

Optimisation de la gestion de la production frigorifique de la centrale énergie du NHM-HFME

Philippe Bianchi-Mirasole

▶ **To cite this version:**

Philippe Bianchi-Mirasole. Optimisation de la gestion de la production frigorifique de la centrale énergie du NHM-HFME. Génie des procédés. 2012. hal-01871237

HAL Id: hal-01871237
https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01871237

Submitted on 10 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

DALKIA France
Agence de Metz
4, Avenue Sébastopol
57 073 METZ BP 45 085

Mémoire :

« Optimisation de la gestion de la production frigorifique de la Centrale Énergie du NHM-HFME ».



Tuteur DALKIA : Nicolas HOUOT

Philippe BIANCHI-MIRASOLE
Master 2 MEPP
Promotion 2011-2012

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêts qu'elles m'ont fait vivre durant ces 6 mois de stage au sein de l'entreprise DALKIA :

Tout d'abord, mon tuteur Mr HOUOT, Chef d'unité d'exploitation. Il a su me faire confiance dans cette mission et m'a permis de développer mon autonomie et mon esprit d'analyse.

Mrs ESTOREZ, PARUTEAU, SANCHEZ, RENALDO et Mr HASSER, Ingénieurs Travaux, pour le temps qu'ils m'ont consacré à me faire partager leurs connaissances du site et leurs savoir-faire.

Mr CORDI, Responsable de la centrale énergie du Nouvel Hôpital de Metz, et l'ensemble de son équipe, pour l'aspect technique qu'ils m'ont fait partager et surtout pour m'avoir communiqué leurs attentes en termes d'exploitation du site.

Mrs FORT et MOULIN, ingénieur exploitation, pour leur rigueur, leurs connaissances techniques et leurs savoir-faire qu'ils m'ont transmis.

Mr CAREMEILLE, stagiaire Licence Professionnelle, avec qui j'ai pu travailler en collaboration sur l'aspect Hygiène Sécurité Environnement, mais surtout au niveau du travail d'équipe pour la connaissance et compréhension du site : étiquetage et recensement du matériel.

Et enfin, l'ensemble de l'équipe DALKIA : des techniciens, secrétaires et ingénieurs qui ont contribué, de près ou de loin, par leur bonne humeur ou leur conseils, à la réalisation de mon stage.

Résumé

Pour permettre le confort thermique et le refroidissement du matériel médical, le contrat de partenariat avec le Centre Hospitalier Régional (CHR) engage DALKIA à fournir de l'eau glacée à un régime de 6/12°C sortie bouteille gaz pression, pour une charge appelée variable.

Pour élaborer un process permettant de satisfaire ce cahier des charges, DALKIA a fait appel à la société Américaine spécialisée dans le Froid : TRANE.

Malgré la réputation mondialement reconnue de ce « Géant du froid », le travail qui m'a été confié fut, tout d'abord de comprendre et d'analyser le process en vue d'aider à sa prise en main. Puis dans un second temps, de porter un œil critique sur la gestion de la production frigorifique, en vue d'optimiser son exploitation. Et enfin, de chercher à développer des plans de conduite.

ABSTRACT

Allow for thermal comfort and cooling medical equipment, the partnership agreement with the " Centre Hospitalier Régional " (CHR) DALKIA committed to provide chilled water at 6/12 ° C output pressure gas bottle, for a load called variable. To develop a process to meet these specifications, DALKIA turned to American company specialized in the Cold: TRANE.

Despite the reputation of the world-renowned "Giant's cold," the work that was given to me was, first of all to understand and analyze the process in order to help his grip. Then in a second time, bring a critical eye on the management of refrigeration, in order to optimize its operation. And finally, try to develop plans of action.

Glossaire

Bouteille de gaz pression : bouteille de mélange, permettant de gérer les débit entre deux réseau communiquant (secondaire et tertiaire)

Déstockage : Récupération de l'énergie frigorifique stockée dans les bacs.

DRY : Aéroréfrigérant

Freecooling : Production de froid par des aéroréfrigérants qui captent les frigories de l'air extérieur.

Production direct : Production frigorifique d'eau glacée à 5°C en sortie du circuit évaporateur d'un groupe.

Production indirect : Production frigorifique d'un groupe froid pour fournir de l'eau glycolée à 3°C afin de générer de l'eau glacée à 5°C en passant par un échangeur.

Réseau condenseur : circuit glycolée permettant de refroidir le condenseur des groupes froid à l'aide d'aéroréfrigérants

Réseau freecooling : circuit permettant de récupérer les frigories de l'air extérieur à l'aide de 3 aéroréfrigérants et d'un échangeur à plaques.

Réseau primaire : circuit permettant de transmettre les frigories de l'évaporateur des groupes froid indirect aux bacs à glace ou aux échangeurs. Ce circuit permet aussi le déstockage de glace pour transmettre l'énergie aux échangeurs.

