V. Le pH de la solution est modifié jusqu'à atteindre le pH acide sélectionné. En effet, malgré la mise à pH de l'eau d'extraction, en fin de processus, l'extrait présente un pH plus élevé qu'au départ et peut être abaissé.

Observations :

Lorsque le pH de l'extrait est modifié, il est observable que la solution présente une déstabilisation et une nette précipitation. Cette précipitation ne prouve pas pour autant que les protéines soient en cause de la déstabilisation observée dans l'extrait frais, mais elle vient alimenter la réflexion dans ce sens.

Une donnée supplémentaire vient appuyer cette hypothèse : l'analyse des composés d'intérêts par HPLC. Le traitement des données de cette analyse (illustré à la figure 6) montre que malgré la précipitation due à l'acidification, les concentrations des différents composés d'intérêts restent inchangées ou varient de manière non significative. Ceci démontre que ni les alcaloïdes (caféine et trigonelline) ni les acides-phénols (les acides chlorogéniques) ne sont impliqués dans cette précipitation.

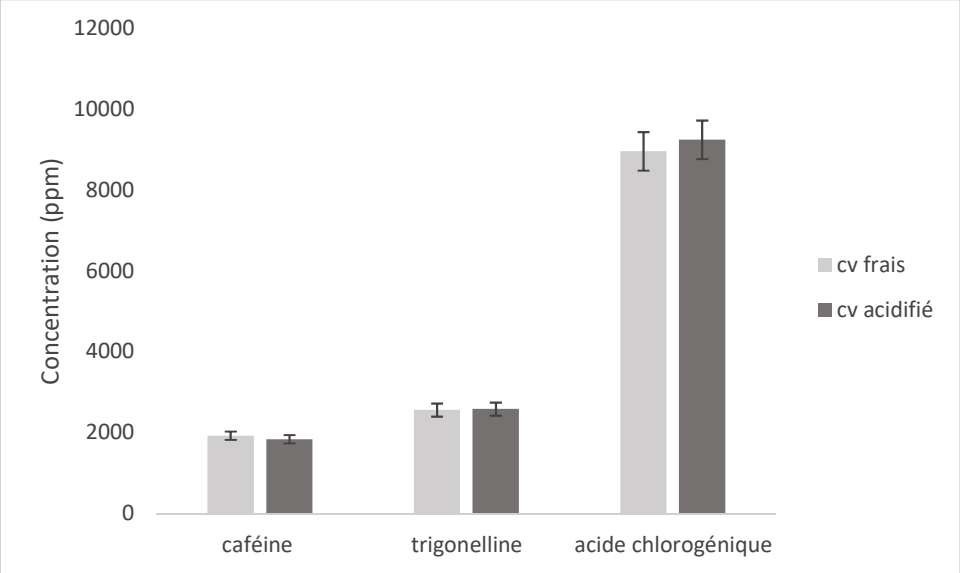


Figure 6 : Concentration des différents composés d'intérêts : échantillon de café vert frais et acidifié

2) Précipitation à l'acide tannique

Une deuxième manière de révéler la présence de protéines consiste en l'ajout d'acide tannique. En effet, les tannins réagissent avec les protéines et précipitent. Les interactions tannin/protéines dans l'extrait sont d'ailleurs une hypothèse quant à l'existence du trouble dans l'extrait frais.

Principe :

L'acide tannique, molécule formée d'acide gallique et de glucose, est un polyphénol faisant partie de la famille des tannins. Cette molécule, comme les autres tannins, a la capacité de précipiter les protéines en solution. La précipitation a lieu suite aux interactions qui peuvent exister entre tannins et protéines. Ces interactions sont de types pont hydrogène et de Van Der Waals (liaison hydrophobe). Ces liaisons provoquent ainsi la formation d'un complexe protéines/tannins qui précipite.

Cependant, les recherches bibliographiques ont montré que les polyphénols, dont l'acide tannique, peuvent réaliser des complexes également avec les alcaloïdes [11] dont font partie la caféine et la trigonelline. La précipitation induite par l'ajout d'acide tannique implique donc également la précipitation de caféine et de trigonelline. La formation du précipité ne permet donc pas directement de mettre en évidence la présence de protéine.

Manipulations et Observations :

La réaction est réalisée en ajoutant 250 µl d'acide tannique à 30% W/V à 10 ml d'extrait de café vert. Un second ajout de 250 µl est réalisé après centrifugation et élimination du culot.

La mise en œuvre de la réaction permet de constater la formation quasi instantanée d'un précipité. Ce précipité, comme dit précédemment, est non seulement un précipité formé par l'acide tannique et les protéines, mais également par les alcaloïdes que sont la trigonelline et la caféine.

Cependant, des tests à différentes températures ont été réalisés. L'hypothèse de travail est qu'en fonction de la température, l'acide tannique va préférentiellement précipiter la caféine ou les protéines. L'analyse HPLC du surnageant est alors réalisée et les résultats analysés (figure 7).

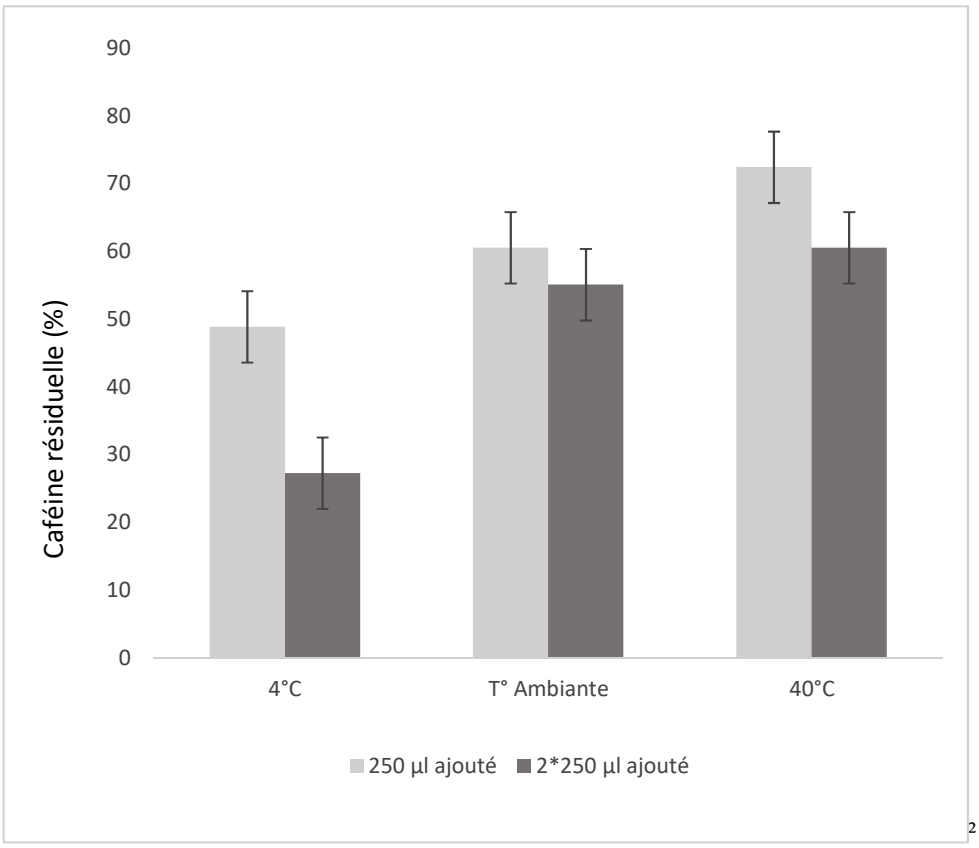


Figure 7 : Pourcentage de caféine résiduelle suite à différents tests de précipitation à l'acide tannique sur l'extrait de café vert

La caféine réagit avec l'acide tannique, et ce de manière différente en fonction de la température du milieu réactionnel (figure 7). La caféine perd, à faible température, plus de 50 % de sa concentration initiale suite à l'ajout de l'acide tannique. Il est à noter qu'après ce premier ajout, une clarification de l'extrait est observée. Un second ajout permet de clarifier d'autant plus l'extrait en enregistrant cependant de nouvelles pertes en alcaloïdes.

En conclusion, une précipitation a bien lieu lorsque l'acide tannique est ajouté à l'extrait de café vert. Précipitation qui entraîne également une clarification de l'extrait. Malheureusement, cette précipitation emporte avec elle une quantité non négligeable d'alcaloïdes. Aucune méthode permettant la différenciation entre le précipité protéique présumé et d'alcaloïdes n'a été mise en place.

Élimination du trouble : la filtration tangentielle

En conservant l'hypothèse de départ, à savoir l'origine protéique du trouble, une des possibilités pour le supprimer consiste en une filtration tangentielle, plus précisément, en une microfiltration. Les recherches bibliographiques ont démontré que les protéines solubles majoritairement présentes dans le café vert se retrouvent sous forme hexamèrique, ayant un poids moléculaire de plus de 300 kDa [12]. À partir de cette donnée, le seuil de coupure de la membrane nécessaire à la filtration de l'extrait végétal est connu.

Observations :

La première observation est que la filtration tangentielle une fois réalisée permet d'obtenir un extrait limpide. Cette clarification est due au fait que l'ensemble des molécules en suspension ont été retenues sur la membrane ainsi que l'ensemble de la fraction des composés solubles supérieurs à 300KDa, environ 0,3 µm, dont une grande partie des protéines contenues dans le café vert.

Au-delà de la clarification, il est nécessaire de vérifier que l'extrait reste stable dans le temps et que la filtration réalisée est bien suffisante à neutraliser l'apparition du trouble. Une conservation à 4 °C a été réalisée pendant 1 semaine, aucun dépôt n'est à déplorer et l'extrait conserve sa limpidité. L'extrait est ensuite analysé par HPLC en vue de définir si la filtration a eu un effet quelconque sur les molécules d'intérêt de l'extrait (figure 8).

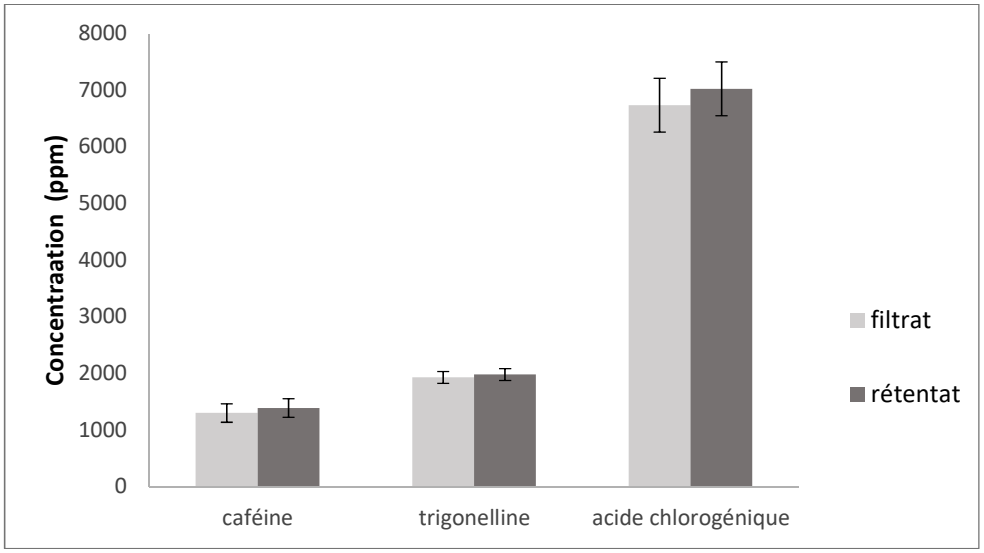


Figure 8 : Concentrations des composés d'intérêts dans le rétentat et le perméat de la filtration tangentielle de l'extrait de café vert acidifié

La figure 8 indique que les concentrations des composés d'intérêts ne varient pas en fonction de l'échantillon rétentat/perméat. Cela indique que la membrane n'a pas d'influence sur le transfert des molécules d'intérêts, en effet celles-ci sont plus petites que le seuil de coupure de la membrane. L'ensemble des composés d'intérêt est bien préservé. Concernant la quantification des protéines restantes dans l'extrait, la réaction au Biuret est mise en œuvre.

Les échantillons traités par la méthode au Biuret sont de deux types. Le premier est l'extrait de café vert acidifié. Cet extrait est déjà en partie dépourvu de ses protéines solubles au vu de la déstabilisation qui a eu lieu. Le passage sur colonne SPE permet ainsi de traiter un échantillon qui contient uniquement les protéines solubles restant dans l'extrait. Le second échantillon est une partie d'un filtrat de microfiltration de l'extrait acidifié. Cet échantillon est évalué dans le but de vérifier ce qui peut subsister malgré la microfiltration. Les résultats sont exprimés au tableau 1, selon la construction d'une droite d'étalonnage réalisée à l'aide d'albumine de blanc d'œuf.

	Absorbance	Équivalent d'albumine (g/l)
Filtrat de la filtration tangentielle	0,053	0,7
Extrait de café vert acidifié	0,134	2,4

Tableau 1 : Evaluation de la quantité de protéine exprimée en équivalent en albumine contenu dans deux échantillons (Méthode au Biuret)

Des protéines sont bien présentes en solution. Le dosage des protéines dans l'extrait frais est cependant nécessaire pour constater l'atténuation qui a lieu entre l'extrait frais et acidifié d'une part et l'extrait frais et filtré tangentiellement d'autre part. La bibliographie rapporte la présence de 8 à 12 % de protéine dans le café vert. Cette proportion rapportée à la masse de café vert engagée dans l'extraction induit une concentration de 16 g/l de protéines. Certaines de ces protéines étant insolubles, d'autres ayant été précipitées par la déstabilisation du pH, la concentration de 2,4 g/l dans l'extrait acidifié est faible, mais donc explicable. La filtration quant à elle, joue bien son rôle et retient les particules en suspension dans le rétentat ainsi que 70 % des protéines qui restent solubles dans le milieu.

4. Perspectives et conclusion

Le développement de l'extrait de café vert à partir de sa mouture est en bonne voie. L'extraction est réalisée de manière optimale et l'extrait est à l'heure actuelle stable au niveau de la formation d'un précipité.

La réalisation en triplicata des tests d'extraction a permis de mettre en évidence le fait que l'extraction des composés bioactifs, pour une heure d'extraction, n'était pas influencée ni par la température ni par le pH d'extraction. Les conditions les plus favorables énergétiquement ainsi que pour la conservation de l'extrait ont donc été retenues. Cependant, l'apparition d'un trouble au froid est à déplorer.

L'identification du trouble au froid grâce à la mise en place de différents tests, a permis de le définir comme un trouble d'origine protéique. Dès lors, une solution de microfiltration a pu être mise en œuvre afin d'éliminer les protéines et les particules en suspension présentes dans le milieu. Le perméat de cette filtration est un extrait limpide prêt à être utilisé sous forme de concentré en molécules bioactives en vue de formuler une boisson.

Dans le même temps, d'autres aspects du projet sont explorés, mais n'ont pas encore abouti à des résultats clairs et précis.
La stabilisation microbiologique de l'extrait est testée. En effet, il est nécessaire qu'il soit stabilisé microbiologiquement afin de ne pas subir d'altération au cours de sa conservation. Deux conservateurs ont été sélectionnés de par leur utilisation courante en industrie agroalimentaire : le sorbate de potassium et le benzoate de sodium. Les concentrations mises en œuvre permettent d'empêcher tout développement microbien. Cependant, la piste d'un traitement thermique n'est pas écartée. Ce dernier permettrait en effet de valoriser un extrait ou une boisson sans conservateur.

Une fois l'extrait stabilisé microbiologiquement, il est nécessaire de s'assurer de sa stabilité dans le temps. Une étude de vieillissement est réalisée dans cet objectif avec comme but la détermination d'une date limite de durabilité pour l'extrait. Une méthode permettant de pallier l'inconvénient majeur du vieillissement naturel, le temps, est la réalisation d'un vieillissement accéléré. Cette étude permettra d'évaluer plus rapidement certaines caractéristiques des différentes formulations qui seront testées pour le développement de la boisson.

Un des objectifs de valorisation du projet est de pouvoir promouvoir le potentiel antioxydant de la boisson. Dans le but de quantifier ce pouvoir antioxydant, le développement de la méthode ORAC a été réalisé à l'UMons. La méthode est dorénavant prête et l'évaluation du pouvoir antioxydant de divers échantillons, mais n'a pu être testée jusqu'à présent.

5. Sources

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, « Statistical Pocketbook: Coffee 2015 »

[2] Oxana Babova, Andrea Occhipinti, Massimo E. Maffei : « Chemical partitioning and antioxidant capacity of green coffee (Coffea arabica and Coffea canephora) of different geographical origin » *Phytochemistry 123*, 2016, p. 33-39

[3] Maria Letícia Galluzzi Bizzo, Adriana Farah, Julie Ann Kemp, Luiza Berguinins Scancetti : *«* Highlights in the History of Coffee Science Related to Health » *Coffee in Health and Disease Prevention,* 2015*,* chapter 2*,* p. 11-17

[4] J. Zhou, L. Chan and S. Zhou : « Trigonelline : A Plant Alkaloid with Therapeutic Potential for Diabetes and Central Nervous System Disease », *Current Medicinal Chemistry,* 2012, *19,* p. 3523-3531

[5] Nicoli, M.C.; Anese, M.; Manzocco, L.; Lerici, C.R. : « Antioxidant properties of coffee brews in relation to the roasting degree » *Lebensm. Wiss. Technol*. 1997, 30, p. 292–297.

[6] Kana Arai et. Al.: « Simultaneous determination of trigonelline, caffeine, chlorogenic acid and their related compounds in instant coffee Samples by HPLC using an acid mobile phase containing octane sulfonate », *Analytical Sciences*, août 2015, 31, p. 831-835

[7] Satish K. Garg, « Green coffee bean », *Nutraceuticals, Efficacy, safety and toxicity*, 2016, p. 653–667

[8] Basil T. Doumas, David D. Bayse, Richard J. Carter, Basil T. Doumas,' David D. Bayse, Richard J. et al. : « A Candidate Reference Method for Determination of Total Protein in Serum I. Development and Validation », *CLIN. CHEM. 27/10*,1981, p. 1642-1650

[9] Azeredo, D.R.P., Alvarenga, V., Sant'Ana, A.S. & Sabaa Sru, A.U.O.: « An overview of microorganisms and factors contributing for the microbial stability of carbonated soft drinks », *Food Research International,* 2016, 82, p. 136-144

[10] Yong-Quan Xu, Xiong-Fei Hu, Ping Tang & al. : « The major factors influencing the formation of sediments in reconstituted green tea infusion », *Food Chemistry,* 2015, 172, p. 831–835

[11] S Oestreich-Janzen : « Caffeine : Characterization and Properties »,, *Encyclopedia of Food and Health*, 2016, p. 556-572

[12] Sandra M.T Baù, Paulo MAzzafera and Luiz G.S.Antoro, « Seed storage proteins in coffee », *Revista Brasileira de fisiologia vegetal,* 2001,13, p. 33-40

Développement de la technique de nanoindentation en température

Ing. G. GERADON
Dr D. MERCIER
Ir C. CHARLIER
CRM Group – Liège
GRAMME – Liège

L'objectif est de développer la technique de nanoindentation en température au sein du CRM Group. Plusieurs étapes ont été réalisées dont la remise en marche et l'amélioration d'un module en température, ainsi qu'une validation ex-situ de la mesure de température à la surface de l'échantillon. Ensuite, des essais de nanoindentation en température ont été entrepris sur des échantillons références et sur un produit du CRM Group.

Mots-clefs : Développement - Nanoindentation - Température - Revêtement - Dureté – Module d'élasticité.

The objective is to develop the technique of nanoindentation in temperature within the CRM Group. Several steps have been achieved, such as the update and improvement of the temperature module, as well as an ex situ validation of the temperature measurements at the surface of the sample. Then some nanoindentation tests in temperature have been performed on reference samples and on a CRM Group product.

Keywords : Development - Nanoindentation - Temperature - Coating - Hardness – Elastic modulus.

1. Introduction

Dans le cadre du développement de la fonctionnalisation de surface de produits métalliques innovants, le CRM Group cherche à caractériser mécaniquement en fonction de la température des revêtements avancés aux échelles submicroniques. D'ailleurs, de nombreuses études par nanoindentation instrumentée et nanoscratch à température ambiante sont déjà en cours sur des peintures et des vernis, des matrices métalliques renforcées avec des particules, des revêtements de type DLC[1], sol-gel, etc. C'est dans le but d'étendre les connaissances des propriétés mécaniques des revêtements à des températures allant jusqu'à 150°C que ce travail a contribué au développement de la technique.

2. État de l'art

2.1. L'essai de nanoindentation

La nanoindentation est une technique de caractérisation mécanique des propriétés locales et de surface des matériaux [1]. Il s'agit d'une variété de tests de dureté d'indentation appliqués aux petits volumes. Au cours de la nanoindentation, un pénétrateur est mis en contact avec un échantillon et une force normale F_c est appliquée jusqu'à une limite de force ou de profondeur d'indentation choisie en fonction du matériau et de son épaisseur. Comme le montre la figure 1, après l'essai le matériau s'étant déformé, une empreinte résiduelle est observée [2].

Figure 1 : Empreinte d'un indent Berkovich par microscopie à force atomique

[1] Diamond-Like-Carbon ou DLC est une classe de matériau de carbone amorphe qui présente certaines propriétés mécaniques proches de celles du diamant.

Le nanoindenteur utilisé au CRM Group, est un Agilent G200 de Keysight. Toutes les mesures de nanoindentation réalisées au cours de ce travail ont été faites avec la tête d'indentation XP dont le principe est illustré à gauche sur la figure 2.

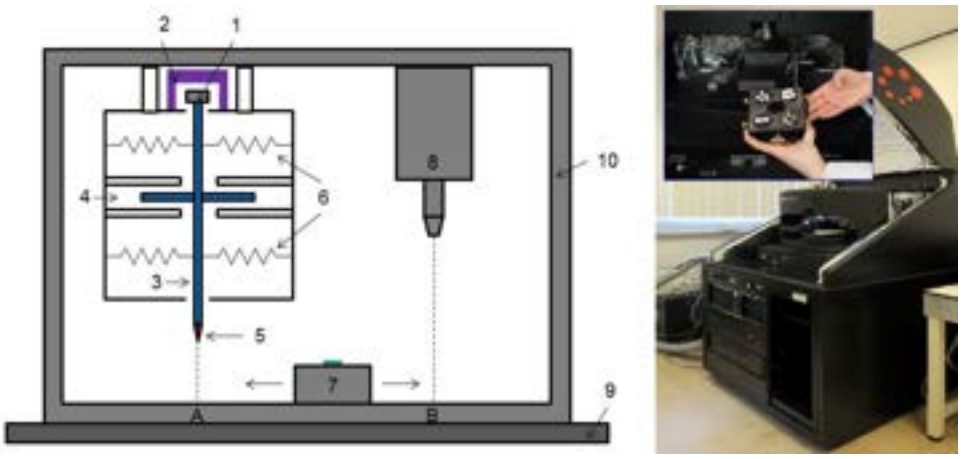


Figure 2 : Schéma de principe de la tête XP du nanoindenteur G200 (à gauche) [3] et photo (à droite)

Une bobine (1) insérée dans un aimant (2) permet d'appliquer une force F_c. Suite au passage d'un courant à l'intérieur de la bobine, une force électromagnétique est induite et transmise à l'axe de la colonne (3), permettant son déplacement vertical *h*. Le contrôle en déplacement se fait indirectement à l'aide d'une boucle d'asservissement et la colonne est directement contrôlée en force. Un capteur capacitif (4) constitué de trois plaques parallèles soumises à un champ électrique, assure la mesure du déplacement. La mesure du déplacement vertical et de la force à la décharge, permet de déterminer la raideur du contact *S* qui est une caractéristique des propriétés élastiques des matériaux mis en jeu dans le contact.

Le pénétrateur ou plus couramment appelé l'indenteur (5), a une dureté élevée et est de géométrie connue. La matière généralement utilisée pour les indenteurs est le diamant (E = 1141 GPa et ν = 0,07) [1]. Il est placé à l'extrémité inférieure de la colonne. Les lames ressorts (6) sont de faible raideur selon la direction verticale (≈ 100 N/m, calibrée au changement de l'indenteur suite à la différence de masse et avant chaque ensemble de mesures). Les lames ressorts sont positionnées autour de la colonne, afin de garantir son maintien et un déplacement parfaitement vertical.

L'échantillon à caractériser est placé sur une platine motorisée (7), qui peut se déplacer entre un point A sous la colonne, où les essais de nanoindentation sont réalisés et un point B sous un microscope (8), où les sites d'essais sont choisis. La précision de positionnement des sites d'essai est de l'ordre de 1,5 µm. L'ensemble est monté sur un bâti (8) ayant une rigidité très élevée (≈ 10^7 N/m). Le bâti est disposé sur une table anti-vibration (9), elle-même mise à l'intérieur d'un caisson permettant une isolation thermique et phonique (10). Enfin, un ordinateur muni de protocoles de mesures contenus dans un logiciel, pilote le nanoindenteur [3].

En plus du mode classique en charge-décharge, le nanoindenteur G200 intègre un module CSM (Continuous Stiffness Measurement) permettant la mesure en continu du module d'élasticité et de la dureté par oscillations successives de la pointe pendant son déplacement. Sans cette option, les mesures ne pourraient être réalisées qu'à la profondeur maximale de pénétration.

Un essai d'indentation correspond à une étape de charge au cours de laquelle le matériau subit une déformation (visco) élasto-plastique, puis une étape de décharge qui correspond au retour élastique (relaxation de la charge appliquée au matériau). Un exemple de courbe d'indentation instrumentée d'un matériau élasto-plastique est donné à la figure 3. Cette courbe représente bien l'évolution de la force appliquée F_c en fonction de la pénétration h au cours de l'essai.

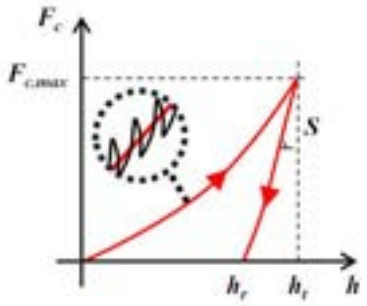


Figure 3 : Courbe de la charge en fonction du déplacement [2]

Durant la première phase, la force appliquée et la pénétration augmentent jusqu'à une force maximale $F_{c,max}$ et un enfoncement maximal h_t est observé. Cette étape correspond au chargement. Pour la seconde phase, la force diminue et s'annule pour un enfoncement dit résiduel h_r (perte du contact entre la surface du matériau et l'indenteur). Cela correspond cette fois à l'étape de la décharge.

La dureté (*H*) et le module de Young ou module d'élasticité (*E*) du matériau sont extraits de sa courbe de charge et de décharge. Ils peuvent être déterminés par les formules suivantes :

$$H = \frac{F_{c,max}}{A_c} \quad (1) \qquad\qquad E_{eff} = \frac{S}{2.\beta}\sqrt{\frac{\pi}{A_c}} \quad (2)$$

où :

- A_c est calculé en fonction de l'indenteur et correspond à l'aire de contact
- S est la rigidité obtenue avec $S = dF_c / dh$
- β est un coefficient adimensionnel qui dépend de la géométrie de la pointe
- E_{eff} est le module de Young de l'ensemble échantillon-indenteur, il vaut :
-

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - {\nu_i}^2}{E_i} \quad (3)$$

E et ν sont respectivement le module de Young et le coefficient de Poisson de l'échantillon étudié et E_i, ν_i sont ceux de l'indenteur. Ce dernier utilisé traditionnellement pour les essais de nanoindentation est de type Berkovich. Il s'agit d'un pénétrateur de type pyramidal à base triangulaire, d'angle au sommet α = 65,27°. Cette pointe offre une grande surface de contact entre l'échantillon et l'indenteur. Pour un indenteur Berkovich idéal, la constante β vaut 1,034 (utilisée dans l'équation (2)) [4] et l'aire de contact est calculée via les formules suivantes :

$$A_c = 24{,}56.h_c^2 \quad (4) \qquad\qquad h_c = h_t - \varepsilon.\frac{F_c}{S} \quad (5)$$

où h_c correspond à la profondeur de contact selon Oliver et Pharr [5]. ε est une constante qui dépend de la géométrie de l'indenteur. La valeur ε = 0,75 est recommandée dans le cas de l'indentation Berkovich [6] [7] [8]. Lors des mesures, il faut calibrer l'aire de contact sur de la silice fondue (matériau massif de référence, homogène et isotrope dont on connaît parfaitement les propriétés), pour bien étalonner le nanoindenteur et ainsi évaluer l'usure de la pointe au fil du temps. Cela permet d'éviter de fausses interprétations des mesures effectuées.

2.2. Module en température

Le module en température est constitué d'un circulateur de chaleur et d'un refroidisseur. Le circulateur de chaleur disponible est un Julabo FP50-HE, modifié par la firme SURFACE Nanolab. Cette installation permet de porter l'échantillon à des températures allant de -30°C à 180°C par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. Le montage du module en température est illustré à la figure 4.

Figure 4 : Branchement du module en température au nanoindenteur

Le système de refroidissement à l'eau est une sécurité. D'abord, il se présente sous la forme d'un serpentin creusé entre 2 plaques serrées l'une contre l'autre avec des joints et dont l'ensemble sert de couvercle au réservoir du Julabo contenant le fluide caloporteur. Ce refroidissement au sein de la cuve du Julabo (illustré à la figure 5) va permettre la condensation des vapeurs du fluide caloporteur et éviter ainsi l'émission de vapeurs formant avec l'air un mélange gazeux qui risque de s'enflammer lors de la montée en température. De l'azote est également injecté dans la cuve pour venir chasser/purger l'air présent.

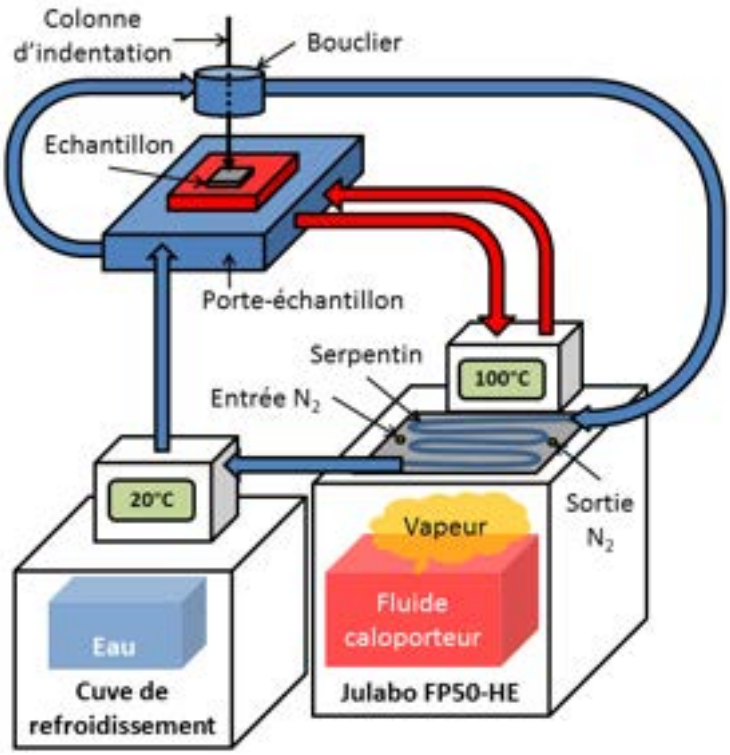


Figure 5 : Schéma du module en température

Les composants à protéger dans le nanoindenteur sont ceux qui sont au voisinage du système de chauffage, à savoir la colonne d'indentation, et le porte-échantillon. Le refroidissement du bouclier et du porte-échantillon a pour but de protéger la colonne d'indentation contre la chaleur. En effet, un des problèmes de la nanoindentation à haute température est que les capteurs de haute précision utilisés par le nanoindenteur ont une gamme limitée de températures de travail. La température élevée autour de l'échantillon et de l'indenteur lors du test peut provoquer une surchauffe de ces capteurs, ce qui génère des erreurs et du bruit supplémentaires dans les mesures. Ainsi, isoler les capteurs thermiquement est une tâche importante à atteindre pour l'indentation à haute température.

3. Développement de la mesure en température

3.1. Maintenance et amélioration du module en température

La première étape de ce travail a consisté à la remise en marche du réfrigérateur et du circulateur de chaleur Julabo FP50-HE modifié. Différents éléments ont été

ajoutés comme un détendeur, un rotamètre, deux débitmètres, un détecteur d'oxygène et un tuyau pour avoir accès au gaz inerte (azote). Le montage du module en température est réalisé en insérant une plaque de protection dans le nanoindenteur. Cette plaque, qu'il a fallu percer pour protéger une tête d'indentation, est fixée à l'aide de 3 vis au nanoindenteur. Elle sert à positionner le bouclier en cuivre, ainsi qu'à préserver l'objectif et les têtes d'indentation.

Pour une meilleure sécurité de l'installation et de l'utilisateur, la décision a été prise de remplacer le Therminol D-12 (fluide recommandé par les fournisseurs) par d'autres fluides (glycérine pour les essais à température supérieures à 25°C et un mélange 30/70 eau-éthanol pour les futurs essais à température négative). En effet, ce fluide organique étant un distillat du pétrole, il est facilement inflammable, en plus d'être cancérigène.

3.2. Validation ex situ de la température

Afin de valider la température réelle d'un échantillon chauffé via le circulateur de chaleur, une validation de la température a été effectuée. Un thermocouple et une caméra thermique sont utilisés. Le thermocouple est simplement un montage fait de 2 fils de métaux différents soudés pour mesurer la température localement via un enregistreur de données (ou data logger). Le thermocouple est soudé à la surface d'un échantillon placé au centre du porte-échantillon (voir la figure 6).

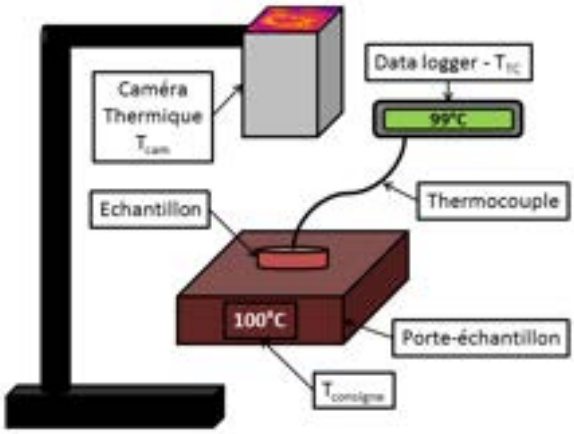


Figure 6 : Schéma du protocole de validation de la température

3.3. Calibration in situ

Le but de cette partie est de réaliser des mesures de propriétés mécaniques sur des matériaux de référence en température à l'intérieur du nanoindenteur. Les matériaux de référence retenus pour cette étude sont le verre massif et un échantillon

multicouche Al/SiO_2/Si. Pour effectuer ces mesures, une première étape de calibration de la raideur de contact doit être effectuée.

Détermination de la raideur de contact

Une fois le montage en température installé au sein du nanoindenteur (porte-échantillon, plaque de protection, etc.), l'étape de calibration *in situ* peut débuter. Suite aux changements mécaniques, il faut recalculer la raideur de contact qui rentre dans le calcul de la dureté et du module d'élasticité. Cette valeur est obtenue à partir de différentes raideurs présentes au sein du nanoindenteur, qui peuvent être représentées par une mise en parallèle et une mise en série des raideurs.

Raideurs en série : $$\frac{1}{S_{colonne}} = \frac{1}{S_{ressorts}} + \frac{1}{S_{ind}} + \frac{1}{S_{contact}} + \frac{1}{S_{PE}} \quad (6)$$

Raideurs en parallèle : $$S = S_{colonne} + S_{bâti} \quad (7)$$

Détermination de la raideur de contact :

$$S_{contact} = \left(\frac{1}{S - S_{bâti}} - \frac{1}{S_{ressorts}} - \frac{1}{S_{ind}} - \frac{1}{S_{PE}}\right)^{-1} \quad (8)$$

où :

- $S_{bâti}$ est la raideur du bâti, non influencée par le montage, valeur initialement calibrée par le fournisseur lors de l'achat (de 10^7 à 10^8 N/m).
- S_{ind} est la raideur de l'indenteur, dans la gamme de mesure de températures, invariable. En réalité, ce sont les propriétés élastiques du diamant.
- S est la raideur mesurée par la courbe charge-décharge.
- $S_{contact}$ est la raideur de l'échantillon, valeur calculée et corrigée avec laquelle la dureté, ainsi que le module d'élasticité sont calculés.
- S_{PE} est la raideur du porte-échantillon, cette valeur évolue en fonction du porte-échantillon disponible et doit être calibrée à chaque changement.
- $S_{ressorts}$ est la raideur des ressorts, à calibrer à chaque changement d'indenteur mais aussi pour un changement de configuration au sein du nanoindenteur, car cela entraîne une différence de poids.

Une première mesure pour la calibration de la raideur des ressorts (fig. 7), est effectuée à blanc (sans échantillon et avec l'indenteur libre de tout contact).

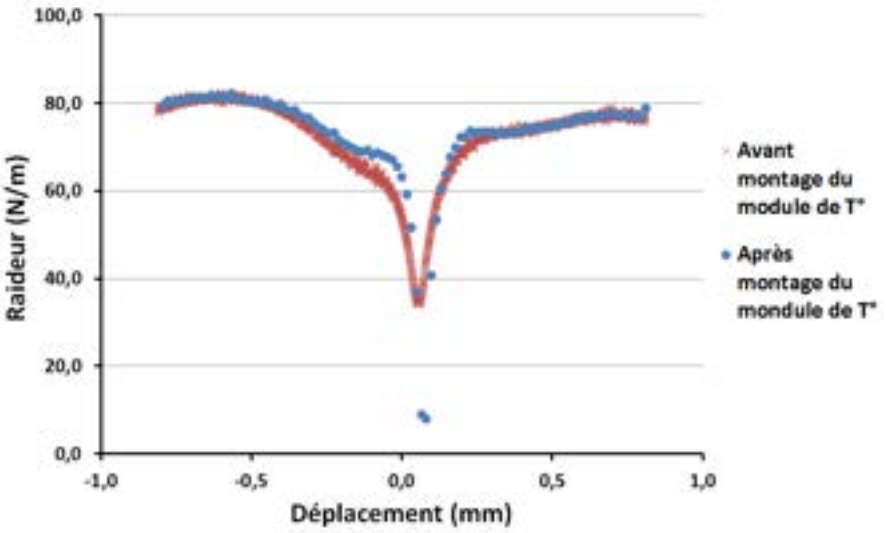


Figure 7 : Raideur en fonction du déplacement avant et après montage du module en température

La faible différence visible à la position d'équilibre (pour un déplacement de 0,08 mm à la figure 7), est sans doute due à la présence du montage en température qui entraîne une différence de poids. Cette première étape validée, les valeurs de la raideur des ressorts sont connues en fonction du déplacement et sont enregistrées dans le nanoindenteur pour en tenir compte lors des essais suivants.

Avant toute analyse, il est essentiel de déterminer la raideur du porte-échantillon (S_{PE}) pour mesurer avec précision les propriétés mécaniques des matériaux. La raideur du porte-échantillon est obtenue en prenant l'inverse de l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire faite sur la courbe $1/S = dh/dF_c = f(1/h_c)$ et où S correspond à la raideur totale mesurée à température ambiante (T_{amb}), obtenue à différentes forces (voir à la figure 8 à gauche). Lors du test d'indentation, la force appliquée agit sur une partie de la machine en plus de l'échantillon. Cela entraîne une augmentation de la profondeur d'indentation mesurée et provoque une sous-estimation du module élastique et de la dureté. Une fois la raideur du porte-échantillon identifiée, elle est soustraite de la raideur mesurée S provenant de la courbe charge-décharge [9] [10].

Pour obtenir cette valeur, un test avec 36 indents sur un morceau de verre a été effectué pour une force allant de 1,7 mN à 51,4 mN. Une fois les valeurs des 36 indents obtenues, un point est tracé pour chaque indent et correspond à l'inverse de la raideur en fonction de l'inverse du déplacement. Une régression linéaire de ces points donne une interception avec l'axe des ordonnées qui est l'inverse de la raideur du porte-échantillon (S_{PE}).

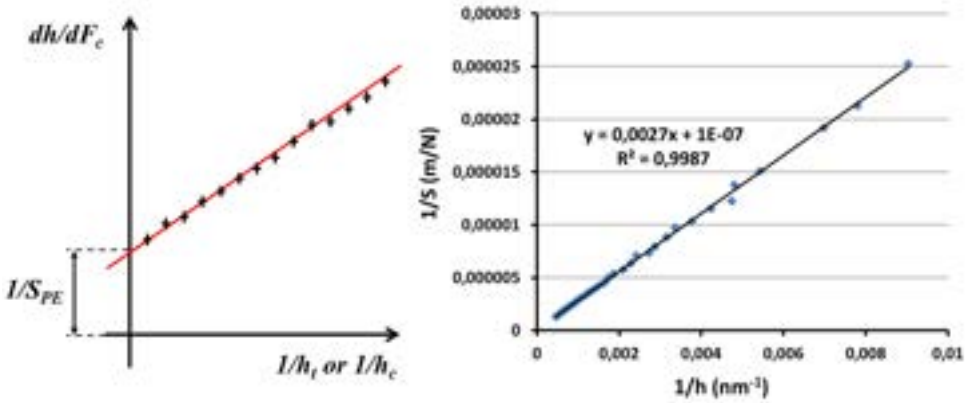


Figure 8 : Détermination de la raideur du porte-échantillon : méthode schématique détaillée à gauche et résultat expérimental à droite

L'inverse de la raideur du porte-échantillon obtenue après régression linéaire est de 10^{-7} m/N. Il faut donc apporter une correction lors de la programmation des essais d'indentation de : $S_{PE} = 1/10^{-7} = 10^{7}$ N/m.

3.4. Validation de l'essai en température

Des méthodes de mesures en température sont disponibles et programmées avec le nanoindenteur. Pour mieux les comprendre, ainsi que voir les différentes possibilités de paramétrage et mettre en évidence les différences dans les mesures avec les méthodes standards, une comparaison a été faite pour différents échantillons de référence à savoir un échantillon massif de verre et une couche mince d'aluminium.

Échantillon de verre

L'échantillon de verre est un échantillon de référence, car il est massif, homogène et amorphe avec des propriétés mécaniques isotropes. Un coefficient de Poisson de 0,18 est utilisé pour cet échantillon de verre.

Une première mesure avec le verre a été faite avec le porte-échantillon standard et la méthode standard (ensemble utilisé habituellement pour les mesures). Une seconde et une troisième mesures ont été effectuées cette fois avec le porte-échantillon du module en température, respectivement avec la méthode standard et la méthode en température. La méthode standard comporte le mode de mesure de raideur en continu (CSM) au contraire de la méthode en température qui donne le point maximal en fonction de la profondeur de l'indenteur (à une force donnée correspond un point d'indentation maximale). Les paramètres utilisés pour les différents essais sont résumés dans le tableau 1.

Type d'indenteur	Berkovich en diamant
Profondeur d'indentation	2000 nm à T_{amb} Variable en température
Limite de sensibilité pour la détection de surface	200 mN/m à T_{amb} 300 mN/m en température
Nombre d'indents	6x6=36
Taux de chargement	0,05 s^{-1}
Distance entre indents	50 µm
Modèle pour la profondeur de contact	Modèle d'Oliver et Pharr

Tableau 1 : Paramétrage des essais de nanoindentation

Comme le montre la figure 9 ci-dessous, une fois l'ensemble calibré, les valeurs obtenues de la dureté et du module d'élasticité sont relativement très proches, peu importe la méthode utilisée pour l'échantillon. Ces tests sont réalisés à température ambiante et pour un même déplacement. Cette constatation valide la méthode en température et permet donc de l'utiliser sereinement pour les essais suivants.

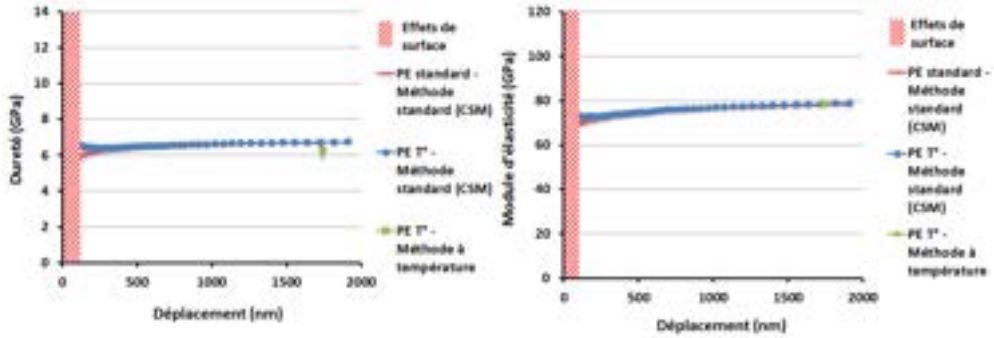


Figure 9 : Dureté et module d'élasticité en fonction du déplacement et de la méthode

La zone hachurée à gauche dans les graphiques correspond aux effets de surface. Les déplacements inférieurs à 100 nm ne sont pas pris en compte car ils sont influencés par divers phénomènes tels que la topographie, la rugosité, la contamination, la présence d'oxydes, la calibration de la pointe d'indentation, etc.

Un premier test en température (de 21 à 150°C) a donc été réalisé dans le nanoindenteur avec cet échantillon de verre pour une force de 1 mN avec les paramètres proposés au tableau 1. Les valeurs obtenues sont tracées à la figure 10. La force de 1 mN correspond à un enfoncement de 1,7 µm.

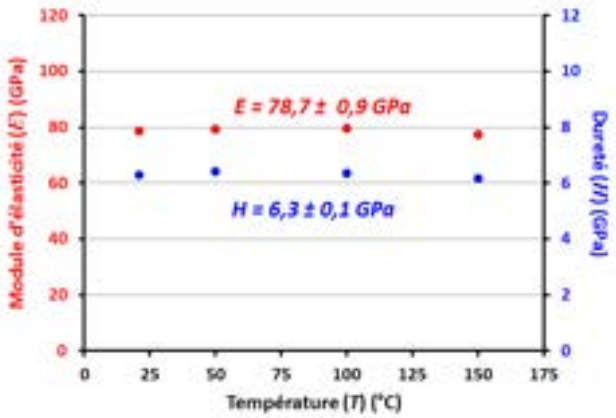


Figure 10 : Module d'élasticité et dureté du verre en fonction de la température

Comme attendu, la figure 10 montre que le module d'élasticité et la dureté sont constants en fonction de la température. Ces mesures correspondent bien aux valeurs théoriques du verre qui sont H = 5,5-6,4 GPa et E = 74 GPa [11]. Pour avoir une modification des propriétés mécaniques du verre, il faut approcher une température élevée (au moins égal à la température de transition vitreuse qui est à plus de 500°C pour des verres silicatés [12][13]), ce qui est impossible à atteindre avec l'équipement actuel.

Couche mince d'Aluminium

Le second échantillon de référence est un échantillon multicouche, dont l'empilement depuis la couche supérieure jusqu'au substrat se compose de :

- 1 µm d'Al PVD[2]
- 0,5 µm de SiO_2 thermique
- Substrat de Si monocristallin

Dans le calcul du module élastique, le coefficient de Poisson de l'Al est supposé être de 0,3. Les valeurs sont obtenues par le nanoindenteur via la relation d'Oliver et Pharr. Pour savoir si cette dernière est toujours valide pour le calcul de la profondeur de contact (équation (5)), une mesure de la topographie résiduelle d'un indent a été réalisée par profilométrie mécanique avec l'indenteur Berkovich à 50 µN sur le film mince d'Al (voir à la figure 11). La topographie de l'indent dans l'Al montre clairement des bourrelets de part et d'autre de l'empreinte.

[2] Le Dépôt Physique en phase Vapeur (PVD) est un procédé de recouvrement de surface par des atomes ou molécules d'un matériau à déposer à partir de vapeur métallique ionisée. Cette vapeur va adhérer sur le substrat à recouvrir et former une couche mince de composition déterminée en passant par un milieu passif (atmosphère inerte ou vide) ou actif (gaz réactif ou plasma) [14].

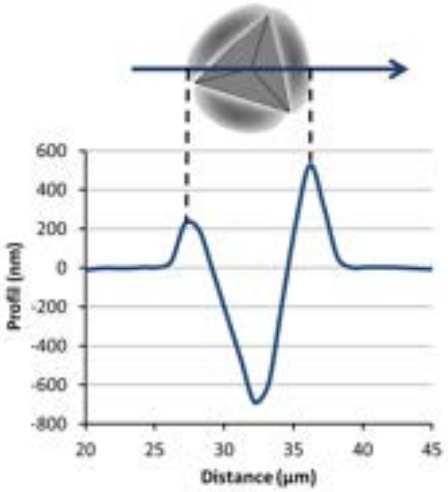


Figure 11 : Représentation de l'indent et profil 2D des bourrelets

Il existe plusieurs modèles dans la littérature pour le calcul de la profondeur de contact (h_c), en fonction de la rhéologie du matériau sous indentation (voir la figure 12). Le déplacement de la matière sous l'indent est fonction des propriétés mécaniques du matériau, c'est pourquoi le profil de l'indent est souvent utile pour déterminer quel modèle utiliser.

La profondeur totale de l'indentation est rarement égale à la profondeur de contact d'indentation. Les deux principaux types de topographie qui peuvent survenir sont :

- les bourrelets ou "pile-up" (profondeur de contact d'indentation h_c > profondeur totale d'indentation h_t),
- l'affaissement ou "sink-in" (profondeur de contact d'indentation h_c < profondeur totale d'indentation h_t).

Dans le cas d'un affaissement, l'équation d'Oliver et Pharr est utilisée (équation (5)). Par contre, dans le cas des bourrelets, la formule de Loubet *et al.* est utilisée :

$$h_c = \alpha.\left(h_t - \frac{F_c}{S} + h_0\right) \quad (9)$$

Le terme α est une constante adimensionnelle du matériau indenté (habituellement autour de 1,2) et h_0 est le défaut de pointe (estimé à 2 nm) [2].

Dans le cas du revêtement d'Al, ce n'est plus la relation d'Oliver et Pharr qui doit être utilisée pour déterminer la profondeur de contact mais la relation liée au modèle de Loubet *et al.* [15], étant donné la présence de bourrelets. Ces bourrelets dans l'Al sont causés par la faible dureté de l'Al (très plastique) et par le confinement de l'Al par le substrat oxydé lors de l'indentation.

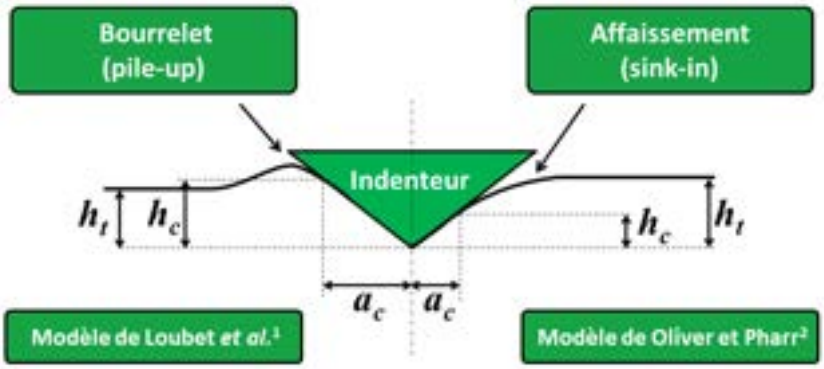


Figure 12 : Comparaison des différentes rhéologies sous indentation

L'équation (9) est utilisée pour recalculer les bonnes valeurs des propriétés mécaniques et ainsi éviter une surestimation des résultats. Il apparaît d'après ces résultats que le module de Young et la dureté calculés augmentent en fonction de la force appliquée. Cette augmentation provient de l'effet substrat. Ainsi, dans le cas d'un film déposé sur un substrat ou un échantillon multicouche, il est nécessaire d'utiliser un modèle (empirique, analytique ou numérique) pour déterminer les propriétés mécaniques du film, indépendamment de l'influence du substrat.

Bückle a proposé une loi empirique pour caractériser élastiquement les revêtements fins sur un substrat [2]. Cette règle estime que le module de Young du revêtement n'est pas influencé par le substrat, pour des profondeurs d'indentation inférieures à 10% de l'épaisseur du film. En raison des imperfections de l'indenteur, de la rugosité et de la pollution de la surface de l'échantillon, il est plus significatif d'utiliser cette règle du "10%", pour un film de plus de 500 nm d'épaisseur. Dans le cas plastique, une seconde loi a été proposée par Bückle pour déterminer la dureté d'un film mince [2]. Elle permet de s'affranchir pour la dureté de l'effet substrat, pour des profondeurs d'indentation inférieures à 40% de l'épaisseur du film.

Une autre solution pour prendre en compte l'influence du substrat (le Si) et des couches intermédiaires (ici l'oxyde thermique) est d'utiliser un modèle élastique multicouche analytique [16]. Ce modèle est implémenté dans un fichier Excel [17].

Comme le montre la figure 13 ci-dessous, la dureté et le module de Young diminuent en fonction de la température. Pour un échantillon massif d'Al dont la température varie de 21°C à 100°C, la littérature donne des décroissances de 0,42 à 0,38 GPa pour la dureté et de 72 à 64 GPa [18]. Les faibles valeurs de module d'élasticité obtenues pour le film mince d'Al en comparaison avec la littérature, peuvent provenir du fait que le film d'Al n'est pas un matériau massif (film PVD moins dense).

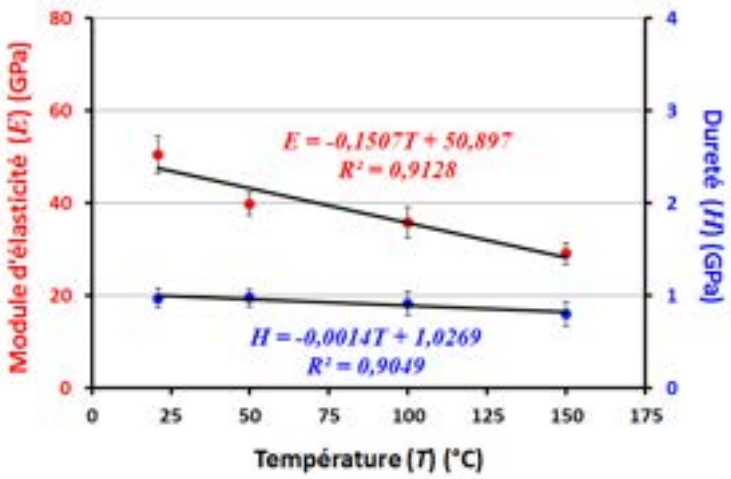


Figure 13 : Module d'élasticité et dureté en fonction de la température pour Al

La diminution de la dureté de l'Al en fonction de la température peut s'expliquer par l'activation de mécanismes de plasticité dans le matériau [19] ou par un effet Hall-Petch (augmentation de la taille de grain [20]).

4. Essais à température supérieures à 25°C

4.1. Présentation de l'échantillon

L'échantillon étudié est un échantillon multicouche de Ag/Al/époxy/fer blanc[3], qui va servir de support pour des diodes électroluminescentes organiques[4] sur acier. Cet empilement complexe est actuellement un produit du CRM Group.

[3] Le fer blanc est un acier bas carbone recouvert d'une couche d'étain.

[4] Une OLED ou Organic Light Emitting Diode est un composant qui permet de produire de la lumière. Il s'agit d'une superposition de plusieurs couches semi-conductrices organiques entre deux électrodes dont au moins une est transparente (souvent l'anode) [21].

