

Revue Générale du Froid

et du conditionnement de l'air



DOSSIER :

Froid et santé



Interview du Dr Léon Salumu, responsable Programme de Médecins sans frontières (MSF)



Thermodynamique en dimensions finies - optimisation des systèmes



La conférence ICCC 2020 approche



EN ROUTE VERS

LA FRAÎCHEUR!

Petit Forestier vous propose
une **gamme frigorifique multi-produits**
en location courte, moyenne et longue durée.



N° Vert 0 800 100 296

VÉHICULES, MEUBLES, CONTAINERS 100% FRIGORIFIQUES

www.petitforestier.com



Gérald CAVALIER
Président de L'AFF

ÉDITO

Revue Générale du Froid
et du conditionnement d'air

Vérifier la qualité des informations « circulantes »

À l'heure du tout numérique et de l'instantané, la pertinence de la presse écrite, des revues scientifiques et techniques, tout comme celle des associations qui les publient se pose régulièrement. « A quoi bon adhérer à une association ou adhérer à une revue alors que tout est accessible en ligne gratuitement » entend-on régulièrement. La question mérite, en effet, d'être posée et se pose tous les jours aux dirigeants des associations comme aux responsables de publications. La première réponse passe par la nécessité d'une filière - celle du froid en ce qui nous concerne - de maîtriser ce qui se dit et s'écrit sur le froid, du moins en partie, de promouvoir son secteur d'activité et de veiller à la qualité des informations qui circulent car tout ce qui est gratuit et libre n'est pas la vérité et pas toujours de qualité. Mais la question n'est pas nouvelle et donc pas seulement liée à la digitalisation, la numérisation ou l'ubérisation de notre société. Il y a déjà cent ans dans la RGF, nos illustres prédécesseurs se battaient pour que les professionnels du froid paient leur cotisation à L'AFF et s'abonnent à la revue. Cela doit donc nous pousser sans cesse à nous remettre en cause et à innover. En 2019, L'AFF innove avec un partenariat inédit avec l'Institut international du froid qui permet désormais à chacun des membres de L'AFF de recevoir toute l'information digitale de l'Institut en français et en anglais, source inestimable d'informations sur le froid et ses applications dans le monde. L'AFF innove aussi en organisant son assemblée générale les 16 et 17 avril à la Saline royale d'Arc et Senans à l'occasion de l'expo Froid donc le succès est toujours au rendez-vous !

L'innovation est indispensable

Le froid aussi doit innover et la richesse des travaux des doctorants en atteste avec ce mois-ci par la présentation d'une part, de travaux de recherche sur la caractérisation expérimentale et la modélisation des transferts thermiques/hydriques et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc et d'autre part, sur les écoulements diphasiques évaporatifs. L'innovation est indispensable dans toutes les applications du froid à commencer par la chaîne du froid des produits de santé au cœur de ce numéro de la RGF. Du Vietnam au CHU de Caen, la chaîne du froid du médicament poursuit son développement et son amélioration et prend de plus en plus en compte les enjeux environnementaux avec la réutilisation des équipements de transport lorsque cela est possible et pertinent ou la bonne gestion des sources de froid et de leur préparation. Les défis à relever sont encore nombreux dans ce domaine et la diffusion des bonnes pratiques tout aussi importante que le choix des bons équipements. Avec la nécessité de réaliser des économies d'énergie dans tous les secteurs, les certificats d'économie d'énergie voient leur place grandir et les annonces se multiplier. L'annonce des pompes à chaleur à 1€ en est l'une des plus marquantes de ces derniers mois qui nécessitera toute l'attention des professionnels pour garantir la qualité des produits installés et de l'installation. C'est aussi un appel à poursuivre les innovations en la matière pour améliorer encore les performances des machines. Le ministère de l'Écologie a aussi retenu une nouvelle liste de programmes d'économie d'énergie dont le programme ECLER dédié à la logistique sous température dirigée. Bonne Lecture !



Association Française du Froid



Pour tout renseignement :

Secrétariat AFF
+33 01 45 44 52 52
a.f.f@wanadoo.fr
redaction.rgf@orange.fr



SOMMAIRE

Sponsoring RGF

Promotion réservée aux entreprises et organisations qui veulent promouvoir le froid et soutenir la diffusion de la connaissance scientifique et technique.

1

Premier pack 4 000 € HT

- 6 x 1/2 page annonce : 2500 €
- 1 page annuaire : 1000 €
- 8 abonnements : 500 €

2

Deuxième pack 5 000 € HT

- 6 pages publi-reportage : 3 500 €
 - 1 page annuaire : 1000 €
- 10 abonnements : 50 x 10 : 500 €

3

Troisième pack 6 000 € HT

- 2^e ou 3^e de couv : 6 numéros : 4 500 €
 - 1 page annuaire : 1000 €
- 10 abonnements : 50 x 10 : 500 €

4

Quatrième pack 9 000 € HT

- 4^e de couv : 6 numéros : 7 500 €
 - 1 page annuaire : 1000 €
- 10 abonnements : 50 x 10 : 500 €

Edito de Gérald Cavalier, président de l’AFF	p.3
Agenda	p.6
La RGF il y a 100 ans	p.7
La recherche avance	p.8

ACTUALITÉS

• 7 ^e édition du Congrès algérien de mécanique	p.12
• Le froid au service de la sécurité alimentaire et pharmaceutique	p.12
• Le Cémafroid porte le programme Ecler	p.13
• Engie renforce sa position sur les CEE	p.13
• Une pompe à chaleur d’exception	p.14
• ITER Organization a choisi SPIE	p.14

DOSSIER : FROID ET SANTÉ

• Interview du Dr Léon Salumu, responsable Programme de Médecins sans frontières (MSF)	p.16
• La chaîne du froid, une priorité pour la santé	p.18
• Articles :	
- Pleins phares sur l’amélioration de la chaîne du froid des médicaments dans un CHU	p.20
- La chaîne du froid dans les hôpitaux publics du Vietnam	p.26
- La préparation des plaques eutectiques pour les caisses isothermes	p.29
- Emballages isothermes à usage unique versus emballages réutilisables	p.34

FOCUS

• Etude cinétique de la cristallisation des hydrates de CO ₂ par spectroscopie infrarouge FTIR/ATR	p.43
• Un « nouveau » couple pour les PAC à compression/résorption	p.51

MEMOFROID

• Thermodynamique en dimensions finies - optimisation des systèmes	p.56
• Jacques Charles (1746-1823), le père des relations entre la température et la pression	p.60

AU COEUR DE L’AFF

• Les Vœux du froid, une première réussie	p.62
• La conférence ICCO 2020 approche	p.62

LES NOUVEAUX PRODUITS ET SERVICES	p.63
-----------------------------------	------

NOS CONTRIBUTEURS	p.65
-------------------	------

Revue Générale du Froid

et du conditionnement de l'air

Directeur de la publication
Gérald CAVALIER, président de l'AFF

Rédactrice en chef
Martine GESLIN, redaction.rgf@orange.fr

Graphiste
Eve TABERNA, eve.taberna@gmail.com

Comité de rédaction
Claudia CAPO, doctorante au Cemafroid et à l'INSA de Lyon

Medhi CHARNI, ingénieur d'étude R&D.
IFFI-CNAM

Evelyne DERENS-BERTHEAU,
ingénieur de recherche à Irstea

Jean-Pierre DOMBLIDES,
maître de conférences

Imad LOUATI, consultant Energie-Industrie

Louis Goussé, ingénieur Cnam

Florence Moulins, expert conseil au Cemafroid

Philippe HABERSCHILL,
maître de conférences, HDR - INSA Lyon

Abbès KACIMI,
directeur expertise Chaîne du froid, Sofrigam

Jean-Louis LANOISELLÉ,
professeur université Bretagne Sud

Alain LE BAIL, professeur à Oniris

Maxime LEJEUNE, doctorant - Irstea

Guy LETANG, ingénieur ENSIA

Christiane MAHE, ingénieur INSA

Fatou-Toutie NDOYE, ingénieur de
recherche à Irstea

Susan PHALIPPOU, pharmacien consultant

Guillaume SAINT LORANT

docteur en pharmacie PH, CHRU de Caen

Marie-France TERRIER,
ingénieur de recherche au CNAM/IFFI

Jean-Yves THONNELIER, ingénieur INSA

Cyril TOUBLANC,
maître de conférences à Oniris

Bernard VALENTIN, ingénieur AM

Mohammed YOUB-HDRISSI,
chef de projet R&D, Air Liquide

Membres d'honneur

Maxime DUMINIL,
professeur à l'École Centrale

André GAC, ingénieur général du GREF,
directeur honoraire de l'IIF,

Lucien ROUSSEL, ingénieur ESCPI

Crédits photos

AdobeStock

La Revue Générale du Froid appartient
à l'Association Française du Froid (AFF)
dont elle est l'organe officiel.
Tél. : 01 45 44 52 52

Association Française du Froid

4 Place St-Germain-des-Près, 75006 Paris
Tél. : 01 45 44 52 52 • Fax : 01 42 22 00 42
Web : www.aff-froid.com

© Association française du Froid.
Tous droits de reproduction, même partielle,
par quelque procédé que ce soit, réservés
pour tous pays.

Abonnements : AFF

abonnement.rgf@orange.fr

Abonnement annuel (6 numéros)

France : 125 € dont TVA : 2,10%

Étranger : 160 €

Commission paritaire : 0121G83366

Dépôt légal : à parution

Impression : Imprimerie Corlet

Les événements du froid 2019

CONGRÈS ET SALONS

15-16 mai

**Selfi : salon des solutions
éco-responsables ; logistique.**
Marseille Parc Chanot
Contact : www.leselfi.com

19-21 novembre

**Sifa : salon interprofessionnel du froid
et de ses applications.**
Paris espace Champéret
Contact : Frédéric Escoffier, directeur
commercial
f-escoffier@pyc.fr • +33 (0)1 53 26 47 96

26 juin 2019

Journée mondiale du froid.

2023 - A Paris

Congrès international du froid,
organisé par l'AFF.

Congrès international du froid 2019

Les congrès internationaux du froid ont lieu tous les 4 ans et rassemblent les acteurs de tous les domaines du froid. Le prochain congrès se tiendra à Montréal (Canada) du 24 au 30 août 2019. Visitez le site : icr2019.org

CONFÉRENCES

6-7 juin

18^e conférence européenne sur les dernières technologies dans les domaines du conditionnement d'air et du froid.
Milan, Italie
Contact : 39 (0) 142 452403
conference@centrogallileo.it

11-12 juin

Eureka 2019 : Chauffage, froid et ventilation : des technologies durables pour une vie meilleure.
Bruges, Belgique
Contact : EPEE secrétariat
+ 32 2 732 70 40
info@eurekhvacr.eu

2020 - ICCC

6^e conférence internationale de l'Institut internationale du froid sur la chaîne du froid et de la durabilité.
Cité des congrès à Nantes (44) du 15 au 17 avril. Organisation AFF en partenariat avec Oniris, Cnrs et Gepea.
Renseignements : cyril.toublanc@oniris-nantes.fr

Erratum

RGF n° 1172 / P. 17 titre : lire experts et non exerts / P. 26 titre : lire condenseur et non condensateur
Prière de bien vouloir nous excuser pour ces erreurs.
La rédactrice en chef : Martine Geslin

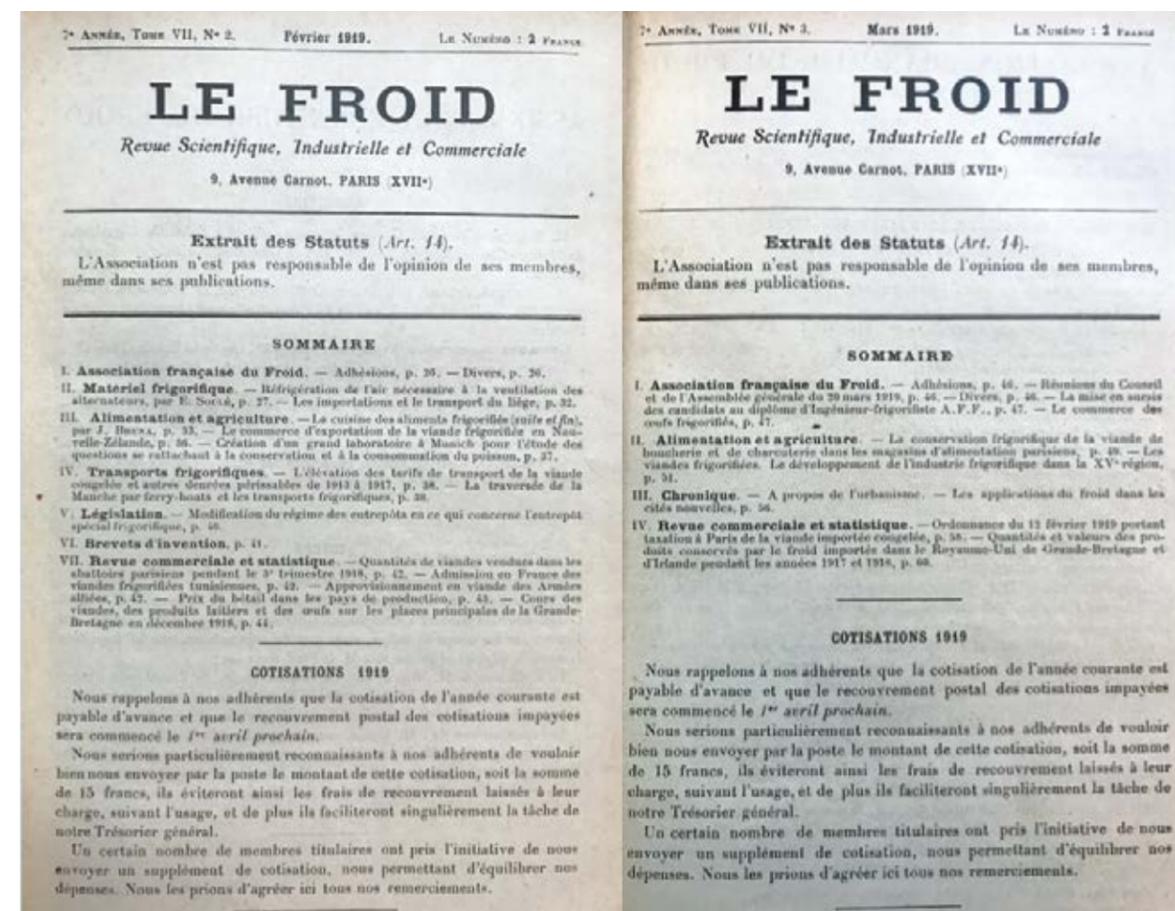
La chasse aux adhésions dure

Par Gérald Cavalier, président de l'AFF

Les associations techniques et scientifiques tout comme les associations professionnelles partent chaque année à la chasse aux adhérents et aux adhésions.

Appels à cotisation, relances sont le commun de toutes les associations en début d'année. Cela n'est pas nouveau ! Il y a 100 ans, l'AFF rencontrait déjà les mêmes difficultés comme nous le rapporte la RGF dans ses numéros de février et de mars 1919... Les 15 F de cotisation annuelle, soit 19,65 € en 2018, devaient être payés d'avance... et adressés par la poste et l'AFF remerciait déjà ceux qui avaient la générosité de compléter leur cotisation par un don pour aider l'association à boucler son budget. Ces remerciements sont toujours valables pour ceux qui perpétuent cette tradition un siècle plus tard.

Le développement de la chaîne du froid nécessitait d'importants volumes d'isolants et la RGF s'intéressait de près au marché du liège, principal isolant pour les chambres froides comme pour les équipements de transport sous température dirigée. Le liège n'était pas le seul produit importé dans cette première année d'après-guerre. Les importations de viandes et de denrées alimentaires sous température dirigée sont indispensables pour assurer l'alimentation de la France. La RGF s'intéresse à leur conservation dans les entrepôts et dans les magasins parisiens ainsi qu'à leurs propriétés et qualité. La RGF s'intéresse aussi à leur cours en fonction de leur provenance et des marchés entre Paris et la Grande-Bretagne. Le prix de leur transport augmente et il est question de taxes, non pas sur les fluides frigorigènes, mais sur les viandes réfrigérées ■



Caractérisation expérimentale et modélisation des transferts thermiques/hydriques et de la croissance microbienne au cours du transport frigorifique de carcasses de porc

Directeur de thèse : Onrawee Laguerre, Denis Flick

Co-encadrants : Laurent Guillier (Anses), Steven Duret

Financement : DIM ASTREA

Laboratoires de recherche : Unité Génie des procédés frigorifiques (GPAN), Irstea, Antony

École doctorale : AgroParisTech

L'objectif de ce travail est de développer une démarche permettant de prédire l'évolution de la charge microbienne à la surface de carcasses de porc lors d'un transport frigorifique selon les conditions opératoires (température et humidité de l'air de soufflage) et les conditions initiales (profil de température en sortie de chambre froide d'abattoir).

Résumé

La croissance microbienne dépendant notamment de la température et de l'activité de l'eau, il est nécessaire d'étudier les transferts de chaleur et de matière de type diffusif au sein des carcasses et de type convectif autour des carcasses. Ces derniers dépendent de la circulation d'air dans le véhicule frigorifique lorsqu'il est chargé de centaines de demi-carcasses, ce qui rend la géométrie particulièrement complexe.

De ce fait, ce travail fait appel à diverses disciplines : mécanique des fluides, transferts thermiques et microbiologie prévisionnelle. Le couplage de ces trois disciplines permet d'apporter des réponses scientifiques quant à la qualité sanitaire des carcasses de porc.

En travaillant sur un dispositif expérimental reproduisant une semi-remorque chargée de carcasses de porc à l'échelle réduite, les écoulements d'air ont pu être caractérisés par vélocimétrie laser Doppler 2D dans deux configurations de distribution d'air (avec et sans conduits). De plus, les coefficients de transfert convectifs locaux ont pu être estimés à la surface de différentes parties des carcasses de porc et à différentes positions dans la semi-remorque à l'échelle réduite. Un schéma simplifié des écoulements d'air a été établi, il permet de localiser les « zones à risque » dans la semi-remorque chargée (faible circulation d'air et faibles coefficients de transfert convectif).

En se basant sur les résultats de l'étude expérimentale à l'échelle du laboratoire et sur ceux récoltés au cours de vrais transports frigorifiques, la variabilité des paramètres caractérisant l'air circulant autour des carcasses a pu être estimée. Ces informations ont servi de conditions aux limites d'un modèle de transfert de chaleur et de matière (eau) au sein de la partie la plus sensible au niveau microbiologique : le jambon. Ce modèle 3D, résolu par la méthode des éléments finis, permet de prédire l'évolution de la température, de la teneur en eau et de la charge microbienne (*Pseudomonas*) à la surface de la partie maigre du jambon pour différents scénarios de transport frigorifique. Les résultats ont montré que si le transport commence alors que le cœur des carcasses est encore tiède (15 °C au lieu de 7 °C selon la réglementation actuelle), la croissance des microor-



ganismes à la surface des carcasses de porc n'est globalement pas plus importante entre l'abattage et l'arrivée sur le site de découpe.

Enfin, une étude de terrain a permis d'étudier les profils de température de la surface et du cœur des carcasses dans des conditions réelles de transport. De plus, cette étude a permis d'évaluer les besoins frigorifiques supplémentaires dus au transport des carcasses chaudes par rapport au transport de carcasses froides selon différents taux de chargement. Cette étude a permis de développer des méthodes de caractérisation des écoulements et des transferts dans une géométrie particulièrement complexe. Elle a montré l'intérêt de coupler des modèles de transfert et de microbiologie prévisionnelle. Les expérimentations à l'échelle du laboratoire ont été construites en reproduisant au plus près les conditions réelles grâce à l'appui de spécialistes de la filière viande. Ainsi les carcasses modèles ont été réalisées dans des moules obtenus par impression 3D d'après des scanners X de vraies carcasses. Les résultats de cette étude sont utilisables par la profession et les pouvoirs publics pour l'adaptation de la réglementation des transports réfrigérés. La démarche développée pourra être adaptée pour des problèmes similaires dans des enceintes ventilées très encombrées.

Mots clés : transport frigorifique, carcasses de porc, écoulement d'air, transferts thermiques, microbiologie prévisionnelle

Abstract

The objective of this work is to develop an approach allowing to predict the evolution of microbial load on the surface of pork carcasses during a refrigerated transport according to the operating conditions (temperature and humidity of the blowing air) and initial conditions of product (temperature profile at the outlet of the slaughterhouse cold room). Since microbial growth depends mainly on temperature and water activity, it is necessary to study heat and mass transfer within and around the carcasses. These phenomena depend on the airflow pattern in the refrigerated vehicle loaded with hundreds of half-carcasses which makes the geometry particularly complex.

Thus, this work involves various disciplines: fluid mechanics, heat/mass transfer and predictive microbiology. The coupling of these three disciplines makes it possible to provide scientific answers as to the sanitary quality of the pork carcasses.

Experiments at the laboratory scale were built by reproducing the real conditions as closely as possible thanks to the support of specialists in the meat sector. Thus the pork carcass models were made in molds obtained by 3D printing from X-Ray scanners of real carcasses. By conducting experiments on a reduced scale semitrailer loaded with these carcasses, the airflow could be characterized using 2D Doppler Laser Velocimetry in two air distribution configurations (with and without air ducts). In addition, local convective heat transfer coefficients could be estimated at the surface of different parts of pork carcasses and at different positions in the reduced-scale trailer using fluxmeters. A simplified airflow diagram and the ratio of air distribution in the loaded vehicle have been established, helping in the identification of the «risk zones» in the loaded semi-trailer (low air circulation and low convective transfer coefficients).

*Based on the experimental results in laboratory scale and those measured during real refrigerated transport, the variability of the parameters characterizing the air circulating around the carcasses could be estimated. This information served as boundary conditions for heat and mass (water) transfer modelling within the most microbial sensitive part of carcass: the ham. This 3D model, solved by the finite element method, allows the prediction of the evolution of the temperature, the water content and the microbial load (*Pseudomonas*) on the surface of the lean part of the ham for different transport scenarios. The results showed that if the transport begins while the carcasses center is still warm (15 °C instead of 7 °C according to current regulation) the microbial growth on the surface of pork carcasses is generally not more between slaughter and arrival at the cutting site.*

Finally, a field study was conducted to monitor the temperature evolution of the pork carcass located at different positions in semitrailer. The cooling capacity of semitrailer required for the transport of different ratio of warm carcasses was estimated. Finally, the developed experimental and numerical methodologies for airflow and heat transfer characterization in a particularly complex geometry showed the interest of coupling transfer models and predictive microbiology models. The results of this study are usable by the profession and the public authorities for the adaptation of the refrigerated transport regulations. The approach developed may be adapted for similar problems in ventilated enclosures.

Keywords: refrigerated transport, pork carcasses, air flow, thermal transfer, predictive, microbiology.

Modélisation d'un écoulement diphasique évaporatif le long d'une paroi chauffée

Directeur de thèse : Laurence Fournaison.

Co-encadrants : Anthony Delahaye, Stéphanie Lacour, François Trinquet.

Laboratoires de recherche : Irstea, unité GPAN.

Ecole doctorale : ED 391 : Sciences mécanique, acoustique, électronique et robotique de Paris.

Ces travaux contribuent au développement d'un outil numérique permettant de simuler l'effet d'un spray sur une plaque chauffée.

Résumé

La brumisation en amont d'un échangeur à air permet d'intensifier les échanges de chaleur entre l'air et les parois de l'échangeur. La simulation de l'écoulement au sein d'un échangeur est complexe à cause des interactions avec les parois chauffées. Peu d'études traitent de la simulation de l'interaction spray/paroi d'un échangeur à l'aide d'un code CFD. Ces travaux de thèse sont donc une contribution au développement d'un outil numérique permettant de simuler l'effet d'un spray sur une plaque chauffée. Le code CFD 3D Code_Saturne, développé par EDF, est utilisé. Pour des topographies complexes, comme un réseau de parois, l'approche eulérienne est pressentie comme une alternative aux approches lagrangiennes plus coûteuses en temps de calcul et choisie pour simuler la phase dispersée. Le modèle de spray développé couple un modèle 0D de formation de spray et un modèle CFD 3D simulant la dispersion et l'évaporation de gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air. L'approche de la partie dispersion a été comparée et validée à l'aide de mesures expérimentales. Une analyse paramétrique est réalisée et les résultats obtenus sont conformes à ceux de la littérature. Cette analyse a également permis de montrer que la majorité de l'évaporation est réalisée lors de la formation du spray. Le bon refroidissement d'une cible est obtenu pour une cinétique d'évaporation rapide couplée à une surface de spray proche de la surface cible. L'interaction du nuage de gouttes avec la paroi est également abordée. Un nouveau dispositif expérimental est mis en œuvre afin d'étudier l'interaction spray + paroi avec des flux massiques d'eau faibles. Une plaque chauffée par un flux imposé est positionnée dans un écoulement d'air dans lequel un spray est injecté. Le flux massique de gouttes impactant la paroi est déterminé numériquement à partir de la vitesse normale à la paroi. La formulation des conditions de dépôt des gouttes et des conditions thermiques sur la paroi est un travail original. Les résultats numériques et expérimentaux sont confrontés. Les premiers résultats numériques obtenus sur le refroidissement de la plaque chauffée sont très encourageants pour l'obtention d'un outil numérique simulant un écoulement diphasique au sein d'un échangeur.

Mots clés : spray d'eau, modélisation, CFD, écoulement diphasique, évaporation, dispersion, échange pariétal.

Abstract

The application of water sprays can boost air cooling capacity and improve the heat exchange between the air and the heat exchanger wall. Computational Fluid Dynamics (CFD) models are widely used to investigate the thermal system performance. However, a simple and accurate CFD model for two-phase flow studies with complex 3D geometries such as in heat exchangers remains challenging. This study is therefore carried out to fill this gap by developing a numerical tool to investigate the effects of the water spray on the heat exchanger efficiency. A spray model was developed in this study to simulate droplet dispersion and evaporation. This model couples a 0D spray formation model with a 3D-CFD model. The Code_Saturne software developed by EDF is used and based on the Eulerian approach which requires less computer resources compared to Lagrangian one. The global model was compared with experimental results for the validation. Through parametric analysis, the obtained results were consistent with the literature. Based on this analysis, it was also observed that droplets evaporate more during spray formation compared to the dispersion. Moreover, the optimum target cooling can be achieved when the spray surface is close to the target surface together with fast droplet evaporation rate. The effect of water sprays on a heated plate was also studied experimentally and numerically. An experiment was performed to study spray/wall interaction by using a heated plate located in a two-phase flow. For the numerical study, the water mass flow rate was determined by the normal velocity component to the wall. The formulation of boundary condition for droplet deposit and heat exchange on the wall is then obtained. The numerical and experimental results were compared and showed good agreement. Therefore, the spray model developed in this study on the heated plate is very promising.

Keywords: water spray, modelling, CFD, two-phase flow, evaporation, dispersion, parietal, exchange.



EXPOSITION JUSQU'AU 22 AVRIL 2019

FROID

ORGANISEZ VOTRE ÉVÉNEMENT
À LA SALINE ROYALE D'ARC-ET-SENANS.



ACCÈS

EN TRAIN À 2H30 DE PARIS ET 2H15 DE LYON



CENTRE DE CONGRÈS

10 SALLES DE RÉUNION MODULABLES DE 10 À 900 PERSONNES



HÔTEL 3 ÉTOILES

31 CHAMBRES AU COEUR DE LA SALINE



RESTAURATION

4 SALLES DE 10 À 900 PERSONNES

EN SOUTENANT
LA SALINE ROYALE
ET EN DEVENANT
MÉCÈNE, BÉNÉFICIEZ
D'UN ESPACE
POUR UN SHOWROOM
OU UN SALON
PROFESSIONNEL.

CONTACT :
JULIE DE SLOOVER
juliedesloover@salineroyale.com
07 60 49 84 90
www.salineroyale.com

7^e édition du Congrès algérien de mécanique

Abbes Kacimi, directeur expertise chaîne du froid, Sofrigam, 1 rue de l'Union 92565 Rueil-Malmaison. France

La septième édition du Congrès algérien de mécanique CAM2019 se déroulera du 24 au 27 novembre prochain à Ghardaïa, située à 600 km au sud d'Alger. Des membres de l'AFF et des intervenants français seront présents.

Après les six premières éditions qui ont été organisées à Alger, Biskra, Guelma, Mascara, El-Oued et Constantine, Ghardaïa accueille le congrès algérien de mécanique CAM2019. Ville légendaire, Ghardaïa est connue pour ses vestiges historiques, son architecture unique en son genre et son cachet touristique indéniable. Le CAM se veut une tribune réunissant des chercheurs exerçant leur activité à l'université ou dans les centres de recherche ; il tente de faire le lien entre l'industrie et l'université via l'Association algérienne pour le transfert de technologie « a2t2 ». Le CAM s'est précisément fixé pour but d'encourager les interactions étroites entre ces différents groupes. Le CAM2019 réunira des scientifiques et des experts industriels actifs dans les domaines de



l'ingénierie mécanique pour établir des échanges constructifs, enrichissants et favorisant l'essor de nouvelles idées.

Lors des journées du 24 au 27 novembre 2019 qui auront lieu à l'Université de Ghardaïa, des chercheurs et des industriels reconnus présenteront des conférences plénières et introductives.

Les dix-huit thèmes du CAM2019 s'articulent autour de trois grands axes :

1. mécanique des solides, des fluides et des structures ;
2. génie mécanique et productique ;
3. génie civil, hydraulique et énergies renouvelables ■

Renseignements :

cam.ja.dz@gmail.com ; site web : <http://www.cam-dz.org>

Le froid au service de la sécurité alimentaire et pharmaceutique

Le Selfi (Salon exclusif logistique froid innovation) jumelé avec La chaîne logistique du froid qui regroupe l'Usnef, l'Untf et Transfrigoroute France, se déroulera les 15 et 16 mai prochains au Parc Chanot à Marseille.

Plus de 2 000 décideurs et prescripteurs de la filière logistique du froid sont attendus. Ils pourront y découvrir les toutes dernières technologies mises sur le marché tant pour le transport que pour le stockage des produits sous température dirigée, dans l'objectif de garantir la sécurité des citoyens. Ces innovations ont également pour objectif d'assurer la transition énergétique à tous les maillons de la chaîne du froid. Moteurs des véhicules et énergies alternatives (GNC/GNL, électrique, hybrides et hydrogène), groupes frigorifiques (électriques, cryogéniques à l'azote liquide et au CO₂ recyclé, au gaz, hybrides, renfort des panneaux solaires embarqués, hydrogène, etc.). Toutes ces technologies contribuent à réduire l'impact carbone et les émissions polluantes, tout en limitant le bruit pendant le transport et les livraisons urbaines.

Nouveau : l'intelligence artificielle (IA) sera au centre des thématiques du Selfi. Elle fera le lien entre l'entrepôt sous température dirigée et la mise en avant de l'entrepôt du futur, d'une part, et les moyens de transport, d'autre part. L'IA se déploie également dans les véhicules de plus en plus connectés ainsi que pour la gestion de parc et la maintenance prédictive. Enfin, le transport en température dirigée de type multimodal, fluvial et maritime, sera également mis en avant avec les Hubs de Marseille, Toulon et Sète, sans oublier l'Hinterland du Port de Lyon ■

Source : communiqué de presse du 14 février 2019. Froid News.



Le Cémafroid porte le programme Ecler

Sélectionné par le ministère de l'Ecologie, le programme Ecler du Cemafroid en partenariat avec Hydroparts France, annonce une économie de 141 millions de litres de carburants dans la logistique du froid.

