

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 baches (cuves de stockage d'eau) sont disponibles avec suffisamment d'eau pour réaliser plusieurs brassins de 20 hl : une bache à eau chaude à 85°C et une bache 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 bache 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 bûches 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.
- 1^{er} palier : maintien à 65°C pendant 1 heure.
- Chauffe jusqu'à 77°C.
- 2^e 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 bûche à eau froide à la bûche 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 sucre pour permettre la refermentation.
- Refermentation : 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 bache à eau chaude qui demande le plus d'énergie. En effet, cette bache fait 40 hl et est suffisante pour la réalisation de 4 brassins consécutifs

	Energie [MJ]	Puissance [kW]
Préchauffage de la bêche	1222	70
1^{er} palier	1,2	0,3
Montée au 2^e palier	69,1	96
2^e 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 bêche à eau chaude est déjà disponible à une température plus élevée que nécessaire¹. La station CIP (Clean In place) effectuant ces nettoyages réalise donc un mélange entre les eaux en provenance des deux bêches.

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] :

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

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 ($1,04 \text{ kg}/\text{dm}^3$)
- c : capacité de chaleur spécifique du liquide en fermentation ($3,979 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
- $\Delta\delta$: 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 plato² 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
$E_{\text{montée}}$	40 MJ
P_{maintien}	308 W
$P_{\text{montée}}$	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 néanmoins 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 bache 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 ($\lambda = 0,0035 \text{ W/mK}$) minimum est à prévoir.

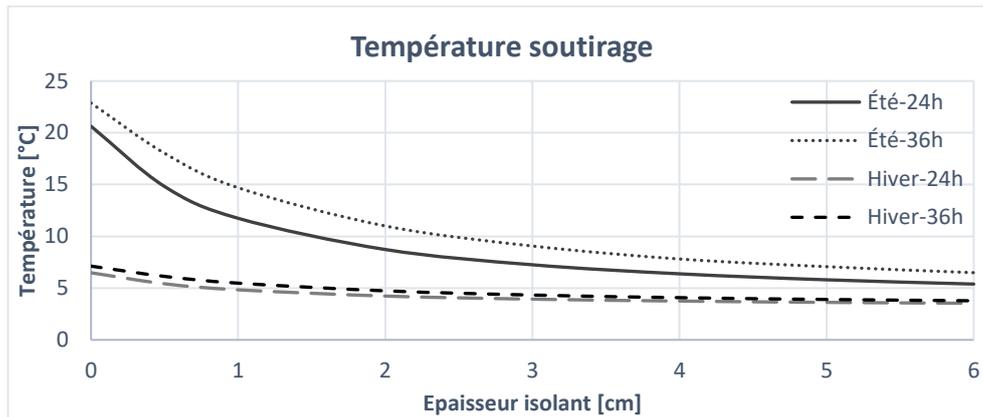


Figure 1 : Epaisseur d'isolant cuve de soutirage

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 : $c_p = 3979 \text{ J/kg K}$;
- 6000 bouteilles en verre : $c_p = 720 \text{ J/kg K}$ et masse de 0,241 kg/verre ;
- 250 casiers en plastique : $c_p = 1900 \text{ J/kg K}$ 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 m³/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 bûche 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 bûche 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 bêche à eau chaude au démarrage du brassage
- V_f : volume final dans la bêche 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.