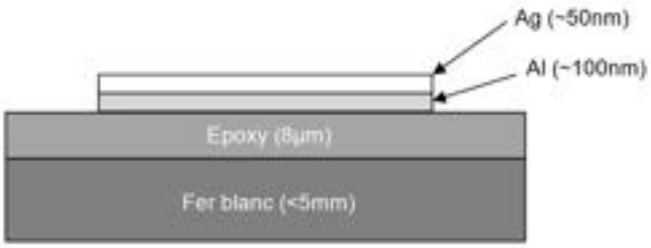


Figure 14 : Schéma de l'échantillon multicouche (Ag/Al /époxy/fer blanc)

Dans le cas de l'empilement Ag/Al/époxy/fer blanc représenté à la figure 14, les couches Ag/Al ont un rôle d'anode et l'époxy joue le rôle du diélectrique. L'intérêt d'utiliser une couche d'Ag vient du fait que l'Ag a une très bonne réflectivité optique, augmentant le rendement des OLEDs en termes de production de lumière. L'Ag étant relativement cher, il a été prévu initialement de déposer en premier une couche d'Al pour la fabrication des anodes. De plus, l'époxy présente l'avantage de lisser la topographie du fer blanc et ainsi d'aplanir/lisser la surface.

Il est primordial d'étudier le comportement mécanique des différents matériaux mis en jeu dans cet empilement en fonction de la température. En effet, dans le procédé de fabrication des OLEDs sur acier, certaines étapes se déroulent à des températures pouvant atteindre 250°C, ce qui induit des dégradations ou des modifications des matériaux. Aussi, il y a de l'effet Joule lors du fonctionnement des OLEDs induisant un vieillissement accéléré des composants.

4.2. Résultats expérimentaux en température

Des essais en température ont été réalisés afin d'analyser l'évolution des propriétés des différentes couches de l'échantillon. Ces tests ont été faits avec la méthode en température et avec les paramètres disponibles dans le tableau 1. Chaque force programmée correspond à une seule mesure, à savoir la valeur maximale lors de l'indentation. Les analyses ont été faites via la relation d'Oliver et Pharr. La première couche étudiée est celle du fer blanc et les valeurs obtenues sont données dans la figure 15.

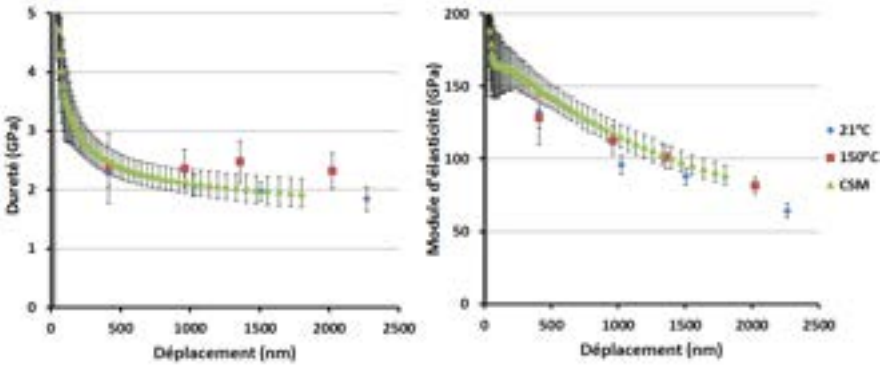


Figure 15 : Dureté et module d'élasticité du fer blanc en fonction de la température

Pour le fer blanc, que ce soit pour le mode CSM avec les mesures classiques à température ambiante ou la méthode à température pour des températures de 21°C et de 150°C, les valeurs restent dans la même plage d'erreur. Une augmentation de la température à 150°C ne modifie donc pas drastiquement les propriétés mécaniques du fer blanc.

La seconde couche évaluée est celle de l'époxy. L'évolution des propriétés mécaniques obtenues par nanoindentation pour l'époxy est proposée à la figure 16.

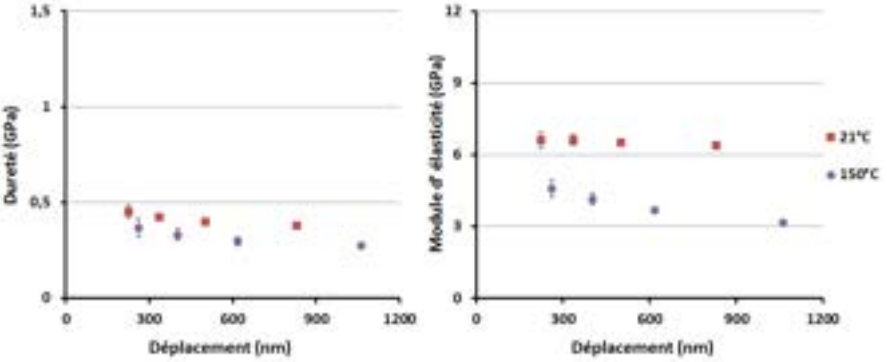


Figure 16 : Dureté et module d'élasticité de l'époxy en fonction de la température

Une augmentation de température de 21 à 150°C entraîne un ramollissement (diminution de la dureté) et un assouplissement (diminution du module d'élasticité) de l'époxy. Ces observations sont en accord avec la littérature [22].

Les derniers essais portent sur l'étude des couches Ag et Al. Les évolutions des propriétés mécaniques de surface obtenues par nanoindentation sont proposées aux figures 17 et 18. Lors des mesures, les valeurs des propriétés mécaniques de Ag/Al/époxy tendent vers celles de l'époxy. Pour mieux se rendre compte de l'influence de la température sur la couche Ag/Al, les graphiques sont retracés à

partir des propriétés mécaniques normalisées (obtenues en divisant par la valeur moyenne obtenue pour l'époxy à la température correspondante) en fonction du rapport de la profondeur de l'enfoncement sur l'épaisseur totale des deux films métalliques (environ 150 nm).

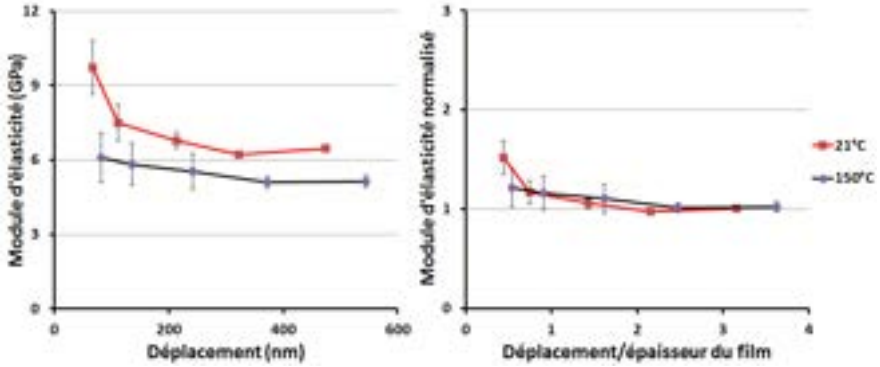


Figure 17 : Module d'élasticité et valeur normalisée pour Ag/Al en fonction de la température

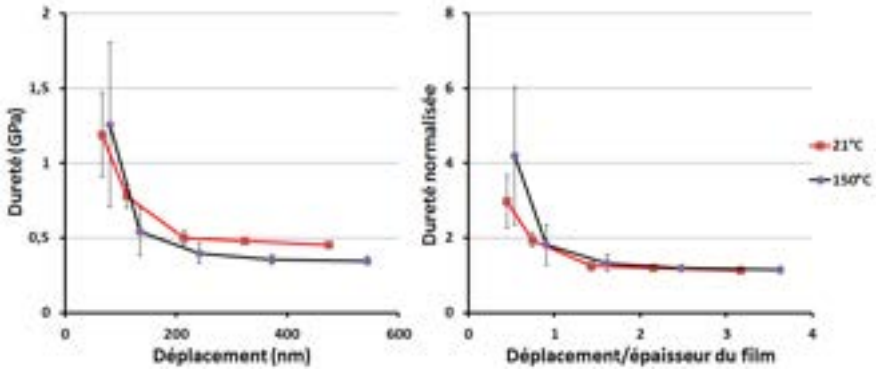


Figure 18 : Dureté et valeur normalisée pour Ag/Al en fonction de la température

La dureté est plus importante au début de l'indentation, il y a donc comme pour l'étude faite au préalable (avant et après recuit), un léger durcissement qui est observé à la surface de l'échantillon. Le module d'élasticité de l'empilement ne semble pas être affecté par une hausse de la température.

4.3. Discussion

Des analyses XPS[5] ont été réalisées sur les échantillons multicouches après recuit à 200 et 250°C. Ces analyses ont montré la présence de solutions solides Ag_x Al_{1-x}, au lieu de la couche d'argent pur sur la couche d'aluminium pur. Ces analyses XPS ont aussi révélé la présence d'oxydes d'aluminium pour ces deux échantillons aux interfaces Ag/Al et Al/époxy. La formation d'une solution solide Ag_x-Al_{1-x} lors d'une montée en température peut expliquer le durcissement des couches Ag/Al, observé pour les différents essais de nanoindentation. En effet, il a été établi que la dureté et la résistivité électrique augmentent avec la diffusion d'Ag dans l'Al [23].

La problématique dans le cadre de l'élaboration des OLEDs est l'ensemble des étapes de recuit qui vont modifier les microstructures et la nature des couches. Cette modification va entraîner une variation des propriétés mécaniques des différents matériaux, pouvant induire des contraintes internes et donc des défaillances mécaniques (cloques, fissures, etc.), mais aussi électriques (augmentation de la résistivité électrique, induisant un échauffement par effet Joule et donc éléctromigration = défaillance).

Il existe plusieurs solutions technologiques pour palier à cette problématique :

- remplacement de l'époxy ou de la nature du chargement pour éviter le ramollissement.
- Mettre une couche barrière limitant la diffusion d'Al dans Ag et vice versa.
- Mettre uniquement de l'Ag ou de l'Al.
- Faire des dépôts métalliques à plus basse température (par sérigraphie ou impression avec encre métallique).

5. Conclusion

Ce travail a permis de développer la technique de nanoindentation en température. Le développement de cette technique a été validé par la mise en route du module en température, son amélioration, la mise en sécurité de l'équipement et le contrôle de la température au niveau de la surface de l'échantillon.

Effectuer des tests de nanoindentation à haute température par rapport à l'air ambiant entraîne l'apparition de nombreuses difficultés et inconnues dont il a fallu tenir compte dans le développement de cette technique. Pour mesurer correctement les propriétés mécaniques des matériaux (dureté et module d'élasticité) tout en tenant compte de l'influence du module en température, les méthodes d'essais en température avec les différents paramètres méthodologiques, ainsi que la calibra-

[5] X-ray Photoelectron Spectrometry ou XPS est une technique de caractérisation physico-chimique de surface qui permet d'obtenir la composition chimique d'un matériau.

tion des différentes raideurs mises en jeu dans le calcul des propriétés mécaniques ont été étudiées et validées. Pour cela, des essais de nanoindentation en température ont été effectués sur des échantillons de référence (verre massif et couche mince d'Al).

Une fois la technique de nanoindentation en température validée, des essais en température ont permis de caractériser mécaniquement un produit du CRM Group (multicouche entrant dans la fabrication d'OLED sur acier). A partir des valeurs obtenues expérimentalement, une comparaison rassurante des résultats a été réalisée avec la littérature. Enfin, la validation de cette technique permet au CRM Group d'avoir un nouvel outil prometteur et fiable pour la caractérisation en température des propriétés mécaniques de futurs échantillons.

6. Sources

[1] FISCHER-CRIPPS A. C., *Nanoindentation*.
Springer, 3rd edition, 2011.

[2] MERCIER D., (consulté en mai 2017), *NIMS toolbox*.
Adresse URL : http://nims.readthedocs.io/en/latest/.

[3] MERCIER D., *Lois de comportement des matériaux utilisés dans les contacts électriques pour application "flip chip"*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2013.

[4] KING R. B., *Elastic analysis of some punch problems for a layered medium*.
International Journal of Solids and Structures, 23(12) :1657-1664,1987

[5] OLIVER W.C. & PHARR G. M., *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*.
Journal of materials research, 7(06) :1564-1583,1992

[6] OLIVER W.C. & PHARR G. M., *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology*.
Journal of materials research-Pittsburgh then Warrendale. 19(1) :3-20,2004.

[7] TANG B. & NGAN A.H.W., *Accurate measurement of tip-sample contact size during nanoindentation of viscoelastic materials*.
Journal of Materials Research, 18(5) :1141-1148, 2009.

[8] HAY J., *Introduction to instrumented indentation testing*.
Experimental Techniques, 33(6) :66-72,2009.

[9] VAN VLIET K.J., PRCHLIK L. & SMITH J.F., *Direct measurement of indentation frame compliance*.
Journal of Materials Research, 19(1) :325-331.

[10] COSTA A.L.M. *et al*, *Determination of the compliance of an instrumented indentation testing machine*.
HARDMEKO 2004 : Hardness Measurements Theory and Application in Laboratories and Industries, 11 2004.

[11] CHORFA A. *et al*., *Glass hardness and elastic modulus determination by nanoindentation using displacement and energy methods*.
Ceramics-Silikaty, 54(3) :225-234, 2010.

[12] AVRAMOV I., VASSILEV Ts. & PENKOV I., *The glass transition temperature of silicate and borate glasses*.
Journal of Non-Crystalline Solids, 351(6) :472-476, March 2005.

[13] BEAKE B.D. & SMITH J.F., *High-temperature nanoindentation testing of fused silica and other materials*.
Philosophical Magazine A, 82(10) :2179-2186, 2002.

[14] Institut Numérique, (consulté en mai 2017), *les revêtements PVD*. Adresse URL : http://www.institut-numérique.org.

[15] G. GUILLONNEAU *et al*, *Determination of mechanical properties by nanoindentation independendly of indentation depth measurement*.
Journal of Materials Research, 27(19) :2551-2560, August 2012.

[16] MERCIER D. *et al*, *Mesure de module d'Young d'un film mince à partir de mesures expérimentales de nanoindentation réalisées sur des systèmes multicouches*.
Matériaux & Techniques, 99(2) :169-179, 2010.

[17] MERCIER D., (consulté en mai 2017), *Github*.
Adresse URL : https://github.com/DavidMercier/NIMS

[18] TRENKLE J.C., PACKARD C.E. & SCHUH C.A., *Hot nanoindentation in inert environments*.
Review of Scientific Instruments, 81(7) :073901, 2010.

[19] FROST H.J. & ASHBY M.F., *Deformation-mechanism maps: the plasticity and creep of metals and ceramics*.
Pergamon Press, 1982.

[20] FUJITA H. & TABATA T., *The effect of grain size and deformation sub-structure on mechanical properties of polycrystalline aluminum*.
Acta Metallurgica, 21(4):355-365, 1973.

[21] KODEN M., *OLED Displays and Lighting*.
John Wiley & Sons, December 2016

[22] FRONTINI P. *et al*, *High temperature nanoindentation response of rtm6 epoxy resin at different strain rates*.
Experimental Mechanics, 55(5) : 851-862, 2015.

[23] MAMALA A. *et al*, *New al-ag alloys for electrical conductors with increased current carrying capacity*.
Arch. Metall. Mater., 61(4) :1875-1880, 2016.

Développement de la méthode hédonique en matière d'évaluation immobilière en région bruxelloise

Ing. A. THAUVIN
ECAM – Bruxelles

À l'heure actuelle, les experts immobiliers utilisent principalement la méthode des points de comparaison pour déterminer la valeur vénale d'un bien. Cet article traite du développement d'une méthode statistique qui permettrait à l'expert de gagner du temps lors de ses évaluations.

Mots-clefs : expertise immobilière, valeur vénale, hédonique, Bruxelles.

Nowadays, real estate experts mostly use the method of comparison points to determine the market value of a real estate property. This paper concerns the development of a statistical method called the "hedonic method" which could allow the experts to fix more quickly the value of such properties.

Keywords : property evaluation, market value, hedonic, Brussels.

1. Introduction

À l'heure actuelle, lorsqu'un expert immobilier doit évaluer la valeur vénale d'un bien, il utilise principalement 3 méthodes d'évaluation en fonction du cas abordé, à savoir : la méthode des points de comparaison, la méthode de la capitalisation du revenu ainsi que la méthode intrinsèque.

Il faut cependant savoir qu'il n'existe pas de valeur unique mais bien des valeurs différentes en fonction de la finalité de l'évaluation et également qu'il existe une multitude de paramètres influençant la valeur d'un bien, d'où une incertitude quant à la valeur estimée. En général, les estimations réalisées par les experts se situent dans une zone de $\pm 10\%$ autour du prix réel de la transaction du bien, mais les experts ne peuvent estimer l'intervalle de confiance de la valeur annoncée.

Néanmoins, dans le courant du siècle dernier, une nouvelle façon de voir les choses a été avancée : la méthode hédonique. Cette méthode consiste en la création d'un modèle statistique permettant de définir la valeur d'un bien. L'avantage de cette méthode "plus systématique" réside notamment dans le fait que l'intervalle de confiance de la valeur établie est ici connu. Cette méthode peut s'apparenter à la méthode des points de comparaison et donc à l'étude des prix du marché afin de déterminer la valeur d'un bien. L'application de la méthode hédonique va ainsi permettre de déterminer la valeur vénale d'un bien immobilier en donnant une information sur l'intervalle de confiance de cette valeur.

Cet article traite donc de la création d'un modèle hédonique appliqué aux appartements et aux maisons d'habitations dans la région bruxelloise. Nous évaluerons ainsi la fiabilité de cette méthode ainsi que ses limites de façon à déterminer la pertinence ou non de son utilisation par les expert.

2. Principes généraux

Le postulat fondamental de la méthode hédonique, énoncé par K. Lancaster en 1966, repose sur le fait que les consommateurs tirent leur utilité des caractéristiques que possèdent les biens et non des biens eux-mêmes [1]. Cela implique que les biens doivent être différenciés selon différentes caractéristiques. Dans le cas du marché immobilier, les biens seront donc recherchés pour leurs caractéristiques telles que la surface, le nombre de chambres, la présence d'un garage... et non pas sur base du bien dans son ensemble. De cette constatation découle le fait que le bien peut être

représenté par un vecteur possédant n caractéristiques.

$$X = (x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$$

Le principe de la méthode hédonique sera d'attribuer à chacune de ces variables un coefficient représentatif de sa valeur. Le postulat qui en ressort est qu'il existe une fonction hédonique F(X) qui permet de déterminer pour toutes les combinaisons de ces caractéristiques le prix que l'acheteur va devoir débourser afin d'en avoir la propriété. En appliquant cela à l'évaluation immobilière, cela revient à déterminer pour le bien en question sa valeur vénale (V_v) qui sera la somme de la valeur unitaire de chaque caractéristique multipliée par son coefficient. Cela revient à écrire pour n variables :

$$V_v = F(X) = F(x_1, x_2, x_3, ..., x_n)$$

Dans cette équation, les x_i représentent les quantités de chaque variable i. Les coefficients peuvent être déterminés par des régressions linéaires.

2.1. Les caractéristiques à prendre en compte

Le nombre et le choix de variables retenues est très important car c'est le point de départ de la modélisation et cela va donc en conditionner le résultat et sa précision. La littérature ne mentionne pas un nombre précis de variables à utiliser car cela dépend du marché analysé. Toutefois, selon, J-M Halleux (2009), au-delà de 5 à 10 caractéristiques intrinsèques, l'effort nécessaire à l'obtention de ces caractéristiques est disproportionné par rapport à l'amélioration de la précision que l'on peut obtenir [2].

Les caractéristiques explicatives d'un bien sont regroupées en 2 grandes catégories :

- **les variables intrinsèques** du bien c'est-à-dire les caractéristiques qui lui sont propres (surface, présence d'une cave, nombre de chambres, etc). Ces données sont aisées à obtenir lors d'une visite du bien.
- **les variables extrinsèques** ou variables de localisation qui sont liées à l'environnement dans lequel est situé le bien. Cette catégorie de variables est elle-même subdivisée en 2 sous-catégories : d'une part celles liées à l'accessibilité du bien et d'autre part celles liées à la qualité du voisinage. Ces variables sont déjà moins aisées à déterminer et une des solutions consiste à géolocaliser les biens et à utiliser un programme de SIG (Système d'Information Géographique).

Figure 1 : Les différentes catégories de variables

3. Hypothèses et méthodologie

3.1. Hypothèses

La réalisation d'un modèle hédonique nécessite de poser des hypothèses tant sur le plan statistique qu'au niveau du marché analysé. Certaines pourront être vérifiées, d'autres pas.

- *les observations sont mesurées sans erreur* : on suppose que tous les éléments présents dans les données sont exacts et donc représentatifs de la réalité. Il est donc supposé n'exister aucun biais dans les observations.
- *le modèle développé ne contient pas de variables qui se répètent*. Afin que cette hypothèse soit vérifiée, une matrice de corrélation sera réalisée pour identifier quelles variables sont redondantes.
- *l'ensemble de la région bruxelloise constitue un seul marché immobilier* auquel sera associé une fonction hédonique. En effet, cette dernière n'est valide que pour un seul marché déterminé.
- *la variance des résidus de régression est constante* et donc indépendante des variables explicatives. Il s'agit ici de l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus. Il doit y avoir indépendance entre les erreurs de régressions et les variables explicatives. Le cas contraire indiquerait la présence de sous-marchés.
- les erreurs de régression doivent suivre une distribution normale centrée autour de 0.

3.2. Méthodologie

Un modèle hédonique se construit étape par étape de la manière suivante :

1. **Définition des objectifs de la modélisation**
2. **Segmentation spatiale et structurelle**
   Il faut s'assurer de la présence d'un seul et unique marché, condition sine qua non de la modélisation hédonique.
3. **Choix de la base de données à utiliser**
4. **Traitements des données**
5. **Analyse des statistiques descriptives**
   Cette phase consiste en l'analyse des données retenues afin de s'assurer qu'il n'y a pas de valeurs aberrantes qui pourraient fausser le résultat des régressions multiples.
6. **Vérification de la corrélation entre les différentes variables indépendantes**
   Cette étape sert à vérifier qu'il n'y a pas de variables redondantes .
7. **Régressions linéaires multiples**
   Ici, il s'agit d'effectuer les régressions linéaires multiples à proprement parler en vue d'obtenir le modèle le plus fiable possible.
8. **Vérification de la multicolinéarité**
   Il s'agit de vérifier qu'une variable n'est pas en relation linéaire avec d'autres variables explicatives.
9. **Analyse des résidus et suppression des valeurs extrêmes**
   Cette étape vise à vérifier le bon ajustement du modèle. Afin d'avoir le meilleur ajustement possible, il faut supprimer les biens présentant des résidus extrêmes. Il y a également lieu de vérifier que les résidus suivent bien une loi normale.
10. **Vérification de la présence d'hétéroscédasticité**
    C'est lors de cette étape que s'opère la vérification de l'hypothèse qui indique que la variance des résidus est bien indépendante des variables explicatives.
11. **Analyse de l'autocorrélation spatiale**
    L'autocorrélation spatiale exprime la ressemblance des valeurs en fonction de leur localisation. L'absence d'autocorrélation spatiale veut donc dire que la répartition spatiale des résidus est totalement aléatoire. Cette analyse va nous permettre de tester notre modèle. En effet, la présence d'auto-corrélation spatiale peut provenir de l'oubli d'une variable explicative importante dans le modèle mais également d'un mauvais choix de relation entre une variable explicative et la variable dépendante.

3.3. Données utilisées

La méthode hédonique étant une grande consommatrice de données, son application nécessite une solide base de données afin d'avoir une modélisation la plus juste possible. À cette fin, le choix s'est porté sur l'ensemble des fiches d'expertise de la Commission du Marché Immobilier (CMI) de l'Union des Géomètres-Experts de Bruxelles (UGEB). Il en existe au total environ 10000 tous types de biens confondus. L'avantage de ces fiches réside dans le fait qu'elles mentionnent le prix de vente effectif du bien et non du prix demandé comme il est possible de trouver sur des sites tels que "Immoweb". Chaque fiche comprend également un ensemble de caractéristiques renseignées par les experts ayant visité le bien.

Les informations de ces fiches ont été extraites et réunies dans un seul fichier en vue de procéder à la modélisation. Pour permettre la construction des variables extrinsèques, les biens ont été géolocalisés.

3.4. Variables retenues

Il a été considéré un ensemble initial de 80 variables afin de déterminer le modèle le plus pertinent. Le tableau suivant reprend uniquement les variables qui ont été retenues pour les modèles finaux.

Variables retenues pour les appartements		Variables retenues pour les maisons	
Variable dépendante	Prix	Variable dépendante	Prix
Variables intrinsèques	Surface pondérée Emplacements de parking Année de vente Coefficient d'entretien Qualité de la situation Vente publique	Variables intrinsèques	Points de construction Superficie du terrain Coefficient d'entretien Qualité de la situation Vente publique
Accessibilité	Métro à 100m Métro à 250m Métro à 500m Autoroute à 500m	Accessibilité	Gare à 1km Autoroute à 500m
Environnement	Bruit aérien Densité d'espaces verts	Environnement	Bruit aérien Densité d'espaces verts Densité de routes Voirie secondaire (Nxxx) Distance chemin de fer
Valorisation sociale	Taux de chômage	Valorisation sociale	Taux de chômage

Tableau 1 : Les différentes variables retenues

— *surface pondérée* : surface brute pondérée qui est mieux représentative de l'espace réellement disponible ;
— *nombre d'emplacements de parking* : tous types confondus (box, emplacement extérieur, etc) ;
— *année de vente* : afin de prendre en compte l'évolution du marché sur la période couverte par les biens (référence = 2013) ;
— *coefficient d'entretien* : échelle de 1 (bien délabré) à 11 (bien neuf) ;
— *qualité de la situation* : échelle de 1 (situation défavorable) à 11 (toute bonne situation) ;
— *points de construction* : 1 point représente un coût de construction de 1 franc de 1914. C'est une variable propre à la CMI ;
— *vente publique* : les biens ayant été vendus soit en vente publique soit de gré à gré il est nécessaire de les différencier sous forme binaire ;
— *station de métro* : présence d'une station suivant plusieurs intervalles ;
— *autoroute à 500m* : variable construite à vol d'oiseau ;
— *gare à 1km* : variable construite à vol d'oiseau ;
— *densité d'espaces verts* : calculée dans un rayon d'1km autour de chaque bien ;
— *densité de routes* : calculée dans un rayon de 200m autour de chaque bien ;
— *distance aux chemins de fer* : variable construite à vol d'oiseau ;
— *voirie secondaire* : variable binaire indiquant si le bien est situé sur une voirie secondaire ;
— *bruit aérien* : valeurs données par quartier (dBA) ;
— *taux de chômage* : valeurs données par quartier.

4. Modélisation des appartements

Afin de réaliser un modèle pour les appartements, il faut tout d'abord isoler le marché que l'on veut étudier puisqu'un modèle hédonique n'est valable que pour un seul marché. L'ensemble des biens de type "appartement" situés en région bruxelloise ont été sélectionnés. De cette sorte, le marché immobilier des appartements en région bruxelloise a été isolé. Afin de coller au mieux au marché, cet échantillon a été réduit suivant deux critères : un prix de vente maximum de 300000€ (afin d'avoir une répartition des valeurs bien équilibrée de part et d'autre de la moyenne de l'échantillon qui est de 162000€) et une vente réalisée entre 2010 et 2016. L'échantillon final reprenait ainsi 615 appartements répartis au sein de l'agglomération bruxelloise.

L'analyse de la corrélation entre variables a permis d'identifier 7 couples de variables fortement corrélés. Cela a notamment été le cas pour le couple distance par rapport aux chemins de fer et distance par rapport aux gares. Ceci est logique car les gares

sont situées au niveau des voies. Les variables redondantes ont ainsi été éliminées.

Plusieurs régressions linéaires ont été effectuées afin de trouver le modèle qui témoignait des plus grandes fiabilité et stabilité. Pour déterminer ce modèle, il faut trouver celui pour lequel le critère d'Akaike est le plus petit possible. À cette fin, différentes combinaisons de variables parmi toutes celles construites ont été testées.

Différentes transformations de variables ont également été évaluées. Par exemple, une transformation logarithmique peut s'avérer utile pour représenter l'utilité marginale qu'apporte chaque unité supplémentaire de la variable.

Il a également été testé s'il était plus pertinent de mettre les variables de proximité sous forme continue, sous forme de seuils (ex : dans un rayon de 500m autour du bien) ou bien encore suivant des intervalles (ex : une variable binaire pour dire si le bien est situé entre 0m et 250m et une autre si il est situé entre 250m et 500m).

Les paramètres statistiques du premier modèle ainsi obtenu sont visibles à la table 2.

Moy. var. dép.	162004.1	Éc. type var. dép.	56208.3
Somme carrés résidus	6,24E+11	Éc. type de régression	32257.95
R^2	0.678149	R^2 ajusté	0.670639
F(14, 600)	90.30105	p. critique (F)	2.10E-137
Log de vraisemblance	-7249.689	Critère d'Akaike	14529.38
Critère de Schwarz	14595.7	Hannan-Quinn	14555.17

Tableau 2 : Paramètres du modèle initial

Le paramètre R^2 est égal à 0.67 ce qui veut dire que 67% de la variance du prix peut être expliquée par les variables retenues. La valeur du test de Fischer-Snedecor : F(14,600) est élevée et sa p-value est extrêmement petite. Cela signifie que l'hypothèse nulle qui dit que les variables du modèle n'ont pas un impact significatif sur le prix peut être rejetée.

Une fois le modèle initial obtenu, il faut encore effectuer certains tests afin d'améliorer le modèle. Pour ce faire, il a été mené un test de vérification de la multi-colinéarité, un test d'hétéroscédascticité ainsi qu'une analyse des résidus. La présence d'hétéroscédascticité ayant été décelée pour plusieurs variables, un nouveau modèle corrigeant l'hétéroscédasticité a été réalisé en utilisant cette fois-ci la Méthode des Moindres Carrés Généralisés. Cette méthode pondère les observations par la variance de l'erreur

afin de donner moins de poids aux observations qui possèdent une variance élevée. Une dizaine de biens ont également été retirés du modèle car ils présentaient des résidus supérieurs à 2,5 fois l'écart-type de la régressions. Ces opérations ont conduit à un nouveau modèle dont les paramètres sont visibles à la table 3.

Moy. var. dép.	160808.9	Éc. type var. dép.	55479.86
Somme carrés résidus	5.29E+11	Éc. type de régression	29594.39
R^2	0.735589	R^2 ajusté	0.729763
F(13, 590)	126.2595	p. critique (F)	9.80E-161
Log de vraisemblance	1177.874	Critère d'Akaike	2383.748
Critère de Schwarz	2445.399	Hannan-Quinn	2407.74

Tableau 3 : Paramètres du modèle final

Le R^2 a ainsi augmenté de 6% (en valeur absolue) et permet maintenant d'expliquer 73% de la variance du prix avec les variables retenues. Le paramètre F a également augmenté et le critère d'Akaike a diminué ce qui abonde dans le sens d'une amélioration du modèle.

L'erreur-type du modèle est quant à elle de 29594,39€. Si on rapporte cette erreur à la valeur moyenne de notre échantillon cela nous donne une erreur moyenne de 18,4%. Cette valeur est donc largement supérieure à la marge des 10% dans lequel un expert se situe habituellement lorsqu'il expertise un bien immobilier. Nous sommes aussi au-delà de 15% qui caractérise un modèle performant (F. des Rosiers, 2001 ; cité par H. Maldague, 2014) [3]. Cela peut s'expliquer par le fait que l'agglomération bruxelloise se caractérise par la grande diversité de situations de biens qu'elle peut offrir.

La dernière étape consiste à vérifier la présence d'autocorrélation spatiale. Ce test a permis de constater que le modèle souffre bien de la présence de cette dernière pour les communes les plus aisées et les moins aisées de l'agglomération bruxelloise. L'hypothèse avancée pour expliquer cela est une mauvaise attribution du coefficient de qualité de la situation pour les biens dans ces zones. En effet, ce coefficient est souvent attribué à une échelle communale et non au niveau de l'agglomération entière. De ce fait, les différentes valeurs de ce coefficient sont répartis de manière plus ou moins homogène au sein de l'agglomération ce qui ne permet pas de distinguer clairement les communes jouissant d'une meilleure situation.

4.1. Présentation des résultats

Les coefficients attribués aux variables retenues sont visibles au tableau 4. Le coefficient B représente la valeur monétaire de chaque caractéristique en euros. Ces coefficients sont classés par ordre d'importance dans la contribution à la valeur totale du bien grâce au coefficient β. Les variables intrinsèques au bien se retrouvent ainsi dans le haut du tableau.

Variable	B	β
Surface pondérée	1381.01	0.600
Taux de chômage	-1957.31	-0.256
Emplacements de parking	23876.8	0.193
Coefficient d'entretien	6175.65	0.175
Vente publique	-18635.7	-0.168
Log. du bruit aérien	-73803.8	-0.161
Année de vente (ref = 2013)	3904.99	0.133
Densité espaces verts	-1047.06	-0.125
Autoroute à 500m	-16440.7	-0.078
Métro à 250m	18193.3	0.072
Qualité de la situation	2956.67	0.065
Métro à 500m	8362.56	0.059
Métro à 100m	18003.2	0.051

Tableau 4 : Coefficients de régression

La surface pondérée est la variable qui contribue le plus à la prévision du prix. Cela est tout à fait normal car les acheteurs recherchent avant tout de l'espace. Après les variables intrinsèques viennent les variables d'environnement physique et les variables d'accessibilité avec la proximité des autoroutes et des stations de métro. Nous pouvons ainsi déduire que les acheteurs considèrent d'abord la qualité du bien et principalement la surface disponible avant de considérer son environnement ainsi que son accessibilité. Les signes des coefficients sont également en accord avec la logique. La proximité d'une autoroute, le bruit aérien ainsi que le taux de chômage ont un impact négatif sur la valeur du bien.

Ces résultats mettent ainsi en lumière que les acheteurs accordent plus d'importance à une bonne situation qu'à une bonne accessibilité de l'appartement. Cela peut s'expliquer par l'importance qu'a le nombre d'emplacements de parking dans le prix du bien.

En effet, cette importance peut démontrer que bon nombre d'acheteurs possèdent une ou plusieurs voitures et sont donc prêts à parcourir une distance plus importante si cela leur permet de jouir d'une meilleure situation.

5. Modélisation des maisons

Tout comme pour les appartements, il a fallu isoler les fiches CMI des maisons (MH, maison, habitation,...) situées au sein de l'agglomération bruxelloise. Parmi les 1171 maisons retenues, une restriction a été opérée en limitant la superficie du terrain à 700m^2 afin d'obtenir une distribution continue. Le prix a quant à lui étant restreint à 700000€ également afin de suivre une distribution proche de la normale. En effet, la moyenne de prix de vente de l'échantillon étant proche de 350000€, le choix semble ainsi judicieux. L'échantillon contenait ainsi 541 observations.

Les étapes de la modélisation étant pareilles à celles pour les appartements, il ne sera présenté que le résultats du modèle final obtenu (tableau 5). La présence d'autocorrélation spatiale est également semblable à celle rencontrée pour les appartements et ce, toujours en lien avec le coefficient de qualité de la situation mal adapté.

Moy. var. dép.	317898.6	Éc. type var. dép.	125651.5
Somme carrés résidus	2.43E+12	Éc. type de régression	67020.01
R^2	0.778649	R^2 ajusté	0.773072
F(14, 526)	139.6261	p. critique (F)	1.90E-159
Log de vraisemblance	1078.407	Critère d'Akaike	2184.814
Critère de Schwarz	2244.634	Hannan-Quinn	2208.229

Tableau 5 : Paramètres du modèle initial

L'erreur-type du modèle est égale à 67020,01€. Si on rapporte cette moyenne à la moyenne du prix cela représente une erreur de 21,1%. Cette erreur est supérieure à celle obtenue pour les appartements ce qui montre que les habitations sont plus complexes et présentent plus d'hétérogénéité que les appartements.
Concernant les coefficients, c'est la variable points de construction qui contribue le plus largement au prix. Tout comme pour le modèle des appartements, la deuxième position est occupée par le taux de chômage qui indique qu'au plus ce dernier est élevé au sein du quartier au moins le bien aura de valeur. La superficie du terrain arrive en cinquième position indiquant que les acheteurs attachent plus d'importance au bien qu'à la taille du terrain. L'inefficacité de l'échelle des coefficients de situation et d'entretien est encore plus marquée dans ce modèle-ci car ces derniers sont situés

Variable	B	β
Points construction	14.8751	0.515
Taux de chomage	-4314.43	-0.263
Bruit aérien	-3889.27	-0.205
Distance chemin de fer	28.43	0.205
Superficie	219.25	0.198
Vente publique	-30088.70	-0.109
Gare 1000m	23258.40	0.092
Route secondaire	-48042.30	-0.83
Densité routes	1189.71	0.061
Qualité situation	5012.45	0.060
Coeff. d'entretien	3978.3	0.056
Autoroute à 500m	-16621.90	-0.040
Densité espaces verts	-477.02	-0.037

Tableau 6 : Coefficients des variables du modèle final

dans le fond du tableau. Cela indique donc que leur contribution à la valeur du bien est assez faible et est toujours en contradiction avec ce que l'on aurait pu attendre.

6. Test des modèles

Bien que les modèles ne puissent être validés à cause de l'autocorrélation spatiale, ces derniers ont quand même été testés avec certains biens vendus au début de l'année 2017. Cela a permis de mettre en exergue les zones pour lesquelles le modèle est mal ajusté et de voir si la précision du modèle se confirme dans les faits.

Trois appartements et trois maisons vendus en 2017 ont donc été sélectionnés avec à chaque fois :

- un bien situé dans une zone où le modèle est bien ajusté ;
- un bien situé dans une zone où le modèle sous-estime la valeur du bien ;
- un bien situé dans une zone où le modèle surestime sa valeur

Le choix de la localisation des biens a été fait sur base de l'analyse de la carte d'autocorrélation spatiale qui a été réalisée. Les valeurs obtenues via les modèles sont visibles au tableau 7.

Appartements			
Ville	BRUXELLES	JETTE	WOLUWE-ST-LAMBERT
Valeur [€]	221435	213406	214163
Prix_vente [€]	248000	190000	285000
Différence [€]	-26565	23406	-70837
Ratio	-10.71%	12.32%	-24.86%
Maisons			
Ville	WOLUWE-ST-LAMBERT	SAINT-GILLES	ANDERLECHT
Valeur [€]	352682	247786	232410
Prix de vente [€]	525000	255000	270000
Différence [€]	-172318	-7214	-37590
Ratio	-32.82%	-2.83%	-13.92%

Tableau 7 : Application des modèles

L'application des modèles aux biens vendus en 2017 confirme bien les paramètres des modèles. Il y a bien une sous-estimation assez conséquente de la valeur des biens situés dans les communes les plus aisées (représentées par Woluwe-Saint-Lambert) avec des différences de l'ordre de 25 à 30%. Pour les autres biens, l'écart entre le modèle et la réalité est bien meilleure avec des différences proches des 10%. La maison à Anderlecht présente une sous-estimation et non une surestimation qui n'est pas anormale car elle possède une bonne situation pour la commune.

7. Conclusion

Le but du développement d'un modèle hédonique est de fournir un outil supplémentaire que les experts pourraient utiliser pour évaluer plus rapidement des biens immobiliers. Les modèles hédoniques sont une synthèse des points de comparaison donnant une estimation de la valeur pour laquelle l'expert doit encore tenir compte des particularités du bien expertisé.

Les résultats obtenus avec les modèles développés dans ce travail sont plutôt encourageants et incitent à continuer à développer cette méthode. En effet, il est possible d'expliquer plus de 70% de la variance du prix par les caractéristiques retenues. Les écarts obtenus en testant les modèles sont proches de 10% qui est la précision généralement annoncée par les experts lors d'une évaluation.

Toutefois, les limites afférentes à ces modèles statistiques ont été mises en avant. Dès que l'on sort d'un bien-type eu égard à ses caractéristiques ou à sa situation, les modèles développés s'avèrent moins performants. Les biens immobiliers étant fort

diversifiés il est très complexe de prendre en compte toutes leurs caractéristiques plus particulières.

Bien que les modèles développés dans ce travail ne puissent pas encore être utilisés par les experts en vue de les aider à déterminer la valeur vénale d'un bien, le développement de modèles hédoniques pour l'évaluation des biens immobiliers semble prometteur mais nécessitera plus de temps et de données avant de constituer un outil suffisamment performant. Ces modèles ne constitueront toutefois qu'une aide pour les experts leur permettant d'évaluer plus rapidement un bien et ne pourront en aucun cas remplacer ces experts. Seuls ceux-ci sont aptes à critiquer la valeur obtenue et à l'adapter sur base d'autres éléments non pris en compte dans les modèles.

8. Remerciements

Je tiens à remercier M. Eric De Keghel, président de la CMI et promoteur du TFE à l'origine de cet article, ainsi que M. Denis Pierlot pour avoir relu et commenté ce présent article.

9. Sources

[1] Kévin Lancaster. « A new approach of consumer theory ». In : *Journal of Political Economy* 74 (avril 1966), pp. 132–157.

[2] Jean-Marie Halleux. « Modélisation hédonique des prix immobiliers : quelles opportunités pour la collectivité ? » In : *Georama* 62 (décembre 2009), pp. 42–46.

[3] Hubert Maldague. « Approche hédonique du marché des terrains à bâtir. Modélisation des prix dans les bassins d'emploi de Liège et de Charleroi, comparaison interbassin et évolution temporelle liégeoise ». Mémoire de master. Université de Liège, 2014.

[4] Jean Yves Baudot. *Les hypothèses de validité d'une régression linéaire*. url : `http://www.jybaudot.fr/Correl_regress/hypothrls.html` (consulté le 15 avril 2017).

Conception d'une nouvelle centrale d'énergie pour un processus de brassage

Ir T. DELAITE
PIERRARD – Virton

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche entre la Brasserie de la Lesse et le centre de recherche FoRS de la Henallux. Le but vise à développer une nouvelle brasserie qui soit la moins énergétivore possible dans tous ses départements, tant pour le processus que pour les bâtiments. Cette économie d'énergie est axée dans une politique de développement durable qui vise une extension locale mais surtout écologique.

Mots-clefs : brasserie, énergie, écologie, thermique

This work is part of a research project between the Brasserie de la Lesse and the research center FoRS of Henallux. The aim is to develop a brewery which is the least energy consuming possible in all its divisions, both process and building. This energy saving is geared toward a sustainable development policy that aims a local expansion and over all ecological.

Keywords : brewery, energy, ecology, thermic

1. Introduction

L'Union Européenne s'est fixée des objectifs stricts dans le domaine de l'énergie et du climat afin de réduire les émissions de gaz à effets de serre, d'augmenter la part d'énergie issue de sources renouvelables et d'améliorer l'efficacité énergétique. En ajoutant à cela une hausse de la demande énergétique et une variabilité importante des prix, il est logique que la tendance actuelle des entreprises vise à diminuer au maximum les coûts énergétiques tout en optimisant le rendement de production.

Dans ce but, la Brasserie de la Lesse cherche à innover en tentant de développer un processus de brassage qui respecte l'environnement et qui travaille à un niveau local. Cette nouvelle méthode de travail permettra une meilleure utilisation de toutes les formes d'énergies disponibles tout en visant un objectif écologique.

À la différence des autres brasseries, cette centrale d'énergie ne couvre pas uniquement le procédé de fabrication de la bière (brassage) mais également les phases de garde chaude (refermentation en bouteille) ainsi que le chauffage des bâtiments et des éléments annexes. Ce projet est ainsi bien plus global que les systèmes actuels existants déjà dans de nombreuses brasseries avec systèmes de récupérations d'énergie tel que la brasserie d'Orval, de Chimay, ou plusieurs implantations de AB InBev [1].

2. Description du processus de brassage

Le processus de brassage se résume en une longue suite d'étapes à partir d'eau, de malte et d'arômes. Ces étapes doivent être réalisées avec précision, tant sur les quantités (temps, température et matériaux), que sur les vitesses de chauffe, afin d'obtenir un produit final de qualité. Chaque étape présentée est essentielle pour obtenir une véritable bière artisanale belge. Le processus précis utilisé dans ce document concerne la réalisation de la bière la plus brassée par la Brasserie de la Lesse.

Dans le cadre de la Brasserie de la Lesse, deux bâches (cuves de stockage d'eau) sont disponibles avec suffisamment d'eau pour réaliser plusieurs brassins de 20 hl : une bâche à eau chaude à 85°C et une bâche à eau froide à 12°C. Cette dernière peut monter jusqu'à 15°C en plein été en raison de la provenance de l'eau du réseau depuis une nappe phréatique en surface. Pour la partie brassage à proprement parler, il est obligatoire de garantir une vitesse de chauffe de 1°C/min.

Le procédé de brassage peut dès lors se résumer comme suit :

- Préparation : chauffe de la bâche à eau chaude jusqu'à 85°C la veille du jour de brassage. Cette température élevée permettra de gérer l'ensemble des demandes en eau chaude du processus.

- Transfert : transfert d'eau des deux bâches dans la cuve d'empâtage ; un mélangeur permet d'obtenir une eau à 72°C.
- Empâtage : mélange du malt, stocké à 12°C dans l'eau et stabilisation du moût à 65°C.
- 1er palier : maintien à 65°C pendant 1 heure.
- Chauffe jusqu'à 77°C.
- 2e palier : maintien à 77°C durant 10 minutes.
- Transfert en filtration et repos de la maische (mélange obtenu précédemment).
- Recirculation et filtration avec transfert vers l'ébullition, durée de 2h30.
- Ébullition : chauffe de l'ensemble filtré en continu afin que la température du mélange soit à 100°C à l'instant où la filtration se termine ; maintien de cette température durant 90 minutes.
- Whirlpool : transfert et maintien à 100°C durant 20 minutes.
- Refroidissement : le moût ainsi obtenu passe dans un échangeur à contre-courant où il est refroidi jusqu'à 22°C avant de terminer sa course dans le fermenteur. De l'autre côté de cet échangeur, de l'eau passe de la bâche à eau froide à la bâche à eau chaude en étant réchauffée par cet échange thermique.
- Ajout des levures : l'injection de levures dans le fermenteur permet de progressivement transformer le jus de malt sucré en une bière alcoolisée.

Toutes ces étapes représentent le procédé de brassage en tant que tel. Néanmoins, la création de bière nécessite encore une série d'étapes bien plus lentes :

- Fermentation : la transformation du sucre en alcool par les levures est un procédé fortement exothermique. Le moût, couplé à ces levures, est maintenu à 22°C dans le fermenteur durant 36 heures grâce à un groupe froid avant de monter jusqu'à 24°C en également 36h. Il s'ensuit un travail des levures amélioré où aucune énergie n'est nécessaire.
- Garde froide : l'ensemble est amené à 3°C dans le fermenteur et est préservé durant 2 semaines.
- Soutirage : la bière est enfin transférée dans les bouteilles grâce à une ligne de soutirage automatisée. Lors du soutirage, du gaz carbonique est ajouté ainsi qu'une faible quantité de surcre pour permettre la refermentation.
- Refermetation : les bouteilles sont placées dans une chambre chaude à 22°C durant deux semaines. Cette dernière étape marque la fin de la création de bière.

À toutes ces étapes de fabrication de la bière, il est essentiel de rajouter le nettoyage des différentes cuves. Ce nettoyage est excessivement demandeur en eau chaude et nécessite donc une énergie importante pour être réalisé. Il est essentiel de séparer dans ces calculs le circuit chaud (cuves de brassage), le circuit froid (fermenteur) et la soutireuse.

Le nettoyage des différentes cuves, nécessitant 100 l/étape, s'effectue aux températures montrées dans le tableau 1. Il est à noter que le nettoyage complet de la brasserie nécessite près de 3400 l d'eau à des températures variables.

	Circuit chaud	**Circuit froid**	**Soutireuse**
Nettoyage acide : 45 min	75°C	40°C	75°C
Rinçage acide : 5 min	75°C	40°C	75°C
Nettoyage acide : 45 min	60°C	40°C	75°C
Rinçage acide : 5 min	60°C	40°C	75°C
Désinfection : 15 min	12°C	12°C	12°C
Rinçage final : 5 min	12°C	12°C	12°C

Tableau 1 : Températures de nettoyage

À tous ces éléments fixes, il existe également un nettoyage complémentaire pour les pièces détachables. Celui-ci réalise également les 6 étapes précitées à la température du réseau de 12°C.

3. Énergies et flux

Une fois le procédé de fabrication totalement défini, il est nécessaire de calculer les énergies mais surtout les puissances nécessaires à la réalisation des brassins afin de pouvoir, à terme, dimensionner les chaudières et systèmes annexes adéquats.

3.1. Brassage

En appliquant les principes de base de thermique sur le processus décrit précédemment, il est aisé de calculer les énergies et puissances nécessaires pour chaque phase de la fabrication [2, 3] en se basant sur les dimensions des cuves de brasserie standards [4].

Afin de calculer les maintiens aux bonnes températures, une analyse des flux sous le logiciel EES est réalisée en utilisant les dimensions et isolants des cuves commandées. Des différences entre été et hiver au sein du bâtiment non isolé sont présentes mais ne représentent, au maximum, qu'une variation de 100 W et seront donc négligées [5].

Les résultats de ces analyses sont présentés au tableau 2. Tout à fait logiquement, c'est la chauffe de la bâche à eau chaude qui demande le plus d'énergie. En effet, cette bâche fait 40 hl et est suffisante pour la réalisation de 4 brassins consécutifs

	Energie [MJ]	Puissance [kW]
Préchauffage de la bâche	1222	70
1er palier	1,2	0,3
Montée au 2e palier	69,1	96
2e palier	0,3	0,4
Montée en ébullition	200,3	151,7
Maintien en ébullition	3	0,6
Whirlpool	0,7	0,6

Tableau 2 : Energies et puissances processus

Pour finir, le nettoyage des différentes cuves nécessite des énergies importantes au vu des températures visées, mais l'eau dans la bâche à eau chaude est déjà disponible à une température plus élevée que nécessaire[1]. La station CIP (Clean In place) effectuant ces nettoyages réalise donc un mélange entre les eaux en provenance des deux bâches.
Le nettoyage n'intervient donc pas dans les puissances en jeu, puisqu'il faut uniquement prendre en compte les maintiens de l'ordre de 0,5 kW et non la chauffe de cette eau de nettoyage.

3.2. Groupe frigorifique

Le groupe frigorifique gère deux étapes complètes du processus : la fermentation et la garde froide. Les temps mis en jeu dans ces parties sont extrêmement longs et permettent ainsi de travailler avec de faibles puissances.

Fermentation

Pour le dimensionnement du groupe frigorifique pour la fermentation, il est essentiel de connaître l'énergie libérée par les levures lors de la réaction de transformation du sucre en alcool. Cette méthode est aisément calculable grâce à la formule suivante [6] :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta E \; qG + V \; \rho \; c \; \Delta\delta}{t \; \eta} \qquad (1)$$

Où :

- $\dot{Q}$: quantité de chaleur à évacuer [kJ/h]
- ΔE : diminution de l'extrait pendant la fermentation relié au volume total de la cuve de fermentation [kg]
- qG : chaleur dégagée pendant la fermentation de l'extrait (569 kJ/kg)

[1] La température maximale de nettoyage du processus est de 80°C pour la soutireuse.

- V : volume en fermentation [dm^3]
- ρ : densité de volume en fermentation (1,04 kg/dm^3)
- c : capacité de chaleur spécifique du liquide en fermentation (3,979 kJ/kg.K)
- $\Delta\delta$: différence de température entre le début et la fin de la fermentation [K]
- t : temps de fermentation [h]
- η : degré de rendement de l'installation de refroidissement dû à la perte par rayonnement dépendant du groupe frigorifique [-]

La bière réalisée par la Brasserie de la Lesse présente une perte de 5 degrés plato[2] durant sa fermentation complète (maintien et montée). Les résultats pour le groupe frigorifique sont dès lors montrés dans le tableau 3. Pour rappel, il existe deux phases dans la fermentation : le maintien à 22°C suivi de la montée à 24°C.

$E_{maintien}$	40 MJ
$E_{montée}$	40 MJ
$P_{maintien}$	308 W
$P_{montée}$	306 W
$Déperditions$	125 W

Tableau 3 : Réaction exothermique levures

Les énergies mises en jeu sont importantes mais les très longues durées de ces étapes permettent de n'utiliser que de faibles puissances.

Garde froide

Le groupe frigorifique contrôle également la garde froide qui est à nouveau composée de deux étapes : l'abaissement de 24°C à 3°C en 48h et un maintien à 3°C durant deux semaines.

À nouveau, en utilisant le logiciel EES avec la forme du fermenteur et les températures ambiantes, il est aisé d'obtenir les puissances du groupe comme montré au tableau 4.

Abaissement	1 kW
Maintien	0,35 kW

Tableau 4 : Garde froide

[2] Exprime le pourcentage en masse d'extrait sec du moût avant fermentation (image de la quantité de sucre).

La plus importante puissance nécessaire pour le groupe frigorifique est donc l'abaissement en température d'un fermenteur qui demande 1 kW thermique. Dans la pratique, plusieurs brassins sont réalisés par jour, il est donc nécessaire que ce groupe froid puisse refroidir plusieurs fermenteurs (refroidissement et maintien) en simultané ainsi que supporter plusieurs fermentations (4 de chaque type au maximum de production). Ce qui amène à une puissance totale de théorique de 8,5 kW froid.

3.3. Soutirage

La Brasserie de la Lesse se démarque encore une fois des autres brasseries par un cycle brassage-soutirage très différent.
Classiquement, une micro-brasserie va réaliser un brassin un jour et soutirer un autre le lendemain. Cette méthode permet de réaliser un seul jour de brassage par semaine tout en gardant la bière plus d'une semaine en garde froide.
A l'inverse, la Brasserie de la Lesse a décidé d'augmenter la durée de garde froide à deux semaines dans une optique de qualité de la bière. Ce temps est assez important et permet donc de réaliser le transfert de la bière dans une cuve tampon, appelée cuve de soutirage, la veille du brassage. Cette méthode demande désormais de réaliser le soutirage le même jour que le brassage et donc un travail très important lors de cette journée.

Bien qu'étant épuisante, cette méthode donne trois avantages certains :

- La libération des fermenteurs : puisque la bière est transférée dans une cuve de soutirage la veille du brassage, les fermenteurs peuvent être nettoyés rapidement et être réutilisés dès le lendemain. Cette technique permet ainsi d'éviter de laisser un fermenteur vide 6 jours sur 7.
- La montée en température : la cuve de soutirage est très faiblement isolée. Cela permettra donc à la bière de monter en température avant d'être soutirée. Puisque l'étape suivante demande d'élever la température de 3°C à 22°C, plus la bière sera chaude, moins cette étape est demandeuse en énergie. Il faut néamoins se limiter à 10°C maximum car la bière a tendance à mousser, rendant l'embouteillage impossible au-delà de cette limite.
- L'optimisation énergétique : à nouveau, la phase de garde chaude qui suit est très énergivore. Puisque la brasserie a à ce moment-là de l'eau chaude résiduelle disponible dans la bâche à eau chaude, il est intéressant de l'utiliser le plus vite possible avant que cette énergie ne soit naturellement dissipée vers l'ambiance.

Pour choisir l'épaisseur d'isolant à placer autour de la cuve de soutirage, une simulation en modèle statique avec résolution numérique a été réalisée. Les résultats de celle-ci sont montrés à la figure 1. Cette simulation réalise l'analyse de la température finale de la bière dans la cuve de soutirage en été et en hiver pour des temps d'attente de 24 et 36h.

