

CVC

CONDITIONNEMENT D'AIR

CHAUFFAGE

VENTILATION

LE DOSSIER DES CLIMATICIENS

www.aicuf.org

Juin 2021

Économies d'énergie dans l'industrie

EXTRAIT
DU N° 912
DE CVC



Association des ingénieurs
et techniciens en climatique
ventilation et froid



Économies d'énergie dans l'industrie

Dossier coordonné par José NAVETEUR et Pierre PICARD (membres AICVF et du comité de la revue)

L'industrie représente environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre de la France. La décarbonation de l'industrie et sa transition énergétique doivent être accélérées pour répondre à l'urgence des enjeux environnementaux, climatiques et à la limitation des ressources.

D'autant plus que ces enjeux s'inscrivent dans la perspective des 80% de réduction des émissions

industrielles à l'horizon 2050 affichés dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Ce dossier présente plusieurs techniques et opérations qui ont été mises en oeuvre dans des secteurs variés de l'industrie. Est également présentée l'association ALLICE, qui a été créée afin d'accélérer la mise en oeuvre de l'efficacité énergétique et le développement d'une industrie bas-carbone compétitive.

ALLICE : une nouvelle alliance pour accélérer la décarbonation de l'industrie

→ Alliance dédiée à l'efficacité énergétique et à la décarbonation de l'industrie, ALLICE a pour vocation d'accélérer l'innovation et de faire émerger des solutions nouvelles, en rassemblant tous les acteurs : de l'offre, de la demande, les prescripteurs, les centres de compétences et de recherche, les investisseurs et financeurs.

Vocation et objectifs d'ALLICE

La **décarbonation de l'industrie et sa transition énergétique** doivent être accélérées pour répondre à l'urgence des enjeux environnementaux, climatiques et à la limitation des ressources. Pour cela, il est indispensable de mobiliser tous les acteurs - industriels exploitants, offreurs de solutions, prescripteurs, énergéticiens, centres de recherche - dans une approche transversale à tous les secteurs, afin de faciliter le transfert de technologies et de conduire des projets enrichis par la diversité des parties prenantes.

La création **d'une structure d'animation dédiée, neutre, facilitatrice des échanges, capable de rassembler des acteurs aujourd'hui dispersés** et tenant compte de la dimension économique de la filière, répond à cet impératif : c'est ainsi qu'est née **ALLICE (Alliance Industrielle pour la Compétitivité et l'Efficacité Énergétique)** en juillet 2018, à l'initiative du CETIAT, associé au CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques), au CTCPA (Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles) et ENEA Consulting. Les ont rejoints en 2020 le CTIF (Centre Technique Industriel de la fonderie, métallurgie et transformation des métaux et fonderie) et le CTMNC (Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction).

ALLICE est labellisée projet pilote par l'Alliance Industrie du Futur, soutenue par l'Agence de la transition écologique (ADEME) et par la Direction Générale des Entreprises (DGE) du Ministère de l'Economie et des Finances.

Un tournant stratégique

L'année 2020 a marqué un tournant stratégique pour les industriels : **leurs actions de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES**, auparavant largement incitées par des mesures réglementaires, deviennent désormais des leviers clés de leur compétitivité et de leur pérennité :

- Tout d'abord, **la prise en compte de la composante carbone** de leurs produits est aujourd'hui imposée aux industriels par leurs clients : entrer dans une démarche de **décarbonation des procédés** devient un impératif

pour remporter de nouveaux marchés.

- Ensuite, **les axes du plan France Relance**, en réponse aux conséquences économiques de la crise sanitaire, favorisent largement les opérations visant à **gagner en efficacité et à s'orienter vers un mix énergétique moins carboné**.

De fait, l'intérêt des actions initiées par l'association ALLICE a été renforcé. Le modèle économique de cette SAS repose en grande partie sur des adhésions des acteurs de l'offre, de la demande et des prescripteurs. Ces cotisations permettent de **réaliser des études collectives choisies par les adhérents** et dont les résultats, qu'ils évaluent, leur sont réservés. Cette **mutualisation des financements** permet aux adhérents d'avoir accès à un nombre d'études bien supérieur à ce qu'ils pourraient réaliser avec un budget individuel. Certaines actions ont pour objectif de valoriser ou représenter la filière, elles sont alors ouvertes à l'ensemble des acteurs de la décarbonation de l'industrie, y compris s'ils ne sont pas adhérents.

Ressources

Un écosystème de partenaires permet un accompagnement à différents niveaux :

- **Institutionnels et financiers** : l'ADEME et la DGE
- **Animation et valorisation de nos travaux**
 - L'ATEE, par exemple pour faire émerger de nouvelles Fiches d'Opérations Standardisées pour l'industrie
 - Des pôles de compétitivité et organismes d'animation : le PEXE, Axelera, Tenerrdis
 - Des investisseurs et organismes de financement comme InnoEnergy, la branche opérationnelle de l'Institut européen d'innovation et de technologie
- **Expertise scientifique et académique** :
 - Le CEA Liten, présent dès la création d'ALLICE
 - D'autres centres de recherche sollicités en fonction des projets à mener pour leur expertise précise : IEA, Mines ParisTech, CNRS, GT Energie de la Société Française de Génie des Procédés, IFRF (International Flame Research Foundation), ANCRE (Alliance Nationale de Coordination

>>>



© Chris LeBoutillier

- >>> de la Recherche pour l'Energie)
- Des laboratoires académiques et universitaires : LGC (Laboratoire de génie chimique), LRGP (Laboratoire réactions et génie des procédés), LAGEPP (Laboratoire d'Automatique et de Génie des procédés)

Ce réseau de partenaires n'est pas figé, mais évolue selon les expertises à mobiliser.

L'objectif d'ALLICE est d'accélérer **la mise en œuvre de l'efficacité énergétique et le développement d'une industrie bas-carbone compétitive**. Pour l'atteindre, les activités sont déployées autour de deux axes complémentaires :

- **La dimension « innovation technologique »** : afin de favoriser l'émergence de solutions nouvelles par la réalisation de **travaux collectifs partagés par tous ses adhérents**. Sur la base de ces derniers, des projets collaboratifs sont initiés entre un nombre plus restreint d'acteurs, en facilitant la mutualisation des besoins, des efforts de recherche et des financements ;
- **La dimension « animation et valorisation de la filière »** : afin de soutenir **la structuration d'une offre performante** en encourageant les coopérations transversales entre les secteurs industriels, le partage de bonnes pratiques et en valorisant les avancées technologiques auprès des autorités compétentes ou lors de différentes manifestations techniques.

Les ressources suivantes sont accessibles pour les membres :

- Études, technico-économiques et feuilles de route
- Etats de l'art de technologies
- Un bulletin de veille mensuel
- Des ateliers techniques
- Des webinaires
- Un congrès biennal (voir encadré)

Christophe DEBARD
Président exécutif, ALLICE



Le premier Congrès « Ensemble, vers l'industrie bas-carbone »

La décarbonation de l'industrie étant un levier fort de relance, ALLICE souhaite aujourd'hui ouvrir ses activités largement pour faire bénéficier un plus grand nombre d'acteurs de ses travaux et les enrichir en identifiant toutes les technologies d'avenir pour le secteur. C'est la raison du premier congrès biennal « Ensemble, vers l'industrie bas-carbone » organisé par ALLICE les 21-22 Septembre 2021 à Paris (et possibilité d'accès à distance).

Le programme s'articule autour des sessions suivantes :

1. La décarbonation de l'industrie : enjeux et perspectives à horizon 2050
2. Industrie zéro carbone ; exploiter tous les leviers et optimiser leur synergie
3. Quelles innovations pour répondre aux défis de demain ?
4. Financement et couverture des risques : la pérennité des modèles économiques, levier incontournable de la décarbonation
5. Faciliter l'émergence de l'innovation dans l'industrie
6. Industrie 4.0 : accélérer la décarbonation avec les outils numériques, la data et les modèles prédictifs
7. L'usine dans son territoire
8. La décarbonation de l'industrie : quels enjeux pour quels secteurs ?

Pour s'inscrire : www.alliance-allice.com

La récupération de chaleur dans les buées industrielles

L'ADEME évalue le gisement de chaleur fatale industrielle en France à 109 TWh, soit 36% de la consommation de combustibles de l'industrie rejetée sous forme de chaleur. La moitié de ce gisement concerne deux secteurs : l'agro-alimentaire et la chimie. L'Alliance ALLICE a missionné une évaluation des techniques disponibles et des contraintes de récupération.

La récupération de chaleur fatale n'est souvent pas prise en compte dans les procédés thermiques dans le secteur de l'industrie compte tenu de sa complexité. Or les méthodologies et les technologies ayant évolué depuis quelques années et forts du soutien important du Fonds Chaleur, des projets de récupération de chaleur se sont mis en place. C'est pourquoi l'Alliance ALLICE (Alliance Industrielle pour la Compétitivité et l'Efficacité Énergétique) dont cette thématique fait partie de ses axes de travail prioritaires, a missionné en 2019 son partenaire le CETIAT pour réaliser une étude [1] sur la récupération de chaleur dans les buées industrielles. Cette étude, menée avec le Cetim (Centre technique des industries mécaniques) et le CTCPA (Centre technique de la conservation des produits agricoles) a eu pour objectif d'évaluer les techniques et les contraintes de récupération ainsi que les opportunités de projets liées à cette opération.

Des cas d'études représentatifs de l'enjeu de récupération de chaleur fatale

Le secteur agro-alimentaire et celui de l'industrie mécanique ont constitué les cibles de ce travail, chacun intégrant des procédés thermiques (fours biscuitiers, étuve de séchage avant peinture...) représentant un enjeu important de récupération de chaleur.

Dans ce contexte, six cas d'étude ont été sélectionnés afin d'identifier les opportunités, les freins et les leviers d'actions pour ces procédés : four biscuitier, sécheur cylindre purée de pommes de terre, four de boulangerie, blancheur/cuiseur, traitement de surface, séchage de pièces métalliques.

Plusieurs critères ont été pris en compte pour ces cas d'études : la température du procédé thermique ; le fonctionnement en continu ou en batch ; le potentiel de récupération ; la valorisation sur le procédé ou sur un autre équipement du site industriel ; enfin, les contraintes de fonctionnement (cadre réglementaire, intérêt en termes d'hygiène et >>>

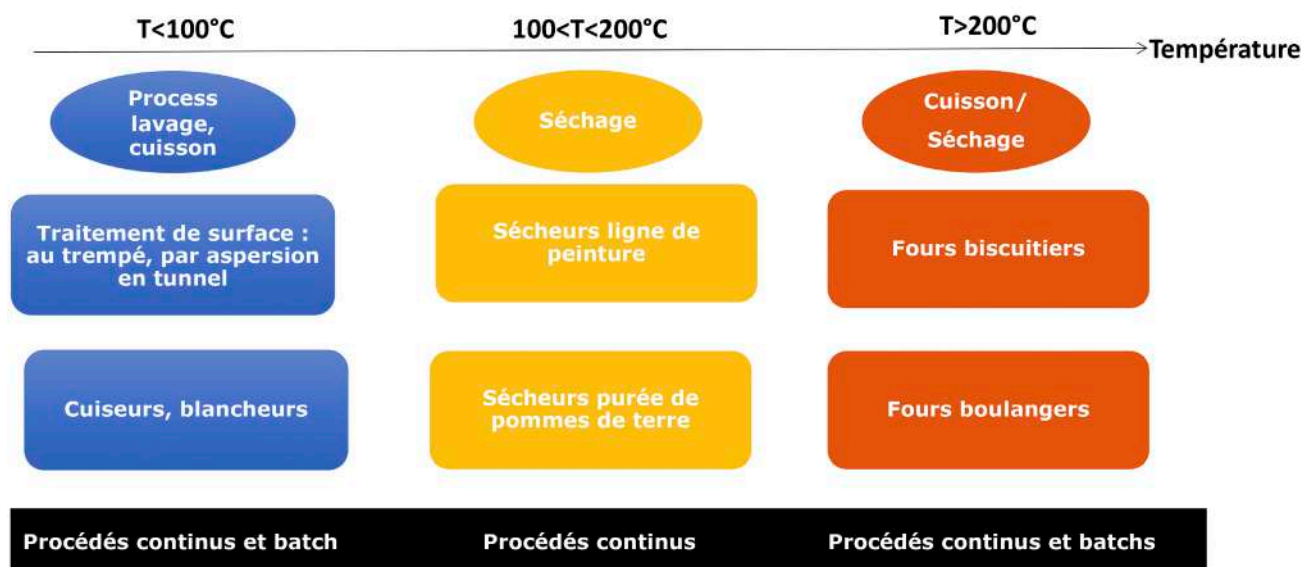


Figure 1 : les cas d'étude sélectionnés

>>> de confort des salariés, nature de l'effluent). Les deux exemples présentés ci-après précisent les intérêts et contraintes d'un projet de récupération de chaleur, avec l'objectif d'éclairer sur les éventuels axes de travail à mener, pour favoriser le déploiement de ce type de projets.