Le programme Ecler (Economie circulaire et logistique écologique et responsable) piloté par le Cemafroid a été retenu pour augmenter l'efficacité énergétique dans le secteur du transport. Il est issu de la fusion du programme Froid proposé par le Cemafroid et du programme Ecler par Hydroparts France. Par quels moyens ? Le programme repose sur la formation de 10 000 conducteurs de véhicules frigorifiques aux bonnes pratiques d'utilisation du froid, au marquage de 135 000 camions de transport sous température dirigée français qui afficheront les gestes clés de la logistique écologique et responsable. Ces informations procureront des arguments aux conducteurs pour convaincre les chargeurs et les réceptionnaires du bien-fondé des bonnes pratiques. Cette formation expliquera le processus de connexion de 10 000 camions frigorifiques afin d'optimiser leur gestion et leur consommation. Ce programme met également en œuvre une plate-forme digi-

tale innovante qui permettra de générer de l'information intelligente engendrant les optimisations et les économies d'énergie propres à l'écosystème des transports sous température dirigée.

Cemafroid Formation et visible.digital dispenseront la formation ■



POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE PROGRAMME ECLER :

- contacter : contact@programme-ecler.fr ;
- consulter la plaquette de présentation : [plaquette-programme-ecler-201903.pdf](#) ;
- visiter le site internet dédié au programme : www.cemafroid.fr/programme-ecler.htm
- se connecter au groupe LinkedIn créé pour l'occasion.

Engie renforce sa position sur les CEE

Avec l'acquisition du pôle CertiNergy & Solutions auprès du Groupe Effy, Engie renforce sa position sur les certificats d'économie d'énergie (CEE) pour accélérer la transition énergétique des entreprises et des collectivités.



Engie, au travers de son entité Engie Entreprises & Collectivités, a acquis auprès du groupe Effy, les sociétés CertiNergy, CN Solutions en France et CertiNergia en Italie, pionnières du dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE) et spécialisées dans le conseil en efficacité énergétique. Cette opération stratégique permet à Engie Entreprises & Collectivités, fournisseur de gaz naturel, d'électricité et d'énergies vertes pour le B2B (*Business to business*) en France, d'augmenter encore sa capacité de proposition à ses clients entreprises, établissements publics, syndicats et bailleurs sociaux, par la valorisation des CEE pour financer leurs projets de travaux de rénovation, destinés à réduire leur consommation énergétique et par là même, leur empreinte carbone.

La mission du pôle CertiNergy & Solutions est de fournir aux entreprises et aux collectivités les moyens techniques et financiers de consommer moins de ressources et de la façon la plus compétitive, sans perte ni de confort ni de performance. Ce pôle propose, en France, un accompagnement complet allant de l'identification des gisements d'économies d'énergie à la mise en œuvre des travaux.

Par cette opération, le groupe Effy recentre son action sur l'accompagnement digital des particuliers avec l'ambition inchangée de rendre la rénovation énergétique plus solidaire et efficace. Effy disposera ainsi des moyens financiers nécessaires au renforcement de ses plateformes numériques et offres innovantes, visant à massifier et à simplifier la réalisation de travaux performants et de qualité ■

Une pompe à chaleur d'exception

Panasonic vient d'équiper le nouveau chai de vinification, ainsi que l'espace restauration du Château Grand Boise situé à Trets en Provence. Une seule et même solution a été retenue pour de multiples applications : la pompe à chaleur PACi de Panasonic.

Cette solution a été utilisée aussi bien en basse température, que ponctuellement en mode chaud pour le chai, et bloquée en mode chaud pour le bar-restaurant. Confort, esthétisme et réactivité étaient les trois mots d'ordre d'un chantier complexe réalisé pour un domaine d'exception.

Les caves de vinification : le défi climatisation

En 2018, Château Grand Boise s'est lancé dans des travaux d'agrandissement de ses caves de vinification afin de créer un nouveau chai, l'ancien devenant trop exigu. L'idée avec ce nouvel espace de 125 m² situé au rez-de-chaussée du bâtiment, était également de créer un espace de réception convivial afin d'accueillir des clients et d'organiser des dégustations. Climatiser cet espace constituait un véritable challenge. L'objectif premier était de maintenir constante la température ambiante du chai qui ne devait subir ni la chaleur de l'été ni celle des clients venus déguster le vin. Difficulté supplémentaire : le chai était séparé en plusieurs espaces avec pour chacun une température différente : 12 °C pour l'élevage, 20 °C pour la vinification, et enfin 12 °C également pour une troisième salle dédiée à la conservation des grands crus.

Jean Simonet, le vigneron du Château, souhaitait pour sa part que le système soit silencieux, esthétique avec un encombrement réduit, et réactif. Il fallait aussi qu'il puisse piloter lui-même le système afin de gérer les différentes phases de la vinification.

A l'origine, le domaine était équipé d'une PAC air/eau installée par un frigoriste spécialisé. L'installateur choisi pour l'agrandissement du chai s'est tourné vers un système à

détente directe, capable de faire baisser la température de l'espace très rapidement en cas d'arrivée de visiteurs. De plus l'avancée du chantier rendait impossible l'installation d'une dalle rafraichissante. C'est donc un système à détente directe PACi de 25 kW de Panasonic qui a été choisi. En principe, les pompes à chaleur PACi ne descendent pas en dessous de 16 °C de température de consigne. Pour Château Grand Boise, ils ont fait l'objet d'un paramétrage spécial afin de garantir une température oscillant entre 12 et 16 °C.

L'une des difficultés de l'installation du système dans la grande salle où ont lieu les dégustations était également de rendre les unités intérieures les moins visibles possible. Celles-ci, particulièrement compactes ont donc été intégrées dans des voutes spécialement créées dans le cadre de cette rénovation. L'espace de vinification affiche une contrainte technique supplémentaire. En effet, l'élevage du vin nécessite de monter la température du chai afin de déclencher le processus de fermentation après les vendanges. Le chai doit ainsi atteindre la température de 24 °C pour que le vin soit entre 18 et 22 °C. C'est toujours une unité extérieure PACi reliée à un « gainable » qui assure ces mêmes variations de températures. Car seul un système à détente directe est capable de soutenir de telles variations de températures tout en restant performant ce qui est nécessaire, particulièrement en Provence où il peut faire très chaud en été.

Enfin, la vinothèque, consacrée à la conservation des grands crus ne tolère aucune variation de température ; ainsi un « gainable monosplit », toujours relié à une unité extérieure PACi assure une température constante de 12 °C ■

ITER Organization a choisi SPIE

ITER Organization confie à SPIE la maintenance de ses bâtiments et infrastructures pour les quatre prochaines années.

Filiales françaises du groupe SPIE, leader européen indépendant des services multi-techniques dans les domaines de l'énergie et des communications, SPIE Nucléaire et SPIE Facilities ont remporté le contrat de maintenance multi-technique du site d'ITER, à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Fruit d'une collaboration inédite entre les grandes puissances mondiales(*), ce premier réacteur destiné à explorer la fusion nucléaire comme source d'énergie décarbonée représente un enjeu majeur pour la production d'électricité.

(*) La Chine, l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et Les États-Unis.



© ITER Organization / EJF Riche

DOSSIER Froid et santé

Sommaire du dossier

- Interview du Dr Léon Salumu**
 > Martine Geslin p.16
- La chaîne du froid, une priorité pour la santé**
 > Abbe Kacimi p.18
- Pleins phares sur l'amélioration de la chaîne du froid des médicaments dans un CHU**
 > Thomas Ricci, Elodie Delavoipière et Guillaume Saint-Lorant p.20
- La chaîne du froid dans les hôpitaux publics du Vietnam**
 > Houda Hasnaoui, Juliette Leroux, Mathilde Lechevrel et Guillaume Saint Lorant p.26
- La préparation des plaques eutectiques pour les caisses isothermes**
 > Abbes Kacimi et David Stienne p.29
- Emballages isothermes à usage unique versus emballages réutilisables**
 > Laetitia Perche p.34
- > Dossier coordonné par Abbes Kacimi et Guillaume Saint-Lorant

AU SOMMAIRE
DU PROCHAIN
NUMÉRO :
Ventilation,
conditionnement
de l'air, PAC



Sécuriser tous les maillons

Propos recueillis par Martine Geslin

Le Dr Léon Salumu, responsable Programme de Médecins sans frontières (MSF), en mission en République démocratique du Congo, décrit ici tous les maillons de la chaîne du froid des produits de santé thermosensibles que MSF délivre dans ce pays.

RGF : Quels produits de santé thermosensibles (PST) utilise l'Organisation non gouvernementale internationale, Médecins sans frontières (MSF), pour la capitale et ses projets en République démocratique du Congo (RDC) ?

Dr Léon Salumu : Les vaccins représentent le plus gros volume de produits de santé thermosensibles dispensés par MSF à la population de la RDC. Un autre produit fréquemment utilisé est l'insuline. Pour les structures hospitalières, nous avons besoin de produits sanguins car nous effectuons beaucoup de transfusions sanguines. Pour en assurer la sécurité, nous disposons de produits réactifs de laboratoire, conservés en chaîne du froid. Pour ce qui est

des médicaments thermosensibles proprement dits, nous limitons leur usage compte tenu des contraintes de terrain. Le volume utilisé de ces produits fragiles varie en fonction des activités du moment. Pour les vaccins notamment, les quantités augmentent en cas d'épidémies comme celles de la rougeole et du choléra qui perdurent depuis l'an dernier et qui nécessitent d'organiser des campagnes de vaccinations.

RGF : Comment organisez-vous la chaîne du froid des PST ?

Dr L.S. : Chez nous, des équipes mixtes composées de médicaux et de logisticiens assurent la gestion et le suivi de la chaîne du froid. Nous mettons tout en œuvre, depuis le

fournisseur jusqu'aux unités de soins, pour sécuriser tous les maillons.

J'ai divisé la chaîne du froid en deux parties : le transport international et l'acheminement vers les unités de soins approprié au transport national. Nous achetons la plupart de nos produits thermosensibles, en Europe ou en Asie. Ils sont ensuite transportés en avion jusqu'à la capitale, Kinshasa. Afin de contrôler la température tout au long de ce processus, nous utilisons des indicateurs de températures électroniques, des *Log Tag* et des *Freeze Tag* ainsi que des cartes de contrôle « 3mp » que nous insérons également dans les boîtes isothermes. Les PST arrivent dans la capitale en moins de 72 heures, depuis notre centrale d'achats où ils sont emballés jusqu'à la capitale.

Après le déchargement à l'aéroport, une équipe de logisticiens MSF prend en charge les colis pour les conserver dans des réfrigérateurs spécifiques, dotés de thermomètres enregistreurs intégrés, lisibles à l'extérieur. En cas d'excursion de température, l'alarme se met en route. Nous utilisons aussi des feuilles de surveillance de la température bi-journalière (matin et soir). Une personne est responsable du suivi de la surveillance et de l'intégrité de la chaîne du froid.

	Réfrigérateur Vestfrost MK144	Réfrigérateur Vestfrost MK204	Réfrigérateur Vestfrost MK304	Réfrigérateur Sibir V170
Volume stockage brut	94 litres	136 litres	218 litres	170 litres
Volume stockage net	45 litres	75 litres	105 litres	55 litres

Capacité de stockage

QU'EST-CE QU'UNE CHAÎNE À TEMPÉRATURE CONTRÔLÉE (CTC) ?

La « chaîne à température contrôlée », permet de conserver des vaccins à des températures autres que la plage habituelle de +2 °C à +8 °C imposée dans la chaîne du froid, pendant une période de temps limitée et nécessitant des contrôles et une surveillance en rapport avec la stabilité de l'antigène. La CTC suppose généralement une seule sortie du vaccin dans des températures ambiantes ne dépassant pas +40 °C, pendant trois jours au minimum selon les critères de l'OMS, juste avant l'administration.

L'envoi des PST vers les projets en cours, distants de plusieurs centaines de kilomètres de la capitale, suivent les mêmes protocoles que ceux décrits précédemment. Néanmoins, certains projets sont éloignés de la piste d'aviation. Dans ce cas, un véhicule récupère les boîtes réfrigérées, toutes munies d'enregistreurs de température, pour les emmener sur le site du projet sans jamais dépasser 48 heures de trajet. Dès que les caisses arrivent, les produits sont contrôlés et nous avons la visibilité sur les excursions de température. Ils sont stockés dans des réfrigérateurs adaptés selon les mêmes principes que ceux de la capitale.

RGF : Nous abordons maintenant la deuxième étape : la livraison vers les unités de soins utilisatrices, dans les hôpitaux et les dispensaires. Qu'en est-il ?

Dr L.S. : Il n'y a pas de stockage des PST au niveau des unités de soins. Les produits sont conservés à la pharmacie centrale au sein du projet et distribués au fur et à mesure des besoins. Par exemple, pour les besoins journaliers de la vaccination, les produits sont acheminés dans des porte-vaccins réfrigérés comportant quatre accumulateurs disposés à l'intérieur, vers l'hôpital ou le dispensaire, chaque jour.

En revanche, en ce qui concerne les

produits sanguins, les poches de sang prélevé *in situ*, sont conservées dans le laboratoire de l'hôpital, équipés de réfrigérateurs adaptés, permettant de visualiser la bonne conservation du sang. L'unité de soins utilisatrice les reçoit à sa demande, dans des porte-vaccins réfrigérés, pour effectuer immédiatement la transfusion.

RGF : Êtes-vous souvent confronté à des ruptures de la chaîne du froid ?

Dr L.S. : Le manque d'électricité et d'infrastructure dans ces régions d'Afrique, constitue un handicap certain. L'installation des panneaux solaires et l'utilisation de générateurs pallient ces inconvénients majeurs qui nous conduisent parfois à jeter des produits du fait de la rupture de la chaîne du froid. C'est donc, pour nous, très important d'avoir des moyens de contrôle de la température, solides.

RGF : Quelles formations reçoivent les professionnels de MSF en lien avec la chaîne du froid ?

Dr L.S. : Il s'agit d'abord de formations pratico-pratiques.

Au niveau des aires de stockage, il y a toujours une personne responsable de la gestion de tous les produits thermosensibles et de la qualité de la chaîne du froid. Elle a reçu en amont, une formation sur toutes

les étapes du processus jusqu'à la distribution des PST au niveau de la capitale et des projets.

Puis, nous nous sommes rendu compte qu'il s'avérait nécessaire de dispenser une formation sur les responsabilités réciproques des différents acteurs impliqués dans la chaîne du froid.

Nous formons également les professionnels sur les produits en eux-mêmes, leur stabilité, les températures de conservation, mais uniquement sur ceux que MSF délivre. Nous développons aussi une formation technique sur la connaissance de tous les matériels mis à disposition à tous les maillons de la chaîne et leurs contraintes.

Il y a également une formation sur les moyens de contrôle et le suivi des températures.

Puis les logisticiens sont formés à la maintenance régulière des équipements.

D'une façon plus générale, tous les professionnels de santé de MSF, sont sensibilisés aux tenants et aux aboutissants de la chaîne du froid et des produits de santé thermosensibles comme d'ailleurs les logisticiens.

RGF : quelles seraient notamment les pistes d'amélioration ?

Dr L.S. : La première piste se situe au niveau du stockage des produits afin de garantir une bonne conservation des produits et garantir une bonne qualité de nos actes, surtout de la vaccination.

La deuxième piste consiste à développer la chaîne à température contrôlée (CTC). Nous encourageons les fabricants de vaccins à développer ce procédé répondant aux réalités du pays avec les difficultés de transport ; cette solution nous semble d'autant plus adaptée. Enfin le rêve de MSF, serait de disposer de vaccins qui ne sont pas soumis à la chaîne du froid ■

Introduction

LA CHAÎNE DU FROID, UNE PRIORITÉ POUR LA SANTÉ

Abbe Kacimi, directeur expertise chaîne du froid, Sofrigam, 1 rue de l'Union 92565 Rueil-Malmaison.

L'augmentation des pathologies et de traitements nécessitant des produits thermosensibles, associée aux exigences réglementaires, donne à la logistique sous température dirigée des enjeux financiers, techniques, juridiques et écologiques. Le respect de la chaîne du froid devient une priorité afin de maintenir la qualité des soins et des traitements.

Les moyens de stockage et de transport sont de plus en plus adaptés aux besoins et aux exigences pharmaceutiques. Les équipements mis en place sont qualifiés selon les protocoles proposés par les normes et les standards existants avec des critères d'acceptation plus contraignants. Dans une approche d'amélioration continue et de développement durable, les acteurs de la chaîne de distribution sous température contrôlée recherchent des solutions plus performantes, plus écologiques avec un coût logistique global réduit.

Thomas Ricci, Elodie Delavoipière et Guillaume Saint-Lorant présentent les actions d'amélioration sur la chaîne du froid des médicaments dans un centre hospitalier universitaire (CHU). Dans un souci de maintien de la qualité des médicaments thermosensibles, ce CHU a mis en place des équipements sous température dirigée adaptés et des dispositifs permettant une meilleure surveillance de la température. Ces mesures correctives et préventives s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue de la maîtrise de la chaîne du froid, couvrant

le stockage et le transport entre la pharmacie et les services de soins. Les données de stabilité de 340 références ont été actualisées et complétées permettant d'agir rapidement et efficacement en cas d'excursions de température.

Les hôpitaux publics du Vietnam

L'article de Houda Hasnaoui, Juliette Leroux et Guillaume Saint-Lorant analyse la chaîne du froid des médicaments thermosensibles dans les hôpitaux publics du Vietnam. Le travail mené dans ces hôpitaux durant quatre mois a permis d'identifier les points critiques de la chaîne du froid et d'apprécier la sécurité des patients et l'efficacité des médicaments thermosensibles. Il est nécessaire d'établir des normes ou des standards dans ce pays où les conditions climatiques et socio-économiques sont différentes de celles de l'Europe. Pour maintenir la qualité des médicaments thermosensibles, il serait bénéfique d'adapter le conditionnement de ces derniers au climat du pays ou encore de four-



nir des pochettes isothermes lors de la livraison. Il est également nécessaire de définir les responsabilités dans l'utilisation des équipements et de sensibiliser le personnel aux risques et aux bonnes pratiques.

La sécurisation de la chaîne du froid

Abbes Kacimi de Sofrigam et David Stienne du laboratoire Ater Métrologie étudient la préparation des plaques eutectiques utilisées dans les caisses isothermes pour conserver les produits de santé entre +2 °C et +8 °C. La préparation de ces accumulateurs thermiques est une étape importante dans la sécurisation de la chaîne du froid. Avant de les insérer dans la caisse, les plaques eutectiques sont préparées selon des protocoles établis en fonction des

exigences des produits, des moyens disponibles et des conditions logistiques. Le mode opératoire doit permettre la meilleure utilisation de l'énergie thermique stockée par la solution eutectique tout en évitant la congélation des produits à transporter. Les plaques sont souvent congelées à -20 °C environ, ensuite stabilisées ou remontées à -2 °C environ. L'article analyse les deux modes opératoires ainsi que le temps de remontée en température en fonction de l'épaisseur de la plaque, de la température ambiante et de la température de congélation.

Laetitia Perche de Sofrigam présente une comparaison des emballages isothermes à usage unique et réutilisables dédiés au transport de produits de santé thermosensibles. La préparation de ces emballages peut

être unique tout au long de l'année (mono-configuration) ou variable en fonction de la saison (bi-configuration). Afin de réduire les coûts et simplifier l'usage, les laboratoires pharmaceutiques et les prestataires de transport tendent à utiliser des solutions dites réutilisables, mono-configuration. Ces solutions peuvent être une alternative dans le cas où les emballages ne voyagent pas à vide et qu'ils ne présentent pas de faille thermique à l'usage. Les solutions bi-configuration restent toutefois moins lourdes et peuvent être plus avantageuses d'un point de vue économique et écologique. En comparant le coût logistique global, l'analyse a permis de déterminer le nombre d'utilisations minimum pour qu'une solution réutilisable mono-configuration soit plus rentable qu'une solution mono-configuration à usage unique ■



AU CŒUR DES CONFLITS, DES ÉPIDÉMIES
OU DES CATASTROPHES NATURELLES



**AIDEZ-NOUS
À SAUVER DES VIES**

En 2019, tout don versé à Médecins Sans Frontières ouvre droit à une réduction d'impôt de 75%, dans la limite de 546 euros de don, 66 % au-delà.



FAITES UN DON EN LIGNE
SUR NOTRE SITE SÉCURISÉ :

soutenir.msf.fr

Pleins phares sur l'amélioration de la chaîne du froid des médicaments dans un CHU

Thomas Ricci, Elodie Delavoipière, Guillaume Saint-Lorant
Pharmacie centrale, CHU de Caen, avenue de La Côte de Nacre, 14033 Caen cedex

La maîtrise de la chaîne du froid est un élément devenu essentiel pour les établissements de santé. Cet article présente différentes procédures mises en œuvre par un centre hospitalier universitaire (CHU) afin de garantir la qualité de la gestion des produits de santé thermosensibles, notamment au niveau du transport et du stockage.

Résumé

Avec l'augmentation du nombre de produits de santé thermosensibles, le respect de la chaîne du froid devient un objectif important pour les hôpitaux. Dans un souci de maintien de la qualité des médicaments thermosensibles un centre hospitalier universitaire (CHU) a mis en place différentes mesures correctives afin d'améliorer certaines étapes clés dans le maintien de la chaîne du froid. Pour améliorer le transport, une armoire réfrigérée mobile a été mise en place pour assurer l'acheminement entre la pharmacie et les services de soins. Pour le stockage dans les services et dans la pharmacie, des sondes ont été installées, avec une surveillance centralisée par la pharmacie. Enfin, après appel des différents laboratoires responsables et suite à la mise à jour des données de stabilité en cas d'excursions de température, une catégorisation de tous les médicaments thermosensibles a été faite. Ainsi, la pharmacie peut agir plus vite en cas d'excursion de température.

Mots clés : chaîne du froid, médicaments, amélioration continue.

Abstract

As the number of thermosensitive products grows, compliance with the cold chain becomes a key issue in hospitals. To maintain the quality of thermosensitive medicines, a teaching hospital decided to implement corrective actions designed to upgrade some key steps in the maintenance of the cold chain. In order to improve the transportation of cold medicines between the pharmacy and various units, a mobile refrigerator has been implemented. Regarding storage in the care units and the pharmacy, sensors have been installed. These sensors enable centralized monitoring by the pharmacy and greater healthcare stakeholder involvement. All thermosensitive medicines stored in the hospital have been categorized thanks to the updating of information on the stability of the thermosensitive medicines (through calls to the laboratories concerned). In this manner, the pharmacy can act as fast as possible where temperature abuse occurs.

Keywords: cold chain, medicines, ongoing improvements.

Introduction

On dit d'un médicament qu'il est thermosensible lorsqu'il doit être conservé dans des conditions définies par un intervalle de température donné afin de préserver l'intégrité de ses propriétés et cela dans la limite de leur durée de validité.

Les produits thermosensibles sont répartis en quatre catégories : les médicaments devant être conservés à une température comprise entre -25 °C et -18 °C (appelés « médicaments congelés »), ceux devant être conservés entre 2 et 8 °C (appelés médicaments « froids »), ceux devant

être conservés entre 8 °C et 15 °C, les médicaments se conservant à température ambiante (15-25 °C). Ces intervalles de température sont définis par la réglementation, que ce soit pour les établissements chargés de leur distribution (1), pour les officines (2), mais également pour les établis-

sements de santé et leurs pharmacies à usage intérieur (PUI) (3).

Les médicaments à conserver entre 2 °C et 8 °C, appelés couramment médicaments « froids », sont particulièrement critiques. Leur nombre est important et ne cesse de croître. En 2009, sur les vingt et une autorisations de mise sur le marché (AMM) octroyées par l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), 33 % d'entre elles concernaient un médicament thermosensible (données ANSM). La gestion des produits « froids » peut devenir problématique et expose ces derniers à des risques d'excursion thermique. Le non-respect de la chaîne du froid expose le pharmacien à un triple risque : un risque financier, un risque réglementaire et surtout un risque patient.

Le risque patient demeure le risque à gérer en priorité. Afin de prévenir et sensibiliser le public aux risques encourus lors de la mauvaise prise en charge des médicaments nécessitant des conditions de conservation particulière, de nombreuses alertes ont été émises suite à différentes excursions thermiques s'étant produites pour des médicaments « froids » impactant des patients. Ainsi, en juillet 2012, l'ANSM a notifié des cas de réactions anaphylactiques liées aux mauvaises conditions de conservation des curares (4). En 2013, l'Agence régionale de santé (ARS) Bourgogne a été alertée par les risques induits par une panne électrique survenue pendant une douzaine d'heures auprès de plusieurs pharmacies (5).

En juillet 2015, le centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts a été dans l'obligation de détruire plusieurs collyres au sérum autologue, après avoir constaté une rupture de la chaîne du froid, laissant les patients sans alternative thérapeutique pendant quelques semaines (6).



Concernant les risques financiers, au sein d'un centre hospitalier universitaire de 1495 lits, où les médicaments thermosensibles représentent 30 % du budget alloué aux médicaments, le suivi des non-conformités a montré une perte financière annuelle d'environ 20 000 € (21 858€ : données internes de 2017) associée à la maîtrise partielle du circuit de prise en charge des médicaments thermosensibles. Les budgets des médicaments « froids » sont en augmentation permanente : il a été noté une augmentation de 4,1 % des dépenses pour ces derniers, dépassant l'augmentation des dépenses de médicaments « ambiants » (2,1 %) (données laboratoires non publiées). Ainsi la maîtrise de la chaîne devient de plus en plus importante car dans l'avenir la place du médicament « froid » ne fera que s'accroître tant quantitativement que financièrement, majorant les conséquences lors d'excursions thermiques.

L'objectif de ce travail est d'effectuer un retour d'expérience sur la maîtrise de la chaîne des médicaments froids au sein d'un centre hospitalier universitaire (CHU) et montrer les mesures qui sont mises en place afin d'améliorer la prise en charge des médicaments thermosensibles.

Matériel

Cette étude porte sur le processus de la prise en charge des produits froids dans un établissement de soins de 1 495 lits. Le processus intègre les étapes de gestion des produits froids dans la PUI, d'acheminement des produits de la PUI jusqu'aux 80 unités de soins (UDS) du CHU, de gestion des médicaments thermosensibles au sein de l'UDS ainsi que le pilotage de toutes ces étapes par la PUI.

Méthode

Dans une démarche d'amélioration de la prise en charge des médica-



ments froids, la pharmacie du CHU a mis en place plusieurs mesures afin d'éviter les excursions de température, ainsi que des mesures mises en place permettant une conservation optimale des produits froids lors d'excursions de température (pannes de réfrigérateurs ou d'électricité, porte mal fermée, etc.) au sein des unités de soins et à la PUI.

Armoire mobile de livraison

Tout d'abord, une armoire mobile de livraison, d'un volume de 370 litres a été mise en place, pour remplacer les pochettes aluminisées isothermes contenant des accumulateurs de froid, précédemment utilisés. Il s'agit d'une armoire réfrigérée sur roulette qui fonctionne sur batterie. Elle est rechargée à la pharmacie sur le secteur (lui conférant une autonomie de plusieurs heures, si la porte reste porte close), puis débranchée lors des livraisons dans les services. Elle permet la livraison quotidienne des produits « froids » à toutes les UDS. De plus, elle possède des bacs permettant une meilleure répartition de la température entre les produits ainsi qu'un rangement des médicaments livrés par unité de soins. Les médicaments sont disposés dans des sachets plastique. Une feuille est à disposition du magasinier lui indiquant les services à livrer. Pour effectuer les mesures de température, lors des tests mis en place lors de la qualification opérationnelle de l'armoire mobile, des enregistreurs électroniques de température ont été utilisés. A chaque tournée, un enregistreur est placé dans l'armoire et enregistre en continu pendant la durée totale de la tournée globale ; deux autres sont mis dans deux pochettes plastique différentes afin de pouvoir suivre la température dans l'armoire et celle du trajet réfrigérateur - salle de soins (SDS).

Pilotage centralisé des excursions de température des réfrigérateurs des UDS par la PUI

Une autre mesure est en cours de déploiement pour permettre aux services d'apporter une vigilance plus importante aux médicaments froids stockés dans les UDS. Déjà, dans plusieurs services, des sondes de mesure en continu de la température ont été mises en place dans les réfrigérateurs. Ce système per-

met de faire une mesure toutes les 15 minutes, une surveillance centralisée des réfrigérateurs de la PUI et des UDS par la PUI et accroît la réactivité des services ainsi que la vitesse d'intervention de la pharmacie en cas d'excursion thermique. En effet, en cas d'excursion, une alarme est reportée sur le portable de l'interne de garde à la PUI qui assure une surveillance 7j/7, 24h/24 et une action immédiate sur place. De plus, un système de gyrophare, relié à ces sondes, est à l'étude afin de préve-

nir et de mieux responsabiliser les services de soins aux excursions de températures. L'éventualité d'une alarme sonore a été exclue par soucis de maintien du confort des patients hospitalisés. La mise en place de sondes d'enregistrement continu de la température n'exclut pas un relevé quotidien des températures par les infirmières diplômées d'état (IDE). Les services fermés le week-end, comme les blocs opératoires ou les hôpitaux de jour (HDJ), sont priorités pour l'installation des sondes.

La gestion des excursions thermiques étant centralisée à la PUI, tout service se doit de rapporter ces excursions auprès de la pharmacie afin que les produits soient pris en charge au plus vite et qu'une réponse appropriée soit donnée en fonction de chaque médicament. Une procédure sur la conduite à tenir est mise en place et affichée dans les services (« Les 7 règles d'or »), elle intègre les règles d'entretien du réfrigérateur travaillées avec les services d'hygiène du CHU (Figure 1).

Mise à jour des données de laboratoire sur les conduites à tenir lors d'excursion thermique

Une recherche documentaire a également été effectuée par le secteur qualité de la pharmacie en lien avec l'Observatoire du médicament, des dispositifs médicaux et de l'innovation thérapeutique (OMEDIT) Normandie. Les services d'information médicale des laboratoires fournisseurs des produits stockés et/ou achetés par la PUI du CHU de Caen ont été contactés individuellement afin d'obtenir, par écrit signé, la conduite à tenir en cas d'excursion de température pour chaque médicament. Grâce aux différentes réponses fournies par les pharmaciens responsable du service d'information médicale de chaque laboratoire, la

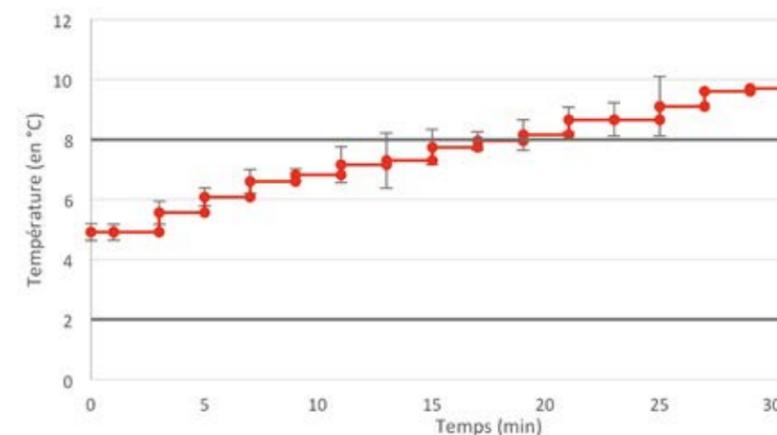


Figure 2 : évolution des températures dans l'armoire réfrigérée mobile lors de la livraison des services.

PUI met à jour ses données sur les excursions de température. Elle peut ainsi agir au plus vite auprès des services et à la pharmacie lors d'une excursion thermique. Ces données sont insérées dans la fiche produit du logiciel de gestion des médicaments (Pharma®, Computer Engineering, Paris, France).