Pour garantir les 10°C maximum de réchauffe, une épaisseur de 3cm de laine de roche ($\lambda = 0{,}0035\ W/mK$) minimum est à prévoir.

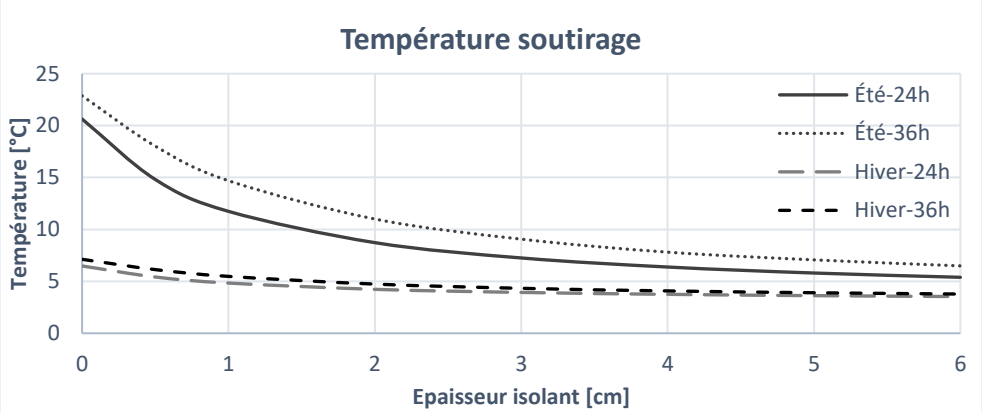


Figure 1 : Epaisseur d'isolant cuve de soutirage

3.4. Garde chaude

La dernière demande en énergie du procédé de brassage nécessite de remonter les bières embouteillées de 3-10°C à 22°C. Un brassin de 20 hl représente donc, une fois embouteillé :

- 2000 l de bière : $c_p = 3979\ J/kg\ K$;
- 6000 bouteilles en verre : $c_p = 720\ J/kg\ K$ et masse de 0,241 kg/verre ;
- 250 casiers en plastique : $c_p = 1900\ J/kg\ K$ et masse de 1,74 kg/casier.

Cette réchauffe devant être réalisée en 12h, les énergies et puissances nécessaires sont données au tableau 5.

	Energie [MJ]	Puissance [kW]
Bière (2000 L)	165,5	3,8
Bouteilles (6000)	11,5	0,3
Casiers (250)	9,1	0,2

Tableau 5 : Garde chaude

Cela signifie que chaque brassin réalisé nécessite 186 MJ avec une puissance de 4,3 kW pour pouvoir être réchauffé. Cette élévation en température sera réalisée grâce à des aérothermes et déstratificateurs. En effet, il est essentiel que la chambre chaude soit toujours à une température constante et homogène, la variation maximale autorisée étant de 1°C par jour.

En plus du besoin de réchauffe des bières, la chambre chaude subit également des pertes vers l'ambiance. Une simulation en modèle statique avec résolution numérique de cette pièce montre qu'il est nécessaire de prévoir 4,5 kW supplémentaires afin de réaliser le maintien en température dans un cas de -10°C extérieur.

Au final, la chambre chaude nécessitera donc un aérotherme constant de 4,5 kW pour le maintien ainsi que deux supplémentaires de 8,6 kW pour la réchauffe sans prendre en compte le facteur de sécurité.

Pour garantir la bonne homogénéité de la pièce, le débit d'air total obtenu est de 950 m^3/h. Celui-ci permet de garantir un taux de brassage d'air de 3 volume/h dans cette pièce.

3.5. Besoins énergétiques complémentaires

Aux différentes énergies précitées, la centrale d'énergie doit assurer un apport de chaleur complémentaire pour deux autres parties de la brasserie. Ces énergies confèrent à la centrale la possibilité de gérer une brasserie au complet ce qui diffère des centrales d'énergie classiques.

Les deux éléments complémentaires sont :

- Le chauffage des bâtiments administratifs : le bâtiment actuel est ancien et très mal isolé. Une simulation en modèle statique avec résolution numérique de ce dernier a donné une puissance de chauffe de 30 kW pour maintenir une température acceptable par -10°C extérieur.
- Le ballon sanitaire : celui-ci, placé dans la salle de brassage, permet d'assurer le nettoyage des éléments amovibles de la brasserie et d'avoir toujours accès à de l'eau chaude. Ce ballon de 200 l, maintenu à 55°C, nécessite 10 kW afin d'être entièrement chauffé en 1h (en cas d'inactivité de la brasserie durant un laps de temps important) et seulement 150 W pour être maintenu à la bonne température. Sa chauffe doit être rapide au vu des demandes très importantes de la brasserie.

3.6. Energies récupérables

Une fois que les différentes sorties ont été déterminées, il est important de se demander où il est désormais possible de récupérer de l'énergie et où la réinjecter.

Ce travail a identifié trois possibilités d'optimisations énergétiques :

- Le refroidissement de fin de processus ;
- L'évaporation de moût ;
- La biométhanisation des résidus de brassage.

Refroidissement de fin de processus
L'eau chaude générée par le refroidissement de la bière via un échangeur de chaleur confère une très importante capacité énergétique. Entre 2000 et 2500 l d'eau chaude à 85°C sont récupérés à la fin de chaque brassin (dépendant de la température initiale de l'eau). Ceux-ci sont directement réinjectés dans la bâche à eau chaude afin de réaliser les brassins suivants durant les deux jours de brassage. L'énergie résiduelle finale est quant à elle renvoyée vers un ballon tampon.

Évaporation
Dans les nouvelles salles à brasser, un échangeur tubulaire est installé dans la cuve d'ébullition. L'évaporation du moût génère une importante chaleur (sous forme de chaleur latente) qui est transférée dans de l'eau froide qui finira également sa course dans la bâche à eau chaude. Environ 500 l d'eau à 85°C est récupéré par brassin.

Biométhanisation
Cette dernière optimisation consiste à récupérer les drèches (résidu solide de fin de filtration), le trub (résidu de fin de Whirlpool) ainsi que les levures résiduelles afin de réaliser une biométhanisation. Le processus de biométhanisation, en plus d'être exothermique et de permettre une chauffe gratuite du ballon tampon, génère du biogaz utilisable directement dans la chaudière gaz de processus produisant de la vapeur. Malheureusement les quantités extrêmement faibles de biomasse (environ 300 kg par brassin) sont insuffisantes pour alimenter un tel système à l'heure actuelle. Les systèmes modernes, déjà très performants, nécessitent environ 1 tonne de biomasse par jour afin de fonctionner. De plus, pour obtenir une bonne biométhanisation, il est préférable de travailler avec une diversité bien plus importante de biomasses.

4. Cycles temporels

Afin d'accroître sa production, la Brasserie de la Lesse souhaite réaliser plusieurs brassins consécutivement sur un même jour. De plus, une nouvelle salle à brasser doit être achetée et de nombreux modèles existent sur le marché.

Le maximum de production sera situé à 4 brassins par semaines dans quelques années et il est dès lors essentiel d'optimiser la réalisation temporelle de ceux-ci pour le choix de la nouvelle salle à brasser, aussi bien d'un point de vue énergétique et du rendement que d'un point de vue temporel et humain.

4.1. Brassage-soutirage

La première étape est donc le choix de la nouvelle salle à brasser à acheter.

Quatre types de salle à brasser existent actuellement et peuvent être décrites comme suit :

- 3Cu1Ch : trois cuves dont une chauffante : empâtage/ébullition (chauffante), filtration et Whirlpool.
- 3Cu2Ch : trois cuves dont deux chauffantes : empâtage (chauffante), filtration et ébullition/Whirlpool (chauffante).
- 4Cu2Ch : quatre cuves dont deux chauffantes : empâtage (chauffante), filtration, ébullition (chauffante) et Whirlpool. Ce type de salle est d'ailleurs disponible avec des ébullitions standards de 90 minutes (noté 90') ou avec une nouvelle technologie permettant de réaliser cette étape en 50 minutes (noté 50').

Pour ce faire, de grands tableurs Excel ont été utilisés pour la réalisation de 2, 3 ou 4 brassins pour ces 4 types de salle à brasser en fonction de la disponibilité de toutes les cuves (brassage, nettoyage ainsi que les phases suivantes). Ces tableurs optimisent la production uniquement d'un point de vue temporel et seront par la suite grandement optimisés pour la salle à brasser choisie (voir tableau 7 au chapitre 4.2).

Les résultats de ces simulations initiales sont visibles au tableau 6.

	T_B	T_N	T_{sup}	V_i [l]	V_f [l]	P [kW]
3Cu1Ch-2B	13h24	15h54	6h12	**3050**	**3000**	**161**
3Cu2Ch-2B	12h27	14h57	5h15	3450	3600	**161**
4Cu2Ch90'-2B	11h22	13h52	4h10	4550	4350	298
4CU2Ch50'-2B	**10h02**	**12h32**	**3h30**	4450	4350	**160**
3Cu1Ch-3B	19h36	22h06	6h12	**3050**	**3250**	**161**
3Cu2Ch-3B	17h42	20h12	5h15	3450	3950	**161**
4Cu2Ch90'-3B	15h32	18h02	4h10	4450	4550	298
4CU2Ch50'-3B	**13h32**	**16h02**	**3h30**	4450	4550	**160**
3Cu1Ch-4B	25h48	28h18	6h12	**3050**	**3500**	**161**
3Cu2Ch-4B	22h57	25h27	5h15	3450	4300	**161**
4Cu2Ch90'-4B	19h42	22h12	4h10	4450	4800	298
4CU2Ch50'-4B	**17h02**	**19h32**	**3h30**	4450	4800	**160**

Tableau 6 : Cycles temporels

Où :

- T_B : temps de réalisation des brassins
- T_N : temps de réalisation des brassins et du nettoyage
- T_{sup} : temps supplémentaire par brassin
- V_i : volume nécessaire dans la bâche à eau chaude au démarrage du brassage
- V_f : volume final dans la bâche à eau chaude après brassage et nettoyage
- P : puissance maximale demandée par la chaudière vapeur

Ces résultats montrent directement que la salle à brasser 4Cu2Ch50' est nettement la plus rapide. Néanmoins ce type de salle à brasser est extrêmement cher et n'est réellement adapté qu'à de très grosses productions travaillant 24h/24, 7j/7.

La salle à brasser 4Cu2Ch90' présente quant à elle un immense défaut (en plus d'être également un type de salle pour une très grande production) : deux phases de chauffes apparaissant simultanément. Cela implique la nécessité d'une chaudière bien plus importante.

Pour finir, le choix s'est porté sur la 3Cu1Ch. Même-ci cette dernière est plus lente que la 3Cu2Ch, elle présente une bien meilleure efficacité énergétique tout en étant la moins chère de toutes. La Brasserie de la Lesse préfère dès lors optimiser énergétiquement et économiquement sa production en couplant une salle à brasser plus demandeuse en main d'œuvre à un soutirage le même jour. Il s'ensuit une production complète de 4 brassins et 4 soutirages réalisée sur deux jours.

À chaque phase de brassage, la puissance nécessaire par la chaudière vapeur a été calculée. La figure 2 montre la puissance nécessaire dans le cadre de deux brassins réalisés consécutivement. Ces résultats montrent l'exigence d'une chaudière capable de moduler extrêmement rapidement sa puissance.

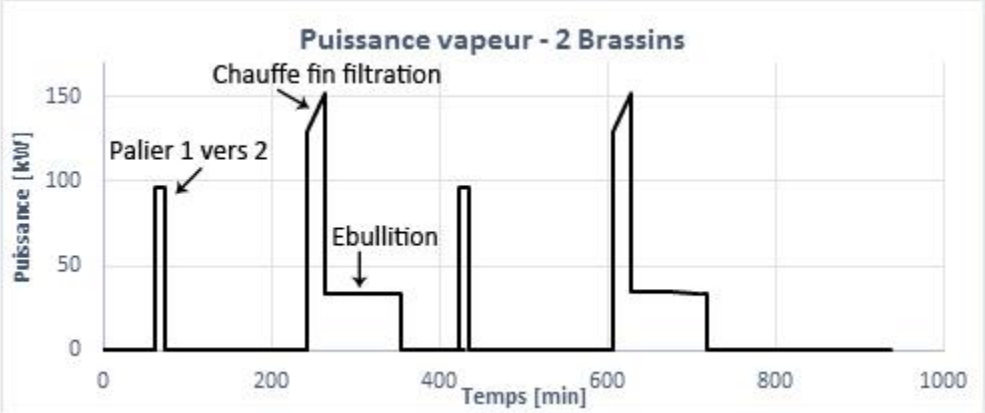


Figure 2 : Puissance vapeur

Les cycles temporels de soutirage ont également été réalisés en se basant sur les hypothèses suivantes :

- Volume de 2000 l par brassin ;
- Deux brassins par jour ;
- Soutireuse de 2500 bouteilles par heure (33cl par bouteille) ;
- Palette de 56 casiers.

Le soutirage complet de deux brassins, tenant compte des battements et du transport des palettes en chambre chaude, s'élève à plus de cinq heures consécutives. Le soutirage étant réalisé en même temps que le brassage, ces deux journées par semaines seront extrêmement éprouvantes pour les brasseurs.

4.2. Bâche à eau froide

Une fois la salle à brasser déterminée, il est intéressant de pousser l'analyse de cycle encore un cran au-dessus pour pouvoir dimensionner la bâche à eau froide. Pour ce faire, des simulations encore plus précises ont été réalisées en prenant en compte la réalisation de 3 et 4 brassins sur deux jours (ce qui explique des temps de brassage très importants pour la réalisation de 3 et 4 brassins). Les résultats sont montrés au tableau 7.

	T_B	T_N	V_i [l]	V_f [l]	P [kW]	V_{FU} [l]	V_B [l]
3Cu1Ch-2B	13h08	15h38	3050	2825	152	6000	6000
3Cu1Ch-3B	31h04	33h34	3050	2715	152	9100	6000
3Cu1Ch-4B	37h08	39h38	3315	2800	152	12100	6000

Tableau 7 : Cycles temporels 3Cu1Ch

Où :

- T_B : temps de réalisation des brassins
- T_N : temps de réalisation des brassins et du nettoyage
- V_i : volume nécessaire dans la bâche à eau chaude au démarrage du brassage
- V_f : volume final dans la bâche à eau chaude après brassage et nettoyage
- P : puissance maximale demandée par la chaudière vapeur
- V_{FU} : volume d'eau froide consommé dans le processus
- V_B : le volume d'eau froide nécessaire pour un remplissage unique par jour

Ces résultats indiquent directement que le volume de la bâche à eau froide doit être de 6 m^3 pour garantir une quantité d'eau froide suffisante (et cela sans sécurité) pour

pouvoir brasser. Cette information oblige donc la brasserie à se diriger vers un système à remplissage continu depuis le réseau tout au long du brassage. De cette manière, une bâche à eau froide de 4 m^3 est suffisante.

4.3. Bâche a eau chaude

L'analyse plus poussée des cycles temporels de la section 4.2 permet également de démontrer que l'eau dans la bâche à eau chaude diminue entre les semaines de brassage. Il est dès lors nécessaire de remplir la bâche en eau froide (et donc la chauffer) avant chaque cycle de brassage.

Pour le dimensionnement de la bâche à eau chaude, il est intéressant d'analyser l'évolution de la quantité d'eau chaude dans cette bâche durant les cycles de brassage complets.

La figure 3 montre l'évolution de la quantité d'eau chaude dans la bâche pour la réalisation de deux brassins avec la salle à brasser choisie. Ce graphique exprime la limite théorique acceptable où la quantité devient nulle à un instant donné.

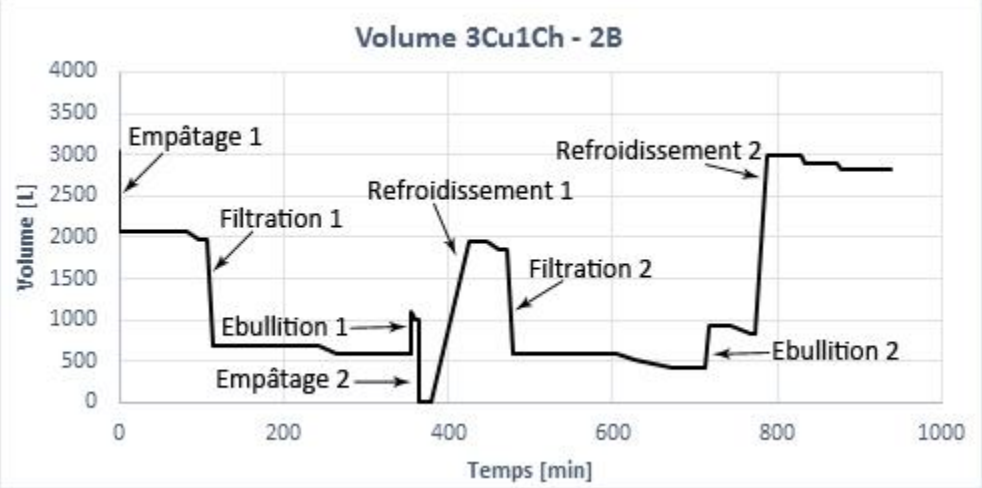


Figure 3 : Volume bâche à eau chaude 3Cu1Ch-2B

L'information essentielle de ce graphique concerne la quantité d'eau initiale théorique nécessaire de 3050 l ainsi que la quantité finale de 2800 l. Cela signifie qu'avec un système réel de 4000 l, la brasserie possèdera toujours 950 l de sécurité permettant un fonctionnement plus flexible. De plus, l'eau diminue de brassin en brassin et un faible appoint doit être réalisé avant le jour de brassage.

5. Ballon tampon

Afin d'alimenter totalement la brasserie en énergie à partir de la chaudière biomasse, il est nécessaire de prévoir un ballon tampon qui sert de stock d'énergie thermique. Celui-ci, d'un volume total de 4000 l, est composé de deux ballons de 2000 l montés en série, le haut du premier étant connecté au bas du second. Cette méthode permet d'obtenir une hauteur virtuelle très importante et donc d'améliorer grandement la stratification. Cet important volume permet de stocker, avec une demande continue pour les bâtiments et garde chaude, l'équivalent de 8,5 heures de fonctionnement de la chaudière biomasse.

Celui-ci reçoit l'énergie depuis trois sources :

- Chaudières biomasse (et vapeur en cas de panne) ;
- Panneaux solaires thermiques ;
- Bâche à eau chaude lors du renvoi d'énergie comme expliqué à la section 5.1.

En échange, il distribue l'énergie vers les différents besoins :

- Bâche à eau chaude lors du préchauffage ;
- Chambre chaude via un chauffage par aérothermes ;
- Bâtiment administratif par des chauffages classiques ;
- Ballon sanitaire.

La plupart de ces entrées/sorties sont standards et cet article ne discute en détail que de l'échange bâche à eau chaude – tampon qui est plus particulier.

5.1. Principe de récupération d'énergie

L'idée est de pouvoir transvaser l'énergie entre la bâche à eau chaude et le tampon.

Deux échanges sont donc possibles :

- Préchauffage de la bâche : l'énergie est amenée depuis le ballon tampon, chauffé en permanence, vers la bâche à eau chaude pour réaliser un préchauffage.
- Renvoi d'énergie : en fin de brassage, la bâche à eau chaude possède une grande quantité d'énergie résiduelle (au minimum 3000L à 85°C). Pour optimiser la consommation de la brasserie, celle-ci est renvoyée vers le ballon tampon.

Ces deux échanges se basent sur le schéma hydraulique de la figure 4 qui présente le cas du préchauffage de la bâche. Cette réalisation, à base de 4 vannes trois voies, deux circulateurs et un échangeur contre-courant, peut également être réalisée à partir de simples vannes tout ou rien.

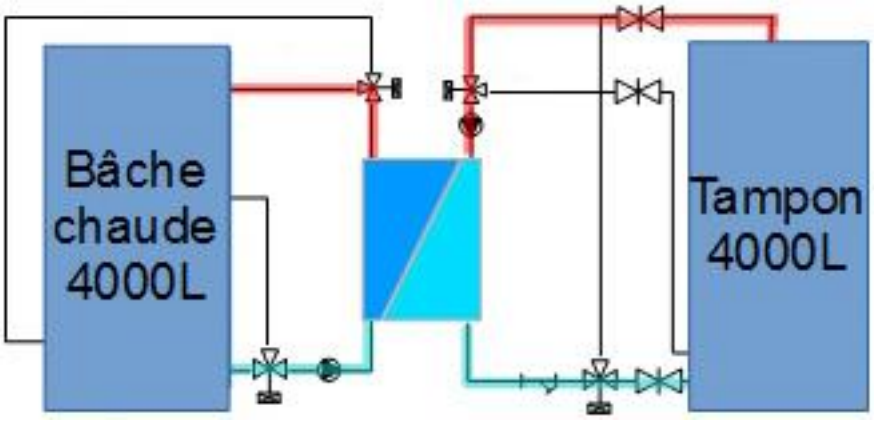


Figure 4 : échange bâche tampon : préchauffage

Dans cet échange, l'énergie, sous forme d'eau chaude, est prélevée dans le dessus du ballon tampon, passe par l'échangeur contre-courant et revient dans le dessous de la cuve. Pour la bâche, c'est l'inverse qui se produit. Cette méthode permet de toujours travailler avec l'eau chaude en haut et l'eau froide en bas pour garantir la stratification. De plus, afin d'améliorer cette stratification des cuves et de pouvoir effectivement transférer l'énergie, les débits d'échanges seront de l'ordre de 1 m^3/h. Il faudra dès lors au minimum 4 heures pour réaliser l'échange d'énergie.

6. Conclusion

Ce travail a finalement permis de choisir et de dimensionner de nombreuses parties de la nouvelle brasserie :

- Salle à brasser de type 3Cu1Ch pour ses intérêts énergétiques et économiques ;
- Bâche à eau chaude et bâche à eau froide de 40 hl chacune ;
- Chaudière biomasse de 80 kW;
- Chaudière gaz de 160 kW ;
- Ballon tampon de 40 hl;
- Groupe frigorifique ;
- Chambre chaude et aérothermes ;
- Le circuit hydraulique complet de tous ces éléments.

Il s'agit ainsi d'un travail très global où les nombreuses interconnexions des différents éléments ont toujours dû être prises en compte. De la même manière, chaque pièce a été dimensionnée dans des cas extrêmes de canicule ou d'hiver particulièrement rude pour pouvoir pallier à toute éventualité.

Le travail le plus important à court terme pour la Brasserie de la Lesse, en plus du dimensionnement de la nouvelle centrale d'énergie, concerne la réalisation des cycles temporels pour les différents brassins. Ces fiches ont permis le choix de la salle à brasser mais également de savoir quand lancer le second brassin dans une journée pour optimiser le temps disponible.

À toutes ces étapes, ce projet a également exploré d'autres possibilités qui ne seront pas mises en œuvre :

- Le fluide HydromX : un fluide capable de stocker bien plus d'énergie thermique que l'eau de chauffage. Son coût très important est un frein direct.
- Le froid par ad/ab-sorption : création de liquide froid à partir de chaud. Ce procédé nécessite trois niveaux de température (froid, moyen et chaud) que la brasserie ne possède pas.
- La biométhanisation : celle-ci sera peut être applicable dans quelques années avec le développement de nano-biométhanisation. Elle permettra, en plus de la génération de chaleur, de générer du biogaz afin de rendre la brasserie encore plus écologique.

7. Sources

[1] PYPAERT, Anne-Françoise, « *Récupération énergétique au sein de la Brasserie d'Orval »*, Orval, 16 janvier 2017

[2] MEUNIER, Hector, LYBAERT Paul & FELDHEIM Véronique, *Thermique : La transmission de la chaleur – Tome 1*
Mons, Mutuelle d'édition de la F.P.Ms, 2012, 179 p.

[3] MEUNIER, Hector, LYBAERT Paul & FELDHEIM Véronique, *Thermique : La transmission de la chaleur – Tome 2*
Mons, Mutuelle d'édition de la F.P.Ms, 2012, 137 p.

[4] EASYBRÄU, (consulté en septembre 2016), *Flex-Bräu, personalized Brewhouse from 10 to 50 hl. – 3, 4 or more tuns*
Adresse URL : http://www.easybrau.it/en/shop/sistemi-modulari-en/flex-brau-da-5-a-50-hl-3-4-o-piu-tini

[5] F-CHART SOFTWARE, (consulté en juin 2016), *EES: Engineering Equation Solver*
Adresse URL : http://www.fchart.com/ees/

[6] MOLL, Hanfred, *Bières et coolers*
Paris, Tec & Doc - Lavoisier, 1991.

Equipements aérauliques de laboratoire : méthodologie de sélection et application de celle-ci dans un projet réel de pharmacie hospitalière

Ing. J. NORTIER
Ing. J.Cl. MARBAIX
ISICHt – Mons

Cet article présente une méthodologie de sélection concernant les équipements aérauliques de laboratoire. Le but de ceux-ci est de garantir une protection de l'utilisateur, de l'environnement dans lequel il travaille mais aussi des produits manipulés. Le choix de cet appareil a un impact majeur sur l'étude d'un projet surtout au niveau de l'HVAC. Un choix judicieux garantit la protection adéquate tout en permettant de réduire le budget d'un projet.

Mots clefs : Equipements, laboratoires, salles propres, HVAC, protection, flux laminaire, hotte chimique, hotte de pesée, poste de sécurité microbiologique, isolateurs ...

This article presents a selection methodology of aeraulic equipment for laboratories. The purpose of these is to ensure protection for the user, the environment in which he works but also the products handled. The choice of this device has a major impact on the study of a project especially for the HVAC. A wise choice ensures the right protection while reducing the budget of a project.

Keywords : Equipment, laboratories, cleanrooms, HVAC, protection, laminar air flow, chemical fume hood, powder hood, biosafety cabinet, isolators ...

1. Glossaire

BSC : BioSafety Cabinet : Poste de sécurité microbiologique (PSM)
Cytotoxique : Substances nocives pour les cellules
GHS : Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals
HVAC : Heating, Ventilation and Air Conditioning
LD50 : Lethal Dose 50% : Dose létale (à 50%)
MSDS : Material Safety Data Sheet : Fiche de données sécurité d'un produit
NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health
OEB : Occupational exposure Band : Plage de Concentration autorisée dans un espace de travail
OEL : Occupational exposure Limit : Concentration maximale autorisée dans un espace de travail
PSM : Poste à sécurité microbiologique
TPN : Total Parenteral Nutrition : Nutriton parenterale totale (NPT)
URS : User Requirement Specification : Spécification des exigences de l'utilisateur

2. Introduction

Au sein d'un bureau d'études spécialisé dans le domaine pharmaceutique, lors d'une étude de projet, il est important de pouvoir maitriser les paramètres de chaque discipline dans le détail. L'objectif de cette étude est de présenter une méthode de sélection afin de choisir correctement un équipement de laboratoire dont le but essentiel est de protéger l'utilisateur, l'environnement dans lequel il travaille, ainsi que les produits manipulés à l'intérieur de celui-ci (création de médicaments, de vaccins, analyse de bactéries, de virus ...).

En effet, il existe différents types d'équipements de laboratoire possédant leurs propres caractéristiques et correspondant à des manipulations et des produits bien spécifiques. Lors d'une étude, le choix de cet équipement est primordial car si celui-ci a été mal étudié, une cascade de conséquences peut alors survenir lors de la suite de l'étude du projet. Mais aussi, cela pourrait engendrer des dangers pour la personne effectuant les manipulations ainsi que pour les produits (médicaments, vaccins …) créés qui pourraient être contaminés par des substances extérieures.

De plus, le type d'équipement influencera aussi la classification du local, ce qui aura un impact majeur sur le prix de la construction des salles propres. Il aura aussi un impact sur la ventilation du local car certains équipements devront être raccordés vers l'extérieur pour l'extraction de l'air vicié, d'autres pourront recycler l'air directement dans le local. Si le choix de l'équipement ne répond pas correctement aux besoins de l'utilisateur, des coûts supplémentaires causés par les surdimensionnements surviendront et causeront des problématiques sur le budget du

projet, mais aussi sur la maintenance ultérieure des installations. C'est pourquoi, il faut étudier minutieusement les besoins du client et lui accorder les meilleurs moyens pour y parvenir.

Cet article est structuré de la manière suivante :

- Dans un premier temps, le principe de salle propre est étudié pour pouvoir comprendre et définir l'environnement dans lequel l'équipement en question sera utilisé.
- Dans un deuxième temps, les différents équipements sont décrits et comparés suivant certains critères. Les paramètres critiques de la salle propre (classification, filtration, niveaux de confinement …) sont aussi abordés dans la partie équipement.
- Dans un troisième temps, la méthode de sélection d'un équipement est décrite, en commençant par une méthode d'analyse des produits manipulés et en finissant par un arbre décisionnel pour choisir correctement l'équipement approprié.
- Pour terminer, afin d'illustrer cet article, un cas réel est étudié pour la pharmacie d'un hôpital se situant à Leuven.

3. Une salle propre

Une salle propre est un local dans lequel le taux de particules en suspension dans l'air est maîtrisé. Elle est conçue afin de générer le moins possible de particules néfastes à l'activité effectuée dans celle-ci. De nombreux paramètres sont important à maitriser dans une salle propre, à savoir la température, l'humidité, les pressions car elles peuvent favoriser les proliférations de bactéries, les contaminations-croisées ainsi que des inconforts de travail … Mais ce n'est pas tout, une salle propre est caractérisée par d'autres critères qu'il faut aussi maitriser comme :

- La classe de la propreté particulaire de l'air. Il en existe plusieurs, celles-ci se différencient par leur exigence sur la propreté particulaire de l'air. C'est-à-dire par la concentration maximale des particules présentes en fonction de leurs tailles et par l'état d'occupation du local.

- Les filtres : Ceux-ci sont utilisés pour parvenir à ces classes de propreté. On utilise des filtres particulaires de différentes sortes (des filtres « normaux » ou alors des filtres à haute efficacité). On utilise aussi des filtres moléculaires lorsque l'on souhaite supprimer des odeurs, ou « purifier » l'air de certaines molécules.

- Le taux de brassage exprime le nombre de fois où la totalité du volume d'air du local est renouvelé (ou filtré) par heure. Cela dépend des exigences de la classe de propreté : au plus l'air est renouvelé, au plus la qualité de l'air est meilleure.

- Les pressions dans les salles propres et autres locaux environnants sont très importants car elles déterminent le sens des fuites entre ceux-ci. Pour mettre un local en surpression, il faut qu'il ait un débit d'air pulsé supérieur à celui extrait. Cela permet de protéger une salle propre de toute contamination extérieure : protection du produit, de la personne vis-à-vis de l'environnement extérieur. Aucun flux d'air venant des locaux adjacents ne peut y rentrer. L'inverse sera pour un local mis en dépression.

- L'aéraulique du local : Dans les salles propres, des flux d'air sont présents et possèdent chacun leurs propres avantages. Il faut donc choisir celui le plus approprié à l'utilisation. C'est un paramètre important pour la maitrise de la contamination. Certains protègeront le produit, d'autres l'utilisateur ou les deux. Ils existent trois types de flux : le flux d'air unidirectionnel, le flux d'air non-directionnel (turbulent) ou le flux mixte.

- Le niveau de confinement : Le confinement désigne l'isolation d'un local vis-à-vis de l'environnement extérieur en fonction du niveau de risque biologique présent à l'intérieur. En d'autres termes, rien ne sortira de ce local. Il existe différents niveaux de confinement avec des paramètres, des exigences à respecter.

Tous ces paramètres énoncés sont essentiellement pour la discipline HVAC. Or, pour élaborer une salle propre, d'autres conditions interviennent aussi comme les matériaux utilisés pour les surfaces (les murs, les revêtements de sol, le vitrage, les plans de travail). Il faut des matériaux générant le moins de particules possible, faciles à nettoyer, résistants … Des équipements de protection individuelle devront être aussi utilisés tels que des « sur-chaussures, cache-barbes ... ». L'exigence varie en fonction de la classe du local, celle-ci pouvant aller jusqu'à utilisation de feuilles, de stylos conçus spécifiquement pour les salles propres.

Figure 1 : Photo d'une salle propre munie d'un équipement aéraulique de laboratoire (Isolateur dans ce cas-ci)

4. Un équipement

Un équipement de laboratoire est un outil de travail dont l'objectif principal est d'assurer une protection de l'utilisateur, de l'environnement dans lequel il travaille ou du produit ou une combinaison des trois. Un équipement est en soi une « petite » salle propre possédant les mêmes paramètres (présence de flux d'air unidirectionnel ou non-unidirectionnel, classe à l'intérieur de l'équipement, taux de brassage, débit d'air…).

Certains équipements sont plus spécialisés soit pour la manipulation de poudres, soit de liquides ou soit de gaz. Concernant l'air vicié, il peut soit être rejeté dans le local, soit à l'extérieur ou alors recyclé à l'intérieur de l'équipement; cela dépend de la dangerosité du produit manipulé à l'intérieur de l'équipement.
A l'aide des illustrations suivantes, les grands principes de ces équipements sont expliqués. Ces cinq types suivants ne sont pas les seuls, il en existe bien d'autres tels que les enceintes à flux laminaire horizontal, les BSC CLASS III, les isolateurs…

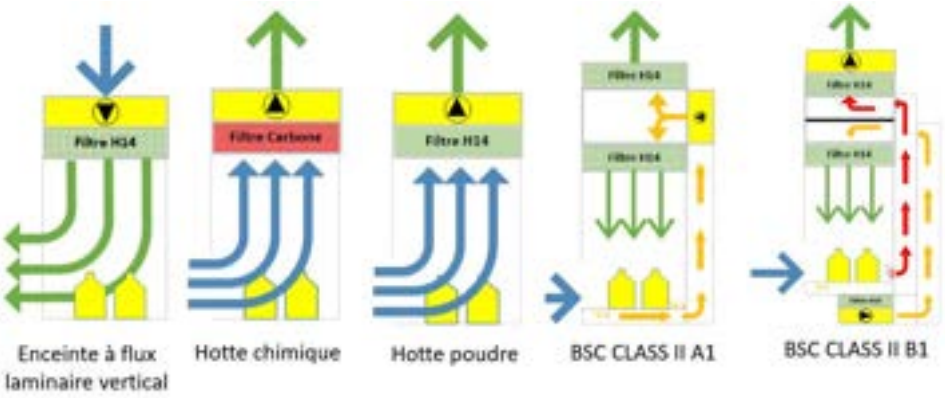


Figure 2 : Schémas de principe de plusieurs équipements

Pour chacun de ces équipements, un tableau récapitulatif a été élaboré afin de faire une synthèse utile pour la méthode de sélection.

5. Méthode de sélection

Lors d'un projet, il est important de savoir exactement quelles sont les exigences du client. Cependant, celui-ci n'est parfois pas certain de ce qu'il veut ou de ce dont il a besoin pour manipuler ses produits. C'est pourquoi il faut bien analyser, bien comprendre ce qu'il compte faire en lui posant les bonnes questions. C'est ce qui s'appelle dans le métier l'URS (User Requirement Specification).

Ci-dessous se trouve :

- Une procédure d'analyse des produits et des manipulations
- Un arbre décisionnel pour le choix de l'équipement

Remarque : Tous ces points seront illustrés par une étude de cas concret au point 6.

5.1. Analyse des produits utilisés

Premièrement, il est important de savoir quels sont les produits manipulés. Sous quelles formes se présentent-ils ? Sous forme liquide, gazeuse ou solide ? Quelle est la fréquence, la quantité de ces produits utilisés ? Quelle est la dangerosité de ces produits ? Celle-ci est déterminée en analysant ses limites d'exposition.

Les informations concernant les produits se trouvent dans les MSDS (Material Safety Data Sheet) respectives à chaque produit, en français sa fiche de sécurité. Pour savoir si un produit est dangereux, on regardera son «Occupational exposure Band/Limit», c'est-à-dire la quantité maximale d'un produit pouvant se trouver dans un mètre cube d'air. Au-dessus de ces limites, il existe un risque potentiel important pour l'utilisateur et l'environnement. Ce critère permet de classifier les produits suivant leur dangerosité. En présence d'un produit solide (comme de la poudre), son OEL est exprimé en µg/m³. Pour les produits volatiles (comme les gaz, les vapeurs), il est en ppm (partie par million).

Band	A	B	C (default)	D	E
GHS Signal Word	Warning	Warning	Danger	Danger	Danger
OEL (Control) Ranges	> 1,000 µg/m³	> 100 and < 1,000 µg/m³	> 10 and < 100 µg/m³	> 1 and < 10 µg/m³	< 1 µg/m³
	> 1000 ppm	> 100 - < 1000 ppm	> 10 - < 100 ppm	> 1 - < 10 ppm	< 1 ppm

Figure 3 : Différentes catégories d'OEB/OEL: NIOSH [6 ;8]

Si aucune information concernant ces limites ne s'y trouve, on utilisera une méthode d'analyse venant de NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) pour identifier la dangerosité des produits et établir leurs limites.

Les trois méthodes suivantes ne sont pas nécessaires mais permettent de garantir la certitude sur le danger du produit. Grâce à l'étape 1 et/ou 2, il est déjà possible d'avoir une idée assez précise de la dangerosité.

Méthode 1 : GHS H-codes

La première permet une évaluation rapide du produit en ne possédant que les GHS H-codes.
Les GHS sont des codes représentant des notions de dangers.

Exemple :

- H301 : Toxique si avalé
- H330 : Fatal si respiré
- …

Ces GHS H-codes se présentent principalement en quatre catégories de danger. Une fois analysé, on peut déterminer dans quelle classe d'OEB, le produit se situe en prenant la catégorie la plus néfaste. Plusieurs critères peuvent intervenir : La toxicité aigüe, la cancérogénéité, les irritations de la peau, des yeux…
Le tableau ci-dessous ne correspond qu'à la toxicité aigüe.

Band	A	B	C	D	E
GHS Signal Word	Precautionary	Warning	Danger	Danger	Danger
GHS Hazard Category	---	4	3	2	1
GHS Hazard Statements		Harmful if swallowed. Harmful if inhaled. Harmful in contact with skin	Toxic if swallowed. Toxic if inhaled. Toxic in contact with skin.	Fatal if swallowed. Fatal if inhaled. Fatal in contact with skin	Fatal if swallowed. Fatal if inhaled. Fatal in contact with skin
"H" Codes		H302, H332, H312	H301, H331, H311	H300, H330, H310	H300, H330, H310

Figure 4 : Catégorie OEB avec les GHS H-codes : NIOSH [6 ;8]

Méthode 2 : La toxicité LD50

La deuxième utilise la toxicité LD50 pour assigner au produit une classe. La LD50 est la dose qu'une population « test » a ingérée et dont 50% d'entre eux sont morts. Cette notion s'exprime en mg/kg ou g/kg. Ces valeurs proviennent d'expériences effectuées sur des souris, des rats. On prendra le plus souvent la valeur testée sur le rat (celle qui se rapproche le plus de l'humain).

Exemple : Si le produit possède un LD50 de 100mg/kg, une personne de 80kg devrait ingérer 8g pour avoir une probabilité de mourir égal à 50%.

Band		A	B	C	D	E
NIOSH banding criteria for **acute toxicity**	**Oral toxicity (LD_{50})**	>2,000 mg/kg-bodyweight	>300 and ≤ 2,000 mg/kg-bodyweight	>50 and ≤ 300 mg/kg-bodyweight	>5 and ≤ 50 mg/kg-bodyweight	≤ 5 mg/kg-bodyweight
	Dermal toxicity (LD_{50})	> 2,000 mg/kg-bodyweight	>1,000 and ≤ 2,000 mg/kg-bodyweight	>200 and ≤ 1,000 mg/kg-bodyweight	>50 and ≤ 200 mg/kg-bodyweight	≤ 5 mg/kg-bodyweight

Figure 5 : Catégorie des OEB en fonction des LD50 : NIOSH [6 ; 8]

Méthode 3 : Expert

La troisième est la plus complète en utilisant les données de la première et de la deuxième méthode ainsi que de l'avis d'un expert.

Remarque générale : En fonction de la catégorie du produit, un niveau de protection est souhaité et cela permet de guider l'utilisateur sur le choix de l'équipement devant être utilisé.

5.2. Analyse des manipulations effectuées, procédures des pharmaciens

Deuxièmement, il faut savoir comment les utilisateurs vont utiliser leur produit. Que vont-ils faire avec ? Les mélanger, les mixer, les peser, les injecter ? Quels sont les appareils utilisés pour faire ces manipulations (balance, mixeur, …) ? Y a-t-il des contraintes ? Comme par exemple, l'impossibilité de faire les manipulations avec des gants, les appareils prennent trop de place ? Faut-il protéger le produit, l'utilisateur, les deux ?

5.3. Analyse de risque

Troisièmement, en comprenant bien le processus que les utilisateurs vont faire avec les produits utilisés, il faut effectuer une analyse de risque. En se positionnant dans le cas le plus dangereux, le plus critique par rapport à l'utilisateur, au produit ou à l'environnement, cela permet de choisir l'équipement en s'assurant toujours une sécurité maximale ou la plus adéquate dans n'importe quel cas.
Dans certains cas, si une incompatibilité est remarquée, une séparation des produits ou des manipulations pourrait être effectuée. Une partie se ferait dans un équipement plus spécifique et le reste dans un équipement « standard ».

5.4 Arbre décisionnel

A partir des connaissances acquises et de l'inspiration d'un arbre de décision existant, cet outil a été créé en tenant compte des besoins de l'entreprise. Plusieurs contacts avec des fournisseurs ainsi que le suivi de cas concrets ont permis de développer cet arbre décisionnel efficace et complet. De plus, suite à toute la méthode, la précision est beaucoup plus importante. L'étude sera nettement plus pertinente et pourra être défendue devant le client.
D'autres méthodes peuvent exister mais sont moins précises. Il faut savoir que chaque constructeur a sa propre méthode et qu'il faut parfois les utiliser afin de comparer les résultats.
Ci-après se trouve la dernière version de l'arbre décisionnel à l'écriture de cet article, des modifications/améliorations pourront être faites lors de la vie future de cette méthode. Une amélioration continue est la clé d'un travail de qualité.

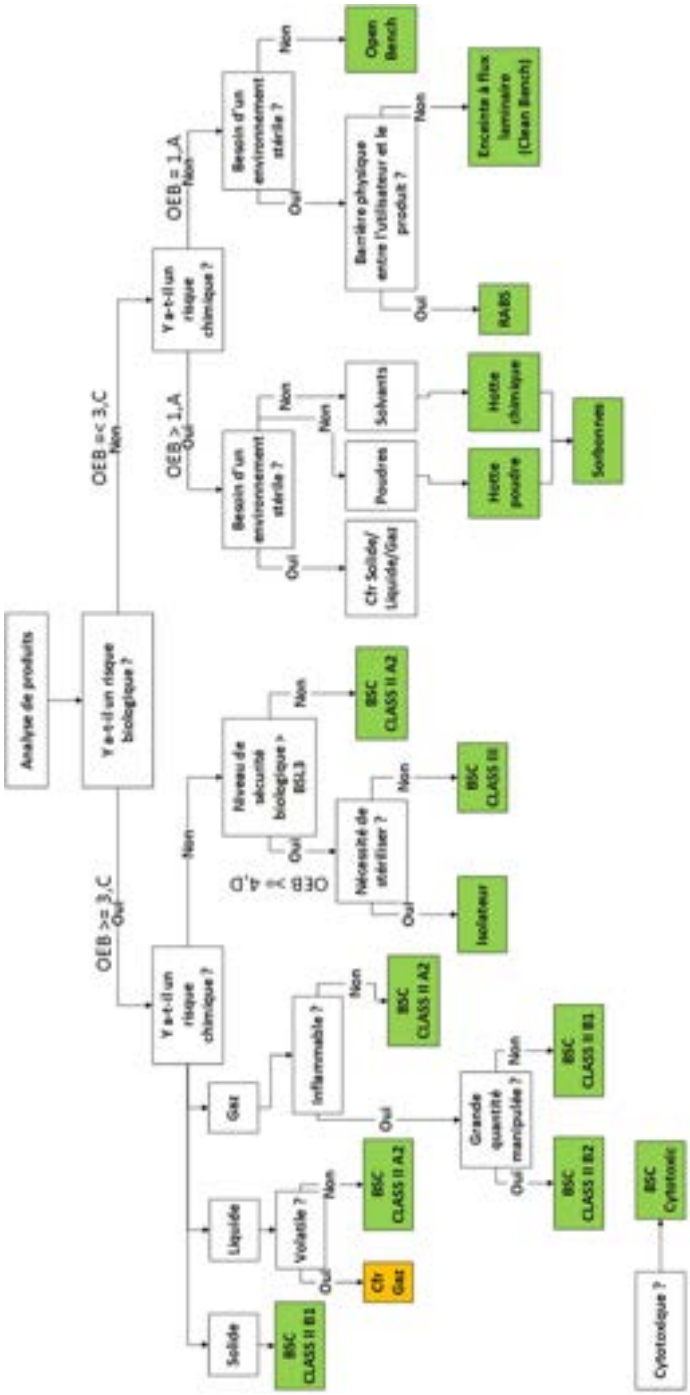


Figure 6 : Arbre décisionnel [2]

6. Cas concret

Le projet étudié est celui d'une pharmacie hospitalière se trouvant à Leuven.
Dans cette zone, seront produits :

- des cytotoxiques, des anticorps monoclonaux (des liquides et des poudres brutes) ;
- des gélules à petite et grande échelle (des liquides et poudres non toxiques) ;
- des produits non stériles ou stériles (à partir de poudres non toxiques et toxiques) ;
- des produits aseptiques TPN.

6.1. Première étude

Lors de la première étude, un problème de budget est survenu. Il a donc fallu chercher des pistes d'économie. L'une d'elle était de réétudier la partie « équipements ». En effet, la plupart des équipements choisis étaient des hottes poudres avec une extraction de l'air directement connectée vers l'extérieur, c'est à dire « ducted ». Le problème était qu'il fallait des débits considérables en air neuf. En effet, pour contrôler la pression du local, il faut qu'il y ait au moins autant de débit d'air pulsé qu'extrait, sinon le local est en pression relative fortement négative. De plus, la marche ou l'arrêt de certaines hottes modifierait ces débits et ces pressions. Cette problématique n'est pas facile à mettre en œuvre.
En suivant la méthode décrite dans cet article, nous allons réétudier si le choix de l'équipement était le bon et en voir les conséquences.

Avant la deuxième étude, il y avait 14 hottes poudres demandant **15000 m³/h** d'air neuf. Grâce à un outil développé, le calcul de la consommation énergétique de préparation de ces 15000 m³/h d'air neuf a pu être effectué. Le coût total par an estimé est de **43.138€** pour une centrale de traitement d'air fonctionnant 24h/24 durant toute l'année.
Le prix de l'électricité a été fixé à 10 c€/kWh, celui du gaz à 6 c€/kWh et 5€ le litre d'eau.

6.2. Deuxième étude

Analyse des produits

Afin de choisir correctement l'équipement désiré, nous avons analysé les produits que notre client utilise. Avec l'aide d'une pharmacienne, les produits les plus dangereux ont été relevés parmi une liste considérable de produits.

Première étape, analyse des GHS H-codes :

Dans certaines fiches sécurités des produits, GHS H-codes ne figurent pas, mais les notions de dangers y sont quand même renseignées. Reste à les relier avec les H-codes à l'aide de tableaux.

Produits	Notions de danger	GHS H-codes	OEB
Acetate de fluorocortisol 9	Dangereux si contact avec la peau (irritant) Dangereux si contact avec les yeux (irritant) Dangereux si avalé Dangereux si respiré	H315 H319 H301 H302	C C C C
Diazepam	Dangereux si avalé Peu dangereux si contact avec la peau (irritant) Peu dangereux si contact avec les yeux (irritant): Peu dangereux si respiré	H301 H315 H319 H302	C C->B C->B C->B
Pénicilline V (sel de potassium)	Acute oral toxicity Respiratory Sensitization Skin Sensitization	Category 4 Category 1 Category 1	C D->C C
Pentobarbital	Toxique si avalé Peut être dangereux si respiré (irritant) Peut être dangereux si contact avec la peau Peut causer des irritations au niveau des yeux	H301 H302 H315 H319	C C->B C->B C->B
Propionate de testostérone	Peu dangereux si contact avec la peau (irritant) Peu dangereux si contact avec les yeux (irritant) Peu dangereux si avalé Peu dangereux si respiré	H315 H319 H301 H302	C->B C->B C->B C->B

Figure 7 : GHS H-codes des produits

Beaucoup d'entre-eux ont été ramenés à la catégorie B de l'OEB. En effet, dans le NIOSH la classe OEB C comprend la classe OEB B et C venant d'autres sources. Il n'a été choisi que lorsque la notion de danger étant peu probable, ou peu dangereuse, la classe du produit diminuerait de dangerosité.

Deuxième étape, prise en compte du paramètre LD50 pour améliorer notre analyse :

Band		A	B	C	D	E
NIOSH banding criteria for acute toxicity	Oral toxicity (LD_{50})	>2,000 mg/kg-bodyweight	>300 and ≤ 2,000 mg/kg-bodyweight	>50 and ≤ 300 mg/kg-bodyweight	>5 and ≤ 50 mg/kg-bodyweight	≤ 5 mg/kg-bodyweight
	Dermal toxicity (LD_{50})	> 2,000 mg/kg-bodyweight	>1,000 and ≤ 2,000 mg/kg-bodyweight	>200 and ≤ 1,000 mg/kg-bodyweight	>50 and ≤ 200 mg/kg-bodyweight	≤ 5 mg/kg-bodyweight

Figure 8 : LD50 des produits

Avec l'aide de ce tableau, nous avons les OEB suivant :

Produits	LD50 (mg/kg)	OEB
Acétate de fluorocortisol 9	1001	B
Diazepam	249	C
Pénicilline V (sel de potassium)	1040	B
Pentobarbital	118	C
Propionate de testostérone	1000	B

Figure 9 : LD50 des produits

Conclusion de l'étape 1 et 2

La conclusion des OEB a été faite en prenant les cas les plus défavorables pour prendre le moins de risque possible et garantir une sécurité optimale :

Produits	Etape 1	Etape 2	OEB
Acétate de fluorocortisol 9	C	B	C
Diazepam	C	C	C
Pénicilline V (sel de potassium)	C	B	C
Pentobarbital	C	C	C
Propionate de testostérone	B	B	B

Figure 10 : Résultats des OEB des produits

Choix de l'équipement

Afin de choisir l'équipement, l'arbre décisionnel est utilisé.

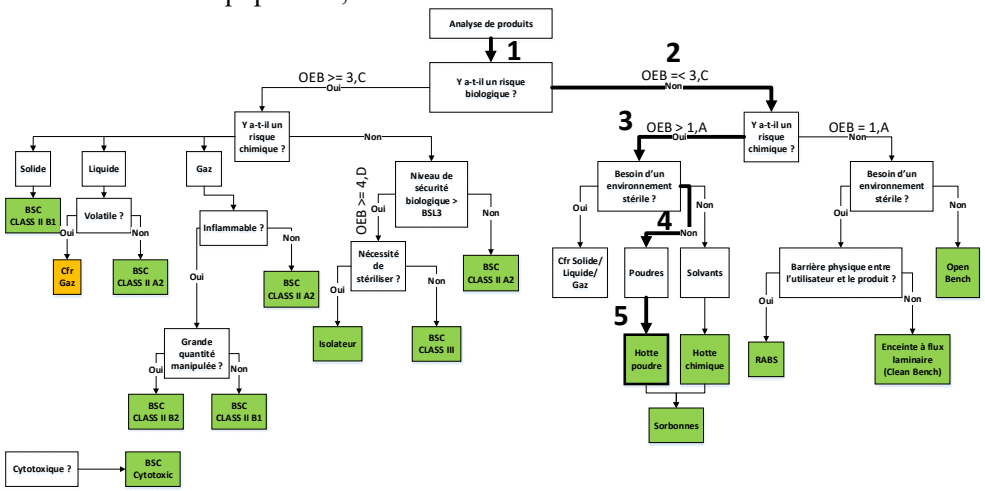


Figure 11 : Choix de l'équipement à l'aide de l'arbre décisionnel

Premièrement, **l'analyse de produits** a bien été faite **(1)**. Ensuite, il ne s'agit pas de virus, bactérie, il n'y a donc **pas de risque biologique (2)**. Nous ne sommes qu'en

présence de **produits solides** (poudres toxiques) **(5)** dont leur limite d'exposition est inférieure ou égale à OEB C. Il y a donc **un risque chimique (3)**. Les manipulations qui seront effectuées sont essentiellement des pesées et des mixages. Il ne faut pas une protection à l'aide d'un flux unidirectionnel du produit, **un environnement stérile n'est pas nécessaire (4)**.
A l'aide de l'arbre de sélection, nous avons pu déterminer qu'il faudrait une hotte poudre pour garantir une protection de l'utilisateur lors de la manipulation de ces produits. Aucun solvant, excepté de l'eau, ni gaz ne seront utilisés dans cette hotte. Il ne faut donc pas de filtre à charbon actif en plus, et donc pas de Sorbonne.
Equipement nécessaire : Hotte poudre

Figure 12 : Hotte poudre

Rejet de l'air

Suite à l'analyse de nos produits, l'équipement approprié a pu être déterminé. De plus, cela a permis d'en déduire que l'air rejeté par la hotte, peut être recyclé dans le local.
En effet, lors d'une simple réflexion, on peut vite constater que la quantité de poudre pouvant passer par un filtre à très haute efficacité (H14) en « worst case » (le cas le plus critique) est très infime et ne soumettrait pas l'utilisateur à un danger potentiel. Au final, le plus grand danger auquel l'utilisateur peut être soumis est un danger venant de sa part, lors de la manipulation de la poudre avec ses mains qui seraient « remplies de poudre » et qu'il sortirait de la hotte.
De plus, il ne faut pas de barrière physique (avec des gants) séparant le produit de l'utilisateur car nous sommes en présence de poudre possédant un OEB plus petit ou égale à C.
Afin de confirmer le choix de l'équipement et le souhait de rejet d'air dans le local, une société vendant des hottes poudres a confirmé, après l'étude des produits, que l'équipement choisi était le bon.

Coupure de courant

Cette partie est très brève dans ce cas-ci car si une coupure de courant survient, la hotte se coupe. Si on souhaite continuer à protéger l'utilisateur, l'équipement peut être mis sur un circuit électrique de secours afin de pouvoir finir sa manipulation au plus vite. L'énorme avantage d'une hotte poudre à rejet dans le local est qu'elle n'influence pas les pressions de la salle propre. En effet, aucun débit d'air n'est extrait vers l'extérieur. De plus, Il ne faut pas une extraction supplémentaire en toiture comme lorsqu'elle est « ducted ». La problématique est beaucoup plus compliquée lorsque l'on travaille avec des équipements de ce genre car il faut toujours tenir les pressions entre les locaux, lors d'une coupure de courant. Les choses sont très complexes car les groupes de ventilation s'arrêtent aussi et ne fournissent plus d'air dans les locaux. Des surpressions ou des dépressions dans les gaines d'extraction, le niveau de confinement des locaux n'est plus respecté, le sens des fuites change …

Economie

Au début du projet, comme expliqué au début de ce chapitre, l'utilisation de hottes poudres à FULL extraction faisait exploser le budget au niveau de l'HVAC. Grâce à cette analyse profonde, nous avons pu économiser une quantité non négligeable d'air neuf par an. C'est-à-dire **15000 m³/h** et **43.138€** par an comme calculé précédemment. De plus, le fait de ne plus devoir préparer ces 15000 m³/h permettra de supprimer une centrale de traitement d'air dont le prix est de **+-40.000€.**
Mais ce n'est pas tout, car le fait de ne pas devoir connecter les équipements vers l'extérieur, aucune conduite d'extraction ne doit être placée. Probablement plusieurs centaines de mètres de tuyauteries (partant de l'équipement, jusqu'à la toiture du bâtiment) ne devront pas être achetées, ni installées. Cela libère de la place considérable dans les espaces techniques. De plus, lorsqu'une hotte est connectée vers l'extérieur un extracteur doit se situer « au bout » de la conduite afin d'aspirer l'air vicié. Or dans ce cas-ci, il n'en faut pas, ce qui diminue encore une fois les coûts par rapport à la première étude. Mais aussi, aucune maintenance des extracteurs n'est nécessaire.