Réseau secondaire : Circuit permettant de récupérer l'ensemble du froid produit pour fournir aux réseaux tertiaires (Hôpital et Maternité)

Réseau tertiaire : Circuits permettant d'alimenter les besoins frigorifiques de l'Hôpital et de la maternité

Stockage : Stockage d'énergie frigorifique à l'aide de la production de glace dans 66 bacs remplie d'eau.

Thermostat antigel : Instrument de protection de l'échangeur

Variateur de vitesse : Modulateur de fréquence permettant de piloter le débit des pompes.

Lexique Abréviations

AC : Air Comprimé

CE : Centrale Énergie

CHR : Centre Hospitalier Régional

COP : Coefficient de Performance

EG : Eau Glacée

EER : Efficiency Energy Ratio

ECH : Échangeur

FT : Flow Transmitter : Compteur ou débitmètre dépend du réseau concerné

GF : Groupe Froid

GTC : Gestion Technique Centralisée

HFME : Hôpital Femme Mère Enfant

HT : Sonde d'Hygrométrie

NHM : Nouvel Hôpital de Metz

PI : Manomètre

PID : Pipping Instrumentation Directives

PSB : Pressostat Seuil Bas

PSLL : Pressostat niveau très bas

PO : Pompe

PT : Sonde de pression

QT : Quantity Transmitter : Compteur ou débitmètre dépend du réseau concerné

SST : Sous Station

TI : Thermomètre

TSB : Thermostat antigel

TT : Sonde de Température

VV : Variateur de Vitesse

VANA : Vanne Analogique

VTOR : Vanne Tout Ou Rien

Lexique Notations

α_F: $Coefficient\ permettant\ de\ déterminer\ la\ puissance\ froid\ en\ fonction$

$du\ débit\ pour\ un\ régime\ de\ température;\ \ \alpha = \rho\ \ Cp\ \Delta T$

β: $Coefficient\ permettant\ de\ déterminer\ la\ puissance\ absorbée\ en\ fonction\ du\ débit$

qv_F: $débit\ volumique$

f_{pompe}: $fréquence\ de\ la\ pompe$

ε : $efficacité\ de\ l'échangeur$

EER: $Coefficient\ de\ performance\ du\ groupe\ froid$

$\dot{Q}_{\max DRY\ 32°C}$: $Chaleur\ maximale\ évacuable$ à $32°C$ $\ extérieur$

$\dot{Q}_f^{Déstockage}$: $Puissance\ frigorifique\ du\ déstockage$

$\dot{Q}_f^{Stockage}$: $Puissance\ frigorifique\ du\ stockage$

$\dot{Q}_f^{Direct}$: $Puissance\ frigorifique\ production\ direct$

$\dot{Q}_f^{Indirect}$: $Puissance\ frigorifique\ production\ indirect$

$\dot{Q}_f^{Secondaire}$: $Puissance\ frigorifique\ sortie\ centrale$

$\dot{W}_e^{Déstockage}$: $Puissance\ électrique\ de\ la\ production\ par\ déstockage$

$\dot{W}_e^{Stockage}$: $Puissance\ électrique\ de\ la\ production\ par\ \ stockage$

$\dot{W}_e^{Direct}$: $Puissance\ électrique\ de\ la\ production\ par\ GF\ froid\ direct$

$\dot{W}_e^{Indirect}$: $Puissance\ électrique\ de\ la\ production\ par\ Groupe\ froid\ indirect$

$\dot{W}_e^{Secondaire}$: $Puissance\ électrique\ consommée\ par\ l'intégralité\ du\ process\ froid$

W_E^{DRY}: Puissance absorbée par un DRY

Introduction

Dans un souci de respect des délais et de budget, la société DALKIA a fait appel à mes services, dans les limites de mes compétences techniques, pour contribuer à l'aide à la mise en exploitation de la Centrale énergie, du Nouvel Hôpital de Metz (NHM) et de l'Hôpital Femme Mère Enfant (HFME).

Mise à part l'ensemble des tâches diverses et variées qui m'ont été confié, l'essentiel de ma mission, consista à l'analyse de la production frigorifique de la centrale énergie.

Ainsi, j'ai pu structurer mon étude en commençant par la phase appréhension du process frigorifique (composition, particularités, etc.).

Puis, j'ai ainsi pu me concentrer sur l'étude des différents producteurs, pour en découler sur l'analyse de la gestion de la production.

En fin, dans une optique d'amélioration continue, j'ai proposé un ensemble de points de suivi, à l'analyse du retour d'expérience en vue d'optimiser la gestion de la production part l'estimation de charge appelée.