Résultats et discussion

Armoire mobile de livraison

Au vu des inconvénients des pochettes aluminisées, l'armoire mobile a été privilégiée. Le personnel et les autres usagers estiment souvent que la pochette seule assure le respect du froid et ont du mal à gérer les accumulateurs de froid, souvent perdus ou conservés à température ambiante ou dans le réfrigérateur. De plus, il peut arriver que les pochettes restent en dehors du réfrigérateur car le personnel soignant oublie de la ranger, entraînant une excursion thermique car la pochette ne garantit pas un maintien prolongé de la température. Il y a aussi la nécessité de refroidir les pochettes avant d'y introduire les produits. Si on oublie cette étape, le maintien de la chaîne du froid n'est plus assuré, de plus ce dispositif est encombrant et occupe

une place de stockage importante qui devrait plutôt être réservée au stockage des médicaments compte tenu des contraintes de volume de la chambre froide. Le problème de la disponibilité se pose aussi : il peut arriver qu'il n'y ait plus de pochettes eutectiques, soit par manque fournisseur, soit parce que les services ne pensent pas à retourner les pochettes à la pharmacie. Ainsi la PUI se retrouve dans l'impossibilité de maîtriser la chaîne du froid lors de la livraison. Enfin, étant donné que le magasinier n'est pas habilité à manipuler les médicaments, si une pochette aluminisée était utilisée, le livreur se verrait obligé de laisser la pochette dans le réfrigérateur et l'effet isotherme de la pochette isolerait les produits de la température du réfrigérateur dans l'attente du rangement par l'IDE, seule habilitée à manipuler les médicaments ; encore une fois il y a un risque de rupture de la chaîne du froid. Pour une bonne conservation des médicaments froids, il n'y a pas d'intérêt à stocker une pochette isotherme dans un réfrigérateur. En pratique, l'armoire mobile est remplie par les préparateurs, les casiers sont préparés dans la cave froide pendant que l'armoire se met à tem-

Gestion des médicaments froids et sécurité de la prise en charge du patient
Les 7 règles d'or

REGLE N°1 :
Tout médicament livré dans un Isobag® doit être rangé immédiatement au réfrigérateur (sans l'isobag®). Les isobags® vides doivent être retournés à la pharmacie sans délai.

REGLE N°2 :
Soyez particulièrement vigilant à ce que la porte du réfrigérateur soit bien fermée.

REGLE N°3 :
Vérifier et tracer la température du réfrigérateur qui doit se situer entre +2°C et +8°C.
Si la température est < 2°C ou > 8°C :
• Ne pas utiliser le médicament (risque potentiel pour le patient)
• Appeler la pharmacie

REGLE N°4 :
En cas de non utilisation du médicament froid, insérer en commentaire libre (bulle blanche) dans "unités de soins, retour vers pharmacie" : "médicaments froids à reprendre dans le service."
La pharmacie assurera le retour.

REGLE N°5 :
Respecter les bonnes conditions de stockage des médicaments froids
Sur une étagère ajourée
Pas dans la porte du réfrigérateur
Pas dans le bac à légumes
Pas contre les parois

REGLE N°6 :
Réaliser l'entretien du réfrigérateur selon les procédures d'hygiène
• Entretien trimestriel
• Décongélation trimestrielle :
- stockage transitoire obligatoire assurant le maintien entre +2°C et +8°C
- nettoyage et décongélation
- remise en température avant remise en stock pour permettre la circulation du froid

REGLE N°7 :
Faire attention :
• A ne pas surcharger le réfrigérateur
• A ne pas stocker des denrées alimentaires ou prélèvements de liquides biologiques avec les médicaments.

Perte financière : 20 000€ / an

CHU CAEN NORMANDIE
EN CAS DE DOUTES, contacter la pharmacie 8h30-17h00 Poste 6805
En dehors des heures d'ouverture : contacter l'interne de garde GSM : 98 60 24
Pole Biologie-Pharmacie / service pharmacie

Figure 1 : affiche « Les 7 règles d'or » de gestion des médicaments thermosensibles.



pérature. Une fois la température atteinte comprise entre 2 °C et 8 °C, l'armoire est remplie le plus vite possible afin d'éviter les écarts de températures. Lors de la livraison dans les services, le magasinier récupère l'armoire roulante et se rend dans la salle de soins des UDS. Le magasinier sort de l'armoire le sac kraft destiné au service, l'armoire reste dans l'ascenseur, les médicaments sont livrés jusque dans la salle de soins et placés dans le réfrigérateur du service par le magasinier ; cela prend moins d'une minute en général. Le choix a été fait de laisser les médicaments dans des pochettes plastique, et non pas dans des pochettes aluminisées isothermes. Enfin, le personnel soignant a en charge le

rangement des médicaments froids, déposés dans le réfrigérateur. A partir de l'analyse de cinq transports correspondant aux résultats préliminaires de stabilité, une augmentation de 4 °C est en général constatée, au sein de l'armoire entre le départ et le retour à la PUI (Figure 2 page précédente). Ainsi pour garantir une tournée globale des services sans incident pour le médicament froid, la température de l'armoire mobile réfrigérée est fixée à 4 °C ± 1 °C. Pour augmenter la durée pendant laquelle la température en cours de livraison est bien comprise entre 2 et 8 °C, il a été décidé d'attendre un retour à 6 °C avant chaque ouverture de porte correspondant à une livraison. Pour ce qui est du trajet des po-

chettes plastique entre l'ascenseur et le réfrigérateur de la salle de soins, on note un écart de 3 °C en moyenne à chaque livraison, la limite des 8 °C est souvent dépassée mais la livraison ne dure en général pas plus d'une minute ; dans ces conditions la stabilité du médicament n'est pas altérée (Figure 3). Suite aux températures enregistrées, et afin de limiter le temps de livraison entre l'ascenseur et la salle de soins, les codes d'accès aux salles de soins ont été indiqués sur la feuille de traçabilité de la livraison par service affichée sur l'armoire. Si les prochaines évaluations menées, montrent de nouveaux dépassements de température au-delà de 8 °C, le transport entre l'armoire et le réfrigérateur de la salle de soins sera assuré avec des pochettes aluminisées qui, néanmoins, est une solution plus coûteuse.

Pilotage centralisé des excursions de température des réfrigérateurs des UDS par la PUI

En ce qui concerne la centralisation de la prise en charge des médicaments « froids » par la PUI et la responsabilisation des UDS, l'installation de sondes facilite la surveillance des réfrigérateurs. Cependant, les services et la PUI devront tout de même intervenir afin de traiter les excursions thermiques. Afin que tout le monde soit au courant de la conduite à tenir en cas d'excursion thermique, des « règles d'or » ont été communiqués (Figure 1). Ainsi, les services sont responsabilisés mais la gestion des excursions thermiques reste centralisée à la PUI après alerte des UDS ou de la PUI. Concernant l'installation des sondes Sirius®, le projet en cours de développement a été initié dans des services identifiés par l'établissement comme à risque comme les blocs

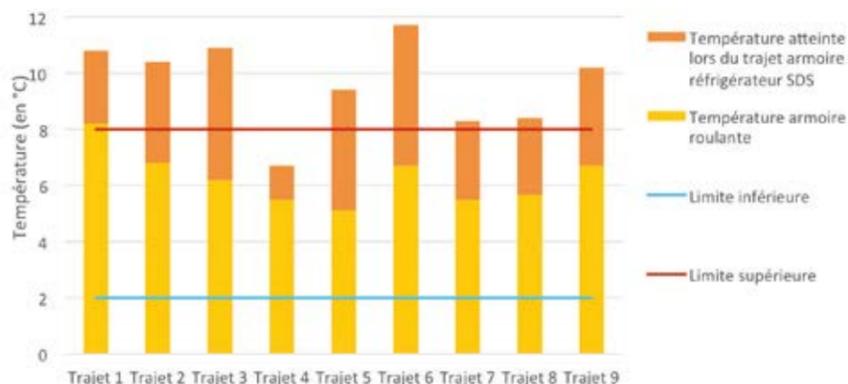


Figure 3 : températures atteintes dans les sachets de médicaments lors de la livraison dans les services de soins.



« BLACKLIST »	Quelle que soit la durée de l'excursion, le produit doit être jeté
0-12h	Une excursion de moins de 12h est possible d'après les données écrites du laboratoire
12-24h	Une excursion de moins de 24h est possible d'après les données écrites du laboratoire
24-48h	Une excursion de moins de 48h est possible d'après les données écrites du laboratoire
>48h	Une excursion supérieure à 48h est possible d'après les données écrites du laboratoire
Au cas par cas	Le laboratoire doit être contacté par la PUI pour connaître la conduite à tenir en cas d'excursion de température

Tableau I : catégories de médicaments thermosensibles déterminées au CHU en fonction de la durée de l'excursion de température.

opérateurs. Les premiers résultats montrent la détection d'ouvertures de portes prolongées entraînant une augmentation de température au-dessus du seuil de 8 °C après deux mesures prises toutes les 6 minutes, déclenchant ainsi l'alarme mais n'impactant pas la qualité de la très grande majorité des médicaments et dont la cause n'était pas due à un dysfonctionnement du réfrigérateur.

Mise à jour des données de laboratoires sur les conduites à tenir lors d'excursions thermiques

Enfin, suite à la récupération des informations de 67 laboratoires sur la stabilité de plus de 340 références lors d'excursions de température, la PUI a pu compléter et actualiser ses données permettant une action plus rapide et efficace. Il a également été décidé de mettre en place des catégories selon l'ordre de priorité de la prise en charge des produits, ceci dans l'objectif de gérer au mieux une excursion de température concernant un nombre important de produits, et ainsi limiter les pertes financières (notamment en cas de panne d'une des deux caves froides de la PUI). Six catégories ont donc été créées dans le logiciel de gestion des médicaments de l'établis-

sement (Tableau I). Chaque catégorie a été définie selon des périodes de temps données correspondant à des laps de temps souvent rencontrés et cités dans les réponses des laboratoires. Cette catégorisation permet, en cas d'excursion thermique et selon la durée de l'excursion, d'extraire du logiciel la liste des produits à transférer en priorité dans un réfrigérateur de secours.

Conclusion

Les différentes mesures mises en place afin de permettre une meilleure surveillance du maintien de la chaîne du froid dans le CHU sont des étapes nécessaires à l'amélioration du système global de la qualité des produits thermosensibles. Elles sont la conséquence de problèmes survenus dans le passé entraînant des conséquences potentielles d'ordre financier, réglementaire et surtout sanitaire pour la bonne prise en charge du patient. Cette étude est d'autant plus importante que le nombre de médicaments thermosensibles est en constante augmentation. La gestion de la chaîne du froid devient une priorité afin de maintenir la qualité des soins et des traitements. Chaque mesure permet de corriger ou d'améliorer les processus intervenant lors de pé-

riodes à risque, comme le transport et le stockage dans les services et la PUI. Ces mesures correctives et préventives s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue de la maîtrise du processus des médicaments thermosensibles. Cette amélioration pourra être mesurée par le suivi de l'indicateur budgétaire associé à la perte de médicaments thermosensibles ■

Références

- Décision du 20 février 2014 relative aux bonnes pratiques de distribution en gros de médicaments à usage humain et modifiant l'arrêté du 30 juin 2000. *JORF* n°0071 du 25 mars 2014 page 5752 texte n° 2 mars, 2015.
- Conseil national de l'ordre des pharmaciens. *Recommandations de gestion des produits de santé soumis à la chaîne du froid entre +2 °C et +8 °C à l'officine*. 2009 décembre
- Ministère de l'Emploi et de la Solidarité, ministère délégué à la Santé. *Bonnes pratiques de pharmacie hospitalière*. 2001 Juin.
- Agence nationale de sécurité du médicament et des dispositifs médicaux. *Suxamethonium - Respecter strictement la chaîne du froid*. 2012 juillet
- Agence régionale de santé Bourgogne. *Retour d'expérience sur une panne de courant dans la Nièvre et la gestion de la chaîne du froid au cours de cet évènement*. 2014 mars
- Journal international de médecine*. Une coupure d'électricité au centre des Quinze-Vingts complique le traitement de plus d'une centaine de patients. 2015 juillet

La chaîne du froid dans les hôpitaux publics du Vietnam

Houda Hasnaoui, Juliette Leroux, Mathilde Lechevrel et Guillaume Saint Lorant.
UFR Santé, faculté des sciences pharmaceutiques, avenue de La Rochambelle, 14000 Caen.

Cet article dresse un état des lieux de la chaîne du froid des médicaments thermosensibles (MTS) au Vietnam (Ho Chi Minh) depuis le laboratoire pharmaceutique jusqu'au patient. L'étude révèle la difficulté de maintien de la chaîne du froid des médicaments dans ce pays.

Résumé

De nombreuses entreprises du médicament livrent des MTS au Vietnam. Cependant, les conditions politiques, économiques et sociales sont à prendre en compte pour le respect de la chaîne du froid. Une observation a été menée dans différents hôpitaux publics de Ho Chi Minh Ville durant 4 mois. Ce travail a permis d'identifier les points critiques de cette chaîne, d'apprécier la sécurité des patients vis-à-vis du respect de la chaîne du froid des MTS et l'efficacité des médicaments. Certaines étapes ne pourront pas être décrites pour des raisons de confidentialité.

Mots clés : chaîne du froid, médicaments, Vietnam, hôpital

Abstract

Many pharmaceutical companies deliver heat-sensitive medicines (HSM) in Vietnam. However, the political, economic and social contexts need to be taken into account in order to ensure compliance with the cold chain. An observation was conducted in several public hospitals in Ho Chi Minh over a 4-months period. This work helped to identify the critical points of this chain, to assess the safety of patients and the effectiveness of drugs. Certain steps cannot be described for confidentiality reasons.

Keywords: cold chain, drugs, Vietnam, hospital.

Introduction

Il est important pour les laboratoires pharmaceutiques de connaître les conditions de la chaîne du froid des médicaments thermosensibles dans les pays où ils exportent, tels que le Vietnam, notamment dans le but de prendre les dispositions nécessaires au respect de la qualité de ces médicaments.

Tout d'abord, il est primordial de comprendre le contexte opérationnel des hôpitaux publics au Vietnam. Pour avoir un remboursement de

leurs soins par le gouvernement, les patients doivent, par exemple, revenir tous les 21 jours à l'hôpital dans le cas de pathologies chroniques. Le seul endroit pour consulter un médecin et être remboursé est l'hôpital public. La seule pharmacie permettant d'avoir un remboursement est la pharmacie de l'hôpital (Figure 1). Les hôpitaux publics sont donc débordés. Ainsi, les pharmacies hospitalières délivrent plus de 1 000 ordonnances en une matinée. Les

services de soins doivent en permanence aller au plus vite pour pouvoir traiter un maximum de patients. Dans ce contexte, il est ainsi aisé de comprendre que le respect de la chaîne du froid est difficile. Il faut noter également un manque caractérisé de pharmaciens, ce qui entraîne du fait de leur non présence dans les services, la quasi absence d'informations sur l'importance du suivi des médicaments thermosensibles (MTS).

Du laboratoire pharmaceutique au distributeur

Les industries pharmaceutiques telles que NovoNordisk, envoient des stylos d'insulines, des sites de productions vers les distributeurs dans des emballages et des modes de transports validés selon les normes en vigueur. Chaque palette de MTS arrive avec un traqueur de température. Le journal de température est examiné à la réception dans l'entrepôt des distributeurs, ainsi chaque écart est identifié et traité. Les données sont analysées, et les décisions sont prises en conséquence de celles-ci.

En juillet 2017, le décret 54/2017 a été mis en place par le gouvernement vietnamien, il guide la mise en œuvre de la loi sur les produits pharmaceutiques pour les entreprises étrangères. Ainsi, elles sont autorisées à importer de l'étranger des médicaments mais n'ont pas le droit de les distribuer. Il faut passer par des distributeurs locaux pour livrer les médicaments. Ces distributeurs sont des entreprises vietnamiennes qui assurent le stockage et la livraison des médicaments.

Du distributeur à l'hôpital

Les médicaments sont livrés à l'entrepôt de l'hôpital par voitures climatisées ou par motos, les heures de livraison sont fluctuantes et donc imprévisibles. Ils sont transportés dans des boîtes en polystyrène contenant des poches de glace avec un thermomètre à mercure. La température est relevée au moment de la livraison. Si la température à la livraison n'est pas conforme, la livraison n'est pas acceptée.

Les réfrigérateurs de l'entrepôt sont qualifiés ou vérifiés selon les normes et standards en vigueur. Les médicaments sont stockés au centre du réfrigérateur, le thermomètre est au centre du réfrigérateur. La température est relevée deux fois par jour, le matin et le soir. Ces réfrigérateurs sont destinés uniquement au stockage des médicaments.

De l'entrepôt aux pharmacies

La livraison des pharmacies est quotidienne. Le transport des MTS suit le même parcours que les médicaments "classiques". Leur condition-

nement est réalisé dans des emballages en carton. Cependant, il faut préciser que l'exposition à la température ambiante est autorisée pour certains MTS pendant 6 semaines (15-25 °C).

La pharmacie de l'hôpital

Tous les réfrigérateurs de la pharmacie sont équipés de thermomètres à mercure avec relevé périodique mais non continu par le personnel. Malgré cela, le relevé des températures n'est pas régulier faute de temps. Il faut aussi noter que certains réfrigérateurs n'ont pas de relevé et que d'autres au contraire ont un relevé journalier mais avec des valeurs non conformes. En fonction du type de réfrigérateurs et de son contenu, le suivi se fait différemment. Ainsi, les vaccins sont mieux conservés, car mieux suivis, que les autres MTS. Ces réfrigérateurs n'ont pas d'usage dédié aux médicaments, puisqu'il y a été observé un stockage de nourriture. D'une température supérieure à 8 °C, congelés et en présence de nourriture, l'utilisation même des réfrigérateurs est un facteur de risque pour la qualité des médicaments

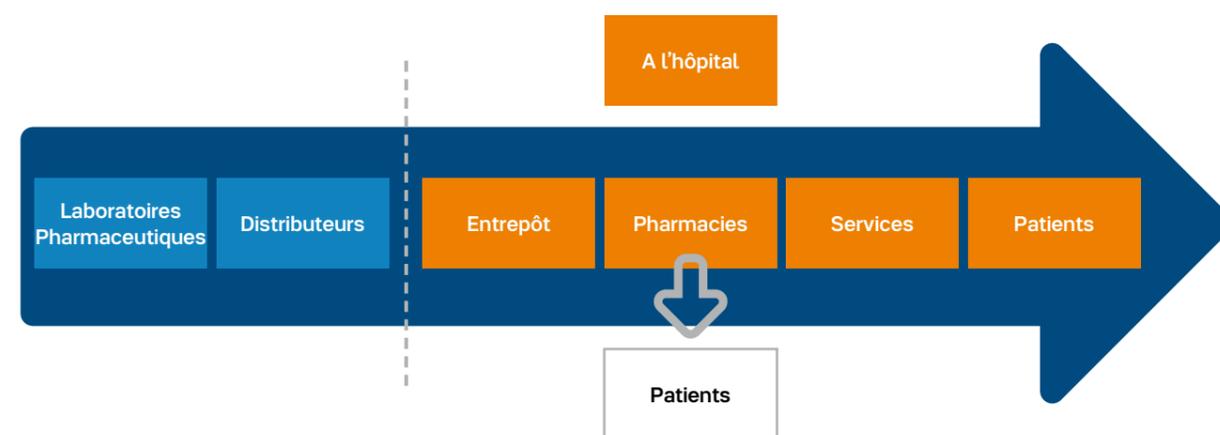


Figure 1 : processus de prise en charge des MTS au Vietnam.



thermosensibles. De plus faute de place, les médicaments sont parfois conservés dans les portes.

Des pharmacies aux services

Les dotations des services sont honorées tous les jours. Une commande est passée par les services le matin. Les infirmières vont ensuite chercher les médicaments à la pharmacie. Le transport des médicaments est le même quel que soit le type de médicament (MTS, médicament photosensible...). Puis les médicaments sont triés par patient dans les services.

Le stockage des MTS dans les services est très variable. Le plus souvent, il s'agit de réfrigérateurs alimentaires. Là aussi, faute de consignes et d'informations, il est possible d'observer des réfrigérateurs congelés, sans suivi ou contenant de la nourriture. Cela est très dépendant de la personne en charge

des réfrigérateurs. De même lorsque des MTS, tels que des anticorps monoclonaux, sont préparés, il est possible de les observer en dehors du réfrigérateur pendant plus de 1h30 avant d'être administrés au patient.

Des services aux patients

Dans les chambres, il y a entre quatre et six patients. Dans certains hôpitaux, il est possible d'observer plusieurs patients dans un même lit. Les médicaments sont donnés au fur et à mesure aux patients. Aucun n'est stocké dans les chambres.

De la pharmacie aux patients

La délivrance des médicaments aux patients lors de leur sortie de l'hôpital est la même pour tous les médicaments.

Lors de la délivrance : Les médicaments sont donnés aux patients sans conseil pharmaceutique. De

plus, il est assez difficile de savoir comment le patient va conserver ses médicaments.

Chez les patients

Cette étape est difficile à généraliser. La majorité des Vietnamiens possède un réfrigérateur. Cependant, il est impossible de connaître la température de leurs réfrigérateurs.

Des médicaments tels que les stylos d'insuline, peuvent être conservés à température ambiante lors de leur utilisation. Cependant, il faut prendre en considération que le terme « température ambiante » signifie qu'elle soit comprise entre 15 et 25 °C alors que la température extérieure de Ho Chi Minh est en moyenne de 35 °C sur l'année.

Conclusion

Au terme de cette étude observationnelle et descriptive, il est possible d'appréhender la complexité du maintien de la qualité des MTS. Il semble intéressant de se questionner sur la nécessité d'établir des normes ou des standards dans des pays où les conditions sont complètement différentes, liées aux conditions climatiques et socio-économiques.

Par ailleurs, il pourrait être bénéfique d'adapter le conditionnement primaire au climat du pays de destination afin de maintenir la qualité des MTS.

Au sein de l'hôpital, nommer un responsable des réfrigérateurs par service serait un gain de temps pour les équipes. Sensibiliser le personnel aux conséquences de la dégradation de ce type de produit pourra également améliorer la qualité. Pour finir, il pourrait être envisagé de mettre des affiches sur tous les réfrigérateurs des hôpitaux pour sensibiliser au rangement, aux risques, aux démarches à suivre en cas d'exclusion thermique ■

La préparation des plaques eutectiques pour les caisses isothermes

Abbes Kacimi, directeur expertise chaîne du froid, Sofrigam, 1 rue de l'Union 92565 Rueil-Malmaison et David Stienne, responsable laboratoire Ater Métrologie, 98 allée du Danemark 62118 Monchy-les-Preux.

La préparation des accumulateurs thermiques est une étape importante dans la bonne utilisation des caisses isothermes et la sécurisation de la chaîne du froid des produits de santé.

Résumé

Les plaques eutectiques 0 °C sont utilisées comme accumulateurs thermiques dans les caisses isothermes pour conserver les produits de santé thermosensibles entre +2 °C et +8 °C. Avant de les insérer dans la caisse, ces plaques eutectiques sont généralement congelées dans des équipements standards à -20 °C environ, ensuite remontées à une température proche de leur point de fusion (-2 °C environ). L'insertion des accumulateurs thermiques à -2 °C, permet d'utiliser la phase latente de la solution eutectique tout en évitant la congélation des produits. Pour atteindre cette température, ils peuvent être stabilisés à -2 °C par stockage dans une deuxième enceinte ou, dans l'absence d'un tel équipement, laissés à la température ambiante pendant un temps permettant de remonter leur température. Nous analysons dans cet article les deux modes opératoires de préparation ainsi que la variation du temps nécessaire pour la remontée en température en fonction de l'épaisseur de la plaque, de la température ambiante et de la température de congélation.

Mots clés : plaques eutectiques, accumulateurs thermiques, solution eutectique, stabilisation thermique, caisse isotherme, chaîne du froid, température contrôlée.

Abstract

Eutectic plates at a temperature of 0 °C are used for thermal storage in insulated boxes in order to maintain heat-sensitive health products at a temperature between +2 °C and +8 °C. Before inserting them in the box, these eutectic plates are usually frozen in standard equipment at a temperature of about -20 °C, and then their temperature raised to a temperature close to their melting point (about -2 °C). The insertion of thermal storage plates at a temperature of -2 °C makes it possible to use the latent phase of the eutectic solution while avoiding the freezing of products. To reach this temperature, they can be stabilised at a temperature of -2 °C by storage in a second chamber, or in the absence of such equipment, left at room temperature for a while in order to raise their temperature. In this paper, we analyse both preparation operating procedures as well as the variation of the required time for the temperature rise as a function of the plate thickness, the ambient temperature and the freezing temperature.

Keywords: eutectic plates, thermal accumulators, eutectic solution, thermal stabilisation, insulated box, cold chain, temperature-controlled.

Introduction

La préparation des plaques eutectiques utilisées dans les caisses isothermes constitue une étape déterminante dans la sécurisation de la chaîne du froid des produits de santé. En fonction de la nature des produits et du profil de température, ces

accumulateurs thermiques doivent être stabilisés et insérés dans les caisses à une température prédéfinie. Pour conserver les produits entre +2 °C et +8 °C, les solutions utilisées doivent permettre d'éviter le risque de congélation ou même d'excursions en dessous de +2 °C.

Pour répondre à cette exigence, les plaques eutectiques sont souvent congelées à -20 °C environ, ensuite stabilisées ou remontées à -2 °C environ. Le mode opératoire appliqué dépend des moyens disponibles et de la quantité d'accumulateurs thermiques à préparer.



»» Stockage thermique

La solution eutectique permet de compenser la chaleur échangée entre l'intérieur et l'extérieur de la caisse isotherme et remplace le besoin d'utiliser une source d'énergie externe.

Énergie stockée par une solution eutectique

L'énergie Q [J] stockée par la solution eutectique est donnée par l'équation 1.

$$Q = M \cdot [c_s \cdot (T_f - T_1) + L_f + c_l \cdot (T_2 - T_f)] \quad (1)$$

Pour une solution eutectique 0°C congelée à -20°C , l'énergie stockée entre -20°C et $+8^\circ\text{C}$ est donnée par l'équation 2.

$$Q = M \cdot (20c_s + L_f + 8c_l) \quad (2)$$

Si on introduit les plaques eutectiques à -2°C , l'équation précédente s'écrit :

$$Q = M \cdot (2c_s + L_f + 8c_l) \quad (3)$$

M : masse du matériau [kg]

c_s : capacité thermique massique de la solution eutectique en phase solide [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

c_l : capacité thermique massique de la solution eutectique en phase liquide [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

L_f : chaleur latente de fusion de la solution eutectique [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]

T_1 : température initiale de la solution eutectique [K] ou [$^\circ\text{C}$]

T_f : température de fusion de la solution eutectique [K] ou [$^\circ\text{C}$]

T_2 : température finale de la solution eutectique [K] ou [$^\circ\text{C}$]

Solutions eutectiques aqueuses

Ayant une chaleur latente élevée (334 kJ/kg), non toxique, ininflammable et abondante à bas prix, les solutions aqueuses sont les plus utilisées dans les caisses isothermes. Comparées aux autres matériaux à changement de phase, les solutions 0°C à base d'eau sont les plus utilisées pour la plage $+2/+8^\circ\text{C}$ sous les profils de température chauds ($> +15^\circ\text{C}$).

Les performances des solutions

eutectiques sont améliorées en les présentant sous forme de gels par l'addition d'agents viscosants. La viscosité supprime ou réduit la convection et ralentit la fusion, ce qui permet d'obtenir une durée de restitution supérieure à celle de l'eau.

La quantité d'accumulateurs thermiques à mettre dans une caisse isotherme dépend de plusieurs facteurs. Les principaux paramètres sont :

- la capacité de stockage thermique de la solution eutectique utilisée ;
- le coefficient global de transfert thermique K de la caisse isotherme ;
- le profil de la température extérieure et la durée du circuit logistique ;
- les exigences du produit à transporter.

Pour conserver les produits de santé entre $+2^\circ\text{C}$ et $+8^\circ\text{C}$, les accumulateurs thermiques 0°C sont souvent congelés dans des équipements standards à -20°C environ, ensuite stabilisés ou remontés à une température proche de leur point de fusion (-2°C). Effectuée selon un protocole validé, cette opération permet d'utiliser la phase latente de la solution eutectique tout en évitant que les produits transportés descendent en dessous de la limite basse $+2^\circ\text{C}$.

Tests de performances thermiques avec et sans stabilisation

Pour étudier l'impact de la température d'insertion des plaques eutectiques, des tests de performances thermiques ont été effectués sur la même caisse isotherme avec des plaques insérées à -20°C et à -2°C . Ces essais ont été réalisés selon un protocole spécifiant les conditions et les exigences métrologiques.

Principaux éléments du protocole de test

Caisse testée : une caisse isotherme composée de panneaux de polyuréthane d'épaisseur 60 mm , ayant un

volume intérieur de 29 litres et équipée de $8\text{ plaques eutectiques } 0^\circ\text{C}$.

Charge test : Produit standard (type vaccins), selon la norme NF S 99-700

Pré-conditionnement thermique :

- les plaques eutectiques sont congelées à -20°C pendant au moins 48 heures ;
- les produits sont stabilisés dans une chambre froide à $+5^\circ\text{C}$ pendant au moins 24 heures ;
- la caisse isotherme est stabilisée à $+22^\circ\text{C}$ pendant au moins 24 heures .

Équipements de test : pour ces essais thermiques des sondes de température de type Pt100 sont utilisées pour mesurer la température dans la caisse et la température extérieure. Les tests sont réalisés dans une chambre thermostatique programmable.

Profil de température : Le profil de température appliqué pour les essais est le profil standard ST-96-b défini par la norme NF S 99-700.

Disposition des sondes de température : trois sondes intérieures sont fixées sur les produits et disposées au coin bas, au milieu et au coin haut. Une quatrième sonde est placée dans l'enceinte thermostatique pour relever la température ambiante durant toute la durée du test.

Constitution de la configuration et lancement des tests : le chargement de la caisse s'effectue à la température ambiante de $+22^\circ\text{C}$. La caisse chargée est placée dans la chambre du test, ensuite le profil de température programmé est lancé.

Test avec les plaques eutectiques insérées à -20°C

Dans ce test, les huit plaques eutectiques congelées et stabilisées à -20°C pendant au moins 48 heures sont insérées directement dans la caisse. Les températures intérieures et extérieures relevées sont présentées par la figure 1.

On constate une chute de la température lors des premières heures du

test. Les trois sondes enregistrent des températures négatives pendant $6\text{ à }7\text{ heures}$, ce qui peut provoquer la congélation du produit. La température minimale de -4.4°C est enregistrée au bout de 3 heures de test. La caisse maintient les produits en dessous de $+8^\circ\text{C}$ pendant 94 heures .

Test avec les plaques eutectiques insérées à -2°C

Dans ce test, les plaques eutectiques sont congelées à -20°C pendant au moins 48 heures , ensuite elles sont stabilisées dans un autre congélateur à -2°C pendant au moins 24 heures avant d'être insérées dans la caisse. Les températures relevées sont présentées par la figure 2.

Les trois sondes enregistrent des températures supérieures à $+2^\circ\text{C}$ pendant toute la durée du test, évitant ainsi tout risque de congélation des produits. La caisse maintient les produits entre $+2^\circ\text{C}$ et $+8^\circ\text{C}$ pendant 88 heures .

Préparation des plaques eutectiques individuelles

Remontée à -2°C par exposition à la température ambiante

Beaucoup d'utilisateurs des plaques eutectiques ne disposent pas de deux équipements distincts, un pour la congélation en dessous de -15°C et un autre pour la stabilisation à -2°C . Dans ce cas, un mode opératoire, basé sur une méthode

empirique, est proposé. Ce mode de préparation consiste à congeler les plaques eutectiques (généralement à -20°C environ) ensuite à les laisser à la température ambiante pendant une durée permettant de remonter leur température à -2°C environ. Le choix de la cible -2°C permet d'utiliser la phase latente de la solution eutectique à 0°C et d'éviter le risque de congélation des produits à transporter. Le temps de remontée en température est déterminé par type de plaque eutectique

Principaux éléments du protocole du test

Les essais sont réalisés sur deux types de plaques avec une solution eutectique aqueuse 0°C ayant la même longueur et la même largeur mais des épaisseurs nettes moyennes de 30 mm et de 15 mm respectivement. Les masses de la solution eutectique sont 700 g et 350 g .