Voici les chiffres de ces dernières remarques concernant les conduites d'extraction et les extracteurs en toiture :

- La pharmacie se trouve au deuxième niveau du bâtiment. Huit étages se trouvent au-dessus de celle-ci. La hauteur de chaque niveau est de 3,9 m. Ce qui fait **31,2 m** pour l'extraction verticale d'une seule hotte. Au total : 14 hottes * 31,2 m = **436,8 m**
- La longueur totale de conduite d'extraction allant de chaque hotte jusqu'à la trémie située au même niveau est de **485 m.**
- Le coût d'un extracteur en toiture est de **1.500€**.

	Prix	Unité	Total
Gaines	90€/m	= 436,8 + 485	82.962,00 €
Extracteur	1500€	14	21.000,00 €
		Total	**103.962,00 €**

Bilan total

	Prix
Gaines + Extracteurs	103.962,00 €
Centrale de traitement d'air	40.000,00 €
Total	**143.962,00 €**
Economie de préparation d'air neuf	**43.138 € / an**

Au total on remarque que **l'économie totale** de la construction du projet est de **143.962,00 €**, « juste » en ayant choisi un équipement plus approprié. De plus, **chaque année**, **une économie de 43.138,00 €** sera faite puisqu'il ne faut plus préparer ces 15.000 m³/h d'air par an. L'économie financière est un argument primordial pour le client.

7. Conclusion

Pour pouvoir élaborer cette méthode de sélection d'un équipement de laboratoire, il a fallu tout d'abord effectuer de nombreuses recherches bibliographiques sur différents sujets. Le premier était celui de la salle propre afin de comprendre dans quel environnement ces équipements allaient être utilisés, celui-ci étant très complexe dans le domaine pharmaceutique, de la biotechnologie… Le second était de comprendre et d'étudier précisément les différents types d'équipements de laboratoires. Ces recherches ont été complétées en contactant des fournisseurs de ces appareils où des ingénieurs sont venus présenter leur produit.

Par la suite, après avoir développé une connaissance assez bien poussée dans ce domaine, il a été possible de mieux comprendre la problématique faisant face. Peu d'informations étaient disponibles sur ces équipements, beaucoup d'incertitudes de la part des fournisseurs étaient présentes. Peu de normes existent sur l'utilisation de produits dangereux, par exemple toxiques, dans ces appareils de protection. En tant que bureau d'études, il a été important de pouvoir approfondir le sujet et de fournir une synthèse, une méthode afin de dimensionner au mieux les projets.

Cet article a permis de faire une synthèse des équipements les plus fréquents et disponibles pour travailler en salles propres. Ainsi que d'éclaircir plusieurs points comme les caractéristiques minutieuses de chaque équipement mais aussi d'apporter de nouveaux questionnements sur différents aspects. Par exemple, qu'en est-il du niveau de confinement des hottes ? Aucun fournisseur (ou très peu) ne peut répondre

à ce genre de question. De plus, il a permis de sensibiliser l'importance du choix des équipements, en étudiant à travers le cas concret, les conséquences économiques d'un projet.

En effet, ce cas concret reflète bien l'impact d'un mauvais choix d'équipement. Après ré-étude, une économie majeure de 143.962,00 € a pu être faite en choisissant des équipements plus appropriés ainsi qu'en supprimant une centrale de traitement d'air. En effet, il ne faut plus préparer les 15.000 m³/h d'air neuf que les équipements demandaient par an et ce qui correspondait à une préparation d'air neuf coûtant 43.138,00 € par an. Au final, cette ré-étude a permis de réduire le coût de la partie équipement sur un projet de plusieurs centaines de milliers d'euros. Lors de la réalisation de projets de cette ampleur, aucune petite économie ne doit être négligée.

Cette étude a permis de réaliser une méthode de sélection qui offre plusieurs avantages : décider plus rapidement et plus sereinement le type d'équipement nécessaire parmi une grande variété de possibilités, analyser des produits inconnus, les identifier et les classifier en fonction de leur dangerosité. En phase d'avant-projet, on peut déjà savoir si on doit prévoir des conduites d'extraction pour les hottes (ainsi que des extracteurs en toiture), les débits d'air nécessaires à fournir … Le choix correct d'un équipement est primordial car cela influence énormément les facteurs gravitant autour (la complexité des laboratoires, l'HVAC, le budget …).

Au terme de ce travail, tous les outils sont mis à la disposition de chacun afin de pouvoir choisir correctement un équipement de laboratoire. Cependant, cette méthode n'est pas la version définitive, toutes les modifications en vue d'une amélioration sont bien sûr les bienvenues afin d'opter pour une amélioration continue et ainsi viser un travail de qualité. J'encourage à utiliser cet ouvrage lors de nouveaux projets et de créer une base de données avec les différents produits et les divers équipements utilisés pour qu'à l'avenir, le choix de l'équipement soit le plus approprié possible. De plus, il serait intéressant de créer et d'étudier divers scénarios (plusieurs équipements dans un local, par exemple, avec ou sans extraction) afin de comprendre et par la suite expliquer aux clients les solutions techniques nécessaires à la réussite d'un projet.

8. Sources

[1] Aldrich. (2008). *Aldrich ChemFiles: Laboratory Data Guides.* Aldrich.

[2] BAKER. (2016). *Clean Air & Containment Decision Map.* Baker Company.

[3] ESCO. (1996). *A Guide to Biosafety & Biological Safety Cabinets - Biohazards and Biosafety Levels.*

[4] I. Balty, B. B.-C.-A.-C. (trimestre 2003). Postes de sécurité microbiologiques. Postes de sécurité cytotoxique. *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, N° 193.

[5] ISO14644, N. Salles propres et environnements maîtrisés apparentés.

[6] McKernan, L. T. (September 2015). Occupational Exposure Bands (OEBs). Dans National Institute for Occupational Safety et Health (NIOSH).

[7] Primary Containment for Biohazards: Selection, Installation and Use of Biological Safety Cabinets. (s.d.). *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories*, 290-325.

[8] Susan D. Ripple. (s.d.). *Health Hazard Banding = Occupational Exposure Banding*

[9] Vodex. (s.d.). Quick Reference Guide to Cabinet types. *Registration Number 4812548*, Registration Number 4812548,. Romsey.

Applications de streaming vidéo sur Hololens

Ing. G. VANVINCKENROYE
Dr F. SENNY
GRAMME - Liège

Ce papier constitue le résumé d'un travail fruit de 13 semaines de stage au sein de l'entreprise EVS Broadcast Equipment. Il traite du développement d'application pour les lunettes de réalité augmentée Hololens. Différents points sont abordés, comme la présentation de la lunette, la communication réseau ou encore les performances de la lunette.

Mots-clefs : Hololens, EVS Broadcast Equipment, C\#, Socket, 3D, Hologrammes, Serveur, Réseau, Parsing, POO

This paper is the summary of a thesis which is the result of a 13-weeks internship at EVS Broadcast Equipment. It discusses the development of applications for the holographic glasses Hololens. Different aspects are approached, among other a presentation of the Hololens device, network communication or the performances of the Hololens device.

Keywords : Hololens, EVS Broadcast Equipment, C\#, Socket, 3D, Holograms, Server, Network, Parsing, OOP

1. Introduction

« La technologie de l'information a changé la façon dont les gens créent de la valeur économique », comme l'a dit Alan Greenspan, docteur en sciences économiques et ancien président de la Réserve fédérale de la Banque Centrale des Etats-Unis. Cet article présente le développement d'une nouvelle façon de vivre des évènements mondiaux, retransmis en direct. Il est le fruit d'un travail de fin d'études découlant de 13 semaines de stage au sein de l'entreprise EVS Broadcast Equipment située à Seraing, en Belgique.

Le produit utilisé lors de la réalisation de ce travail est la lunette de réalité augmentée Microsoft Hololens. Cette lunette permet d'intégrer des éléments virtuels dans le champ de vision de la personne les portant, et de faire interagir ces éléments virtuels avec l'environnement autour de celui-ci.

Le but final du projet était de proposer une manière innovante au milieu du broadcast, bien que la version du produit soit invendable au grand public, étant donné qu'il s'agit d'une version développeur, et non un produit fini.

Ce travail s'est déroulé en plusieurs parties : la première consistait en une prise de connaissance avec le milieu du broadcast, un enseignement des bonnes pratiques de celui-ci, et de l'écosystème propre à l'Hololens.

Ensuite, un premier projet a été proposé, celui de mettre en place un mur d'écran virtuel remplaçant les écrans physiques actuellement utilisés. Les différents écrans seraient alimentés par différents flux vidéo provenant, par exemple, des caméras situées dans une salle de concert. Cependant, ce projet a été abandonné suite à des contraintes de deadline et technologiques.

Enfin, le projet ayant abouti consiste à visualiser en 3D le déplacement des différents acteurs d'un match de football, ayant été soumis à un dispositif de tracking lors d'un match s'étant déjà déroulé. A cette visualisation du match s'ajoutent différentes fonctionnalités comme la navigation dans le match, ou des outils d'analyse tactique.

Cet article présente un condensé du travail, et nous conseillons une lecture du travail complet pour une compréhension globale du sujet.

2. Notions préliminaires

Afin de comprendre le travail réalisé, il est nécessaire de connaître certaines informations tant sur le milieu du broadcast que sur la lunette de réalité augmentée Hololens.

2.1. Présentation du milieu du broadcast

Le milieu du broadcast est un milieu mobile. En effet, des évènements se déroulent aux 4 coins du monde, et les infrastructures permettant la retransmission de ces évènements est donc concentrée dans des camions, où les réalisateurs proposent aux téléspectateurs le meilleur angle et le meilleur ralenti. Cet aspect mobile du milieu entraine que toute l'infrastructure est concentré dans des espaces exigus.

Cette infrastructure, composée de serveurs, écrans ou encore câbles, est actuellement indispensable et laisse donc très peu d'espace aux opérateurs, et rend leurs conditions de travail difficile. La figure 1 illustre l'intérieur d'un camion de réalisation.

Figure 1: Intérieur d'un camion de réalisation [1]

Un des enjeux du progrès technologique est, pour le monde du broadcast, de réussir à augmenter le confort de travail des opérateurs, et donc de réduire l'encombrement lié au matériel nécessaire à la retransmission d'évènements télévisés.

2.2. Présentation de la lunette Hololens

La lunette de réalité augmentée Hololens est un produit développé par Microsoft. Elle permet la visualisation d'hologrammes en 3D, et de les intégrer dans l'environnement autour de l'utilisateur. Cette immersion des hologrammes se fait grâce à différentes fonctionnalités, qui sont ici brièvement présentées, mais de manière bien plus approfondie dans le travail complet.

Gaze :
Le *Gaze* (Regard en anglais), permet à l'utilisateur d'avoir un curseur suivant la direction de sa tête. Ainsi il pourra interagir avec certains éléments virtuels en les pointant avec ce curseur.

SpatialMapping :
Le *SpatialMapping* permet à la lunette de réaliser un scan de son environnement, et d'en réaliser un maillage triangulaire en 3D. Ce maillage est placé dans un repère propre à la lunette, et va donc permettre de situer les différents hologrammes d'une part entre eux, grâce au repère spécifique à la lunette, mais également par rapport aux éléments réels grâce au maillage permettant de situer l'origine du repère de la lunette dans le monde réel. Ce *SpatialMapping* peut être poussé un cran plus loin, grâce au *SpatialUnderstanding*. Ce module supplémentaire, permet de réaliser un maillage plus fin de la pièce, et donc de réaliser certaines détections automatique, comme une détection de plan par exemple le sol ou encore le plafond. Le scan, tant pour le *SpatialMapping* que pour le *SpatialUnderstanding* est réalisé sur des zones spécifiques. Ainsi, l'utilisateur pourra en pointant le *Gaze* sur certains endroits de la pièce, scanner la zone. La figure 2 met en évidence la différence entre le *SpatialMapping* et le *SpatialUnderstanding.* On constate que le maillage sur la partie gauche de l'image, issu du *SpatialUnderstanding*, est beaucoup plus précis et plus fin, notamment au sol, que le maillage blanc, issu du *SpatialMapping.*

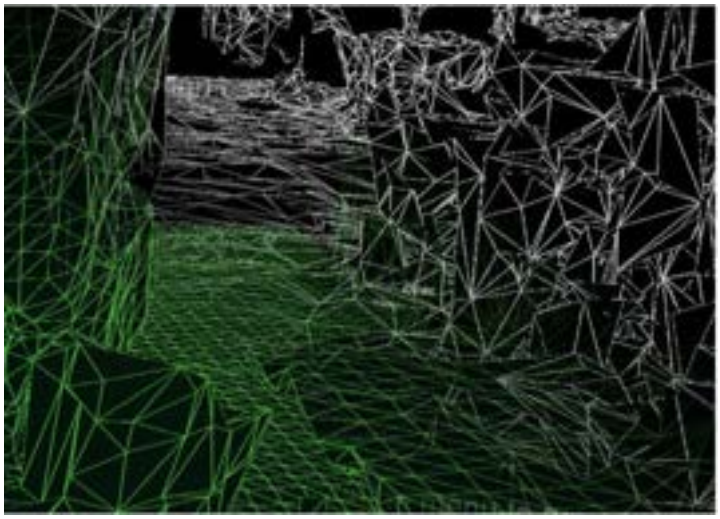


Figure 2: Différences entre le SpatialMapping et -Understanding

GestureUnderstanding :
Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de communiquer avec la lunette, comme en effectuant l'équivalent d'un click de souris, grâce à l'Air-Tap. Différents gestes,

prévu dans le système d'exploitation de la lunette[1], permettant la navigation dans la lunette peuvent être détectés par la lunette, et sont développés dans le travail complet concernant ce projet.

3. Développement d'un mur d'écrans virtuels

Comme mentionné précédemment, un des enjeux du milieu du broadcast est de réduire l'encombrement lié aux infrastructures nécessaires à la retransmission d'un événement. Ainsi, un des sujets abordés est de réaliser un mur d'écrans virtuels, permettant à chacun des utilisateurs de visualiser les écrans désirés dans ses propres lunettes. De cette façon, deux utilisateurs différents peuvent superposer leurs écrans respectifs, étant donné qu'ils ne sont visibles qu'à travers les lunettes.

3.1. Principe général de l'application

Le schéma de principe de l'application est celui illustré à la figure 3. Il est important de noter qu'en plus des étapes illustrées sur le schéma, il faut mettre en place une communication entre un serveur et la lunette, ainsi qu'entre les caméras et le serveur.

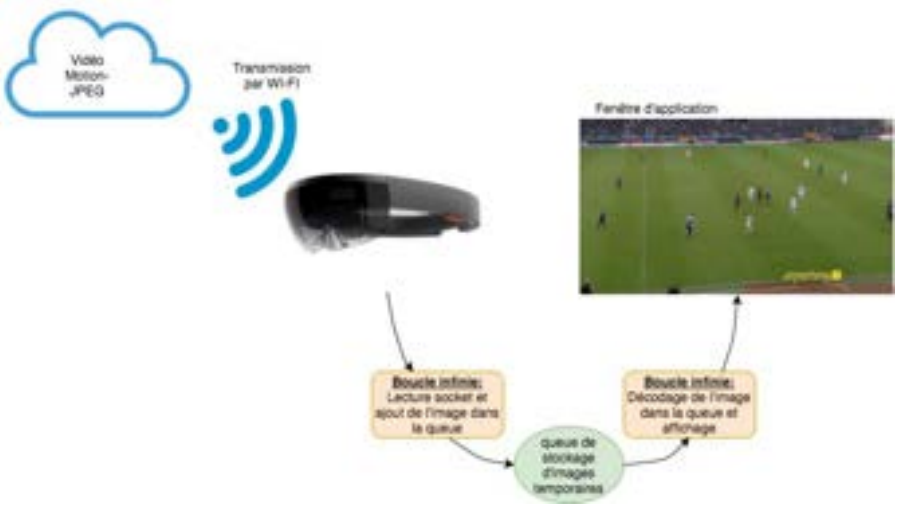


Figure 3: Schéma général de l'application

[1] Voir référence [1] : Microsoft Dev Center - Gestures

Le problème rencontré dans ce cas-ci est lié au fait que la lunette est extrêmement récente, et que les capacités de celle-ci sont donc toujours fort floues. Afin de définir ce qu'il était possible de réaliser avec la lunette, nous avons réalisé une application de type Universal Windows Platform (UWP). Comme son nom l'indique, une application UWP est une application qui peut tourner sur l'ensemble des appareils équipés d'un système d'exploitation Windows 10. Cela permet donc de faire tourner la même application sur la lunette, et sur un PC et donc de comparer les performances des deux applications.

Comme illustré à la figure 3, l'envoi et la lecture d'une image se déroulent en plusieurs étapes :

1. La première étape consiste à instaurer une liaison par socket entre le serveur et la lunette. Celle-ci est ouverte sur un port choisi directement dans le code. On transmet au serveur l'adresse IP de la lunette, ainsi que le port, et celui-ci « pousse » ensuite les images l'une après l'autre sur le socket. Afin de se débarasser de toute une série de header liés aux protocoles, cette communication se fait dans une couche de bas niveau, la couche TCP.
2. Le serveur commence ensuite à envoyer, toutes les 40 ms (pour du 25 fps), une image. Cette image est envoyée dans une séquence d'octets, où les 4 premiers contiennent la taille de l'image, tandis que tous ceux qui suivent contiennent l'image en elle-même.
3. La lunette, lorsqu'elle reçoit une image, lit les 4 premiers octets, afin de connaître la taille de l'image à afficher. Une fois sa taille connue, elle boucle sur la séquence d'octets, jusqu'à avoir séparé les octets contenant l'image du reste de la chaîne. Ainsi, on peut stocker dans un objet l'image, ainsi que sa taille séparément.
4. Une fois que cette image est stockée dans un objet, cet objet est poussé dans une queue. Une queue permet de retirer des objets d'une file d'attente dans le même ordre que celui dans lequel ils ont été ajoutés.
5. Parallèlement à la thread de lecture sur le socket, une seconde thread retire les objets au fur et à mesure de la queue, décode l'image contenue dans l'objet, et actualise une photo dans la fenêtre d'application.

Ces étapes se déroulent pour chacun des flux vidéo que l'on désire afficher dans la lunette.

3.2. Performances de l'application

Comme mentionné précédemment, les performances de la lunette sont à l'heure actuelle encore fort floues. C'est pour cette raison que nous avons décidé non seulement d'observer les performances de l'application sur Hololens, mais également de les comparer à la même application sur PC.

Analyse des performances sur l'Hololens

Différents problèmes ont été constatés lors de l'exécution de l'application sur la lunette, mais un seul sera discuté dans ce résumé : la présence d'artefacts sur la vidéo.

Ce phénomène d'artefacts consiste à observer à l'œil nu une pollution des images affichées dans l'application. La pollution observée est une pixellisation dans le coin inférieur droit de l'image, comme illustré à la figure 4.

Figure 4: Artefacts observés sur des images de 282,3 kB (à droite) et 290,5 kB (à gauche)

Le paradoxe de cette pollution des images est que la pollution sur l'image de droite est supérieure à celle de gauche, alors qu'elle est de taille plus petite. Il n'y a donc pas de lien direct entre la taille de l'image à décoder, et la qualité du décodage de celle-ci. Cette pollution est observée dès que la fréquence d'envoi d'une nouvelle image atteint 25 fps, tandis qu'il est nécessaire d'augmenter énormément cette fréquence (jusqu'à 60-70 fps) lors de l'exécution sur PC. On peut donc penser que la lunette ne parvient pas à décoder assez rapidement les images. Cette hypothèse est confirmée par un problème d'accumulation des images dans une queue, discuté en détail dans l'ouvrage complet.

3.3. Conclusion intermédiaire

Ce premier projet nous a permis de faire connaissance avec l'entièreté de l'écosystème de la lunette, tant au niveau du langage de programmation (C#) que des logiciels permettant le développement des applications (Unity, Visual Studio,etc.). Il a également permis, via les limites rencontrées par la lunette, de prendre plus conscience du potentiel, et du cahier des charges auquel la lunette est capable de répondre.

4. Visualisation d'un match de football en 3D

Les conclusions amenées par le premier projet nous ont poussés à développer une application plus en phase avec le cahier des charges de la lunette. Cette application

consiste à visualiser, en 3D, le déplacement des différents acteurs d'un match (balle, joueurs, arbitre). Afin de connaître les différentes données sur les joueurs au cours d'un match, ceux-ci ont été soumis à un tracking GPS pendant un match.

Le but de l'application finale étant de permettre à un utilisateur de communiquer avec l'application, à l'aide d'une commande, différentes structures ont été mise en place :

1. La première étape consiste à transformer les données GPS, stockées dans un fichier .txt (que nous appelerons fichier TRACAB, du nom de l'entreprise ayant récolté les différentes données au cours d'un match), en un ensemble de données exploitable pour l'application, c'est à dire des objets.
2. Ensuite, un serveur Http a été mis en place pour permettre la communication entre la commande, et la lunette.
3. Enfin, différentes fonctionnalités (des analyses tactiques par exemple) ont été mise en place, afin de rendre l'application plus dynamique et interactive.

Un schéma global de l'application est illustré à la figure 5. On peut observer sur cette figure la commande reliée via un câble USB à un serveur. Ensuite, le serveur envoie des données à la lunette, qui les analyse et effectue des actions en fonction de ces données.

Figure 5: Schéma de principe de l'application de visualisation d'un match en 3D

4.1. Parsing du fichier TRACAB

Comme mentionné ci-dessus, les différentes données GPS (position X, Y, Z, vitesse) sont stockées dans un fichier texte, où chaque ligne représente un échantillon des

positions de toutes les positions des acteurs. Cet échantillonnage s'est déroulé à du 25 Hz.

Pour pouvoir exploiter ces données, nous avons décidé de créer différentes classes, dont la structure est illustrée à la figure 6 :

1. La première classe, appelée Snapshot, contient l'échantillonage de toutes les positions à un instant t, et correspond donc à une ligne du fichier texte. Ces Snapshots sont caractérisés par un frameID, qui est l'index du Snapshot dans la liste de tous les Snapshots, et un timeCode, qui contient le repère temporel du Snapshot dans le match. Ils contiennent également un objet de type SoccerAgents.
2. La seconde classe, la classe SoccerAgents, contient les positions de tous les acteurs, c'est à dire les joueurs, l'arbitre et la balle. Ainsi, elle contient donc 2 listes de SportAgent, pour l'équipe à domicile et à l'extérieur, et deux objets SportAgent, la balle et l'arbitre.
3. La dernière classe créée est la classe SportAgent, qui contient les différentes données sur les joueurs. Ces données sont, comme mentionné précédemment, les données GPS, ainsi que des données comme le numéro de maillot, l'équipe, ou encore un SystemID permettant au système de garder des numéros de joueurs entre 1 et 22.

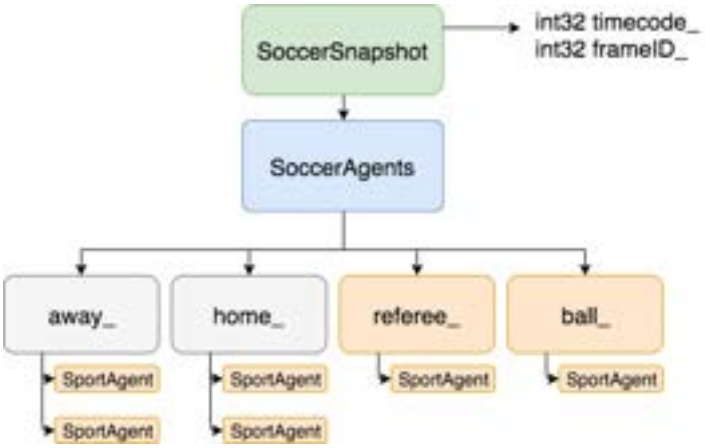


Figure 6: Relations entre les différentes classes de l'application GameVisualisation

Cette hiérarchie entre classes permet, en passant un objet de type SoccerSnapshot au programme, d'actualiser les positions de tous les joueurs, de l'arbitre ou encore de la balle (les objets de type SportAgent). On donnera donc, à vitesse réelle, toutes les 40 ms (la fréquence d'échantillonage étant de 25Hz) un nouveau SoccerSnapshot

afin d'actualiser les positions des différents éléments du terrain. L'entièreté des données sera ensuite lue au sein de cet objet de type SoccerSnapshot.

4.2. Communication entre la commande et la lunette

Afin de permettre à l'utilisateur de communiquer avec la lunette, il a été nécessaire d'ajouter une commande. Cette commande, illustrée à la figure 7, permet de réaliser un grand nombre d'actions.

Figure 7: Illustration de la commande permettant de communiquer avec l'application

Le port USB de la lunette étant exclusivement réservé à la recharge de la batterie de la lunette, une communication réseau a été mise en place entre la lunette, et un serveur, connecté en filaire à la commande. Toutes les 100 ms, une requête de type GET est effectuée par la lunette sur le serveur, qui renvoie une réponse adaptée aux évènements qui se sont déroulés sur la commande.

Cette réponse est structurée de la manière suivante :

deltaX, deltaY, deltaZ, compteurBrowe, keyPressed

Les termes deltaX, deltaY, deltaZ correspondent à l'écart entre la position du joystick et sa position d'équilibre, selon les 3 axes. Le terme compteurBrowse représente l'incrémentation (ou décrémentation) d'un compteur lié à la rotation de la roulette de la commande permettant de naviguer dans le match. Enfin, la variable keyPressed représente la dernière touche sur laquelle l'utilisateur a appuyé.

Une fois cette chaîne de caractères reçue par la lunette, elle est traitée par l'application, et l'action correspondant aux évènements est effectuée.

4.3. Fonctionnement de l'application

Dans son déroulement normal, l'application actualise la position des différents éléments à une fréquence de 25 Hz, qui est aussi la fréquence d'échantillonnage du fichier tracking GPS. Cependant, différentes actions peuvent être effectuées lors de l'utilisation de la commande. Certaines sont assez classiques, par exemple le Zoom-In/-Out ou encore la navigation dans le match, mais certaines sont plus complexes et sont donc développées ici.

Sélection et déplacement d'un joueur

Afin de permettre une analyse tactique, il est possible pour l'utilisateur de sélectionner un joueur, et d'ajuster sa position. Pour ce faire, l'utilisateur déplace le curseur lié au joystick, et sélectionne un joueur en appuyant sur une touche. Un « fantôme » est alors placé à la position initiale du joueur, et une droite relie le joueur, qui suit le curseur. L'utilisateur peut ensuite « déposer » le joueur à un autre endroit sur le terrain et répéter l'opération. Une illustration de cette fonctionnalité se trouve à la figure 8.

Figure 8: Illustration de la fonctionnalité permettant de modifier la position d'un joueur

Détection de zones
Etant dans un cas d'analyse de match de football, il est intéressant de repérer les différents espaces sur un terrain. Ainsi, il est possible de déplacer le curseur dans une zone du terrain, et en appuyant sur un bouton, la zone libre entre les 5 défenseurs les plus proches est tracée. Une illustration de cette fonctionnalité se trouve à la figure 9.

Figure 9: Illustration de la détection de zones

A noter qu'il est possible de combiner les deux fonctionnalités, et donc d'observer l'impact de la position d'un joueur sur la zone laissée libre par les défenseurs.

5. Conclusions

Bien que la lunette soit encore extrêmement récente, il est possible de la prendre en main assez rapidement, et de développer facilement des applications. Cependant, sortir du cahier des charges défini pour la lunette reste compliqué, étant donné le peu d'expériences vécues par les utilisateurs en général.

Ainsi, l'ensemble des ressources fréquemment utilisées pour le développement d'application, tels que les forums de développeurs, reste d'une aide assez limitée.

Bien que la seconde application ait donné des résultats très satisfaisants, il reste encore un grand nombre de pistes d'améliorations, notamment dans les connaissances du potentiel de la lunette. Les principales pistes d'améliorations se situent cependant

au niveau de la première application, en exploitant plus le Graphical Processor Unit (GPU) que le CPU.

Enfin, l'enseignement principal de ces 13 semaines de stage réalisées au sein de l'entreprise EVS Broadcast Equipment, est qu'il est important, lors de l'utilisation d'une technologie encore inconnue, de valider une à une les différentes capacités de celle-ci, avant de projeter de développer des applications plus complexes.

6. Sources

[1] Microsoft Dev Center, (consulté en août 2017), *Gestures*.
Adresse URL : https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures

[2] ESPN, (consulté en septembre 2017), *How ESPN plans to save millions on broadcasts without you ever knowing*.
Adresse URL : http://ftw.usatoday.com/2015/06/espn-broadcasts-remote-integration-save-millions

[3] VANVINCKENROYE, G., *Applications de streaming pour Hololens*, Travail de fin d'études, Liège, Belgique : Institut HELMo Gramme, juin 2017.

L'économie circulaire dans le secteur de la construction

Ing. E. DELCOURT
Ir A. ROMNÉE
Ing. J-P. LAHAYE

ECAM Bruxelles

L'économie circulaire est un thème de plus en plus abordé dans notre société. Mais de quoi s'agit-il exactement ?

La production de déchets et la surconsommation de ressources naturelles grandissante exercent de fortes pressions sur notre environnement. Le secteur de la construction fait partie des plus grands pollueurs et est en partie responsable de l'épuisement des ressources de notre planète. Il se doit donc d'agir face à ces problèmes de surconsommation.

Cet article vise tout d'abord à comprendre les challenges principaux auxquels le secteur du bâtiment doit faire face afin de réduire son empreinte écologique de façon durable. Le modèle stratégique de l'économie circulaire sera développé afin de répondre à ces différents challenges de taille.

Mots-clefs : économie circulaire, développement durable, construction circulaire, urban mining, matériaux de construction

We hear a lot about circular economy but what is it exactly ?

The waste production and the overconsumption of our natural resources induce a strong pressure on our environment. The building sector is one of the biggest polluters and is partially responsible for the depletion of our planet's resources. It must therefore act against these overconsumption's problems.

This article will help you to understand the main challenges facing the building sector in order to reduce its ecological footprint in a sustainable way. The strategic model of the circular economy will be developed to respond to these different challenges

Keywords : circular economy, sustainable development, circular construction, urban mining, building materials

1. L'impact de la mondialisation sur le secteur de la construction

C'est au 19e siècle, lors de la révolution industrielle que la société, jusque-là, artisanale et agricole évolue pour devenir industrielle et commerciale. C'est alors que la mondialisation commence à faire son apparition.

La mondialisation désigne un processus d'intensification des échanges internationaux de toute sorte. Elle représente l'ouverture des frontières et l'apparition du commerce international, de la délocalisation et de la libre-circulation des hommes et des biens.

Ce phénomène a joué un grand rôle sur le développement du secteur de la construction. L'apparition du béton, les échanges de matière première et des techniques de construction, la croissance démographique et ce besoin de créer toujours plus haut, toujours plus résistant ont fait du secteur de la construction une véritable industrie, entrainant une consommation croissante des matières premières.

Cette mondialisation qui a été entamée il y a plus de 200 ans commence à révéler ses effets indésirables. En effet, le modèle économique actuel est notamment basé sur l'hypothèse que les ressources naturelles sont inépuisables or, c'est loin d'en être le cas. Non seulement les ressources naturelles de la Terre ne sont pas inépuisables mais en plus, leur consommation ne fait que s'accroître. Cependant, l'offre de certaines ressources ne sera bientôt plus capable de combler la demande mondiale (exemple figure 1).

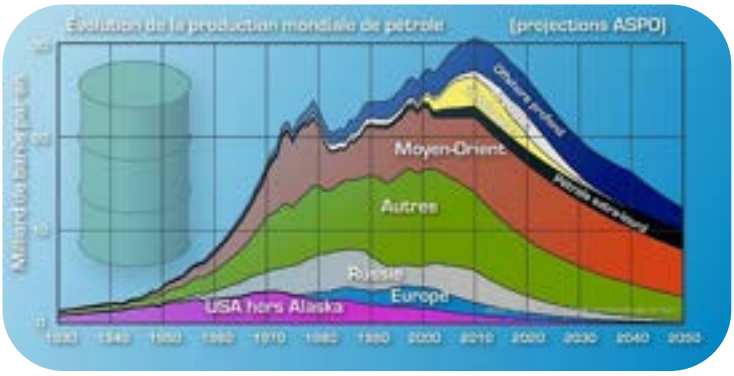


Figure 1 : Evolution et projection de la production mondiale de pétrole
(Source : ASPO-http://www.maison-passive-nice.fr)

Depuis la fin des années 60, la population mondiale augmente d'environ 80 millions de personnes chaque année et la classe sociale dominante consomme de plus en plus. Cette consommation abusive de nos ressources naturelles n'est donc pas près de s'atténuer (figure 2). Entre 1970 et 1995, 30% des richesses naturelles de la Terre ont ainsi disparu.

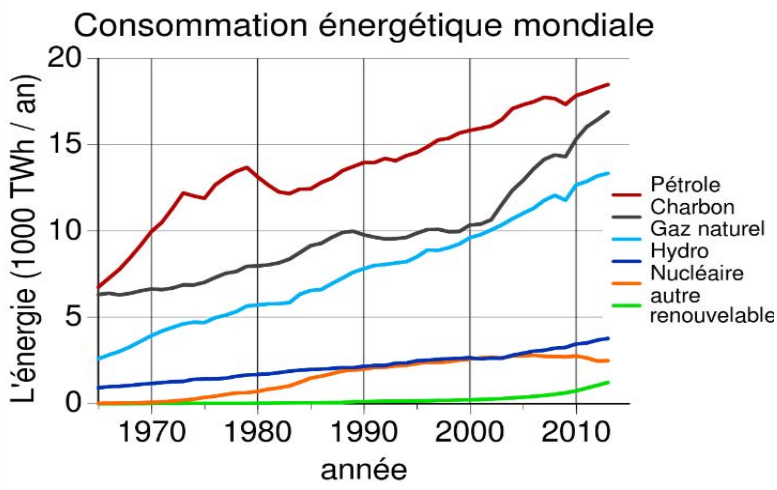


Figure 2 : Consommation énergétique mondiale
(Source: BP Statistical Review of World Energy, 2015)

Les répercussions de l'épuisement des ressources naturelles se font principalement ressentir à travers la volatilité des prix de certaines matières premières.

Pour le pétrole par exemple, malgré la découverte de nouveaux gisements, leur exploitation coûte de plus en plus cher (figure 3). En effet, il s'agit de gisements marins dont les coûts d'exploitation, de développement et de production explosent tous les records.

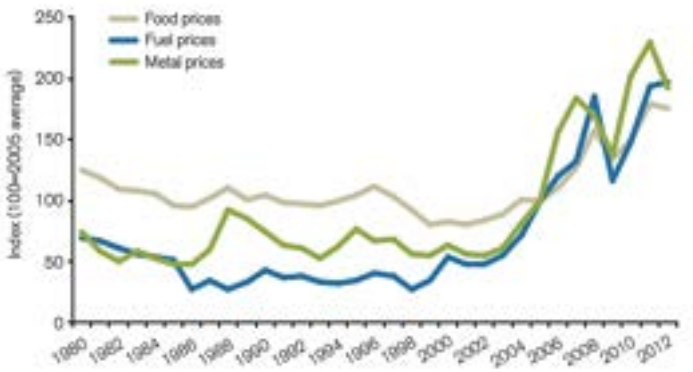


Figure 3 : Volatilité des prix de la nourriture, des carburants et métaux
(Source: Chatham House based on IMF, 2012)

Finalement, la mondialisation est marquée par une répartition inégale de la production de ressources naturelles. En effet, près de 90% des réserves mondiales prouvées de pétrole se trouvent dans seulement 15 pays (sur un peu plus de 200 pays dans le monde actuellement). La production de ressources en occident étant limitée, nous sommes dépendants des pays producteurs pour maintenir notre qualité de vie.

2. Les défis du secteur de la construction

Pour se défaire de cette dépendance des autres pays et diminuer notre surconsommation de ressources naturelles évoquée dans le paragraphe précédent, il est nécessaire de gérer des ressources naturelles de manière plus durable tout au long de leur cycle de vie, depuis leur extraction jusqu'à l'évacuation des déchets.

Le secteur de la construction joue un rôle majeur en tant que grand pollueur et consommateur de ressources. D'après la Commission Européenne, le secteur de la construction est responsable de :

- → 50% du total des ressources naturelles exploitées
- → 33% des déchets produits (en poids)
- → 42% des consommations totales d'énergie
- → 35% des émissions de gaz à effet de serre
- → 30% des consommations d'eau

En dépit de tous les efforts réalisés pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments, le secteur de la construction reste un grand consommateur de ressources et d'énergie. La production de déchets aux différents stades de vie du bâtiment reste énorme :

Figure 4 : Le secteur de la construction, grand pollueur au cours de sa vie
(Source: Ellen Mc Arthur Foundation and Mc Kinsey)

En Belgique, le secteur de la construction produit annuellement plus de 15 millions de tonnes de déchets, dont 650 000 tonnes[1] à Bruxelles. Bien que la majeure partie soit recyclée (de 75 à 80% en Belgique), de nombreux défis restent encore à solutionner. D'une part, ce recyclage est réalisé principalement dans des applications de moindre valeur, c'est ce qu'on appelle le downcycling[2]. D'autre part, de plus en plus de fractions non pierreuses sont produites et pour lesquelles des solutions de valorisation doivent encore être trouvées.

[1] D'après une étude du CERAA-ROTOR, mai 2012

[2] Ce terme désigne un processus de recyclage qui transforme les déchets en matière de moindre qualité en dégradant les propriétés du matériau.

Sachant que la Région de Bruxelles-Capitale est saturée en matière d'espace de stockage des déchets, elle exporte ses déchets dans ses régions limitrophes. De même, la Région bruxelloise ne produit quasiment aucun matériau de construction, elle doit importer la majeure partie d'entre eux. Ces importations et exportations représentent un coût important et nuisent à l'environnement.

Le secteur du bâtiment doit dès à présent réagir face à ces problèmes de surconsommation. Les challenges principaux que le secteur doit relever sont : devenir plus économe en énergie, moins consommateur de ressources naturelles et moins producteur de déchets.

3. Du linéaire au circulaire : changement de paradigme économique

Depuis la révolution industrielle, notre société est fondée sur un modèle économique de production et de consommation dit « linéaire ». Ce modèle économique linéaire repose sur le principe que les ressources sont peu coûteuses, abondantes et qu'il y a une énergie suffisante disponible pour les exploiter. On extrait, on fabrique, on consomme et puis on jette. Le secteur de la construction n'échappe pas à cette logique puisque les matières premières sont extraites pour produire des matériaux ou fabriquer des produits qui sont assemblés dans le bâtiment. En fin de vie, ces bâtiments sont démolis, ce qui produit une grande quantité de déchets qui sont jetés.

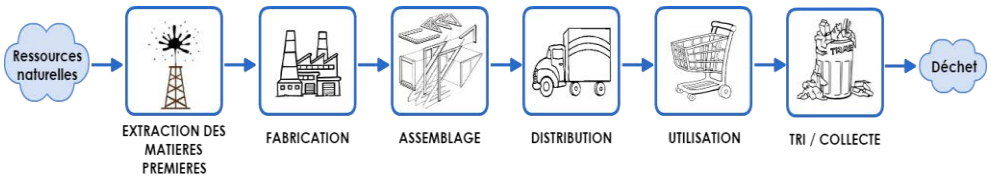


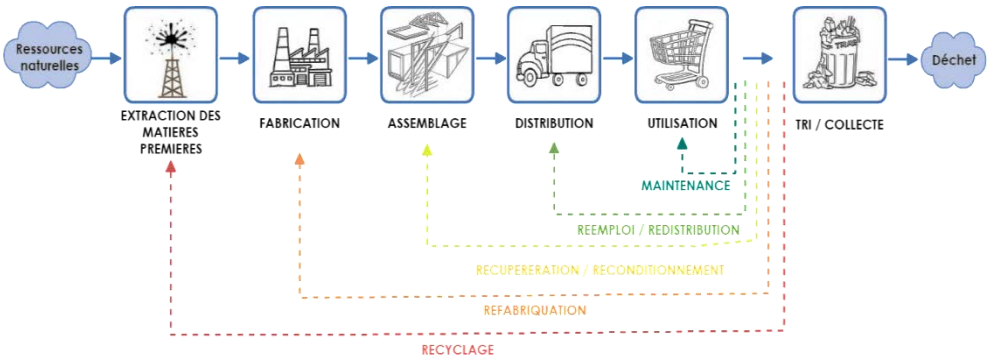
Figure 5 : Modèle de l'économie linéaire
(Source : Dreamstime)

Actuellement, puiser dans un stock limité de matériaux et générer énormément de déchets devient de plus en plus cher, compliqué à gérer et non soutenable à long terme. Plus que jamais, l'essoufflement du modèle économique linéaire est une opportunité de changer le cours des choses. Il faut dès à présent réinventer un nouveau modèle de développement, créateur de valeur économique, sociale et environnementale.

Le principe de l'économie circulaire est de conserver la valeur des produits et matériaux en circulation aussi longtemps que possible. Ce principe contraste avec le modèle économique traditionnel. En pratique, l'économie circulaire minimise la production de déchets par la réparation, la maintenance, le réemploi des produits et le recyclage des matériaux.

L'économie circulaire ne se limite pas à trouver des solutions techniques pour le traitement des matières. Pour prolonger et optimiser la durée de vie des produits, une réflexion est également nécessaire sur leur conception et sur la manière dont ils sont assemblés afin de pouvoir les désassembler et les réutiliser plus facilement. En parallèle, de nouveaux modèles économiques se développent pour supporter ces approches (l'économie de la fonctionnalité, l'économie du partage, l'économie du prolongement de la durée de vie, sont trois exemples de nouveaux modèles économiques).

S'engager dans une économie plus circulaire peut apporter de nombreux avantages incluant une minimisation de la pression sur l'environnement, une meilleure sécurité d'approvisionnement des matières (au niveau local), et se traduit dans des solutions innovantes et des emplois non délocalisables.



Dans la construction, l'économie circulaire peut se fonder sur 3 grands thèmes : la conception et la réalisation des bâtiments dits « circulaires », l'utilisation des ressources déjà disponibles, et le développement des nouveaux modèles économiques.

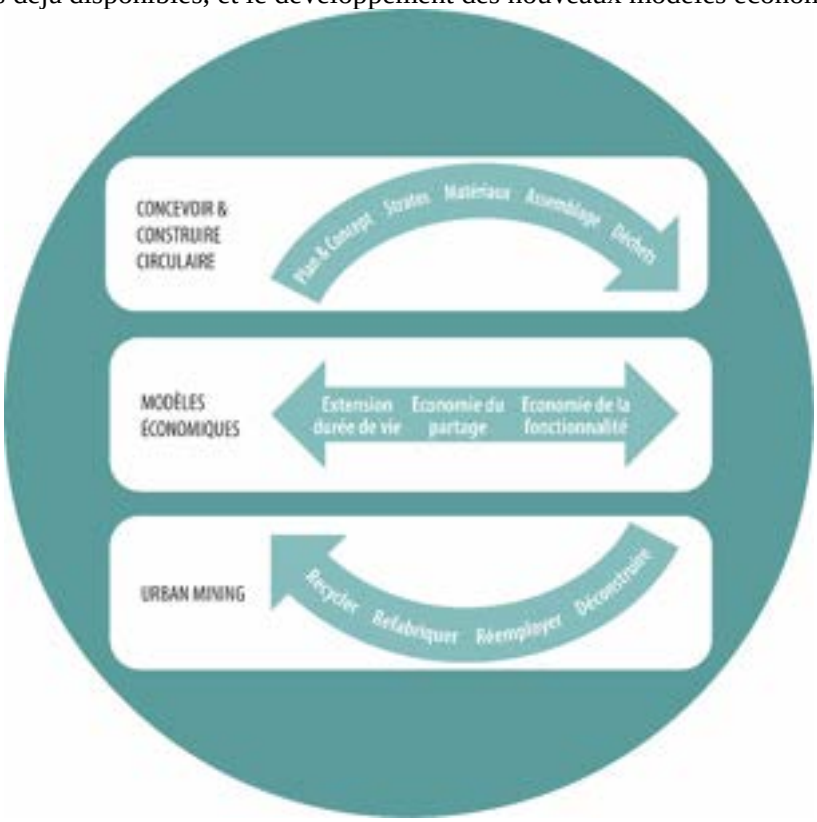
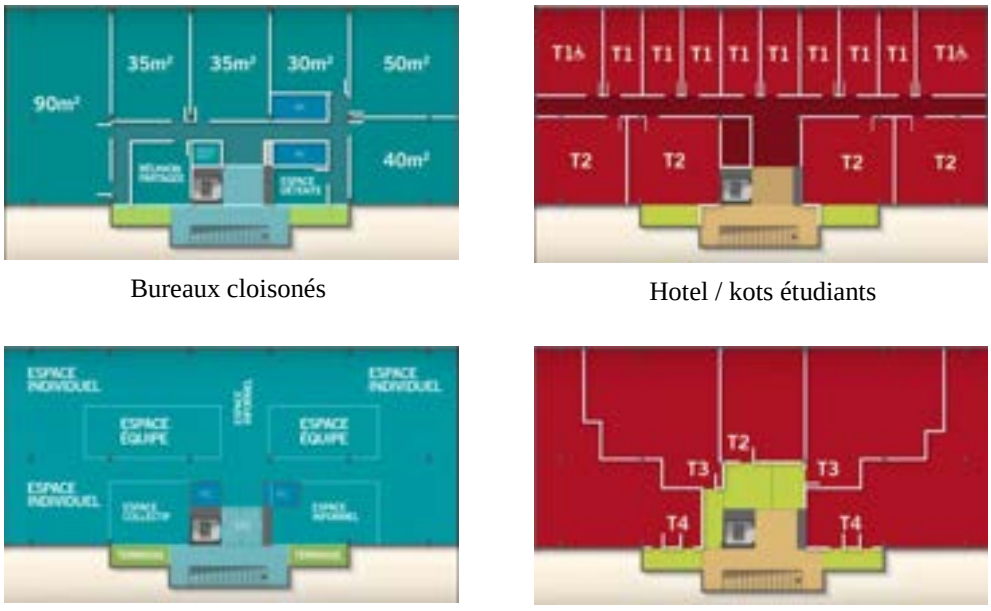


Figure 7 : Piliers de l'économie circulaire
(Source : CSTC - Innovation Paper – Construire circulaire)

3.1. Concevoir et construire circulaire

Réaliser une construction « circulaire » implique de prévoir dès le départ le devenir en fin de vie du bâtiment, des éléments et des matériaux construits. La conception circulaire peut être vue sous différents angles.

Tout d'abord, un bâtiment peut être conçu flexible et adaptable afin qu'il puisse se convertir à d'autres fonctions ou aux besoins de ses occupants au fil des années. De cette façon, le bâtiment conserve sa valeur et repousse son obsolescence fonctionnelle au maximum. Pour atteindre cette réversibilité du bâtiment, plusieurs paramètres structurels tels que les dimensions, les fondations ou l'ossature doivent être adaptés pour correspondre aux normes de toutes les fonctions et extensions envisagées. Par exemple, pour qu'une maison puisse accueillir un étage supplémentaire parce que la famille s'agrandit, il faut avoir prévu dès la construction, des fondations capables de reprendre ces nouvelles charges. Un autre exemple, si l'on souhaite convertir un immeuble de logements en un immeuble de bureaux, il faut avoir prévu des hauteurs sous plafond suffisantes pour pouvoir accueillir les différentes techniques de ventilation, obligatoires dans les immeubles de bureaux. L'ossature sous forme de poteaux-dalles favorise également une multitude d'agencements de cloisons (figure 8) qui permet des changements de fonctions du bâtiment.



Bureaux cloisonés

Hotel / kots étudiants

Bureaux "open space"

Appartements

Figure 8 : Adaptabilité du bâtiment en conservant l'ossature
(Source : Vinci Construction France, CONJUGO)

Si les matériaux (sélectionnés en fonction de leur moindre impact environnemental) et leurs assemblages (pensés de manière à ce qu'ils soient accessibles et réversibles) sont convenablement réfléchis en termes de recyclage ou de réemploi, cela diminuera la demande en matières premières ainsi que la production de déchets de démolition. Par exemple, des blocs de béton ClickBrick (figure 9) sont aussi facile à assembler qu'a désassembler grâce à leurs clips en inox. Ils sont donc réutilisables et pourront avoir plusieurs vies dans des bâtiments différents.

Figure 9 : Les briques de façade ClickBrick
(Source : www.daasbaksteen.nl)

3.2. Les modèles économiques de la construction circulaire

Pour pouvoir construire de façon circulaire, les entreprises doivent adopter un certain état d'esprit et adapter leurs stratégies aux nouvelles exigences économiques et environnementales en suivant les tendances des nouveaux modèles économiques.

L'économie de la fonctionnalité

Actuellement, la concurrence croissante entre les différentes entreprises les pousse à produire et à vendre toujours plus de biens sans tenir compte de l'impact que cela pourrait avoir sur les ressources et l'environnement.

L'économie de la fonctionnalité consiste à substituer à la vente d'un bien ou d'un service, la vente d'une performance d'usage. Dans cette optique, les entreprises ne vendent plus des biens et/ou services mais les mettent à disposition. De cette manière, la valeur ajoutée du produit ne se fonde plus sur la quantité des produits vendus mais plutôt sur leur fonction.

L'intérêt de ce modèle économique réside dans le fait que les fabricants sont responsables de la maintenance, de la réparation et de la gestion de leurs produits durant tout leur cycle de vie. Les fabricants ont donc tout intérêt à prévoir des produits robustes et facilement démontables afin de faciliter leur réparation ou leur recyclage. L'obsolescence programmée n'est donc plus de mise et cela soulage par la même occasion l'environnement qui sera alors moins touché par la surconsommation de matières premières et la surproduction de déchets.

Un exemple de l'économie de la fonctionnalité est le chauffage centralisé dans les immeubles. Une entreprise spécialisée en chauffage propose une garantie de confort thermique en leur louant un service fondé sur un apport d'énergie et en déchargeant les occupants de l'achat et de la gestion de la chaudière. Chaque locataire d'appartement paye alors pour l'énergie qu'il a consommé sans devoir se soucier de la maintenance de la chaudière.

L'économie du partage

Un deuxième modèle économique auquel les entreprises devraient se soumettre est l'économie du partage. Celle-ci s'appuie sur 3 grands principes : l'échange de ressources, le partage des compétences et le partage d'espaces.

L'échange de ressources repose sur la collaboration de différentes entreprises, généralement situées proches les unes des autres, qui partagent ou échangent des biens et services. Ces échanges peuvent être d'ordre matériel (matière première / déchets), logistiques (approvisionnement), de services (collecte et transport) ou encore d'équipements (chaudières ou production de vapeur). La motivation première des entreprises qui participent à une économie d'échange de ressources est principalement d'ordre économique mais profite également à l'environnement.

Le partage des compétences ou des moyens est une seconde forme d'économie du partage. Il s'agit d'une mise en commun de connaissances, d'espaces et d'outils afin créer de nouveaux biens et services grâce à la contribution de différents acteurs.

Finalement, les lieux partagés se répandent de plus en plus et offrent beaucoup d'avantages. Ils permettent de rassembler des personnes ayant besoin d'accéder à des services, des compétences, des locaux, des équipements ou des outils. Il favorise indirectement les rencontres et la collaboration entre ces différentes personnes et augmente leur productivité.

Un exemple de tendance de l'économie du partage dans le monde de la construction est l'habitat collectif. Il s'agit d'un lieu de vie dans lequel résident plusieurs personnes et où l'on retrouve aussi bien des espaces privatifs (chambre, sanitaires, salon,…) que des espaces collectifs (cuisine, jardin, parking,…). L'habitat collectif est caractérisé par l'auto-gestion du bâtiment pas ses habitants (nettoyage des communs, jardinage,…) et par le volontarisme. Ce partage entre résidants peut même aller jusqu'au partage de biens comme les vélos, les électroménagers ou l'outillage. Cette façon innovante de vivre est respectueuse de l'environnement et permet d'avoir beaucoup plus d'espace que dans les logements individuels.

Extension de la durée de vie

L'économie de la fonctionnalité n'étant pas applicable à tous les produits, les producteurs peuvent proposer à leurs clients une boucle de collecte et de remise en état de leurs produits ou des déchets qu'ils génèrent. Le recyclage, la refabrication ou encore la réparation des produits sont des formes de prolongation de la durée de vie qui peuvent être bénéfiques à l'entreprise (elle peut revendre ses produits plusieurs fois) mais surtout diminue la production de déchets. Un exemple bien connu est celui du béton qui, une fois concassé, est réintroduit dans le circuit de production de nouveau béton en tant que granulats ou utilisé en fond de coffre pour la construction de voiries.

La transition des modèles économiques actuels vers de nouveau modèles circulaires dépend en partie de la volonté des acteurs à évoluer dans cette direction mais surtout des facteurs externes, tels que les aspects politiques, sociaux et économiques, qui constituent aujourd'hui des barrières au développement de l'économie circulaire. Les initiatives européennes, fédérales ou régionales sont encore trop peu nombreuses pour convaincre les différentes entreprises à passer à une économie plus circulaire. Les craintes par rapport au retour sur investissement sont des freins à l'évolution. Une prime pour chaque effort en faveur du développement durable permettrait à certaines entreprises de se jeter à l'eau. De plus, le développement d'une économie circulaire permettrait de créer de nouveaux emplois locaux (centrales de tri, recyclage,…). De nombreuses évolutions de la part du secteur sont donc à espérer.

3.3. L'urban mining

Tandis que des tonnes et des tonnes de déchets s'accumulent dans les décharges, les matières premières se raréfient et leur extraction est de plus en plus complexe, coûteuse et énergivore.

Si les gisements naturels s'épuisent, les villes des pays industrialisés, quant à elles, pourraient être considérées comme de véritables mines urbaines. En effet, la population mondiale commence à se rassembler de plus en plus dans les grandes villes et les stocks bâtis urbains se développent énormément. La ville serait alors vue comme un grand réservoir de matériaux qu'on pourrait extraire des bâtiments.

Ce concept est connu sous le nom de « l'urban mining ». L'urban mining métamorphose une ville en véritable centre de production de matériaux et considère les déchets comme des ressources. Les 3 objectifs de l'urban mining sont :

- Diminuer la pression sur l'exploitation des ressources naturelles et rendre l'économie locale plus forte en diminuant l'importation des ressources naturelles.

- Améliorer l'impact environnemental de la construction en diminuant la quantité de déchets produits et en augmentant la qualité de tri de ces déchets.

- Encourager le développement d'une économie non délocalisable en favorisant la déconstruction, le tri et le réemploi de matériaux locaux.