Sommaire

I. PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ 1

A. Groupe DALKIA 1

B. DALKIA France 2

C. DALKIA Est 2

D. Centrale énergie Nouvel Hôpital de Metz (NHM) 5
1. Présentation NHM et HFME 5
2. Présentation de la Centrale énergie 5

II. PRÉSENTATION DE LA PRODUCTION FRIGORIFIQUE 7

A. Contrat de production frigorifique avec le Centre Hospitalier Régional 7
1. Régime de températures 7
2. Estimation de la puissance frigorifique globale appelée 7

B. Caractéristiques du Process Froid 8
1. Producteurs frigorifique 8
2. Présentation des types de production 11

III. ÉTUDE DES PRODUCTEURS FRIGORIFIQUES 13

A. Contrat électrique 13
1. Tarification horaire 13
2. CSPE 14
3. Prime fixe 14
4. Calcul global du coût électrique 15
5. Seuil de rentabilité de l'installation 15

B. Analyse des producteurs 17
1. Identification des consommateurs en fonction du type de production 17
2. Méthode de calcul 18
3. Production direct 24
4. Production indirect 32
5. Stockage/Déstockage 36
6. Production par Freecooling 48

C. Gestion de la production 54
1. Mode de fonctionnement 54
2. Proposition de gestion des modes de fonctionnement 57

IV. RETOUR D'EXPÉRIENCE 62

A. Répartition des points de mesure de consommation frigorifique 62
1. Répartition globale de la consommation 62
2. Décomposition en sous-systèmes 63
3. Intérêts de la décomposition temporelle 64

B. Proposition de résonnement pour l'analyse du retour d'expérience 66

C. Analyse des courbes de production frigorifique actuelles 67

V. CONCLUSION 69

A. Conclusion Technique 69

B. Conclusion personnelle 69

I. Présentation de la société

A. Groupe DALKIA

Filiale de Veolia Environnement à 66 % et d'Électricité de France (EDF) à 34 %, DALKIA est une entreprise internationale spécialisée dans les services énergétiques. Présente dans 42 pays, DALKIA se décompose en quatre zones :

- **Atlantique Nord** (Argentine, Brésil, Canada, Chili, États-Unis, Mexique)
- **Europe du Nord,**
- **Pays d'Europe Centrale**
- **Et Pays d'Europe Orientale** (Algérie, Arabie saoudite, Bahreïn, Émirats arabes unis, Israël, Maroc)

Son chiffre d'affaire s'étend à 8.3 Milliards d'euros.

- Quelques chiffres

Le patrimoine DALKIA s'élève globalement à :

- **819** réseaux urbains et locaux, de chaleur et de froid.
- **118 000** installations énergétiques gérées.
- **7 169 MW** de puissance électrique décentralisée, dont 4 923 par cogénération.
- **4 200** sites industriels.
- **23 350** établissements pour l'éducation, la culture, les loisirs et le sport
- **11 300** établissements d'enseignement et de recherche et 5 542 établissements de santé
- **5 818 000** logements collectifs desservis.

En terme de réduction de gaz à effet de serre et d'économie d'énergie, Dalkia a permis d'économiser en 2009 6 millions de tonnes de CO2 et 147 millions de MWh d'énergie (Source : «Site officiel DALKIA : www.dalkia.com»).

B. DALKIA France

DALKIA France est donc une entité du groupe DALKIA faisant partie de la zone dite « Europe du Nord ». Elle réalise 41 ,5% du chiffre d'affaire de l'entreprise, soit environ 8.3 Milliard d'euros:

Cette filiale s'appuie sur cinq entités régionales autonomes, pour un effectif total de 15 400 employés:

- DALKIA Nord
- DALKIA Atlantique
- DALKIA Ile-de-France
- DALKIA Centre-Méditerranée
- DALKIA Est