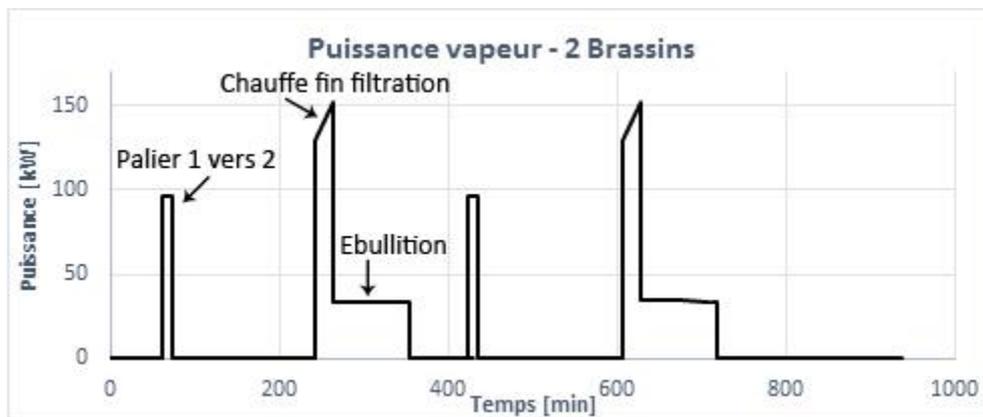


Figure 2 : Puissance vapeur

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 m³ 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 bêche à eau froide de 4 m³ est suffisante.

4.3. Bêche a eau chaude

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

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

La figure 3 montre l'évolution de la quantité d'eau chaude dans la bêche 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.

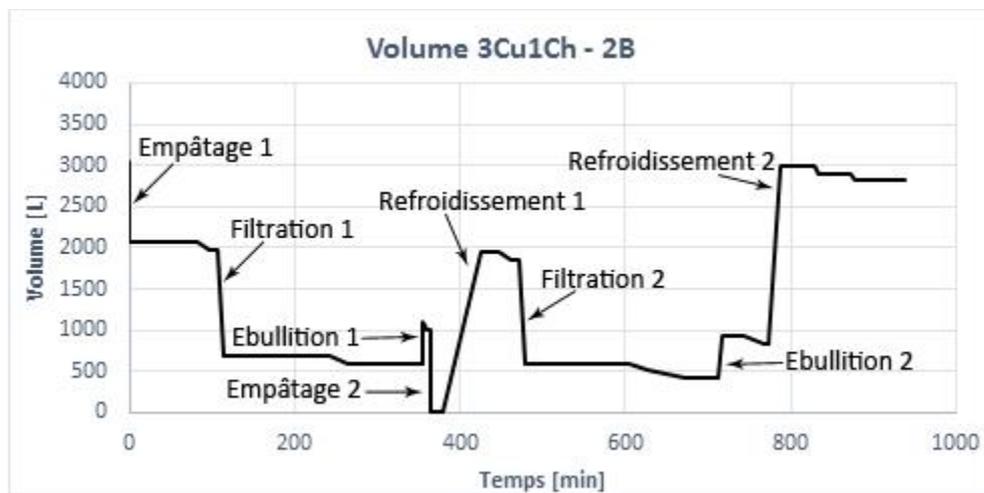


Figure 3 : Volume bêche à eau chaude 3Cu1Ch-2B

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.

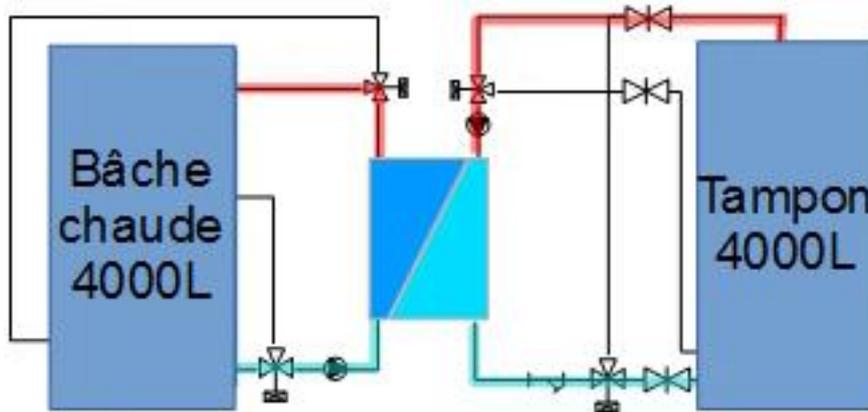


Figure 4 : échange bûche tampon : préchauffage

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 bûche, 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 $1 \text{ m}^3/\text{h}$. 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 ;
- Bûche à eau chaude et bûche 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] PYPART, 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-brauda-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.