Une sonde est placée au centre de la plaque eutectique à cœur de la solution. Pour vérifier la répétabilité des résultats, l'essai est réalisé simultanément sur trois plaques identiques et répété trois fois. Les sondes de température sont étalonnées dans la plage de travail.

Les plaques eutectiques instrumentées sont entièrement congelées et stabilisées dans le même congélateur à -20°C . Elles sont ensuite placées à la température ambiante dans une chambre de test en évitant de les exposer au flux de la ventilation mécanique. Pour chaque type de plaque eutectique, les essais sont réalisés sous $+15^\circ\text{C}$, sous $+20^\circ\text{C}$ et sous $+25^\circ\text{C}$.

La remontée en température de la solution eutectique en fonction du temps est enregistrée pour chaque plaque. Les valeurs moyennes de la température sont présentées par les figures 3, 4 et 5 (page suivante) sous $+15^\circ\text{C}$, $+20^\circ\text{C}$ et $+25^\circ\text{C}$ respectivement.

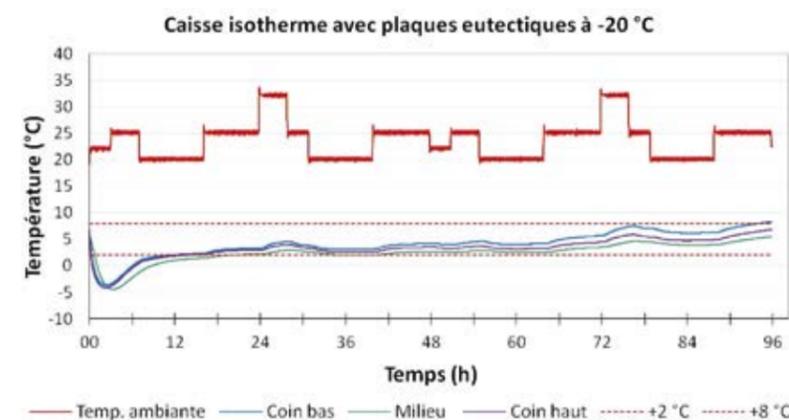


Figure 1 : performances de la caisse avec des plaques eutectiques insérées à -20°C .

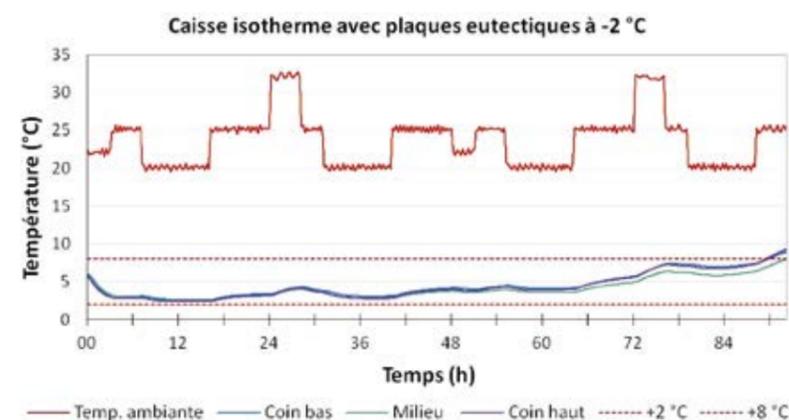


Figure 2 : performances de la caisse avec des plaques eutectiques insérées à -2°C .

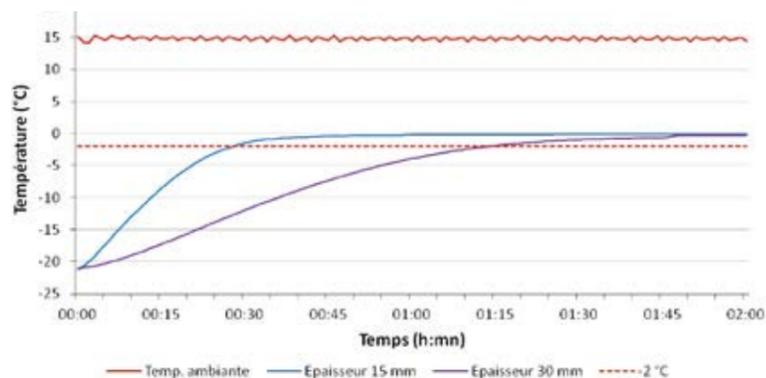


Figure 3 : remontée en température des plaques eutectiques individuelles sous +15 °C.

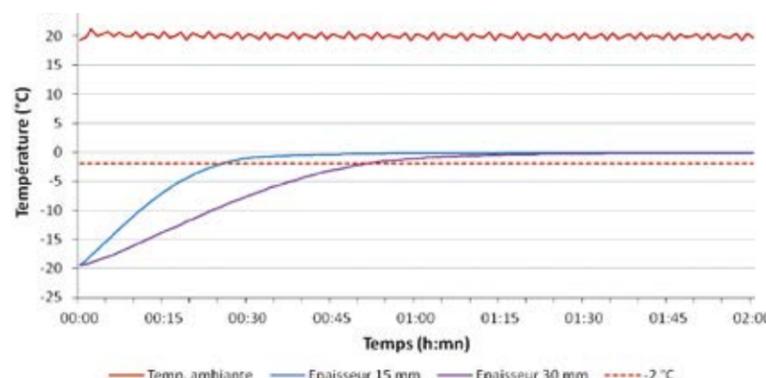


Figure 4 : remontée en température des plaques eutectiques individuelles sous +20 °C.

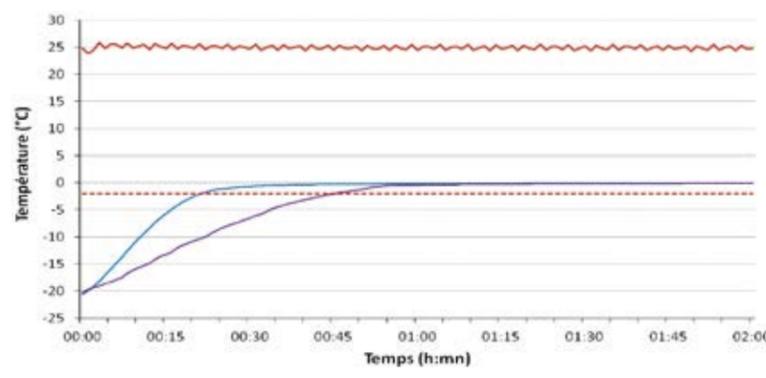


Figure 5 : remontée en température des plaques eutectiques individuelles sous +25 °C.

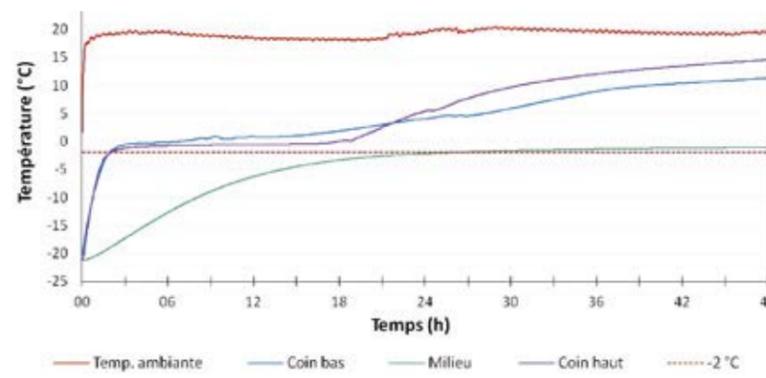


Figure 6 : remontée en température d'une palette de plaques eutectiques sous +20 °C.

Le tableau 1 résume les durées de remontée en température de -20 °C à -2 °C.

Les durées de remontées en température des mêmes plaques eutectiques sous une température extérieure de +20 °C en fonction de la température de congélation (-15 °C, -20 °C et -25 °C) sont données par le tableau 2.

Préparation de plaques eutectiques par palette complète

Beaucoup d'utilisateurs (laboratoires pharmaceutiques, répartiteurs, distributeurs...) utilisent de grandes quantités d'accumulateurs thermiques pour expédier les produits sous température contrôlée. Dans ce cas, la gestion de la préparation des accumulateurs thermiques ne peut pas se faire par plaques individuelles. Des essais ont été réalisés sur une palette complète d'accumulateurs pour déterminer un mode opératoire permettant de préparer une grande quantité de plaques ou de plateaux eutectiques.

Remontée en température d'une palette de plaques eutectiques

L'objectif de cet essai est d'étudier la remontée en température jusqu'à -2 °C d'une palette complète de cartons de plaques eutectiques, en l'exposant à la température ambiante. Des sondes de température sont placées dans des plaques eutectiques de cartons périphériques et au centre de la palette (positions défavorables et favorables). La palette complète est congelée et stabilisée à -20 °C ensuite laissée à une température ambiante de +20 °C. La durée de remontée en température est illustrée par la figure 6. Ce test montre la difficulté, voire l'impossibilité, de gérer la remontée en température d'une palette complète d'accumulateurs thermiques en l'ex-

Durée de remontée en température de -20 °C à -2 °C

Température extérieure	Plaque d'épaisseur 15 mm	Plaque d'épaisseur 30 mm
+15 °C	30 minutes	60 minutes
+20 °C	25 minutes	50 minutes
+25 °C	20 minutes	40 minutes

Tableau 1 : durée de remontée en température de -20 °C à -2 °C.

30 Durée de remontée jusqu'à -2 °C sous +20 °C

Température de congélation	Plaque d'épaisseur 15 mm	Plaque d'épaisseur 30 mm
-15 °C	20 minutes	40 minutes
-20 °C	25 minutes	50 minutes
-25 °C	30 minutes	60 minutes

Tableau 2 : durée de remontée jusqu'à -2 °C sous +20 °C.

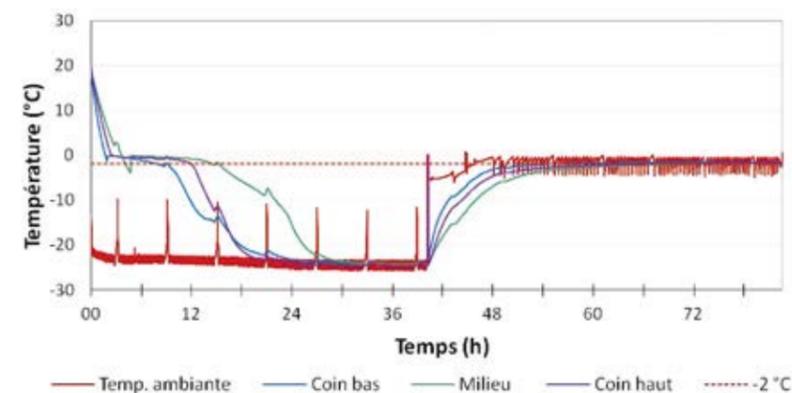


Figure 7 : congélation et stabilisation à -2 °C d'une palette de plateaux eutectiques.

posant à la température ambiante. Des écarts importants sont enregistrés entre les plaques eutectiques périphériques et celles placées au milieu. La durée moyenne de remontée en température de -20 °C à -2 °C varie de 2 heures pour les cartons périphériques à 26 heures pour les cartons placés au centre de la palette.

Stabilisation d'une palette de plateaux eutectiques dans une enceinte à -2 °C

Dans certains cas, plusieurs plaques eutectiques peuvent être regroupées dans un plateau. L'essai est réalisé sur une palette complète de plateaux eutectiques séparés par des supports permettant la circulation d'air, telle que livrée par le fournisseur. L'objectif de ce test est

d'étudier la préparation d'une palette complète de plateaux eutectiques, en deux étapes :

- la première consiste à congeler la palette dans une chambre à une température inférieure à -20 °C ;
- le deuxième consiste à stabiliser cette palette dans une autre chambre à -2 °C.

Des sondes de température sont placées dans des plaques eutectiques périphériques et au centre de la palette pour suivre la congélation et la stabilisation thermique des points favorables et défavorables de la palette. L'évolution de la température de ces points représentatifs est illustrée par la figure 7.

On constate le refroidissement des plateaux de +20 °C à 0 °C, ensuite la congélation à 0 °C pendant une

durée inférieure à 24 heures. Au bout de 36 heures tous les plateaux eutectiques sont stabilisés à la température de la chambre de congélation (en dessous de -20 °C). La palette est ensuite placée dans une deuxième chambre à -2 °C dans laquelle les plateaux sont entièrement stabilisés au bout de 24 heures. Une durée totale de 72 heures est suffisante pour congeler, ensuite stabiliser à -2 °C une palette complète de plateaux eutectiques ajourés. En l'absence de circulation d'air entre les plateaux, la durée de préparation sera plus longue.

Le mode opératoire adéquat pour préparer une palette d'accumulateurs thermiques consiste à utiliser deux enceintes, la première à -20 °C environ pour effectuer la congélation entière des plaques (ou plateaux) et la deuxième à -2 °C pour la stabilisation thermique et le stockage.

Conclusions

La préparation des accumulateurs thermiques est une étape importante dans la bonne utilisation des caisses isothermes et la sécurisation de la chaîne du froid des produits de santé. La stabilisation thermique et l'insertion des plaques eutectiques à -2 °C permet d'éviter la congélation des produits. Le mode opératoire adéquat dépend de la quantité d'accumulateurs à préparer et des moyens utilisés. Après congélation, les plaques individuelles peuvent être stabilisées dans une chambre à -2 °C ou laissées à la température ambiante (entre +15 °C et +20 °C) pendant une durée déterminée en fonction de la taille de la plaque, de la température de congélation et de la température ambiante. Après congélation, les palettes complètes de plaques ou de plateaux eutectiques nécessitent l'utilisation d'une stabilisation thermique dans une chambre à -2 °C ■

Emballages isothermes à usage unique versus emballages réutilisables

Laetitia Perche, directrice marketing, Sogrigam, 1 rue de l'Union 92565 Rueil-Malmaison

Cet article compare les solutions réutilisables et à usage unique en intégrant le mode de préparation mono-configuration ou bi-configuration. En mesurant le coût logistique global, la solution réutilisable mono-configuration apparaît plus rentable à partir de cinquante utilisations environ.

Résumé

L'utilisation des emballages isothermes et réfrigérants pour le transport de produits de santé thermosensibles ne cesse d'évoluer. L'augmentation de pathologies et de traitements nécessitant des produits thermosensibles, associée à une réglementation plus rude, donne à la logistique sous température dirigée des enjeux financiers, techniques juridiques et écologiques. Les emballages réutilisables avec un mode opératoire de préparation mono-configuration sont l'une des voies explorées pour réduire le coût logistique global et simplifier l'usage. Les solutions bi-configuration restent toutefois moins chères et moins lourdes et peuvent être plus écologiques. Cet article compare les solutions réutilisables et à usage unique en intégrant le mode de préparation mono-configuration ou bi-configuration. En comparant le coût logistique global, une solution réutilisable mono-configuration est plus rentable à partir de 50 utilisations environ.

Mots clés : emballages isothermes, solution réutilisable, usage unique, mono-configuration, produits thermosensibles, température dirigée, coût logistique.

Abstract

The use of insulated and refrigerating packaging for the transport of thermal-sensitive health products continues to evolve. The increasing number of pathologies and therapies requiring thermal-sensitive products, associated with stringent regulations, raises financial, technical, legal and environmental issues in the temperature-controlled logistics field. Reusable packaging involving a mono-configuration operating procedure is being explored to reduce the total logistics cost and to simplify use. However, bi-configuration solutions are still cheaper and lighter, and can be more environmentally friendly. This article compares reusable and single-use solutions, including mono-configuration or bi-configuration preparation procedures. By comparing the total overall logistics cost, a reusable solution is cost-effective from about 50 uses.

Keywords: insulated packaging, reusable solution, single use, mono-configuration, thermal-sensitive products, temperature-controlled, logistics cost.

Introduction

Depuis 40 ans, la conception et la création d'emballages isothermes et réfrigérants pour le transport de produits de santé thermosensibles (PST) ne cessent d'évoluer. Cette dynamique s'est accentuée ces quinze

dernières années.

L'augmentation du nombre de produits de santé thermosensibles, associée à une réglementation plus rude donne à la logistique sous température dirigée de réels enjeux

financiers, écologiques, techniques et juridiques pour les laboratoires pharmaceutiques. L'économie circulaire qui passe par la réutilisation des solutions est-elle une réponse financière ou écologique ?

Évolution des produits de santé thermosensibles

Croissance des produits de santé thermosensibles

En 2000-2010, l'émergence des laboratoires génériques et la crise économique mondiale poussent les laboratoires à revoir leur stratégie vers des produits à plus forte marge, aux brevets plus longs et aux conceptions coûteuses. Ils axent donc leurs recherches vers des produits issus de la biotechnologie. Il en résulte durant ces années, un festival de fusions-acquisitions, dont l'issue des recherches aboutit à des produits le plus souvent thermosensibles avec peu de tolérance dans les excursions. Selon le rapport *Evaluate pharma report - 2016*, publié en 2016, le nombre de produits de santé thermosensibles a augmenté de 45 % de 2011 à 2017, en passant de 1 produit thermosensible sur 3 mis sur le marché à 1 sur 2. La figure 1 montre cette augmentation significative (source : *Evaluate pharma report - 2016*).

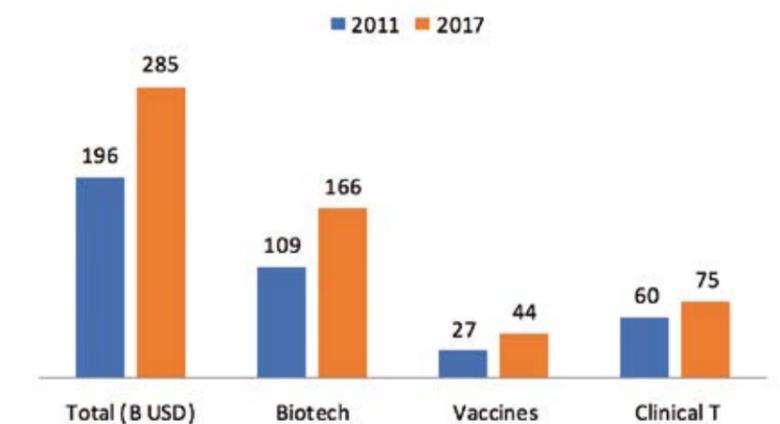


Figure 1 : évolution du marché des produits thermosensibles de 2011 à 2017.

Augmentation des pathologies nécessitant des PST

Selon le même rapport *Evaluate pharma report - 2016*, les pathologies dont les traitements nécessitent des produits thermosensibles connaissent également une augmentation importante ; le cancer, le diabète étant les plus marquants. La figure 2 présente les prévisions de l'évolution des pathologies en 2022 par rapport à 2015 (source *Evaluate*

pharma report - 2016). Le tableau 1 (page suivante) donne les prévisions pour 2020 des cinquante produits thermosensibles les plus vendus dans le monde.

Évolution de la réglementation

La publication en 2012 des nouvelles Bonnes pratiques de distribution (BPD) n'est pas sans conséquence pour la logistique des produits de santé thermosensibles. Selon, Marie

Top 10 Therapy Areas in 2022, Market Share & Sales Growth

Source: EvaluatePharma* August 2016

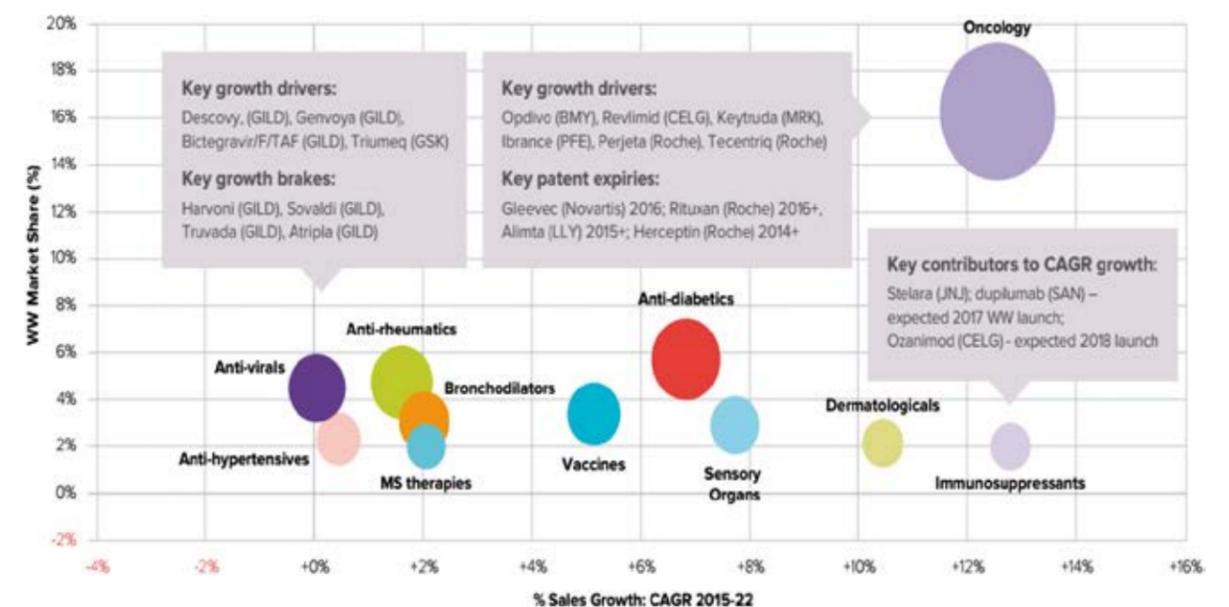


Figure 2 : prévisions de l'évolution des pathologies en 2022 par rapport à 2015.

»» Boned, responsable qualité de la distribution du laboratoire Septodont, ces BPD imposent de mettre en place des dispositifs assurant le maintien en température des produits +15/+25 °C. La logistique des produits thermosensibles devient pour les laboratoires un véritable casse-tête combinant l'aspect financier-sécurité-règlementaire pour des volumes de plus en plus importants. En parallèle, les laboratoires sont soumis à la norme ISO 14001 qui repose sur l'amélioration continue des performances environnementales. Le laboratoire doit agir pour réduire au

minimum les effets dommageables de ses activités sur l'environnement.

Augmentation des dépenses de la logistique sous température dirigée

Selon le rapport *Evaluate pharma report - 2016*, le marché de la logistique sous température dirigée passera en 2019 à 13 milliards de dollars, soit une augmentation de 40 %, entraînant des surcoûts en chaîne du froid de 14 % par rapport à 2017. La recherche orientée biotechnologies, l'augmentation des patients traités avec des produits thermosensibles

et la réglementation, entraînent un surcroît de la quantité des produits sous température dirigée. Les figures 3 et 4 présentent la forte augmentation des dépenses relatives à la logistique sous température dirigée des PST. Transporter des produits en température dirigée nécessite des équipements spécifiques (emballages, enregistreurs de température, chambre froide, camion frigorifique...), ce qui rend cette logistique coûteuse, à risque et probablement avec un réel impact environnemental. Pour minimiser les coûts logistiques tout en maintenant la sécu-

rité en température, deux voies sont à explorer :

- pour le transport routier ou aérien, on teste aujourd'hui l'économie circulaire ;
- pour le transport aérien, on permute vers un transport maritime.

l'efficacité, à tous les stades, de l'économie des produits (source : Ademe - Agence de l'environnement et de la maîtrise d'énergie).

Réutilisation des caisses

La mise en place d'une logistique sous chaîne froide est loin d'être simple. Il faut pouvoir allier la gestion du risque, la maîtrise des coûts, la sécurité du patient et le respect des réglementations.

Aujourd'hui, ce marché en plein essor accueille un grand nombre d'acteurs. Laboratoires, logisticiens, fournisseurs de solutions, travaillent

de concert pour apporter les solutions les plus adaptées en termes de sécurité et de coût (TCO : *Total cost ownership* - calcul du coût global de transport).

Lors du transport des produits avec des emballages réfrigérants, ces derniers demandent une rigueur d'utilisation. La source de froid doit être préparée selon les instructions précises du fabricant (temps de congélation, stabilisation, condition de stockage...) et le chargement doit faire l'objet d'une procédure écrite. En cas de non-respect, les produits peuvent subir une excursion en température (non-respect de la température de conservation), ce qui rend le produit inutilisable et donc un réel enjeu financier pour le laboratoire ou le logisticien.

Pour atténuer ce risque et simplifier les procédures, les utilisateurs demandent des solutions plus simples de préparation et moins coûteuses. Les experts des solutions d'emballage réfrigérant proposent :

- une réduction des coûts qui se traduit le plus souvent par des demandes de solutions réutilisables, dont le coût d'achat est lissé sur un coût d'usage (fonction du nombre de réutilisation possible) ;
- une simplicité d'usage et une réduction du temps de préparation par des solutions mono-configuration, c'est-à-dire une seule préparation quelle que soit la saison ;
- une simplification et une réduction du temps de préparation.

Mais ces solutions offrent-elles réellement des économies financières ?

Solutions multi-configurations et mono-configuration

La solution mono-configuration consiste en une caisse isotherme équipée de plaques eutectiques ou de matériaux à changement de phase dont la préparation ne dépend pas de la température extérieure. Il s'agit d'une solution « universelle »

Rank in Top 50	Product	Generic Name	Company	Global Sales 2020 (\$millions)	Technology
1	Humira	adalimumab	AbbVie + Eisai	\$12,707	Monoclonal antibody
2	Lantus	insulin glargine recombinant	Sanofi	\$10,252	Recombinant product
3	Enbrel	etanercept	Amgen + Takeda + Pfizer	\$8,572	Recombinant product
4	Remicade	infliximab	Johnson & Johnson + Merck & Co + Mitsubishi	\$8,217	Monoclonal antibody
7	Avastin	bevacizumab	Roche	\$6,613	Monoclonal antibody
9	Nivolumab		Bristol-Myers Squibb + Ono	\$6,361	Monoclonal antibody
12	Prevnar 13	pneumococcal vaccine	Pfizer + Daewoong	\$6,078	Bioengineered vaccine
13	Eylea	afibercept	Regeneron + Bayer + Santen	\$5,852	Recombinant product
14	Rituxan	rituximab	Roche + Biogen Idec	\$5,627	Monoclonal antibody
16	Soliris	eculizumab	Alexion Pharmaceuticals	\$5,202	Monoclonal antibody
18	Herceptin	trastuzumab	Roche	\$5,054	Monoclonal antibody
19	Kadcyla	ado-trastuzumab emtansine	Roche + Chugai	\$4,912	Monoclonal antibody
21	Victoza	liraglutide	Novo Nordisk	\$4,443	Recombinant product
22	Perjeta	pertuzumab	Roche + Chugai	\$4,440	Monoclonal antibody
23	NovoRapid	insulin aspart	Novo Nordisk	\$4,438	Recombinant product
24	Botox	onabotulinumtoxinA	Allergan + GSK	\$4,311	Recombinant product
25	Lucentis	ranibizumab	Novartis + Roche	\$4,064	Monoclonal antibody
27	Simponi	golimumab	Johnson & Johnson + Merck & Co	\$3,910	Monoclonal antibody
29	Gammagard Liquid	immune globulin	Baxter International	\$3,533	Protein extract
30	Xgeva/Prolia	denosumab	Amgen	\$3,527	Monoclonal antibody
31	Neulasta	pegfilgrastim	Amgen	\$3,455	Recombinant product
32	Stelara	ustekinumab	Johnson & Johnson	\$3,390	Monoclonal antibody
33	Privigen	immune globulin	CSL	\$3,158	Protein extract
36	RG7446 (in R&D)		Roche + Chugai	\$3,023	Monoclonal antibody
39	Humalog	insulin lispro recombinant	Eli Lilly	\$2,902	Recombinant product
45	Levemir	insulin detemir	Novo Nordisk	\$2,780	Recombinant product
49	Tysabri	natalizumab	Biogen Idec	\$2,573	Monoclonal antibody
Total 2-8 °C				\$139,394	
Total Top 50				\$233,086	

Sources: Evaluate Pharma, World Preview 2014, Outlook to 2020; and FDA label and package insert data. Note, Gammagard and Privigen allow room temp. storage for a shorter period

Tableau 1 : prévisions pour 2020 des 50 produits thermosensibles les plus vendus.

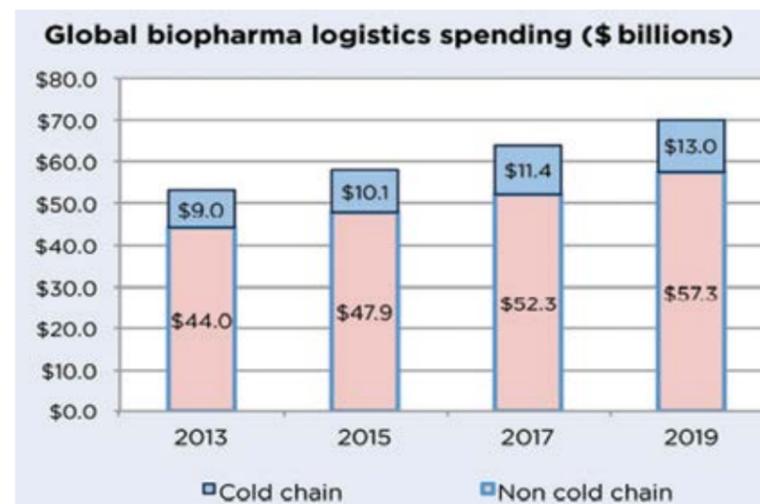


Figure 3 : dépenses de la logistique sous température dirigée des produits pharmaceutiques de 2013 à 2019 (Source : Evaluate pharma, 2016).

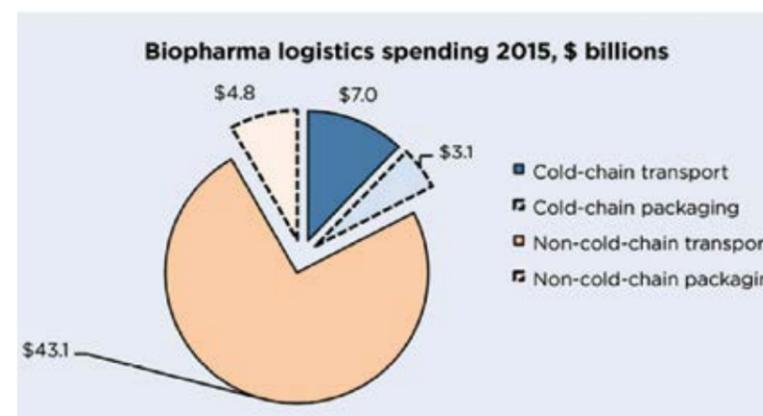


Figure 4 : dépenses de la logistique sous température dirigée des produits pharmaceutiques en 2015 (Source : Evaluate pharma, 2016).



dont le mode opératoire de préparation et de chargement ne change pas quel que soit le profil de la température extérieure et quelle que soit la saison. En appliquant le même mode de préparation toute l'année, ce type de solution permet de réduire le risque d'erreur humaine.

A l'inverse, des solutions multi-configurations « saisonnières » requièrent une préparation par saison. Les normes se sont inspirées des saisons météorologiques (été, hiver, mi-saison) pour définir des profils type dits chaud, froid, chaud-froid ou froid-chaud. Cela nécessite de former les opérateurs à plusieurs modes de chargement, d'identifier les périodes saisonnières et de fixer les critères de la configuration.

Étude comparative entre solutions mono-configuration et bi-configuration

Comparaison des données techniques

Comparons les données techniques et le prix de trois solutions de fournisseurs différents. Toutes conservent des produits sous +2/+8 °C pendant 120 h.

Solution A : bi-configuration, avec carton extérieur simple cannelure, isolant en polyuréthane (PU) et accumulateurs thermiques en gel eutectique 0 °C à base d'eau pour un usage unique.