Cas d'étude N°1 : le sécheur cylindrique



Figure 2 : exemple de sécheur cylindre (Fabricant Andritz Gouda)

Les installations de séchage de purées de pomme de terre fonctionnent 24h/24, avec des tonnages de matières premières entrantes et par conséquent des débits d'eau à évacuer très élevés. Ci-après quelques ordres de grandeur fixant les idées (sans être exhaustif) :

- Séchage par cylindre chauffant
- Type de chauffage : vapeur (température de 150 °C)
- Production de 20 000 t/an de flocons
- Humidité produit : 77% à 5% après séchage
- Température des buées (avant dilution) : 100 °C
- Débit air extrait séchoir : 30 à 35 000 kg/h
- Débit eau à évacuer : 650 kg/h

Ces installations sont en nombre limité en France. Cependant les conclusions de l'étude sont applicables à des usines en Europe.

Le scénario de fonctionnement

Les caractéristiques de fonctionnement d'un sécheur cylindrique de purée de pommes de terre et des buées en sortie de ce sécheur sont indiquées en Figure 2. La problématique de ventilation du procédé est forte d'une part pour assurer l'extraction de l'humidité et d'autre part du fait de son interaction avec la ventilation de l'atelier. Le principe de fonctionnement de cette ventilation est synthétisé ci-après. Les débits d'air induits sont importants afin d'évacuer l'eau extraite de la purée de pommes de terre. Ceci réduit fortement le gisement de chaleur valorisable sur ce procédé, bien que la température des buées évaporées soit de l'ordre de 100 °C. La température résultante après dilution des buées est faible et inférieure à 30 °C.

L'analyse de rentabilité

Les solutions techniques portent sur la valorisation de la chaleur pour le préchauffage d'air neuf de cen-

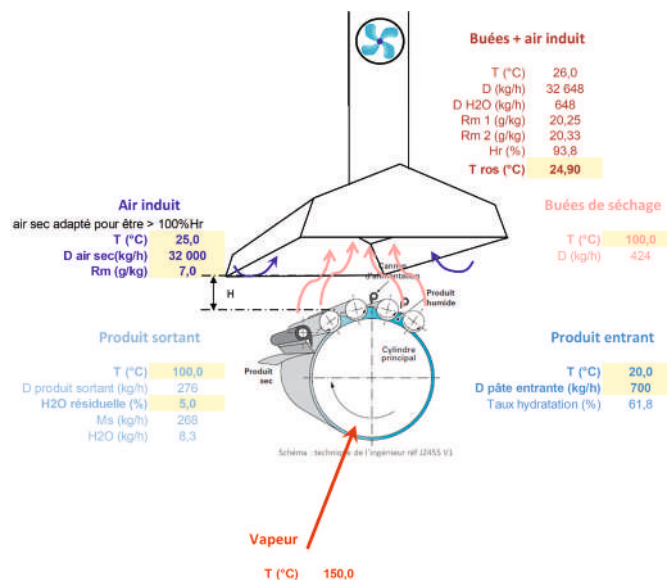


Figure 3 : principe de fonctionnement de la ventilation du procédé (source CETIAT)

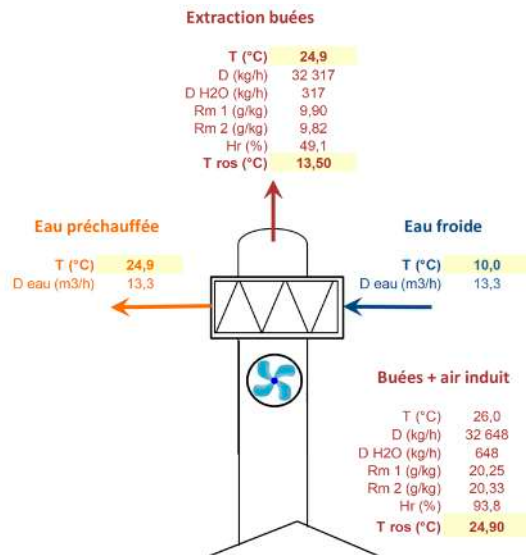


Figure 4 : Principe de la récupération de chaleur - préchauffage d'ECS (source CETIAT)

trales de traitement d'air (échangeur condenseur, valorisation durant la période de chauffage) et pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire (récupération pendant toute l'année). Le point de fonctionnement nominal est indiqué en Figure 4. En prenant en compte un coût du gaz naturel de 40 €/MWh PCS, les éléments énergétiques et financiers sont les suivants.

Préchauffage d'air neuf CTA :

- Économie de gaz naturel : 478 MWh PCS/an
- Gains financiers : 19 k€/an
- Investissement (matériel + installation) : 100 k€
- Maintenance : 2,0 k€ /an
- Temps de retour brut sur investissement : 5,3 ans

Préchauffage d'ECS :

- Économie de gaz naturel : 1951 MWh PCS/an 1
- Gains financiers : 78 k€/an
- Investissement (matériel + installation) : 150 k€
- Maintenance : 2,0 k€ /an
- Temps de retour brut sur investissement : 1,9 ans

La synthèse



Figure 5 : la synthèse du cas d'étude (source CETIAT)

Cas d'étude N° 2 : le préchauffage des bains de traitement

Pour cette étude, nous retenons les traitements de surface par aspersion en tunnel. Ce type de traitement est très utilisé dans les lignes de peinture pour le dégraissage et la phosphatation. Les tunnels de nettoyage en ligne par aspersion peuvent, à priori, bénéficier des mêmes conclusions.

On peut noter des disparités de caractéristiques des buées en fonction des installations. Certaines présentent des débits trop importants: l'aspiration majoritaire d'air issue de l'atelier limitant fortement les récupérations d'énergie. Avant d'envisager des récupérations thermiques, il est nécessaire de s'assurer que le débit d'extraction est optimisé.

L'extraction d'air dans un tunnel de traitement de surface par aspersion doit être juste suffisante pour que les buées ne soient pas évacuées dans l'atelier.

L'exemple proposé concerne les tunnels de traitement de surface avant peinture ayant des conditions aérauliques se traduisant, à l'aspiration, par un air saturé en humidité: la température est assez faible mais relativement proche de la température des bains de traitement. Les bains sont dans ce cas chauffés par une chaudière à eau chaude ou des tubes immergés compacts.

Le scénario de fonctionnement

Le schéma (figure 6) présente les conditions retenues et le principe de récupération par pompe à chaleur pour réchauffer le fluide caloporteur sortant des échangeurs présents dans les bains et avant d'être chauffé par la chaudière.

L'analyse de rentabilité

En prenant en compte le rendement de la chaudière, les éléments énergétiques et financiers sont les suivants :

- Économie de gaz naturel : 165 MWh/an soit 6,6 k€/an
- Consommation électrique supplémentaire : 43 MWh/an soit 3,5 k€/an
- Économie totale d'énergie : 122 MWh/an soit 53 MWh/an

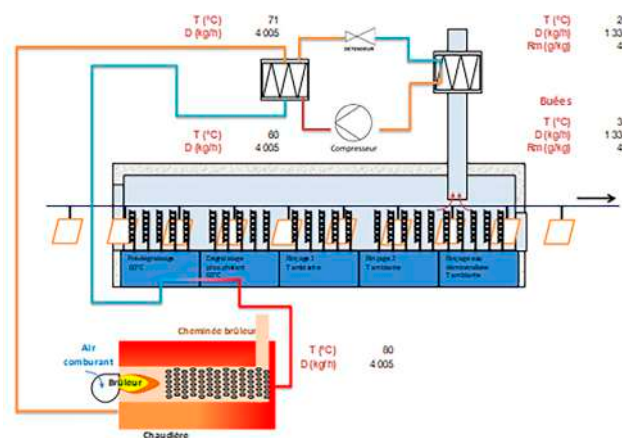


Figure 6 : principe de fonctionnement (source Cetim)

d'énergie primaire

- Gains financiers : 3,1 k€/an
- Investissement (matériel + installation) : 14 k€
- Maintenance : 0,5 k€ /an
- Temps de retour sur investissement : 4,6 ans

On retiendra pour ce cas d'application qu'environ 93 m³ d'eau seront condensés par an. Ces effluents peuvent être gérés de manière différente suivant les installations déjà présentes sur le site. Afin de s'affranchir de la pollution issue des gouttelettes présentes dans le flux d'air, un dévésiculateur doit être installé en amont de l'échangeur. L'eau ainsi récupérée doit être réintégrée aux bains de traitement (des principes actifs sont présents dans cette eau).

L'eau condensée doit être considérée comme toutes les autres eaux industrielles. Si l'eau condensée ne peut être réutilisée sur site, son rejet dans le réseau d'épuration est possible mais soumis à des contrôles réguliers. Ces effluents peuvent aussi être stockés avant envoi dans un centre de traitement agréé ou traités sur site par évapo-concentration. À noter qu'avec un coût du gaz naturel supérieur à 40 €/MWh PCS ou une aide financière de l'industriel, le TRI brut se rapproche de 3 ans. >>>

>>> La synthèse

Enjeux	Intérêts/ contraintes	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Préchauffage d'eau des bains de traitement de surface • TRI de 5 ans (sans subvention) • Duplication possible sur une majorité d'installations chauffées par chaudière externe 	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé continu • Technologie de PAC mature • Gestion des condensats (50-150 m3/an) et traitement spécifique à prévoir 	<ul style="list-style-type: none"> • Financement : faciliter l'aides à des CEE • Maintenance régulière et comptage (IPE)

Synthèse du cas d'étude

Conclusions

Pour les procédés thermiques analysés lors de cette étude, les technologies de récupération applicables sont disponibles et matures. Ce sont principalement des échangeurs de chaleur, valorisant l'énergie sensible et l'énergie latente disponibles dans les effluents. L'offre des constructeurs est actuellement variée et chaque échangeur condenseur peut être dimensionné de façon spécifique en fonction de l'effluent rejeté (corrosif ou pas, chargé en poussières ou pas, etc.).

Les pompes à chaleur (PAC), électriques ou à gaz relèvent le niveau de température des effluents pour rendre la chaleur valorisable sur le site industriel. Les pompes à chaleur dites standards atteignent des niveaux de température de 50 à 70 °C pour les procédés thermiques étudiés. Pour des températures plus élevées (> 80 °C), l'offre des constructeurs s'est développée ces dernières années et propose des équipements assurant une relève jusqu'à 100 °C (PAC HT).

À noter que des prototypes sont en cours de démonstration industrielle en Europe sur la plage 100 °C à 140 °C (PAC THT) et que des travaux de recherche étudient la faisabilité pour des températures supérieures à 140 °C, ce qui ouvre des opportunités d'application très importantes dans l'industrie.

Enfin, on note un intérêt croissant de l'usage de pompes à chaleur sur le procédé de séchage : l'enjeu de récupération de chaleur est important, des références industrielles existent, et des projets de recherche sur des PAC HT/THT en France et en Europe sont en cours, par exemple :

Transpac/EDF, sur un séchoir papetier;
DryF/consortium AIT, sur un séchoir de

briques & tuiles et un séchoir d'amidon;
projet GEA réfrigération, sur des buées d'atomiseur.

Youmna ROMITTI
CETIAT. Responsable pôle
Énergie & Procédés Industriels -
Direction des Études et de la Formation



1. Sous réserve d'un besoin en ECS correspondant à la chaleur disponible. Il s'agit ici d'une hypothèse de calcul, les besoins en ECS n'ayant pu être recensés dans le cadre de cette étude. Si ces besoins sont plus faibles que ceux estimés, le TRI brut de cette solution sera plus élevé.

Bibliographie

[1] Étude réalisée pour le compte d'ALLICE par : Youmna ROMITTI et Claire LOTTEAU (CETIAT), Arnaud GIBERT (Cetim), Nicolas BELAUBRE (CTCPA)

Un retour d'expérience concluant

Le CETIAT a contribué au succès d'une solution technique de récupération de chaleur fatale mise en œuvre par la société SODELEG. Ce producteur d'oignons déshydratés pour l'industrie agroalimentaire, s'est lancée dans une stratégie d'économie d'énergie et de décarbonation de son site de production.

L'entreprise a notamment mis en place un système de récupération de chaleur fatale intégrant une PAC sur les effluents du préchauffeur, placée en amont de quatre condenseurs cycloniques pour refroidir et filtrer ses effluents. Cela a permis de fournir de l'air à 50 °C alimentant le four de déshydratation principal via une centrale de traitement d'air. Cette solution technique a été élaborée par la société CLAUGER, en collaboration avec le CETIAT.

Bénéfices (Source colloque CETIAT FIRE 2020) :

- gain énergétique de 6 650 MWh/an ;
- gain d'émissions de CO2 de 1 556 tonnes ;
- réduction des émissions de COV (désormais brûlées dans le four), des odeurs et du niveau sonore ;
- temps de retour de 5 à 6 ans (incluant la subvention du Fonds Chaleur).

Les Centrales de Traitement d'Air : un gisement significatif d'efficacité énergétique dans l'industrie

→ Depuis fin 2019 EDF propose à ses clients professionnels un service d'efficacité énergétique pour leurs centrales de traitement d'air (CTA). Outre un diagnostic énergétique de leur installation, ce service leur ouvre aussi des perspectives chiffrées d'économies d'énergie qui vont parfois jusqu'à 50% des consommations globales...



Guide
ADEME-ASPEC-EDF
sur l'efficacité énergétique
en salles propres

Les centrales de traitement d'air (CTA), très présentes dans l'industrie, conditionnent l'air soufflé en température (T) et aussi parfois en humidité relative (HR). Leurs consommations énergétiques sont d'autant plus élevées que les débits sont importants, que les plages de consignes sont strictes, et que leur degré de filtration est poussé.