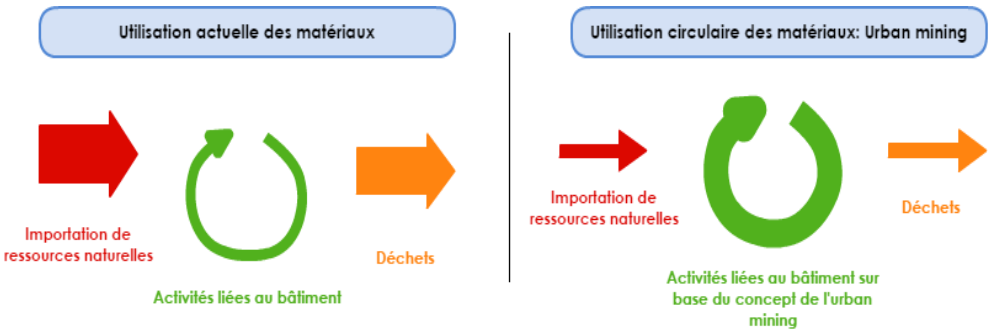


Figure 10 : Impacts environnementaux et économiques de l'urban mining dans la construction

La majeure partie des ressources nécessaires à la production de matériaux de construction est présente en grande quantité dans notre environnement urbain. L'urban mining nécessite de connaître le stock bâti existant (inventorisation). Ce stock pourra ensuite être potentiellement déconstruit pour être valorisé au travers du réemploi ou du recyclage.

4. Conclusion

La prise de connaissance des enjeux environnementaux du secteur de la construction nous a fait prendre conscience qu'il est impératif que celui-ci change ses habitudes de consommation. Pour ce faire, le passage d'un modèle économique linéaire à un modèle économique circulaire est indispensable.

Le modèle économique circulaire se décline sous différentes formes. Il y a tout d'abord la construction circulaire qui vise à réfléchir, dès la conception du bâtiment, à la façon dont celui-ci va pouvoir évoluer dans le temps. Il y a ensuite les différents modèles économiques qui proposent aux entreprises de nouvelles stratégies de production plus responsables et finalement l'urban mining, qui met en avant l'utilisation des ressources locales disponibles dans le stock bâti pour construire de nouveaux bâtiments.

Une transition d'un modèle économique linéaire vers un modèle circulaire est une belle opportunité pour le secteur de la construction qui vise à conserver les ressources en usage aussi longtemps que possible grâce au réemploi, à la refabrication, la réparation ou le recyclage.

Deux grandes évolutions vont être nécessaires à passer le cap de la transition vers un modèle d'économie circulaire dans le secteur de la construction. Il s'agit d'une évolution technique et technologique qui vise à optimiser l'usage et la production des différents produits de construction mais également une évolution économique qui pourrait encourager le secteur à évoluer vers les nouveaux modèles économiques.

5. Sources

Ouvrages :

[1] BRUXELLES ENVIRONNEMENT, *Programme Régional en Economie Circulaire 2016-2020 Mobiliser les ressources et minimiser les richesses perdues : pour une économie régionale innovante*, Bruxelles, Belgique, 2016, 43p.

Sites internet :

[2] CSTC, *Le bâti Bruxellois : source de nouveaux matériaux*, 2016, en ligne. Consulté en décembre 2016 sur http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=projects&proj=96

[3] ECOCONSO, *Réemploi et recyclage : Aussi en construction ! ,* 2014, en ligne. Consulté en avril 2017 sur http://www.ecoconso.be/fr/Reemploi-et-recyclage-aussi-en

[4] ECONOMIE SOLIDAIRE, *Les avantages et conséquences de la mondialisation*, 2007, en ligne. Consulté en mars 2017 sur http://www.economiesolidaire.com/2007/03/31/la-mondialisation-et-l%E2%80%99economie-de-la-cohesion-sociale/

Publications :

[5] BRUXELLES ENVIRONNEMENT, *Fiche 4.3 : La gestion des déchets du secteur de la construction*, 2011, Rapport technique, Bruxelles, Belgique, 33p., http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_BATEX_Fiche4.3._Dechets_FR.pdf

[6] CONFEDERATION CONSTRUCTION WALLONNE, *La gestion des déchets de construction*, 2013, Belgique, 14p., http://www.confederationconstruction.be/Portals/28/cellule%20environnement/guidesdocumentsutiels/gestiondesdechets/Les%20d%C3%A9marches%20administratives%20(stockage%20-%20transport-%20valorisation).pdf

[7] GOBBO. E, *Déchets de construction, matière à conception*, p.508, 2015, https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:167680?site_name=UCL

[8] MACARTHUR, MCKINSEY, SUN, *Growth within : a circular economy vision for a competitive Europe*, 2015, 98p., https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf

[9] ROMNEE, A. et VRIJDERS, J, *Construire ciruclaire – Vers une économie circulaire dans la construction*., CSTC, 2017, 125p., http://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=BuildingCircular_fr.pdf&lang=fr

Discrétisation d'un gradient de température lors d'un déplacement liquide à travers un mélange solide

Ing. J.-A. CARNEVALI
Dr Ir V. HANUS
PIERRARD – Virton

Cet article montre comment discrétiser un gradient de température en tout point lors d'un échange de chaleur entre un liquide et un solide suite au déplacement forcé du premier dans le second. Le gradient de température obtenu permet de déterminer la température de chaque mélange liquide et solide à tout endroit d'un lessiveur de cuisson du bois afin d'établir le modèle énergétique d'un cycle de cuisson.

Mots-clefs : Cold Blow, échange de chaleur, gradient de température

This article shows how to discretize a temperature gradient at any point during a heat exchange between a liquid and a solid, following the forced displacement of the latter through the former. The temperature gradient obtained makes it possible to determine the temperature of each liquid and solid mixture at any point in a wood-cooking digester in order to establish the energy model of a cooking cycle.

Keywords : Cold Blow, heat exchange, temperature gradient

1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de remplacement de l'installation de cuisson du bois de l'usine Burgo Ardennes par un équipement utilisant un procédé appelé « Cold Blow » pour extraire de la cellulose et, in fine, faire du papier. Afin de comprendre le modèle réalisé, le procédé général de cuisson est tout d'abord présenté. Ensuite, le modèle discrétisé du gradient de température est développé et les résultats exposés. Enfin, ces derniers sont discutés en fonction des paramètres en entrée.

2. Contexte

2.1. Procédé Kraft

Le procédé Kraft permet de produire de la pâte de cellulose nécessaire à la fabrication du papier. Ce procédé chimique consiste à cuire les copeaux de bois avec un mélange aqueux à base de soude active (NaOH et $\mathrm{Na_2S}$) appelé liqueur blanche (LB). Ce faisant, la cellulose contenue dans le bois est séparée de la lignine. Cette dernière, ainsi que tous produits de la réaction chimique entre le bois et la liqueur blanche, forment un mélange aqueux appelé liqueur noire (LN). Cette LN est un combustible biomasse permettant de produire de la vapeur haute pression qui, en la détendant dans les deux turbines à vapeur, fournit entièrement l'usine en énergie thermique et partiellement en énergie électrique.

Les résidus de la combustion de la LN sont régénérés au bas de la chaudière (réduction des sulfures) et dans un four à chaux (récupération du NaOH) pour récupérer la liqueur blanche initiale.

2.2. Procédé de cuisson *Cold Blow*

Le procédé de cuisson Cold Blow se décompose en cinq phases, dont deux déplacements de liqueurs au travers d'un amas de copeaux. Brièvement, les cinq étapes sont :

1. le remplissage en copeaux et l'imprégnation en liqueur noire tiède ;
2. le remplissage en liqueur chaude ; ceci sous-entend un déplacement de liqueur avec la liqueur chaude qui, injectée par le bas, va déplacer et éjecter la liqueur tiède d'imprégnation par le haut du lessiveur ;
3. la chauffe du mélange jusqu'à température de cuisson et le maintien en palier afin que la cellulose se sépare de la lignine ;

4. le remplacement de la liqueur noire de fin de cuisson par de la liqueur noire tiède afin de refroidir le mélange restant au sein du lessiveur ;
5. le déchargement du mélange et de la liqueur noire tiède dans un réservoir de déchargement.

Les étapes pertinentes dans le présent article sont les étapes 2 et 4 qui comportent un déplacement de liqueur au travers d'un lit de copeaux.

2.3. Discrétisation du gradient de température

Pour déterminer l'énergie requise par le procédé « Cold Blow » (et la comparer au procédé conventionnel), il est nécessaire de connaître la température de la liqueur noire sortant du lessiveur. Cela se fait en simulant et en représentant le gradient de température à tout endroit dans le lessiveur ainsi qu'à tout moment pour visualiser exactement la phase de montée en température (et de refroidissement par la suite).

Pour modéliser l'échange thermique au sein du lessiveur, il faut diviser le volume du lessiveur en de petites parts dV, et exprimer la conservation de l'énergie et de la masse sur cet élément. Ce faisant, on fait l'hypothèse que le problème est monodimensionnel et on suppose que la température du mélange et de la liqueur est constante sur chaque tranche de lessiveur (voir figure 1).

Étant donné qu'on s'intéresse à la résolution numérique, on discrétise le gradient de température et pour ce faire, on impose un pas de temps et de volume. Plusieurs modèles ont été réalisés :

— un modèle discrétisé avec un coefficient d'échange infini, et
— un modèle discrétisé avec un coefficient d'échange fini.

Dans le premier cas, le temps de convergence des températures entre la liqueur et le mélange est nul, représentant un échange instantané, alors que dans le second cas, il est fini et dépend du coefficient d'échange. Cette dernière méthode est plus réaliste, car il existe toujours un coefficient d'échange fini entre deux composés.

3. Modèle avec un coefficient d'échange infini

3.1. Modélisation

Si l'on admet que le coefficient d'échange thermique est infini, il va de soit que la température des deux substances converge instantanément (et donc une seule température

T suffit à la décrire). Dès lors, une tranche dV représentée à la figure 1 est composée de $dm_{mel} + dm_{liq}$ et la liqueur traversante cède une certaine différence d'enthalpie $\Delta H_{liqueur}$.

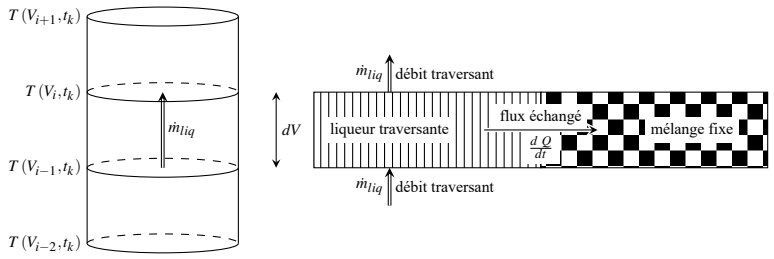


Figure 1 : Représentation schématique de l'échange thermique au sein du lessiveur

L'équation générale de l'échange thermique au sein du lessiveur est la suivante :

$$\rho_{mel}\, c_p\, \frac{d\,T}{dt} = -\dot{m}_{liq}\, c_{p,liq}\, \frac{d\,T}{dV} \tag{1}$$

avec ρ_{mel} = la masse volumique du mélange de copeaux,
c_p = la chaleur spécifique pondérée du mélange solide des copeaux,
$\frac{dT}{dt}$ = la variation temporelle de température,
$\dot{m}_{liq}$ = le débit massique en liqueur,
$c_{p,liq}$ = la chaleur spécifique pondérée des composants de la liqueur, et
$\frac{dT}{dV}$ = la variation volumique de température.

Elle exprime que la chaleur perdue par la liqueur traversant (second membre) équivaut à l'augmentation d'enthalpie du mélange de copeaux.

Soit $V_i = i\,\Delta V$, le volume discrétisé et $t_k = k\,\Delta t$, le temps discrétisé. La température est fonction de i et k. Par le développement en série de Taylor-Maclaurin, on a la température du mélange statique en fonction du pas de temps :

$$T(V_i,t_k) = T(V_i,t_{k-1}) + \left.\frac{\partial\,T}{\partial t}\right|_{V_i}^{t_{k-1}} \Delta t + \mathcal{O}\left(\Delta t^2\right) \tag{2}$$

Et donc,

$$\left.\frac{\partial\,T}{\partial t}\right|_{V_i}^{t_k} = \frac{T(V_i,t_k) - T(V_i,t_{k-1})}{\Delta t} + \mathcal{O}(\Delta t) \tag{3}$$

De par un développement similaire, on a la température de la liqueur dynamique en fonction du pas volumique :

$$T(V_{i-1},t_{k-1}) = T(V_i,t_{k-1}) - \left.\frac{\partial\,T}{\partial V}\right|_{V_i}^{t_k} \Delta V + \mathcal{O}\left(\Delta V^2\right)$$

Et donc,

$$\left.\frac{\partial T}{\partial V}\right|_{V_i}^{t_k} = \frac{T(V_i,t_{k-1}) - T(V_{i-1},t_{k-1})}{\Delta V} + \mathscr{O}(\Delta V) \tag{4}$$

En remplaçant les équations (3) et (4) dans l'équation (1), on obtient :

$$\rho_{mel}\ c_p\ \frac{T(V_i,t_k) - T(V_i,t_{k-1})}{\Delta t} = -\dot{m}_{liq}\ c_{p,liq}\ \frac{T(V_i,t_{k-1}) - T(V_{i-1},t_{k-1})}{\Delta V} \tag{5}$$

Pour enfin arriver à l'équation de la température discrétisée suivante :

$$T(V_i,t_k) = T(V_i,t_{k-1}) + \frac{\frac{\Delta t\ \dot{m}_{liq}\ c_{p,liq}}{\Delta V}\ [T(V_{i-1},t_{k-1}) - T(V_i,t_{k-1})]}{\rho_{mel}\ c_p} \tag{6}$$

Pour avoir un modèle qui converge et qui corresponde à la réalité, il est nécessaire de tenir compte de l'effet piston. Ainsi, ce dernier implique une condition sur le terme $\frac{\Delta t\ \dot{m}_{liq}\ c_{p,liq}}{\Delta V}$ du numérateur. En effet, pour avoir un effet piston, il faut que la masse de liqueur amenée par intervalle de temps Δt soit égale au volume qu'elle peut occuper dans la tranche dV. Pour cela, la condition suivante est imposée :

$$\Delta t\ \dot{m}_{liq} = \rho_{liq}\ \Delta V \tag{7}$$

avec ρ_{liq} = la masse volumique apparente de la liqueur au sein des copeaux, soit la masse de liqueur rapportée au volume occupé par les copeaux et la liqueur, qui vaut dans ce cas-ci 450 m^3.

On trouve donc un pas de temps qui est lié au pas volumique :

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\rho_{liq}}{\dot{m}_{liq}} \tag{8}$$

Dans le modèle présent, on choisit de contraindre le pas de temps :

$$\Delta t = \frac{\rho_{liq}\ \Delta V}{\dot{m}_{liq}} \tag{9}$$

Ainsi, à partir de l'équation 6, on peut calculer la température $T(V_i,t_k)$ en tout temps t_k et toute position V_i, et donc simuler le gradient de température et son évolution temporelle dans le lessiveur. Le résultat des calculs se présente sous la forme d'une matrice avec i lignes et k colonnes. Les lignes représentent l'évolution d'une tranche de volume dV au cours du temps et les colonnes indiquent l'évolution de la température à un temps t_k sur tout le volume du lessiveur.

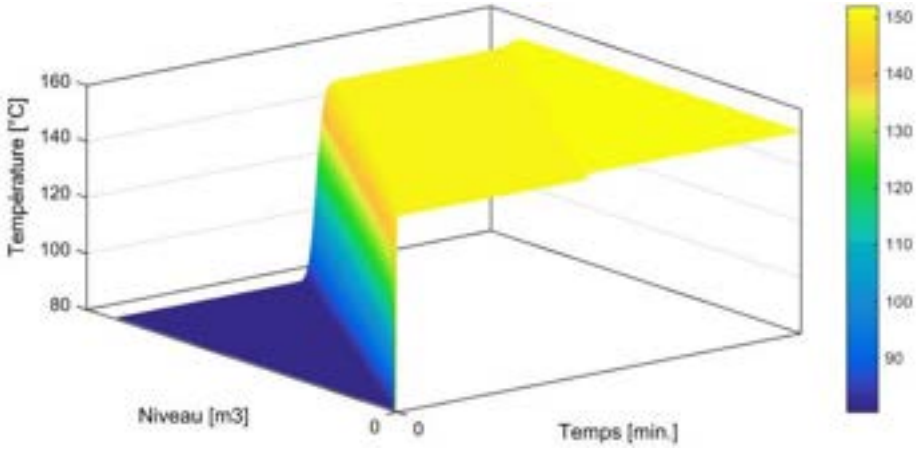


Figure 2 : Évolution de la température dans le lessiveur lors de la montée en température

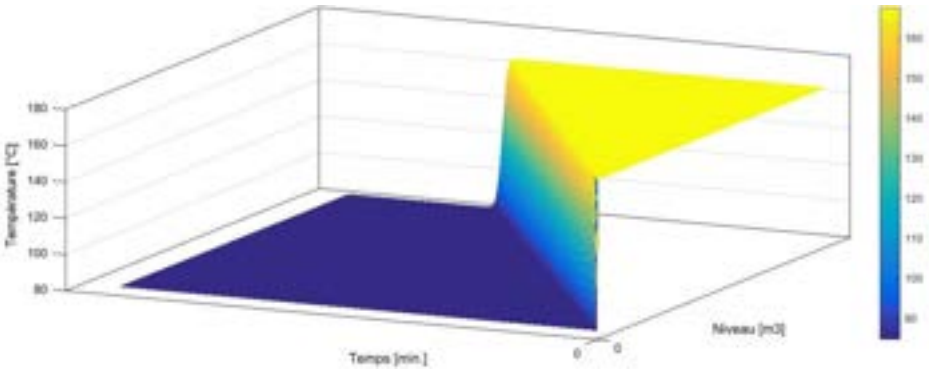


Figure 3 : Évolution de la température dans le lessiveur lors du déplacement froid

3.2. Résultats du modèle avec un coefficient d'échange infini

Le modèle mathématique élaboré permet d'obtenir une matrice [temps ; niveau ; température] qui est présentable sous forme graphique. Ainsi, la figure 2 montre la montée en température du lessiveur : au temps 0, l'ensemble du lessiveur est à 80°*C* ; ensuite, de la liqueur chaude est injectée par le bas, ce qui fait monter le gradient de température petit à petit vers le haut ; très rapidement la température est quasiment uniforme sur tout le lessiveur ; pour finir, la température de la liqueur injectée est légèrement augmentée, ce qui explique le léger ressaut. Pour le déplacement froid à la figure 3, le même mode opératoire est appliqué : la température est uniforme à 160°*C* au départ,

puis, suite à l'injection de liqueur froide en bas de lessiveur, le gradient se déplace de bas en haut au fur et à mesure que le temps s'écoule.

On remarque dans les figures 2 et 3 que le front de température est très abrupt, signifiant que le réchauffement/refroidissement du mélange de copeaux est presque instantané. Cela s'explique par l'hypothèse d'un coefficient d'échange infini. Par ailleurs, le temps nécessaire pour que le front se propage dans l'entièreté du lessiveur dépend du débit de la pompe qui est de l'ordre de 600 à 800 m^3/h.

4. Modèle avec un coefficient d'échange fini

On va à présent considérer que l'échange de chaleur entre la liqueur et les copeaux n'est pas instantané, et donc qu'ils ont des températures différentes à des endroits identiques.

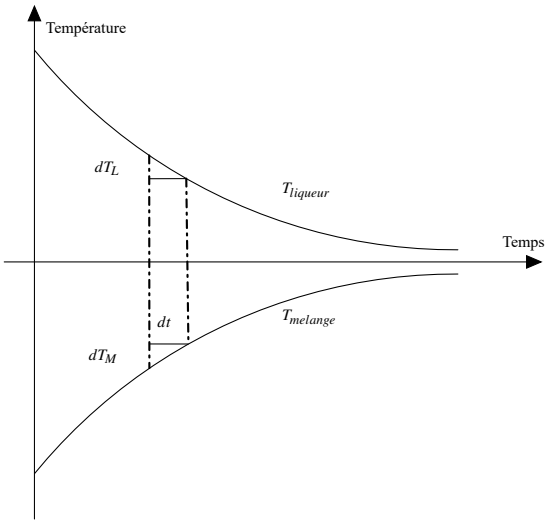


Figure 4 : Profil de température des deux composés dans le lessiveur [1]

4.1. Modélisation

Le profil de température pour un échange fini ressemble à celui présenté à la figure 4 et on y voit une différence de température entre les deux mélanges qui dépend du temps et du coefficient d'échange.

Deux modèles ont été développées : l'un tenant compte d'une évolution linéaire de

la température au cours du temps et donc le coefficient d'échange ne se trouve pas sous la forme d'une exponentielle, et l'autre prenant la forme d'une convergence exponentielle avec une asymptote. La deuxième méthode a été retenue puisqu'elle est adaptative à n'importe quel coefficient d'échange et qu'elle est beaucoup plus réaliste. La première méthode est disponible dans le travail de fin d'études original [2].

Soit l'équation de départ du flux thermique :

$$\frac{d\,Q}{dt} = -\dot{m}_{liq}\; c_{p,liq}\; \frac{d\,T_L}{dV} = \rho_{mel}\; c_p\; \frac{d\,T_M}{dt} = A\;U\;\;(T_L - T_M) \tag{10}$$

Avec $\dot{m}_{liq}$ = le débit massique en liqueurs,
$c_{p,liq}$ = la chaleur spécifique pondérée des liqueurs,
$\frac{dT_L}{dV}$ = la variation volumique de température de la liqueur,
ρ_{mel} = la masse volumique de mélange de copeaux,
c_p = la chaleur spécifique pondérée du mélange de copeaux,
$\frac{dT_M}{dt}$ = la variation temporelle de température du mélange de copeaux,
A = la surface d'échange, et
U = le coefficient d'échange thermique global.

Par rapport à l'équation (1), on contraint l'échange à se faire proportionnellement à la différence de température entre les copeaux et la liqueur via le dernier terme.

Si on intègre par sur un pas de temps Δt, on obtient la quantité de chaleur échangée sur ce pas de temps :

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{d\,Q}{dt}\,dt = -\dot{m}_{liq}\;\Delta t\;c_{p,liq}\;\frac{d\,T_L}{dV} = \rho_{mel}\;c_p\;\Delta T_M$$

Pour avoir l'effet piston, il faut lier le pas de temps au pas volumique de la liqueur traversante, à l'instar de la modélisation précédente. Il faut que la masse de liqueurs par unité de temps soit égale à la masse de liqueur dans l'élément de volume, ainsi l'entièreté du volume de liqueur est renouvelée à chaque pas temporel.

$$\Delta t\;\dot{m}_{liq} = \Delta V\;\rho_{liq} \tag{11}$$

ρ_{liq} correspond à la masse de liqueur présente dans un certain volume. L'effet piston signifie que pour chaque incrément temporel, il y a un incrément volumique pour la liqueur mobile. On peut donc discrétiser les températures en fonction :

$$dT_L = T_L\,(V_{i-1}, t_{k-1}) - T_L\,(V_i, t_k)$$

La température est calculée en tout point (V_i, t_k) et la température en ce même point dépend de la température à un pas temporel et volumique précédent (car la liqueur se

déplace d'un incrément de volume ΔV à chaque incrément de temps Δt). Le mélange dans le lessiveur est immobile et donc pour chaque incrément temporel, il n'y a pas d'incrément volumique.

$$dT_M = T_M(V_i, t_k) - T_M(V_i, t_{k-1})$$

À partir des équations (10) et (11), on a :

$$\rho_{liq}\ c_{p,liq}\ [T_L(V_{i-1}, t_{k-1}) - T_L(V_i, t_k)] = \rho_{mel}\ c_p\ [T_M(V_i, t_k) - T_M(V_i, t_{k-1})]$$

$$\rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(V_{i-1}, t_{k-1}) - \rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(V_i, t_k) = \rho_{mel}\, c_p\, T_M(V_i, t_k) - \rho_{mel}\, c_p\, T_M(V_i, t_{k-1})$$

$$\begin{aligned} \rho_{liq}\ c_{p,liq}\ T_L(V_i, t_k) \quad &= \quad \rho_{mel}\ c_p\ T_M(V_i, t_{k-1}) - \rho_{mel}\ c_p\ T_M(V_i, t_k) + \\ &\quad\ \rho_{liq}\ c_{p,liq}\ T_L(V_{i-1}, t_{k-1}) \end{aligned} \tag{12}$$

À partir de l'équation (10), on déduit aussi :

$$\frac{d\ T_M}{dt} = \frac{A\ U}{\rho_{mel}\ c_p}\ (T_L - T_M)$$

$$-\frac{d\ T_L}{dt} = \frac{A\ U}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\ (T_L - T_M)$$

$$-\frac{d\ (T_L - T_M)}{dt} = \left(\frac{1}{\rho_{mel}\ c_p} + \frac{1}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\right) A\ U\ (T_L - T_M)$$

$$-\int_{T_L(t_{k-1}) - T_M(t_{k-1})}^{T_L(t_k) - T_M(t_k)} \frac{d\ (T_L - T_M)}{T_L - T_M} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \left(\frac{1}{\rho_{mel}\ c_p} + \frac{1}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\right) A\ U\ dt$$

Après intégration, on obtient :

$$-\left(\ln(T_L - T_M)\big|_{t_k} - \ln(T_L - T_M)\big|_{t_{k-1}}\right) = \left(\frac{1}{\rho_{mel}\ c_p} + \frac{1}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\right) A\ U\ \Delta t$$

$$\ln \frac{T_L(V_{i-1}, t_{k-1}) - T_M(V_i, t_{k-1})}{T_L(V_i, t_k) - T_M(V_i, t_k)} = \left(\frac{1}{\rho_{mel}\ c_p} + \frac{1}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\right) A\ U\ \Delta t$$

$$\begin{aligned} \ln \frac{T_L(V_{i-1}, t_{k-1}) - T_M(V_i, t_{k-1})}{T_L(V_i, t_k) - T_M(V_i, t_k)} \quad &= \quad \exp\left(\underbrace{\left(\frac{1}{\rho_{mel}\ c_p} + \frac{1}{\rho_{liq}\ c_{p,liq}}\right) A\ U}_{1/\tau}\ \Delta t\right) \\ &= \quad \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right) \end{aligned}$$

avec τ qui représente un temps caractéristique.

$$T_M(V_i,t_k) = T_L(V_i,t_k) - [T_L(V_{i-1},t_{k-1}) - T_M(V_i,t_{k-1})] \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (13)$$

On injecte cette égalité dans l'équation (12) :

$$\begin{aligned} & \rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(V_i,t_k) - \rho_{mel}\, c_p\, T_M(V_i,t_{k-1}) - \rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(V_{i-1},t_{k-1}) \\ = \quad & \rho_{mel}\, c_p \left(T_L(V_i,t_k) - [T_L(V_{i-1},t_{k-1}) - T_M(V_i,t_{k-1})] \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) \end{aligned}$$

Et enfin, on obtient les températures de la liqueur (T_L) et du mélange (T_M) à chaque pas de temps :

$$\begin{aligned} T_L \quad = \quad & \frac{\rho_{mel}\, c_p\, T_M(t_{k-1}) + \rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(t_{k-1})}{\rho_{liq}\, c_{p,liq} + \rho_{mel}\, c_p} + \\ & \frac{\rho_{mel}\, c_p\, [T_L(t_{k-1}) - T_M(t_{k-1})]}{\rho_{liq}\, c_{p,liq} + \rho_{mel}\, c_p} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (14) \\ T_M \quad = \quad & \frac{\rho_{mel}\, c_p\, T_M(t_{k-1}) + \rho_{liq}\, c_{p,liq}\, T_L(t_{k-1})}{\rho_{liq}\, c_{p,liq} + \rho_{mel}\, c_p} - \quad (15) \\ & \frac{\rho_{liq}\, c_{p,liq}\, [T_L(t_{k-1}) - T_M(t_{k-1})]}{\rho_{liq}\, c_{p,liq} + \rho_{mel}\, c_p} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) \end{aligned}$$

Les volumes ne sont plus notés pour simplifier l'écriture, puisque la température de la liqueur au pas précédent est toujours en $T_L(V_{i-1},t_{k-1})$, alors que celle du mélange est en $T_M(V_i,t_{k-1})$. La démonstration présentée ci-devant est valable pour la montée en température ; pour le déplacement froid, le principe est similaire sauf qu'il faut prendre le signe opposé entre les deux termes de l'équation.

4.2. Résultats du modèle avec un coefficient d'échange fini

Dans le cadre d'une modélisation avec un coefficient d'échange fini, il faut imposer un coefficient d'échange qui fixe le temps caractéristique de l'équation. Ce point n'est pas abordé dans cette analyse et la suite expose les résultats avec un coefficient d'échange qui a été déterminé à la fois expérimentalement et théoriquement [1] [2]. De par cette contrainte, un différentiel de température entre le mélange et la liqueur apparaît tout au long du lessiveur. Il y a donc un profil de température pour chaque substance lors de la montée en température ainsi que lors du refroidissement. Seuls

1. Le produit $A\,U$ s'élève à $0,1542\ MJ/min$.

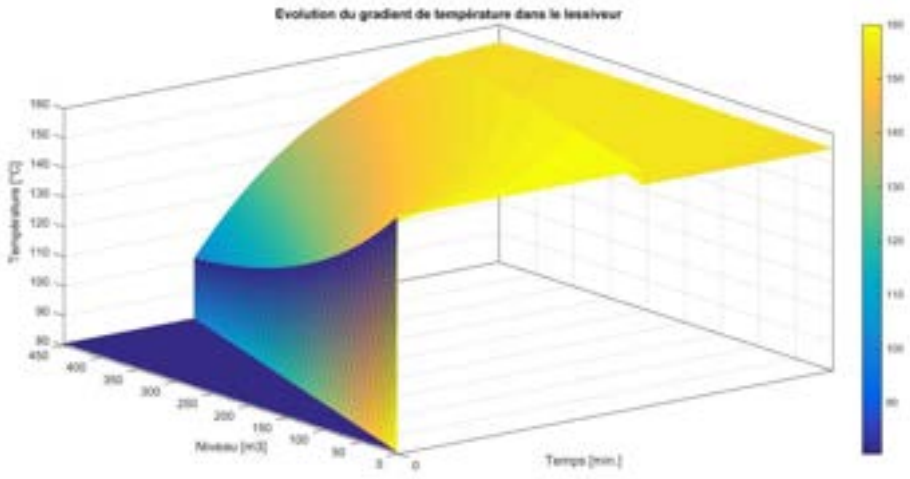


Figure 5 : Évolution du gradient de température de la liqueur dans le lessiveur lors de la chauffe

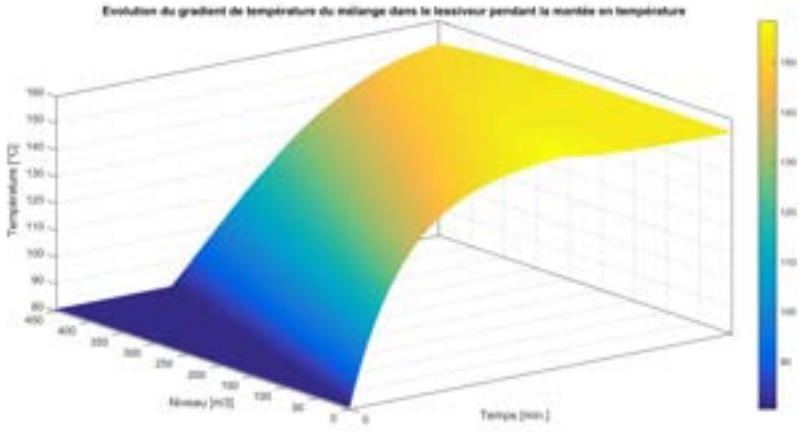


Figure 6 : Évolution du gradient de température du mélange dans le lessiveur lors de la chauffe

les profils de température de la liqueur et du mélange lors de la chauffe sont exposés à la figure 5 et à la figure 6.

On remarque clairement qu'il y a un front de température entre la liqueur présente avant la chauffe et la liqueur chaude entrante, car la liqueur froide est poussée vers le haut et que l'on néglige l'échange de température entre la liqueur froide et la liqueur chaude injectée (effet piston). Ensuite, le front est moins abrupt que lors du cas avec un coefficient d'échange infini, car la liqueur chaude cède moins rapidement de la chaleur aux copeaux froid qu'elle rencontre.

À la figure 6, le mélange homogène se réchauffe graduellement au fur et à mesure que la liqueur cède une partie de son enthalpie. Par rapport au modèle avec un coefficient d'échange infini, on voit que le mélange de copeaux met plus de temps à se réchauffer (à débit constant) et la liqueur se refroidit moins vite au contact des copeaux. Le saut de température que l'on remarque sur la fin de l'échelle du temps à la figure 5 vient du fait qu'en fin de montée en température, un supplément de liqueur blanche ayant une température plus faible est injecté.

En faisant des coupes par niveau de lessiveur, on remarque que le profil de température est considérablement différent. En effet, le coefficient d'échange thermique est un terme exponentiel et une faible variation engendre une modification significative de la température. L'application d'un coefficient d'échange précis est donc essentielle et permet de déterminer une température réaliste des éléments au sein du lessiveur. Plus cette dernière est importante, plus elle est susceptible d'être utile pour les cycles de cuisson ultérieurs.

5. Conclusions et perspectives

Les modélisations présentées dans le présent article ont permis d'appréhender le fonctionnement de la cuisson Cold Blow d'un point de vue thermique et ainsi estimer et expliciter les gains énergétiques relatifs à cette dernière. En effet, le modèle a permis de déterminer la quantité de liqueurs à injecter dans le lessiveur afin de monter le contenu de celui-ci en température. De plus, il a également permis de connaître, à tout moment, la température de la liqueur sortant du lessiveur ; il fut ainsi possible de faire le bilan énergétique des réservoirs alimentés par cette liqueur.

Il faut remarquer cependant que le premier modèle avec un coefficient d'échange infini manque de précision, ce qui a nécessité la réalisation du modèle plus complexe avec un coefficient d'échange fini. Ce dernier a été déterminé à la fois de manière expérimentale et théorique. Il convient de prendre celui qui coïncidait le mieux avec certaines hypothèses de départ fournies par le fabriquant de l'installation de cuisson.

Le modèle mis en place permet de simuler des cuissons ayant des hypothèses de départ variables. Toutefois comme toute modélisation, des incertitudes subsistent, notamment au niveau du coefficient d'échange thermique. Pour avoir une valeur réelle, il est nécessaire de réaliser des essais sur un procédé fonctionnel, permettant ainsi d'obtenir un résultat précis. Par ailleurs, le modèle permet d'entrevoir toute une série d'améliorations qu'il convient d'approfondir avant la mise en place d'une telle cuisson.

En conclusion, l'évaluation des procédés des cuissons conventionnelle et Cold Blow a montré que, avec des hypothèses de départ équivalentes, le premier consomme $0,92$ tonne de vapeur moyenne pression pour obtenir 1 tonne de cellulose, tandis que le deuxième n'en consomme plus que $0,34$. Tout cela résulte, in fine, en un gain financier significatif.

6. Sources

[1] Hanus, V., *Thermodynamique et transferts thermiques : Transferts thermiques* Virton, Belgique, Haute École de Namur-Liège-Luxembourg, 2015, pp. 93–95.

[2] Carnevali, J.-A., *Modélisation énergétique des cuissons Kraft conventionnelle et Cold Blow*, Trav. de fin d'ét., Virton, Belgique : Haute École de Namur-Liège-Luxembourg, juin 2017, pp. 19–21.

Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso

Ing. N. ZIMMERMANN
Charles D. KONSEIBO
Ir. C. CHARLIER
CEAS Burkina
GRAMME – Liège

Cet article traite du développement d'un biodigesteur en voie humide à petite échelle qui doit également être abordable pour les populations rurales du Burkina Faso. Le passage à l'utilisation du biogaz constitue une solution renouvelable aux enjeux énergétiques locaux, tout en y impliquant aussi la gestion des déchets.

Mots-clefs : biodigesteur, voie humide, Burkina Faso, biogaz, gestion des déchets.

This article presents the development of a wet process biodigester at a small scale which has also to be affordable for the rural populations of Burkina Faso. The transition to the use of biogas stands as a renewable answer to the local energy issues, while including also the waste treatment.

Keywords: biodigester, wet process, Burkina Faso, biogas, waste treatment.

1. Introduction

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé microbiologique complexe et relativement fragile : il s'agit d'une fermentation en absence d'oxygène qui est possible sur 3 plages de température plus ou moins larges [1]. Elle a lieu naturellement dans les marais, les sols, les décharges municipales mais aussi dans les intestins des animaux.

Ce processus est assuré par plusieurs familles de microorganismes qui vont se relayer pour digérer la matière organique. La composition de ces groupes de bactéries productrices de biogaz dépend de nombreux facteurs comme la température, l'état d'avancement de la digestion, la nature du substrat. Dans la plupart des cas, le substrat est composé d'une grande variété de molécules différentes. Cependant, les graisses usagées par exemple ont un plus grand pouvoir méthanogène. A contrario, les déjections animales (plus particulièrement de source bovine) sont plus facilement dégradables étant donné l'apport de microorganismes adaptés à la digestion anaérobie mais elles produisent de plus faibles quantités de biogaz [2]. Il est également intéressant de noter que la réaction de méthanisation est endothermique, par conséquent, elle nécessite un apport de chaleur.

Les produits de cette transformation sont d'une part le biogaz composé majoritairement de méthane, et d'autre part le digestat, c'est-à-dire un produit humide riche en minéraux partiellement stabilisé et utilisable comme engrais.
L'attrait principal de la biométhanisation est de fournir une source d'énergie locale et renouvelable tout en valorisant les déchets organiques, ce qui en fait une alternative aux énergies fossiles polluantes et limitées. Le milieu de l'agriculture trouve également son compte dans ce procédé en disposant d'un engrais efficace qui peut représenter une source potentielle de revenu.

2. Composition du biogaz

Le biogaz est majoritairement composé de méthane, qui constitue la partie énergétique utile de ce gaz. Le tableau 1 rassemble les composés complétant le mélange dont le dioxyde de carbone qui est le deuxième plus représenté [3]. On trouve également des traces de sulfure d'hydrogène, qui est un gaz toxique et corrosif. Il va de soi que la composition du biogaz varie d'un substrat à l'autre mais elle dépend aussi des conditions de la digestion anaérobie.

Composé	Pourcentage du volume
Méthane (CH_4)	55 – 65
Dioxyde de carbone (CO_2)	35 – 45
Vapeur d'eau (H_2O)	0 – 5
Azote (N_2)	0 – 3
Oxygène (O_2)	0 – 2
Sulfure d'hydrogène (H_2S)	0 – 1
Hydrogène (H_2)	0 – 1
Ammoniac (NH_3)	0 – 1

Tableau 1 : Composition typique du biogaz ([1] et [3])

Le méthane possède un pouvoir calorifique d'environ 10 kWh/Nm³. Le biogaz étant habituellement composé de 60 % de méthane, son pouvoir calorifique potentiel est donc de 6 kWh/Nm³.

3. Contexte

L'accès à l'énergie est un problème majeur pour les pays en voie de développement. Etant situé dans la zone du Sahel, le Burkina Faso fait en plus face à la désertification progressive, accélérée par l'utilisation généralisée du bois pour la cuisine aussi bien dans les campagnes que dans les villes. En effet, les bonbonnes à gaz ainsi que le système de brûleurs représentent souvent des investissements trop importants, voire complexes, pour les populations rurales. Par ailleurs, l'utilisation de gaz propane ou butane reste un problème économique et environnemental vu que ces ressources ne sont ni gratuites, ni renouvelables.

La population burkinabée étant majoritairement rurale (plus de 70% de la population active), il n'est pas rare qu'une famille possède plusieurs animaux et/ou cultive des fruits et légumes. L'apport en déchets organiques est donc quasi quotidien, ce qui représente un réel gisement à exploiter. Ainsi, à l'aide d'une unité de biométhanisation, ces déchets pourraient être valorisés en énergie et en fertilisant. Le coût de l'installation a bien évidemment une importance cruciale pour ces populations, c'est pourquoi il faut réaliser un système très simple en termes d'installation et d'utilisation.

4. Unités de biométhanisation

Il existe une grande variété d'installations de biométhanisation allant habituellement de plusieurs milliers de mètres cubes pour le traitement des boues de stations d'épurations à 4 à 10 mètres cubes pour les petites unités domestiques. La plupart des installations fonctionnent en régime de température mésophile, c'est-à-dire entre 30 et 42°C, avec un optimum à 38°C. Sortir de cette plage de température ne constitue cependant pas de problème majeur pour les microorganismes, ce qui permet dans certains cas de se passer d'un système de régulation de température.

Le processus peut être continu, semi continu, ou fonctionner en batch (c'est-à-dire de manière discontinue). Le taux de matière sèche a une grande influence sur les types de technologies rencontrées. D'autres facteurs tels que le temps de rétention de la matière, le régime de température ou le type de substrat diversifient également les caractéristiques des unités de production.

Dans les pays en voie de développement, la biométhanisation s'effectue principalement en voie humide. Le taux de matière sèche dans le substrat utilisé est alors inférieur à 15 %. On distingue deux types d'unités de production de biogaz domestique [4] :

- le système enterré, réalisé en recouvrant une fosse d'une bâche en plastique. Bien qu'elles soient peu onéreuses, ces installations sont relativement fragiles et éphémères, leur fiabilité est faible.
- Les digesteurs sous forme de dômes semi-enterrés en briques ou briquettes sont quant à eux plus fiables mais nécessitent un investissement plus important.

Ces deux catégories de digesteurs fonctionnent de manière continue et requièrent un apport important de substrat (par exemple un minimum de 20 kg de bouse de vache par jour pour une unité de 4 m^3).

5. Biodigesteur à barrique

Afin de présenter une alternative aux systèmes fragiles ou trop coûteux déjà répandus dans les pays en voie de développement, des barriques métalliques de 200 litres ont été quelque peu modifiées afin d'assurer l'étanchéité du système mais aussi dans le but de permettre un fonctionnement semi-continu. Par ailleurs, il apparait nécessaire de développer cette unité en tenant compte des matériaux et substrats facilement disponibles au Burkina Faso.
En ce sens, les barriques en métal sont particulièrement peu coûteuses et relativement répandue dans le pays. Leur volume limité à 200 litres est leur principal inconvénient.

La figure 1 représente l'un des deux biodigesteurs réalisés lors de ce travail. L'étanchéité est d'une importance cruciale, c'est pourquoi chaque connexion est dans un premier temps soudée, pour être ensuite renforcée à l'aide de mastic.
Le système d'admission est composé d'un bac ainsi que d'un tuyau plongeant dans la barrique et immergé lorsque la digestion anaérobie est en cours. Ainsi, l'ajout de matière dans le biodigesteur peut se faire sans y introduire de l'oxygène, inhibiteur de la réaction. On peut alors renouveler la matière à digérer tous les 20 à 30 jours et soutirer une partie du substrat digéré grâce à la vanne inférieure.

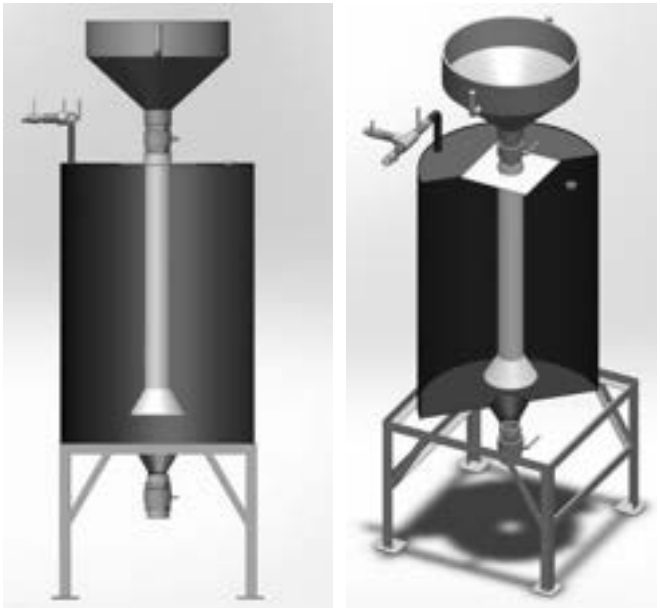


Figure 1 : Coupes partielles représentant le digesteur réalisé lors de ce projet

L'ensemble du système est scellé par deux vannes de plomberie de 1,5 pouces. Il est également nécessaire de prévoir une voie d'échappement pour le biogaz, afin de le stocker ou éventuellement de le consommer directement.

5.1. Analyse qualitative du biogaz

Les analyses qualitatives du biogaz ont été réalisées à l'aide d'un analyseur de gaz GEMBIO, permettant d'avoir les concentrations en méthane, dioxyde de carbone, oxygène et sulfure d'hydrogène.
Après avoir réalisé les vérifications quant à l'étanchéité du système, les biodigesteurs ont pu être alimentés. Le choix du substrat s'est d'abord porté sur de la bouse de vache et s'est ensuite élargi à des résidus de fruits.

Substrat homogène

La figure 2 présente l'évolution de la composition du biogaz en pourcents dans le premier digesteur. Le substrat de départ était constitué de 15 kg de bouse de vache mélangé à 20 kg d'eau (nécessaire pour des raisons pratiques uniquement). Durant les premiers jours de la réaction, les microorganismes ont consommé l'oxygène présent initialement dans le digesteur, et ont alors produit principalement du CO_2. A partir du dixième jour, le taux d'oxygène est resté inférieur à 0,1% et le taux de méthane n'a cessé d'augmenter pour atteindre des valeurs comprises entre 55 et 60%.

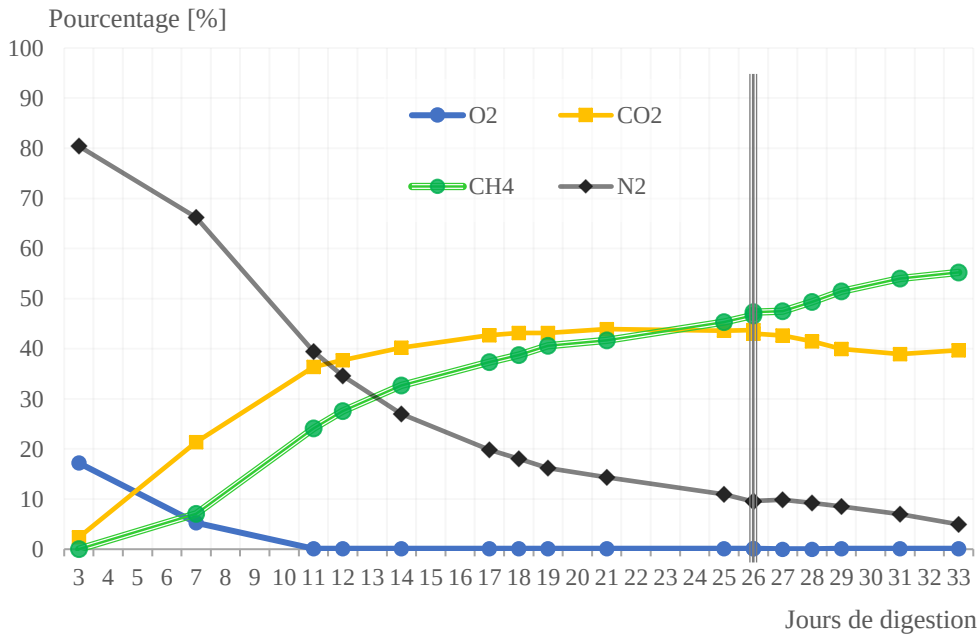


Figure 2 : Évolution de la composition du biogaz, substrat homogène

Il est également intéressant de constater que la réintroduction de substrat (marqué par la ligne verticale, cf. fig. 2) a pu maintenir les conditions anaérobies, ce qui prouve l'efficacité du système d'admission. De plus, le taux de méthane a par la suite continué à augmenter grâce à cet apport de matière facilement méthanisable. Enfin, il a été constaté que la quantité de sulfure d'hydrogène est restée inférieure à 15 ppm tout au long de l'expérience, et ce également pour le second digesteur.

Substrat hétérogène

A l'instar du premier digesteur, l'expérience réalisée sur le second système a également été démarrée au départ d'un substrat homogène, soit de la bouse de vache. Une combinaison entre la bouse de vache et des résidus de fruits (peaux de

bananes, mangues impropres à la consommation) a été expérimentée lors du second rechargement.

Comme on peut le constater à la figure 3 (à partir du 42ème jour), la qualité de la production a été quelque peu détériorée en raison de l'ajout de matière hautement fermentescible, qui a dans un premier temps dégagé beaucoup de CO_2.

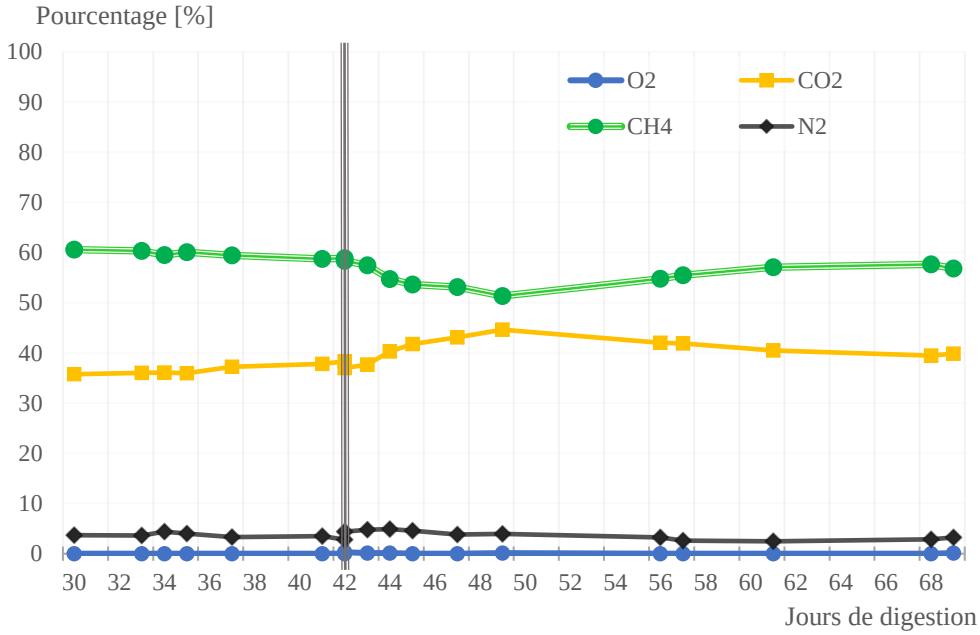


Figure 3 : Évolution de la composition du biogaz, substrat hétérogène

Le système d'admission a une nouvelle fois démontré son efficacité en permettant l'alimentation et le soutirage sans introduction d'air.

5.2. Analyse quantitative de la production

La figure 4 représente l'évolution de la pression relative interne des deux unités, réalisée à l'aide de l'analyseur de gaz GEMBIO. Etant donné que l'analyseur pompe une certaine quantité de gaz pour réaliser l'analyse, on peut remarquer sur ce graphique des diminutions de pression ayant lieu lors de chaque prise de mesure. On constate également plusieurs grosses chutes de pression, le 3 mai et le 11 mai notamment. Celles-ci correspondent à la consommation ou au stockage du biogaz.

En outre, le premier biodigesteur a atteint une pression relative maximale de plus de 600 mbar, qu'il ne faut pas dépasser en raison de la résistance mécanique des barriques en métal. En effet, à cette pression, la partie supérieure du digesteur avait drastiquement enflé et menaçait de se fissurer.

Plusieurs facteurs influencent la pression relative interne :

- la production de biogaz connait un optimum à une température de 38°C et un léger ralentissement autour de 45°C. Or, étant donné l'absence de régulation de température, la température du système est imposée par les conditions extérieures.
- Le second digesteur a été lancé ultérieurement au premier digesteur. Ainsi, la quantité de microorganismes était moindre et, bien que ces derniers produisent un biogaz de qualité, la quantité était légèrement inférieure.
- Il est également possible qu'il soit resté un léger excès de substances inhibitrices qui ont freiné la production du second digesteur

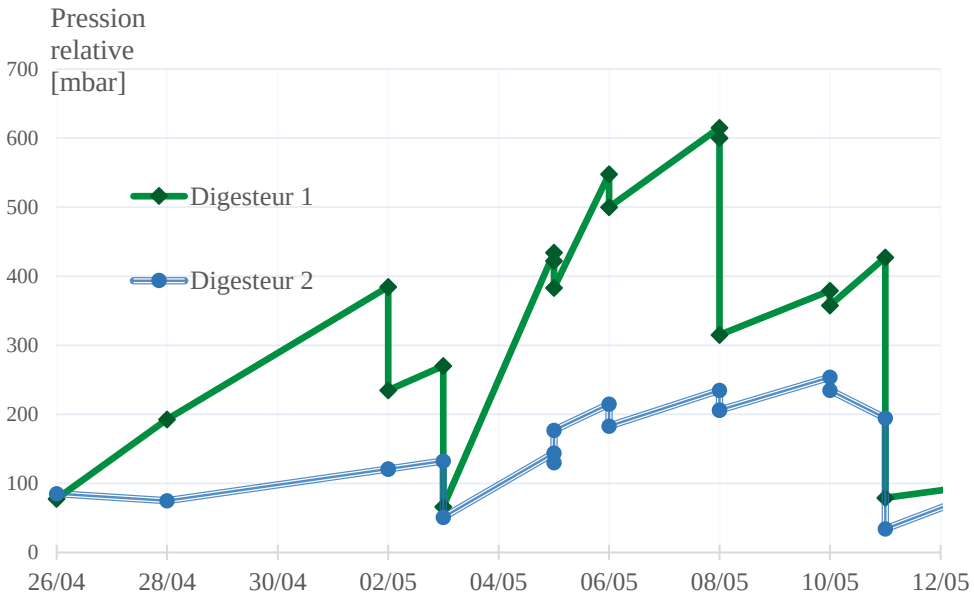


Figure 4 : Évolution de la pression interne relative des biodigesteurs

Cette analyse de la pression permet de confirmer l'étanchéité des digesteurs, mais ne permet pas d'avoir une idée exacte sur le volume de biogaz produit. Pour ce faire, la production a été évaluée en remplissant des chambres à air de 200 litres. Ainsi, en 10 jours, et quasi exclusivement grâce à la production du premier digesteur, il a été possible de remplir 3 fois une chambre à air de 200 litres sans précaution particulière.

En utilisant des biodigesteurs à barriques parfaitement fonctionnels et dont la phase de démarrage est passée (à l'instar du premier digesteur), on peut estimer que la production serait donc d'environ 1600 litres (soit 2 * 4 chambres à air de 200 litres) en 10 jours.

En supposant qu'une famille de 5 personnes cuisine 2h30 par jour [5], et que 200 litres de biogaz contenant 60% de méthane permettent de cuisiner 45 minutes, une production quotidienne de 200 litres par jour représenterait donc près d'un tiers des besoins d'une famille. Ces données sont cependant à considérer avec précautions étant donné qu'elles dépendent de plusieurs paramètres comme le type de cuisine (chauffer de l'eau ou réchauffer des aliments ne demande pas la même quantité d'énergie), l'efficacité du brûleur (à garantir), la quantité de méthane dans le biogaz (à stabiliser), etc.

6. Unités de production envisagée

L'objectif étant de réaliser une unité accessible aux fermes et éventuellement aux familles modestes des pays en voie de développement, ce travail s'est axé sur la conception d'un système peu coûteux, simple à réaliser et à utiliser.

6.1. Simple barrique

Ce procédé utilisant une seule barrique est à priori le moins complexe. Cependant, afin d'avoir une production continue, l'installation doit intégrer un système d'alimentation permettant l'ajout le plus aisé possible de matière organique, mais aussi un système de soutirage efficace.