Solution B : mono-configuration, avec carton extérieur plus épais, iso-

lant en panneaux isolants sous vide (*vacuum insulation panels-VIP*) et accumulateurs thermiques en matériaux à changement de phase (PCM) pour une utilisation de courte durée de 1 à 5 réutilisations.

Solution C : mono-configuration, revêtement polypropylène, isolant en panneaux isolants sous vide et accumulateurs thermiques en matériaux à changement de phase pour une utilisation de longue durée de plus de 10 fois.

Le tableau 2 présente la comparaison technique et économique des trois solutions.

Solutions mono-configuration

Les solutions mono-configuration sont deux fois plus lourdes et jusqu'à cinq fois plus coûteuses à l'achat qu'une solution bi-configuration. Les matériaux utilisés pour la conception de la caisse sont les panneaux isolants sous vide et les matériaux à changement de phase.

Un bilan carbone a été réalisé sur l'impact en émission de CO₂ de leur production et a révélé que le taux d'émission pour la production de ces matériaux est nettement supérieur au taux émis pour la production de polyuréthane, le polystyrène et les solutions eutectiques à base d'eau. Leur recyclage est également plus difficile à réaliser. Le VIP, seul, est moins résistant aux chocs que le polyuréthane ou le polystyrène et peut perdre ses avantages thermiques suite à une perforation. Mais ces solutions offrent un seul mode de pré-

paration quelle que soit la saison, ce qui diminue le risque d'erreur, et ils sont réutilisables un grand nombre de fois.

Solutions dites « réutilisables »

En ce moment, nous voyons fleurir des solutions dites « réutilisables ». Tous les fabricants vantent une réutilisation garantie des dizaines de fois. Certains experts considèrent que les solutions dites « réutilisables » ne sont pas rentables d'un point de vue financier, sécuritaire et environnemental. Il n'existe aujourd'hui aucune norme ou standard permettant au fournisseur d'emballages de s'engager sur un nombre de réutilisations. Sur quoi se basent-ils ? A moins que cela ne soit sur la base d'expérience réelle surenchérie par des conditions d'utilisation strictes et des surfacturations pour le contrôle de l'efficacité des solutions après chaque usage, si tant est qu'il y ait réellement un contrôle à chaque usage.

Le plus souvent le contrôle se fait avec une notice d'évaluation visuelle. Il existe plusieurs circuits de réutilisation. Pour résumer prenons trois cas matérialisés dans la figure 5 :

- cas 1 : le laboratoire pharmaceutique ordonne la livraison de ses produits via son partenaire vers un Hub. La solution est ensuite récupérée lors d'un passage par le logisticien, puis contrôlée, puis remise dans le circuit ;
- cas 2 : le laboratoire pharmaceutique ordonne la livraison de ses produits via son partenaire vers un

	Performance	Configuration	Usage	Matériaux	Volume net	Poids	Ratio Vnet/Vext	Prix
Solution A	120 h	Saisonnière (été/hiver)	Usage unique	PU ou EPS + Solution eutectique aqueuse	72 litres	18 kg	33 %	85 €
Solution B	120 h	Mono-configuration	Usage unique	VIP + PCM	56 litres	21 kg	33 %	300 €
Solution C	< 120 h	Mono-configuration	Réutilisable	VIP + PCM	56 litres	25 kg	42 %	> 500 €

Tableau 2 : comparaison de données techniques et commerciales de 3 solutions.

	Configuration	Usage	Volume extérieur	Volume net	Poids	Ratio Vnet/Vext	Prix emballage	Transport Paris-FKT
Solution A	Saisonnière (été/hiver)	Usage unique	220 litres	72 litres	18 kg	33%	85 €	32,52 €
Solution B	Mono-configuration	Usage unique	166 litres	56 litres	21 kg	33%	300 €	38,24 €
Solution C	Mono-configuration	Réutilisable	141 litres	56 litres	25 kg	42%	> 500 €	38,24 €

Tableau 3 : comparaison du coût de transport des 3 solutions sur Paris-Francfort, par camion.

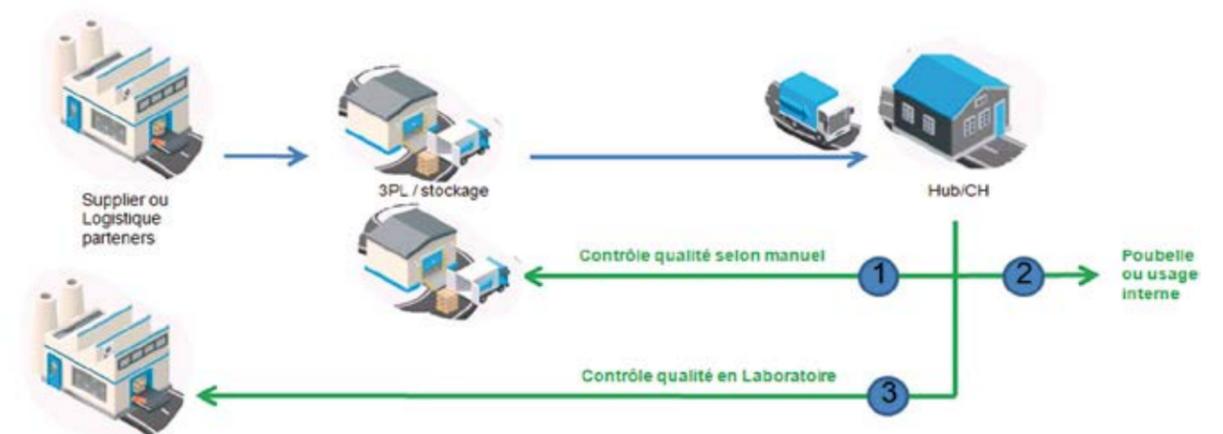


Figure 5 : exemples de circuits de réutilisation des caisses.

Hub. La solution est ensuite récupérée en interne ou bien jetée ;

- cas 3 : le laboratoire ordonne la livraison de ses produits via son partenaire vers un Hub. La solution est ensuite renvoyée au fournisseur. Comparons d'un point de vue financier le coût d'usage de nos trois solutions dans le cas 2, le plus fréquent *a priori* (tableau 3). Prenons un exemple d'expédition Paris-Francfort et admettons que les caisses soient réutilisables. A partir de combien

de réutilisations, le projet devient-il avantageux, dans le cas où le retour des caisses se fait sans chargement - la situation la moins rentable *a priori* ?

Mesurons d'abord l'impact économique sur un transport par camion Paris-Francfort, avec ces mêmes emballages qualifiés +2/+8 °C en 120 h. Notons que pour un volume utile de 72 litres, la solution A sera facturée pour un transport de Paris-Francfort à 32,52 euros contre 38,24 euros pour

la solution C ; soit 15 % plus coûteuse pour un volume net réduit de 20 %. Toutefois, la solution C offre plus de volume utile (42 % contre 33 %).

Impact économique après plusieurs utilisations

Nous prenons l'hypothèse que la caisse est retournée dans 100 % des cas pour être remise dans le circuit (figure 6). De plus, cette caisse fera l'objet d'un contrôle qualité à réception. Nous avons estimé le contrôle qualité à 20 euros environ. Ce montant correspond soit au temps passé par l'opérateur pour le contrôle, soit au coût de passage en infrarouge ou autre système choisi pour le fournisseur d'emballage. Nous ne prendrons pas en compte les coûts de stockage des caisses, soit un coût de réutilisation composé de :

- coût d'expédition de Paris à Francfort en camion ;
- coût de rapatriement Francfort-Paris en camion ;
- frais de contrôle qualité.

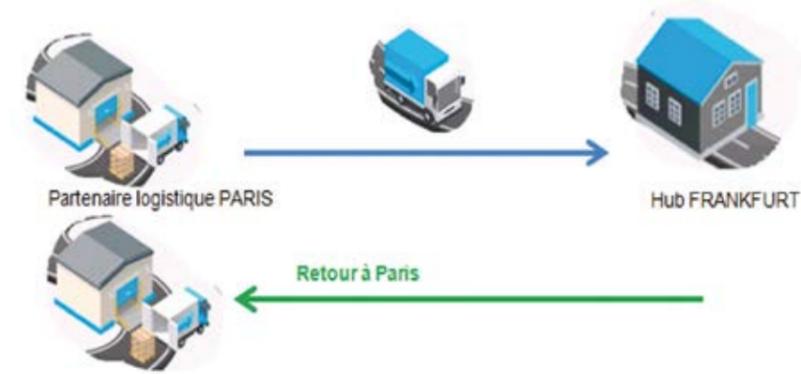


Figure 6 : parcours de la caisse remise dans le circuit.



Nb : Les prix ont été établis selon les tarifs de transporteurs européens.

Solution A : usage unique, Saisonnière

Envoi 1 : prix d'achat + transport, soit 117,52 euros.

Envoi 2 : prix d'achat + transport, soit 117,52 euros.

Solution B : usage unique, Mono-configuration

Envoi 1 : prix d'achat (300€) + transport (38,24€) + transport retour (49,71€) + contrôle (20€) = 407,95 euros.

Envoi 2 : transport(38,24€)+transport retour (45,88€) + contrôle (20€) = 104,12 euros.

Envoi 3 : transport(38,24€)+transport retour (45,88€) + contrôle (20€) = 104,12 euros.

Solution C : réutilisable, Mono configuration

Envoi 1 : prix d'achat (500€) + transport (38,24€) + transport Retour (49,71€) + contrôle (20€) = 627,95 euros.

Envoi 2 : transport(38,24€)+transport retour (49,71€) + contrôle (20€) = 127,95 euros.

Envoi 3 : transport(38,24€)+transport retour (49,71€) + contrôle (20€) = 127,95 euros.

Après 50 utilisations (tableau 4 et figure 7) :

- la solution A revient à 5 876 euros ;
- la solution B revient à un cout total de 408 + 5 397 = 5 805 euros ;
- la solution C revient à un cout total de 608 + 5 206 = 5 814 euros.

Dans cet exemple, une solution dite « réutilisable » et une solution à usage unique reviennent à un coût global sensiblement identique. Mais n'oublions pas que l'hypothèse de base repose sur un retour de la caisse dans 100 % des cas, avec une réutilisation possible. En réalité, les caisses ne sont pas toutes retournées et ne sont pas toutes réutilisables 50 fois.

Calculons alors le coût global dans le cas d'un rachat de caisse toutes les 10 utilisations (tableau 5 et figure 8). Selon les hypothèses posées, nous constatons qu'après 5 utilisations, le coût global d'une solution à usage unique devient plus économique.

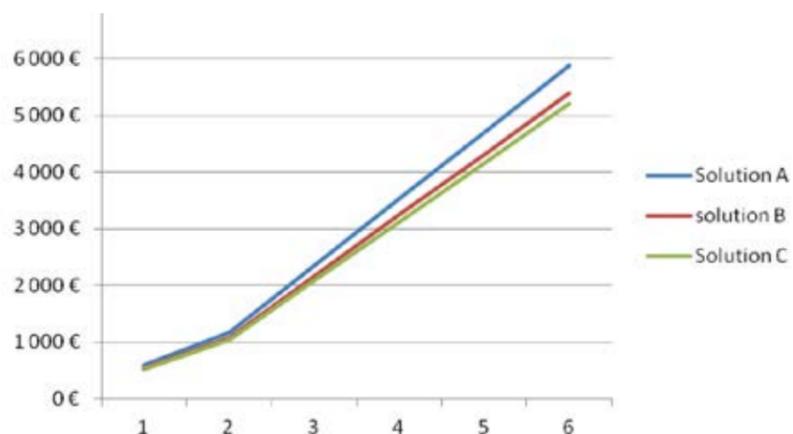


Figure 7 : comparaison du coût total (solution + coût logistique) pour 50 utilisations.

Nombre d'envoi	1	5	10	20	30	40	50
Solution A	118 €	587 €	1175 €	2350 €	3525 €	4700 €	5876 €
Solution B	408 €	539 €	1079€	2159 €	3238 €	4318 €	5397 €
Solution C	608 €	520 €	1041 €	2082 €	3123 €	4164 €	5206 €

Tableau 4 : coût total de chaque (solution + coût logistique) pour 50 utilisations.

Attention ! Nous restons prudents sur les valeurs annoncées. Il est bien évident que chaque logistique est différente. L'objectif de cette démonstration est d'appeler les utilisateurs à la réflexion : les emballages réutilisables sont-ils réellement plus économiques ?

Impact environnemental

Le calcul du bilan carbone est complexe. C'est la raison pour laquelle nous prendrons en référence l'étude réalisée par Kai N. Goellner & Eph Sparrow : *An environmental impact comparison of single-use and reusable thermally controlled shipping containers*.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact environnemental d'une solution réutilisable comparée à une solution à usage unique. Elle prend en compte l'extraction des matériaux, la fabrication, l'assemblage, l'utilisation, le transport et les réalités de fin de vie.

La figure 9 présente une comparaison du potentiel de réchauffement planétaire, de la production à l'usage, d'une solution réutilisable et deux solutions à usage unique, une en polyuréthane et l'autre en polystyrène. Globalement cette étude montre, selon ses hypothèses que les solutions réutilisables émettent moins de CO₂ que des solutions à usage unique en polyuréthane ou polystyrène. Dans certains cas, la réutilisation des caisses peut bénéficier d'une rentabilité et d'un bilan carbone efficace.

Nombre d'envoi	1	5	10	20	30	40	50
Solution A	118 €	587 €	1175 €	2350 €	3525 €	4700 €	5876 €
Solution B	408 €	539 €	1079€	2159 €	3238 €	4318 €	5397 €
Solution C	608 €	520 €	1041 €	2082 €	3123 €	4164 €	5206 €

Tableau 5 : coût total de chaque solution (solution + coût logistique) avec intégration des pertes.

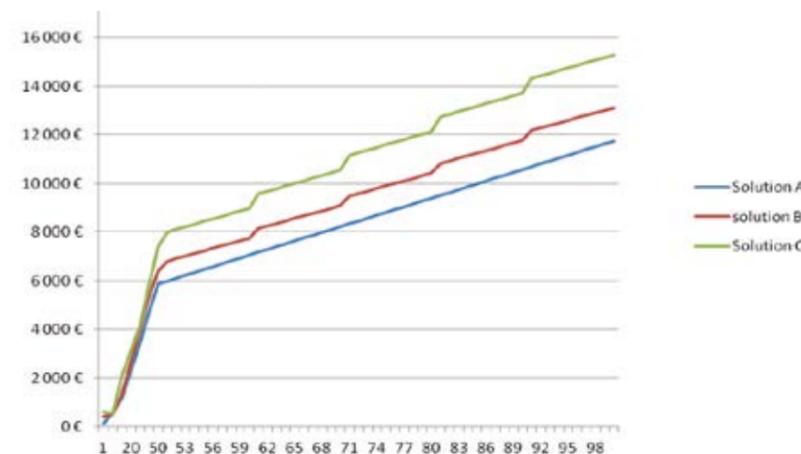


Figure 8 : comparaison du coût total (solution + cout logistique) avec intégration des pertes.

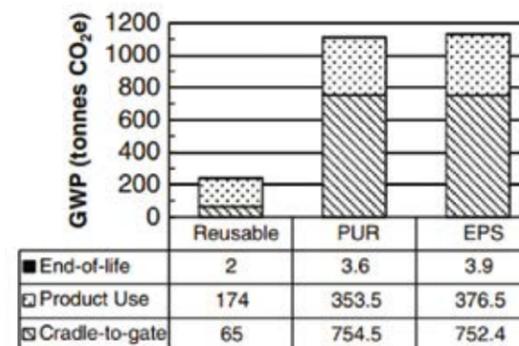


Figure 9 : comparaison du potentiel de réchauffement planétaire de 3 solutions.

Etude de cas

Cet exemple est un retour d'expérience d'un laboratoire pharmaceutique suisse. Cet utilisateur expédie par avion des produits de France vers les USA et des USA vers la France. Son objectif est de réduire les coûts de transport tout en améliorant l'impact écologique. Une solution de container réutilisable, bi-configuration, permettant de transporter une palette complète de produits a été choisie en 2015. Pour cet utilisateur, une solution mono-configuration re-

présente une sur-qualité, qui la rend plus lourde et plus coûteuse sans intérêt économique dans leur cas. Les containers ont été réutilisés cinq fois avec, à chaque voyage, un contrôle qualité réalisé directement par les équipes formées par le service qualité. A chaque voyage, les équipes compétentes effectuent un contrôle de la température pour vérifier la conformité du transport. Ce projet est un réel succès pour le laboratoire. Car il leur a permis de

réduire de 30 % les coûts de transport grâce à cette solution bi-configuration.

Conclusion

Afin de réduire les coûts de transport et simplifier l'usage, les laboratoires pharmaceutiques et les prestataires de transport tendent à utiliser des solutions dites « réutilisables », mono-configuration. Ces solutions peuvent être une alternative dans le cas où les emballages ne voyagent pas à vide et qu'ils ne présentent pas de faille thermique à l'usage.

Des solutions bi-configuration restent toutefois des solutions plus avantageuses d'un point de vue économique et écologique.

Concernant la gestion des stocks des emballages, les transporteurs doivent pouvoir assurer une disponibilité des solutions à tout moment et donc une gestion exemplaire des stocks.

Notons également que l'aspect environnemental ne s'arrête pas à l'utilisation de la caisse. En effet, les solutions réutilisables, mono-configuration sont des solutions nécessitant des matériaux dont la production et le recyclage présentent des inconvénients écologiques. Leur émission en CO₂ peut être parfois multipliée par 10 par rapport à une solution *single use* bi-configuration ■

Références

- 1) Evaluate pharma report – 2016
- 2) An environmental impact comparison of single-use and reusable thermally controlled shipping containers, University of Minnesota, Minneapolis, USA, publié en 2013 *The International Journal of Life Cycle Assessment*
- 3) Ademe - Agence de l'environnement et de la maîtrise d'énergie



Transport et stockage des produits de santé thermosensibles : CERTICOLD Pharma assure la conformité « chaîne du froid »

À l'heure où de plus en plus de produits de santé sont sensibles à la température et que les exigences réglementaires se renforcent dans ce domaine, les acteurs du monde de la santé recherchent des solutions simples pour garantir la maîtrise de la chaîne du froid.

Retour sur la certification Certicold Pharma avec Eric Sténer, Pharmacien, Responsable Qualité de la Distribution chez SANOFI PASTEUR, et président du comité de labellisation CERTICOLD.

Pourquoi CERTICOLD ?

En tant que professionnel de la santé, l'évolution de la réglementation européenne et française, au travers des bonnes pratiques de distribution (BPD ou GDP en anglais) et des recommandations de l'Ordre des Pharmaciens notamment, nous obligent à prendre les mesures nécessaires pour garantir que le produit de santé conserve sa qualité et son intégrité tout au long de la chaîne : du laboratoire jusqu'au patient.

Il est alors impératif de s'assurer que les équipements de transport et de stockage utilisés sont conformes à ces règles et recommandations. Le label CERTICOLD Pharma est le système de certification le plus abouti aujourd'hui en Europe et s'appuie sur un cahier des charges robuste nécessitant des essais poussés et un audit annuel des méthodes de fabrication.

Ces règles exigeantes, représentées par un label reconnaissable, facilitent le travail des pharmaciens, utilisateurs, laboratoires pharmaceutiques pour recourir à des équipements de qualité et conformes.

Qui délivre le label CERTICOLD ?

Un comité de labellisation indépendant se réunit plusieurs fois par an pour étudier les demandes de labellisation et de renouvellement sur la base des rapports d'essais et d'audit réalisés et présentés dans des synthèses anonymes. Ce comité que j'ai le plaisir de présider depuis octobre 2018 est constitué

de représentants de tous les acteurs : fabricants d'équipements, utilisateurs (transporteurs, laboratoires pharmaceutiques, distributeurs, hôpitaux, etc.), administrations et organismes de contrôle (DGAI, DGS, DGCCRF...) et experts. Cette indépendance apporte beaucoup à la crédibilité du label Certicold et aux décisions prises par ce comité.

En quoi le label Certicold est-il différent des autres labels ?

CERTICOLD est aujourd'hui la seule marque de qualité pour les équipements dédiés à la chaîne du froid à être reconnue au niveau européen. Chaque équipement est testé individuellement en sortie de production ou lors de son intégration dans le label CERTICOLD (Engins de type de transport des produits de santé, meubles de vente, emballages, chambres froides, ...).

À ce jour, plus de 12 000 équipements de transport ou de stockage sont certifiés en Europe. De plus, il s'agit de la seule certification de la chaîne du froid qui soit facilement repérable puisque chaque équipement labellisé arbore le label CERTICOLD.

La force du label repose selon moi sur ces règles rigoureuses. Les exigences techniques, thermiques et mécaniques ainsi que l'audit qualité annuel des unités de fabrication vont au-delà des exigences réglementaires. Cela permet au fabricant et à l'utilisateur de ce type d'équipements de s'assurer de la conformité réglementaire de leurs produits.



Aller plus loin ?

Pour en savoir plus sur la gamme des équipements labellisés par type d'application, pharmaceutique ou alimentaire, et sur les caractéristiques certifiées, n'hésitez pas à consulter www.certicold.com.

FOCUS

Etude cinétique de la cristallisation des hydrates de CO₂ par spectroscopie infrarouge FTIR/ATR

Amokrane Boufares^{1,2}, Pascal Clain^{1,3}, Elise Provost², Didier Dalmazzone², Véronique Osswald¹, Hong-Minh Hoang¹, Anthony Delahaye¹, Laurence Fournaison¹.

¹ GPAN, Irstea, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030 92761 Antony Cedex, France.

² UCP, ENSTA ParisTech, Université Paris Saclay, Palaiseau, France.

³ Leonard de Vinci Pôle Universitaire, Research Center, 12 avenue Léonard de Vinci, 92916, Paris La Défense, France.

Cet article présente une caractérisation cinétique expérimentale de la formation et de la dissociation des hydrates de CO₂ grâce à une sonde spectroscopique infrarouge à transformée de Fourier par réflectance totale atténuée (FTIR / ATR). Une modélisation du comportement de phase à l'équilibre et hors équilibre est proposée.

Résumé

Les hydrates de gaz sont considérés comme des matériaux prometteurs pour diverses applications industrielles. En particulier, les hydrates de CO₂ sont connus pour leurs capacités à stocker du froid, grâce à leur chaleur latente de fusion élevée. Une meilleure compréhension du mécanisme de cristallisation des hydrates de CO₂ dans les coulis et de leur cinétique de formation est encore nécessaire pour évaluer et améliorer l'efficacité du procédé de réfrigération secondaire à base d'hydrates. Pour cela, l'évolution en temps réel de la concentration de CO₂ dans la phase liquide a été mesurée *in situ* par FTIR-ATR au cours de la formation et de la dissociation d'hydrates. Les résultats ont montré que la cinétique de cristallisation est limitée par les transferts de CO₂ de la phase vapeur vers la phase liquide, quelles que soient les conditions expérimentales testées.

Mots clés : hydrates de CO₂, cinétique, concentration de CO₂, cristallisation, FTIR/ATR.

Abstract

*Gas hydrates are regarded as promising materials for various industrial applications. In particular, CO₂ hydrates are known for their cold storage capacities, related to their high latent heat of melting. A better understanding of the crystallization mechanism of CO₂ hydrates in slurries and of the resulting formation kinetics is still needed in order to evaluate and improve the efficiency of a hydrate-based secondary refrigeration process. For that purpose, in the present work, the real-time evolution of the CO₂ concentration in the liquid phase was measured *in situ* during hydrate formation by FTIR-ATR probe. The results showed that the crystallization kinetics are limited by CO₂ transfers from the vapor phase to the liquid phase, whatever the experimental conditions tested.*

Keywords: CO₂ hydrate, kinetics, CO₂ concentration, crystallization, FTIR/ATR.

Introduction

Les hydrates de gaz sont des composés cristallins non stœchiométriques semblables à de la glace, contenant des molécules hôtes piégées dans des cavités polyédriques formées par des molécules d'eau. La molécule invitée peut être une molécule simple (O₂, N₂, H₂, H₂S, NO₂,

CO₂...), des dérivés légers de gaz naturel (du méthane à l'isobutane) ou des hydrocarbures cycliques plus lourds (au-delà de C8 [1]). Les cristaux d'hydrates se forment, en présence d'eau et de la molécule invitée, dans des conditions thermodynamiques propres, en général à haute pression et à basse température. La quantité d'hydrates





formés dépend principalement des conditions thermodynamiques (pression, température) et du rapport eau/gaz. La structure des hydrates de gaz est stabilisée par des liaisons hydrogène entre les molécules d'eau et les interactions de Van der Waals entre le réseau cristallin aqueux et la molécule hôte. Selon le rayon de la molécule de gaz, il est possible de former plus d'une dizaine de types de structures. Les structures les plus répandues sont généralement appelées structure-I (SI), structure-II (SII) et structure-H (SH). Les hydrates de gaz sont considérés comme un matériau innovant pour diverses applications industrielles telles que le stockage et le transport de gaz naturel [2] ou d'hydrogène, le captage du dioxyde de carbone dans les gaz de combustion [3] ou dans le biogaz, la séquestration du CO₂ dans les gisements d'hydrates de gaz naturel dans les océans et dans le pergélisol, la purification des eaux usées ou le dessalement de l'eau de mer [4]. L'une des applications les plus prometteuses des hydrates de gaz est celle de matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage et le transfert d'énergie thermique. Par exemple, le CO₂ forme une structure de clathrate SI qui a une enthalpie de dissociation de 500 kJ/kg, beaucoup plus élevée que celle de la fusion de la glace (333 kJ/kg). Par conséquent, les hydrates de CO₂ ont été identifiés comme un bon candidat pour le stockage et le transport au froid dans les boucles de réfrigération secondaires [1].

Compte tenu de l'objectif des accords internationaux sur la transition énergétique (COP21, COP22, COP23) visant à limiter le réchauffement climatique entre 1,5 °C et 2 K d'ici 2100, la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant de nombreuses activités, y compris l'industrie du froid, est primordiale. En France, cette dernière consomme jusqu'à 17 % de l'électricité produite et met en jeu une grande quantité de fluides frigorigènes à fort potentiel de réchauffement global contribuant ainsi à 8 % des émissions de gaz à effet de serre. La réfrigération secondaire est une technologie prometteuse pour réduire la quantité de fluides frigorigènes et donc de l'impact environnemental de nombreuses activités nécessitant une production de froid, telles que la conservation des aliments, le stockage de produits pharmaceutiques, la chimie, le transport, la climatisation, etc. En effet, les boucles de réfrigération secondaires sont utilisées pour le transport de froid via un fluide frigopporteur du lieu de production de froid (où le frigorigène est confiné) aux lieux d'utilisation. De plus, des fluides secondaires diphasiques comme les coulis, composés d'un MCP, généralement un solide dispersé dans une phase de transport de liquide, peuvent être utilisés pour augmenter l'efficacité énergétique des boucles secondaires. Néanmoins, pour toute application technologique impliquant des hydrates, les

étapes limitantes du mécanisme de formation doivent être définies et, éventuellement, les moyens de les maîtriser recherchés. Dans le cas d'applications de transport et de stockage de froid à base d'hydrates, l'objectif est d'obtenir un taux élevé de cristaux d'hydrates [5], engendrant peu de pertes de charge et garantissant un écoulement stable sans agglomération [6].

Le processus de formation d'hydrates de gaz est expliqué par la théorie classique de la cristallisation et peut être représenté par une phase de nucléation suivie d'une phase de croissance cristalline.

La nucléation

Dans cette première phase de la cristallisation, la solution aqueuse reste dans des conditions thermodynamiquement favorables à l'existence d'hydrates, appelée état sursaturé. Les sites de germination, appelés nucléi, de cristaux sont générés dans la solution à une vitesse qui dépend du degré de sursaturation. La croissance cristalline commence dès lors qu'au moins un nucleus atteint une taille critique, qui est régie par la compétition entre les énergies de surface et de volume. Les nuclei qui n'ont pas atteint la taille critique sont instables et se dissolvent. Ceux qui atteignent la taille critique sont stables et peuvent croître en cristaux d'hydrates. La théorie de la nucléation de la formation d'hydrates de gaz a été proposée pour la première fois dans les années 80 [7-9]. Les auteurs ont mené des expériences sur le méthane dissous au point de nucléation et ont trouvé que la concentration locale de gaz était supérieure à celle de l'équilibre vapeur-liquide (LVE). Le rayon critique des germes d'hydrates de méthane a été calculé pour la première fois par Englezos et al. [7-10].

La croissance

Le mécanisme de croissance des hydrates est décrit comme un processus de cinq mécanismes simultanés [7-9], qui sont une combinaison de transferts de matière et de chaleur : le premier est la diffusion du CO₂ de la phase vapeur à la phase liquide ; ensuite, la diffusion du CO₂ dissous de la phase liquide à la surface de l'hydrate ; enfin, l'intégration du CO₂ dissous dans le cristal. Simultanément, la chaleur dégagée par la cristallisation exothermique est transférée de l'hydrate à la phase liquide et de la phase liquide à l'environnement (paroi du réacteur). Les travaux de Vysniauskas et Bishnoi [9-10] constituent la première tentative de modélisation de la cinétique de formation d'hydrates. Ils ont montré que le taux de formation d'hydrates de méthane était fonction de la surface interfaciale eau-gaz et du degré de sursaturation. Englezos et al. [8] ont développé un modèle basé sur les travaux expérimentaux de Vysniauskas et Bishnoi [10] sur

la cinétique de formation d'hydrates à partir de méthane, d'éthane et d'un mélange méthane-éthane dans de l'eau distillée et déionisée dans un réacteur semi-continu sous agitation (300 cm³). Les expériences ont été effectuées sur des gammes de température allant de 274 à 282 K, et de pression allant de 3 à 8 MPa pour le méthane et de 0,6 à 2,1 MPa pour l'éthane à des vitesses d'agitation entre 300 et 450 tr/min. Leur protocole expérimental était le suivant : lorsque l'hydrate se forme et commence à consommer du gaz, les expérimentateurs maintiennent la pression en ajoutant du gaz provenant d'un réservoir dans le réacteur. Ensuite, sur la base d'un bilan massique, entre la quantité de gaz dans le réacteur et celle injectée, les auteurs ont pu mesurer (évaluer) la consommation de gaz au cours de la formation d'hydrates. Durant leurs essais des degrés de sursaturation relativement élevés ont été relevés.

Le modèle est basé sur la théorie de la cristallisation et le modèle à double film pour le transfert de matière aux interfaces [11]. Il ne prend pas en compte l'agglomération. Englezos et al. [7] décomposent la croissance des hydrates en trois étapes distinctes : (i) diffusion du gaz de la phase vapeur au liquide, (ii) diffusion du gaz dissous à travers la couche limite entourant les particules, (iii) à l'interface du cristal, processus d'adsorption permettant d'incorporer les molécules invitées dans les cavités d'hydrates. Les conditions d'équilibre des hydrates sont déterminées par les transferts de chaleur et de masse autour du cristal. Si la résistance au transfert de chaleur est suffisamment forte, les conditions de température et de pression se rapprochent des conditions d'équilibre (P_{eq}, T_{eq}). Cependant, si la résistance au transfert de chaleur est faible, ces dernières se rapprochent de (P_{eq}, T_{exp}). Néanmoins, Englezos et al. [7] ont supposé qu'à des vitesses d'agitation élevées, il n'existait aucune résistance thermique autour de l'hydrate ; ils se sont donc formés dans des conditions (P_{eq}, T_{exp}).