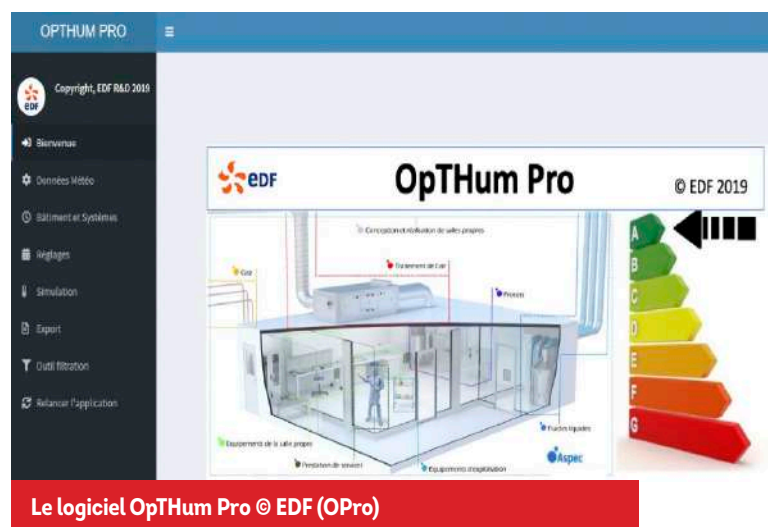
Une démarche initiée en salles propres

C'est au travers des salles propres (SP) – autrefois, et souvent encore appelées salles blanches – qu'EDF s'est d'abord focalisé sur la consommation des CTA [1], car elles sont très énergivores : 4 TWh/an pour plus de 3 millions de m², soit une Intensité Énergétique de 1 200 kWh/m²/an au sens de la norme NF EN ISO 14644-16 de juin 2019 sur les SP [2].

Différents retours d'expérience ont démontré l'impossibilité d'avancer un bilan annuel des consommations pour bon nombre d'installations [3]. En effet, si la partie électrique de la consommation de la ou des CTA se mesure facilement (ventilation), la partie thermique (chauffage et refroidissement) est souvent commune à plusieurs utilités, avec une (ou des) chaudière(s) et un (ou des) groupe(s) froid(s) en tête des réseaux d'eau chaude et froide. Et si leurs consommations globales sont bien connues, les répartir ensuite sur chaque CTA est souvent difficile, car rares sont les compteurs d'énergie installés sur les réseaux d'eau, et encore plus rares ceux régulièrement relevés et étalonnés.

OpTHum Pro (OPro) : un logiciel spécifique pour les CTA

Partant de ce constat, EDF a développé un outil logiciel OpTHum Pro © EDF qui Optimise les consommations énergétiques des CTA pilotées en Température (T) et Humidité relative (HR) des clients Professionnels d'EDF. Ses calculs horaires se basent sur les débits d'air, les consignes (T, HR) des CTA avec des météo intégrant elles aussi T et HR.



Le diagramme psychrométrique a été découpé en neuf zones pour agir sur l'air qui traverse la CTA : chauffer, humidifier, refroidir, déshumidifier. Par exemple, la zone 9 – zone de confort repérée en jaune sur la Figure 3 – correspond au polygone de confort : une zone neutre dans laquelle la CTA n'effectue aucune action. Tout le contraire de la zone 8 – située au-dessus – où la CTA enchaîne une action de chauffage suite à un refroidissement/déshumidification, pour aboutir à la consigne (T, HR).

>>>

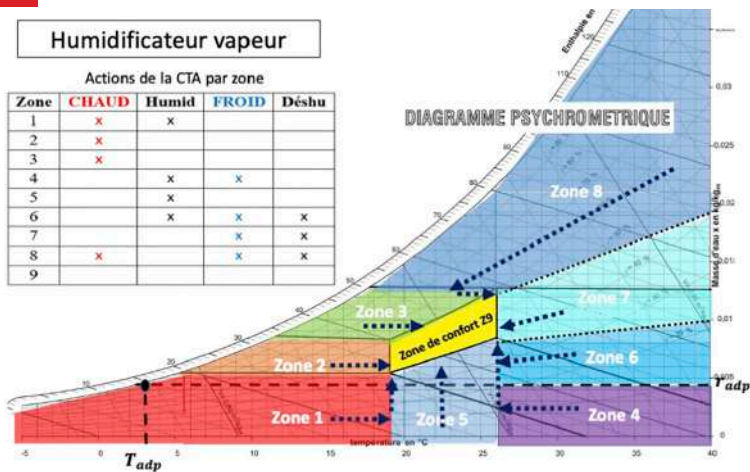


Figure 3 : Neuf zones pour traiter l'air qui traverse la CTA

Les situations les plus courantes sont traitées avec deux types d'humidificateurs (adiabatique ou vapeur) et avec deux configurations de CTA : soit une CTA unique pour l'air neuf et l'air repris, soit 2 CTA dont une est spécifique à l'air neuf.

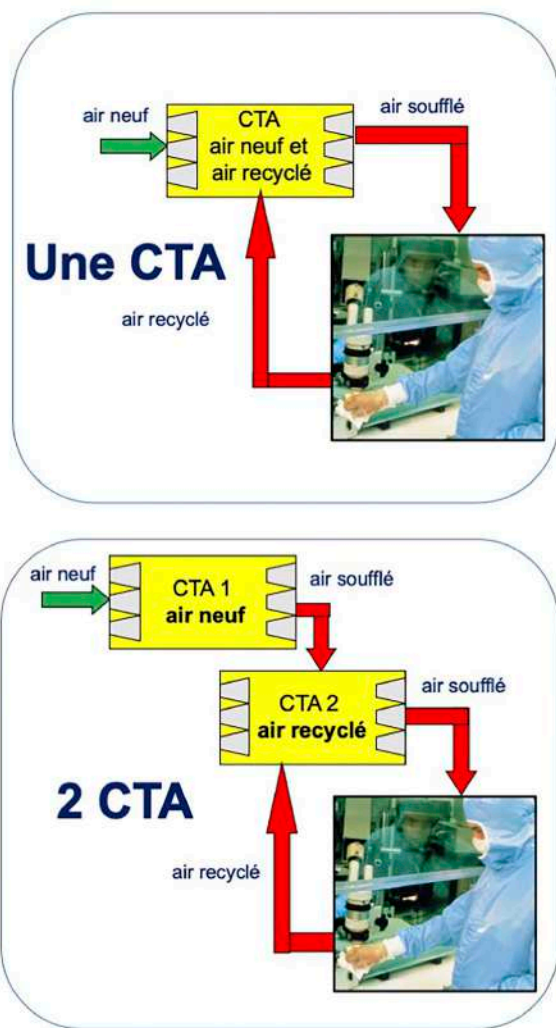


Figure 4 : Configurations courantes de CTA rencontrées

Un exemple industriel d'utilisation d'OPro

OPro a servi récemment à dimensionner et étudier les consommations d'un moyen expérimental d'EDF R&D : le laboratoire ZEPHYR, qui aura vocation à répondre à différentes problématiques de la ventilation nucléaire (de la conception à la déconstruction), dans le cadre du programme « grand carénage » dont le but est de prolonger de 10 ans (voire 20) la durée de vie des centrales nucléaires françaises.



Figure 5 : La CTA et le local du laboratoire ZEPHYR modélisés

Ce laboratoire disposera de multiples configurations. Les résultats présentés ici concernent le « local polyvalent » destiné à des tests avec traceurs gazeux, modélisé avec une CTA unique, en tout air neuf, sans apport thermique, avec un humidificateur vapeur pour reproduire des conditions de bord de mer.

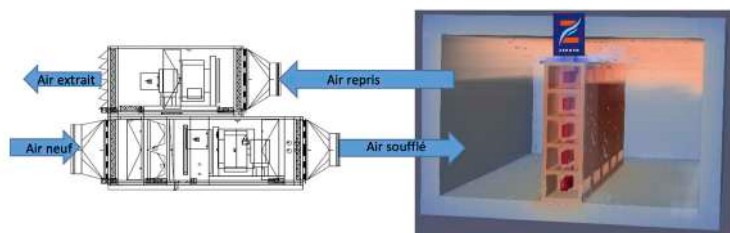
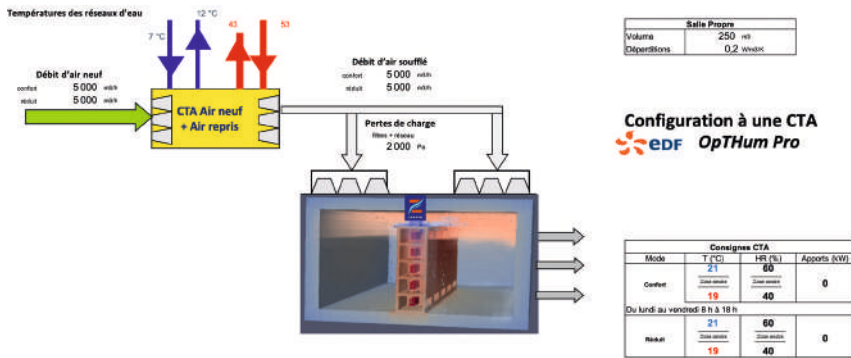


Figure 6 : Une configuration à une CTA, en tout air neuf

L'étude se base sur une pompe à chaleur sur nappe (COP de 4) pour le réseau d'eau chaude et d'eau froide, du fait que le site est situé sur l'île de Chatou (78) entourée par la Seine, et les valeurs par défaut du logiciel sont utilisées pour toutes les données non disponibles au stade de la conception.

Les résultats horaires, tout au long de l'année 2020, montrent que les consignes minimales et maximales fixées (T, HR) sont respectées, et se calent plutôt sur (19°C, 40%) en hiver et sur (21°C, 60%) en été (Figure 8).

L'analyse des consommations électriques annuelles (figure 9) de la CTA montre que la ventilation est prédominante, puis suivent le chauffage (du fait du tout air neuf sans apport), l'humidificateur vapeur et la climatisation. L'Intensité Énergétique [2] de cette installation est de 994 kWh/m²/an soit



Un service de diagnostic thermique et d'optimisation des CTA

A l'image de l'exemple ci-dessus, et depuis fin 2019, une vingtaine d'experts EDF efficacité énergétique formés sur OPro proposent ce service à leurs grands clients industriels et tertiaires. Après avoir « calé » leurs hypothèses par rapport aux mesures globales, ils réalisent d'abord un diagnostic de l'installation de CTA dans son état

actuel. Puis ils l'optimisent avec différentes stratégies de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE) [4] :

- intermittence des consignes en dehors heures ouvrées (le soir, le week-end),
- baisse des débits d'air neuf et des taux de brassage (possible hors occupation sans affecter la maîtrise des contaminations)
- free-cooling (utiliser plus d'air froid extérieur lors des besoins de froid)

Toutes ces **économies** étant chiffrées, l'industriel peut ainsi les prioriser. Et si des investissements sont nécessaires, après consultation des professionnels de la CTA, il est alors en mesure de cibler ses travaux sur ceux ayant le meilleur temps de retour sur investissement.

Parmi les **premières références industrielles** citons entre autres des unités de production du Centre Spatial Guyanais de Kourou, la salle propre du Centre Spatial Universitaire de Montpellier, une étude générique dans le domaine de la santé [5], un Data Center... et différentes **études en cours** sur les salles propres dans le domaine de la Défense, de la Pharmacie... Cette dynamique devrait encore s'accélérer au fur et à mesure de l'appropriation de la norme ISO sur les salles propres [2].

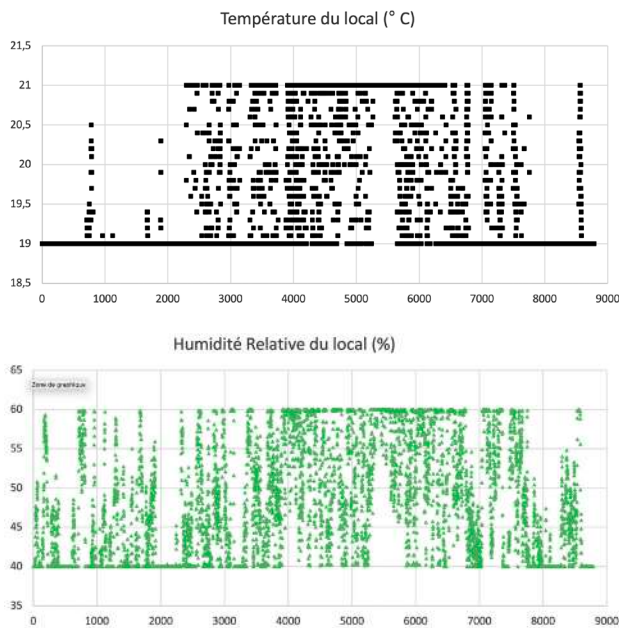


Figure 8 : Évolution (T, HR) tout au long de l'année 2020

20% de moins qu'une SP moyenne, mais cohérente avec les plages de consignes appliquées et le cas CTA air neuf. Le logiciel fournit aussi l'évolution de la température des réseaux d'eau chaude et froide tout au long de l'année, comptabilise le temps passé par la CTA dans chacune des 9 zones pour chauffer, humidifier, refroidir, déshumidifier... autant d'éléments utiles à la compréhension du fonctionnement réel de la CTA.