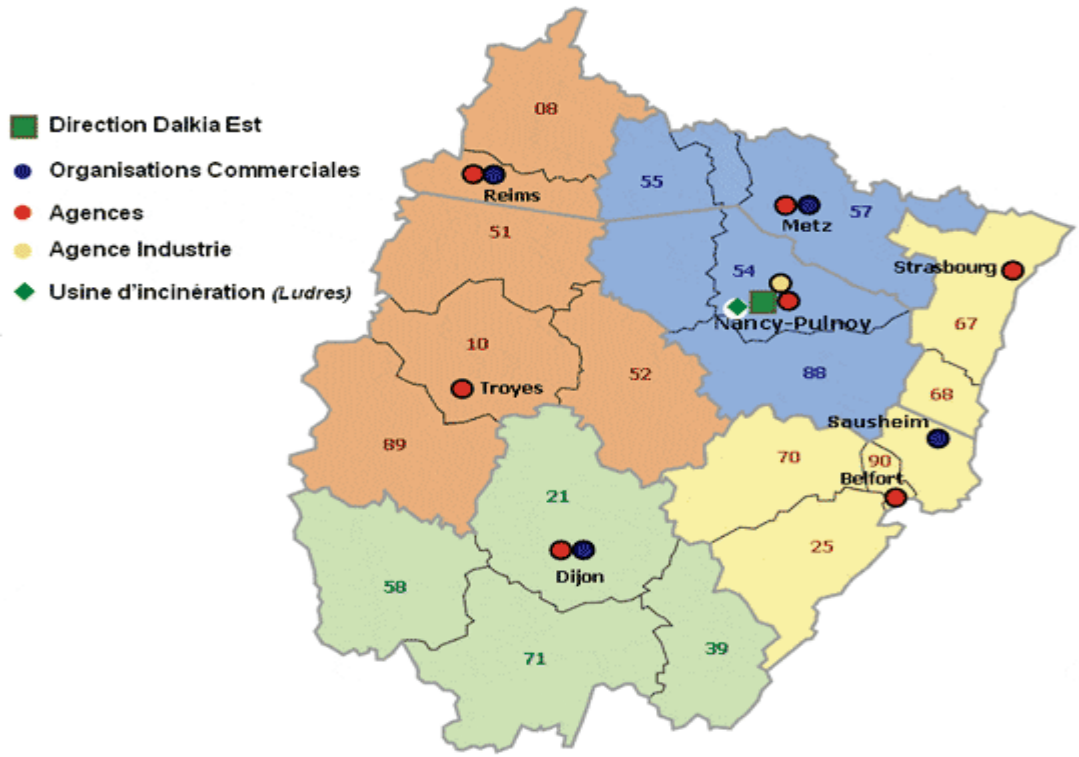
À l'heure actuelle, son principal concurrent direct est Cofely Suez

C. DALKIA Est

DALKIA Est se compose de 5 régions administratives du Grand Nord-Est de la France (soit 18 départements) :

- Alsace,
- Bourgogne,
- Champagne-Ardenne,
- Franche-Comté, Lorraine,

La Direction régionale de Dalkia Est est basée dans la banlieue de Nancy à PULNOY (54). Elle est présidée par **Serge CAVELIUS,** ancien directeur régional de Veolia eau.



L'établissement DALKIA Est s'appuie sur une organisation de proximité autour de 8 agences (dont une agence Industrie) en liaison permanente avec les acteurs commerciaux.

- Agence de Nancy (54)
- Agence de Metz (57)
- Agence de Strasbourg (67)
- Agence de Belfort (90)
- Agences de Troyes (10)
- Agence de Reims (51)
- Agence de Dijon (21)
- Agence Industrie

Chacune d'entre elle est découpée en unités d'exploitation regroupant l'ensemble des équipes opérationnelles.

Chaque agence étant quant à elle composée d'une structure, d'unités d'exploitations (ou sites rattachés pour l'Industrie) regroupant l'ensemble des équipes opérationnelles (Chefs d'exploitation, Responsables de sites, Techniciens...).

➢ Les chiffres clés de Dalkia Est

Présent sur 18 départements, Dalkia Est répond chaque jour aux besoins de ses clients : immeubles d'habitation, collectivités locales, entreprises tertiaires et commerciales, établissements de soin et de santé, entreprises industrielles.

Les **1 362** collaborateurs de Dalkia Est interviennent pour ses **4 000** clients sur plus de **7 000** installations pour un chiffre d'affaires annuel de **479 millions d'euros** en 2011.

Dalkia Est, c'est également...

- 43 réseaux de chaleur et de froid
- 60 chaufferies biomasse
- 420 sites industriels
- 2 600 000 m2 gérés
- 215 établissements de santé
- 339 000 logements collectifs
- Une puissance de production thermique de 5 801 MW
- Une puissance de production frigorifique de 208 MW
- Une puissance de production électrique de 612 MW

Source : site officiel dalkia.com

D. Centrale énergie Nouvel Hôpital de Metz (NHM)

1. Présentation NHM et HFME

Le Centre Hospitalier Régional de METZ-THIONVILLE a passé en juillet 2006 un marché de conception réalisation avec la société pour la construction du Nouvel Hôpital de Metz avec la société PERTUY (BOUYGUE) et de l'Hôpital Femme Mère Enfant avec DE MATHIEU HEBART.

Le Nouvel Hôpital de Metz dispose d'une capacité de 630 lits et places. Il est implanté est implanté sur le site du Château de Mercy en extrémité du Technopole de Metz. Sa surface d'implantation du NHM est de 11.95 Ha.

La surface utile du NHM est 59 777 m² et la surface dans l'œuvre est de 91 134m².