Ce modèle comporte un problème de taille : en cas de fonctionnement continu, la matière ajoutée étant plus fraîche, elle relâche dans un premier temps toute une série de composés (CO_2, acides gras volatils, etc.) et détériore donc grandement la qualité du biogaz. En effet, seul le méthane est énergétiquement utile énergétiquement, or la décomposition de substrat frais s'accompagne dans un premier temps par une forte production de CO_2, comme l'a démontré le point 5.1.

6.2. Plusieurs barriques en parallèle

Dans ce cas, l'unité est composée d'un minimum de trois digesteurs fonctionnant de manière discontinue et contenant de la matière organique à différents stades de maturation afin d'avoir une production suffisamment linéaire (stabilisée), comme le présente la figure 5.

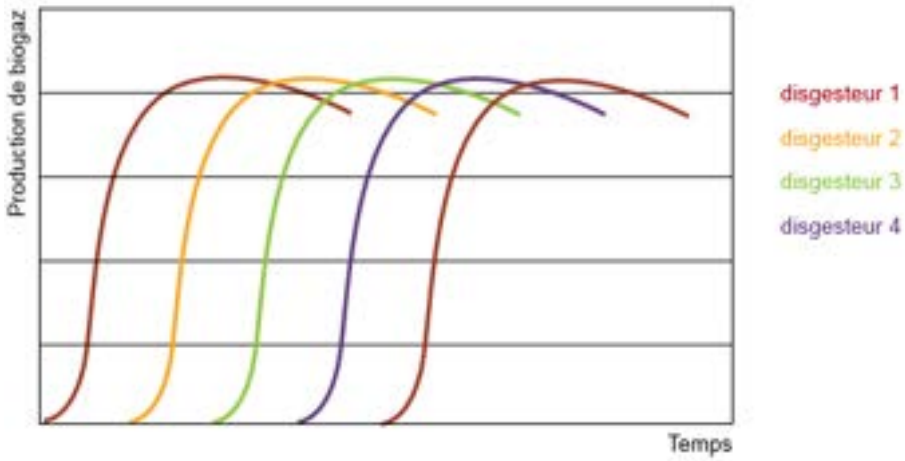


Figure 5 : Production continue réalisée grâce à plusieurs digesteurs en parallèle

Ce principe permettrait d'obtenir des quantités variables de biogaz en fonction du nombre de digesteurs en parallèle, chacun étant à un stade de maturation différent. De plus, la quantité de biogaz produite par une barrique de 200 litres est relativement limitée. En utilisant un minimum de 3 barriques, on a donc une production cumulée plus importante.

Figure 6 : Système de deux barriques en parallèle réalisé durant ce travail au CEAS

La figure 6 représente l'installation réalisée durant ce travail. On distingue deux biodigesteurs à barrique utilisés en parallèle et connectés d'une part à une chambre à air et d'autre part à un brûleur.
Ce dernier nécessite dans de nombreux cas une adaptation à l'utilisation du biogaz. En effet, afin que la flamme puisse se maintenir et donc éviter un décollement, il est nécessaire que le biogaz ne soit pas amené à un débit trop haut. Or, ce débit est principalement fonction du diamètre du gicleur (assimilable à un tube de venturi) ainsi que de la pression du gaz. Le gicleur d'origine, destiné à l'utilisation du butane – propane, a donc été élargi de 0,7 à 2 mm.

7. Pistes d'améliorations

Suite à l'utilisation des deux barriques, de nombreuses optimisations nous sont venues à l'esprit. Il serait par exemple possible de souder deux barriques afin d'avoir un digesteur de 400 litres.

Par ailleurs, il s'avère nécessaire de soutenir davantage les barriques car après 3 mois d'utilisation, la paroi inférieure du premier digesteur s'est légèrement affaissée sous le poids du mélange bouse de vache/eau (plus de 50 kg tout de même).

Il pourrait être intéressant de prévoir un fond de barrique conique afin de faciliter la vidange des digesteurs. Néanmoins, cela nécessiterait un usinage supplémentaire, ce qui se traduirait par un coût plus élevé, problématique dans le contexte évoqué.

Les bacs d'admission des trois digesteurs réalisés durant ce travail ont été fixés fermement au tuyau et à la vanne d'admission, cependant, on pourrait utiliser le même bac d'admission amovible pour chaque digesteur.

8. Conclusion

Fort des travaux réalisés au Centre Ecologique Albert Schweitzer du Burkina Faso ainsi que des expériences menées à bien à l'unité de laboratoire de l'Institut Gramme, ce travail a permis de contribuer au développement d'une unité de biométhanisation en voie humide dans le contexte du Burkina Faso.

Afin d'être accessible aux populations rurales de ce pays de l'Ouest Africain, la question du coût de l'unité était centrale. En effet, diverses technologies permettent déjà de produire du biogaz à des fins domestiques, néanmoins, celles-ci requièrent des investissements conséquents. L'objectif était donc de réaliser un biodigesteur simple d'utilisation permettant in fine de fournir suffisamment de biogaz pour

subvenir aux besoins d'une famille burkinabée pour tout simplement cuisiner un repas quotidiennement.

Ainsi, la réutilisation de barriques de 200 litres a été privilégiée car leur présence est largement répandue à travers le Burkina Faso et dans les pays en voie de développement en général. De plus, le coût de ces contenants est relativement bas (10 000 franc CFA, soit 15 €), ce qui permet de les optimiser par l'ajout d'un système d'admission et de vidange, ainsi que de prévoir un système de stockage qui s'avère nécessaire.

Deux biodigesteurs sous forme de barriques et alimentés principalement par des déjections bovines ont produit du biogaz utilisable directement par l'intermédiaire d'un brûleur adapté. Afin de fournir suffisamment de biogaz et de disposer d'une production relativement constante, il est alors nécessaire de placer plusieurs barriques en parallèle. Les estimations ont débouché sur un nombre de trois voire quatre biodigesteurs, ce qui permettrait alors de pourvoir quotidiennement un minimum de 300 litres de gaz.

Durant 3 mois, l'installation à simples barriques utilisées en parallèle a fait ses preuves. Dès lors, nous pouvons considérer que ce système est utilisable et qu'il peut être installé dans une ferme afin de l'éprouver dans une utilisation quotidienne.

Qu'elle soit en voie sèche ou humide, à grande échelle ou plus modeste, la biométhanisation est une source d'énergie qui a de grandes chances de se développer dans les prochaines années, et ce d'autant plus dans les pays en voie de développement tel que le Burkina Faso, où la question de l'énergie, liée à celle de l'environnement est à la fois essentielle et prioritaire.

9. Sources

[1] AL SEADI, T. *et al., Biogas Handbook*
University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

[2] FULFORD, D., *Running A Biogas Programme : A Handbook*
Londres, Intermediate Technology Publications, 1988.

[3] GRODENT, Simon, *Extension du développement de la biométhanisation en voie sèche en containers maritimes avec recirculation des percolats*, Mémoire de master, Liège, Belgique : HELMo Gramme, juin 2016.

[4] RAKOTOJANOA, Loïc, (mis en ligne en juillet 2013), *Domestic biogas development in developing countries*.
Adresse URL : http://www.enea-consulting.com/

[5] VÖGELI, Y. & LOHRI, C., *Renewable Energy from Kitchen Waste*, Sandec News, 10, juillet 2009, p. 15.

[6] CHARLIER, C. *REmploi des combustibles*, Note de cours, 2016.

[7] LOHRI C., *Research on Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste at Household Level in Dar Es Salaam, Tanzania*, Zurich University of Applied Sciences, 2009.

Implémentation d'un test médical dans un environnement 3D virtuel et réalisation d'une application d'enregistrement de données.

Ing. W. ESTIEVENART
Dr Ir L. JOJCZYK
ISICHt – Mons

Ce travail de fin d'étude consiste en deux phases distinctes. D'une part, la réalisation d'une application informatique d'enregistrement de données (données reliées à la cinématique de la main) et d'autre part, l'implémentation d'un test médical existant en une application virtuelle en 3D sur ordinateur. Les deux applications s'inscrivent dans un contexte médical avec l'aide de nouvelle technologie et concernent la kinésithérapie et l'ergothérapie. Ce projet a été réalisé au sein du CERISIC (Centre d'Etude et de Recherche de la catégorie technique de la HELHa) (Mons) et avec la collaboration de l'URFFH (Unité de Recherche sur la Forme et le Fonctionnement Humain) (Montignies-Sur-Sambre).

Mots-clefs : IMC, Leap Motion, Médical, Virtuel, 3D, Données, Cinématique, Visual Studio, C#, Unity, Main.

This end of study work consists in two distinct phases. Firstly, the development of a computer application for data recording (Data are related to kinematics of hands). Secondly, the implementation of an existing medical test toward a virtual application in 3D on a computer. These applications are in a medical context with the help of new technology and they are related to kinesitherapy and occupational therapy. This project was carried out within the CERISIC (Research Center of the technical category of the HELHa) (Mons) and with the collaboration of the URFFH (Research Unit on the form and human function) (Montignies-Sur-Sambre).

Keywords : Cerebral Palsy, Leap Motion, Medical, Virtual, 3D, Data, Kinematic, Visual Studio, C#, Unity, Hand.

1. Introduction

1.1. Contexte

La problématique de ce travail de fin d'études est liée à l'utilisation de la réalité virtuelle dans la réalisation de tests cliniques visant à évaluer la dextérité manuelle d'un patient. La dextérité digitale fine (c'est la combinaison de la précision et de la rapidité des mouvements des mains) est souvent évaluée chez les enfants et adultes IMC par le Purdue Pegboard Test (voir figure 1).

L'Infirmité Motrice Cérébrale, ou IMC, regroupe des troubles moteurs dûs à des lésions cérébrales ayant eu lieu avant, pendant ou après la naissance. Ces troubles, présents dans 0.2% des naissances, sont permanents et limitent le développement du mouvement et de la posture. Ces lésions sont non évolutives mais les conséquences peuvent évoluer. L'IMC est souvent accompagnée d'autres troubles (sensoriels, perceptifs, Trouble Musculosquelettique (TMS), etc) et peut prendre diverses formes (diplégie, hémiplégie, quadriplégie).

Figure 1 : Purdue Pegboard Test

Ce Purdue Pegboard Test est une planche en bois de 45 centimètres de longueur sur 30 centimètres de largeur. Cette planche comporte deux rangées de trous de 3 millimètres de diamètres, alignés et équitablement espacés, en son centre. Sur la partie supérieur, un cache recouvre quatre compartiments destinés à ranger les différentes pièces manipulables par le patient (tigette, rondelle et entretoises métallique). Cela se fait au travers de plusieurs exercices de coordination. Le patient doit prendre les tigettes (2.5cm de longueur et 2.5mm de diamètre) et les placer dans les trous. Il doit en mettre le plus possible en 30 secondes et en partant du haut vers le bas. Il ne peut prendre qu'une tige à la fois et ne peut pas s'aider de l'autre main pour le test. Il y a trois tests : un avec la main dominante, non-dominante et les deux mains. Il existe également un dernier test dit d'assemblage qui est plus complexe et non utilisé dans le cadre du projet.

L'apport de la réalité virtuelle serait d'une part de rendre plus attractif un test clinique efficace mais peu ludique, particulièrement chez les enfants qui peuvent se décourager rapidement lorsque la tâche est difficile. D'autre part, la réalité virtuelle permettra d'étudier plus précisément la cinématique de la main et des doigts lors de ce test clinique. Cela permettra aussi d'avoir accès à la stratégie déployée par le patient pour prendre et déplacer les tigettes jusque dans les trous.

1.2. Cahier des charges

Le projet consiste en la réalisation de deux applications informatiques. La première, une interface graphique permettant l'enregistrement de repères anatomiques choisis et captés par le Leap Motion (décrit par la suite au point 2), les coordonnées cartésiennes recueillies et exprimées en unités physiques devant être importées dans un fichier XLS ou CSV. Les données dans le fichier doivent être mises en forme de manière à pouvoir être lues et exploitées ultérieurement (réalisation de graphique ou d'analyse statistique par exemple).

La seconde application, une interface graphique permettant la réalisation du Purdue Pegboard Test. La possibilité de réaliser plusieurs épreuves différentes ainsi que de choisir plusieurs visuels devra être envisagée. Un aspect intéressant de la réalité virtuelle pourra être une liberté dans le choix des paramètres des éléments concrets du test : taille des trous, espacement, nombre de trous, etc. Là aussi une partie d'enregistrement des données (plus succincte) devra être envisagée afin d'analyser ultérieurement la cinématique des mains du patient lors du test.

Le but de la première application est de pouvoir disposer d'un outil de récolte et de stockage de données qui permette une utilisation et une exploitation ultérieure des données plus aisées possible.

Le but de la deuxième application est le même que la première avec un aspect additionnel : ne pas seulement disposer d'un outil de récolte et de stockage de données mais aussi d'un outil d'analyse et d'aide au diagnostic dans les milieux médicaux de la kinésithérapie et de l'ergothérapie. Le milieu et le contexte restent spécifiques mais s'inscrivent dans une mouvance nouvelle pour aider patient et praticien.

1.3. Anatomie de la main

Etant donné que les deux applications vont porter sur la cinématique de la main, nous allons présenter un bref résumé sur ses détails anatomique. L'anatomie de la main est, tout comme sa fonction, très complexe. Une main comporte cinq doigts : le pouce, l'index, le majeur, l'annulaire et l'auriculaire. Le pouce est particulier car il possède la capacité de s'opposer aux autres doigts, ce qui est fort utile pour attraper

des objets par exemple. Elle est également composée d'os, de muscles, de tendons, de veines, de nerfs et d'artères mais nous ne verrons que la partie concernant les os. Ils sont au nombre de 27 par main, ce qui fait plus de 50 os pour les deux mains. Le corps humain contenant environ 206 os, les mains représentent donc à elles seules un quart de la quantité osseuse. Cela montre à quel point elles sont complexes et importantes.

Sur la figure 2, on peut voir un schéma représentant les différents os composant la main. On voit qu'une main est composée de 14 phalanges (le pouce ne possède pas de phalange médiane), de cinq métacarpes et d'un carpe. Ce dernier est composé de huit os alignés sur deux rangées (la proximale, près du poignet, et la distale, près des doigts).

1. Phalange distale
2. Phalange médiane
3. Phalange proximale
4. Métacarpe
5. Os du carpe
6. Articulation inter-phalangienne distale
7. Articulation inter-phalangienne proximale
8. Articulation métacarpo-phalangienne

Figure 2 : Anatomie osseuse de la main

L'action d'attraper un objet est appelée préhension. Ce terme est largement utilisé dans le milieu médical. Une autre action intéressante à observer dans le cadre du Purdue Pegboard Test est la rotation de la main. En effet, les personnes atteintes d'IMC ont des difficultés à bouger correctement leurs membres (dépendant de la forme d'IMC). Grâce au Purdue Pegboard Test, on peut observer ces deux actions fondamentales que font les mains dans la vie de tous les jours.

Sur la figure 3, on peut voir différents types de préhension possible. Celle que l'on s'attend à rencontrer (individu sain) lors du Purdue Pegboard Test sera la préhension bi-digitale (« Tip » sur l'image) avec une prise pouce-index.

Figure 3 : Types de préhension

Cependant, on peut aussi observer d'autres types (individu pathologique) comme la préhension palmaire, latérale ou d'autres prises digitales (autres couples de doigts ou pluri-digitale). La rotation amenant la paume vers le haut est appelée supination et la rotation amenant la paume vers le bas est appelée pronation. L'ensemble des deux rotations est appelé prosupination. En effet, lors du déplacement des tiges, le patient est amené à prendre l'objet et à effectuer des rotations de la main afin de l'amener correctement dans les trous. On peut voir une représentation des deux mouvements concernant la prosupination sur la figure 4.

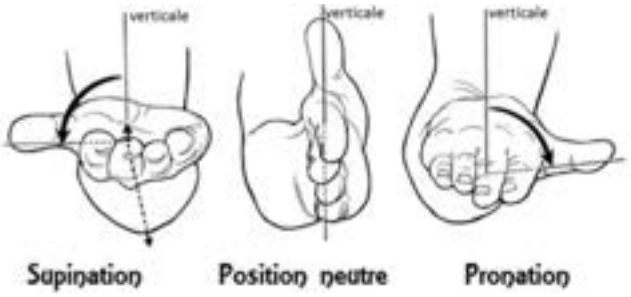


Figure 4 : Schéma prosupination

2. Matériel et logiciels utilisés

2.1. Le Leap Motion

La transcription des mouvements de la main nécessaire à la réalisation des deux applications utilise une caméra 3D spécifique reliée à l'ordinateur via USB : le Leap Motion (voir figures 5 à 8). Ce capteur de faible coût (< 80€) a été conçu spécifiquement pour la reconnaissance tridimensionnelle de repères anatomiques situés sur les mains et les avant-bras (contrairement à d'autres capteurs comme la caméra Kinect par exemple, utilisée pour repérer le corps dans son ensemble) mais n'est appliqué à l'heure actuelle qu'à des fins ludiques ou bureautiques.

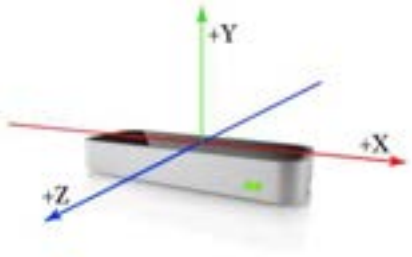


Figure 5 : Leap Motion et axes

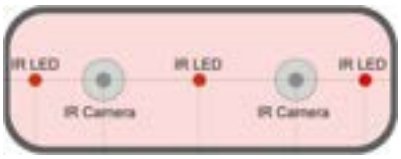


Figure 6 : Vue Schématique du Leap Motion

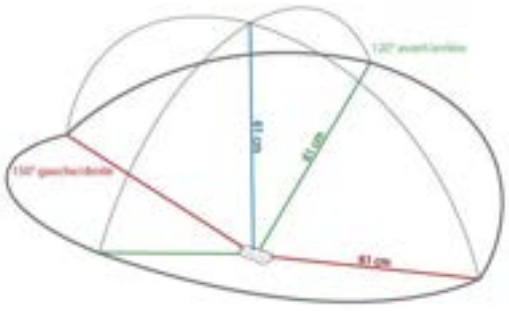


Figure 7 : Zone détection du Leap Motion

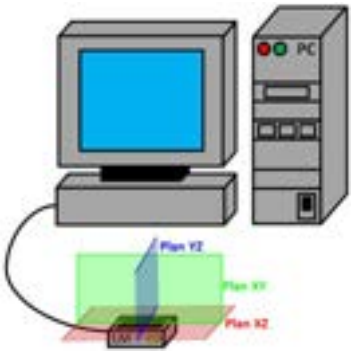


Figure 8 : Plans du Leap Motion

Ce capteur est composé de deux caméras infrarouges et de trois leds elles aussi infrarouge pour lui permettre de voir les mains grâce à une vision stéréoscopique (voir figure 6). Tout comme les yeux du corps humain, chaque caméra filme une image en deux dimensions. Les images des deux caméras sont ensuite utilisées pour synthétiser la vue en trois dimensions. Des traitements mathématiques sont utilisés

pour produire une vue 3D de ce que le capteur voit. Ensuite, d'autres traitements (algorithme, filtre) sont appliqués afin de déterminer les divers points des mains (coordonnées 3D des articulations, de la paume, longueur de doigts, etc).

Le système de coordonnées utilisé est dit « main droite » (ou dextrogyre) : le pouce, l'index et le majeur représentent respectivement les axes {X, Y, Z}. Il est important de le préciser car d'autres appareils ou logiciels utilisent un système de coordonnées dit « main gauche ». La différence entre les deux résulte en une simple inversion de l'axe Z. Sa précision est d'au moins 0.2 mm ce qui est largement suffisant pour les deux applications.

2.2. Unity3D

Unity3D est un moteur 3D permettant de réaliser des applications ludiques ainsi que de réalité virtuelle. Le choix s'est porté sur Unity3D plutôt que sur un autre logiciel du même type (Unreal Engine par exemple) car c'est un logiciel simple et disposant de suffisamment de fonctionnalités dans sa version gratuite. Il possède également beaucoup d'exemples et de documentation de par sa communauté active. Il offre aussi la possibilité d'intégrer des créations 3D réalisées dans d'autres logiciels tels que Blender par exemple. Et enfin, une boutique en ligne permet de trouver et d'intégrer des objets, textures ou autres éléments utiles facilement. Ce logiciel utilise un système de coordonnées « main gauche » (contrairement au Leap Motion).

2.3. Visual Studio

Visual Studio est un IDE (Integrated Development Environment) permettant la programmation de diverses applications informatique (interface graphique par ex.) et ce dans divers langages (Visual Basic, C#, …). Il est compatible avec Unity3D. C'est-à-dire que l'on peut utiliser Visual Studio pour réaliser et éditer des scripts dans un projet. Une autre raison de son choix est le langage de programmation utilisé. En effet, les scripts sur Unity3D ne peuvent être écrits que dans deux langages : le C# ou le JavaScript.

2.4. Le C#

Le choix du langage de programmation s'est porté sur le C# car il est disponible dans Unity3D et dans Visual Studio, ce qui permet d'utiliser un seul et unique langage dans les deux logiciels, et donc d'éviter la confusion lors de l'utilisation de deux langages différents. De plus, les bibliothèques relatives à l'utilisation du Leap Motion sont disponibles en C#. C'est un langage de programmation évènementielle et orienté objet.

3. DataTrackLM

3.1. Interface et fonctionnalités

Nous arrivons maintenant à la première application développée, celle pour enregistrer les données venant du capteur Leap Motion. Comme on peut le voir dans le titre de ce chapitre, elle est baptisée « DataTrackLM ». « Data » pour données, « Track » car le capteur détecte et suit les mains et enfin «LM» pour Leap Motion. Cette application a pour but d'enregistrer les coordonnées cartésiennes en trois dimensions des différentes articulations des mains. Les données (exprimées en unités physiques) doivent être enregistrées et disposées intelligemment dans un fichier XLS ou CSV pour pouvoir être exploitées ultérieurement.

Avant de développer cette application, divers tests ont été effectués : pour savoir comment récupérer les données du capteur, pour avoir un timer précis permettant de récupérer au moins 25 points par seconde, sur certains aspects graphiques de l'application, sur l'enregistrement dans des fichiers CSV, etc. Une fois tous ces tests réalisés, la programmation de l'application et le design de son interface ont pu commencer. En plus des choses utiles à l'enregistrement, quelques fonctionnalités supplémentaires ont été ajoutées. Sur la figure 9, on peut voir son Interface.

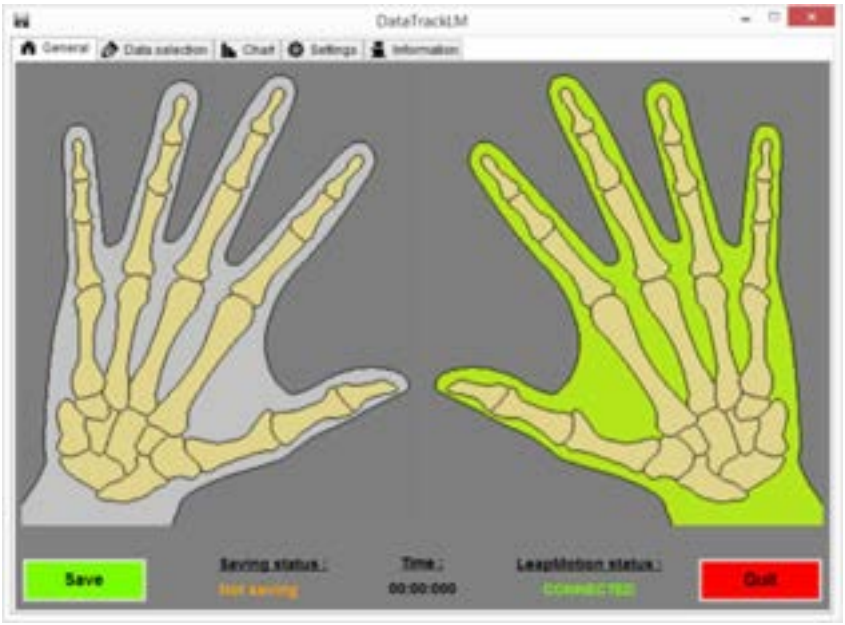


Figure 9 : Onglet "General" de DataTrackLM

Cet onglet reprend la visualisation des mains, l'état du Leap Motion (connecté ou non au PC) ainsi que de la sauvegarde (en cours ou non), la durée de la sauvegarde et les boutons pour quitter et pour démarrer/stopper un enregistrement.

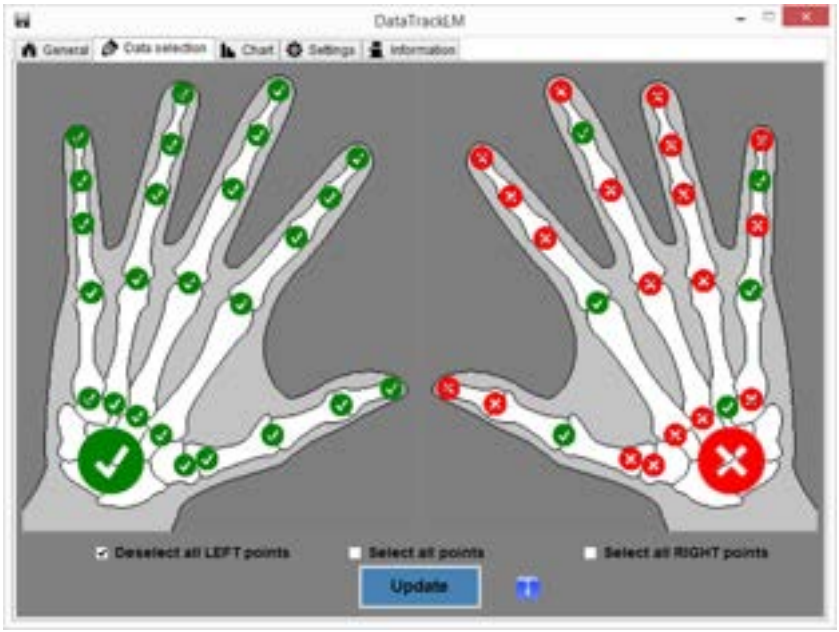


Figure 10 : Onglet "Data selection" de DataTrackLM

Sur la figure 10, on peut voir le second onglet qui permet de sélectionner les divers points des mains à enregistrer ou non. Chaque point peut-être individuellement sélectionné mais des check box permettent de sélectionner un ensemble de point en un clic (main gauche, droite ou les deux). Le bouton « Update » permet de valider la sélection.

Sur la figure 11 se trouve le 3ème onglet. Ce dernier permet la visualisation en direct de l'évolution de points anatomiques choisis dans l'espace tridimensionnel. Cela se fait au travers de deux graphiques représentant deux des plans du Leap Motion, le plan « XY » et le plan « XZ ». Ce sont respectivement le plan parallèle à l'écran du PC et le plan parallèle à la table et au capteur. Les points à afficher dans ces deux graphiques sont sélectionnables parmi deux listes, une pour chaque main. On peut donc choisir n'importe quel repère anatomique que l'on souhaiterait visualiser. On retrouve également les coordonnées de quatre points précis en dessous d'un des graphiques : les coordonnées des paumes gauche et droite ainsi que les coordonnées des points choisis (main gauche et main droite). Les points sont de couleurs différents afin de savoir à quelle main ils appartiennent.

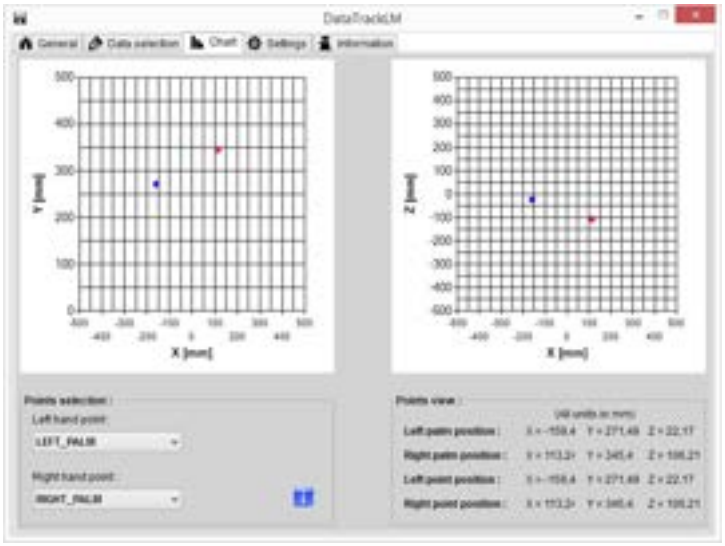


Figure 11 : Onglet "Chart" de DataTrackLM

Sur la figure 12, on peut voir l'onglet permettant de régler tous les paramètres liés à l'enregistrement et au fichier CSV en sortie de l'application. On peut régler le nom et l'emplacement du fichier, le nombre de données par seconde ainsi que d'autres informations complémentaires.

Figure 12 : Onglet "Settings" de DataTrackLM

3.2. Enregistrement des données

Dans son fonctionnement global, cette application utilise 2 timer : l'un pour le rafraichissement de l'interface et l'autre (plus précis) pour l'enregistrement des données. Dès lors qu'on démarre/stoppe un enregistrement, l'application bascule automatiquement de l'un à l'autre. Lors d'un enregistrement, les données sont stockées temporairement en mémoire du programme. Ensuite, si l'utilisateur choisis de les enregistrer à la fin du texte, elles vont être utilisées afin de compléter un fichier CSV. On retrouvera tout d'abord un en-tête au début et ensuite les données de manière structurée. L'en-tête contient les informations utiles au fichier (nom, durée enregistrement, date début et fin, etc) et les informations complémentaires que l'utilisateur a renseigné dans l'onglet « Settings ». On peut voir la structure du fichier sur la figure 13. Chaque coordonnée de chaque articulation de chaque doigt et cela pour chaque main y est stockée. Les données présentes sont hiérarchisées de cette manière : main, doigts, articulations, axe de coordonnées. Avec la paume au même niveau que les doigts. Cela permet de les exploiter simplement par la suite pour réaliser graphique ou analyse.

Informations		Time b. :			FPS :			Time :			Nb of point :			Start date :			End date :			...
		File name :			Normal :			Symbol :												...
		First name :			Name :			Age :			Case number :									...
Mains		Main gauche																		...
Doigts		Paume			Pouce												Index			...
Articulations					J1			J2			J3			J4			J5			...
Coordonnées		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	...
t0	valeur																			...
t1	valeur																			...
t2	valeur																			...
																				...

Figure 13 : Structure d'un fichier CSV

4. VirtualPPT (version 1)

4.1. Interface et fonctionnalités

Nous arrivons maintenant à la deuxième application développée, celle concernant le test médical Purdue Pegboard Test en version virtuelle. Comme on peut le voir dans le titre de ce chapitre, elle est baptisée « VirtualPPT ». Simplement pour Purdue Pegboard Test Virtuel. Pour rappel, cette application a pour but de réaliser le test médical sous forme virtuelle avec le Leap Motion. Pour deux raisons principales : rendre le test plus ludique pour les enfants et pouvoir récupérer, enregistrer et analyser ultérieurement les données cinématiques des mains. En effet avec le Purdue Pegboard Test, il est plus qu'intéressant d'observer le chemin que la main parcourt afin de mettre une tige dans un trou.

Avant de développer cette application, divers tests ont été effectués tout comme pour l'autre application : pour réaliser les trous avec la détection de la tige et les collisions, pour utiliser le Leap Motion avec Unity3D, pour interagir basiquement avec un objet virtuel présent dans la scène, pour prendre la tige, la déplacer et la relâcher, etc. Une fois tous ces tests réalisés, je me suis donc lancé dans la programmation de l'application et le design du test / jeu. Certaines fonctionnalités auxquelles nous n'avions pas pensé au départ ont pu être ajoutées. Par exemple, un timer est implémenté pour mesurer le temps pendant lequel on pince les tigettes, cela pour évaluer la difficulté d'attraper les tiges virtuelles.

Sur la figure 14, on peut voir le test virtuel en question, avec quelques tiges placées et une nouvelle attendant qu'on la saisisse.

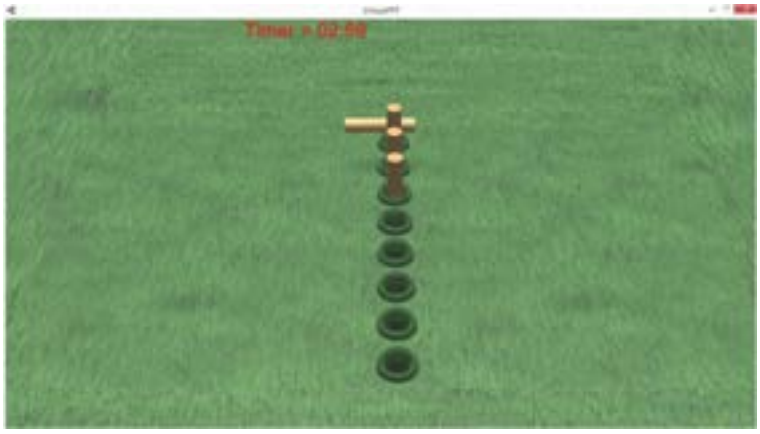


Figure 14 : Interface de VirtualPPT

On peut voir que le test virtuel ne ressemble pas à la vraie planche du Purdue Pegboard Test. La première phase a été d'essayer de modéliser une des tigettes avec sa taille réelle mais elle était bien trop petite pour pouvoir l'attraper et la manipuler dans l'environnement virtuel. La décision a donc été de modéliser une tigette plus grande afin qu'elle soit aisément manipulable par la suite.
La phase suivante a été la modélisation d'une version simplifiée et allégée de la planche du Purdue Pegboard Test mais cela posait problème au niveau des collisions et de la taille encore une fois. La solution finale est donc celle que l'on peut voir sur la figure 14. Il y a une rangée centrale de huit trous et une tigette. Cette tigette réapparait une fois qu'on la place dans le bon trou. Le choix à été de faire une rangée centrale au lieu de deux pour pouvoir effectuer le test avec la main gauche ou la main droite, le test comprenant les deux mains étant moins utilisé. Pourquoi huit trous et pas plus ou moins ? C'est un compromis entre un nombre de trous suffisant pour le test et une vue 3D non surchargée (et de ce fait une orientation et position de caméra la plus adéquate possible pour l'utilisateur). Chaque trou est donc un objet séparé

pour pouvoir gérer les collisions avec la tigette plus facilement que s'il formait un seul et même objet.

L'application dispose d'un mode entrainement et d'un mode de test, tout comme le Purdue Pegboard Test. Dans le mode test, lorsque l'utilisateur a placé toutes les tiges ou que le temps est écoulé, il voit apparaitre les scores et informations finales (voir figure 15). On peut également voir apparaitre une clôture contenant un animal. C'est le côté ludique de l'application. En effet, la taille de la clôture dépend du nombre de tiges placées correctement. Cela est fait afin de motiver les plus jeunes et pour ne pas qu'ils se découragent.

Figure 15 : Fin du jeu/test VirtualPPT

L'action principale dans cette application est d'attraper les tiges, de les amener jusqu'aux trous à atteindre, et de les relâcher pour les placer correctement.

4.2. Préhension

Mais comment peut-on détecter la prise et les relâchements dans le monde virtuel ? Sur la figure 16, on peut voir le schéma d'une main et plus particulièrement de son pouce et index en forme de pince. Sur la figure 17, on peut voir le schéma en coupe et en vue du dessus d'une tige avec le point milieu représenté. On va utiliser la distance entre les deux doigts pour détecter une prise ou un relâchement, mais il ne faut pas qu'un pincement à 10 centimètres de l'objet permette de l'attraper.

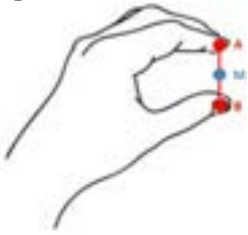


Figure 16 : Schéma pincement

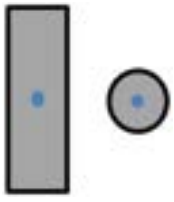


Figure 17 : Schéma tige

On va utiliser les coordonnées du bout de deux doigts pour calculer le point se situant au milieu de ces deux doigts. C'est en comparant les coordonnées de ce point milieu et du point milieu de la tige que l'on va pouvoir détecter et valider le pincement ou le relâchement de l'objet (en tenant compte de l'écartement des doigts, AB proche pour un pincement et AB écarté pour un relâchement. Le seuil étant la largeur de la tige avec un paramètre additionnel afin de ne pas être trop restrictif car le monde virtuel est parfois capricieux). Cependant, on ne va pas restreindre le point à atteindre uniquement au point milieu de l'objet, on va laisser une zone tout autour, cette zone est tout simplement l'objet lui-même.

On peut voir les coordonnées des points A et B respectivement aux équations suivantes.

$$A = [x0; y0 ; z0]$$
$$B = [x1 ; y1 ; z1]$$

Tout d'abord, on va trier les coordonnées pour chaque axe.

$$Axe\ x => xmin = x0\ et\ xmax = x1$$

Ensuite, on va calculer la distance, la diviser par deux et l'ajouter à la valeur minimale, et cela pour chaque axe. On peut voir les calculs complets pour les axes X, Y et Z aux équations suivantes.

$$X = \frac{(Xmin - Xmax)}{2}$$

$$Y = \frac{(Ymin - Ymax)}{2}$$

$$Z = \frac{(Zmin - Zmax)}{2}$$

Cela nous donne les coordonnées du point médian entre deux autres points (A et B) en trois dimensions.

$$M = [x; y; z]$$

Une fois l'objet pris, il va suivre le même mouvement que la main (comme dans la réalité).

4.3. Détection tiges => trous

Pour tester si une tigette a été placée dans le bon trou, on utilise plusieurs objets. Tout d'abord le trou en lui-même pour avoir la position et ensuite deux plaques de

détection situées respectivement en haut et au milieu du trou (voir figure 18 et 19). Les collisions entre les tigettes et ses deux plaques étant désactivées, si la tigette passe au travers, une variable propre à la plaque va changer d'état pour indiquer que la tigette la traverse. Dans le programme principal, on va récupérer et tester l'état des variables des deux plaques du trou en question afin de savoir si la tigette est dans le trou ou non. Il faut aussi que le tag de la tigette (une variable propre à l'objet) soit « libre » ce qui veut dire qu'on ne soit plus en train de la pincer. Le fait de mettre deux plaques de détection permet de forcer l'utilisateur à amener la tigette avec un angle minimal et donc à se rapprocher le plus possible du Purdue Pegboard Test.

Figure 18 : Tige droite

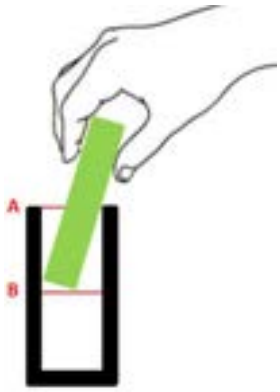


Figure 19 : Tige penchée

5. VirtualPPT (version 2)

Cette deuxième version a été créée suite à la première. En effet, il était difficile d'attraper les tiges et les amener jusqu'aux trous et ce, parce que gérer la préhension et la prosupination en même temps n'est pas une chose évidente. Il a donc été décidé de réaliser cette deuxième version en séparant la préhension et la rotation à l'aide de deux tests séparés qui évalueraient chacun un des aspects. Cela permet de rendre le test plus accessible à tous, plus simple à gérer, et ne change pourtant pas le véritable but du test réel. Car on doit effectuer les mêmes types d'actions, et donc cette deuxième version évalue de la même manière même si cela peut sembler différent.

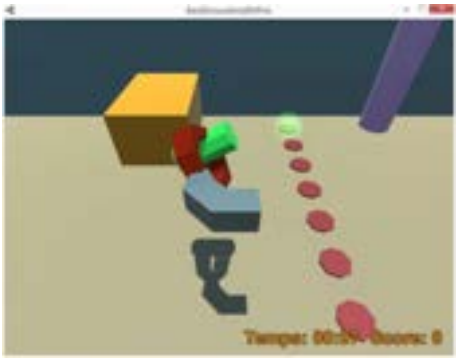


Figure 20 : Mode "Tourner" gauche de VirtuallPPT2

Figure 21 : Mode "Attraper" droite de VirtualPPT2

On peut voir sur les figures 20 et 21, respectivement le mode « Tourner » et le mode « Attraper » de cette application. Dans le premier mode, la tige apparait sur le support et elle est attrapée automatiquement dès qu'on s'en approche. Cependant, une rotation aléatoire est appliquée à la main et l'utilisateur doit donc lui-même tourner la main afin de corriger la rotation et amener correctement la tige (perpendiculairement au trou).

Dans le second mode (attraper), il faut aller chercher la tige et effectuer l'action de pincement afin de pouvoir la saisir. Les rotations seront nulles et la main ainsi que la tige resteront perpendiculaire pendant tout le test.

On voit bien dès lors que chaque test fait intervenir un des deux aspects, séparément de l'autre, évoqués plus haut, à savoir prosupination et préhension.

Le menu du jeu/test permet de choisir dans quel mode on veut aller, avec qu'elle main, de choisir entre un mode test (chronométré) ou un mode entrainement (aucune limite de temps), ainsi que la sensibilité (dans le cas où le pincement poserait problème d'une personne à l'autre).

6. Tests et Résultats

6.1. Suivis de trajectoires

Vers la fin du développement de l'application DataTrackLM, j'ai effectué des simples tests afin de vérifier si l'enregistrement des données s'effectuait correctement et aussi pour montrer une première utilisation des données dans le fichier CSV. J'ai donc dessiné des formes géométriques simples avec mes doigts au-dessus du Leap Motion (plan « XZ ») pendant une phase d'enregistrement. J'ai

ensuite utilisé les données générées pour réaliser des graphiques selon les axes «X» et «Z». Les formes choisies étaient un cercle, un triangle et un carré. On peut voir la trajectoire du cercle sur la figure 22.

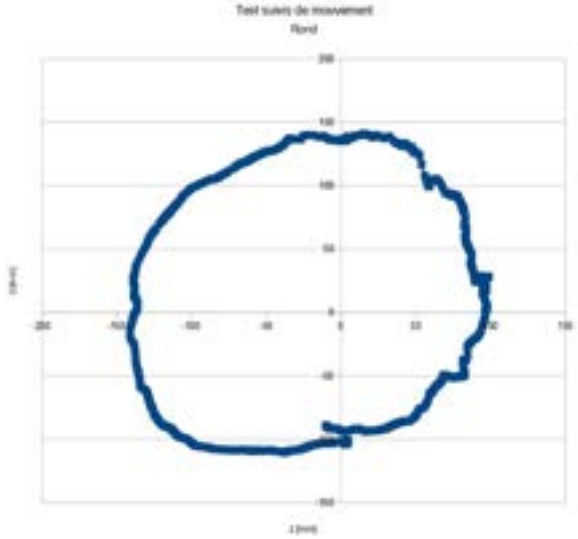


Figure 22 : Trajectoire circulaire

Ces trois tests ont été réalisés à l'aide d'une structure faite de bois et de plexiglass afin de garantir la même hauteur tout au long de la trajectoire de l'index pendant l'enregistrement. Le but premier de cette structure était d'offrir une limitation physique pendant le test virtuel. En effet, il n'existe aucune limitation physique lors du test virtuel, et le patient n'a aucun repère de hauteur contrairement à la planche en bois dans le Purdue Pegboard Test. L'idée était de réaliser une limitation physique pour le test virtuel tout en entravant pas le Leap Motion et en offrant un repère physique au patient pendant le test. Il y a une encoche prévue pour placer le Leap Motion au centre et en dessous de la plaque transparente. Sa taille a été déterminée selon les dimensions de la planche du Purdue Pegboard Test.

Pour ce qui est des tests réalisés par une étudiante en kinésithérapie dans le cadre de son TFE [1], ils ont pu démontrer plusieurs choses. Tout d'abord, des corrélations entre le test réel (le Purdue Pegboard Test) et le test virtuel (l'application VirtualPPT dans sa seconde version). Pour les tests, une population de 85 enfants sains et 11 enfants IMC, âgés de 6 à 14 ans, a été sollicitée.

« Chez les enfants sains, une corrélation significative et modérée est globalement observée entre les scores réels et les scores virtuels des deux modes ainsi qu'entre les scores virtuels des deux modes. Aucune relation significative n'a été trouvée entre le score réel de la main dominante et le score virtuel du mode « **Attraper** ».

Chez les enfants IMC, pour les deux mains, aucune relation significative n'a été observée entre le score réel et le score virtuel du mode « **Attraper** », lequel n'était également pas corrélé au score virtuel du mode « **Tourner** ». A contrario, une corrélation significative élevée a été observée, pour la main dominante, entre le score réel et le score virtuel du mode « **Tourner** » ; une relation significative modérée a également été trouvée, pour la main non dominante, entre les mêmes scores. Ces résultats semblent indiquer que le mode « **Tourner** » du test virtuel mesure une variable plus proche de la variable mesurée par le Purdue Pegboard Test que le mode « **Attraper** », et ce, particulièrement pour la main non dominante. » [1]

On peut voir un des résultats de ce test sur la figure 25. Il montre la corrélation entre test réel et virtuel chez les enfants IMC pour la main non-dominante.

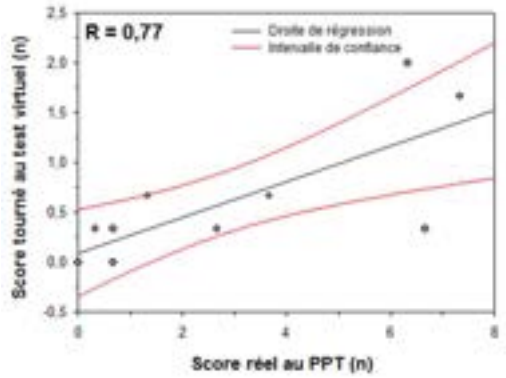


Figure 24 : Corrélation chez les enfants IMC entre le score au Purdue Pegboard Test et le score au VirtualPPT version 2 pour la main non dominante

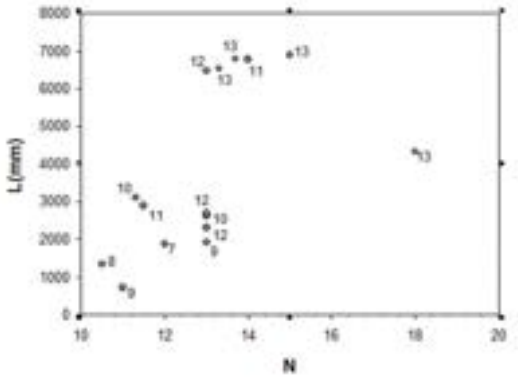


Figure 25 : Relation entre le nombre moyen de tiges (N) et la longueur totale de déplacement de la paume (L)

Ensuite, un des tests permet de voir le nombre moyen de tigettes mises au Purdue Pegboard Test en 30 secondes avec la longueur de déplacement totale de la paume.

L'application DataTrackLM a été utilisée ici conjointement avec le Purdue Pegboard Test afin de récolter des données relatives au test réel. On peut voir le résultat sur la figure 25. Le nombre à côté de chaque point fait référence à l'âge du sujet.

7. Conclusions et Perspectives

La première application, DataTrackLM, fonctionne et est relativement facile d'utilisation. De plus, l'utilisateur peut régler à sa guise les différents paramètres d'un enregistrement et des fichiers CSV qui seront générés (Fréquence d'acquisition, points, information supplémentaire, etc). L'application permet également une visualisation des mains détectées, et de deux points au choix (un par mains) sur des graphiques « XY » et « XZ » (avec affichage des coordonnées). Cette application pourrait cependant être améliorée par l'ajout de fonctionnalités permettant de lire et d'utiliser les fichiers CSV générés afin d'en faire des graphiques et des analyses statistiques rapidement et simplement (liste de graphiques et analyses types, choix des axes et grandeurs, etc).

La seconde application, VirtualPPT, dans sa première version fonctionne et reflète bien les différentes manipulations à effectuer lors du Purdue Pegboard Test. Les manipulations sont quelque peu différentes, dû à l'environnement virtuel, mais le but du test virtuel reste le même que le test réel. A savoir attraper des tigettes à un endroit précis, les amener jusqu'au trou et les lâcher ensuite. L'application a cependant besoin d'amélioration au niveau de la préhension.

En effet la préhension virtuelle n'est pas une chose évidente à reproduire et si elle comporte certains défauts, l'utilisateur le ressentira car ça ne se comportera pas comme ça le devrait en réel. Un point qui a été évoqué plus tôt est la différence entre les limitations physiques réelles et virtuelles. En effet, dans le monde virtuel on peut passer la main à travers l'objet modélisant le sol, ce qui ne pourrait être le cas en réel. C'est pour cela qu'un support pour le test virtuel a été réalisé. Il s'agit simplement d'une structure en bois pouvant accueillir le Leap Motion en son centre, et disposant d'une plaque en Plexiglass a environ 15 cm au-dessus de celui-ci. Cela pour donner une limite physique correspondant au sol virtuel et empêchant ainsi de passer au travers du sol. On peut aussi noter que la première application pourrait être utilisée conjointement avec le Purdue Pegboard Test réel. On disposerait ainsi d'une troisième façon de réaliser ce test : une version réelle mais avec enregistrement des données. C'est ce qui a d'ailleurs été fait durant les tests réalisés par l'autre étudiante [1]. Cette application mériterait donc plus d'amélioration interne et de tests afin de reproduire le plus fidèlement la préhension dans le monde virtuel en 3D. Cela augmenterait grandement le ressenti et la prise en main des utilisateurs.

La deuxième version de l'application VirtualPPT a été utilisée pour réaliser des tests de comparaison entre un test virtuel et le Purdue Pegboard Test, test réel. Les tests ont pu démontrer que l'application permet de faire la différence entre un enfant sain et un enfant IMC. Elle a également permis de mettre en valeur le ressenti des enfants sur la difficulté et l'aspect ludique des deux tests (virtuel et réel) au travers d'un questionnaire. Ce questionnaire démontre que le test virtuel n'est pas jugé plus ludique que le test réel.

De plus, dans sa version actuelle, le test virtuel est jugé plus difficile que le test réel. On peut dès lors espérer qu'une adaptation de la difficulté de l'épreuve virtuelle permettra d'augmenter le caractère ludique de cette dernière. Cette application pourrait être améliorée en la rendant paramétrable : d'autres scènes 3D, nombre, taille et espacement des trous, etc.

La capture et l'analyse des mouvements humains liés au domaine médical est en expansion grâce aux technologies récentes. Plusieurs études ont déjà été menées, et plusieurs sont en cours actuellement [3], [4]. C'est donc un domaine prometteur pouvant aider patient, praticien et améliorer les diagnostics et techniques actuelles sur des troubles divers (IMC, TMS) bien présents de nos jours.

8. Sources

[1] FABULUS Alysson, *Pertinence du Leap Motion comme outil d'évaluation de la dextérité digitale fine chez les enfants sains et IMC*, Montignies-Sur-Sambre, Travail de fin d'étude, HELHa, 2017.

[2] ESTIEVENART Wesley, *Implémentation d'un test médical dans un environnement 3D virtuel et réalisation d'une application d'enregistrement de données*, Mons, Travail de fin d'étude, HELHa, 2017.

[3] CERISIC, (Consulté le 19/09/2017), *DYSKIMOT*
Adresse URL : http://www.cerisic.be/?projet=developpement-dun-systeme-multitaches-immersif-et-low-cost-denregistrement-et-analyse-de-donnees-cinematiques-en-vue-de-levaluation-de-dyskinesies-motrices-et-de-leur-prise

[4] CERISIC, (Consulté le 19/09/2017), TRACKTMS
Adresse URL : http://www.cerisic.be/?projet=developpement-dun-environnement-non-intrusif-de-mesures-ergonomiques-visant-a-la-prevention-de-lapparition-de-troubles-musculo-squelettiques

Les planchers mixtes bois-béton : Etat de l'art, méthodologie et outil de calcul, domaines d'application

Ing C. Vanderroost
Ing Y. Gobert
ECAM Bruxelles

Cet article traite de l'étude des planchers mixtes constitués de bois et de béton trouvant leur place dans le domaine de la construction. Le sujet a été traité en collaboration avec le bureau d'étude « Ney & Partners WOW ». S'agissant d'une technologie peu utilisée à l'heure actuelle, le travail a pour but de déterminer les différents systèmes de plancher existants, d'en établir le schéma de dimensionnement et d'en trouver un domaine d'application intéressant.

Mots-clefs : Plancher mixte, Bois, Béton, Etat de l'art, Dimensionnement, Application

This article deals with the study of timber-concrete composite floor systems which are used in construction. The subject has been covered in collaboration with the structural engineering office « Ney & Partners WOW ». Given that this system remains less known and less used that the common ones, the purpose of this work consist of highlighting the existing floor systems, defining a design method and finding interesting application of the system.

Keywords : Composite floor system, Timber, Wood, Concrete, State of the art, Application, Design

Symboles

a_1 : distance du centre de gravité du béton à l'axe neutre de la section
a_2 : distance du centre de gravité du bois à l'axe neutre de la section
A_1 : aire de la section de béton
A_2 : aire de la section de bois
b_1 : largeur de la section de béton
b_2 : largeur de la section de bois
e : entraxe entre les solives
E_1 : module d'élasticité du béton
E_2 : module d'élasticité du bois
$(EI)_{ef}$: rigidité effective de la section composite
$F_{v,rk}$: résistance caractéristique au cisaillement du connecteur
h_1 : hauteur de la section de béton
h_2 : hauteur de la section de bois
I_1 : inertie de la section de béton
I_2 : inertie de la section de bois
k : rigidité de la connexion (k=K/s)
K : module de glissement du connecteur
K_{ser} : module de glissement du connecteur à l'ELS
K_u : module de glissement du connecteur à l'ELU
L : portée de la poutre
M_{Ed} : moment sollicitant en valeur de calcul (ELU)
s : espacement entre les connecteurs
V_{Ed} : effort de cisaillement sollicitant en valeur de calcul (ELU)
γ : coefficient de glissement de la connexion
σ_i : contrainte normale dans l'élément i due à l'effort normal créé par la liaison de la section composite
$\sigma_{m,i}$: contrainte normale dans l'élément i due au moment sollicitant
τ_2 : contraintes tangentielles dans l'élément bois

Abréviations

ELS : Etats limites de service
ELU : Etats limites ultimes
CLT : Cross laminated timber (bois lamellé croisé)

1. Introduction

Depuis quelques années, l'utilisation des systèmes composites faisant travailler conjointement le bois et le béton au niveau des planchers et des tabliers de pont se répand de plus en plus de par le monde. Les deux matériaux ont des caractéristiques différentes et peuvent dès lors devenir complémentaires.

En effet, si les deux matériaux sont bien liaisonnés, ils forment une section composite unique. Etant donné que le plancher reçoit des charges descendantes verticales, il est sollicité en flexion. Dès lors, le béton se trouvant au-dessus du bois travaille principalement en compression tandis que le bois travaille principalement en traction (figure 1b). Cette application fait donc travailler les matériaux en sollicitant leur aptitude préférentielle propre.

La section composite se retrouve avec une rigidité accrue par rapport à un plancher uniquement en bois de même épaisseur et permet donc de reprendre plus de charge ou d'augmenter la portée. Par ailleurs, le plancher mixte se retrouve avec un poids moindre par rapport à un plancher de même performance uniquement en béton, car il permet d'éviter la présence du béton en traction qui constitue un poids mort.