Répartition des consommations annuelles électriques (résultats OPro)

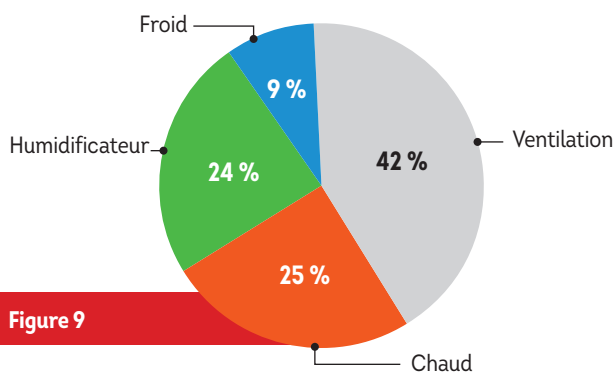


Figure 9

Bibliographie

- [1] Guide ASPEC-ADEME-EDF. Performance énergétique en ambiances propres. Salles propres, environnements maîtrisés & zones de confinement. 2016.
- [2] ISO 14644-16. Salles Propres et environnements maîtrisés apparentés. Efficacité énergétique dans les salles propres et les dispositifs séparatifs. 2019.
- [3] Retour d'expérience terrain sur la consommation énergétique et la maîtrise de la demande en énergie (MDE) en salles propres. EDF R&D JP Rignac. Paris ASPEC ContaminExpo 2017.
- [4] F Salanson, JP Rignac. Estimation de gains MDE en salles propres (pharmacie et microélectronique) avec le logiciel OpTHum Pro © EDF. Contamin@Lyon, mars 2018, ASPEC.
- [5] F Salanson, JP Rignac. 25% de gains énergétiques simulés sur 5 salles propres en établissements de santé. Salles Propres N°118, page 58 à 62. Congrès ContaminExpert, 2019, ASPEC.

Frédéric SALANSON EDF Direction Marketing Expertise des Offres (31) responsable HVAC France Business To Business (frederic.salanson@edf.fr)

Jean-Paul RIGNAC EDF Recherche & Développement (77) membre du conseil scientifique de l'association pour la prévention et l'étude de la contamination en salles propres (ASPEC)



➔ MOTEURS ÉLECTRIQUES À VITESSE VARIABLE ➔ CEE

L'approche système appliquée aux moteurs électriques accroît le potentiel d'efficacité énergétique

➔ Les moteurs représentent plus de 70 % de la consommation d'électricité dans l'industrie. La mise en place des technologies de moteurs efficaces est encouragée par le dispositif des Certificats d'Economie d'Energie (CEE) avec des résultats convaincants. Les experts travaillant dans ce domaine montrent qu'il est possible d'économiser encore plus d'énergie avec une approche globale du système par rapport à une approche unitaire en appliquant la fiche standard CEE référencée IND-UT-136.

Les systèmes motorégulés : une approche efficace pour réduire les consommations

En France, la consommation des moteurs électriques est de 83,7 TWh ce qui représente 70 % de la consommation électrique totale de l'industrie en France en 2014. Il existe une grande variété d'utilisation des moteurs. La nouvelle approche systèmes motorisés dans le dispositif CEE se focalise sur 4 applications transverses : pompes, ventilateurs, compresseurs de froid et d'air comprimé.

Les compresseurs de froid sont principalement utilisés dans le secteur des produits alimentaires et des boissons et dans le secteur de la chimie fine pour la conservation des produits. Les compresseurs d'air et les ventilateurs sont utilisés dans tous les secteurs et dans un large éventail de processus. Les pompes sont principalement utilisées dans les secteurs de la chimie de base, du papier, ainsi que dans l'agroalimentaire dans les processus à fluides continus.

Bien que le dispositif des CEE appliqué aux moteurs ait montré son efficacité, il est possible d'économiser plus d'énergie en combinant le dispositif CEE avec une approche système en appliquant la fiche standard CEE référencée IND-UT-136.

L'approche système moto-régulé consiste à analyser le besoin, à définir les exigences fonctionnelles du système et à mettre en place l'ensemble des équipements et algorithmes nécessaires à un fonctionnement optimisé du système. Un système moto-régulé comprend :

- un moteur et sa transmission performante ;
- une application entraînée par ce moteur (pompe, ventilateur, groupe de production de froid et compresseur d'air) ;
- un variateur électronique de vitesse ;
- un ou plusieurs capteurs nécessaires à la régulation ;
- une boucle de régulation ;
- un compteur de l'énergie électrique consommée par le système.

De nombreux dossiers sont en cours depuis la publication de

la fiche CEE systèmes motorégulés dans l'arrêté de fin août 2019. Les deux exemples choisis sont représentatifs des cas couramment rencontrés dans la pratique.

Exemple 1 : application du système motorisé sur un ventilateur d'extraction de gaz d'une cabine de peinture de composants de voiture (étude de Nidec Leroy Somer).

Nous allons démontrer l'intérêt d'installer un moteur autorégulé (à vitesse variable) sur un ventilateur d'extraction des gaz d'une cabine de peinture de composants de voiture chez un fournisseur automobile.

L'analyse de la demande a montré que l'utilisateur final souhaitait améliorer la consommation d'énergie du ventilateur de la cabine de peinture qui fonctionne 7104 h par an. Le débit d'air est contrôlé par un registre mécanique ouvert à 75 %. La cabine de peinture nécessite un débit d'évacuation de 12 m³/s

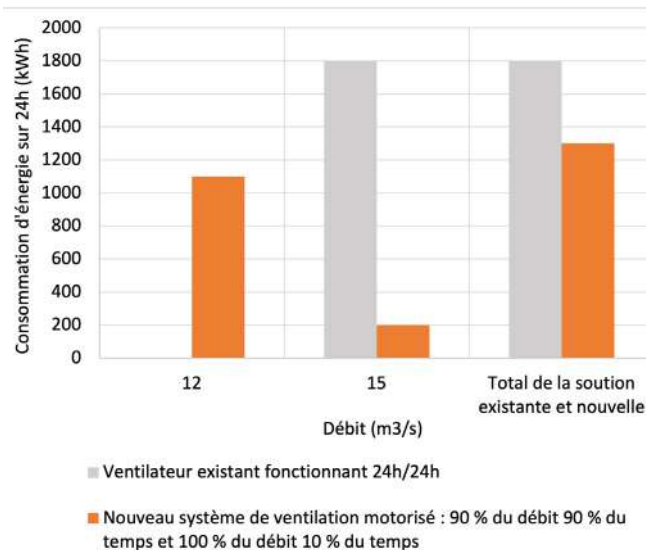


Figure 1 : Résultats de simulation ESA

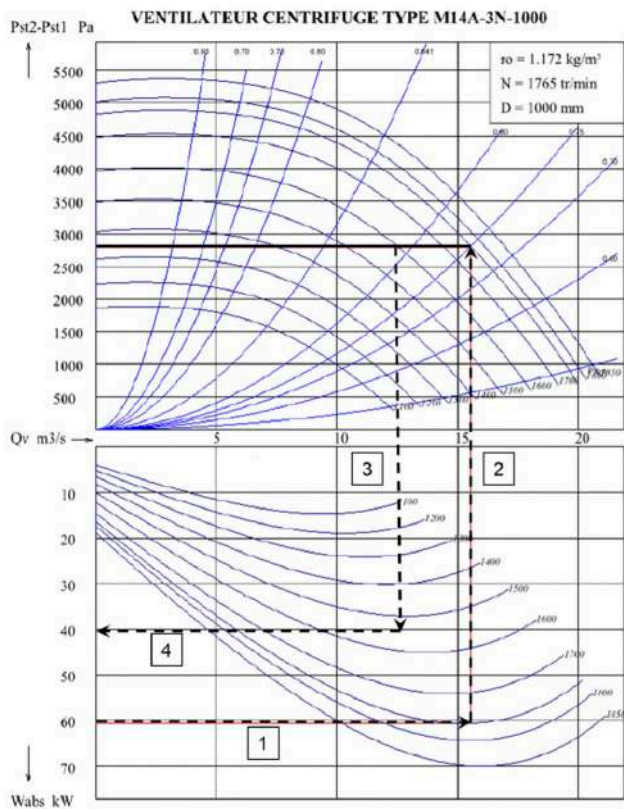


Figure 2 : Graphique du ventilateur FEVI, réf : M14A-3N-1000, pression barométrique = 101325 Pa. Vitesse maximale = 1850 tr/min, performances aérauliques selon la norme ISO5801.

avec une pression statique maintenue constante à 2800 Pa 90 % du temps. La possibilité d'augmenter le débit jusqu'à 15 m³/s pendant 10 % du temps est requise. Les exigences fonctionnelles du système et le dimensionnement des équipements à mettre en place sont déterminées. Des mesures de puissance et la détermination du point de

fonctionnement du ventilateur sont réalisées en amont sur le ventilateur existant.

Pour obtenir le débit requis de 15m³/h, la consommation d'énergie mesurée avec un analyseur de réseau indique une valeur constante de 66 kW.

La consommation initiale et finale du ventilateur sur 24h sont donnés en figure 1 [cf Figure 1]

Le point de fonctionnement théorique est estimé sur les abaques du ventilateur [cf Figure 2]. Les mesures permettent de préciser ces estimations. Le point de fonctionnement existant pour le débit requis de 15 m³/s donne une puissance théorique consommée de 60 kW, valeur légèrement différente des 66 kW mesurés, une vitesse du ventilateur de 1750 tr/min et une pression statique de 2800 Pa. Le nouveau point de fonctionnement est obtenu avec la même pression de fonctionnement, avec un débit réduit à 12 m³/s et une vitesse de rotation du ventilateur de 1550 tr/min. La nouvelle demande de puissance électrique du système entraîné par le moteur du ventilateur est donc réduite théoriquement de 20 kW et celle mesurée de 26 kW. Le rendement du ventilateur passe de 75 % à 80 %. A cette nouvelle vitesse de rotation, la puissance diminue jusqu'à 33%.

En outre, le moteur de ventilateur asynchrone IE1 existant est remplacé par un moteur synchrone IE5, plus économe en énergie, ce qui permet d'économiser environ 5 % au point de fonctionnement. De même, les entraînements par courroie trapézoïdale sont remplacés par un entraînement par courroie crantée, ce qui permet d'économiser environ 5 % de plus. Le contrôle du système de ventilateur entraîné par moteur est obtenu par une boucle de contrôle PID à l'intérieur du convertisseur de fréquence. Une sonde de Pitot mesure le débit du flux d'air et le débit de consigne est contrôlé au point de fonctionnement.

Les économies d'énergie sont simulées à l'aide d'un outil numérique appelé Energy Savings Advisor «ESA» qui compare la solution existante avec une ou plusieurs solutions

>>>

	VENTILATEUR EXISTANT	NOUVEAU SYSTÈME MOTORISÉ DE VENTILATEUR	ENERGIE ÉCONOMISÉE (MWh/an)	CO ₂ (t/an)	COÛT (%)
Moteur électrique	Asynchrone IE1 Leroy Somer, ref: LS280SC 75kW - 1467Trmn - 400V - B3	Synchrone IE5 Leroy Somer, ref: 1500 LSHRM 280SD 75kW B3 400VY/460VY/400VDV 50Hz	2,3 (10% du temps) 21,1 (90 % du temps)	0,94	45
Ventilateur	Centrifuge FEVI, ref: M14A-3N-1000	Centrifuge FEVI, ref: M14A-3N-1000			0
Transmission	Courroie multicouches SPB rapport 0,8	Courroie dentée	2,3 (10% du temps) 21,1 (90 % du temps)	0,94	5
Régulateur	Vitesse fixe, Volets mécaniques	Vitesse variable, Variateur de fréquence Leroy Somer, ref: Powerdrive F300-0840I550A10I03AB103 Régulateur PID sur le débit d'air	124,0 (90 % du temps)	4,9	25
Mesure	Non	Tube de Pitot			
Compteur d'énergie électrique	Non	Oui Ref: COUNTIS E40 3PH CT/5A			
Mise en service	-	-			
Economies totales			171	6,8	

Tableau 1 - Les spécifications fonctionnelles du moto-ventilateur existant et du nouveau système de motorisation du ventilateur.