Au total, six entités sont concernées par le déménagement sur le site du NHM :

- L'Hôpital de Bon secours
- L'Hôpital de Sainte Croix (1/5 des places)
- La DRH (METZ)
- La direction générale du CHR, les magasins, les ateliers, la reprographie
- Le bâtiment Annexe Logistique des Hôpitaux Messins (ALHOM) de Metz
- Les laboratoires du CHR de Metz

2. Présentation de la Centrale énergie

La centrale énergie a été conçue pour assurer la production de chaleur, d'eau glacée et le secours électrique pour les besoins du Nouvel Hôpital de Metz (NHM) et l'Hôpital Femme Mère Enfant (HFME).

DALKIA a su remporter le contrat pour la construction et l'exploitation de la centrale durant 20 ans. Pour satisfaire le contrat de partenariat avec le CHR, excepté les sous station de chauffage urbain de l'UEM, la centrale se constite de :

- 3 échangeurs Chaud d'une puissance unitaire de 5 MW chaud, raccordés au réseau de l'UEM
- 2 chaudières fioul domestique (FOD), d'une puissance unitaire de 7.5 MW chaud, pour le secours et l'appoint à la production de chaleur

- 3 groupes électrogènes de 1.8 MWe/2 MVA unitaire, pour le secours électrique, avec possibilité d'installer un 4ième identique aux précédents
- La production d'eau glacée est composée quant à elle de :
    - 66 bacs à glace d'une capacité réelle totale de 32,5 MWh froid
    - 2 Groupes froid permettant la production directe (eau glacée) d'une puissance unitaire de 1.25 MW froid
    - 3 Groupes froid indirect (réseau glycolée) d'une puissance unitaire de 1.15 MW froid, avec possibilité d'installer un 4^{ième} identique au 3 premiers

La distribution de chaleur et de froid est assurée par des réseaux pré isolées enterrés jusqu'à l'entrée des sous stations NHM et HFME qui se fait par réseaux aériens.

Contractuellement parlant, la distribution de chaleur doit correspondre à un régime d'eau chaude de 90/70°C jusqu'aux réseaux secondaire des échangeurs présent en sous station NHM et HFME, afin de produire en sortie tertiaire de l'eau chaude à un régime de 80/60°C.

La production d'eau glacée doit respecter un régime de 5/11°C sortie centrale pour assurer un régime sortie bouteilles de mélange NHM et HFME de 6/12°C.

II. Présentation de la production frigorifique

A. Contrat de production frigorifique avec le Centre Hospitalier Régional

1. Régime de températures

Le but de la production frigorifique est d'assurer le confort thermique des locaux mais aussi de refroidir les appareils médicaux. Pour ce faire, la centrale énergie doit produire de l'eau glacée, qui sera distribuée dans les sous stations du NHM et du HFME, au travers d'une bouteille de mélange pour l'hôpital et d'un échangeur pour la maternité.

D'un point de vue contractuel, les températures maximales devront correspondre aux régimes suivant:

- 6/12°C : Sortie bouteille de mélange de la sous station NHM
- 8/13°C : Sortie bouteille de mélange de la sous station HFME

Source II.1 : « p14, Cahier des clauses techniques particulières, LOT N°12 : Production frigorifique, Indice C, 14/12/2010, DALKIA France ».

Pour assurer ces contraintes, le régime de températures en sortie centrale (entrée bouteille) devra être de 5/11°C.

2. Estimation de la puissance frigorifique globale appelée

Pour dimensionner l'installation, le CHR à estimer la charge frigorifique maximale du NHM et HFME, en fonction de l'ensemble des consommateurs froid théoriquement installés (voir listing consommateurs : annexe1, page 1).

Il en ressort le **tableau II.A.2.1 :** « Estimation de la puissance frigorifique du NHM et HFME ».

Puissance (kW)	
NHM base	**7838**
HFME base	**1775**
Total	**9613**

Source II.2.1 « Page 21, contrat de partenariat, Centrale d'énergie, programme fonctionnel, 07/03/2010 »,

La conception de l'Hôpital et de la maternité n'étant pas figée, le CHR prévoit une éventuelle extension hypothétique. Cette extension future induira donc une consommation frigorifique supplémentaire.

Il en ressort le **tableau II.A.2.2** : « Estimation de la puissance frigorifique du NHM et HFME avec extension».