Il convient de souligner que, dans la plupart des études expérimentales sur la cinétique de formation des hydrates de gaz, le procédé est suivi par l'évolution de la pression de gaz en phase vapeur. Ceci n'est pas représentatif de la dynamique réelle de la consommation de gaz due à la réaction de formation d'hydrates, car le rôle du transfert de gaz à l'interface hydrate-liquide est négligé. Pour contribuer aux avancées en matière de modélisation de la cinétique de cristallisation des hydrates, il apparaît nécessaire de développer des outils expérimentaux permettant d'analyser quantitativement la composition du système au plus près de la croissance cristalline. Il était donc nécessaire de développer une nouvelle méthodologie pour mesurer la concentration de gaz dissous dans la phase liquide en présence d'hydrates. L'objectif de cet article est de caractériser la consommation de CO₂ en

temps réel pendant la formation d'hydrates afin de déterminer les étapes limitantes du processus de formation d'hydrates. Dans ce travail, un protocole a été développé pour permettre des mesures simultanées de la pression, de la température (de la phase vapeur) et de la concentration de CO₂ dissous dans la phase liquide pendant la cristallisation de l'hydrate de CO₂. Cette concentration est mesurée à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) connecté à une sonde à réflexion totale atténuée (ATR). Cette technique d'analyse a déjà été développée pour contrôler la cristallisation de produits pharmaceutiques [12-14] et a trouvé peu d'applications dans les études d'hydrates [15]. Pourtant, elle a été utilisée avec succès pour mesurer la concentration de CO₂ et de carbonate dissous lors de l'absorption de CO₂ dans des solutions d'alcanolamine à basse pression [16]. Elle peut être complétée par des observations visuelles ou spectroscopiques de la formation d'hydrates, telles que la turbidité, la spectroscopie Raman ou les mesures de réflectance de faisceau focalisé (FBRM), etc. [17-19]. Cet article présente d'abord le dispositif expérimental équipé d'un capteur FTIR / ATR et le protocole utilisé pour effectuer les mesures. Les concentrations de CO₂ mesurées lors de la cristallisation des hydrates sont ensuite comparées aux concentrations calculées dans des conditions d'équilibre hydrate-liquide (HLE) et liquide-vapeur (LVE) afin d'identifier l'étape limitante du processus.

Matériels et méthodes

Matériels

Une bouteille de CO₂ fournie par Air Liquide (pureté de 99,995 % en volume) et de l'eau déionisée a été utilisée durant les expériences.

Équipement

La figure 1 (page suivante) présente le dispositif expérimental utilisé dans le travail. Le réacteur est en acier inoxydable (volume de 382 ml), équipé d'une sonde de température PT100 (précision ± 0,1 °C) et d'un capteur de pression (Drück, 0 - 3000 ± 1 kPa). Le couvercle du réacteur est équipé de vannes manuelles pour l'introduction des fluides et la température est contrôlée par un bain thermostaté. Les phases liquide et vapeur sont agitées par une turbine à 6 pales droites de type Dispersimax pour la phase liquide et une turbine à 4 pales inclinées pour la phase vapeur, destinée à assurer le mélange dans les deux phases et avoir une composition homogène et fournir un mélange vapeur-liquide efficace. La vitesse d'agitation peut être réglée de 0 à 1 200 tr/min. Une sonde ATR est fixée dans le couvercle et connectée via une fibre optique à un ana-



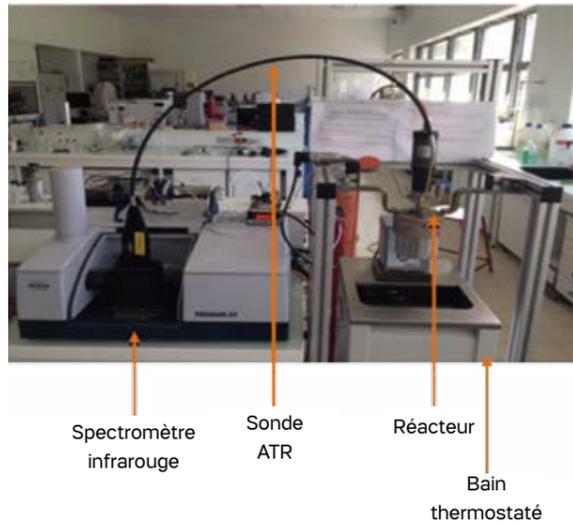


Figure 1 : montage expérimental pour la mesure du CO₂ dans la phase liquide durant la formation des hydrates.

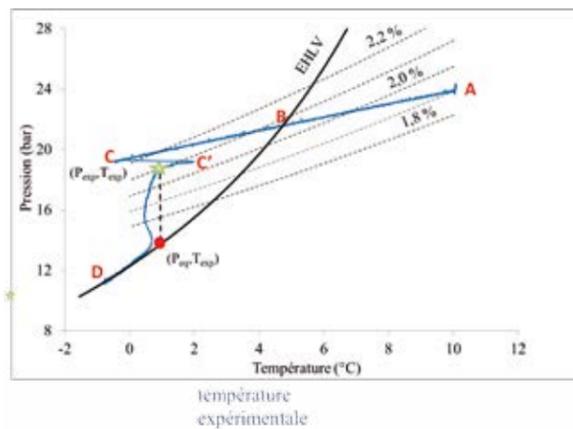


Figure 2 : protocole de formation des hydrates de CO₂.

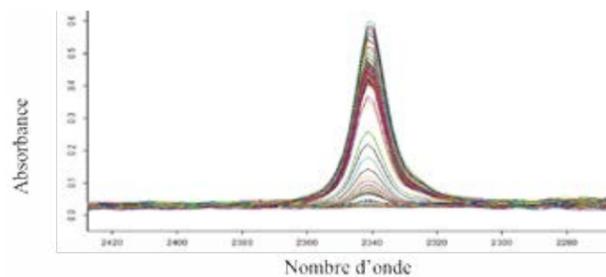


Figure 3 : spectre IR de CO₂ dans de l'eau pure à 3 °C pour des pressions de gaz entre 10 et 25 bar.

lyseur par spectroscopie FTIR (HTS-XT-Tensor 27, Bruker Optics). Les spectres FTIR sont obtenus en mode absorption (OPUS v6.5, Bruker Optics) dans la région spectrale 400-4 000 cm⁻¹, avec une résolution spectrale de 4 cm⁻¹. Afin d'éviter les interférences avec le CO₂ atmosphérique, de l'air sec et purifié est mis en circulation à l'intérieur du spectromètre pendant toutes les expériences.

Formation d'hydrates de CO₂ et acquisition du spectre infrarouge

Formation d'hydrates de CO₂

La première étape du protocole est de remplir le réacteur, préalablement tiré au vide, avec une quantité d'eau de 191 ± 0,1 g (soit rempli à 50 % de son volume). Celui-ci est ensuite immergé dans le bain thermostaté à une température initiale de 10 °C. Puis le CO₂ est injecté dans le réacteur agité à 600 tr/min et à une pression de consigne fixée. Les deux phases sont agitées continuellement tandis que l'arbre d'agitation assure une recirculation continue du CO₂ à travers la phase liquide pour une dissolution plus rapide. Lorsque l'équilibre liquide-vapeur (LVE) est atteint pour la température initiale (point A sur la figure 2), le refroidissement du bain est lancé, permettant d'atteindre la courbe d'équilibre pour conduire ensuite à un état de surfusion dans le réacteur (ligne B-C). La différence entre la température réelle à l'intérieur du réacteur et la température à l'équilibre hydrate-liquide-vapeur (HLVE) représente la force motrice de la cristallisation, qui peut être également exprimée en termes de sursaturation, à condition que les concentrations réelles et à l'équilibre soient connues. Lors de la rupture de surfusion, se produisant au point C, la température augmente rapidement jusqu'au point C' en raison de la forte exothermicité de la réaction. Le système rejoint ensuite la courbe HLVE (point D), après une chute de pression mettant en évidence la consommation de gaz et une chute de température due à la chaleur transférée au bain. La dissociation est ensuite effectuée à une vitesse de chauffage lente pour rejoindre la courbe LVE (point A).

Mesure de la concentration en CO₂ dans la phase liquide

Afin d'étalonner la mesure de la concentration de CO₂ en phase liquide, le protocole suivant a été appliqué. La bande d'absorption du rayonnement infrarouge sélectionné correspond à la vibration de la double liaison C=O du CO₂ dissous dans l'eau, qui apparaît à un nombre d'onde de 2 340 cm⁻¹ [20, 21]. L'intensité du signal a été estimée grâce à la hauteur du pic IR pouvant être directement reliée à la concentration de CO₂ dans la phase liquide. La figure 3 montre le spectre d'absorption IR en fonction du nombre d'onde obtenu à 3 °C à diverses pressions de CO₂

entre 10 et 25 bar pendant la dissolution du gaz. Le gaz est injecté dans le réacteur agité à 600 tr/min. Pour chaque injection, le réacteur a été laissé sous agitation pendant une période nécessaire pour atteindre un équilibre pression-température et absorbance. La même procédure a été appliquée à des températures définies variant de -1 à 10 °C afin d'obtenir les données d'absorbance couvrant la plage (P, T) d'intérêt pour l'étude.

La figure 4 présente les données d'absorbance en fonction de la concentration de CO₂ en phase liquide à l'équilibre. Une relation linéaire est observée sur toute la gamme des conditions étudiées. Un coefficient d'étalonnage a pu être déduit et a été utilisé pour calculer la composition de la phase liquide lors des expériences de formation/dissociation d'hydrates. Ainsi, la concentration en CO₂ exprimée en % mol (% molCO₂/molH₂O), a été déduite de l'équation d'équilibre (Eq. 1) devient :

$$p = x_{CO_2} H_{CO_2} \quad (1)$$

Où H_{CO_2} est la constante d'Henry, calculée selon la méthode mentionnée dans [22].

Evolution cinétique du CO₂ dans les phases liquide et vapeur durant la formation/dissociation des hydrates de CO₂

Concentration expérimentale en temps réel du CO₂

La concentration de CO₂ dans la phase liquide a été mesurée en temps réel et *in situ* à l'aide des mesures FTIR au cours des cycles de formation/dissociation d'hydrates de CO₂, obtenues par refroidissement/chauffage du système sans affecter l'équilibre du système, contrairement à d'autres auteurs [23], qui ont utilisé des prélèvements d'échantillons pour mesurer la composition de la phase liquide hors système. La figure 5 montre l'évolution de la température, de la pression et de la concentration mesurée de CO₂ dissous dans la phase liquide. Les différentes étapes de la cristallisation ont été clairement identifiées :

- injection : (0-2 000 s), quand le CO₂ est injecté dans le système, une augmentation de la pression et de la concentration en CO₂ est observée (dans les phases vapeur et liquide). De plus, la température augmente en raison de la dissolution du CO₂ qui est un phénomène exothermique ;
- stabilisation : (2 000-5 200 s), après l'étape de dissolution du CO₂, la pression, la température et la concentration en CO₂ se stabilisent et atteignent un état d'équilibre liquide/vapeur (LVE) ;
- refroidissement et sursaturation : une fois que le système a atteint l'équilibre, il est refroidi afin de former des hydrates de CO₂. Pendant cette phase, la pression et la température diminuent mais la concentration de CO₂

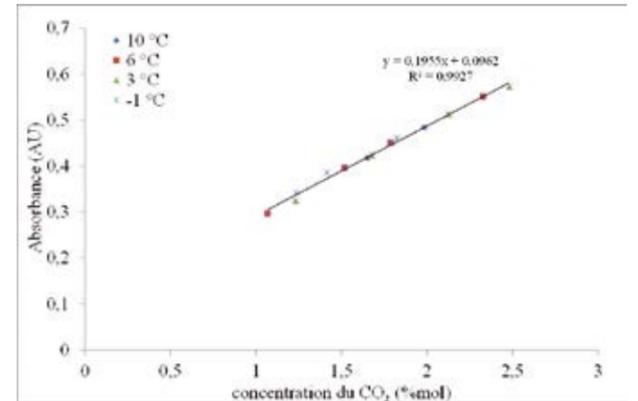


Figure 4 : évolution du pic d'absorbance en fonction de la concentration CO₂.

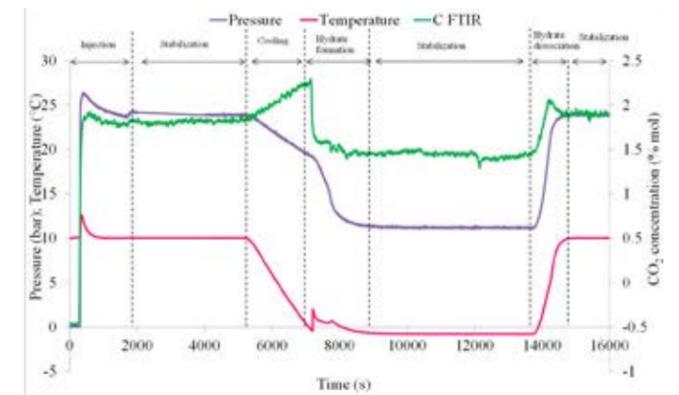


Figure 5 : évolution de la température.

dans la phase liquide augmente (en raison d'un transfert de CO₂ de la phase vapeur à la phase liquide). Au point B, le système a atteint la courbe HLVE. Si le système était dans des conditions d'équilibre, nous devrions observer une cristallisation de l'hydrate de CO₂. Cependant, la température et la pression du système continuent à diminuer, conduisant à un état métastable. Dans le même temps, la concentration de CO₂ a continué à augmenter, ce qui a conduit à des conditions de sursaturation favorables à la cristallisation de l'hydrate de CO₂ ;

- cristallisation : vers 7 000 s, une diminution soudaine de la concentration en CO₂ est observée, ce qui est lié à une consommation importante de CO₂ dissous dans la phase liquide, en raison de la formation d'hydrates. Dans le même temps, une diminution de la pression de CO₂ (alimentation de la phase liquide via la phase vapeur car le CO₂ dissous est consommé par les hydrates qui se forment) et une augmentation soudaine de la température (dégagement de chaleur dû à la cristallisation) sont également observées dans le même temps. Ces

différents moments sont des marqueurs de la cristallisation des hydrates. Après ces variations soudaines, les valeurs de température, de pression et de concentration en CO₂ diminuent lentement jusqu'à 9 000 s, ce qui correspond au début d'une nouvelle zone de stabilité où le système contient alors du CO₂ dans trois phases (CO₂ en phase vapeur, CO₂ dissous en phase liquide et des hydrates de CO₂);

- dissociation : la température du bain est ensuite réglée à 10 °C pour dissocier l'hydrate de CO₂. Une fois que le chauffage a commencé, une augmentation de la concentration de CO₂ dans la phase liquide est observée, liée à la libération de CO₂ piégé à l'intérieur des cristaux pendant la fusion de l'hydrate de CO₂. Simultanément, une augmentation de la pression de CO₂ en phase vapeur est observée, due à la fois à l'augmentation de la température et à la désaturation de la phase liquide. Une fois que la température à l'intérieur du réacteur a atteint 10 °C, le système s'équilibre pour atteindre les conditions LVE et une nouvelle étape de stabilisation a lieu.

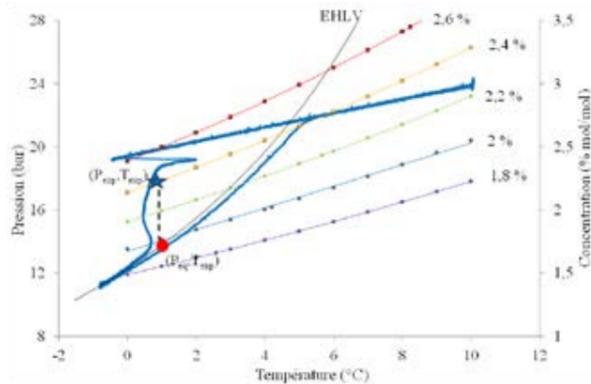


Figure 6 : concentration CO₂ prédite par les solubilités.

Modélisation en temps réel des comportements des phases à l'équilibre et hors équilibre

Afin de caractériser les mécanismes régissant la formation d'hydrates de CO₂, la concentration de CO₂ en temps réel obtenue par la méthode FTIR a été comparée aux données théoriques de la littérature et à des modèles de concentrations de CO₂ en phase liquide. En effet, afin de définir les facteurs limitants dans le système pour la croissance cristalline d'hydrates, il est important de comprendre si les concentrations expérimentales obtenues par la FTIR sont pertinentes pour les données d'équilibre ou hors-équilibre. Tout d'abord, avant la cristallisation de l'hydrate, la concentration de CO₂ dans la phase liquide a été calculée à partir de l'équation LVE basée sur les données expérimentales (P, T) mesurées pendant la dissolution et le refroidissement. Ensuite, après la nucléation, la concentration de CO₂ dans la phase liquide a été prédite selon deux méthodes différentes :

- la première méthode consiste à estimer la concentration en CO₂ en phase liquide à partir des conditions LVE (équation 1) à la pression et à la température expérimentale. Un exemple de ce calcul est représenté par une étoile noire sur la figure 6 ;
- la seconde méthode consiste à estimer la concentration de CO₂ en phase liquide à la pression HLVE correspondant aux données de température expérimentale (cercle rouge sur la figure 6). Les valeurs (P, T) de la courbe HLVE ont été utilisées pour estimer la concentration en CO₂ à l'aide de l'équation 1 et une corrélation de la concentration en CO₂ en fonction de T a été déduite et donnée par l'équation suivante :

$$x_{CO_2} = 1.528 + 9.661 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1.634 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 6.403 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 4.120 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 \quad (2)$$

La figure 7 montre l'évolution de la pression, température et de la concentration en CO₂ dans la phase liquide au cours des différentes étapes de formation/dissociation d'hydrates, identiques à celles décrites précédemment sur la figure 5. Avant la formation d'hydrates, les données expérimentales de concentration en CO₂ et de LVE sont en bon accord. Cependant, au moment de la formation d'hydrates, une diminution importante de la concentration de CO₂ dans la phase liquide est observée lors des mesures par FTIR, mais n'a pas été observée pour la concentration de CO₂ prédites par LVE. La concentration expérimentale de CO₂ était temporairement très inférieure aux prévisions. En supposant que la LVE soit établie, cela montre que le transfert de CO₂ à l'interface vapeur-liquide est une étape limitant la croissance cristalline des hydrates dans ces conditions.

De plus, les concentrations de CO₂ mesurées ont été

comparées à celles prédites par les données HLVE en considérant le couple (P_{eq}, T) lorsque l'hydrate de CO₂ cristallise (Eq. 2) et un bon accord a été observé entre les deux. Il est noté que la concentration de CO₂ mesurée a la même tendance que la concentration indiquée pour le couple (P_{eq}, T) dans les données HLVE. Ce résultat montre qu'au début de la formation d'hydrates, l'équilibre (dans la phase condensée) peut être supposé proche de l'équilibre liquide-hydrate. Cet équilibre est instantané, probablement dû au fait que les particules d'hydrates imposent un équilibre local dans la phase liquide à proximité immédiate. Ainsi, nous pouvons voir que, lorsque les hydrates sont formés, la concentration de CO₂ diminue rapidement, ce qui signifie que les hydrates consomment fortement le CO₂ dissous. La concentration de CO₂ dans la phase liquide calculée via l'équation 2 dépend alors uniquement de la température dans le réacteur et non de la pression de la phase vapeur (pression HLVE à la température expérimentale). Ensuite, un bon accord entre les résultats expérimentaux et les résultats déduits de l'équation (2) ont indiqué que l'équilibre était rapidement atteint grâce au transfert de chaleur réalisé rapidement dans le réacteur. La comparaison entre la concentration de CO₂ mesurée et celle liée au couple (P_{eq}, T) sur les données HLVE a révélé de légères différences. Néanmoins, ce résultat confirme le fait que le transfert de matière de la phase vapeur à la phase liquide est le phénomène limitant de la croissance cristalline de l'hydrate de CO₂ et que l'équilibre entre les phases liquide et hydrate ne dépend que de la température expérimentale.

Conclusion

Un protocole opératoire a été développé dans cette étude pour la quantification du CO₂ dissous dans la phase liquide via des mesures FTIR. Ce protocole permet de mesurer *in situ* et en temps réel, la composition de la phase liquide au cours du processus de formation/dissociation d'hydrates de CO₂. La concentration de CO₂ mesurée dans la phase liquide est conforme à la concentration prédite par le LVE pendant la dissolution et la stabilisation. Au début de la cristallisation de l'hydrate, une baisse drastique de la concentration en CO₂ dans la phase liquide est observée expérimentalement par des mesures FTIR. Les résultats montrent que les hydrates consomment une grande quantité de CO₂ dissous, ce qui était beaucoup plus rapide que la diffusion du CO₂ de la phase vapeur au liquide dans les conditions testées. Ainsi, cette dernière a été considérée comme étant l'étape limitant du processus de croissance cristalline. Un équilibre quasi instantané entre les phases liquide et hydrate s'établit. Cet équilibre est contrôlé par la concentration en CO₂,

qui peut être calculée à (P_{eq}, T) dans les conditions HLVE lorsque les hydrates sont présents dans le système. Deux mécanismes se produisent alors :

- consommation de CO₂ dissous lors de la formation d'hydrates conduisant à une limitation rapide de la croissance cristalline ;
- transfert de gaz à l'interface vapeur/liquide, ce qui permet la poursuite du processus.

Une quantification de la force motrice de la cristallisation sera proposée dans les prochains travaux et utilisée dans les modèles de croissance cristalline ■

Références

- Chatti, I., et al., *Benefits and drawbacks of clathrate hydrates: a review of their areas of interest*. Energy Conversion and Management, 2005. 46(9-10): p. 1333-1343.
- Kim, N.-J., et al., *Formation enhancement of methane hydrate for natural gas transport and storage*. Energy. 35(6): p. 2717-2722.
- Kumar, A., et al., *Influence of kinetic and thermodynamic promoters on post-combustion carbon dioxide capture through gas hydrate crystallization*. Journal of Environmental Chemical Engineering. 4(2): p. 1955-1961.
- Fakharian, H., H. Ganji, and A. Naderifar, *Saline produced water treatment using gas hydrates*. Journal of Environmental Chemical Engineering. 5(5): p. 4269-4273.
- Dufour, T., et al., *Impact of pressure on the dynamic behavior of CO₂ hydrate slurry in a stirred tank reactor applied to cold thermal energy storage*. Applied Energy, 2017. 204: p. 641-652.
- Oignet, J., et al., *Rheological study of CO₂ hydrate slurry in the presence of Sodium Dodecyl Sulfate in a secondary refrigeration loop*. Chemical Engineering Science, 2017. 158: p. 294-303.
- Vysniauskas, A. and P.R. Bishnoi, *Kinetics of ethane hydrate formation*. Chemical Engineering Science, 1985. 40(2): p. 299-303.
- Vysniauskas, A. and P.R. Bishnoi, *A kinetic study of methane hydrate formation*. Chemical Engineering Science, 1983. 38(7): p. 1061-1072.
- Englezos, P. and P.R. Bishnoi, *Gibbs free energy analysis for the supersaturation limits of methane in liquid water and the hydrate-gas-liquid water phase behavior*. Fluid Phase Equilibria, 1988. 42: p. 129-140.
- Englezos, P., et al., *Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates*. Chemical Engineering Science, 1987. 42(11): p. 2647-2658.
- Ribeiro Jr, C.P. and P.L.C. Lage, *Modelling of hydrate formation kinetics: State-of-the-art and future directions*. Chemical Engineering Science, 2008. 63(8): p. 2007-2034.
- Dunuwila, D.D. and K.A. Berglund, *ATR FTIR spectroscopy for in situ measurement of supersaturation*. Journal of Crystal Growth, 1997. 179(1): p. 185-193.
- Lewiner, F., et al., *On-line ATR FTIR measurement of supersaturation during solution crystallization processes. Calibration and applications on three solute/solvent systems*. Chemical Engineering Science, 2001. 56(6): p. 2069-2084.
- Togkalidou, T., et al., *Solute concentration prediction using chemometrics and ATR-FTIR spectroscopy*. Journal of Crystal Growth, 2001. 231(4): p. 534-543.
- Lewiner, F. and G. FÃ©votte, *A monitoring policy to improve the mastery of the crystal size distribution during batch solution crystallization*. IFAC Proceedings Volumes, 2001. 34(25): p. 377-382.
- Diab, F., et al., *Quantitative analysis of the liquid phase by FT-IR spectroscopy in the system CO₂/diethanolamine (DEA)/H₂O*. Fluid Phase Equilibria. 325: p. 90-99.



17. Clain, P., et al., *Particle size distribution of TBPB hydrates by focused beam reflectance measurement (FBRM) for secondary refrigeration application*. International Journal of Refrigeration, 2015. 50: p. 19-31.
18. Lewiner, F., et al., *Improving batch cooling seeded crystallization of an organic weed-killer using on-line ATR FTIR measurement of supersaturation*. Journal of Crystal Growth, 2001. 226(2-3): p. 348-362.
19. Lewiner, F., et al., *On-line ATR FTIR measurement of supersaturation during solution crystallization processes*. Calibration and applications on three solute/solvent systems. Chemical Engineering Science, 2001. 56(6): p. 2069-2084.
20. Archane, A., et al., *Effect of methanol addition on water-CO₂-diethanolamine system: Influence on CO₂ solubility and on liquid phase speciation*. Chemical Engineering Research and Design, 2008. 86(6): p. 592-599.
21. Diab, F., et al., *Quantitative analysis of the liquid phase by FT-IR spectroscopy in the system CO₂/diethanolamine (DEA)/H₂O*. Fluid Phase Equilibria, 2012. 325: p. 90-99.
22. Holder, G.D., S.P. Zetts, and N. Pradhan, *Phase Behavior in systems containing Clathrate hydrates*. Reviews in Chemical Engineering, 1988. 5(1-4): p. 1-70.
23. Servio, P. and P. Englezos, *Effect of temperature and pressure on the solubility of carbon dioxide in water in the presence of gas hydrate*. Fluid Phase Equilibria, 2001. 190(1): p. 127-134.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet CRISALHYD # ANR-14-CE05-0045.

Nomenclature

P	Pression	bar
P _{eq}	Pression d'équilibre	Bar
P _{exp}	Pression expérimentale	Bar
T	Température	°C
T _{eq}	Température d'équilibre	°C
T _{exp}	Température expérimentale	°C
Z	Facteur de compressibilité	
n _{CO₂} ^{tot}	Nombre de mole total de CO ₂	mole
n _{CO₂} ^V	Nombre de mole total de CO ₂ dans la phase vapeur	mole
n _{CO₂} ^L	Nombre de mole total de CO ₂ dans la phase liquide	mole
n _{CO₂} ^H	Nombre de mole total de CO ₂ dans la phase hydrate	mole
R	Constante universelle des gaz parfaits	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
x _{CO₂}	Concentration de CO ₂ dans la phase liquide	mol CO ₂ /mol H ₂ O
n _{H₂O} ^L	Nombre de mole d'eau dans la phase liquide	mole
nb _h	Nombre d'hydratation	mol H ₂ O /mol CO ₂
LVE	Equilibre Liquide-Vapeur	-
HLE	Equilibre Hydrate-Liquide	-
HLVE	Equilibre Hydrate-Liquide-Vapeur	-
μ _{CO₂} ^V	Potentiel chimique du CO ₂ dans la phase vapeur	J.mol ⁻¹
μ _{CO₂} ^L	Potentiel chimique du CO ₂ dans la phase liquide	J.mol ⁻¹
H _{CO₂}	Constante d'Henry	bar
ψ _{CO₂}	Coefficient de fugacité	-
γ _{CO₂}	Coefficient d'activité	-

Un « nouveau » couple pour les PAC à compression/résorption

Paül Dávila, Mahmoud Bourouis, Juan Prieto, Daniel Salavera, Alberto Coronas
 Université Rovira i Virgili, Département de Génie mécanique, Crever, 26 Av. Països Catalans, 43007 Tarragona, Espagne

Le travail relaté ici consiste à évaluer thermodynamiquement les performances d'une pompe à chaleur à résorption/compression fonctionnant avec un mélange CO₂/acétone à 60 °C (étude de cas 1) et à 90 °C (étude de cas 2).

Résumé

Un système intéressant pour les procédés industriels dans lesquels il existe une demande de chauffage à des températures allant jusqu'à 90 °C, consiste à récupérer la chaleur perdue au moyen d'une pompe à chaleur à compression / résorption. Plusieurs études sont rapportées dans la littérature sur le potentiel d'utilisation du dioxyde de carbone comme frigorigène dans différents mélanges absorbants dans les pompes à chaleur ou les machines frigorifiques à compression / résorption. Le présent travail porte sur l'analyse thermodynamique d'une machine de ce type pour récupérer de la chaleur résiduelle à des températures comprises entre 60 et 90 °C, en utilisant le couple CO₂/acétone comme fluide de travail. Les propriétés thermodynamiques de ce mélange ont été calculées à l'aide de l'équation d'état de Peng Robinson et comparées aux données de la littérature.

Mots clés : dioxyde de carbone, acétone, pompe à chaleur, compression/résorption, performances.

Abstract

An interesting issue for industrial processes in which there is a heating demand at temperatures up to 90 °C, is to upgrade waste heat by means of a compression/resorption heat pump. Several investigations are reported in the literature on the potential of using carbon dioxide as refrigerant in different absorbent mixtures in compression/resorption heat pump and refrigeration cycles. The present work deals with a thermodynamic analysis of a compression/resorption cycle for upgrading waste heat at temperatures in the range of 60-90 °C using CO₂/acetone as a working pair. The thermodynamic properties of the working fluid mixture have been calculated using the Peng Robinson Equation of State and compared with the literature data.

Keywords: Carbon dioxide, Acetone, Heat Pump, Compression/Resorption, Performance.

Introduction

Dans de nombreuses usines ou procédés industriels, une grande quantité de chaleur est perdue et donc disponible entre 40 °C à 50 °C. Une solution intéressante pour beaucoup de ces installations est d'augmenter le niveau thermique de cette chaleur résiduelle à l'aide d'une pompe à chaleur pour une utilisation ultérieure. Les pompes à chaleur à compression/résorption représentent une option intéressante pour ce type d'application. Elles utilisent un mélange zéotropique (frigorigène/absorbant) et un circuit de solution entre un désorbeur et un résorbeur, au lieu du

classique ensemble évaporateur/condenseur. La figure 1 (page suivante) représente le schéma d'une pompe à chaleur à compression/résorption qui se compose principalement d'un circuit de solution de résorption (mélange biphasique) et un circuit de frigorigène. Comme l'évaporation du mélange zéotropique dans le désorbeur n'est pas complète, le flux dans le désorbeur est un mélange liquide/vapeur. Après la séparation des phases, le flux de vapeur est envoyé à un compresseur à entraînement mécanique et le liquide est envoyé à un résorbeur au moyen



» d'une pompe à solution. Le principal avantage des cycles à compression/résorption est une meilleure performance en raison de la réduction de la pression de fonctionnement et du taux de compression par rapport au cycle classique à compression, avec un fluide frigorigène pur et l'amélioration de l'efficacité en raison des plus faibles écarts de température interne et externe au désorbeur et au résorbeur, liés à la variation de température des fluides (cycle de Lorentz). En outre, la production de chaleur peut être modifiée en changeant la concentration de la solution circulante entre le désorbeur et le résorbeur. Les cycles à compression/résorption aussi connus dans la littérature comme des « cycles à compression de vapeur avec circuit de solution » [1], o « Osembruck Cycle », puisque ce cycle a été breveté en 1895 par August Osembruck [2]. Alterkinch (1950) a mené une étude théorique démontrant son grand potentiel d'économie d'énergie [3] et expérimentalement par Nordtvedt [4]. Concernant les couples de fluides de travail, même si initialement le R22 ou R134a étaient employés avec des absorbants organiques, le couple ammoniac/eau est le fluide de travail principalement utilisé dans les pompes à chaleur à compression/résorption. Un exemple d'étude avec ce couple est proposé par Baehr [5] qui s'est intéressé à la thermodynamique d'une thermopompe à compression/résorption pour des applications de chauffage. Plus récemment, la société Hybrid Energy [6] a construit plusieurs équipes de machine à compression/résorption pour des applications utilisant le couple ammoniac/eau avec des échangeurs à plaques comme éléments principaux. L'utilisation du CO₂ dans les cycles de compression/résorption est beaucoup plus récente. Groll [7] a rapporté les premières études des cycles frigorifiques à compression avec une solution de CO₂ et d'acétone. Concernant les propriétés thermodynamiques du mélange CO₂/acétone, la littérature ouverte regorge de publications intéressantes. Celle de Chang et al. [8] s'intéresse au diagramme de Dühring, mais aussi à la

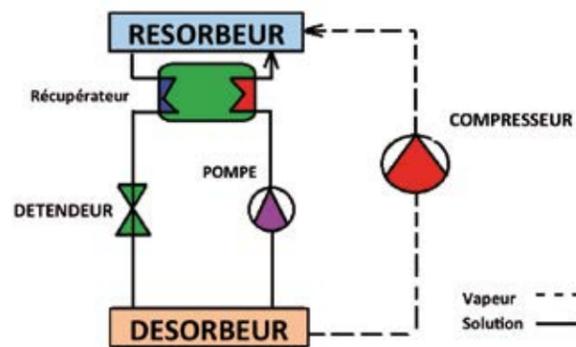


Figure 1 : schéma d'une pompe à chaleur à compression / résorption.

caractérisation de la masse volumique du mélange en phases liquide et vapeur. Celle de Chiu et al [9] donne les limites de phase isotherme de l'équilibre liquide vapeur du mélange CO₂/acétone dans une plage de température de 291,15 à 313,15 K et de pression de 0 à 8 MPa, celle de Han et al, [10] étant les données d'équilibre de phase jusqu'à une pression de 11,77 MPa et une température de 393,15 K. Dans ces études, les équations d'État (EoS) utilisées sont celles de Patel-Teja, l'équation SAFT et celle de Peng-Robinson.