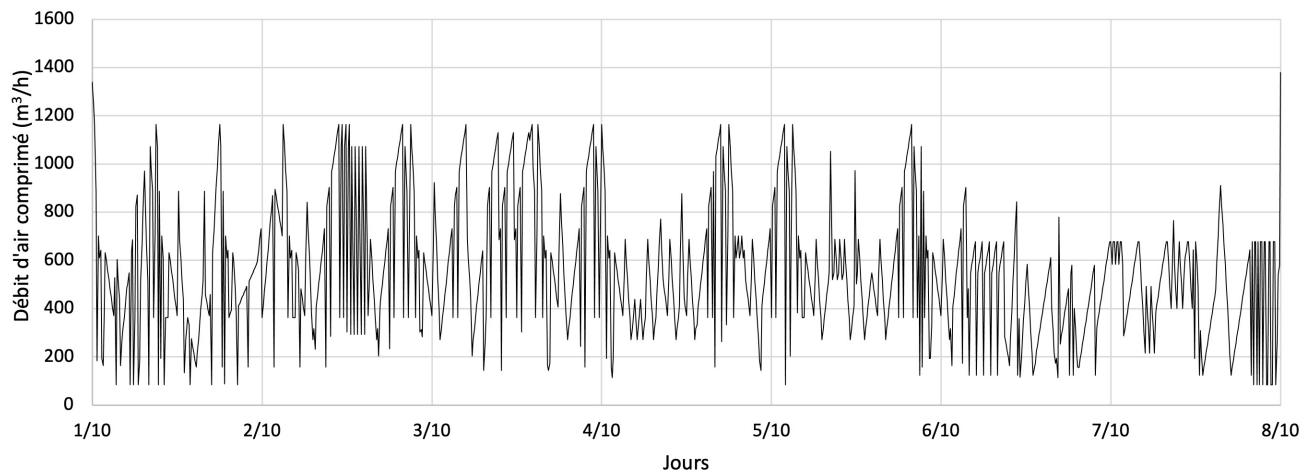


Figure 3 - Courbe de charge initiale du débit d'air comprimé sur une semaine de production

>>> alternatives. Cet outil utilise une base de données constituée d'informations techniques sur l'efficacité énergétique de nombreux types de solutions et d'applications. Il permet de considérer différents modes de fonctionnement et de charge d'un système. Pour le calcul de la puissance électrique, le point de départ est la puissance mécanique distribuée sur l'arbre moteur corrigée de l'efficacité de la transmission, de l'efficacité du moteur et de la courbe de charge. La simulation des deux situations est présentée sur la figure 1. Les économies calculées sont évaluées à 171 MWh/an ce qui représente une réduction de la consommation de 30% du moto-ventilateur existant. L'économie peut être plus importante si le besoin de l'utilisateur final n'impose pas un fonctionnement à 15 m³/s pendant 10 % du temps. Cette contrainte nécessite de conserver la puissance initiale du moteur et de ne pas la réduire à 50 kW. Le suivi de la consommation électrique permet de détecter des dérives dans le temps.

La décomposition des gains apportés par l'approche système est donnée dans le tableau 1 [cf tableau 1 page précédente].

Sans l'approche systèmes motorisés encouragée par les CEE, le fabricant ne ferait que remplacer le moteur asynchrone IE1 existant par un moteur asynchrone IE3 qui respecte le niveau minimum de la directive européenne sur l'écoconception. Dans ce cas, le taux d'économie d'énergie ne serait que d'environ 5 % par rapport aux 30 % obtenus avec le nouveau système. Le montant total de l'investissement est égal à 17 k€ hors taxes (mise en service incluse). Le coût de mise en service est très faible car l'ensemble du moteur du ventilateur était facilement accessible. Le montant des économies d'énergie calculé avec la fiche CEE (IND-UT-136) est égal à 2,7 GWhc de correspondant à un gain énergétique de 233 MWh/an qui est, dans ce cas, 25% supérieur aux économies réelles mesurées 171 MWh/an. Le coût de l'économie d'électricité est égal à 14 k€/an (avec un prix de l'électricité de 0,08 €/kWh). Le retour sur investissement est suffisamment court pour être rentable pour l'industriel en raison notamment du coût élevé des CEE.

En plus des économies d'énergie, les émissions de CO₂ sont

réduites de 6,8 tonnes/an (contenu en CO₂ du kWh d'électricité pris à 40 gCO₂/kWh).

Exemple 2 : application d'un système motorisé sur une unité d'air comprimé (étude d'EDF)

L'approche du système motorisé a été appliquée sur une unité d'air comprimé d'une chocolaterie du secteur des produits alimentaires. Le processus industriel d'une chocolaterie nécessite un haut niveau d'automatisation dans lequel l'air comprimé est utilisé pour alimenter de nombreux équipements (vérins pneumatiques, ventouses...). La principale préoccupation de l'utilisateur final est l'optimisation de l'efficacité énergétique globale du système d'air comprimé. L'usine fonctionne toute l'année et le procédé consomme de l'air comprimé 24/24. La capacité de production est de 1380 m³/h ISO 1217. La production d'air est assurée par 3 compresseurs à vis identiques à vitesse fixe et à injection d'huile. Chaque compresseur a une capacité de 460 m³/h ISO 1217 de débit nominal et une puissance électrique nominale de 45 kW. Le débit d'air comprimé est très variable et nécessite l'engagement d'un, deux ou trois compresseurs pour assurer l'approvisionnement en air de l'usine. La courbe de charge initiale des compresseurs est donnée sur le graphique ci-dessous [cf Figure 3].

Les exigences fonctionnelles du système sont déterminées et les différentes étapes sont réalisées pour optimiser la consommation énergétique globale. Au préalable, un logiciel de calcul d'audit est appliqué pour évaluer les économies et les comparer aux mesures sur site. Le logiciel permet de hiérarchiser les solutions. Néanmoins, certaines différences peuvent exister entre les simulations et les mesures, principalement en raison de la variabilité de la production. Les résultats obtenus aux différentes étapes de l'analyse du système sont présentés dans le tableau [cf tableau 2].

Les résultats montrent que les actions concernent à la fois une amélioration du ratio de performance et une réduction des besoins en air comprimé. Le ratio énergétique de l'air comprimé diminue de 134 Wh/m³ à 113 Wh/m³ (16%), de

ETAPES		PRODUCTION TOTALE (m ³ ISO 1217/an)	CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE (KWh/an)	RATIO D'AIR COMPRIMÉ (Wh/m ³)	ÉCONOMIES (%)	CO ₂ (t/an)	PRIX (%)
Étape 1 Analyse de la demande	Sélection et installation de des débitmètres Installation de compteurs d'énergie individuels pour les compresseurs d'air Enregistrement automatique Mesure initiale	6 119 130	820 160	134	-	33	4
	Campagne de détection de fuites	4 967 190	705 340	142	14	28	5
Étape 2 Questionnement de la demande	Suppression des utilisations inappropriées de l'air comprimé (suppression des souffleurs d'air)	4 891 050	670 070	137	5	27	7
	Baisse du niveau de pression	4 891 050	643 270	132	4	26	-
		4 620 200	605 246	131	4	24	0
Étape 3 Optimisation du contrôle	Conduite automatisée + algorithmes	4 891 050	598 242	122	7,5	24	-
		4 950 500	618 750	125	4,5	25	14
Étape 4+5 Application + optimisation des moteurs	Installation de variateurs électroniques de vitesse sur les compresseurs	4 891 050	532 435	109	11	21	-
		4 620 020	522 062	113	9,5	21	70

Tableau 2 - Différentes étapes de l'analyse du système - Les valeurs sont : en format italique des simulations et en format normal des mesures.

même la production d'air comprimé diminue de 6119130 m³ ISO1217/an à 4620020 m³ ISO1217/an (24,5%) et la consommation d'énergie de 820 MWh/an à 522 MWh/an (36%). Les économies d'énergie mesurées sont évaluées à 298 MWh/an, ce qui représente une baisse de la consommation de l'installation d'air comprimé existante de 36%.

Les émissions de CO₂ évitées représentent 12 tonnes/an, les émissions liées à la production d'électricité étant de 40 gCO₂/kWh. Si les CEE avaient été appliqués, 2,5 GWhc auraient été attribués, correspondant à un gain énergétique de 218 MWh/an qui est inférieur de 25 % aux économies réelles de 298 MWh/an. Sans la fiche CEE système motorisé, l'industriel n'aurait pas été en mesure d'aborder toutes les étapes ci-dessus et n'aurait pas obtenu les gains optimaux. L'économie sur la facture d'électricité est de 24 k€/an (avec un prix de l'électricité de 0,08 €/kWh).

Conclusion

Les 2 exemples présentés sur le cas du renouvellement d'un système de ventilation et d'une installation de produc-

tion d'air comprimé montrent que l'approche système permet non seulement de répondre de façon optimale au besoin de l'utilisateur mais aussi de réduire fortement à la fois la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. La réglementation sur les CEE avec la fiche standard IND-UT, apporte dans ce cas un soutien financier efficace pour passer à l'action.

**Marc Berthou, EDF R&D, Ingénieur Chercheur
Expert Energie dans l'Industrie**



**Abdessalim Arras, EDF R&D,
Ingénieur Chercheur**



**François Saliou, Moteurs Leroy-Somer
Groupe Nidec, Responsable des ventes.**



→ INDUSTRIE → PAC TRANSCRITIQUE HAUTE TEMPÉRATURE → DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

Osez le transcritique pour une meilleure efficacité énergétique : une pompe à chaleur industrielle innovante pour sécheur à air chaud

→ **Une pompe à chaleur très haute température, innovante et efficace pour décarboner les sécheurs industriels à air chaud et réduire les consommations énergétiques : un défi de taille relevé grâce à l'association d'un cycle transcritique et d'un réfrigérant adapté à la température du besoin à combler. Cet article retrace l'histoire de cette innovation prometteuse portée par EDF R&D et DALKIA et présente les premiers résultats obtenus sur une maquette en laboratoire.**

En raison des préoccupations environnementales, la décarbonation devient un défi majeur pour tous les systèmes énergétiques. Ce défi implique d'une part une meilleure récupération des pertes de chaleur (efficacité énergétique conduisant à des consommations moindres donc à des émissions moindres) et d'autre part un effort d'électrification, l'électricité en France étant un vecteur énergétique particulièrement bas carbone. Par exemple, les pertes thermiques liées aux opérations de séchage dans l'industrie représentent environ 40TWh en France. La récupération des calories de l'air extrait des sécheurs industriels couplée à l'utilisation d'une pompe à chaleur à compression électrique pour atteindre la température souhaitée à l'entrée du sécheur représente donc un enjeu important.

En effet, un simple échangeur entre l'air humide extrait et l'air sec entrant ne permet de récupérer qu'une faible quantité des calories de l'air extrait, entre 10 et 15%. Pour récupérer plus, il est nécessaire de refroidir l'air extrait à un niveau de température suffisamment bas pour condenser une partie importante de l'eau contenue dans l'air. Les calories récupérées seront alors à un niveau de température bas, généralement non utilisable sur le sécheur lui-même.

Pour augmenter ce niveau de température, il est nécessaire d'utiliser une pompe à chaleur. L'énergie récupérée en refroidissant l'air humide évacué peut ainsi être transférée à l'air neuf pour le préchauffer avant d'entrer dans le sécheur.

Dans les applications de séchage, l'air neuf doit être chauffé avec une grande amplitude (par exemple de 60 à 120 °C). Avec une pompe à chaleur classique, ce besoin de chauffage important (60 °C dans notre exemple) conduit à un faible coefficient de performance (environ 2), ce qui est insuffisant

pour assurer la rentabilité économique de l'installation. Il est donc nécessaire de développer une pompe à chaleur innovante pour assurer la rentabilité de l'installation.

Méthodes

Avec l'appui de son partenaire académique Armines, EDF R&D a donc entrepris des travaux pour aboutir à une architecture de pompe à chaleur permettant un tel réchauffage avec un coefficient de performance proche de 4.

Tout d'abord, un modèle d'optimisation d'intégration des pompes à chaleur haute température a été développé et a prouvé qu'à ces niveaux de température, l'utilisation d'un cycle transcritique permet de doubler le coefficient de performance de la pompe à chaleur par rapport à un cycle conventionnel (Besbes et al. 2014). Ces travaux ont abouti à un dépôt de brevet (Peureux et al., 2014).

Qu'est-ce qu'un cycle transcritique ?

Un cycle transcritique est un cycle thermodynamique dans lequel le fluide utilisé peut se trouver en dessous et au-dessus de son point critique. Le point critique d'un corps pur est le point du diagramme température-pression où s'arrête la courbe d'équilibre liquide-gaz.

Aux températures et pressions supérieures à celles du point critique le fluide est supercritique : on ne peut plus distinguer une phase liquide d'une phase gaz, on passe continûment des propriétés d'un liquide à celles d'un gaz.

Ainsi, dans le cycle transcritique d'une pompe à chaleur, côté basse pression, le fluide est à l'état subcritique classique, et il s'évapore à température et pression constantes dans l'éva-

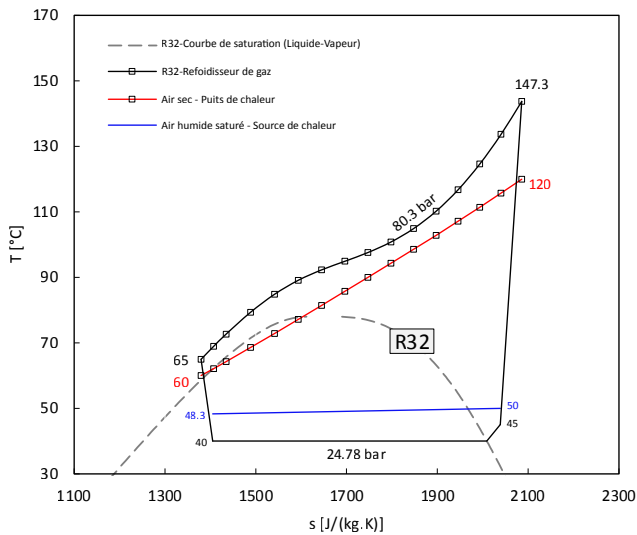


Figure 1 - Cycle transcritique obtenu avec le HFC R-32

porateur. Côté haute pression, le fluide est à l'état supercritique et il se refroidit dans un gaz cooler : il n'y a pas de condensation à température constante (Figure 1).