Puissance (kW)	
NHM base	7 838
NHM marge d'extension	1 568
HFME base	1 775
HFME marge d'extension	355
Total	11 536

Source II.2.2 « Page 22, contrat de partenariat, Centrale d'énergie, programme fonctionnel, 07/03/2010 »,

B. Caractéristiques du Process Froid

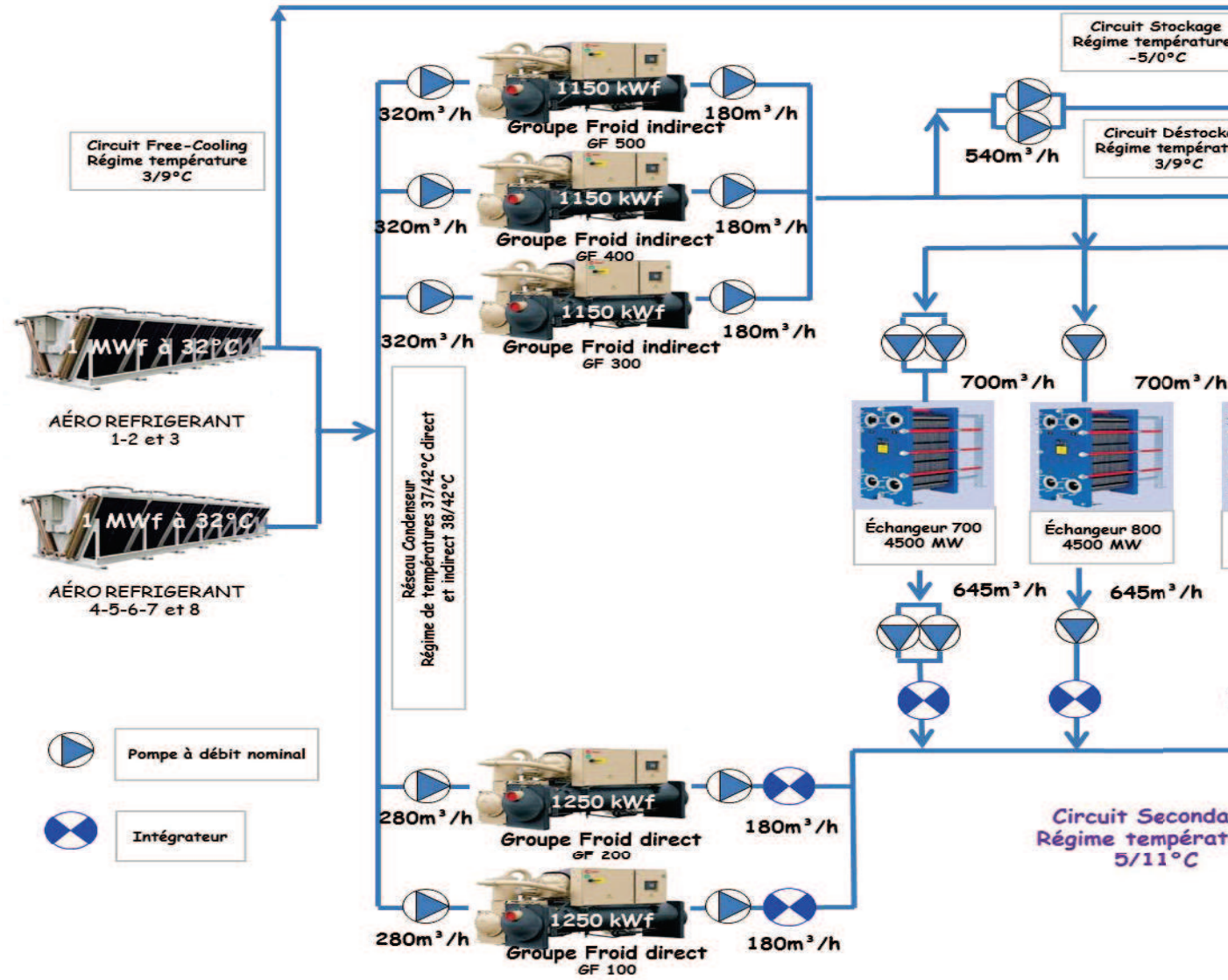
1. Producteurs frigorifique

Pour permettre de garantir l'aspect contractuel, un ensemble de producteurs ont étés dimensionnés sous forme d'un process frigorifique (voir Annexe 2 : PID FROID, page 2). Ce process est composé de :

- ✓ 5 groupes froids de même technologie se différenciant par leur fluide caloporteur sur le circuit évaporateur :
  - 2 Groupes dit : « Producteur Direct », Eau glacée à 5°C
  - 3 Groupes dit : « Producteur Indirect », Eau glycolée à 3°C ou -5°C en mode stockage
- ✓ 66 bacs de stockage de glace, pour une capacité frigorifique de 32.5 MWh
- ✓ 8 Dry-Cooler (aéroréfrigérants secs) avec possibilité de permuter 3 DRY en production Free-Cooling avec une consigne de température eau glycolée allant de 3 à 7°C au départ
- ✓ 3 échangeurs Froid à plaques de type courants croisés, permettant de transférer l'énergie frigorifique de l'eau glycolée à l'eau glacée.