Le présent travail traite de la détermination des propriétés thermodynamiques du mélange CO₂/acétone en fonction de la température, de la pression et de la concentration dans les gammes de fonctionnement des pompes à chaleur à compression/résorption, ainsi que la simulation thermodynamique de la pompe à chaleur avec le couple CO₂/acétone pour deux études de cas. Dans le premier cas, le niveau de la température de la chaleur récupérée est rehaussé de 30 °C à 60 °C et dans le second cas de 60 °C à 90 °C.

Détermination des propriétés thermodynamiques du mélange CO₂/acétone

L'équilibre liquide vapeur (VLE) du mélange CO₂/acétone a été modélisé avec l'équation d'état de Peng-Robinson [11], à l'aide des règles de mélange classiques tels que :

$$a = a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + 2x_1x_2a_{12} \quad (1a)$$

$$b = b_1x_1^2 + b_2x_2^2 + 2x_1x_2b_{12} \quad (1b)$$

où a_i, a₂, b₁ et b₂ sont les paramètres de l'équation d'état de Peng-Robinson pour respectivement le CO₂ et l'acétone pur.

$$a_i = 0,45724 \frac{R^2 T_{crit,i}^2}{P_{crit,i}} \alpha_i \quad (2a)$$

$$b_i = 0,07780 \frac{RT_{crit,i}}{P_{crit,i}} \alpha_i \quad (2b)$$

$$\sqrt{\alpha_i} = 1 + m_i(1 - \sqrt{T_{r,i}}) \quad (2c)$$

$$m_i = 0,37464 + 1,54226w_i - 0,26992w_i^2 \quad (2d)$$

Où :

- R : constante idéale de gaz universel
- T_{crit,i} : température critique pour chaque composant pur
- P_{crit,i} : pression critique pour chaque composant pur
- α_i : paramètre de mélange
- m_i : paramètre du facteur acentrique
- T_{r,i} : température réduite pour chaque composant pur
- w_i : facteur acentrique pour chaque composant pur

Mélange	k ₁₂		
	k ₁	k ₂	k ₃
CO ₂ (1)/acétone (2)	-0,0309	0,00003	6,095

Tableau 1 : paramètres d'interaction binaire k₁₂ pour le couple CO₂ acétone [12].

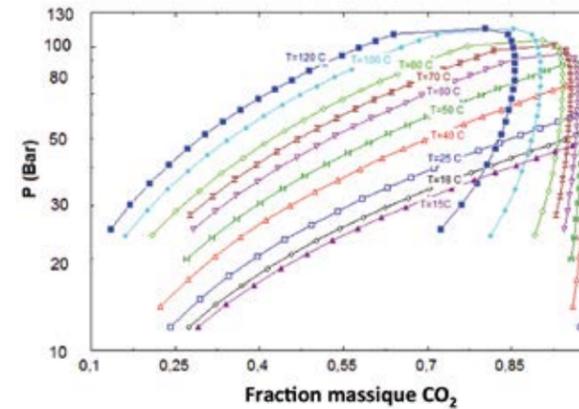


Figure 2 : pression de vapeur du mélange CO₂/acétone, calculée à l'aide de l'équation d'état de Peng-Robinson en fonction de la fraction massique en CO₂ pour différentes températures.

Les paramètres d'interaction a₁₂ et b₁₂ sont obtenus en utilisant les règles de combinaison classique suivant :

$$a_{12} = \sqrt{a_1 a_2} (1 - k_{12}) \quad (3a)$$

$$b_{12} = 1/2(b_1 + b_2) \quad (3b)$$

k₁₂ le paramètre d'interaction binaire dans l'équation (3a) a été déterminé à partir de données d'équilibre liquide vapeur extraites de [8] et [10]. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres de l'équation (4) pour le calcul du paramètre d'interaction binaire en fonction de la température :

$$k_{12} = k_1 + k_2 T + \frac{k_3}{T} \quad (4)$$

L'enthalpie et l'entropie massiques du mélange peuvent être obtenus à partir de l'entropie et de l'enthalpie initiales (tous deux évalués à partir de l'équation d'état) et de la capacité calorifique massique du gaz parfait des composants purs C_p⁰ en fonction de la température. Les paramètres de l'équation (5) utilisés sont donnés dans le tableau 2 [12].

Fluide pur	Coefficients			
	C _{p i,0} ⁰ (cal/g.molK)	C _{p i,1} ⁰ (cal/g.molK)	C _{p i,2} ⁰ (cal/g.molK)	C _{p i,3} ⁰ (cal/g.molK)
CO ₂	4,7280	1,754 x 10 ⁻²	-1,338 x 10 ⁻⁵	4,097 x 10 ⁻⁹
Acétone	1,5050	6,224 x 10 ⁻²	-2,992 x 10 ⁻⁵	4,867 x 10 ⁻⁹

Tableau 2 : coefficients de l'équation 5 pour le calcul de la capacité calorifique massique du gaz parfait pour le CO₂ et l'acétone [13].

$$C_{pi}^0 = \sum_{j=0}^3 C_{pi,j}^0 T^j \quad (5)$$

La capacité calorifique massique du mélange de gaz parfait est obtenue à partir de la simple règle de mélange :

$$C_p^0 = \sum_1^2 C_{pi}^0 x_i \quad (6)$$

La figure 2 montre l'évolution de la pression de vapeur du mélange CO₂/acétone calculé avec l'équation d'état de Peng Robinson en fonction de la concentration en CO₂ pour différentes températures variant de 15 à 120 °C. En comparant ces résultats avec les valeurs issues de la littérature [8 et 10], des écarts maximaux respectivement de 3,6 % et 4,5 % ont été obtenus.

Simulation thermodynamique de la pompe à chaleur à résorption/compression

Le modèle mathématique mis au point pour effectuer les simulations de la machine repose sur les bilans de masse et d'énergie pour chaque composant de la pompe à chaleur à résorption/compression. Les hypothèses suivantes ont été adoptées :

- La solution et le vapeur à la sortie du débourbeur sont à l'équilibre à la basse pression et la température du désorbeur (T₄) ;
- La solution est à saturation à la sortie du résorbeur ;
- L'efficacité de l'échangeur de chaleur de solution est de 0,8 ;
- Le rendement de la pompe est de 0,8 et le rendement isentropique du compresseur est de 0,7.

Le modèle de PAC à résorption/compression a cinq variables indépendantes : la température de sortie du résorbeur (T₁₁) et du désorbeur (T₄), la fraction massique de CO₂ à la sortie du résorbeur (X₁₁), le titre en vapeur à la sortie du désorbeur (q₄) et le débit massique de solution à la sortie du résorbeur (m₁₁). La figure 3 (page suivante) montre un schéma simplifié de la pompe à chaleur à résorption/compression avec les principaux éléments et la numérotation des différents points du cycle représentés sur le diagramme pression-température-composition (PTX).

Il convient de noter que les circuits extérieurs dans le résorbeur et le désorbeur ne sont pas traités dans le présent travail. Les résultats des études de cas sont présentés ci-après. Dans la première étude, le niveau thermique de la chaleur récupérée est rehaussé de 30 °C (T₄) à 60 °C

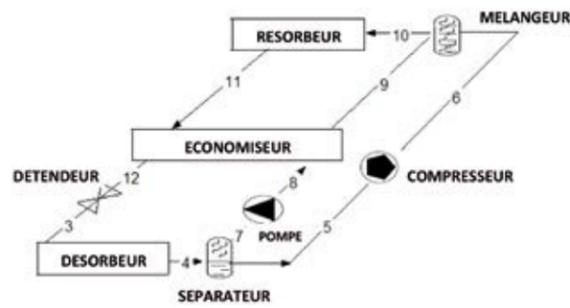


Figure 3 : schéma de la pompe à chaleur à compression/résorption dans le diagramme de Dühring PTX.

»» (T₁₁), tandis que dans la seconde, la chaleur est rehaussée de 60 °C à 90 °C. Pour les deux études de cas, la figure 4 représente le coefficient de performance (COP) de la machine en fonction de la fraction massique de CO₂ à la sortie du résorbeur (X₁₁), pour différents titres en vapeur à la sortie du désorbeur (T_d). On observe que plus le titre en vapeur est élevé, plus la fraction massique de CO₂ appropriée est élevée. De plus, pour un titre donné en vapeur, la fraction massique de CO₂ diminue avec la température de sortie du résorbeur.

Le COP est plus élevé lorsque la température de sortie du résorbeur est de 60 °C. Dans les deux cas les COP les plus élevés sont obtenus pour des titre en vapeur à la sortie du désorbeur de 0,40 et 0,30. Lorsque la température de sortie du résorbeur est égale à 60 °C, le meilleur COP est obtenu pour une fraction massique de CO₂ comprise entre 0,60 et 0,70. En revanche, lorsque la température de sortie de résorbeur est de 90 °C, le meilleur COP s'obtient pour une fraction massique de CO₂ de 0,50.

La figure 5 illustre la puissance de chauffage en fonction de la fraction massique de CO₂ à la sortie du résorbeur pour différents titres en vapeur à la sortie du désorbeur

et pour un débit de solution de 1 kg/s. Comme attendu, la puissance de chauffage augmente avec l'augmentation du titre en vapeur. Par ailleurs, des puissances de chauffage sont obtenues pour de hautes fractions massiques de CO₂ et pour de faibles températures au résorbeur. Lorsque la température de sortie du résorbeur est de 60 °C, le COP le plus élevé (2,75) est atteint lorsque la fraction massique de CO₂ est de 0,7 et le titre en vapeur à la sortie du désorbeur de 0,4. En revanche, lorsque la température de sortie du résorbeur est de 90 °C, le COP est au maximum de 2,04 lorsque la fraction massique de CO₂ vaut 0,5 et le titre en vapeur à la sortie du désorbeur est de 0,3. Le tableau 3 résume les principales caractéristiques (température, pression et titre en vapeur) des cycles illustrés sur la figure 2, correspondant aux plus haut COP atteint pour chaque étude de cas.

Conclusion

Ce travail a consisté à évaluer thermodynamiquement les performances d'une pompe à chaleur à résorption/compression fonctionnant avec un mélange CO₂/acétone à 60 °C (étude de cas 1) et à 90 °C (étude de cas 2). Pour cela, les propriétés thermodynamiques du mélange sont déterminées à l'aide de l'équation d'état de Peng-Robinson, adaptée à ce mélange de fluides.

Les résultats de simulations montrent que le cycle est plus efficace pour les conditions d'étude du cas 1 (COP plus élevé et 50 % de puissance de chauffage en plus). Dans ce cas, le COP le plus élevé (2,75) est atteint lorsque, à la sortie du résorbeur, la fraction massique de CO₂ est de 0,7 et le titre en vapeur de 0,4. Pour l'étude de cas 2, le COP le plus élevé (2,04) est atteint lorsque, à la sortie de résorbeur, la fraction massique de CO₂ est de 0,5 et le titre en vapeur est de 0,3 ■

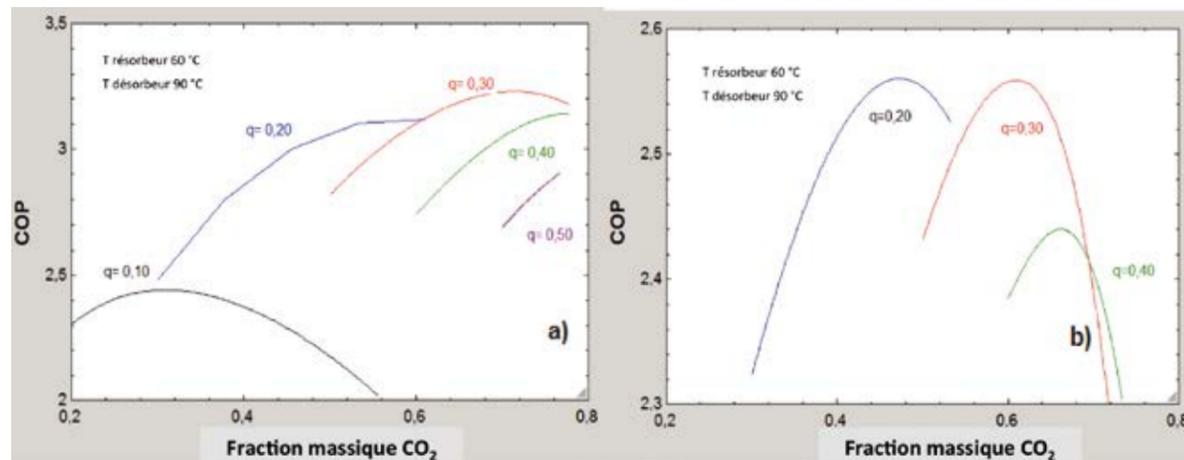


Figure 4 : coefficient de performance en fonction de la fraction massique de CO₂ à la sortie du résorbeur pour différents titres en vapeur à la sortie de désorbeur. a) température de sortie du résorbeur de 60 °C. b) température de sortie du résorbeur de 90 °C.

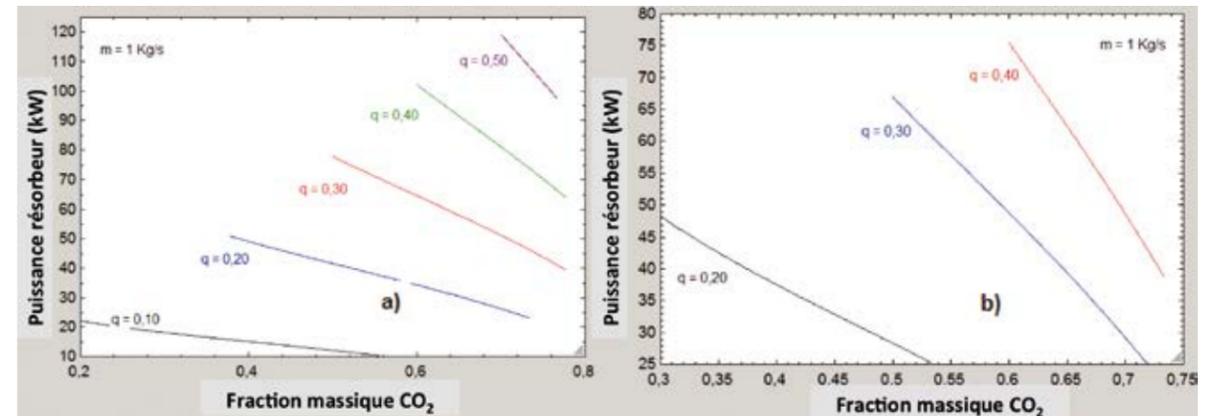


Figure 5 : puissance de chauffage au résorbeur en fonction de la fraction massique de CO₂ à la sortie de résorbeur pour différents titres en vapeur à la sortie de désorbeur. a) température de sortie du résorbeur de 60 °C. b) température de sortie du résorbeur de 90 °C.

Point du cycle	Étude de cas N°1 (30 °C à 60 °C)			Étude de cas N°2 (60 °C à 90 °C)		
	Température (°C)	Pression (bar)	Titre en vapeur (-)	Température (°C)	Pression (bar)	Titre en vapeur (-)
3	19,5	34,4	0,2	43,9	26,6	0,2
4	30,0	34,4	0,4	60,0	26,6	0,3
5	30,0	34,4	1,0	60,0	26,6	1,0
6	98,5	77,5	1,0	141,1	70,1	1,0
7	30,0	34,5	0,0	60,0	26,6	0,0
8	30,0	77,5	0,0	60,0	70,1	0,0
9	54,0	77,5	0,0	84,0	70,1	0,0
10	70,1	77,5	0,2	101,1	70,1	0,1
11	60,0	77,5	0,0	90,0	70,1	0,0
12	49,5	77,5	0,0	76,5	70,1	0,0

Tableau 3 : principales caractéristiques des cycles des deux études de cas avec le plus haut COP obtenu.

Références

- [1] R. Radermacher, Q. Zhou, *Development of a vapor compression cycle with a solution circuit and desorber/absorber heat exchange*. 1997.
- [2] Osenbruck, "Verfahren zur Kälteerzeugung bei Absorptionsmaschinen," DRP 84084, 1895.
- [3] Altenkirch E., "Kompressionskältemaschine mit Losungskreislauf," Kältetechnik, 1950, pp. 251-284.
- [4] S. R. Nordtvedt, "Experimental and theoretical study of a compression / absorption heat pump with ammonia / water as working fluid," Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [5] H. D. Baehr, "The COP of absorption and resorption heat pumps with ammonia-water as working fluid," Int. J. Refrig., vol. 4, no. 2, pp. 83-86, Mar. 1981.
- [6] Hybrid Energy AS, "Hybrid Energy," 2018. [Online]. Available: <http://www.hybridenergy.no/reference-plants/>.
- [7] E. A. Groll and P. D., "Modeling of Absorption / Compression Cycles Using Working Pair Carbon Dioxide / Acetone," *ASHRAE Trans.*, 1997.
- [8] C. J. Chang, C.-Y. Day, C.-M. Ko, and K.-L. Chiu, "Densities and P-x-y diagrams for carbon dioxide dissolution in methanol, ethanol, and acetone mixtures," *Fluid Phase Equilib.*, vol. 131, no. 1, pp. 243-258, 1997.
- [9] H. Y. Chiu, M. J. Lee, and H. M. Lin, "Vapor-liquid phase boundaries of binary mixtures of carbon dioxide with ethanol and acetone," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 53, no. 10, pp. 2393-2402, 2008.
- [10] F. Han, Y. Xue, Y. Tian, X. Zhao, and L. Chen, "Vapor-liquid equilibria of the carbon dioxide + acetone system at pressures from (2.36 to 11.77) MPa and temperatures from (333.15 to 393.15) K," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 50, no. 1, pp. 36-39, 2005.
- [11] D.-Y. P. and D. B. Robinson, "A New Two-Constant Equation of State," *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, no. 1, pp. 59-64, 1976.
- [12] J. M. Mwangome, *Small capacity combined absorption power and refrigeration systems using a scroll expander with different working fluid mixtures*. Tarragona, 2017.
- [13] A. C. Engineers, "Chemical Engineers Guide," *Estimating binary interaction parameters for Peng Robinson EoS*, 2016. [Online]. Available: <https://cheguide.com/2016/01/estimating-binary-interaction-parameter-for-peng-robinson-eos/>.

Remerciements

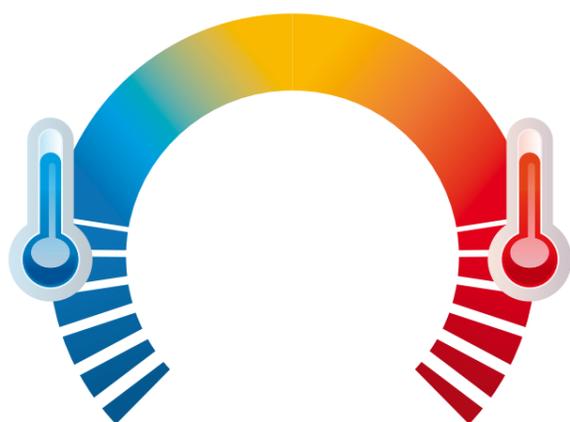
Cette étude fait partie d'un projet de R & D financé par le ministère espagnol de l'Économie et de la Compétitivité (DPI2015-71306-R). P. Dávila remercie l'Université Rovira i Virgili pour l'octroi du contrat de recherche (2016PMF-PIPF-26).

Thermodynamique en dimensions finies - optimisation des systèmes

Michel Feidt⁽¹⁾ et Philippe Haberschill⁽²⁾

(1) Professeur émérite Université de Lorraine-Lemta ; (2) Maître de conférences émérite Insa de Lyon – Cethyl.

Cette quatrième partie des fiches MémoFroid techniques, consacrées à la thermodynamique technique, s'appuie sur les fiches précédentes [1, 2 et 3]. Elle constitue une illustration des tendances récentes en matière d'analyse des systèmes thermodynamiques.



Les systèmes sur lesquels nous allons illustrer la méthodologie proposée sont des machines à cycle inverse fonctionnant selon un cycle de Carnot endoréversible en régime permanent (figure 1).

Cette machine est en contact thermique avec une source froide de débit calorifique fini $\dot{C}_c = \dot{m}_c c_{pc}$, qui échange de la chaleur sensible avec le fluide de travail dont la température est $T_c < T_{cse}$, T_{cse} étant la température d'entrée du fluide de la source froide dans l'évaporateur. Le « bout chaud » de la machine, est en contact avec la source chaude qui est un fluide ambiant (air, eau) disponible à T_{Hse} , avec $T_{Hse} < T_H$, T_H est la température de condensation dans l'échangeur haute température (débit calorifique, \dot{C}_H). Les deux phases de transferts thermiques de puissances \dot{Q}_c et \dot{Q}_H sont encadrées par deux transformations isentropiques (compression et détente sont supposées ainsi adiabatiques et réversibles). La puissance de compression $\dot{W}_{cp} > 0$ et la régénération mécanique de la détente $\dot{W}_E < 0$, conduisent à la dépense énergétique \dot{W} tel que :

$$\dot{W} = \dot{W}_{cp} + \dot{W}_E \quad (1)$$

L'expression des deux transferts thermiques au « bout chaud » et au « bout froid » correspondent en négligeant les pertes thermiques dans les bilans thermiques de l'évaporateur et du condenseur sous les formes suivantes :

$$\dot{Q}_c = \dot{C}_c(T_{cse} - T_{css}) = \epsilon_c \dot{C}_c(T_{cse} - T_c) = \dot{G}_c(T_{cse} - T_c) \quad (2)$$

ϵ_c , l'efficacité de l'évaporateur telle que :

$$\epsilon_c = 1 - \exp(-NUT_c) \text{ avec } NUT_c = \frac{k_c A_c}{\dot{C}_c}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{C}_H(T_{Hse} - T_{Hss}) = \epsilon_H \dot{C}_H(T_{Hse} - T_H) = \dot{G}_H(T_{Hse} - T_H) \quad (3)$$

ϵ_H , l'efficacité du condenseur telle que :

$$\epsilon_H = 1 - \exp(-NUT_H) \text{ avec } NUT_H = \frac{k_H A_H}{\dot{C}_H}$$

Le bilan énergétique de la machine conduit à :

$$\dot{W} = -(\dot{Q}_H + \dot{Q}_c) = \dot{G}_H(T_H - T_{Hse}) - \dot{G}_c(T_{cse} - T_c) \quad (4)$$

Le bilan entropique de la machine s'écrit de façon générale :

$$\frac{\dot{Q}_H}{T_H} + \frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \dot{S}_i = 0 \quad (5)$$

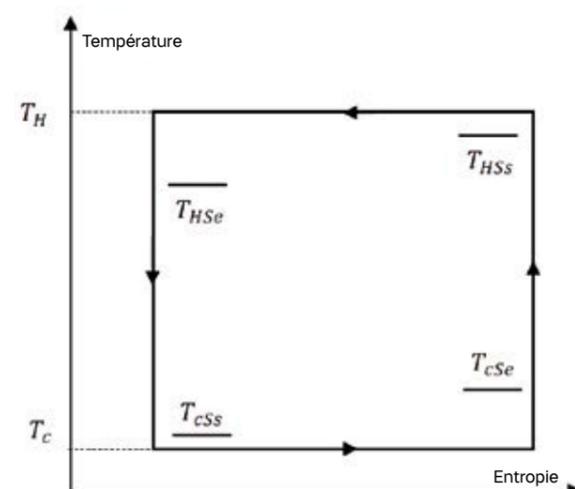


Figure 1 : diagramme température – entropie de la machine à froid de Carnot endoréversible.

On note que dans le cas endoréversible \dot{S}_i , le flux de production d'entropie est nul. L'équation (5) traduit dans ce cas une dépendance entre T_H et T_c telle que :

$$\frac{\dot{G}_H(T_H - T_{Hse})}{T_H} = \Delta S = \frac{\dot{G}_c(T_{cse} - T_c)}{T_c} \quad (6)$$

$\Delta S > 0$, représente l'entropie de transfert aux sources (au signe près pour la source chaude). L'existence du cycle thermodynamique impose $\Delta S \neq 0$ et, en conséquence, des valeurs imposées de T_H et T_c telles que :

$$T_H = \frac{\dot{G}_H T_{Hse}}{\dot{G}_H - \Delta S} \quad (7)$$

$$T_c = \frac{\dot{G}_c T_{cse}}{\dot{G}_c + \Delta S} \quad (8)$$

L'expression (4) de \dot{W} prend alors, en combinant avec (7) et (8), la forme suivante :

$$\dot{W} = \Delta S \left[\frac{\dot{G}_H T_{Hse}}{\dot{G}_H - \Delta S} - \frac{\dot{G}_c T_{cse}}{\dot{G}_c + \Delta S} \right] \quad (9)$$

Cette fonction est monotone croissante de ΔS , à \dot{G}_H et \dot{G}_c fixés. De plus, elle est monotone décroissante de \dot{G}_H et \dot{G}_c , qui sont fonction des dimensions du système (de l'évaporateur et du condenseur) et des débits. Ceux-ci pour des raisons évidentes restent finis. Le problème est donc soumis à des contraintes dimensionnelles que notre illustration méthodologique suppose, pour simplifier, telle que :

$$\dot{G}_H + \dot{G}_c = \dot{G}_T \quad (10)$$

L'optimisation proposée consiste alors à distribuer de façon optimale \dot{G}_H et \dot{G}_c entre le « bout chaud » et le « bout froid ». Un calcul variationnel (annexe) conduit alors à :

$$\dot{G}_c^* = \dot{G}_T \frac{\sqrt{T_{cse}}}{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}} - \Delta S \quad (11)$$

$$\dot{G}_H^* = \dot{G}_T \frac{\sqrt{T_{Hse}}}{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}} + \Delta S \quad (12)$$

On voit clairement qu'il n'y a pas équirépartition des grandeurs \dot{G}^* à l'optimum de dépense énergétique même si $\Delta S=0$. L'augmentation de ΔS accroît de surcroît l'écart entre les deux valeurs.

Le minimum de dépense énergétique vaut pour la distribution optimale :

$$\min \dot{W}_{endo} = \Delta S (T_{Hse} - T_{cse}) + \frac{\Delta S^2}{\dot{G}_T} (\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}})^2 \quad (13)$$

Fonction croissante de $\Delta S (T_{Hse} - T_{cse})$, décroissante de \dot{G}_T . On peut alors montrer simplement que le CEF associé à

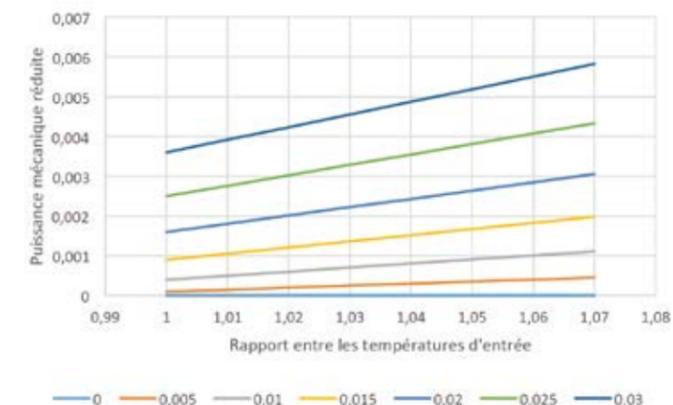


Figure 2 : évolution de la puissance mécanique réduite en fonction du rapport entre les températures d'entrée pour différentes variations d'entropie réduites.

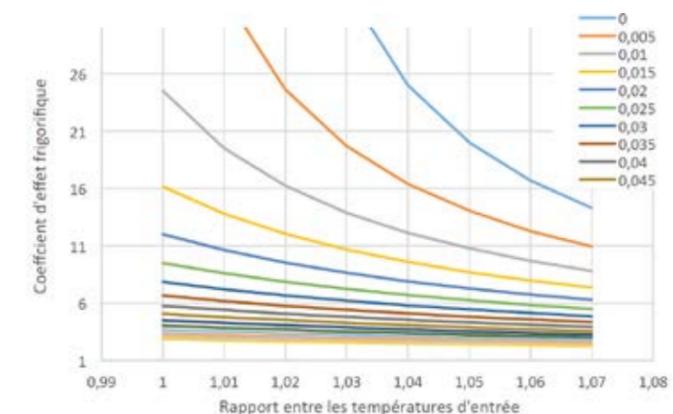


Figure 3 : évolution du coefficient d'effet frigorifique en fonction du rapport entre les températures d'entrée pour différentes variations d'entropie réduites.

$\min \dot{W}_{endo}$ est décroissant avec l'entropie de transfert. En introduisant la variation d'entropie et la température de source chaude réduites :

$$s = \frac{\Delta S}{\dot{G}_T} \text{ et } t_h = \frac{T_{Hse}}{T_{cse}} \text{ le travail minimum réduit s'écrit :}$$

$$w = \frac{\min \dot{W}_{endo}}{\dot{G}_T T_{cse}} = s (t_h - 1) + s^2 (\sqrt{t_h} + 1)^2$$

Et le CEF :

$$CEF = \frac{1 - s (\sqrt{t_h} + 1)}{t_h - 1 + s (\sqrt{t_h} + 1)^2}$$

Les évolutions de ces grandeurs sont représentées sur les figures 2 et 3. Pour un générateur d'eau glacée à condensation par air, les ordres de grandeur des températures d'entrée des sources au condenseur et à l'évaporateur sont de 33 et 12 °C respectivement, soit une

» température réduite de 1,06. En choisissant une variation réduite d'entropie de 2 %, on obtient un CEF de 6,74 et une puissance mécanique réduite de 0,285 %. Si l'on fixe la puissance frigorifique à 100 kW, on en déduit une puissance de compression de 14,8 kW, un $\dot{G}_T = 18,3 \text{ kW/K}$ et finalement $\dot{G}_c^* = 8,6 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$ et $\dot{G}_H^* = 9,64 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$. Si l'on fixe des températures de sortie de l'eau et de l'air respectivement à 7 et 33 °C, à l'optimum, il faudra des efficacités de l'évaporateur et du condenseur respectivement de 0,43 et 0,32, ce qui donne des températures d'évaporation et de condensation respectivement de 0,4 et 41 °C. Réduire la variation d'entropie à 1 % permet de porter le CEF à 9,7 mais dans ce cas les efficacités nécessaires sont doublées (TH = 35 °C et Tc = 6,2 °C) et les surfaces d'échange bien plus importantes.