Ce cycle présente donc un intérêt lorsque l'on souhaite réchauffer un flux avec une grande amplitude de température (de 60 à 120°C dans l'exemple de la figure 1) puisqu'il évite d'avoir un plateau de condensation à température élevée pour réchauffer un flux qui entre dans l'échangeur à beaucoup plus basse température.

Dans le cycle représenté figure 1, les buées sont refroidies de 50 à 48,3°C, permettant l'évaporation du fluide frigorigène à 40°C (et 24,78 bars). Le fluide est ensuite comprimé jusqu'à 80,3 bars. Il traverse alors le gaz cooler où circule l'air sec qui doit être réchauffé de 60 à 120°C. Il se refroidit jusqu'à 65°C en épousant de près la courbe de réchauffage de l'air. L'échange est donc optimisé. En sortie de gaz cooler, le fluide est détendu jusqu'aux conditions d'entrée dans l'évaporateur.

Validation expérimentale

Suite à ces travaux de modélisation, une étude expérimentale portant sur la performance énergétique d'une pompe à chaleur transcritique utilisant le R32 comme fluide de travail a été réalisée (Besbes et al., 2015).

Un pilote de 30 kW thermique, développé en partenariat avec Armines et permettant de réchauffer un flux d'air de 60°C à 120 °C a été construit. Il se compose de deux boucles de cir-



Photo 1

culatation d'air fermées dans lesquelles de l'air humide circule à 50 °C (source de chaleur / boucle froide) et de l'air sec circule à 60 °C (puits de chaleur / boucle chaude) (Figure 2).

L'air circulant dans la boucle froide (les buées) se déshumidifie par condensation lors de son passage dans l'évaporateur. Un humidificateur à jets de vapeur d'eau permet de compenser cette évaporation et de fixer le taux d'humidité à la valeur souhaitée. La régulation de la température dans les gaines s'effectue en asservissant des résistances chauffantes électriques. Les échangeurs conçus pour la maquette sont des échangeurs à tubes à ailettes planes continues.

Résultats

Les essais ont été réalisés en faisant varier la température et le taux d'humidité des buées ainsi que la température de l'air neuf à réchauffer. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Ils montrent un coefficient de performance proche de 4 dans les conditions de fonctionnement d'un sécheur industriel.

Des tests similaires ont été réalisés par la suite avec le fluide frigorigène HFO 1234ze-E pour étudier la faisabilité de fournir de l'air chaud à 150 °C. Ce fluide a été sélectionné du fait de sa température critique (109,4°C) plus élevée que celle du R32 (78,1°C). Le coefficient de performance de la pompe à chaleur transcritique a été mesuré pour plusieurs conditions de fonctionnement (Tableau 2).

La source de chaleur est un air humide à 82 °C avec différentes valeurs d'humidité absolue (160 à 200 g_{eau}/kg Air Sec). Le puits de chaleur (à l'entrée du refroidisseur de gaz) est de l'air ambiant préchauffé à 90 °C pour simuler un premier préchauffage par échangeur air/buées puis chauffé à 150°C par la pompe à chaleur.

>>>

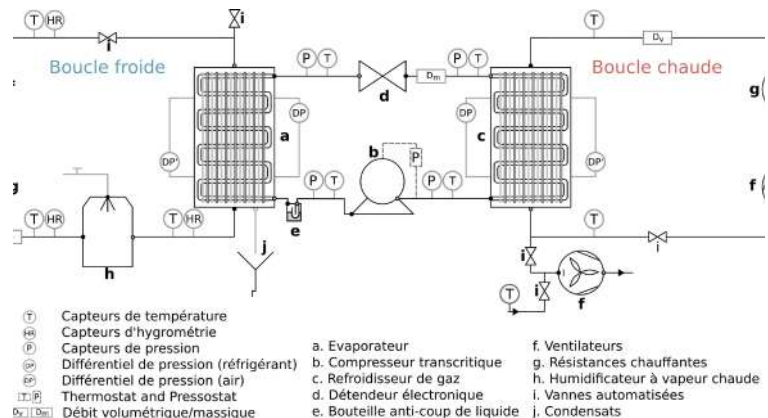
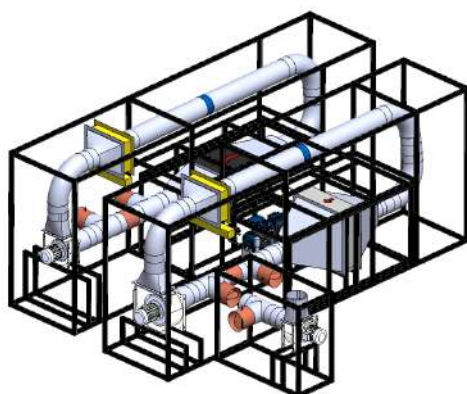


Figure 2 - Schémas de la maquette TRANSPAC

	TEMPÉRATURE DES BUÉES (°C)	HUMIDITÉ RELATIVE DES BUÉES (%)	TEMPÉRATURE DE L'AIR NEUF ENTRANT (°C)	TEMPÉRATURE DE L'AIR NEUF SORTANT (°C)	COP EXPÉRIMENTAL
Point nominal	50	100	59	117	3,7
Variation de la température de l'air neuf en entrée de gaz cooler	-	-	55	116,5	3,75
	-	-	50	116,5	4,01
Variation du taux d'humidité des buées	-	90	60	116,5	3,61
	-	80	-	116,5	3,58
Variation de la température des buées	45	90	-	107	3,51

Tableau 1 – Coefficients de performances obtenus sur la maquette TRANSPAC pour réchauffer de l'air de 60 à 120°C en récupérant l'énergie sur des buées à 50°C

	HUMIDITÉ ABSOLUE DES BUÉES (g _{EAU} /kgAirSec)		
	160	180	200
COP	3,49	3,65	3,72

Tableau 2 – Coefficients de performances mesurés pour réchauffer de l'air de 90 à 150°C en récupérant l'énergie sur des buées à 82°C.

>>> Ces coefficients de performance peuvent être améliorés grâce à l'utilisation d'un échangeur de chaleur interne qui permet de réduire la température du fluide frigorigène en sortie du gaz cooler tout en augmentant la surchauffe à l'aspiration du compresseur. Cette option a été simulée et permet une amélioration de 6% du COP.

La maquette est maintenant installée au laboratoire PAC HT (Photo 1) d'EDF Lab Les Renardières pour valider, à la demande des industriels, les performances de la pompe à chaleur transcritique, au point de fonctionnement de leur sécheur.

Un démonstrateur industriel à l'étude

L'enjeu est désormais de réaliser un démonstrateur industriel et de l'installer sur site. Pour cela, un projet soutenu par l'ADEME est en cours. Les partenaires sont EDF (coordinateur du projet), DALKIA (réalisation et intégration du démonstrateur), Armines (validation des performances sur la maquette) et un industriel possédant un sécheur à air chaud. Les deux premières années ont été consacrées aux études (sélection du fluide frigorigène, sélection de l'huile de lubrification, dimensionnement et sélection des composants). La sélection du compresseur s'est portée sur un compresseur commercialisé pour un autre fluide. Des essais spécifiques au fonctionnement de ce compresseur dans les conditions transcritiques avec le R1234ze sont en cours pour valider la sélection de l'huile de lubrification et la robustesse de la machine avant assemblage des composants et installation sur le site industriel.

Un coefficient de performance proche de 4 est attendu. L'objectif de ce démonstrateur est de réaliser une première

référence industrielle avec une machine de 600 kW thermiques fonctionnant 8000 h par an. Cette installation permettra une économie de gaz pour le chauffage de l'air entrant dans le sécheur de l'ordre de 70% et une réduction des émissions de CO₂ d'environ 1000 t/an.

Conclusion

La pompe à chaleur transcritique permet de réchauffer de l'air de 90 à 150°C à partir de buées à 80°C avec un coefficient de performance proche de 4. Une maquette de 30 kW thermiques a été réalisée et est à la disposition des industriels à EDF Lab Les Renardières pour valider les performances de cette pompe à chaleur au point de fonctionnement de leur sécheur. Par ailleurs, un démonstrateur industriel de 600 kW thermiques est en cours de réalisation. Un premier retour d'expérience sera publié dans un prochain numéro de CVC.

Cette innovation, conçue pour les sécheurs industriels à air chaud, permet de réaliser des économies d'énergie et de fortes réductions des émissions de CO₂.

Références

Besbes Karim, Zoughaib Assaad, de Carlan Florence, and Peureux Jean-Louis. 2014. "Exergy Based Methodology for Optimized Integration of Heat Pumps in Industrial Processes." *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1435>.

Peureux Jean-Louis, Bourig Ali, Zoughaib Assaad, Besbes Karim. "Equipment including a heat pump for heating an external fluid with a large temperature differential." *International Patent WO2014020255 (A1)*, 2014.

Besbes Karim, Zoughaib Assaad, Florence de Carlan, and Peureux Jean-Louis. 2015. "A R-32 TRANSCRITICAL HEAT

Florence de CARLAN, Ingénieur EDF R&D



Yannick BEUCHER, Ingénieur EDF R&D

Assaad Zoughaib, Professeur au Centre Efficacité Energétique des Systèmes (Armines)



Un rendement maximisé pour la nouvelle chaudière vapeur

→ En rénovation d'une production vapeur, un industriel de l'agro-alimentaire a retenu une chaudière dotée d'un condenseur en plus de l'économiseur et d'un brûleur ultra modulant. Le rendement de combustion dépasse dorénavant les 100%.

Enjeux

CORETEC a été missionné par un industriel de l'agro-alimentaire pour proposer des solutions suite à la défaillance de l'une de ses deux chaudières vapeur. **L'avant-projet** a permis de trancher entre remplacer à l'identique ou profiter de cette opportunité pour optimiser le fonctionnement de la chaudière. Dans sa logique d'investissement, le client souhaitait produire de manière performante, mieux et moins cher. La conservation du gaz naturel comme énergie pour alimenter la nouvelle chaudière a donc été rapidement actée : c'est une solution éprouvée nécessitant un investissement modéré et ayant peu d'impact (bâtiment, logistique, etc.).

Une production continue

L'entreprise est spécialisée dans la fabrication de produits alimentaires : aides à la cuisine, nutrition infantile, plats cuisinés, confiseries, ... Implantée en Haute-Savoie depuis plus de cent ans, l'usine fabrique aujourd'hui et conditionne notamment différents types de céréales de petit-déjeuner. Le site dispose de 3 lignes de production qui fonctionnent 7 jours sur 7. Annuellement 44 000 tonnes de céréales sont produites par cette usine dont une moitié est destinée au marché français, l'autre aux marchés européens.

La prise en compte des spécificités du site (grosse consommation d'eau chaude, variations de charge) a conduit naturellement à l'installation d'un condenseur en plus de l'économiseur et d'un brûleur ultra modulant pour limiter les arrêts et les démarrages. CORETEC a proposé une solution clef en main avec un engagement sur les performances dans un délai de réalisation très serré.

Après échanges avec le constructeur BABCOCK WANSON, les équipements installés sont les suivants (voir Figure 1) :

- Chaudière BWD type 100 à tubes de fumées, pour production de vapeur 10 t/h.
- Brûleur bas NOx Modulo avec correction d'oxygène, de puissance utile 7 MW, avec modulation de 1 à 12.
- Economiseur ECO type 100 en acier, d'une puissance de 350 kW.
- Economiseur à condensation en inox, d'une puissance de 350 kW.

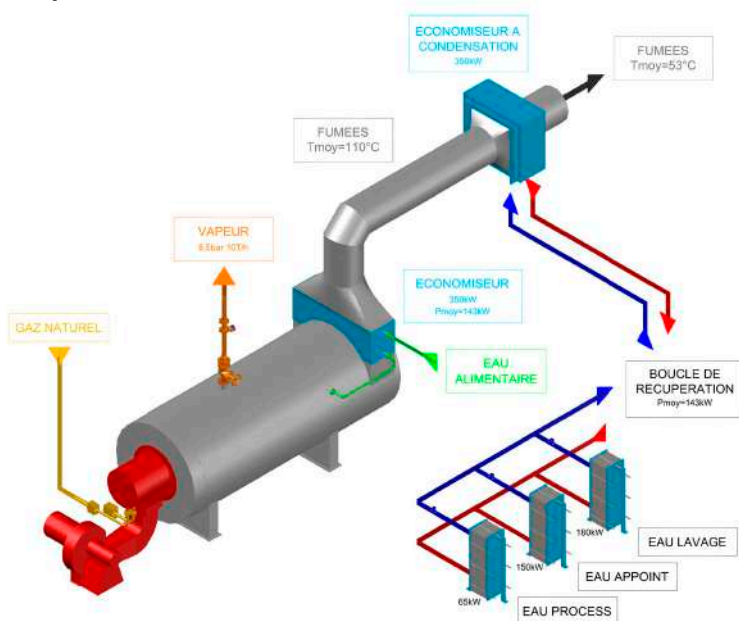


Figure 1 : Schéma de principe de l'installation (document CORETEC)

Une solution éprouvée reproductible

La chaufferie vapeur s'intègre parfaitement dans l'usine en récupérant l'énergie qui alimente directement des process et génère des gains énergétiques et financiers significatifs. De plus, l'exploitation est simplifiée, avec un mode d'exploitation 72 h.