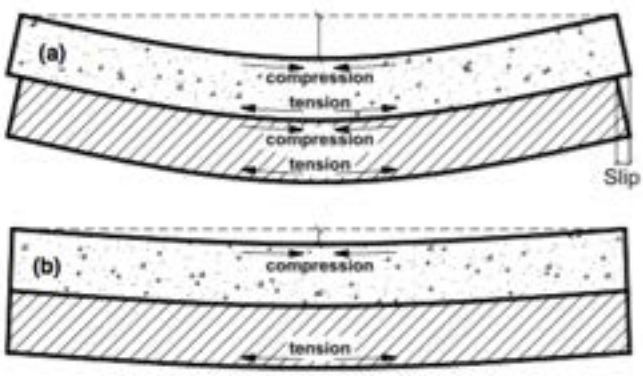


Figure 1 : Poutre bi-appuyée sous chargement
1a- Action composite nulle
1b- Action composite complète [1]

En dehors de leurs caractéristiques mécaniques, ces deux matériaux peuvent être complémentaires sur d'autres aspects. Le béton peut pallier les performances limitées du bois dans les domaines acoustique, vibratoire et d'inertie thermique. Le bois quant à lui est un matériau qui permet une construction plus durable.

De nombreux produits et services adaptés à cette technologie ont vu le jour, cependant elle n'est pas encore couramment exploitée et cela pour plusieurs raisons. Contrairement aux planchers composites en acier-béton, il n'existe pas d'Eurocode spécifique à la vérification de ces structures. De plus, le domaine d'application prouvant le réel bénéfice des planchers composites en bois et béton n'est pas encore défini, de sorte que ceux-ci sont laissés pour compte à côté des planchers classiquement utilisés dans la construction.

Ce travail a pour but de recenser les différentes technologies existantes, de proposer un schéma de dimensionnement regroupant les vérifications adéquates à ce type de plancher et d'en définir le domaine d'application propre.

2. Les planchers mixtes en pratique

Le principe de construction consiste en une dalle de béton, d'épaisseur allant de 5 à 12 cm, qui est liée à un plancher constitué de solives en bois recouvert ou non d'un panneau (OSB, panneau de particules, contreplaqué) faisant office de coffrage perdu, ou, moins fréquemment, à un plancher plein (figure 2). Le plancher peut être en bois massif, lamellé-collé ou en CLT.

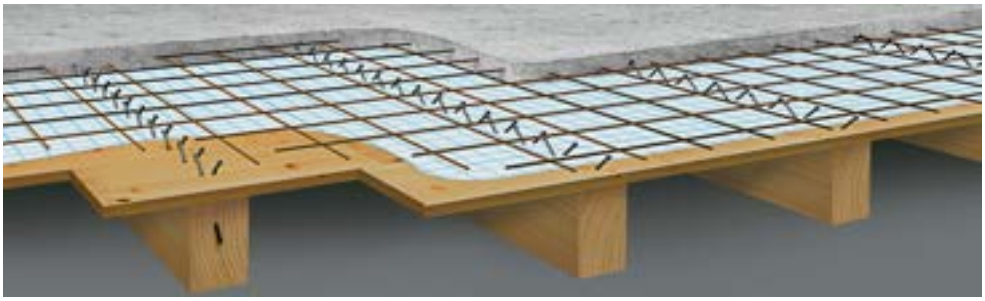


Figure 2 : Plancher mixte connecté par des connecteurs vis [2]

Les étapes de mise en œuvre seront relativement identiques quel que soit le connecteur métallique considéré, elle consiste en [3] :

- La mise en place des poutres.
- La pose des coffrages sur les poutres.
- La pose d'une couche intercalaire sur le coffrage (pour éviter que le bois n'absorbe trop d'humidité émise lors de la prise du béton). Cette couche est un film en polypropylène imperméable au passage de l'eau mais perméable à la vapeur. D'épaisseur négligeable, elle n'affecte pas les performances du plancher mixte et reste incorporée à celui-ci durant sa durée de vie.
- La pose des connecteurs.
- La pose des armatures de la dalle en béton.
- La pose d'étais (selon le besoin mais plus généralement à 1/3 tiers et 2/3 de la portée).
- Le bétonnage de la dalle. Le connecteur fait prise dans celle-ci.
- Le retrait des étais.

Seule l'étape de la pose des connecteurs va différer en fonction de leurs types.

En rénovation, on ajoutera le contrôle des poutres et des appuis existants et le retrait du revêtement de sol existant jusqu'à la couche de planches pouvant être utilisée comme coffrage. [3]

Différents types de connecteurs métalliques existent sur le marché. On retrouve des vis, des connecteurs tubulaires, des tirefonds, des plaques métalliques, des connecteurs plus spécifiques tels qu'un goujon associé à des vis par l'intermédiaire d'une plaque de base, etc (figure 3).

Figure 3 : Différents types de connecteurs.
Haut : Vis [4]. Bas (de gauche à droite) : Connecteurs tubulaires [5], Tirefonds [6], Plaque métallique [7], Goujon et vis [8]

3. Méthodologie de calcul

3.1. Principe Général

Cela a été évoqué précédemment, si les deux matériaux sont bien liaisonnés, ils forment une section composite unique, et le béton se trouvant au-dessus du bois travaille principalement en compression tandis que le bois travaille principalement en traction. Au contraire, si la liaison n'est pas effective, le transfert d'effort rasant qui assure une action mixte en flexion est nul, et les deux matériaux fonctionnent indépendamment. La figure 1 montre deux situations opposées à l'extrême avec, au-dessus (1a) une action composite nulle sans connexion entre les matériaux et en-dessous (1b) une action composite complète avec connexion. [1]

La ridigité flexionnelle de la figure 1a) est la somme des rigidités de chaque élément. Celle de la figure 1b) sera plus haute que la première, et donc la flèche de l'élément composite sera beaucoup moins élevée. [9] Ainsi pour une section en bois-béton, qui comporte des connecteurs et qui appartient donc à une situation intermédiaire, la distribution des contraintes se fait comme sur la figure 4b).

Sur le profil des déformations sans connecteurs de la figure 1a), la présence d'un glissement entre les deux matériaux est également visible. Etant donné qu'une connexion parfaite n'existe pas, pour une situation intermédiaire ($0<\gamma<1$), un glissement sera créé par la déformation du système de connexion. La conception des structures mixtes bois-béton doit prendre en considération cette déformation.

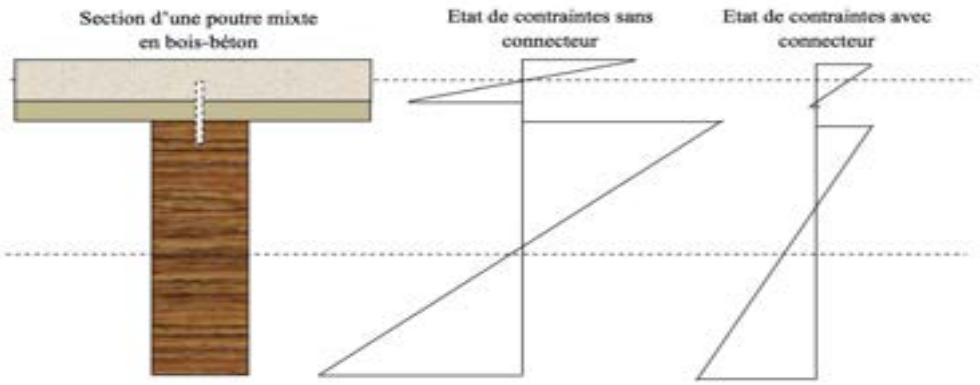


Figure 4 : Distribution des contraintes dans la section mixte a) sans connecteurs b) avec connecteurs [9]

Les connexions étant sollicitées par un effort de cisaillement, les déformations d'un système de connexion et donc les performances d'un connecteur, vont être évaluées par un essai de cisaillement.[1] Cet essai va permettre de déterminer deux paramètres caractérisant les performances du connecteur : sa résistance au cisaillement $F_{v,rk}$ [N] et son module de glissement K [N/mm].

La rigidité d'un système de connexion est donnée par son module de glissement K [N/mm] (K_{ser} à l'ELS et K_u à l'ELU). Le module de glissement est le coefficient de proportionnalité entre la charge appliquée au connecteur et le glissement.

$$K = \frac{charge\ [N]}{glissement[mm]}$$

Ce module de glissement K va, entre autre, différencier les performances d'un connecteur par rapport à un autre car il influence le niveau de l'action composite et donc la valeur de γ. Le paramètre γ est appelé le coefficient de glissement.
La valeur du module de glissement est donc propre à chaque connecteur et est évaluée par un essai de cisaillement. Cet essai permet aussi de connaître la résistance au cisaillement Fvr,k [N] du connecteur qui correspond à la charge de rupture du connecteur.

3.2. La méthode γ

Origine de la méthode

La méthode gamma est décrite dans l'annexe B de l'Eurocode 5 [10]. Elle a pour but de calculer les caractéristiques mécaniques d'une section composite jointe mécaniquement. Elle est donc adaptée à des connecteurs mécaniques.

La liaison mécanique, qui se déforme et qui est soumise à du cisaillement, a une influence sur les contraintes et les déformations de la section (figure 5). La relation est posée entre la rigidité k [N/mm2] de la connexion, le déplacement relatif u [mm] des sections au droit des assemblages et l'effort rasant par unité de longueur ν [N/mm]. Avec k=K/s où s représente l'espacement entre les connecteurs. [11]

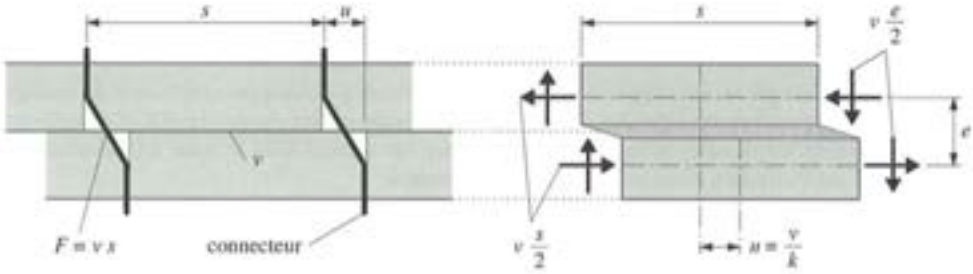


Figure 5 : Déplacement u *et effort de cisaillement v entre les éléments [11]*

Ensuite, l'équilibre d'une poutre connectée reprenant un chargement sinusoïdal est fait en étudiant l'équilibre d'un petit tronçon dx sur lequel agissent tous les efforts (figure 6). Les solutions de la méthode gamma résultent de l'intégration des équations différentielles relatives à l'équilibre de la poutre. Ces solutions permettent de calculer la rigidité flexionnelle de la section composite et de calculer les efforts qui agissent sur chacun des éléments. [11]

Validité de la méthode

C'est une méthode linéaire. Elle suppose que les matériaux bois, béton et acier aient un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Pour des structures portant des charges de faible intensité, faire l'hypothèse que tous les matériaux ont des comportements linéaires élastiques jusqu'à la rupture, et donc employer des méthodes linéaires élastiques telle que la méthode **γ,** va donner des résultats concluants. [1] [12]

En effet les résultats expérimentaux, provenant d'essais, concordent avec les résultats théoriques évalués via la méthode γ basée sur un modèle élastique

linéaire. Ceci est dû au fait que le système composite est souvent conçu pour que la rupture de la section se fasse avant que le béton ou les connecteurs n'atteignent la plasticité. La rupture apparaît alors dans le bois sous flexion et traction combinées. Or le bois possède un comportement linéaire élastique en flexion et en traction.

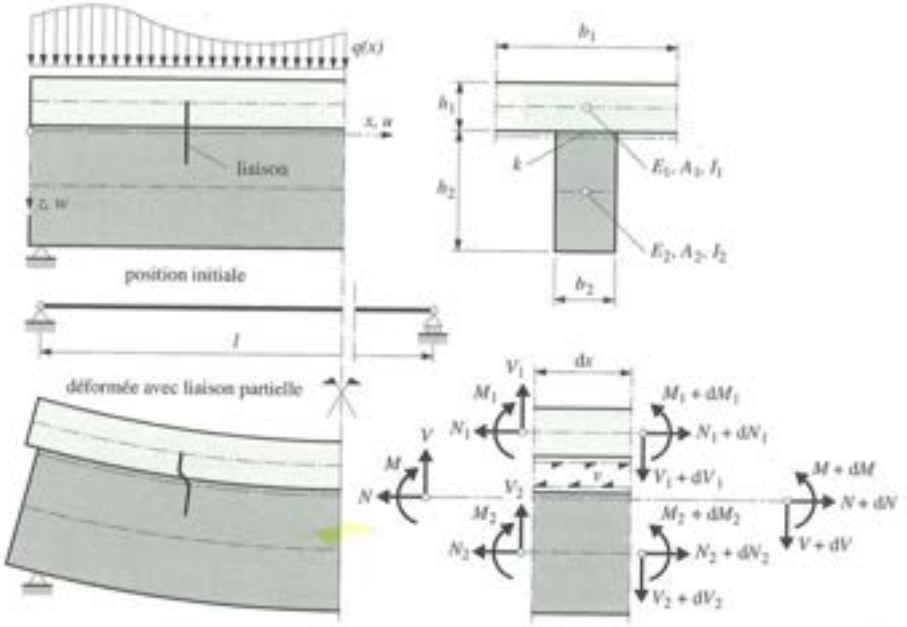


Figure 6 : Haut : Coupe et section d'une poutre connectée par une liaison mécanique et chargée d'une charge sinusoïdale[1] q(x).
Bas : Equilibre d'un élément de longueur infinitésimal dx appartenant à une poutre composite. [11]

Il a cependant été observé sur certains essais que, suivant la configuration de la poutre et suivant le comportement des connecteurs, la poutre composite pouvait montrer un comportement plastique causé par le fait que les connecteurs les plus sollicités[2] aient plastifié. Ce phénomène n'entrainait cependant jamais la rutpure de la poutre.

C'est sur des poutres en bois de classe de résistance élevée que ce phénomène a été observé. En effet si on utilise un bois de classe de résistance plus élevée, les efforts

[1] Le coefficient de glissement γ n'est constant que pour des charges réparties et sinusoïdales. Cette approximation constitue une des limites de la méthode. Elle est cependant acceptée car elle oriente le calcul vers la sécurité.

[2] Les connecteurs les plus sollicités se trouvent sur les extrémités de la poutre là ou l'effort tranchant est maximal.

repris par les connecteurs avant d'atteindre la ruine sont plus importants, ce qui peut potentiellement conduire à une plastification des connecteurs. Ceci n'est pas observé pour du bois de moindre résistance car la ruine y apparaît pour des charges plus faibles n'entrainant pas la plasitification de ceux-ci. [12]

Le modèle linéaire est valable pour des planchers ou des dalles de toit car ceux-ci portent des charges de faible intensité qui sont réparties sur leur surface. [1] Il sera néanmoins moins représentatif de la réalité si le bois utilisé appartient à une classe de résistance très haute. [12]

Résultat de la méthode : rigidité flexionnelle effective et contraintes dans les éléments

L'indice 1 représente l'élément en béton et l'indice 2 représente l'élément en bois.

Pour prendre en compte l'action composite, la méthode gamma consiste en l'utilisation d'une rigidité flexionnelle effective (EI)ef qui est fonction du coefficient de glissement γ (correspond au degré de l'action composite), compris entre 0 et 1, lui même fonction de la rigidité du connecteur K. Si bien que γ=0 correspond à une action composite nulle et γ=1 correspond à une action composite complète.

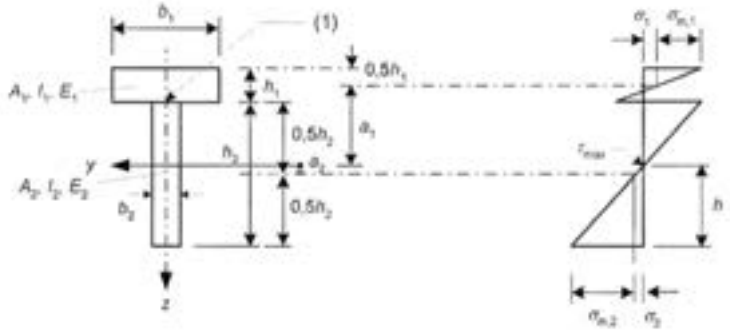


Figure 7 : Définition des éléments de la section, de leur dimension et des contraintes s'y rapportant [10].[3]

La rigidité flexionnelle effective de la section composite est évaluée telle que:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^{2} (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

[3] Veuillez noter que l'axe neutre y ne passe pas par le centre de la solive. En effet, le terme a2 n'est pas nul mais minimisé sur ce schéma pour mettre en évidence que les proportions d'une section mixte auront tendance à indure que l'axe neutre de la section mixte sera très proche de celui de la solive

L'élément en bois est considéré comme la référence par rapport à laquelle est calculé le glissement si bien que γ_2 est toujours égal à 1. Le paramètre γ_1, relatif au béton, est calculé comme suit :

$$\gamma_1 = \left[1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 s}{K_1 L^2}\right]^{-1}$$

Le paramètre s [mm] étant l'espacement entre les connecteurs le long de la solive de bois.

Enfin, la méthode permet de calculer directement les contraintes et efforts dans les éléments.

Les contraintes normales dans le bois et le béton :

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M_{Ed}}{(EI)_{ef}})$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0{,}5 E_i h_i M_{Ed}}{(EI)_{ef}})$$

La contrainte tangentielle dans la membrure en bois :

$$\tau_{2,max} = \frac{0{,}5 E_2 h_2^2}{(EI)_{ef}} V_{Ed}$$

L'effort de cisaillement agissant sur un connecteur:

$$F = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s}{(EI)_{ef}} V_{Ed}[N]$$

NB : Les formules exposées proviennent de l'annexe B de l'Eurocode 5 [10].

4. Dimensionnement de la section composite

Le dimensionnement doit se faire pour plusieurs cas de figures :

- Une phase provisoire et une phase définitive
- Une situation à court terme et à long terme

Le béton, pendant sa prise, constitue un poids mort, que le bois et le panneau de coffrage s'il y en a un, doivent pouvoir reprendre. Il faut également prendre en compte le poids des hommes qui travaillent. Cela constitue la phase provisoire dont le schéma statique ne sera pas forcement similaire à celui de la phase définitive si des étais sont présents pendant cette phase. Les étais vont permettre de diminuer la flèche des solives en bois lors du bétonnage.

La phase définitive comprend la résistance de la pleine section qui doit reprendre toutes les charges permanentes et les charges variables.

Les vérifications devront également se faire sur le court terme et le long terme. Les vérifications à long terme ont pour but de prendre en compte les comportements des matériaux qui évoluent avec le temps (retrait, fluage).

Généralement le béton est liaisonné au bois alors qu'il est encore frais. Or la plus grande partie du retrait se produit pendant sa prise. Des contraintes se manifestent à cause de la différence de retrait entre les deux matériaux. En effet, le bois, lui, ne subit pas de retrait[4]. La déformation du béton n'étant pas libre, cela crée des contraintes supplémentaires dans la structure mixte.

Le fluage, quant à lui, est un phénomène que connaissent le bois, le béton et les connecteurs mécaniques quand ils sont soumis à des charges de longue durée. Le fluage induit une diminution des performances qu'on traduit par une réduction du module d'élasticité pour le bois et le béton, et par une réduction du module de glissement pour les connecteurs. De ces diminutions va apparaître un réarrangement de la section composite (nouvelle valeur de γ, nouveau centre de gravité de la section,..). Ce nouvel état de la section doit donc lui aussi être vérifié.

Les figures 8 et 9 reprennent les différentes vérifications à effectuer pour dimensionner la section.

[4] Le bois a un coefficient spécifique de gonflement et de retrait très faible dans le sens longitudinal et ce sens est également le sens porteur du plancher mixte.

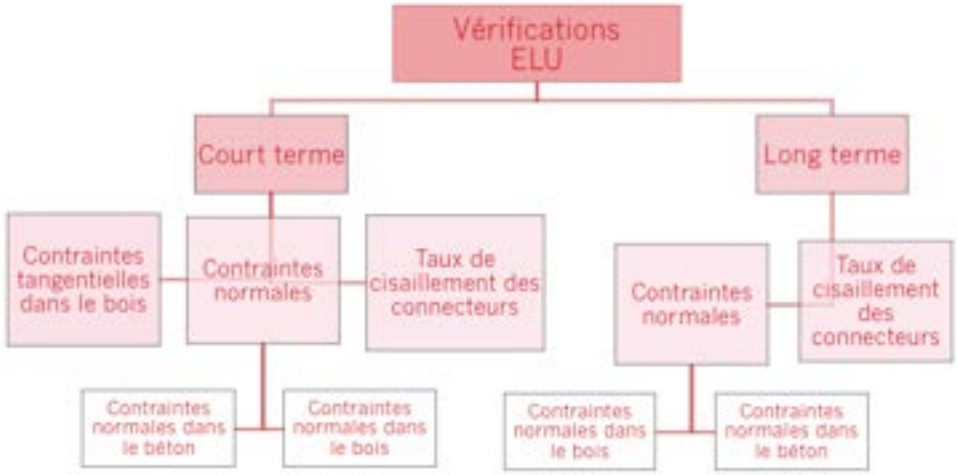


Figure 8 : Schéma de dimensionnement aux ELU

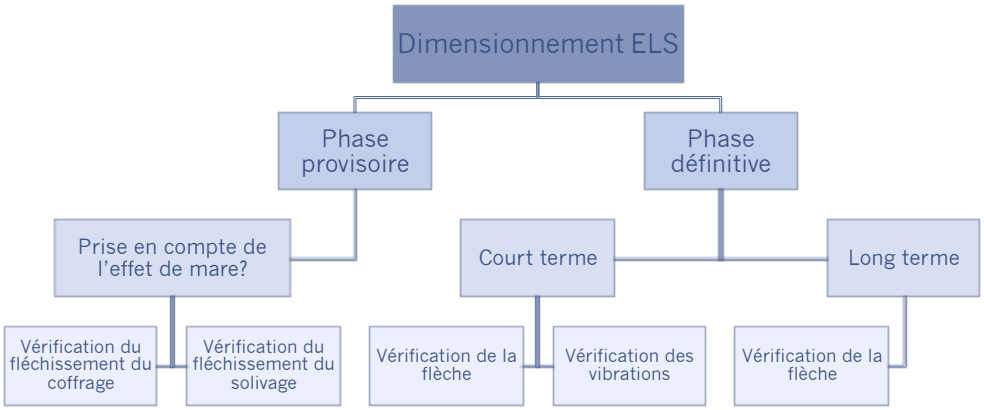


Figure 9 : Schéma de dimensionnement aux ELS

5. Influence des paramètres sur la rigidité flexionnelle effective (EI)ef

L'étude consiste à déterminer quels paramètres ont le plus d'impact sur la valeur de la rigidité flexionnelle de la section composite. En effet, celle-ci intervient dans toutes les vérifications à l'ELS et à l'ELU, où sa valeur a lieu d'être maximisée. Cette étude se concentre sur deux connecteurs relativement différents : les vis de la marque SFS et les plaques métalliques de la marque HBV.

Il a été choisi de travailler avec les vis SFS (figure 3 haut) car le produit est bien implanté sur le marché. Le connecteur plaque métallique HBV (figure 3 bas) quant à lui a été choisi car il se démarque des autres connecteurs par son mode de pose et par son caractère surfacique. Mais aussi parce que c'est le connecteur qui possède le plus haut module de rigidité K.

L'influence des paramètres sur la variation de (EI)ef d'une section connectée avec les vis SFS est d'abord analysée (figure 10).

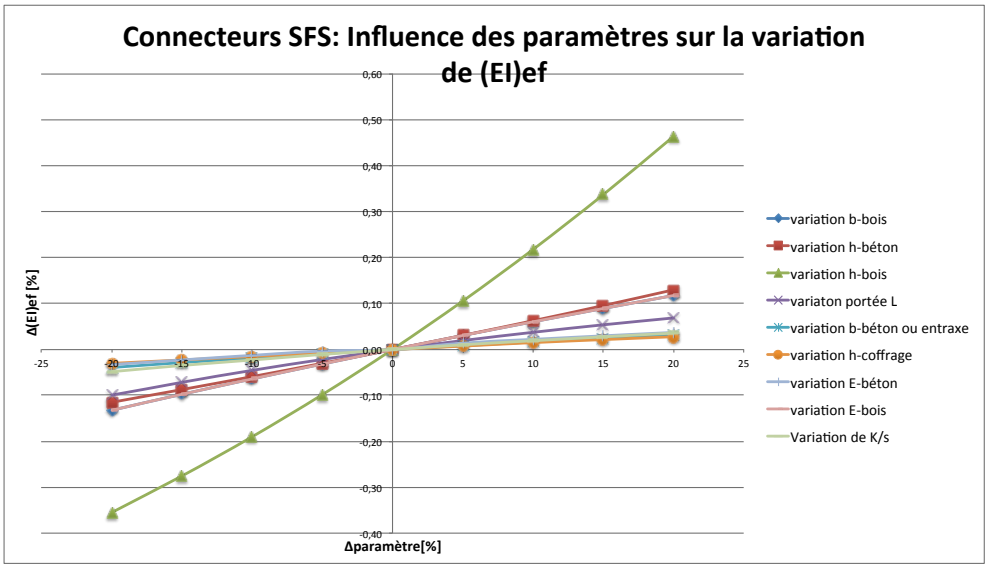


Figure 10 : Influence des paramètres sur la variation de (EI)ef d'une section connectée avec les connecteurs vis SFS. Résultats obtenus sur base de la méthode γ.

Le paramètre le plus influent est la hauteur de la solive en bois. En effet, la hauteur de bois joue un grand rôle dans l'inertie de la section composite. De même que l'épaisseur de béton qui montre une influence plus faible mais qui reste malgré tout un des paramètres les plus influents.

Les paramètres suivants qui influencent le plus la rigidité de la section sont : la largeur de la solive et le type de bois utilisé. De nouveau ce sont les éléments de bois qui prennent le pas sur le béton. Cela est dû au fait que la partie de bois qui travaille est beaucoup plus présente sur la hauteur de la section.

L'entraxe, et donc la largeur de béton, et la portée de la poutre ne jouent pas un rôle prépondérant.

En dernier lieu, on retrouve les paramètres de l'épaisseur de coffrage, de rigidité de la connexion et de type de béton. La rigidité de la connexion k=K/s [N/mm^2] (avec pour rappel K : le module de glissement et s : l'espacement entre les connecteurs) se trouve donc dans le bas du classement.

L'augmentation de l'épaisseur de coffrage a un impact néfaste sur la rigidité de la connexion car il réduit la longueur de connecteur se trouvant dans la solive en bois et donc le transfert de l'effort tranchant.

Si la même étude est effectuée avec le connecteur plaque métallique HBV cette fois, les mêmes constations sont observées. A une différence près qu'il est constaté que la rigidité de la connexion (k=K/s) a encore moins d'impact sur la valeur de (EI)ef comme illustré à la figure 11.

Avec l'augmentation de k et donc du niveau d'action composite, la rigidité flexionnelle (EI)ef de la section mixte augmente également. Il a toutefois été démontré via des expérimentations que la rigidité flexionnelle (EI)ef atteint un seuil maximal même si k continue d'augmenter. [1]

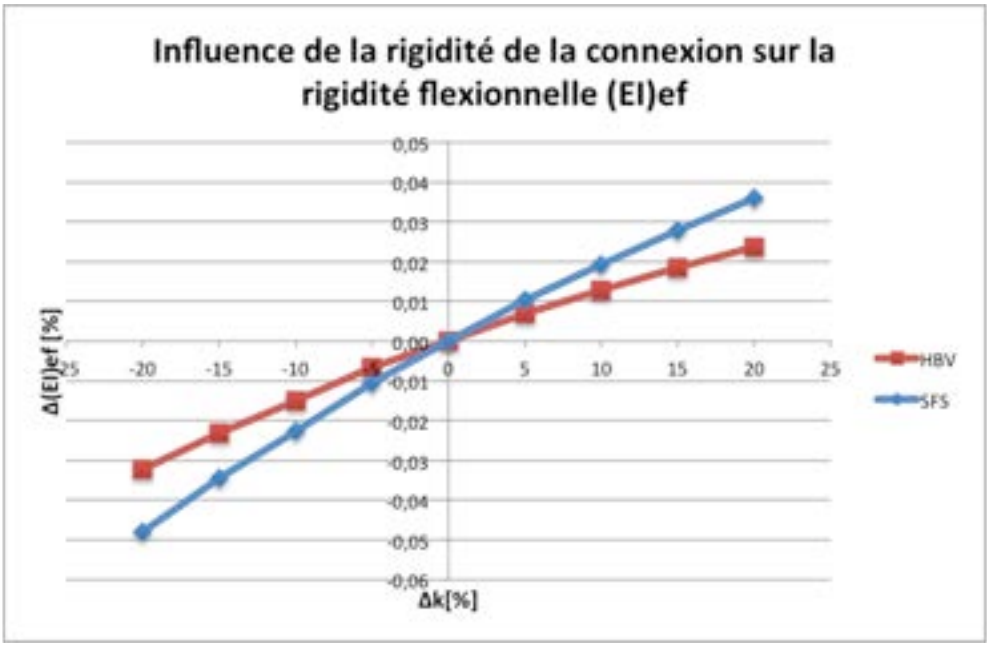


Figure 11 : Comparaison entre l'évolution de l'influence de la rigidité de la connexion SFS face à la rigidité de la connexion HBV

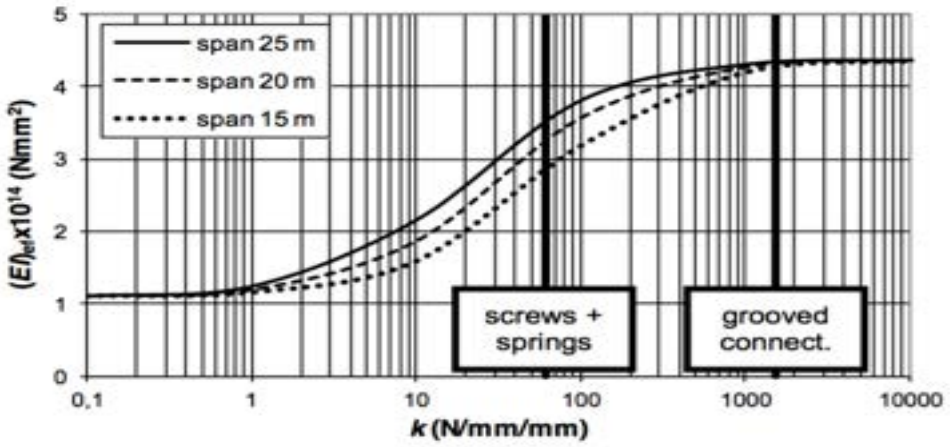


Figure 12 : Relation entre la rigidité flexionnelle de la section mixte et la rigidité de la connexion k=K/s (N/mm²) [1]

Plus la rigidité de la connexion k est élevée, plus cette valeur se trouve sur une partie de la courbe qui croit moins vite. Ce qui veut dire que la rigidité de connexion la plus faible utilisée dans cette étude paramétrique (relative au connecteur vis), assure déjà une action composite suffisante.

Attention de ne pas confondre le fait d'assurer une action composite (relatif à K) et le fait de reprendre un effort de cisaillement (relatif à $F_{v,rk}$). La quantité de connecteurs assurant l'action composite, ne sera pas forcement égale à la quantité de connecteurs nécessaire pour reprendre le cisaillement à l'interface des deux matériaux.

En pratique, c'est d'ailleurs la reprise du cisaillement qui conditionne l'espacement à prévoir entre les connecteurs et donc le nombre de connecteurs à placer sur la solive en bois. Il peut dès lors être conclu que, (sans prendre en compte les aspects pratiques de mise en œuvre) le choix d'un connecteur pourrait se faire d'abord sur sa capacité à reprendre le cisaillement et donc sur sa résistance Fv,rk , et puis sur la valeur de son module de rigidité K, de façon à diminuer le nombre de connecteurs à placer.

On peut également conclure que pour optimiser l'utilisation des matériaux associés, c'est-à-dire faire en sorte que la ruine y soit le plus possible simultanée, il est préférable de privilégier une classe de résistance élevée dans le choix du bois, là où une classe de résistance faible est suffisante pour le béton.

6. Performances du plancher mixte

Les portées atteignables par le système mixte bois-béton sont de l'ordre de 9-11 m pour des utilisations de bâtiments de type habitation et bureau. Lorsque les charges d'exploitation augmentent, comme pour des commerces ou des bâtiments industriels, les portées sont limitées à 8-9 m. L'utilisation du plancher mixte ne se fait pas en-dessous de 5 m. En pratique le bois massif est utilisé pour des portées allant de 5 à 7 m. Au-delà, du lamellé-collé est utilisé.

Les hauteurs du complexe d'un plancher mixte sont de l'ordre de 25 à 45 cm. La densité de connecteurs sera spécifique au projet et au type de connecteurs utilisés.

Au niveau des performances vibratoires, le plancher mixte montre des performances bien meilleures que les planchers en bois. La raison en est que le plancher mixte travaille comme une structure quasi-isotrope et a donc une bonne rigidité dans le sens transversal et longitudinal. Il a également une fréquence de résonance et une masse accrues, ce qui améliore son caractère vibratoire. Atteindre les performances requises en matière de vibration ne constitue donc pas un enjeu pour le plancher mixte. [9]

Pour ce qui concerne ses performances acoustiques, La couche de béton améliore assez bien l'isolation aux bruits aériens de la paroi et va permettre d'atteindre les performances les moins exigeantes des normes : les performances au sein d'une habitation et certaines performances dans les bureaux. Selon son épaisseur, la couche de béton va permettre d'augmenter l'isolation aux bruits aériens de 17 à 29 dB. Le niveau de bruit de choc est également amélioré, mais pas de manière significative. L'amélioration que permet la couche de béton se situe entre 4 et 7 dB. Cette amélioration ne permet pas d'atteindre les performances même les plus faibles des normes.

Lorsqu'on analyse le comportement du plancher mixte au feu, il faudra considérer que, dans tous les cas, le feu attaque le plancher par le bas. En effet, c'est cette situation qui est la plus critique, car ce sont les solives qui sont attaquées en premier. [9]

Au niveau de la résistance au feu, on peut considérer que la couche de béton, selon son épaisseur, sera suffisante pour satisfaire les exigences EI du plancher. Cette couche constitue dans tous les cas une bonne fonction de compartimentage. Le plancher mixte atteindra facilement EI30 à EI60.

Le critère R, par contre, nécessite d'être plus profondément évalué selon chaque cas.

Deux options sont envisageables :

- Considérer le plancher comme déconnecté. Seules les solives résistent aux charges accidentelles pour la durée fixée.
- Considérer que le plancher est connecté mais par des connecteurs qui montrent des performances diminuées. Tout le plancher résiste aux charges accidentelles. Cette deuxième option nécessite de travailler avec des sections larges.

On peut finalement considérer que les résistances REI30 et REI60 sont facilement atteignables par le plancher mixte. La résistance REI90 sera plus difficile à atteindre. [9]

7. Domaine d'application

Il apparaît comme une évidence que la technique du plancher mixte trouve sa meilleure place dans la rénovation des planchers en bois, quand un plancher existant montre des faiblesses ou que le changement d'usage du bâtiment nécessite un renforcement de celui-ci.

- Cette technique permet une intervention rapide puisque la surface de travail est déjà construite.
- Elle permet aussi de ne pas amener un trop grand poids sur les fondations qui devront supporter la surcharge.
- La surépaisseur amenée par la dalle de béton n'est pas pénalisante puisque les anciennes constructions sont réalisées avec de grandes hauteurs sous plafond.
- Le coût de l'intervention est raisonnable.

La place du plancher mixte en construction neuve reste plus floue.

Il est clair que le choix du plancher mixte ne se fera qu'à partir de portées de l'ordre de 5 m. En-dessous, les planchers moins chers ou plus légers feront l'affaire. Pour cela, il rencontre un usage certain dans le secteur tertiaire pour la construction d'écoles, de bureaux et de commerces.

Ses aptitudes acoustiques et au feu dans son état brut lui vouent également un usage des plus intéressant en habitation, si toutefois la portée dépasse 5 m, ce qui est moins courant.

Il apparaît que le plancher mixte est une bonne alternative aux panneaux CLT en construction légère et pour de grandes portées grâce à son coût plus intéressant.

Le plancher mixte trouve particulièrement sa place en construction neuve légère en zone sismique. Le plancher a toujours un poids raisonnable. De plus, un effet diaphragme est apporté par la dalle en béton moyennant des dispositions spécifiques (chaînage, ferraillage, etc.). Il sera également intéressant lorsqu'une exigence vibratoire est demandée.

Les fabricants de planchers mixtes ont été contactés pour évaluer le coût de mise en œuvre de cette technique. Il s'est avéré que son coût pouvait s'estimer en moyenne à 120€/m^2 en construction neuve et à 60€/m^2 en rénovation.

Les fabricants maintiennent que si auparavant leurs techniques étaient principalement utilisées en rénovation, la tendance pousse de plus en plus celle-ci en construction neuve. Cela prouve que ceux-ci ont leur place sur le marché.

8. Conclusion

Ce travail visait à approfondir le sujet concernant les planchers mixtes en bois et béton. Etant donné que cette technologie n'est pas encore couramment utilisée, des questions subsistaient quant à la manière de dimensionner ces planchers et quant à leur valeur ajoutée.

Le travail a commencé par un tour d'horizon des différents produits de connexion présents sur le marché. Il a permis de constater l'essor de cette technique à travers les nombreux produits proposés.

La recherche d'une méthode de calcul a été entreprise et a permis de définir la méthode gamma comme base de dimensionnement. La méthode gamma est une méthode qui considère que tous les matériaux ont un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Elle permet de trouver les efforts que reprend chacun des matériaux et de trouver la rigidité flexionnelle de la section composite.

Ces résultats ont ensuite permis de proposer un schéma de dimensionnement de la section composite.

Une étude paramétrique permettant de mettre en évidence le comportement de la section a été réalisée. Il en est ressorti plusieurs choses :

- Les paramètres influençant le plus les performances résistance de la section. Parmi ceux-ci, on retrouve : les dimensions de la solive, la classe de résistance du bois et la hauteur de béton.
- La rigidité de la connexion ne fait pas partie des paramètres les plus influents. En effet, une connexion « minimale » permet déjà de faire travailler les matériaux ensemble et d'allouer une bonne rigidité effective à la section mixte.
- Le paramètre crucial dans le choix d'un connecteur est donc sa capacité à reprendre le cisaillement à l'interface du bois et du béton. Celle-ci va conditionner l'espacement à prévoir entre les connecteurs.

L'impact de la dalle de béton sur les performances vibratoires, acoustiques et au feu du plancher en bois a été évalué. Il apparaît que :

- Les performances vibratoires sont fortement améliorées et sont capables de satisfaire un niveau élevé d'exigences des usagers là où un plancher bois montre généralement des difficultés à y parvenir.
- L'isolation aux bruits aériens est fortement améliorée par la dalle. Le niveau de bruits de chocs est cependant faiblement diminué par sa présence.
- La dalle confère au plancher mixte une bonne isolation et une bonne étanchéité au feu. La résistance au feu n'est quant à elle pas améliorée par sa présence. Les performances au feu du plancher sans revêtement particulier peuvent atteindre REI30 et REI60.

Enfin il a été tenté de déterminer si les planchers mixtes ont une place à prendre sur le marché. L'utilisation préférentielle du système mixte en renforcement de planchers existants en bois apparaît comme une évidence.

En construction neuve, le domaine d'utilisation qui s'accorde le mieux à la technique est moins évident à entrevoir. Cela est dû au fait que le plancher montre des performances moyennes dans tous les aspects sans que l'un d'entre eux ne se distingue. Il a tout de même été établi que :

- Le plancher mixte sera utilisé pour des portées supérieures à 5 m. Les portées pouvant être atteinte vont jusqu'à environ 11 m. En pratique, le bois massif est utilisé pour des portées de 5-8 m et le bois lamellé-collé pour des portées de 8-10m.
- L'utilisation du plancher dans le domaine du tertiaire semble donc adéquate.
- L'utilisation des planchers mixtes sera intéressante lorsqu'un poids léger est recherché. Un bâtiment fondé sur un sol de mauvaise portance peut donc bénéficier de cette technique.

- Même s'il est un peu plus lourd qu'un plancher CLT, son coût plus attrayant peut le substituer à cette technique sur les bâtiments en construction légère.

La technique du plancher mixte réservée à la rénovation pendant un temps, tend aujourd'hui à gagner du terrain sur la construction neuve. La construction mixte joignant une dalle en CLT à une dalle en béton commence également à se profiler, des agréments techniques verront donc le jour dans un avenir proche. Les planchers mixtes ont donc une place à prendre au sein des planchers classiquement utilisés dans la construction.

9. Sources

[1] RODRIGES ET AL. (2013). *Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review*. BioResources. Disponible sur: <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_4_6630_Review_Rodrigues_Timber_Concrete_Composite_Bridge/2443>. (Consulté en Janvier 2017)

[2] Société SFS intec. *Système mixte bois-béton VB*. (Mise à jour le 20 mai 2014). Disponible sur : < http://www.sfsintec.biz/mo/fr/fr/web/industrial_solutions/batiment_1/construction_bois/syst_me_mixte_bois_b_teon_vb_1/systeme_mixte_bois_beton_vb_1.htm l>. (Consulté en Décembre 2016)

[3] SFS intec. (8 avril 2011). *Système mixte bois-béton VB : Document technique*. SFS intec. Disponible sur : < https://sfs.biz/sfs_download/media/fr/general_media/downloadcenter/sfs_unimarket_1/befestigungstechnik/konstruktiver_holzbau/vb_technische_dokumentation.pdf> (Consulté en Février 2017)

[4] SFS intec.(26 mai 2016). *Système mixte bois-béton VB : Une solution simple, économique et sûre pour la construction et la rénovation rationnelles de plancher.* SFS intec. Disponible sur : < https://sfs.biz/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_fr/syst_me_de_fixations_pour_la_construction_bois/vb_1/Brochure_VB_A4.pdf> (Consulté en Janvier 2017)

[5] CBS-CBT. *Systèmes structurels CBS-CBT*. (Mise à jour le 19 janvier 2015). Disponible sur : < http://www.cbs-cbt.com/fr/structure/systemes-structurels-4-9-0> (Consulté en Décembre 2016)

[6] Bois Béton. *SBB système Bois-Béton.* (Mise à jour le 7 février 2014). Disponible sur:< http://www.bois-beton.fr> (Consulté en Décembre 2016)

[7] BAHMER R. ET HOCK S. *Wood-concrete (HBV) : Comparision of current connectors*. Hailbach : Igngenieurbüro Rainer Bahmer, 2005.

[8] Société TECNARIA SpA. *Tecnaria : systèmes de connexion pour le renforcement des planchers*. (Mise à jour le 22/09/2016). Disponible sur: < https://tecnaria.com/fr/>. (Consulté en Décembre 2016)

[9] SKOWRON A., MARTIN Y., PARMENTIER B. ET VAN DEN BOSSCHE P. *Comportement physique et mécanique des planchers mixtes en bois-béton.* Rapport n°13. CSTC, 2010,41 p.

[10] European Committee for Standardization. *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1 : general rules and rules for buildings*. EN 1995-1-1:2004+A1 2008 (E). 2004,121p.

[11] NATTERER J., SANDOZ J.L. ET REY M. (2014).. *Construction en bois : Matériau, technologie et dimensionnement,* Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. (Volume 13).Presses polytechniques et universitaires romandes (CH), Lausanne.

[12] VAN DER LINDEN M. *Timber-concrete composite beams*. Delft University of Technology / TNO Building & Construction Research. HERON. Vol. 44. No.3, 1999. (ISSN0046-7316).

Scénarios futurs pour des bâtiments basse consommation dans les Alpes suisses : consommation et production énergétiques

Ing. L. DACOS
Dr J. KAEMPF
GRAMME – Liège

L'objet de cet article est de simuler énergétiquement les bâtiments de l'éco-quartier REKA situé à Blatten Belalp, de calibrer le modèle créé avec les données réelles collectées et d'imaginer des scénarios de rénovation en vue de réduire les besoins de chauffage. Ces scénarios permettront de trouver des pistes d'amélioration énergétique et serviront au développement d'un outil d'optimisation des systèmes énergétiques.

Une vidéo explicative, montrant l'utilisation de CitySim ainsi que le site étudié est disponible au lien suivant : https://youtu.be/0Pp9XxuQHPg (consulté en mars 2018).

Mots-clefs : simulation énergétique bâtiments, simulation thermique dynamique, CitySim, modélisation thermique 3D, piste d'amélioration énergétique.

The purpose of this article is to simulate a building energy model of the REKA Blatten eco-district, to calibrate this model with real collected data and to create renovation scenarios in order to reduce the heating needs. These scenarios will help to identify ways of energy improvement and will be used to develop a tool optimizing energy systems.

An explanatory video, showing the use of CitySim and the studied site is available at the following link: https://youtu.be/0Pp9XxuQHPg (accessed March 2018).

Keywords: buildings energy simulation, thermal dynamical simulation, urban energy simulation software, CitySim, thermal 3D model, future energy scenarios.

1. Introduction

Le projet OSCARS (Optimized energy network based Solutions CompAred to Retrofitting Scenarios) est un projet de l'OFEN (Office fédéral de l'énergie suisse). Il regroupe trois entreprises : KAEMCO, le CREM (Centre de Recherches Energétiques et Municipales de Martigny) ainsi qu'ELIMES.

Les ingénieurs d'ELIMES, spécialisés dans les réseaux de chauffage à distance, sont à la base de ce projet puisqu'ils constataient qu'entre leurs simulations des besoins énergétiques et la réalité, il y avait une marge d'erreur trop importante. D'autre part, ELIMES se sert de son expérience pour déterminer une installation, cependant ses ingénieurs n'excluent pas qu'en fonctionnant de façon manuelle (sans outil d'optimisation), certaines solutions, plus performantes énergétiquement et économiquement aient été omises.

Le CREM développe un outil d'optimisation de systèmes énergétiques et est à la recherche d'un quartier réel pour le mettre en application. Cet outil permettra à ELIMES d'atteindre ses objectifs. Pour son fonctionnement, cet outil a besoin d'un grand nombre de scénarios de simulation énergétique, faisant varier l'isolation, le type de vitrage, etc.

L'entreprise KAEMCO développe le logiciel de simulation énergétique à l'échelle urbaine CitySim. CitySim est un logiciel de simulation énergétique dynamique qui a pour avantage de prendre en compte les interactions entre bâtiments (ombres, réflexions) et d'utiliser des données climatiques réelles. KAEMCO participe doublement à la dynamique du projet puisque d'une part, la simulation réalisée par CitySim sera plus proche de la réalité que celles utilisées par ELIMES. D'autre part, grâce à la simulation, des scénarios de rénovation énergétique vont être réalisés et fournis au CREM. Ceux-ci seront nécessaires pour le fonctionnement de son outil d'optimisation.

1.1. Site étudié

Il s'agit du village de vacances REKA situé à Blatten Belalp dans les Alpes suisses. C'est un village qui fonctionne avec 80% d'énergies renouvelables et pour lequel ELIMES a collecté des mesures.

Il est composé de 9 bâtiments (7 habitations, 1 piscine et 1 restaurant). L'entreprise REKA possède beaucoup de villages de vacances en Suisse, mais le village de Blatten est le premier à s'intéresser à l'écologie. Ce sera donc intéressant

pour eux d'avoir un feedback sur des pistes d'améliorations, en vue d'éventuellement construire d'autres villages.

Pour l'étude de ce site, nous avons en notre possession :

- les plans d'architecture,
- le justificatif thermique SIA [1], qui est un document obligatoire en Suisse avant toutes rénovations et nouvelles constructions, il renseigne de manière générale sur les performances énergétiques d'un bâtiment (l'équivalent du PEB en Belgique),
- des mesures réelles réalisées par l'entreprise ELIMES, telles que les besoins de chauffage de chaque bâtiment.

2. Modèle 3D

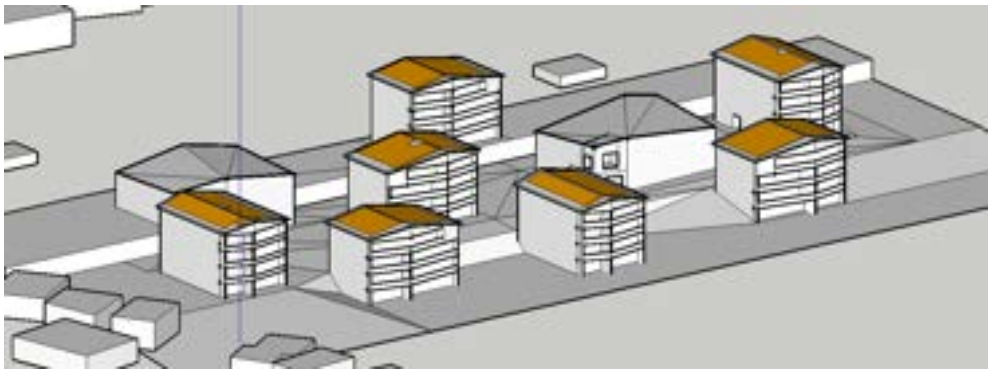


Figure 1: Modèle 3D SketchUp - "plan_final_orienté.skp"

Le modèle 3D est réalisé à l'aide du logiciel SketchUp [2]. Il s'agit d'un modèle simplifié, adapté à l'utilisation de CitySim. Sur la figure 1 sont représentés :

- uniquement l'enveloppe extérieure des bâtiments,
- les éléments extérieurs créant des ombrages tels que les balcons, les dépassants de toit, les autres habitations. La présence d'ombres sur le bâtiment a un impact thermique,
- les dénivelés du sol ainsi que la position spatiale de la scène (altitude, orientation). La représentation du sol permet par la suite de définir la nature du sol. Par exemple : un sol en herbe verte ou une dalle en béton n'ont pas la même réflexion. L'orientation et l'altitude ont un fort impact sur l'intensité des rayons du soleil.

3. Importation du modèle 3D dans CitySim

Il est possible, grâce à un script Ruby, de convertir le modèle SketchUp en un document « .dxf » qui est alors ouvrable avec CitySim. Après importation, nous pourrons affecter à chaque élément surfacique du modèle 3D des paramètres tels que :

- le type de matériaux et isolants,
- le pourcentage de vitrage par élément surfacique,
- la réflectance,
- le pourcentage de panneaux solaires par élément surfacique.

Nous entrons également des paramètres propres à chaque bâtiment :

- l'infiltration d'air au travers de l'enveloppe,
- les températures de consigne du chauffage,
- le volume chauffé,
- le profil d'occupation et le nombre d'occupants,
- les ponts thermiques,
- les données climatiques horaires d'une station météorologique proche du site (commune pour chaque bâtiment dans notre cas).

4. Calibration avec le justificatif thermique

Le but de cette calibration est de valider le comportement global du modèle créé. Ceci est réalisable puisque le justificatif thermique propose une valeur de demande en chaud mensuelle. Toutefois, afin de comparer des choses équivalentes, toutes les données utilisées dans la simulation CitySim du modèle proviennent du justificatif thermique. Nous allons par conséquent utiliser le/les même(s) :

- données météorologiques,
- taux d'infiltration,
- matériaux,
- ponts thermiques,
- températures de consignes du chauffage,
- données d'occupation,
- consommations électriques des appareils,
- surfaces de référence énergétique.

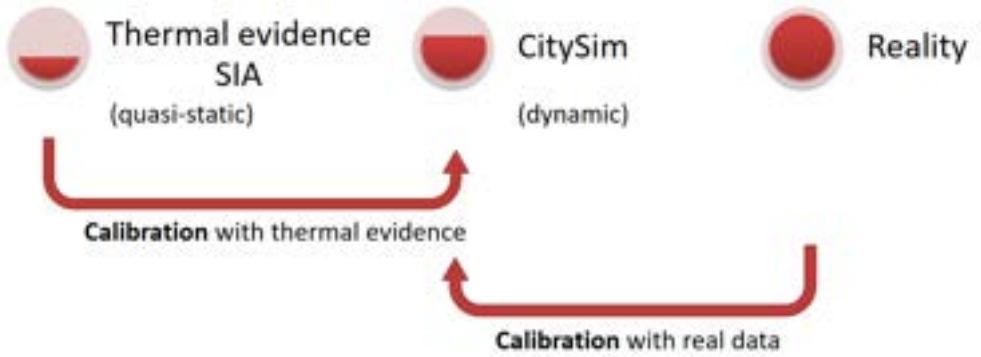


Figure 2: Calibration du modèle CitySim

5. Calibration avec les données réelles

Une fois les éventuelles erreurs de modélisation détectées et donc le comportement global du modèle validé, la seconde calibration se fait par rapport aux données réelles collectées sur site.

Pour ce faire, en repartant du même modèle (utilisant les hypothèses du justificatif thermique), nous allons raffiner ce modèle en utilisant cette fois des données réelles explicitées ci-après. Cette calibration a pour but de se rapprocher le plus possible de la réalité.

5.1. Raffinement à partir des plans

En partant des plans d'architecte, il est possible de déterminer le volume chauffé réel des bâtiments. Jusqu'à présent, le volume chauffé était égal au volume total de l'enveloppe. Ce choix entraîne une nette augmentation des besoins. Pour calculer le volume réel, on soustrait au volume total les volumes non-chauffés tels que les volumes de mur et de cage d'escalier.

Grâce aux plans d'architecte ainsi qu'aux fiches techniques, on peut également calculer la fraction des vitres et portes qui sont ouvrables. Celle-ci a un impact sur le renouvellement de l'air à l'intérieur des bâtiments. En effet, dans CitySim, il est défini qu'une fois la température de consigne dépassée, les éléments ouvrables (fenêtres, oscillo-battants, etc.) sont en position ouverte.

5.2. Données de réservation

Pour rappel, le quartier étudié est un village de vacances en activité. Nous allons donc nous servir des données de réservation pour connaître le nombre de personnes présentes en moyenne. Cela permet d'estimer les gains internes liés à la présence de ces personnes.

Dans CitySim, le seul moyen d'introduire des gains internes - qu'ils soient liés aux occupants ou aux appareils électriques - est de fonctionner avec des profils d'occupation et un nombre maximum de personnes.

Pour les occupants : nous prenons les profils d'occupation définis par la norme SIA [1]. Dans le cas de la figure 3, il s'agit d'un profil de type habitation. Nous multiplions ce profil (en pourcents) par le nombre moyen d'habitants présents par mois. Le profil obtenu est, par conséquent, différent chaque mois de l'année.

En ce qui concerne les appareils électriques, leur consommation électrique est convertie en équivalents-occupant. Dans ce cas-ci, selon le document SIA, l'apport de chaleur interne dus aux appareils électriques est de 70 [MJ/m²/an], ce qui nous donne :

$$70\ \left[\frac{\frac{MJ}{m^2}}{an}\right] * A_E * \left(\frac{1000}{3{,}6}\right) * \frac{1}{24*365} = 1769\ [Wh] \cong 20\ pers.emettant\ 90\ [Wh]$$

A_E étant la surface de référence énergétique.

Afin d'obtenir le profil d'occupation final, nous allons additionner ces deux courbes.