En reprenant les données techniques des pompes-vannes et groupes froids, je peux établir le schéma de principe page suivante :

✓ **Schéma de principe II.B.3:** « Process Frigorifique de la Centrale Énergie du NHM et HFM



D'un point de vue global, en reprenant les caractéristiques techniques transmisses par le fournisseur, on peut en résumer les données du process sous forme d'un tableau récapitulatif :

Tableau II.B.1 : « Caractéristiques Frigorifique des producteurs »,

Caractéristiques frigorifique des producteurs		
GF direct	Puissance unitaire	1 250,00 kWf
	Nombre	2
	Total Puissance	2 500,00 kWf
GF indirect	Puissance unitaire	1 150,00 kWf
	Nombre	3
	Total Puissance	3 450,00 kWf
GF indirect En mode stockage	Puissance unitaire	906 kWf
	Nombre	3
	Total Puissance	2 710 kWf
Production par Déstockage	Puissance nominal	4 500 kWf
Production par Freecooling	3 DRY	Puissance fonction de Text

En prenant une efficacité de 1 des échangeurs, la puissance installée correspond à :

$$\dot{Q}_f^{Secondaire} = Puissance\ froid\ installée = \sum \dot{Q}_f^{Direct} + \sum \dot{Q}_f^{Indirect} + \sum \dot{Q}_f^{Déstockage}$$

$$Puissance\ froid\ installée = 2\,500 + 3\,450 + 4\,500$$

$$Puissance\ froid\ installée = 10\,450\ kWf > \mathbf{9613\ kWfroid\ contractuel}.$$

(Tableau II.A.2.1 : Puissance frigorifique NHM et HFME sans extension)

L'efficacité minimale escompté des échangeurs à plaques doit être de :

$$\frac{\dot{Q}_f^{Contrat} - \sum \dot{Q}_f^{Direct}}{\sum \dot{Q}_f^{Indirect} + \sum \dot{Q}_f^{Déstockage}} = Efficacité\ minimale\ échangeurs$$

L'écart induit de garantir une efficacité des échangeurs de 90%.

2. Présentation des types de production

a) Production direct

La production directe est un type de production permettant de fournir « directement » de l'eau glacée à 5°C.
Cette production est composée de 2 groupes froids dits : « GF direct », d'une puissance unitaire de 1 250 kWf.

Sur chacun de ces groupes sont connectés 2 pompes :

- **Côté évaporateur :** La pompe permet de transmettre l'énergie désirée directement au réseau secondaire
- **Côté condenseur :** Cette deuxième permet de faire circuler le glycol jusqu'au DRY pour refroidir le condenseur du groupe

b) Production indirect

La production indirecte est composée de 3 GF d'une puissance unitaire de 1 150 kWf (sortie réseau évaporateur), avec une possibilité d'ajout d'un 4^{ième} Groupe.

Le principe de la production au niveau des groupes froid indirect est le même la production directe. Néanmoins, le fluide caloporteur à l'évaporateur est du glycol. Ce qui permet la permutation de production en stockage de glace pendant la nuit.

Les groupes froids directs et indirects sont de même technologie. La puissance frigorifique délivrable est pilotée par la nature du fluide et par la pompe associée à l'évaporateur.

La production frigorifique en sortie évaporateur, se faisant grâce à du glycol, il est nécessaire de passer par un échangeur pour avoir en finalité de l'eau glacée à 5°C.

Or, le pincement de l'échangeur étant de 2°C, la température en sortie évaporateur (départ primaire) est alors de 3°C. Donc, le régime de température correspond au 5/11°C côté secondaire doit être de 3/9°C côté primaire.

Le réseau primaire est connecté au secondaire via 3 échangeurs permettant de fournir une puissance de 4.5MW unitaire pour un delta correspondant aux régimes de température des différents réseaux.

Le terme indirect est provient donc du fait que l'on n'utilise pas le même type de fluide pour la distribution frigorifique au NHM et HFME.

c) Freecooling

La production d'eau glacée par freecooling est destinée à refroidir le retour du circuit secondaire d'eau glacée par l'intermédiaire d'un échangeur à plaques raccordé au réseau de 3 aéroréfrigérants « secs ».

Le principe de fonctionnement du freecooling consiste à produire du froid en absorbant les frigories de l'air extérieur dès que les conditions atmosphériques le permettent. Pour cela, on il est possible de sectionner le réseau condenseur 3 aéroréfrigérants pour les basculer en freecooling.