La solution éprouvée mise en œuvre repose notamment sur :

- **Des brûleurs ultra modulants** : les besoins de vapeur des industriels dépendent des besoins de la production souvent très variables et en baisse. De ce fait, les chaudières sont sollicitées sur une large plage de fonctionnement. Les fabricants de brûleurs ont donc développé des brûleurs capables de fonctionner sur une plage de modulation étendue, tout en maintenant les performances énergétiques et environnementales : les brûleurs micro-modulants ou ultra modulants. Les plages de fonctionnement sont a minima de 1 à 5, classiquement de 1 à 8 et atteignent 1 à 12 voire plus. Cette modularité permet de diviser par 3 les arrêts, tout en conservant un impact environnemental limité : émissions de NOx < 80 mg/(n)m³ sur toute la plage de modulation. Ces équipements sont éligibles au dispositif des Certificats d'Economie d'Énergie (sous certaines conditions).



• **Un économiseur condenseur** : cet équipement est installé en complément d'un économiseur (échangeur de chaleur servant à réchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière avec les fumées) pour abaisser la température des fumées de telle sorte qu'une partie de l'eau contenue dans les fumées condense. La température est abaissée de 110 à 55 °C. Dans ces conditions, le rendement de combustion peut atteindre plus de 100 %/PCI. Bien évidemment, cela nécessite la disponibilité d'une source d'eau froide (à moins de 40-50 °C) à réchauffer.

Après trois ans de fonctionnement, les performances de cet investissement de 900 k€ sont toujours au rendez-vous.

Dans le cas d'un industriel éligible aux CEE, on notera qu'une telle rénovation pourrait bénéficier d'aides au titre des fiches CEE suivantes :

• IND-UT-104 « Économiseur sur les effluents gazeux

d'une chaudière de production de vapeur

- IND-UT-105 « Brûleur micro-modulant sur chaudière industrielle »
- IND-UT-102 : Système de variation électronique de vitesse sur un moteur asynchrone (ventilateur d'air de combustion)
- IND-UT-130 : Condenseur sur les effluents gazeux d'une chaudière de production de vapeur
- IND-UT-121 : Isolation de points singuliers d'un réseau

Julien Poulat

Directeur commercial, CORETEC



Didier THIBAUT,

Ingénieur Conseil Energie Industrie, GRTgaz



→ FONDERIE ► BRÛLEUR SANS FLAMME

Un réchauffeur de poche doté d'un brûleur sans flamme

→ Afin de gagner en efficacité énergétique sur le poste de transport de la fonte, une fonderie a installé un réchauffeur de poches doté d'un brûleur sans flamme fonctionnant au gaz naturel. La campagne de mesures a montré que cette technologie entraîne un gain opérationnel conséquent : durée de chauffe divisée par 4, et jusqu'à 80% d'économies d'énergie.

Une fonderie de la Haute-Marne qui a débuté son activité de fonte en janvier 1957, produit aujourd'hui principalement des pièces de fonte pour le marché du ferroviaire, de l'agriculture, des voiries ou de l'automobile. La fonderie a la capacité de réaliser 50 000 tonnes de pièces de fonte par an, allant de 500 grammes à 9 tonnes, en moulage main ou automatique.

Optimisation des performances énergétiques du site

Ayant obtenu en 2016 la certification ISO 50001, l'entreprise est entrée dans une démarche de maîtrise de l'énergie visant à améliorer les performances énergétiques du site et à rendre son activité plus efficace et plus respectueuse de l'environnement. En conséquence l'entreprise a décidé de remplacer, en 2019, l'un de ses deux équipements de chauffe des poches de transport de métal par une technologie plus performante. L'usine disposait alors de deux stands de préchauffage pour les poches, chacune équipée de brûleurs torches

à air induit de puissance nominale égale à 145 kW : l'un sans couvercle, l'autre avec un couvercle non étanche. Comme le demande la certification ISO 50001, l'entreprise avait identifié les points de consommation inefficients sur ses lignes de production : l'équipement installé sur le poste de préchauffage des poches, qui ne possède pas de couvercle, a ainsi été retenu pour les actions d'efficacité énergétique en 2019.

Le choix de la technologie de brûleur sans flamme intégré

La poche de transport est le lieu d'importantes déperditions calorifiques qu'il faut identifier pour mieux les combattre. Ces pertes ont un coût énergétique important et sont aussi synonymes de non-qualité pour les pièces coulées. C'est pourquoi un préchauffage efficace de la poche à haute température est primordial, autant pour la réduction des coûts que pour la qualité du produit final. Les deux brûleurs de type « torche », d'environ 10 ans d'ancienneté et présents à chaque poste de préchauffage, connaissent d'importantes pertes par les fumées. Le brûleur sans couvercle



Figure 1 (à gauche) : Brûleur torche à air sans couvercle



Figure 2 (à droite) : Brûleur sans flamme de Promeos®

(voir Figure 1) représente à lui seul 10% de la consommation en gaz naturel du site. De plus, comme ces équipements ne parviennent pas à atteindre la température consigne de 850 °C pour préchauffer les parois intérieures de la poche à haute température, ils sont allumés au-dessus d'une poche à pleine puissance, 24h/24 et 5 jours par semaine, afin d'avoir toujours une poche préchauffée disponible pour les opérations. L'industriel a donc décidé de remplacer le brûleur assurant le préchauffage le moins performant (celui sans couvercle) par un produit présent sur le marché allemand depuis plus de 10 ans : le système proposé par le fabricant allemand promeos® est une technologie de brûleur radiant, c'est-à-dire sans flamme nue, à haute modulation, équipée d'un corps rayonnant qui permet une diffusion latérale et homogène de la chaleur (voir Figure 2).

Une technologie au gaz naturel performante et adaptée au besoin des fondeurs

Le système promeos® est un ensemble compact pour le préchauffage de poches. Il est composé de 3 éléments essentiels, rendant cette solution innovante et parfaitement adaptée au besoin des fondeurs :

- **Un brûleur gaz radiant poreux Reo®**, technologie brevetée par promeos®, reposant sur une mousse de carbure de silicium.
- **Un corps de chauffe rayonnant en acier** dans lequel est intégré le brûleur sans flamme. Ce corps rayonnant peut être fabriqué avec

des formes et hauteurs variables afin d'être adapté à la forme de la poche à préchauffer.

- **Un couvercle étanche par rapport à l'ouverture en haut de la poche**, muni d'une cheminée permettant l'évacuation des produits de la combustion. C'est sur ce couvercle que sont installés et fixés le brûleur et le corps de chauffe. Cette configuration permet une transmission à la fois convective et radiative de la chaleur produite, pour des applications allant de 100 °C à 1100 °C.

La particularité de la technologie de ce préchauffeur repose sur son brûleur radiant poreux, fonctionnant au gaz naturel et conçu de telle manière que la stabilisation de la flamme à l'intérieur autorise une très haute modulation de la puissance de 1 à 20. Cette configuration permet de réduire la taille des corps de chauffe et de l'exploiter en condensation.

>>>

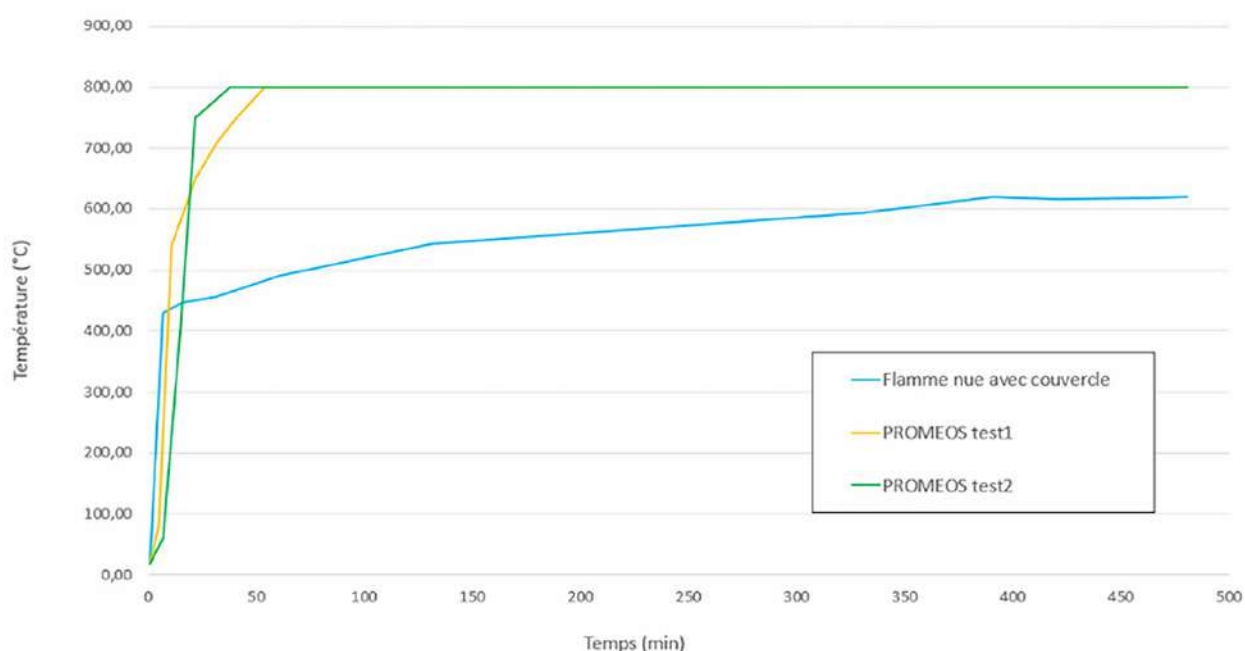


Figure 3 : Evolution de la température en fonction du temps (source : GRDF)

>>>

Un atout majeur de ce brûleur est aussi sa grande modularité de forme et de taille, permettant un grand choix de puissance. En connectant entre elles des cellules individuelles de brûleur de 1 kW, il est ainsi possible de construire des systèmes allant jusqu'à 1 MW : cette technologie se prête à un assemblage de type « Lego » pour s'adapter parfaitement au besoin défini.

Résultats de la campagne de mesures

GRDF a accompagné l'industriel en réalisant, sur site, une campagne de mesures afin de comparer les performances des différents systèmes de préchauffage de poches en exploitation, et ainsi quantifier et qualifier le gain du changement d'équipement. L'instrumentation a permis de suivre en continu l'évolution de la température du brûleur et de la poche, ainsi que la consommation totale d'énergie. Le but était de réaliser trois fois le même test sur les trois installations différentes (brûleur existant sans couvercle, avec couvercle et le nouveau système testé) afin de les comparer. Chaque test a duré 8 heures. Il était composé d'une phase de montée de la température ambiante à la température de consigne de 800 °C et d'une phase de stabilisation à la température consigne.

Les mesures montrent que le système promeos® atteint la consigne de 800 °C en 53 minutes sur une poche neuve et en 37 minutes sur une poche utilisée la veille, alors que les deux autres brûleurs en place n'atteignent jamais ce niveau de température, même en fin de test (figure 3). **Cette rapidité de montée en température permet de réduire le temps de préchauffage des poches de 8h à 2h** (3 poches par jour, fonctionnement continu 24h/5j pour l'ancien brûleur), d'où un gain très élevé en flexibilité côté opérations avec ce nouveau réchauffeur. **Côté métallurgie, la poche préchauffée avec le brûleur sans flamme présente une couleur rouge plus uniforme sur les parois intérieures, démontrant une chauffe homogène à température élevée.** Ce niveau de température atteint par le nouveau système est très intéressant pour la

qualité du produit, en permettant de réduire le différentiel thermique pour la fonte lors de son transport.

Cette instrumentation a également permis de montrer l'efficacité énergétique accrue du nouveau système, en mesurant les consommations réelles sur la période. Une information utile pour la fonderie dans le cadre de la certification ISO 50001. Après calcul, pour une même durée de fonctionnement de 8 heures des tests, et comparativement aux solutions en place, le gain énergétique apporté par le système promeos® est, en effet, de l'ordre de 58 à 68% par rapport au brûleur à flamme nue sans couvercle, et de 53 à 64% par rapport à celui avec couvercle. Néanmoins, grâce à l'efficacité de chauffe du brûleur sans flamme, un fonctionnement de 2 heures est suffisant pour le préchauffage d'une poche, permettant ainsi une économie d'énergie réelle de 85 à 88% selon le type de poches.

Une décarbonation rentable

En prenant en compte l'intégralité de ces économies d'énergie, on peut estimer le ROI de cette installation autour de 16 mois. Un tel gain engendre également une forte réduction de l'impact environnemental de ce poste de transport. L'industriel juge que c'est une opération d'efficacité énergétique très rentable, qui permet un gain en souplesse côté opérationnel. Aussi, l'investissement a été programmé pour remplacer le second préchauffeur.

On notera que **la technologie du brûleur sans flamme contribue à la décarbonation de l'industrie puisqu'elle est aussi utilisée avec succès dans d'autres procédés de chauffage et maintien au chaud des équipements de forges et fonderie** : par exemple, le maintien au chaud du four de fusion à induction, le préchauffage de plancher incliné ou encore de goulottes de transport.

Grégory Verbrughe, Chef de marché Industrie, GRDF

*Laurent Lantoine, Chef de produits
Tertiaire-Industrie, GRDF*



Le free-chilling : de l'idée à la fiche CEE

→ Alain Garnier a proposé en 2012 la notion de free-chilling consistant à maximiser le fonctionnement d'un aérofrigoriférant présent une production d'eau glacée. Son intérêt a été reconnu par la promulgation récente de deux fiches CEE. Retour sur le développement de cette technique qui peut contribuer à améliorer le bilan environnemental de process industriels.