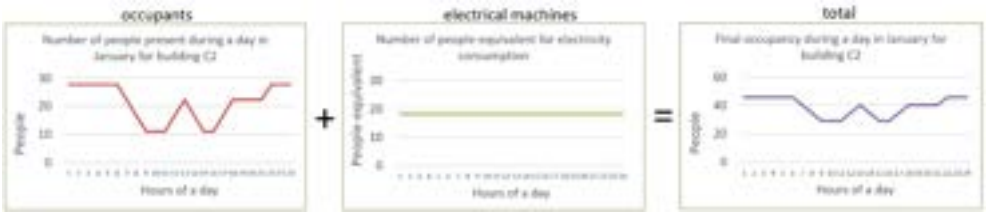


Figure 3: Profil d'occupation final

Limitation 1 :

Ces données de réservations ont également permis de mettre en évidence deux périodes de temps durant lesquelles il n'y a pas de réservation :

- du 08/04 au 30/04,

- du 22/10 au 24/12.

Selon ELIMES, il s'agit de périodes durant lesquelles le village et le système de chauffage sont au repos ou en maintenance. Ceci constitue la première limitation de ce projet, puisqu'il est impossible par la suite de calibrer le modèle durant ces périodes.

5.3. Réalisation du document horizon

Figure 4 : Ligne d'horizon autour du Blatten Belalp

Ce document a pour but de tenir compte de la position des montagnes tout autour du village de Blatten, car ces dernières sont susceptibles de créer de l'ombre sur le site étudié. Pour réaliser cette ligne d'horizon (voir fig. 4), nous utilisons le site SwissTopo [3] et son outil 3D, ce qui permet d'avoir des informations sur l'altitude et la position géographique de chaque point.

5.4. Informations à propos des mesures des besoins de chauffage

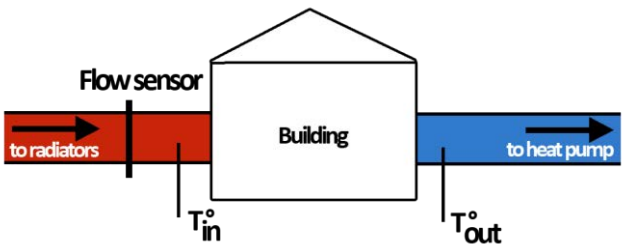


Figure 5 : Mesures des besoins de chauffage

Les données collectées sont des mesures de besoins de chauffage, puisqu'on mesure, à la sortie du système de chauffage, le débit d'eau chaude qui est envoyée aux radiateurs. Comme les températures d'entrée et de sortie sont connues, cela permet de déterminer la quantité de chaleur fournie aux bâtiments. Dans ce calcul, les pertes de charge de l'installation sont négligées.

Pour obtenir une mesure de la consommation de chauffage, nous aurions dû connaître le rendement de l'installation afin de pouvoir le comparer avec les besoins estimés par CitySim.

5.5. Comparaison des résultats

L'analyse des résultats se fait de trois manières différentes :

– Yearly heating needs :

Il est souhaité que les besoins de chauffage annuel entre CitySim et la réalité soient compris dans une marge de ± 10%. La valeur de 10% est une valeur moyenne constatée par les utilisateurs de CitySim.

$$\frac{Qh_{CitySim} - Qh_{Real}}{Qh_{Real}} < \pm 10\ \%$$

– Plot (x-y) (voir fig. 6):

Il faut qu'au niveau du plot (x-y) entre les besoins réels journaliers en abscisse et les besoins CitySim en ordonnée, la pente de la droite soit comprise entre 0,9 et 1,1 (±10%) et que le coefficient de détermination R^2, indicatif de la variabilité des mesures, soit supérieur à 0,8 (valeur constatée).

$$y = a * x + b \quad ; \quad a \in [0{,}9\ ;\ 1{,}1] \quad ; \quad R^2 > 0{,}8$$

Dans l'exemple (fig. 6), le bâtiment A1 respecte les limites fixées.

– Statistical graph :

Au niveau de la comparaison des besoins hebdomadaires, il faut qu'entre bâtiments de même type les graphiques aient une allure similaire. On voit que durant l'été, les besoins mesurés sont supérieurs aux besoins simulés par CitySim. Les deux trous de données correspondent aux périodes pour lesquelles le système de chauffage est en maintenance.

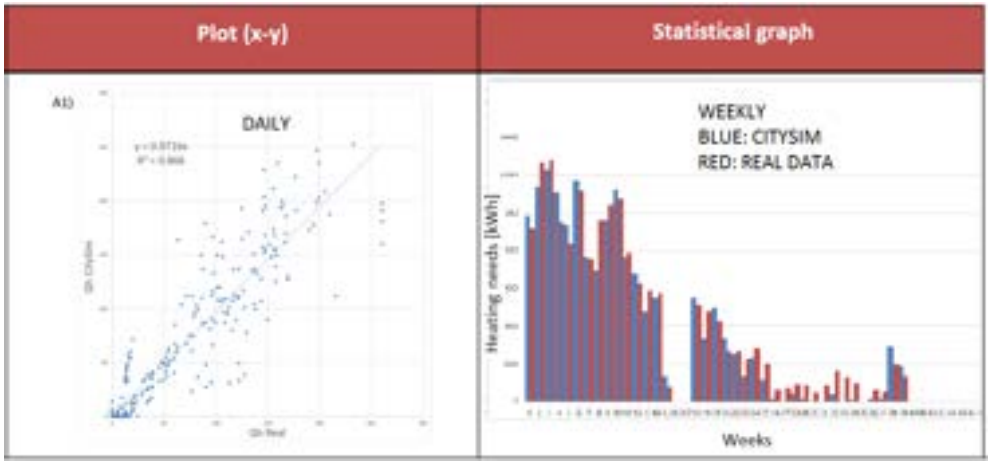


Figure 6 : Comparaison des résultats

Limitation 2 :

Dans le cas du village de Blatten, tous les bâtiments sont dans les tolérances à l'exception de 2 bâtiments : il s'agit de la piscine et du bâtiment A3.

- la piscine a un système de chauffage plus complexe du fait qu'il faut prendre en compte les échanges entre le bassin d'eau chaude et l'air, la récupération de chaleur au niveau de la ventilation et ces données ne sont pas disponibles,
- les résultats du bâtiment A3 sont surprenants car il est de géométrie semblable aux bâtiments A1 et A2 et sa situation est identique. Par conséquent, au niveau de la simulation CitySim les besoins sont approximativement identiques. Cependant, au niveau des mesures, on constate de fortes différences entre les bâtiments A3 et A2,
  Ceci signifie qu'il y aurait au niveau du bâtiment A3 un problème de type :

  - problème au niveau des mesures,
  - problème au niveau du système de chauffage,
  - problème au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Ces 2 bâtiments constituent la deuxième limite de ce projet. Les résultats pour ces bâtiments ne sont donc pas fiables.

Les 7 autres bâtiments sont calibrés en faisant varier le paramètre infiltration. Il s'agit d'un paramètre important et particulièrement difficile à déterminer puisqu'il n'y a pas eu de test d'infiltrométrie au niveau du quartier étudié.

Avant cette calibration, la valeur utilisée était la valeur estimée par le justificatif thermique qui est la même pour chaque bâtiment de même type. Cependant, étant donné que l'infiltration dépend des défauts de l'enveloppe, il est possible que l'infiltration soit légèrement différente d'un bâtiment à un autre. Nous ajustons alors la valeur de ce paramètre pour que les bâtiments collent encore plus à la réalité. Attention, afin de ne pas arriver à des résultats improbables, nous nous sommes fixé une limite de maximum $0.02\ h^{-1}$ de différence entre bâtiments de même type.

6. Scénarios énergétiques

Une fois la calibration réalisée, le premier objectif est atteint. On obtient un modèle calibré qui représente au mieux la réalité. Cela signifie qu'à partir de ce modèle, on peut créer d'autres modèles en y faisant varier des paramètres physiques et ainsi analyser au niveau des résultats l'impact énergétique de chaque variante.

Les paramètres physiques qui intéressent le CREM sont : le type de vitrage et, pour un type d'isolant fixé, l'épaisseur d'isolant. Nous allons faire varier ces deux paramètres selon 4 packs chacun (voir fig. 7).

Ensuite ces 16 scénarios (4*4) sont simulés selon trois années de données météorologiques différentes (2016 - 2030 - 2050). Le logiciel Meteonorm [4] fournit les prévisions météorologiques pour 2030 et 2050.

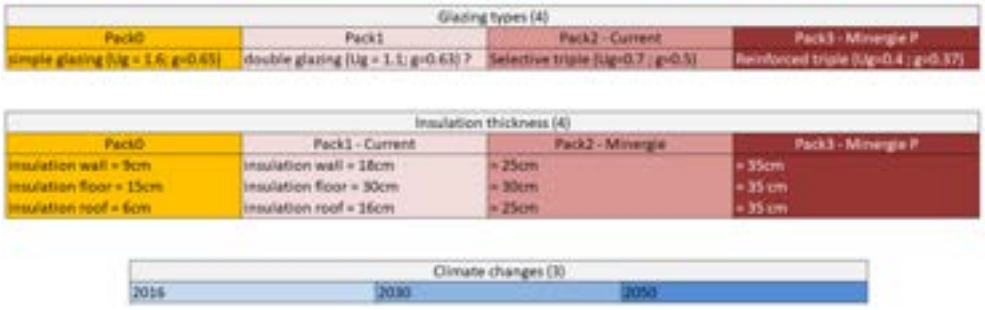


Figure 7 : Scénarios énergétiques

6.1. Différences entre 2016 et 2050 – degré-jour (20/12)

En 2050 selon la figure 8 ci-dessous :

- les hivers seront plus froids : + 20,4 [DJ] entre novembre et avril,
- les étés seront plus chauds : - 277,84 [DJ] entre mai et octobre.

Cela conduit à un réchauffement climatique total de 257,42 [DJ/an], soit une moyenne de 0,76°C en plus par jour.

DJ	2016	2050	(2050 - 2016)	(2050/2016)
January	632.45	640.55	8.1	1.01
February	516.08	556.9	40.81	1.08
March	608.51	568.19	-40.33	0.93
April	437.8	445.41	7.6	1.02
May	325.92	286.96	-38.96	0.88
June	172	119.83	-52.17	0.7
July	44.66	29.02	-15.64	0.65
August	46.84	28.44	-18.4	0.61
September	121.15	103.1	-18.05	0.85
October	435.18	300.55	-134.62	0.69
November	539.67	499.62	-40.05	0.93
December	554.73	599	44.27	1.08
Yearly	4434.98	4177.56	-257.42	0.94

Figure 8 : Analyse des degrés-jours (20/12)

6.2. Résultats des besoins de chauffages des différents scénarios

On retrouve 4 tableaux à la figure 9 ; chaque tableau représente un pack d'isolation.

- sur la colonne de gauche figurent les années étudiées (2016 - 2050) ;
- sur la ligne supérieure figurent les 4 types de vitrage (simple - double - triple sélectif - triple renforcé) ;
- pour chaque case, la valeur en [kWh] représente la somme des consommations annuelles des bâtiments étudiés $\sum Qs_i$; le pourcentage est calculé comme suit :

$$1 - \frac{\sum Qs_i}{\sum Qs_{configuration\ actuelle}}$$

La configuration actuelle est le pack d'isolation numéro 1 ainsi que des triples vitrages sélectifs.

			(Ug = 1.6; g = 0.65)		(Ug = 1.1; g = 0.63)		(Ug = 0.7; g = 0.5)		(Ug = 0.4; g = 0.37)	
		PACK0 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
%	DJ	units	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
0.00	4435	2016	400950	67.13	357940	49.20	335188	39.72	323190	34.72
-5.80	4178	2050	377457	57.34	336403	40.22	315604	31.55	304977	27.12

insulation: wall = 9cm; floor = 15cm; roof = 8cm

DJ	PACK1 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	304657	26.99	262634	9.47	239904	0.00	227459	-5.19
4178	2050	286229	19.31	246335	2.68	225293	-6.09	214055	-10.77

insulation: wall = 18cm; floor = 30cm; roof = 16cm

DJ	PACK2 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	286333	19.35	244477	1.91	221286	-7.76	208152	-13.24
4178	2050	268235	11.81	228598	-4.71	207037	-13.70	195097	-18.68

insulation: wall = 25cm; floor = 30cm; roof = 25cm

DJ	PACK3 INSU	simple glazing		double glazing		selective triple glazing		reinforced triple glazing	
4435	2016	269638	12.39	228006	-4.96	204413	-14.79	190569	-20.56
4178	2050	252222	5.13	212909	-11.25	190846	-20.45	178179	-25.73

insulation: wall = 35cm; floor = 35cm; roof = 35cm

Figure 9 : Tableaux des besoins en chauffage des différents scénarios

6.3. Analyse des résultats

Tout d'abord, on peut constater que chaque investissement engendre des retombées économiques. Cela peut paraître évident mais ce n'est pas toujours le cas. Par exemple, en passant de doubles à de triples vitrages : les triples vitrages ont un meilleur coefficient de transmission thermique, mais la valeur-g des vitrages est diminuée, ce qui signifie que ceux-ci laissent moins pénétrer les rayons du soleil. Cet investissement peut conduire à un impact énergétique nul ou très faible pour certaines positions géographiques.

Cas numéro 1 : Le passage du pack d'isolation actuel (pack 1) au pack d'isolation supérieur (pack 2) réduit de 7,76 % les besoins en chauffage. Comme un résultat en pourcents n'est pas toujours explicite voici un rapide calcul de retour sur investissement explicitant cette valeur :

Investment:

Zone	Insulator	Thickness	Price/m^2	Area	Investment
Wall	Swisspor Lambda	18 → 25 cm	+20 CHF/m^2	3782 m^2	⇒ 75640 CHF
Roof	Swisspor Premium	16 → 25 cm	+32.8 CHF/m^2	1768 m^2	⇒ 57990 CHF
Total				5550 m^2	⇒ 133630 CHF

Saving:

	Pack1 → Pack2	Heat Pump COP	Price / kWh
	(= 239904 - 221286) kWh	3	0.15 CHF/kWh
Results	18 618 kWh Heat	6206 kWh Electric	⇒ 930.9 CHF

Return on investment:

⇒ 143 years

Figure 10 : Calcul de ROI - Passage Pack 1 au Pack 2 Isolation

Nous investissons 133630 [CHF] et chaque année nous récupérerions 930 [CHF], ceci signifie qu'il faudrait plus de 140 années pour rentabiliser l'investissement, ce qui est bien plus long que la durée de vie prévue du bâtiment. Le calcul ne prend pas en compte les coûts liés au transport des matériaux et la pose.

Investment:

	Price/m^2	Area
Reinforcement of the chassis	+28.2 CHF/m^2	1370 m^2
Glazing	+27.6 CHF/m^2	
Installation	+15 CHF/m^2	
VAT (8%)	+5.6 CHF/m^2	
Total	+76.46 CHF/m^2	⇒ 104750 CHF

Saving:

	double → triple glazing	Heat pump COP	Price / kWh
	(=262634 - 239904) kWh	3	0.15 CHF / kWh
Results	22 730 kWh Heat	7 577 kWh Electric	⇒ 1136 CHF

Return on investment: ⇒ 92 years

Figure 11 : Calcul de ROI - Passage Pack 1 au Pack 2 Vitrage

Cas numéro 2 (fig. 11) : un calcul similaire est réalisé pour évaluer l'investissement d'opter pour des triples vitrages sélectifs plutôt que des doubles vitrages. Le passage de double à triple permet de réduire de 9.47 % les besoins en chauffage, cependant l'investissement se rentabilise en 92 ans.

7. Conclusion

Nous pouvons constater que sans aide de l'État, ce genre d'investissement n'est financièrement pas intéressant. Avec l'aide de l'État suisse (selon le Programme Bâtiment 2015), le retour sur investissement pout le cas 1 (isolant) est de 14,3 ans puisque l'on recevrait une prime plafonnée à 30 % de l'investissement total (soit 120279 [CHF]). Pour le cas 2, nous obtenons un ROI de 21,9 ans au lieu de 92 ans grâce à une prime de 35 [CHF/m² SRE] (soit 79841 [CHF] de prime), SRE étant la surface de référence énergétique.

Toutefois, malgré le manque de données nécessaires à la réalisation d'une analyse financière complète, nous pouvons percevoir l'importance d'un logiciel de simulation énergétique dans un projet tel que le projet OSCARS. Une fois le modèle calibré, il est possible de déterminer tous les flux énergétiques entre le bâtiment et l'extérieur. Il est également possible d'obtenir des informations à propos de chacune des surfaces du village de Blatten, ceci nous permet par la suite d'estimer tous les scénarios de rénovation souhaités. De plus, le tableau des résultats (fig. 9) peut être un tableau décisionnel intéressant pour l'entreprise REKA, dans l'optique d'envisager la réalisation de nouveaux villages.

Pour conclure, tous les objectifs ont été atteints. Les seules limitations proviennent d'absence de données.

AI	CitySim	Reality	SIA
$\sum Qs/year$	21544.7	25434.7	37011.8
	-15%	0	+45%

Figure 12 : Besoins satisfaits entre CitySim avant calibration et la réalité

Le premier objectif était de réduire la marge d'erreur entre les simulations utilisées par ELIMES et la réalité. Ceci a été accompli puisque même avant calibration avec les données réelles, le modèle CitySim était 30 % plus proche de la réalité que le justificatif thermique SIA (voir fig. 12). Le second objectif, qui était de fournir au CREM tous les scénarios énergétiques nécessaires au bon fonctionnement de leur outil d'optimisation des systèmes de chauffage, est également atteint

D'autres études sont présentes dans le rapport complet [6], notamment des études concernant la production des panneaux photovoltaïques ainsi que les systèmes de refroidissement.

Avis critique au niveau des données utilisées :

- il y a trop peu de données réelles du système de chauffage concernant la seconde partie de l'année,

- les apports d'énergies internes calculés utilisent des hypothèses théoriques du justificatif thermique,
- les données météorologiques ne proviennent pas exactement du site étudié, des différences d'ensoleillement, vent, température peuvent survenir,
- en raison de l'importance du paramètre infiltration, un test d'infiltrométrie serait préférable.

Avis critique au niveau du logiciel utilisé ; CitySim utilise un modèle 3D simplifié et adapté à son utilisation. Le temps consacré à la réalisation du modèle 3D est une partie importante de cette simulation, de ce fait l'utilisation de ce logiciel n'est pas justifiée en vue de simuler un bâtiment unique.

8. Sources

[1] *L'énergie thermique dans le bâtiment,* SIA 380/1, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2009.

[2] SketchUp, (consulté en septembre 2017).
Adresse URL : https://www.sketchup.com/

[3] Swisstopo, (consulté en septembre 2017), *Swiss Federal Office of Topography.*
Adresse URL : https://map.geo.admin.ch.

[4] Meteonorm, (consulté en septembre 2017).
Adresse URL : http://www.meteonorm.com/.

[5] KÄMPF, Jérome, *On the Modelling and Optimisation of Urban Energy Fluxes*, Thèse, Lausanne, Suisse : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.

[6] DACOS, Lary, *Future scenarios for low energy buildings in the Swiss Alps: energy consumption and production*, Travail de fin d'études, Liège, Belgique : HELMo - Institut Gramme, 2017.

LISTE DES
TRAVAUX DE FIN D'ETUDES

Année académique 2016 -2017

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 émargent à plusieurs rubriques, ils ne sont repris qu'une seule fois en fonction de l'orientation essentielle de leur contenu.

La lettre entre crochets permet de déterminer l'Institut au sein duquel le travail a été réalisé et auquel le lecteur intéressé peut s'adresser.

ECAM	[E]
GRAMME	[G]
ISICHt	[H]
PIERRARD	[P]

1. AUTOMATIQUE

1.1. REGULATION

[E]	EPACKA Emmanuel	Réalisation d'un régulateur de température d'un four à partir des déchets recyclés et analyse de l'apport de l'énergie solaire
[E]	LE BOUCQ DE BEAUDIGNIES Antoine	Étude en simulation de la mise en parallèle de deux organes de commande (barrage ou centrale hydroélectrique) dans le but de réguler le niveau et le débit d'un bief
[H]	QUINET Loïc	Etude de la stabilisation angulaire de la visée dans un système de conduite de tir

1.2. SYSTEMES SEQUENTIELS

[H]	DEMANET Antoine	Automatisation d'une installation de distillation discontinue en vue de son extension
[E]	LAVERS Maxime	Solution pour l'automatisation des tests de validation d'un automate pour le contrôle d'un accélérateur de particules
[E]	SCHOOLS Jérôme	Réalisation et implémentation d'un système de contrôle d'étiquetage de raviers alimentaires au moyen de caméras industrielles
[E]	VAN ACKER Magali	Conception et réalisation d'une racle synchronisée à la vitesse d'un convoyeur assurant le regroupement et le transfert de produits

1.3. ROBOTIQUE

[H]	BARBARY Emerson	Innovations dans l'automatisation d'une ligne de production de verre creux
[H]	HERPOEL Thomas	Casper social assistive robotics platform : top down system design and intracommunication protocol

1.4. AUTOMATES PROGRAMMABLES

[H]	CAKMAK Hasan	Automatisation et supervision d'une machine de classement de pièces cylindriques
[H]	COLPIN Mathieu	Modernisation d'un banc de débitage d'axes moteurs en acier via son automatisation et l'optimalisation du taux de chute
[P]	DION Rémy	Retrofit S5 – S7 de la régulation de vitesse d'une partie de ligne de production de vinyle

[P]	DOMBRÉE Vincent	Supervision des niveaux d'une station de dépotage avec migration technologique
[P]	DUPONT Markus	Adjustment of a motion control for aircraft painting platforms
[H]	GILIS Sébastien	Amélioration de la productivité et de la traçabilité de lignes d'assemblage
[E]	LIBOUTON Quentin	Smart opening of industrial high speed rolling doors
[H]	LIENARD Maxime	Revamping de la partie contrôle - Commande d'une installation de fabrication de produits d'entretien ménager
[G]	LONDON Olivier	Automatisation de la gestion de déplacements tridimensionnels de mains chauffantes dans un four de production de pare-brise
[E]	OTERO JIMÉNEZ Julia	Analysis of the internal state of an extruder using Condition Monitoring techniques
[H]	PIETTE Antoine	Automatisation d'un prototype destiné à la chimie verte
[P]	RONGVAUX Steve	Optimisation énergétique d'un hall de production - Régulation HVAC
[P]	SCHOLZEN Daniel	Development of the control software and the user interface for a self-propelled feeding mixer
[P]	SKARNA Michaël	Modernisation d'une trémie avec mise en réseau et supervision
[E]	VEKEMANS Benoît	Remise en fonctionnement et optimisation d'une station automatisée sur une ligne de production
[E]	WOODHOUSE Nathan	Automated testing method for a radiopharmaceutical cyclotron control program

1.5. CAPTEURS ET INSTRUMENTATION

[H]	AKAN Tarik	Débitmétrie par effet Coriolis : étude d'une application industrielle
[H]	BAILLY Benoît	Conception d'une unité de remplissage de flacons
[G]	BAONVILLE Dimitri	Recherche et mise en place d'une caméra de contrôle de pièces de production
[E]	MARTIN Gilles	Développement d'un prototype de capteur de mesure d'épaisseur d'oxyde de fer sur bande d'acier haute performance lors du processus de galvanisation
[E]	ZARATE CANGAHUALA Diego	Développement technique et méthodologique pour assurer une utilisation sécurisée de stimulations par champs focalisés d'ultrasons

1.7. MODELISATION

[E]	TIOMELA TSAKENG Arnaud	Optimisation de la ligne de production JB4 brasserie ABInBev Jupille
[E]	WITHOECK Pierre-François	Simulation of HVDC-lines in ATP-EMTP

2. CHIMIE

2.1. CHIMIE INDUSTRIELLE ET PROCEDES PILOTES

[H]	ACQUAVIVA Stefano	Optimisation de l'estérification du lactate d'ammonium
[G]	DEMEZ Adrien	Développement d'un procédé d'impression 3D de pièces en céramique biocompatible par stéréolithographie.
[H]	GORIS Thibaut	Lab scale process optimization and modelling of the solvent system impact on a diluted liquid laundry detergent for soluble unit dose
[G]	MONFORT Nicolas	Parametrical Determination of Empirical Water Fraction for Upstream Industry
[G]	SCARINCI Gilles	Creation of a Simulation Model of a Bioethanol Distillation Plant
[G]	SIMONIN Jonathan	Development and validation of Stack design tool for horizontal HRSG Boilers at proposal stage
[G]	WARNOTTE Damien	Mise en œuvre d'un outil d'évaluation écocartes pour une analyse environnementale des postes de la logistique et d'un centre enfouissement technique

2.2. BIOCHIMIE – BIOTECHNOLOGIE

[H]	HENRIET Hélène	Evaluation des méthodes discontinues avec séquençage des étapes pour la fabrication du pain d'épeautre du Moulin de Hollange
[H]	LELANGUE Amélie	Recherche de nouvelles souches et adaptation du procédé de fermentation lactique
[H]	VAN GENECHTEN Erik	Mise au point et validation d'une méthode d'analyse microbiologique pour onguents
[H]	VANDEKERCKHOVE Damien	Lutte contre les développements microbiens dans les installations de traitement de surface de l'aluminium
[H]	WATILLON Philippe	Contribution à l'étude du facteur de transcription PRDM12 dans le développement de la moelle épinière et des ganglions rachidiens

[G]	ZIMMERMANN Nicolas	Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso

2.4. CHIMIE DES MATERIAUX

[H]	FIANDACA Luca	Optimisation du package anti-feu de mousse de polystyrène expansé
[G]	GÉRADON Guillaume	Développement de la technique de nanoindentation en température
[H]	HOYAS Maxence	Caractérisation d'alliage dans les résidus de broyage de moteurs d'automobile en vue de leur récupération
[G]	TIRTIAUX Pauline	Control Quality Improvement of Raw Metallic Powder Material for Additive Manufacturing

3. CONSTRUCTION

3.1. STABILITE ET RESISTANCE DES MATERIAUX

[E]	BROERS Loïck	Évaluation de la durée de résistance au feu de la structure du tunnel ferroviaire de la jonction Nord-Midi
[H]	CARLIER Alexandre	Conception d'un outil informatique permettant le calcul de structures en bois
[E]	DE LE HOYE Guillaume	Constitution et développement d'une base de données universelle des caractéristiques limites admissibles des matières tuyaux utilisées pour les calculs de flexibilité
[E]	DOCLOT Camille	Étude des méthodes de dimensionnement à l'explosion en zone industrielle et application à un cas pratique
[G]	HENIN Esteban	Conception et développement d'éléments d'assemblages pour des ossatures bois modulaires. Assemblages structurels et non-structurels de constructions préfabriquées évolutives, économiques et durables (CIMEDE 2)
[E]	SAUVAGE Félix	Etude de la transformation lourde et structurelle d'un bâtiment existant
[E]	VANDERROOST Clara	Les systèmes mixtes bois-béton : Etat de l'art, méthodologie et outil de calcul, domaines d'application

3.2. CONSTRUCTIONS METALLIQUES

[E]	HANTHAZI Kevin	Prise en compte des Eurocodes Structuraux dans la mise au point d'une méthodologie de dimensionnement des rideaux de palplanches métalliques
[E]	MASSANGE de COLLOMBS Nicolas	Design and analysis of the structure of the theater of Gijon

3.4. GEOTECHNIQUE – MECANIQUE DES SOLS

[E]	COCK Olivier	Blindage de tranchées dans le cas de raccords à l'égout: Validation du système de soutènement par la création d'abaques
[G]	HYZETTE Florian	Etude comparative de différents modes de fondations d'un immeuble à appartements
[G]	LOUPPE Bastien	Etude de la résistance sismique de constructions réalisées avec les éléments PAMAflex
[G]	PONTIGO MONDACA Roman	Theoretical and applied comparison of European and Chilean seismic standards
[E]	QUARIN Thomas	Analyse, critique et étude comparative des différentes méthodes de dimensionnement de pieux
[E]	RABEUX Clément	Etude comparative des têtes d'ancrage

3.5. HYDRAULIQUE – ASSAINISSEMENT

[E]	BRASSEUR Gilles	Etude expérimentale de l'écoulement suite à une rupture de barrage sur lit mobile : caractérisation du cisaillement sur le fond
[E]	COUEZ Bruno	Etude expérimentale de l'écoulement suite à une rupture de barrage sur lit mobile : caractérisation des profils de vitesse
[E]	MINET Marie	Cavitation au droit des vannes de sassement de la quatrième écluse de Lanaye : mesure des dégâts et test d'un système d'aération sur modèle réduit

3.6. MATERIAUX DE CONSTRUCTION

[E]	AFOPA Arnaud	Analyse comparative des théories de dimensionnement des planchers en CLT (Cross Laminated Timber) et application à une étude de cas
[E]	CASALE Michael	Influence de la mise en oeuvre des pare-vapeur sur leur efficacité dans les parois et les toitures inclinées

[E]	PFAFF Roméo	Etanchéité des toitures inclinées à la pluie battante et impact sur les complexes de toiture.
[E]	VERSLYPE Estelle	Etude d'un procédé de refroidissement alternatif du béton en pays chaud minimisant l'empreinte carbone actuelle

3.7. PROCEDES ET TECHNOLOGIE

[H]	DECOSTER William	La norme résistance au feu du "Manoir Saint-Jean" : étude et problématiques
[E]	DE CREM Jonathan	Validation expérimentale d'une nouvelle procédure de calcul de la courbe d'enveloppement d'un profil de texture
[E]	DE JAMBLINNE DE MEUX Edouard	Optimisation et standardisation du point de vue du dimensionnement des structures légères à ossatures en acier laminés à froid utilisées dans le résidentiel
[E]	FIRRE William	Les fuites en toiture plate : origines et systèmes de détection
[E]	GOETHALS Alexis	Optimisation de poutres et de linteaux en bois au lieu de poutres et de linteaux en acier dans des constructions à ossatures bois pour des maisons individuelles
[E]	JANMART Martin	Etude d'un système de refroidissement utilisant un fluide frigorigène innovant appliqué à un cas concret
[G]	LEMAIRE Antoine	Pavement Alternatives for Aprons and Taxiways
[G]	LEONARD Maxime	Introduction du BIM au sein d'un bureau d'études
[E]	LEROY Olivier	Documentation des pratiques actuelles en bâtiments "zéro-énergie" et retour critique sur les premières expériences
[E]	POWIS de TENBOSSCHE Ludovic	Mise au point d'une méthodologie de calcul du débit de fuite d'air théorique d'un bâtiment
[H]	RENARD Arthur	Comment la technologie révolutionne-t-elle les métiers du bâtiment ?
[E]	SURNY Maxime	Analyse des implications techniques et financières du BREEAM sur un projet de construction
[E]	VANHOUTTE Chloé	BIM technology to mitigate delays on construction projects
[G]	WILLÈME Benjamin	Analyse rétrospective et comparative de la construction du voile en béton armé du nouveau siège social de la société Unisensor

3.8. PATHOLOGIE ET REHABILITATION DES OUVRAGES

[E]	DE LOOZ-CORSWAREM Antoine	Proposition de solutions techniques aux problèmes d'infiltrations dans un complexe de garages enterré en copropriété
[E]	LIRA Alix	Audit énergétique de l'Institut Adolphe Max et études de mesures d'amélioration liées à l'éclairage et à l'analyse quart horaire
[E]	RICQUIER Philippe	Analyse chiffrée et comparaison de l'impact environnemental à partir du cycle de vie de différentes stratégies de rénovation d'un logement type bruxellois

4. ELECTRICITE

4.1. ELECTRICITÉ GÉNÉRALE

[E]	ANDRUSZKIEWICZ Arthur	Étude de l'installation électrique nécessaire pour permettre l'alimentation continue et fiable d'un complexe scolaire en République Démocratique du Congo

4.2. MACHINES ÉLECTRIQUES

[H]	JOVENEAU Joachim	Etude de remise aux normes d'une Gleason 7A

4.3. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

[E]	BEN ROMDHANE Maha	Design and analysis of an active battery management system

4.4. PRODUCTION – TRANSPORT – DISTRIBUTION – RÉSEAUX

[G]	BAHM Ludwig	Optimisation des réseaux d'énergie du Sart-Tilman. (Valorisation de la cogénération biomasse)

4.5. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ELECTRICITE

[G]	DOTHÉE Jordan	Etude et optimisation de l'apport énergétique électrique d'une filière à fibre de verre.

4.6. ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES

[E]	HUBERT Olivier	Banc d'essais pour vélo électrique

[E]	LEYSSEN Nicolas	Application of direct drive motors on industrial high speed doors

4.7. APPLICATIONS ELECTRIQUES DES ENERGIES RENOUVELABLES

[E]	LIENARD Jérôme	Simulation and control algorithm development of a fuel cell based propulsion system for a small passenger vehicle
[E]	RACHWALSKI Marc	Solar PV performance assessment : the Potential-Induced Degradation

4.8. ELECTRCITIE DU BATIMENT – DOMOTIQUE

[H]	DI LEGAMI Claudio	Conception des installations de sécurisation incendie du Corinthia Grand Hôtel Astoria Brussels
[E]	VANDERHEYDEN Céline	Electricité d'un bâtiment de bureaux : élaboration d'une méthodologie de travail pour la phase d'étude

5. ELECTRONIQUE

5.1. SYSTEMES EMBARQUES – COMPOSANTS PROGRAMMABLES

[E]	BEN HAMMOU Wassime	Vers une nouvelle génération de barrières rapides
[G]	BO BOLIKO LOKONGA Elie	Développement d'un prototype de luminaire à photométrie variable.
[H]	DI STEFANO Salvatore	Interfaçage de microcapteurs et transmission de données au moyen du protocole LoRa
[H]	FIÉVEZ Dylan	Implémentation d'algorithmes d'analyse statistique par traitement de l'image en temps réel dans un système embarqué
[H]	FISETTE Maxime	Etude et réalisation de l'électronique d'un prototype de bioréacteur jetable asservi
[E]	LEBRUN Geoffrey	Etude et réalisation d'un système d'entrainement de scanner d'imagerie médicale de type Cone-Beam CT
[E]	MONTOISY Tanguy	QuimStep : Module de contrôle de moteurs pas à pas pour applications robotiques industrielles
[E]	NICAISE David	Développement d'un module de commande intelligent destiné aux actionneurs de type moteurs DC et AC pour la robotique
[G]	RIGA Pierre	PROBA (ESA) project: antenna tracking control

[E]	TAHMASEBI Omid	Système de géolocalisation GNSS de prise de vue embarqué sur drone
[H]	YAZIGI Joachim	Développement Simulink ® du logiciel de gestion d'une transmission automatique

5.2. ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

[G]	SAULLE Anthony	Monitoring des vibrations de machines tournantes
[H]	VITULLI Michaël	Etude et analyse d'un système de récolte d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes

5.3. APPLICATIONS SCIENTIFIQUES – ELECTRONIQUE MEDICALE

[H]	ESTIEVENART Wesley	Implémentation d'un test médical dans un environnement 3D virtuel et réalisation d'une application d'enregistrement de données

5.4. MESURES – INSTRUMENTATION – SIMULATION

[G]	TCHADO TCHATCHOUANG Michaël	Conception d'un logiciel de contrôle des instruments du spectrographe pour observer des étoiles massives dans le domaine du proche infrarouge via le télescope TIGRE

5.5. TELECOMMUNICATIONS – TECHNIQUES DE TRANSMISSION

[H]	ESPALARD Corentin	Ecriture d'un driver afin de contrôler un ensemble d'instruments
[E]	LEROY Alexis	Modélisations, simulations et étude d'algorithmes d'optimisation d'adaptation d'impédance pour boîte d'accord d'antennes en haute fréquence
[H]	MANZELLA Michael	Sécurisation d'une messagerie instantanée

5.6. TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL

[G]	BAWIN Florian	Système radar pour la détection de véhicules et de piétons
[G]	COLLO Nicolas	Réalisation d'un démonstrateur basé sur la technologie TOF pour la sécurisation de barrières de parking
[G]	HOUBEN Olivier	Système de comptage des personnes basé sur l'utilisation de caméras LWIR.

5.8. APPLICATIONS DE L'ELECTRONIQUE

[H]	BOSTEM Antoine	Preuve de concept d'un système E/S résistant aux radiations ionisantes par triple redondance
[H]	DELSINNE Anthony	Industrialisation de cartes électroniques destinées au diagnostic de câbles et réalisation de son interface homme-machine

6. ENVIRONNEMENT

6.4. TRAITEMENT DES DECHETS

[E]	DELCOURT Estelle	Méthodes et pratiques d'inventaire pré-démolition dans un contexte d'économie circulaire dans la construction

6.5. DEVELOPPEMENT DURABLE

[E]	BLAUWET Adrien	Conception d'un système automatisé pour un élevage de grillons destiné à un petit et moyen producteur
[E]	GOFFIN Simon	Participation de la toiture verte et de la toiture stockante dans la problématique de la gestion de l'eau de pluie
[G]	PONCELET Raphaël	Prototyping of an Aquaponics system on up-cycling basis in an Indian NGO

7. GEOMATIQUE

7.1. TOPOGRAPHIE – GEODESIE – SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

[E]	MARTEAU Marvin	BIM Workflow @ TUC RAIL

7.2. URBANISME ET AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

[E]	HASTIÈRE Julien	Permis d'urbanisation complet avec voirie
[E]	MAUDOUX Perrine	Etude d'alternatives palliant à la problématique des déplacements individuels motorisés liée à la démolition du viaduc Herrmann-Debroux

[E]	VOTOT Maxime	Identification des échelles de mutualisation et des modalités permettant à un quartier d'accroître son autonomie dans une optique de développement durable

7.4. GESTION DES BIENS IMMOBILIERS

[E]	DEBAILLEUL Anthony	Analyse comparative des différentes approches permettant d'optimaliser la gestion d'un bien immobilier

7.6. EXPERTISES

[E]	THAUVIN Aurélien	Développement de la méthode hédonique en matière d'évaluation immobilière en région bruxelloise

8. GESTION

8.1. ORGANISATION DU TRAVAIL – PLANIFICATION – LOGISTIQUE – MAINTENANCE

[E]	AIGLON Benjamin	Analyse et amélioration du cycle de vie du développement d'un progiciel de gestion en vue d'augmenter sa qualité et sa stabilité
[H]	BAEYENS Alexandre	Conceptualisation et budgétisation d'un centre de formation à la technologie des pompes centrifuges auto-amorçantes
[G]	CHAUFOURAUX Jérôme	Mise en place d'un système de gestion de chantier au sein d'une PME et application à un chantier en cours
[G]	CLAESSENS Sébastien	Mise en place d'un projet pilote d'optimisation de postes de production pour l'amélioration de leur efficience
[H]	DELAUNOY Thomas	Uniformisation des pièces magasin pour la maintenance
[H]	DEPARIS Jean-Charles	Implantation du Lean Manufacturing sur la ligne de production de Thalès Belgium à Tubize
[G]	MERCHE Maxime	Optimisation du processus de montage des parkings aériens métalliques
[G]	PIRENNE Thomas	Implementation of an Automatic, Cycles Based Maintenance Schedule
[H]	SCIEUR Florian	Analyse de risques du projet ARIANE

8.2. CONTROLE QUALITE – FIABILITE

[G]	FAUFRA Michaël	Pertinence empirique d'une donnée via multi-benchmarking sur interface utilisateur
[H]	LEFEBURE Jason	Contrôle qualité d'un mini laboratoire de synthèse de radio pharmaceutique

8.3. SYSTÈME QUALITE – ENVIRONNEMENT – HYGIENE ET SECURITE

[E]	DERODE Arnaud	Définition et implémentation d'un plan d'amélioration d'un poste de contrôle qualité
[H]	DEVER Louis	Projet d'amélioration d'une chaîne de production dans une usine de roulements
[G]	ROUFFLAER Phédrien	Quand l'inventaire amiante classique fait place à une gestion dynamique des remarques évoluant avec le chantier : Personnalisation du logiciel Aproplan.
[P]	SCHANDELER Simon	Mise en conformité de ligne de production automatisée
[E]	TINTAS Ovidiu	Prévention d'incendie sur les chantiers de construction

8.4. RENTABILITE DES INVESTISSEMENTS – GESTION DES COUTS

[H]	CLAVIE Corentin	Optimisation de la réalisation des devis dans le domaine de l'injection plastique
[G]	PIRLOT Basile	Mise en œuvre d'une méthodologie et d'outils de suivi d'actions de réduction de coût au sein d'un service achats

8.8. DROIT – PROCEDURES

[E]	NEVE DE MÉVERGNIES Antoine-Eric	Etude de l'érection sur le toit d'un immeuble en copropriété ou destiné à le devenir, d'un lot ou d'une partie de lot supplémentaire

9. INFORMATIQUE

9.1. ANALYSE – MODELISATION

[G]	NIESSEN Laurent	Conversion vers Model Based Design de fonctionnalités d'agrément et d'adaptabilité pour boîtes de vitesses automatiques

9.2. PROGRAMMATION – LOGICIELS – SYSTEMES D'EXPLOITATION

[E]	DE WOLF Christophe	Conception et implémentation d'un logiciel embarqué temps réel pour un nouvel appareil de laboratoire commandable et dédié aux tests digitaux
[H]	FEDERICO Baptiste	Analyse, conception et programmation de systèmes automatisés en secteur pharmaceutique
[E]	LHOEST Lancelot	CarSwop : Développement d'une application mobile visant à réduire les émissions de CO2 d'un parc de véhicules de société
[H]	MARTELEUR Florent	Etude et développement d'une chaîne de supervision dans un projet d'automatisation d'autoroute
[E]	VANHOVE Damien	Module de gestion des stages: Design, implémentation et intégration à une plateforme de gestion d'école
[G]	VANVINCKENROYE Guillaume	Applications de streaming vidéo sur Hololens.

9.3. TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES

[E]	DE PATOUL Benoît	Post-wildfire Vegetation Loss Mapping using Bitemporal Synthetie Aperture Radar

9.5. RÉSEAUX INFORMATIQUES

[H]	VANDENDRIESSCHE Arnaud	Etude du revamping, de la communication et de la supervision de systèmes automatisés chez Baxter

9.6. INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

[H]	COPPIN Adrien	Découverte et utilisation du logiciel de simulation Winmod dans le cadre de la validation d'un revamping
[E]	LINARD DE GUERTECHIN Gauthier	Amélioration du système de navigation d'un robot tondeuse et développement de solutions pour des terrains présentant des couloirs étroits

9.7. BASES DE DONNEES

[E]	REBAÏ Yanis	Conception d'une interface de rapportage des données de production et Optimisation du process grâce à des instruments de mesure

9.8. TECHNOLOGIE DE LA COMMUNICATION

[G]	GAILLY Dorian	Étude de l'intégration d'une plateforme de Gestion Électronique des Documents gérant le workflow au sein d'une entreprise générale de construction
[E]	VERFAILLE Guillaume	Conception et développement d'un réseau de l'IoT et utilisation de ce réseau dans la plate-forme ThingWorx

10. MATHEMATIQUES APPLIQUEES

10.1. METHODES NUMERIQUES ET ELEMENTS FINIS

[G]	BOUTET Antoine	Contribution à l'amélioration des modèles de simulation numérique (ABAQUS/Explicit) dans la prédiction des endommagements de panneaux plans composites monolithiques soumis à l'impact d'oiseau
[G]	CRENIER Kevin	Calculation & optimisation of the drive mechanisms of a transfer carriage conducting materials designed to the heat treatment of steel strips

11. MECANIQUE

11.1. METROLOGIE ET INSTRUMENTATION

[G]	FRIKHA Walid	Development of the technical specifications for a LIMS in the automotive industry
[E]	VERSCHUERE Vivian	Définition d'une nouvelle méthodologie de Reverse Engineering pour les services CAD et métrologie d'AGC Automotive

11.2. FABRICATION MECANIQUE

[G]	BARTHOLOMÉ Régis	Analyse de la résistance d'un plateau modulaire extensible extra-surbaissé pour le transport exceptionnel et de son paramétrage au sein d'un logiciel de validation de chargement.
[E]	BRACKMAN Damien	Conception d'un portique de positionnement pour un vibromètre laser monopoint

[E]	DEBEER Corentin	Développement d'un nouvel accélérateur d'électrons à haute énergie pour la détection et la stérilisation - le Rhodotron TT50
[G]	DEDERIX Sébastien	Conception et étude d'un pont roulant spécifique destiné à la manutention de tôles façonnées pour le bord d'attaque d'ailes d'avions avec un palonnier à ventouses
[E]	DUPONT Alexandre	Étude et comparaison de logiciels, Vericut et NX10, pour la simulation de machines pour le tournage CAM
[E]	FRANCOIS Mathieu	Étude du logiciel Siemens NX10.0.3 et ses plug-ins pour l'usinage de pièces en titane. Mise en œuvre avec la fraiseuse à commande numérique ARROW500 de l'ECAM
[G]	JAMAR DE BOLSÉE Julien	Suivi de production et optimisation d'un adaptateur pour le transport de mâts d'éoliennes
[G]	JANSSENS Laurent	Étude et conception d'un train avant de Porsche 911 en vue de la participation au championnat africain de rallye historique
[E]	LORGE Roman	Standardisation des Stratégies d'Usinage en Programmation
[E]	MAAREF Bechir	Base chenillée pour un fauteuil roulant
[E]	PETROS Steve	Conception d'un effecteur pour machine à commande numérique
[E]	STAS Nicolas	Conception d'un banc de caractérisation du coefficient de frottement pour rondelles de différentiel TORSEN
[E]	SYMON Hadrien	Optimisation de la liaison « Bras-Pale » d'une éolienne Fairwind
[E]	TRINH Quôc	Offset, gouge and excess management
[E]	VAN DAMME Brieuc	Conception et réalisation d'un équipement permettant de simuler les conditions de forage pétrolier, afin d'étudier l'usure des casings
[E]	VAN DAMME Raphaël	Création et installation d'une cellule de réparation de scie cloche au sein d'un atelier de maintenance
[G]	VERCOUILLIE Jean	Cost-based optimisation for super-duplex bearing crowns manufacturing process.
[E]	VERHULST Benjamin	Design study and manufacturing optimization of a self-sizing spiral cuff electrode

11.3. CONSTRUCTION DES MACHINES

[G]	BARCARO Naïs	Conception et validation d'une VFN GE9X à actuation électrique.
[G]	CORNET-DELMELLE Maxime	Conception d'une machine automatique d'ensachage de bois d'allumage

[G]	DE LUNARDO Alexandre	Conception d'un prototype de gestion des produits non conformes dans l'industrie optique.
[H]	DEBOURSE Quentin	Etude de conception et d'automatisation d'une ligne de production de briques en terre crue
[E]	DETHIER Eric	Conception d'un élévateur basculant
[H]	HAINAUT David	Etude et prototypage d'un train roulant à quatre roues parallèles d'une remorque agricole avec extension des roues en extrémité
[G]	HILGERS Martin	Development of a Hand-over station of trailer chassis in a surface treatment centre for KRONE GmbH & CO. KG located in Werlte (G)
[G]	JOCKIN Gilles	Etude et conception d'une enceinte de tests climatiques pour des pièces en matériaux composites de grande longueur
[G]	LOMBA Maxime	Conception d'une machine automatique de mise en palette de bûches
[E]	MAES Lionel	Conception et dimensionnement d'une machine de mesure de la raideur passive de la cheville
[P]	MAITREJEAN Mathieu	Diminution du temps d'arrêt et optimisation du mécanisme d'apport-matière d'une presse mécanique à excentrique
[G]	RENIER Etienne	Analyse de résistance, par éléments finis, de l'arbre dans un procédé d'épuration.
[G]	RUTTEN Gilles	Conception d'une sonde de nettoyage de puits basée sur l'émission d'ultrasons
[G]	SAPIN Nicolas	Conception d'un convoyeur de seringues en interface entre deux machines industrielles
[G]	SCHOLZEN David	Transformation d'un chariot de manipulation pour noyau de bobine selon directive machine 2006/42/CE
[E]	SLAEDTS Julien	Conception et développement d'un manipulateur à cames
[H]	THOMAS Robin	Projet de conception d'une pale d'éolienne en matériau composite à architecture complexe
[H]	VAN WYMEERSCH Bertrand	Conception et budgétisation d'une presse de vulcanisation pas à pas
[G]	VERMEULEN Rik	Conception d'une turbine hydraulique de type Pelton à axe vertical
[G]	VERWILGHEN Thomas	Development of suspension elements and air intake study on Toyota Hilux Overdrive
[P]	ZACHARY Simon	Mise en production du processus d'assemblage et d'emballage du balai d'essuie-glace W0

11.4. TECHNOLOGIE – PRODUCTIQUE

[P]	ARENDT Sébastien	Etude et amélioration du pouvoir antidérapant d'un revêtement de sol souple en vinyle
[G]	BEUTELS Maxime	Amélioration d'une cellule robotisée dédiée à l'usinage de structures en nids d'abeilles non-métalliques
[H]	CENTULIO Sébastien	Kit universel pour portes sectionnelles de garage résidentiel
[E]	HALFLANTS Bastien	Amélioration de la qualité de sachets de thé pyramidaux par actions techniques, humaines et analyse de matériaux

11.5. MAINTENANCE

[H]	COULON Simon	Conception d'une ligne de production de tapis antivibratoires en caoutchouc recyclé
[H]	DÉSERT Florent	Mise en place d'un plan de maintenance de supports dynamiques
[H]	LAMESCH Tristan	High speed event analysis in time domain - Event distinction using average, max value and other statistical tools
[H]	PATTYN Axel	High speed event analysis in time domain- development of a complementary calculation method to diagnose bearing defects

12. MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMODYNAMIQUE

12.1. INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE ET/OU DE CHALEUR

[E]	AYALA MICHAY Bryan	Rénovation et optimisation de la chaufferie de l'UCL-Woluwe de 50 MW
[G]	BO-BOLIKO LOKONGA Mombanje	Analyse et modélisation d'une installation de production de chaleur
[H]	CORNIL Thibaut	Amélioration énergétique de l'UIOM de Saint-Thibault-des-Vignes
[G]	DAUBIT Clément	Projet d'intégration d'une chaudière biomasse dans une chaufferie gaz/cogénération pour le réseau de chaleur de Louvain-la-Neuve
[H]	FEDERICO Jérémie	Dimensionnement d'un réseau de chaleur couplé à l'unité de valorisation énergétique de Thumaide
[G]	HENSGENS Kevin	Etude de pistes d'amélioration de la performance énergétique du Centre de Worriken

12.2. PRODUCTION ET TRANSFERT D'ENERGIE CALORIFIQUE OU FRIGORIFIQUE

[E]	FOKAM Ariel	Optimisation de la quantité de vapeur utilisée pour la pasteurisation de la pâte hydrolysée
[E]	SALMOUN Omar	Etude technico-économique de l'installation d'une pompe à chaleur pour le nouveau bâtiment communal de Uccle

12.3. INSTALLATIONS DE CONDITIONNEMENT D'AIR – CHAUFFAGE

[H]	GUILLAUME Florent	Climatisation d'un centre commercial par une boucle tempérée - Optimisation des paramètres de fonctionnement
[E]	MASSAUX Hugo	Optimisations énergétiques du bâtiment B de la société Sibelga
[E]	MERSCH Jean	De l'étude de faisabilité à la réalisation technique d'une extension de salle informatique
[H]	NORTIER Julien	Equipements aérauliques de laboratoire : méthodologie de sélection et application de celle-ci dans un projet réel de pharmacie hospitalière
[E]	OULAD MOUSSA Mustapha	Optimisation énergétique sur le réseau vapeur d'humidification d'air pulsé au Parlement européen
[H]	OVAERE Justin	Etude d'une installation frigorifique commerciale comparaison entre R407F et CO2

12.5. REGULATION ET GESTION DES INSTALLATIONS – PROCESSUS THERMIQUE

[P]	ANDRES Philip	Energy flow of heavy trucks auxiliaries, focused on air compressor
[E]	HUART Martin	Etude de cohabitation des panneaux solaires thermiques et de la cogénération pour un bâtiment type piscine
[E]	PARLIER Christopher	Optimisation de la gestion énergétique de l'installation de chauffage du nouveau bâtiment de l'IBGE

12.6. MACHINES THERMIQUES – THERMIQUE INDUSTRIELLE

[E]	BECKERS Antonin	Optimisation d'une installation de séchage de bois utilisé comme combustible dans des fours à chaux
[H]	BERDAL Sébastien	Bilan thermique d'un four de cimenterie à voie sèche
[P]	CARNEVALI Jean-Albert	Modélisation énergétique des cuissons Kraft conventionnelle et Cold Blow

[H]	DAINOTTI Gaëtan	Etude d'un dispositif de chauffage d'huile par induction électromagnétique
[G]	FRANÇOIS Clara	Performance analysis on a conceptual adiabatic cooler
[G]	GAVROY Maxime	Monitoring lubricant properties in an internal combustion engine
[E]	MEHAUDEN Arnaud	Etude et optimisation de supports de pièces pour la fabrication additive par la technologie Electron Beam Melting
[G]	REMACLE Gilles	Ultrasonic oil film thickness measurement on a running combustion engine
[G]	VANDERSMISSEN Julie	Simulation thermique dynamique d'un Earthship

12.7. HYDRAULIQUE – PNEUMATIQUE – AERODYNAMIQUE

[E]	DE BROUWER Victor	Etude hydraulique en vue de déterminer la viabilité de pompes additifs
[E]	DHONDT Vincent	Experimental investigation of the horseshoe vortex around the base of a wall-mounted cylinder
[E]	GULCU Benjamin	An experimental investigation of a NACA 0012 wing-tip vortex flow in a subsonic wind tunnel
[H]	MAURCOT Magali	Implementation of two fountains and a pump room at Khalifa Stadium

12.8. THERMIQUE DU BATIMENT

[H]	ANZILAO Thomas	Optimisation des performances énergétiques d'un bâtiment par simulations dynamiques
[E]	BEN TAHER Nasser	Comparaison entre les systèmes de refroidissement traditionnels et l'utilisation d'un système basé sur la géothermie pour les bâtiments passifs
[G]	DACOS Lary	Future scenarios for low energy buildings in the Swiss Alps : energy consumption and production
[H]	HUSSIN Geoffrey	Etude de la performance énergétique d'un immeuble à appartements à Jambes et étude de solutions technico-économiques en vue d'atteindre le critère NZEB en Wallonie
[G]	MERTENS Quentin	Identification du potentiel de rénovation énergétique d'un bâtiment via benchmarking
[E]	NGANIAMA NGEBA Juvincy	Etude d'optimisation énergétique du bâtiment de l'Orchestre Philharmonique Royal de Liège

[E]	TCHAMDJIE MONGA Cedric	Analyse du comportement thermique d'une maison individuelle en ossature bois et pré-étude des solutions techniques pour rendre le bâtiment autonome énergiquement

13. PHYSIQUE

13.2. OPTIQUE – ACOUSTIQUE

[G]	BONSANGUE Fabio	Etude des propriétés optiques de films minces de TiO2, Nb2O5 et Ta2O5 soumis à des irradiations protoniques (10 MeV)
[P]	ZOHRI Youssef	Conception et réalisation d'un système suiveur du projectile basé sur un miroir rotatif

Tous nos remerciements aux membres du Comité d'édition :

Le Père Laurent CAPART s.J. (GRAMME) et Messieurs Francis GUEUNING (ECAM), Michel LEQUEUX (ISICHt) et Vincent HANUS (PIERRARD).

Nos plus vifs remerciements à Monsieur Louis ROMANINI pour le travail de coordination qu'il a assuré afin de mener à bien cette publication.

Madame Valérie SERONT (ISICHt) et Messieurs Xavier VAN DEN DOOREN (ECAM),
Juan HERRERA (GRAMME) et Vincent PAIRON (PIERRARD),
Directeurs de Catégorie Technique.

Secrétariat Général de l'Enseignement Catholique asbl
en Communautés française et germanophone
avenue E. Mounier 100 • 1200 Bruxelles
http://enseignement.catholique.be • segec@segec.be
D/2018/7362/4001