En conclusion, ces résultats originaux par rapport à la littérature classique montrent la complémentarité et le couplage existant entre les variables dimensionnelles \dot{G}_i et les variables de fonctionnement de la machine, intensive (T_H, T_c) puis extensive ΔS . Il en résulte un optimum, illustré dans la configuration endoréversible. Des extensions à l'approche présentée sont en cours, pour caractériser des configurations de plus en plus proches des comportements réels complexes. Néanmoins, le présent modèle et sa méthodologie ajoutent à la connaissance par l'existence de tendances nouvelles et de nouvelles bornes externes d'efficacité énergétique et de maîtrise des mécanismes de transfert et de dissipation d'énergie.

Références

- [1] A. Lallemand et P. Haberschill. *Premier principe de la thermodynamique*. RGF 1157, mai-juin 2016, p. 52-54.
[2] A. Lallemand et P. Haberschill. *Deuxième principe de la thermodynamique*. RGF 1158, juillet-Aout 2016, p. 93-95.
[3] A. Lallemand et P. Haberschill. *Exergie-Anergie*. RGF 1159, Sept-octobre 2016, p. 75-77.

Annexe

À l'optimum les dérivées de \dot{W} par rapport aux \dot{G}_i sont nulles ce qui conduit à :

$$\frac{\partial \dot{W}}{\partial \dot{G}_H} = 0 = \Delta S T_{Hse} \left(\frac{\dot{G}_H - \Delta S + \dot{G}_H}{(\dot{G}_H - \Delta S)^2} \right) = \frac{\partial \dot{W}}{\partial \dot{G}_c} = \Delta S T_{cse} \left(\frac{\dot{G}_c + \Delta S - \dot{G}_c}{(\dot{G}_c + \Delta S)^2} \right)$$

Ce qui conduit à :

$$(\dot{G}_H - \Delta S) \sqrt{T_{cse}} = (\dot{G}_c + \Delta S) \sqrt{T_{Hse}} \quad (1)$$

En combinant avec l'hypothèse : $\dot{G}_c + \dot{G}_H = \dot{G}_T$

Soit remplacer \dot{G}_c par $(\dot{G}_T - \dot{G}_H)$ dans (1) ce qui donne :

$$(\dot{G}_H - \Delta S) \sqrt{T_{cse}} = (\dot{G}_T - \dot{G}_H + \Delta S) \sqrt{T_{Hse}}$$

Ce qui conduit à :

$$\dot{G}_H^* = \dot{G}_T \frac{\sqrt{T_{Hse}}}{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}} + \Delta S$$

De même en remplaçant \dot{G}_H par $(\dot{G}_T - \dot{G}_c)$ dans (1) on obtient :

$$\dot{G}_c^* = \dot{G}_T \frac{\sqrt{T_{cse}}}{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}} - \Delta S$$

On en déduit :

$$\min \dot{W}_{endo} = \Delta S \left[\frac{\dot{G}_H^* T_{Hse}}{\dot{G}_H^* - \Delta S} - \frac{\dot{G}_c^* T_{cse}}{\dot{G}_c^* + \Delta S} \right] \text{ en remplaçant } \dot{G}_H^* \text{ et } \dot{G}_c^* \text{ par leurs expressions précédentes on obtient :}$$

$$\min \dot{W}_{endo} = \Delta S (T_{Hse} - T_{cse}) + \frac{\Delta S^2}{\dot{G}_T} (\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}})^2$$

La puissance frigorifique est donnée par : $\dot{Q}_c = \dot{G}_c (T_{cse} - T_c)$. En remplaçant $(T_{cse} - T_c)$ par son expression en fonction de ΔS tirée de l'équation (6) du texte on obtient à l'optimum :

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{G}_c^* \Delta S T_{cse}}{\dot{G}_c^* + \Delta S} = \Delta S T_{cse} \left(\dot{G}_T \frac{\sqrt{T_{cse}}}{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}} - \Delta S \right) \frac{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}}{\dot{G}_T \sqrt{T_{cse}}}$$

$$\dot{Q}_c = \Delta S T_{cse} \left(1 - \Delta S \frac{\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}}{\dot{G}_T \sqrt{T_{cse}}} \right)$$

Ainsi le CEF est donné par :

$$CEF = \frac{\dot{G}_T T_{cse} - \Delta S (\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}}) \sqrt{T_{cse}}}{\dot{G}_T (T_{Hse} - T_{cse}) + \Delta S (\sqrt{T_{Hse}} + \sqrt{T_{cse}})^2}$$

SYSTÈMES ENDORÉVERSIBLES

Toute machine réelle fonctionne de façon irréversible. Les irréversibilités d'un système ou d'une transformation sont nombreuses et traduisent toutes une dégradation de l'énergie. Pour ce qui concerne les machines frigorifiques, on peut résumer les irréversibilités à deux grandes catégories :

- les irréversibilités dues aux transferts thermiques entre les sources thermiques chaude et froide et la machine. On appellera ces irréversibilités des exo irréversibilités. Elles sont dues principalement aux écarts de température nécessaires aux transferts de chaleur ;
 - les irréversibilités de la machine sont par contre plutôt mécaniques (frottements solides, frottements visqueux qui s'opposent à l'écoulement du frigorigène), voire électriques (effet joule, pertes « fer »...).
- Une machine est dite « endoréversible », si les productions d'entropie précédentes (liées à la machine) sont négligeables ou plus exactement nulles. Le cycle représenté sur la figure 1 correspond à cette hypothèse.

DOIT-ON ÊTRE VIGILANT CONCERNANT LA PROVENANCE DES FLUIDES FRIGORIGÈNES ?



C'est l'une des nombreuses questions à laquelle l'AFCE, association constituée de spécialistes indépendants, travaille en permanence pour tenir informé en temps réel l'ensemble de la filière froid et climatisation des évolutions techniques, pratiques et législatives. [Rendez-vous sur notre site pour suivre VOTRE actualité !](#)



afce.asso.fr

www.afce.asso.fr est LE site de l'association de la filière froid et climatisation. Son accès est entièrement gratuit et son contenu alimenté par ses membres, tous spécialistes. Vous souhaitez en savoir plus ou nous rejoindre... Contactez-nous directement en ligne !

- INFORMATIONS
- ÉTUDES THÉMATIQUES
- CONFÉRENCES
- PAROLES D'EXPERTS
- RÉGLEMENTATION
- ACTUALITÉS



Promouvoir
une attitude
responsable

Jacques Charles (1746-1823), le père des relations entre la température et la pression

Sans la connaissance des relations entre pression et température, nous n'aurions pas aujourd'hui la majorité des quelque milliards de machines frigorifiques qui équipent nos maisons, nos voitures, nos usines ou nos bureaux.

Ces relations ont été mises en évidence en 1787, cinquante ans avant l'invention de la machine frigorifique, par Jacques Charles, qui est connu de tous les étudiants, pour la formule qui porte son nom $P_1V_1 = P_2V_2$. Mais circonscrire le parcours scientifique et technique et la vie de Jacques Charles à cette brève formule, quelle qu'en soit la puissance, serait bien réducteur.

Jacques Alexandre César Charles est né le 12 novembre 1746, 15 rue Porte-Vendômoise à Beaugency. On peut encore y voir sa maison natale. Son père est conseiller du roi et procureur dans cette ville. Il se distingua d'abord dans ses études littéraires à Beaugency et Meung-sur-Loire, puis dans tous les arts de la musique à la peinture, montrant un goût certain et des facilités dans chacun de ces domaines. Après ses études, il commence à travailler pour l'administration des haras qui se trouve rattachée en 1764 au ministère des Finances. Il y acquiert une charge modeste au sein des services financiers et des tâches



Jacques Charles, par Julien Léopold Boilly, lithographie (1820).

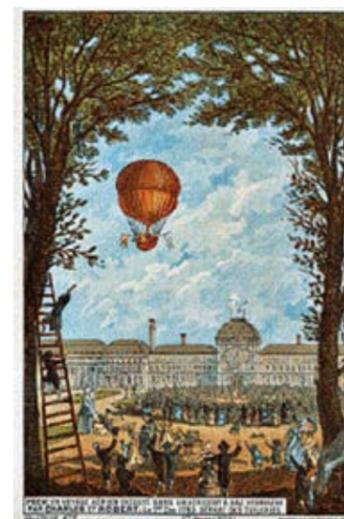
administratives. Parallèlement, il s'intéresse à la science et à l'instar d'Emilie le Tonnelier de Breteuil, marquise du Châtelet (1706-1749), Louise Tardieu d'Esclavelles, dame de Lalive, mieux connue sous le nom de Madame d'Épinay (1726-1783), qui recevaient dans leurs cabinets de lecture savants et érudits, il commence à se constituer un cabinet de physique qui attire de nombreux spectateurs. C'est au plan économique du contrôleur général des finances que nous devons le passage définitif de Jacques Charles dans la carrière des sciences, car son emploi fut supprimé et il quitta ses activités

administratives pour les sciences dans lesquelles il brilla. Lorsque se souvenant de lui, l'administration lui proposa, à nouveau, un poste dans la trésorerie, il était trop tard, les sciences avaient pris Charles, elles ne le rendraient plus ! Le pécule issu de son départ de l'administration lui permit de financer les premiers équipements de son célèbre cabinet de physique. Pendant plus de trente ans, ses séances d'expériences publiques connurent un grand succès et accueillirent les plus grandes célébrités du temps et les scientifiques les plus brillants tels que Benjamin Franklin ou Alessandro Volta. Les séances de Jacques Charles auraient fait dire à Franklin : « La nature ne lui refuse rien, il semble qu'elle lui obéisse »

S'envoler

Le 5 juin 1783, à Annonay, devant les états du Vivarais, les frères Montgolfier réalisent, avec leur ballon à air chaud, l'un des plus vieux rêves de l'homme : s'envoler ! La nouvelle se répand comme une trainée de poudre dans la capitale et Charles est frappé par ces résultats. Il entreprend aussitôt de faire aussi bien autrement.

Jacques Charles s'était déjà intéressé à la chimie et plus particulièrement aux gaz, étudiant leur densité et leurs propriétés. Il s'intéresse particulièrement à l'hydrogène déjà étudié par Cavendish dont il confirme les résultats. C'est avec cet hydrogène qu'il se lance dans la course



Premier voyage aérien exécuté dans un aérostat à gaz hydrogène par Charles et Robert, le 1^{er} décembre 1783, départ des Tuileries.

effectue, à vide, un vol de 16 km. Le 1^{er} décembre 1783, Jacques Charles effectue son premier vol « habité » avec Nicolas Robert. Parti à nouveau des Tuileries, devant une foule immense, il se pose près de Nesles puis repart seul. Il atteint une altitude d'environ 3 300 mètres avant de redescendre. A cette altitude, le thermomètre de bord descend de près de 10 °C sous zéro, mais c'est encore du froid naturel. Ce fut son premier et dernier vol, mais aussi le premier vol habité d'un ballon à gaz, ouvrant la porte à une industrie qui allait se développer jusqu'à la construction de grands dirigeables et connut son âge de gloire dans les années trente. Louis XVI qui avait d'abord donné l'ordre d'interdire cette expérience gratifia Charles d'une « pension assez considérable » nous rapporte Joseph Fourier dans son éloge.

Au monde du froid

Ce n'est pas que par son ascension dans les couches froides de l'atmosphère que Charles a apporté une contribution au monde du froid. Ses travaux sur les gaz ont apporté une contribution majeure à la thermodynamique et par la même au froid artificiel avec, bien entendu, la découverte en 1787 de la loi des gaz parfaits qu'il ne communiqua pas publiquement. Ce fut Gay Lussac qui la publia en 1802, sans pour autant s'en attribuer la paternité, ayant lui-même laissé son nom à la relation entre pression et température à volume constant, loi indissociable de celle de Charles : $PV = n.R.T$. Mais Jacques Charles a aussi apporté une importante contribution à la métrologie et particulièrement à la métrologie utilisée en réfrigération. Dans le cabinet de physique que Louis XVI lui a permis d'installer au Louvre, il perfectionne et développe

des instruments de mesure parmi lesquels l'altimètre qui lui permit de mesurer les altitudes atteintes par son ballon, mais aussi le thermomètre avec en particulier en avril 1786, un essai sur la comparabilité des thermomètres et des moyens de s'en servir comme aéromètres.

Au-delà de ses travaux en lien avec le froid, comme nombre des scientifiques de son temps, Jacques Charles contribua à l'avancée de nombreuses sciences et techniques. Il fut le premier à capturer une image sur du papier imprégné de chlorure d'argent, mais ne sut la fixer. Il avait inventé Instagram avant la photographie qu'il laissait à Nicéphore Niepce le soin de mettre au point ! Il travailla également en optique au développement d'un mégascope achromatique pour reproduire en les agrandissant des objets. Le 29 brumaire an IV, le Directoire le nomme à l'Académie des sciences. Il sera également professeur au Conservatoire national des arts et métiers et bibliothécaire de l'Institut royal. Napoléon I^{er} le fit chevalier de la Légion d'honneur. Indirectement, même s'il laissa peu d'écrits et de publications, Jacques Charles apporta une contribution à la littérature française à travers son épouse, Julie Bouchaud des Hérettes (1784-1817), qu'il avait épousée en 1803 à l'âge de 22 ans alors qu'il en avait lui-même déjà 58, et dont Alphonse de Lamartine s'éprit en 1816, un an avant qu'elle ne meure. Le poète en fit son Elvire dans les célèbres vers du *Lac*, dans les Méditations.

Jacques Charles est mort à Paris le 7 avril 1823 à 77 ans de la maladie de la pierre dont la science ne l'avait su guérir. Il repose au cimetière du Père Lachaise. Son éloge funèbre fut prononcé pendant la séance publique de l'Académie des sciences du 16 juin 1828 par le Baron Joseph Fourier.

Le cabinet de physique de Jacques Alexandre Charles acquis par Napoléon I^{er} compte, depuis 1807, parmi les pièces les plus remarquables du musée des Arts et métiers. La maison en tôle (inv. : 01690-0001-) pour montrer les effets de la foudre, l'un des éléments de ce cabinet de Charles, a été prêtée par le musée en 2006 pour l'exposition sur Benjamin Franklin, l'ami de Charles, à l'occasion du tricentenaire de sa naissance ■

LES INVENTIONS DE JACQUES CHARLES

Toutes les inventions de Jacques Charles sont conservées au musée des Arts et métiers.

Il s'agit :

- d'une balance hydrostatique construite en 1789 (balance dont les plateaux sont suffisamment élevés pour qu'on puisse suspendre des corps sous ceux-ci). Cet instrument applique un principe de Pascal (remontant à 1653) et suivant lequel une variation de pression se transmet intégralement dans toutes les directions dans un fluide en équilibre ;
- de six aéromètres, dont trois construits en 1789 ;
- d'un thermomètre métallique bi lames ;
- d'un sonomètre horizontal ;
- d'un sonomètre vertical, (appareils à cordes vibrantes, utilisés pour étudier et comparer les sons) ;
- d'un mégascope achromatique.

Bibliographie

- [1] *Un enfant illustre de Beaugency : le physicien et aéronaute Jacques Charles (1746-1823)*, Orléans, Académie d'Orléans, 2003, 37p.
- [2] Joseph Fourier, *Éloge historique de M. Charles*, lu dans la séance publique de l'Académie royale des sciences le 16 juillet 1828, dans Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France, Gauthier-Villars, Paris, 1829, tome 8, p. LXXIII-LXXXVIII.

Les Vœux du froid, une première réussie



De gauche à droite : Serge Brésin, Hervé Quibriac, Gérard Cavalier, Didier Coulomb, Jean-Luc Carré, Gérard Charney.

A l'initiative de Serge Brésin, vice-président de l'AFF, cinq organisations de la filière du froid étaient au rendez-vous pour présenter la première édition des Vœux du froid, le 24 janvier dernier. Une centaine de personnes étaient à l'écoute des intervenants.

Gérald Cavalier, président de l'Association française du froid (AFF), Jean-Luc Carré, président du Syndicat national des entreprises du froid, des équipements de cuisines professionnelles et du conditionnement d'air (Snefcca), Gérard Charney, secrétaire général de l'Association française pour les pompes à chaleur (Afpac), Hervé Quibriac, président de la Compagnie nationale des experts du froid, frigorifique, isolation, climatique (Cnefic) et Didier Coulomb, directeur général de l'Institut international du froid (IIF) ont, tour à tour, évoqué les grands défis du froid à relever en France et dans le monde. Les orateurs ont également présenté les actions à réaliser pour la nouvelle année et au-delà, principalement autour du développement durable et de la difficulté de recruter des professionnels du froid. Ce fut une première réussie qui ne demande qu'à se renouveler ■

La conférence ICCC 2020 approche

L'édition 2020 de la Conférence internationale sur la chaîne du froid et le développement durable de l'IIF aura lieu du 15 au 17 avril 2020 à la Cité des congrès de Nantes. L'AFF et Oniris-Gepea organisent l'événement.

La conférence ICCC, série de conférences internationales sur la chaîne du froid et le développement durable, est reconnue comme un événement majeur sur la chaîne du froid et répond à la demande toujours croissante de partage des connaissances dans ce secteur essentiel. Chaque édition, à Cambridge (Royaume-Uni) en 2010 et en 2014 à Paris (France) en 2013, à Auckland (Nouvelle-Zélande) en 2016 et à Pékin (Chine) en 2018, a connu un succès retentissant avec plus de 180 participants.

Cette prestigieuse conférence biennale attire un public international de chercheurs et industriels, offrant une opportunité de présenter les développements de pointe en matière de durabilité, de réfrigération, de climatisation et de chaîne du froid... L'AFF et Oniris-Gepea, en tant qu'organisateur de l'ICCC 2020, recherchent des sponsors pour financer cette conférence. Trois niveaux de sponsoring vous sont proposés ci-contre ■

Contact : iccc2020@sciencesconf.org

Des opportunités supplémentaires de parrainage figurent sur le site Internet dédié : <https://iccc2020.sciencesconf.org>

Package sponsor ICCC 2020	Platinum	Gold	Silver
Prix HT	8 000 €	5 000 €	2 000 €
Pass pour délégués (dîner gala compris)	3	2	1
Logo sur toutes les communications de la conférence	x	x	x
Logo sur tous les documents de la conférence	x	x	x
Logo sur le site Internet + lien vers le site du sponsor	x	x	x
Présentation de la société sur le site	x	x	
Opportunité de réaliser une insertion publicitaire dans la Revue générale du froid	-40 %	-25 %	-10 %
Brochure commerciale dans sacoche (A4)	x	x	
Annonce pleine page dans le programme	x		
Annonce d'une demi-page dans le programme		x	
Totem du sponsor dans la salle de conférence plénière	x		
Stand	x		

15 % de réduction avant le 30 avril 2019

Une nouvelle PAC récupère les eaux grises

La solution PAC Facteur 7, en récupérant l'énergie fatale produite par les eaux grises des douches, lavabos et autres, avoisinant les 31 °C, permet de réaliser 80 % d'économies d'énergie.

La pompe à chaleur (PAC) Facteur 7, offre plusieurs avantages d'autant plus importants que les besoins en eau sanitaire (ECS) sont intenses (> 5 000 litres par jour). La solution permet l'extraction des calories contenues dans les eaux grises filtrées. Le coût de l'ECS produite est maîtrisé. Les bâtiments qui ont choisi de s'en équiper tendent vers une autonomie énergétique.



Lined Combined associe l'esthétisme à la performance

Pour répondre aux besoins de ses clients professionnels qu'ils soient architectes, ingénieurs bureaux d'études ou installateurs, Aldes, expert de la qualité de l'air intérieur, lance la gamme Lined Combined.



Alliant à la fois design et meilleure performance du marché, les nouveaux diffuseurs d'air premium d'Aldes permettent un soufflage et une reprise d'air combinés.

La gamme Lined Combined offre un plus grand confort pour les occupants, une intégration esthétique et discrète, une installation et des réglages simplifiés. Elle vient compléter l'offre de diffuseurs d'air Aldes avec son positionnement haut de gamme.

Grâce au logiciel Selector Kaoanda 3D, outil de gestion de projet Aldes pour la diffusion d'air dans un bâtiment tertiaire, il est possible de visualiser les flux et ainsi de connaître le meilleur positionnement des diffuseurs d'air dans une pièce.

Un support indispensable aux installateurs

Le Snefcca et Qualicuisines ont coréalisé le *Guide de l'installation en cuisines pros – réglementations*. L'ouvrage a été présenté en avant-première au Sirha 2019 à Lyon à la fin janvier.

Toujours soucieux de partager leur expertise avec les installateurs en froid et en cuisines professionnelles, les auteurs ont rédigé ce nouvel ouvrage dans le but de guider le lecteur en amont, pendant et en aval d'un chantier. Leur objectif est également de faciliter l'application des textes réglementaires de la profession et de garantir l'échange d'informations adéquates entre installateur, professionnel et client.

Ce guide est disponible en format papier pour les adhérents du Snefcca et Qualicuisines et en numérique sur le site des deux organismes.





6th IIR International Conference
on Sustainability and the Cold Chain



ICCC 2020



NANTES – FRANCE
Cité des Congrès

April 15–17, 2020

An IIR conference organized by :



<https://iccc2020.sciencesconf.org>

NOS
CONTRIBUTEURS

Ils ont prêté leur plume scientifique et technique

Amokrane Boufares

GPAN, Irstea, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030 92761 Antony Cedex et UCP, ENSTA Paris-Tech, Université Paris Saclay, Palaiseau, France.



Mahmoud Bourouis

Il est professeur au département de Génie mécanique de l'Université Rovira i Virgili de Tarragone en Espagne. Il enseigne notamment les transferts de chaleur et matière, les techniques du froid et machines thermiques. Ces principaux axes de recherche sont l'étude théorique et expérimentale des pompes à chaleur à absorption et de ses composants, les techniques d'intensification des transferts de chaleur et matière dans ces composants et la miniaturisation de ces systèmes. Il a supervisé une dizaine de thèses de doctorat et est le co-auteur de plus de 60 publications dans des journaux indexés et plus de 100 communications à des conférences internationales. Il a participé à plusieurs projets nationaux et internationaux.



Gérald Cavalier

Polytechnicien, Gérald Cavalier est diplômé de l'Engref. Président de la section transport entreposage de l'International Institute of Refrigeration depuis 2006, il est également président du groupe Cemafroid-Tecnea. Depuis 2013, il succède à Patrick Antoine à la tête de l'AFF en tant que président.



Pascal Clain

Docteur en génie des procédés énergétiques, Pascal Clain est enseignant-chercheur au pôle Léonard de Vinci. Il étudie les propriétés thermophysiques des matériaux à changement de phase et plus particulièrement, celles des hydrates de gaz simples et mixtes. Un des axes importants de sa recherche est la mise en place de procédés et de systèmes innovants (stockage d'énergie thermique, climatisation, séparation de gaz).



Alberto Coronas

Alberto Coronas est actuellement professeur de Génie thermique dans le département de Génie mécanique à l'Université Rovira i Virgili, Tarragone (Espagne) et responsable du Groupe de recherche sur les applications du génie thermique (CREVER).



Ses activités de recherche couvrent le domaine de la technologie de l'absorption appliquée à la réfrigération industrielle et les pompes à chaleur, le transfert de chaleur et les propriétés thermodynamiques de nouveaux mélanges de travail, ainsi que les technologies de polygénération. Il a dirigé environ 40 thèses de doctorat et publié plus de 200 articles scientifiques avec comité de lecture. Le professeur Coronas est aussi président de la Commission de pompes à chaleur, récupération d'énergie de l'Institut international du froid (IIF) et membre du Comité Eurotherm.

Paúl Dávila

Paúl Sebastián Dávila Aldás est diplômé en Génie mécanique industrielle, spécialité conception mécanique, production et automatisation industrielle. Il a exercé en tant qu'analyste technique à l'Institut national de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (INER) de l'Équateur. Il a aussi enseigné à l'École nationale polytechnique de Quito en Équateur. Il prépare actuellement son doctorat en « Génie thermodynamique de fluides » à l'Université Rovira i Virgili de Tarragone en Espagne. Ses recherches sont centrées sur l'étude théorique et expérimentale des pompes à chaleur à compression/résorption avec CO₂/acétone pour la revalorisation des rejets thermiques industriels.



Anthony Delahaye

Actuellement directeur de l'unité de recherche génie des procédés frigorifiques d'Irstea, il mène ses recherches sur les systèmes frigorifiques à faibles impacts environnementaux, et entre autres, sur la valorisation des matériaux à changement de phase (coulis, hydrates...) et de différents systèmes de stockage et de transport de froid.



Michel Feidt

Michel Feidt est professeur émérite à l'Université de Lorraine depuis septembre 2013. Ses enseignements portaient sur la thermodynamique et l'énergétique. Thèmes centraux des formations délivrées et qui ont donné lieu à publication d'ouvrages pédagogiques reconnus (plusieurs éditions successives). Ses recherches, effectuées au Lemta (Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée) pour la plus grande partie, ont porté sur les machines à cycles inverses (machines à froid ; pompes à chaleur), puis récemment sur les moteurs thermomécaniques et autres, et enfin sur la valorisation des chaleurs fatales. Il est tout particulièrement investi dans le secrétariat de la commission E2 de l'IIF-IIR, ainsi que dans divers comités éditoriaux scientifiques dont les *Techniques de l'ingénieur* (en langue française).



Laurence Fournaison

Directrice de recherche en énergétique, Laurence Fournaison s'intéresse à l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques à faible impact énergétique. Plus particulièrement, ses travaux de recherche portent sur les systèmes de réfrigération secondaire et la caractérisation des fluides frigopourteurs diphasiques tels que les coulis de glace et d'hydrates.



Philippe Haberschill

Maître de conférences à l'Insa de Lyon depuis 1976, Philippe Haberschill est, également, membre du Cethyl. Sa spécialité est l'étude expérimentale et la modélisation dans le domaine de la réfrigération. Il enseigne également les mesures physiques, la thermodynamique et le froid industriel.





Minh Hoang

Elle est chargée de recherche en énergétique à l'unité génie des procédés frigorifiques à Irstea. Ses activités visent à développer des systèmes frigorifiques performants et respectueux de l'environnement, en particulier à travers la réduction de l'impact de ces systèmes sur le réchauffement climatique.



Abbes Kacimi

Abbes Kacimi est diplômé de l'université de Constantine et de l'École centrale de Paris. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur d'État en froid et génie climatique en 1988 et a présenté une thèse en management et direction de projets en 2011. Après treize ans d'ingénierie et d'enseignement, il a rejoint la société Sofrigam, en 2002, où il est actuellement directeur expertise de la chaîne du froid. Expert à l'Institut international du froid (IIF) et membre de diverses commissions, il est coauteur du guide : Chaîne du froid pour les produits de santé et a publié une trentaine d'articles sur les problématiques et les concepts de la chaîne du froid. Il est membre du comité de rédaction de la RGF.



Véronique Osswald

Véronique Osswald est ingénieure en génie des procédés, spécialisée dans les techniques expérimentales liées au froid. Elle s'intéresse tout particulièrement à l'amélioration des procédés de formation/dissociation des coulis et à la caractérisation de leurs propriétés thermophysiques et cinétiques.



Laetitia Perche

Diplômée d'un DESS marketing à la Sorbonne, Laetitia intègre dans un premier temps une agence de design spécialisée dans le brand management et le packaging pour des comptes d'implantation mondiale tel que Danone et Masterfood. Elle intégrera trois ans plus tard,



le groupe Thomson Multimedia où elle sera l'interface entre les équipes de création et les fournisseurs basés le plus souvent en Chine. C'est en 2008 qu'elle rejoint l'équipe Sofrigam. Aujourd'hui directrice marketing, son rôle est de participer à la définition de la stratégie de l'entreprise et d'assurer la cohérence des plans d'action mondiaux, pour les lancements de produits, les opérations de vente et la communication.

Guillaume Saint-Lorant

Il est pharmacien hospitalier, PharmD, PhD, responsable du Système de management de la qualité de la prise en charge médicamenteuse. Secteur assurance qualité. CHU de Caen 14033.



David Stienne

Après plusieurs années passées au sein de la branche climatisation d'un équipementier automobile, David Stienne est à l'origine de la création du laboratoire Atermetrologie qu'il dirige depuis 2011. Localisé près d'Arras, ce laboratoire est spécialisé dans les études thermiques applicables à différents secteurs d'activité. Agréé par le ministère de l'Enseignement supérieur de La Recherche et de l'Innovation, ses prestations liées à des projet R/D sont éligibles au crédit d'impôt (CIR).



Ont également contribué à ce numéro :

- **Thomas Ricci**, Elodie Delavoipière ; Pharmacie centrale, CHU 14000 Caen, France.
- **Houda Hasnaoui, Juliette Leroux, Mathilde Lechevrel** : UFR Santé, faculté des sciences pharmaceutiques 14000 Caen, France.
- **Elise Provost, Didier Dalmazzone** : UCP, ENSTA ParisTech, Université Paris Saclay, Palaiseau, France.
- **Juan Prieto, Daniel Salavera** : Université Rovira i Virgili, Département de Génie mécanique, Crever, 26 Av. Països Catalans, 43007 Tarragona, Espagne.



Association Française du Froid

Pour l'évolution et l'extension de l'Association, rejoignez la communauté du froid en devenant membre de l'AFF.

Contactez-nous : 01 45 44 52 52
ou secretariat-a.f.f@wanadoo.fr
aff-froid.com

L'AFF,

une association plus que centenaire

L'Association française du froid (AFF), c'est :

- la voix de la filière du froid auprès des pouvoirs publics ;
- la défense de ses usages ;
- des échanges techniques et scientifiques ;
- de la prospective ;
- la contribution aux progrès de la science et de la technique.

Mieux faire connaître le froid sous toutes ses facettes avec :

- des publications de guides techniques et pratiques ;
- la *Revue générale du froid (RGF)*, organe officiel bimestriel ;
- des journées techniques ;
- des conférences ;
- des expositions ;
- une plate-forme collaborative dédiée (aff-froid.com)



BULLETIN D'ABONNEMENT

A retourner à : AFF, 4 place Saint Germain des Prés, 75006 Paris
Tél. : 33 (0)1 45 44 52 52, Fax : 33 (0)1 42 22 00 42, E-mail : abonnementrgf@orange.fr

OUI, je m'abonne à la Revue générale du froid & du conditionnement d'air 1 AN / 6 NUMÉROS

France 125 € TTC 95 € TTC* **Etranger** 160 € TTC 125 € TTC*
*pour les adhérents AFF

• **Prix au n°** : 19 € TTC en France, 25 € TTC à l'étranger

Règlement

Par virement au Crédit Agricole IdF : IBAN FR76 1820 6002 0315 0915 0600 183
Par chèque à l'ordre de l'Association française du froid (AFF)

Société :
Nom : Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville : Pays :
Tél : E-mail :

*pour rester informé(e)



SOFRIGAM^o

Conception sur mesure

Laboratoire de tests thermiques

Stockage des emballages

Formation

Livraison express

Portail de Commande

LA MAÎTRISE DE LA CHAÎNE DU FROID



Depuis près de 40 ans, Sofrigam facilite et sécurise le transport de produits pharmaceutiques sous chaîne du froid. Sofrigam s'appuie sur son expertise technique pour développer des solutions réfrigérantes innovantes et optimiser la gestion des coûts logistiques en :

- Maximisant le volume de produits expédiés,
- Minimisant le poids des emballages pour réduire les coûts de transport,
- Minimisant le temps de chargement.

Sofrigam garantit ainsi maintien de la température et maîtrise des coûts, quelles que soient les conditions de transport.

 @SofrigamFrance
 Sofrigam

SOFRIGAM
1 rue de l'Union-CS20137
92508 Rueil-Malmaison Cedex
France
Tél. : +33 (0) 1 46 69 85 00
Sofrigam.fr