L'état de l'art des recherches

Le secteur du froid conserve encore d'importantes marges d'amélioration de ses capacités en matière d'économies d'énergies, notamment :

- dans les installations de climatisation de confort, où un surdimensionnement en puissance pour « passer les conditions extrêmes » qui ne durent que quelques jours, et/ou de mauvais réglages tels sur ceux des débits des pompes ou ceux des régulations terminales dans les bureaux peuvent entraîner des surconsommations d'électricité ;
- dans les process industriels nécessitant une production d'eau glacée à l'année, où le fonctionnement de la production à faible charge (et donc à mauvais rendement) peut détériorer le bilan économique (car le prix « hivernal » de l'électricité est élevé).

On constate dans la littérature que les recherches sur les équipements performants sont menées en général par les constructeurs dans leurs laboratoires. Seules les caractéristiques techniques nominales sont généralement publiées, après essais normatifs. Par contre, les recherches sur les systèmes énergétiques complexes, tels que ceux mis en œuvre en industrie, sont restreintes. Des travaux ont été menés par le CSTB et le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris qui ont permis au COSTIC d'éditer un Cahier de notes de Savoir-Faire sur la « Climatisation douce » [1]. Il s'agit d'utiliser des procédés de rafraîchissement qui limitent le recours à une machine frigorifique classique ou même de s'affranchir de cette dernière, pour assurer le confort thermique dans des locaux. Des abaques de dimensionnement sont proposées pour quatre systèmes (surventilation, dessiccation, évaporatif indirect et plafonds rafraîchissants) pour différents modes constructif (inertie, surface vitrées) et différents climats. Le cas du free chilling n'est pas traité. De même, le sujet n'est pas abordé dans la thèse de J. Caillet sur les « Méthodologies d'identification d'économies d'énergie : application aux systèmes de climatisation à eau glacée », encadrée par le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris et soutenue en 2010 [2].

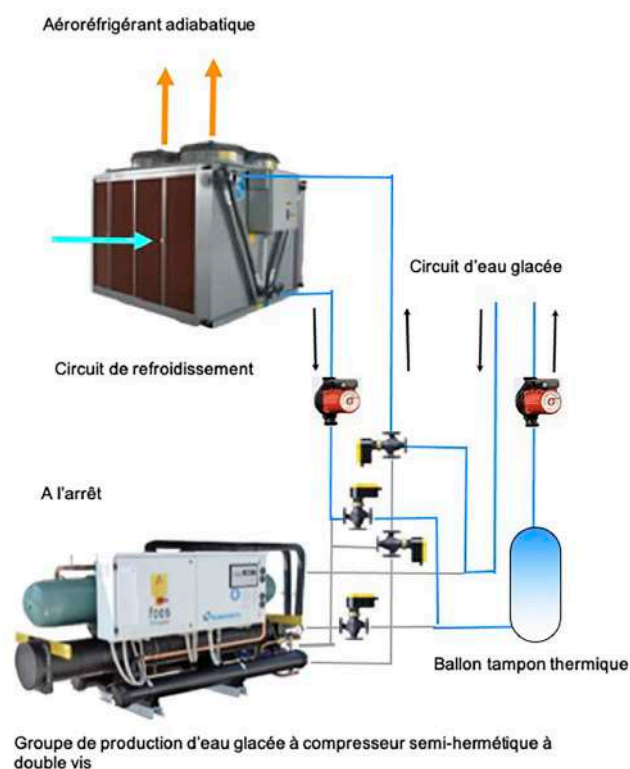


Figure 1 : Schéma de principe du free-chilling (Document BET GARNIER)

Le constat du BET

Le BET A. Garnier a été actif dans les années 2000 avec les premières opérations de « climatisation gaz naturel » soutenues par Gaz de France. Cette offre technique était notamment basée sur des producteurs d'eau glacée mettant en œuvre un cycle à absorption, dont les modèles utilisant un couple réfrigérant/absorbant de type eau-bromure de lithium. Ceux-ci présentent la nécessité d'un refroidissement externe par eau dans une plage de conditions de température à maîtriser en continu. De fait, le bureau d'études établi des contacts techniques avancés avec les deux principaux

>>>

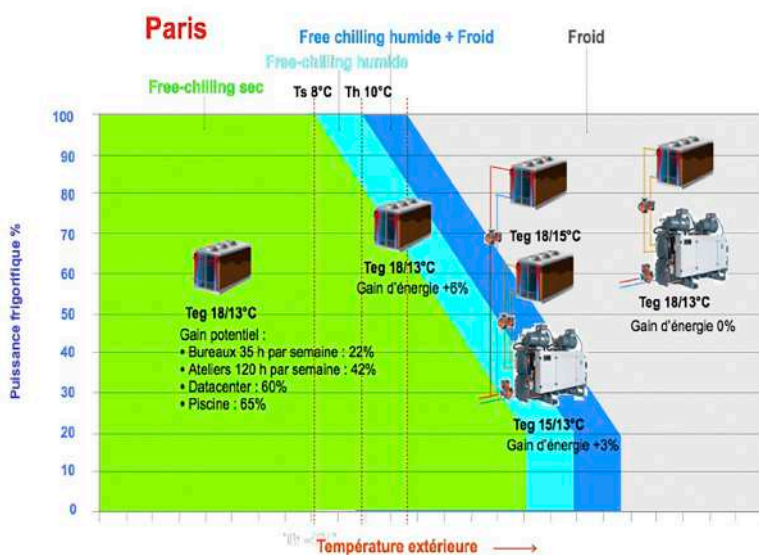


Figure 2 : Impact du free-chilling (Document BET GARNIER)

>>>

constructeurs et distributeurs français de tours aéroréfrigérantes (JACIR et Baltimore Air Coils). De plus, le BET a été confronté à la nouvelle réglementation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) : la Rubrique n°2921 est devenue applicable depuis 2004 à ces dispositifs de refroidissement avec dispersion d'eau dans le flux d'air. Elle prévoit notamment un régime de déclaration et un régime d'autorisation (en fonction de la puissance installée), mais surtout renforce les conditions d'entretien et de maintenance (ce qui impacte le coût d'exploitation de toute installation).

En réponse à ces contraintes, **les constructeurs ont conçu des « aéroréfrigérants adiabatiques » adaptés aux producteurs d'eau glacée refroidis par eau.** Ces produits sont des refroidisseurs aéroréfrigérants ou des condenseurs à refroidissement par air dotés de prérefroidisseurs adiabatiques : l'air extérieur aspiré par le ventilateur traverse d'abord un média humidifié ce qui le rafraîchit, puis la batterie ailetée dans laquelle circule au secondaire le fluide frigorigène à refroidir. Ce passage évapore l'eau suintante dans l'air de manière adiabatique, ce qui abaisse sa température, et donc augmente la capacité de refroidissement de la batterie « condenseur ». **Cet équipement permet de réduire l'emprise au sol par rapport à un aéroréfrigérant sec (jusqu'à 6 fois moins de place nécessaire).**

En 2012, Alain Garnier a décidé d'investiguer l'intérêt de ce type d'aéroréfrigérant dans les différents types de productions frigorifiques, qu'il a été amené à concevoir, mettre en service et/ou diagnostiquer au cours de sa carrière. C'est notamment le principe méconnu du « free chilling » qu'il a décidé d'explorer plus avant avec ces travaux de recherche : lorsque la température extérieure descend sous les 8 à 10 °C, il est possible de refroidir l'eau avec l'aéroréfrigérant sans utiliser le groupe frigorifique : l'eau est directement refroidie par l'air extérieur et la machine frigorifique est mise à l'arrêt. Dans le cas d'un bâtiment climatisé toute l'année, le

groupe frigorifique est généralement en fonctionnement en hiver : or la température extérieure est, 2450 heures par an, inférieure à 8 °C, soit 30% du temps. En mi-saison, l'humidification de la batterie permet de prérefroidir l'air, ce qui étend la plage de refroidissement « gratuit ».

La pertinence du recours au free-chilling dépend de la situation géographique, au travers de la répartition statistique de la température sèche et de la température humide. La figure 2 illustre pour la station de Paris, la sollicitation des composants d'une production frigorifique pour une température extérieure croissante : un fonctionnement en free-chilling sec, puis en free-chilling humide, puis une combinaison free-chilling et groupe froid (cas avec deux refroidisseurs adiabatiques).

Cette technique permet donc de valoriser une énergie renouvelable, l'air extérieur, et donc de réduire les consommations d'électricité du groupe frigorifique et d'améliorer le bilan environnemental de l'installation et du site.

Une première réalisation

Les analyses techniques et économiques ont contribué à la mise au point du procédé innovant avant que le BET ne propose une première mise en œuvre sur le CH de Tourcoing [3]. Le suivi réalisé a montré une réduction de 26% des consommations après travaux, se décomposant ainsi :

- Une amélioration de l'efficacité énergétique d'environ 20% avec l'utilisation d'aéro-réfrigérant sec.
- Une amélioration d'environ 6% (par rapport à un aéro-réfrigérant sec) avec l'utilisation d'aéro-réfrigérant humide.

Différentes mises en œuvre ont ensuite été proposées par Alain Garnier pour des types de productions frigorifiques variées [4]. Sur une production frigorifique centralisée On notera que les constructeurs de groupes frigorifiques qui ont échangé avec le BET ont été particulièrement intéressés par ces travaux de recherche et développement et démonstration (R&D&D). Ainsi CLIMAVENETA a repris le principe du free chilling pour l'intégrer directement dans une nouvelle gamme de producteurs d'eau glacée des condenseurs avec échangeurs adiabatiques (Figure 3) [5]. Cette solution packagée simplifie le travail du bureau d'études ainsi que le montage in-situ, dans le cas d'installations « simples ».

Une reconnaissance « officielle »

L'arrêté publié au Journal officiel le 31 août 2019 comporte notamment deux fiches d'opérations standardisées d'économie d'énergie portant sur le « free chilling », dénommées ainsi :

- le « freecooling par eau de refroidissement en remplacement d'un groupe froid » (opération n° IND-UT-135) ;
- le « freecooling par eau de refroidissement en substitution d'un groupe froid pour la climatisation » (opération n° BAT-TH-156).

La publication de cet arrêté constitue une « officialisation » par les Pouvoirs Publics de l'intérêt du «free chilling » dans le cadre de la Loi de Transition énergétique et environne-



Figure 3 : Modèle de producteur d'eau glacée refroidi par air avec free chilling intégré (Document CLIMAVENETA)

mentale. La méthode de « calcul normalisé » proposée permet à un prescripteur de chiffrer les économies potentielles et d'estimer l'intérêt économique de cette mesure ; puis à un décideur de faire réaliser les travaux en toute connaissance de cause. Ainsi tout maître d'ouvrage ou gestionnaire, qu'il soit public ou privé, peut disposer d'installations de production de froid contribuant à mieux utiliser les énergies renouvelables (ici l'air extérieur) et à décarboner l'usage énergétique.

Cet aboutissement intervient 7 ans après les premières premiers travaux de recherche du BET Garnier sur le sujet. Cette durée est cohérente pour le secteur du Bâtiment et de l'Industrie dans le cas de la généralisation sur le terrain d'un sujet issu de la recherche et du développement.

Dans les bâtiments tertiaires récents, la température d'équilibre d'un bâtiment se situe généralement autour de 10 °C extérieur : au-dessus de ce seuil, le bâtiment devra être refroidi - donc durant une partie de la saison de « chauffage ». Des économies d'énergie supplémentaires peuvent être réalisées avec un régime 13 °C/18 °C, tel qu'attendu par un plafond rafraîchissant ou des poutres froides. **Ce qui rend encore plus pertinent le recours au free-chilling en bureaux et centres commerciaux**, en plus des applications de type process telles que : industries, hôpitaux, piscines et datacenters.

Références bibliographiques

- [1] COSTIC, *Cahier de notes de Savoir-Faire sur la « Climatisation douce »*, Novembre 2010.
 [2] Julien Caillet, « *Méthodologies d'identification d'économies d'énergie : application aux systèmes de climatisation à eau glacée* », Thèse de Doctorat ENMPS, 2010.

- [3] Alain Garnier, « *Comment économiser l'énergie sur les installations de froid* », Revue CFP n°770, Septembre 2013.
 [4] Alain Garnier, « *Une production de froid très performante à l'Hôpital de Tourcoing* », Revue CFP n°809, Avril 2017.
 [5] MITSUBISHI ELECTRIC-CLIMAVENETA, Gamme TECS-EFC 0211 - 1204, "High efficiency air cooled chiller with evaporative free-cooling", www.melcohit.com

Frédéric Ronfort,
 Directeur d'exploitation BET GARNIER



Hommage

L'AICVF rend hommage à Alain Garnier, fondateur du BET GARNIER à Reims. Il est le récipiendaire du « Prix Spécial du Jury » 2017 de l'AICVF récompensant ses recherches et ses innovations en matière d'économies d'énergies développées au cours de sa vie professionnelle. Inlassable vulgarisateur de nouveaux concepts, Alain a donné de nombreuses conférences, rédigé beaucoup d'articles techniques et publié deux ouvrages qui restent des références sur le BEPOS et les piscines. Alain est malheureusement décédé accidentellement fin 2019.