Une fois permutés, ils sont connectés au réseau primaire, via le réseau freecooling relié à l'échangeur 900. On peut en ressortir au niveau du départ secondaire une eau glacée 3 à 5°C pour arriver à être intéressant économiquement (source formelle TRANE). Si la température frigorifique maximale que l'on peut escompter est supérieure au 5°C, le départ du secondaire sera piqué sur le retour général secondaire. Si les 5°C sont facilement atteignables, on peut piquer le départ de l'échangeur sur le départ général.

d) Stockage

Le stockage de glace se fait via les GF indirect qui se permutent en mode stockage (régime -5/0°C). Le régime de températures induit des caractéristiques physiques du glycol permettant de produire 914 kWf pour un débit nominal des pompes à l'évaporateur.

Les sorties évaporateur sont reliées sur les pompes de stockage qui permettent la production de glace via un échangeur de type tubulaire. Le volume d'eau présent dans les bacs permet de détenir une capacité de 32.5 MWh froid.

e) Déstockage

Le déstockage consiste à récupérer l'énergie frigorifique stockée dans les bacs grâce aux pompes de déstockage. Le froid est transmis jusqu'aux primaires des échangeurs pour fournir les 5°C en sortie secondaire.

La puissance maximale que l'on peut déstocker est de 4.5 MW froid, ce qui correspond à la puissance nominale de l'échangeur. La contrainte du déstockage induite par le contrat est le déstockage maximal de 50% de la capacité des bacs.

III. Étude des producteurs frigorifiques

A. Contrat électrique

Le critère d'évaluation des performances d'un mode de production ne repose pas seulement sur l'aspect énergétique mais surtout sur celui économique. Ainsi, pour commencer cette partie de mon étude je souhaite introduire l'aspect contractuel du coût énergétique pour ensuite l'introduire dans l'évaluation des différents types de production.

1. Tarification horaire

Pour permettre le fonctionnement de la centrale, mais surtout ici la production frigorifique, DALKIA a souscrit un contrat avec l'UEM pour la fourniture d'électricité au tarif vert « Émeraude, moyenne utilisation, avec une puissance souscrite de 2 MWe », (Sources : Contrat Émeraude, Conditions particulières, 07/02/2012). Ce contrat établi une tarification horaire comme le montre le tableau suivant :

Tableau III.A.1-1 : « Tarification horaire de l'énergie électrique consommée sous un contrat de type Vert Émeraude, moyenne utilisation »

Tarif d'achat du kWhe (Centimes d'Euros)				
P	HPH	HCH	HPE	HCE
14,879	**7,559**	**4,776**	**4,165**	**2,597**

Sources : « Contrat Émeraude, Conditions particulières, 07/02/2012, page 3 ».

Les différents tarifs horaires sont répartis de la sorte :

P : heures de pointe électrique : seulement en Hiver de 9h à 11h et 18h à 20h.

HP : Les heures pleines, elles sont de 2 types, Hiver ou Été, de 6h à 9h – de 11h à 18h et de 20 à 22h.

HC : Les heures creuses, elles sont aussi de 2 types, Hiver et Été ; de 22h à 6h et le Dimanche, toute la journée.

On remarque que les heures de pointes électriques nous demande une gestion fine de la production. En effet, comme le montre le tableau suivant, les heures de pointes sont plus de 3 fois supérieure à celles creuses en Hiver.

Tableau III.A.1-2 : « Rapports des tarifs horaires au heures creuses selon les saisons »

Rapports tarification horaires				
P	HPH	HCH	HPE	HCE
3,1154	1,5827	1	1,6038	1

2. CSPE

En plus de lu coût de l'énergie électrique, s'associe un nombre de taxe comme la Contribution aux Services Publiques de l'Électricité. La valeur de ces taxes ne dépend ni de la saison ni des heures de sa consommation. On peut estimer leur montant global à 9€/MWh consommés.

3. Prime fixe

La prime fixe correspond au forfait de vente électrique pour une puissance souscrite donnée. La loi permettant sa détermination est linéaire avec un coefficient directeur déterminé par le contrat.

Étant en moyenne utilisation, le coefficient s'élève à 48.12€/kW souscrit (Contrat Émeraude, Conditions particulières, 07/02/2012, page 3). Ainsi, la variation de la prime évolue de la manière suivante :

$$Prime\ fixe = Puissance\ souscrite\ X\ 48.12$$

Actuellement, pour des conditions de stockage avec 3 groupes froid, et la consommation frigorifique actuelle, la puissance souscrite s'élève à 2MW électrique. Ainsi, la prime fixe est de $96\,240$€/ans.

Si on abaisse la puissance souscrite de 285kW (retrait d'un groupe en stockage), on arrive à une diminution de 13 572,7€. Ainsi, l'étude du stockage/déstockage est un point clé de conduite.

4. Calcul global du coût électrique

En admettant que la consommation électrique des différents autres process ne représente que 5% de la prime fixe, la totalité de ce forfait est à prendre en compte dans le coût global de la production frigorifique. Pour le déterminer, je vais distinguer le stockage de la production pure.

- ✓ Le coût du stockage correspond au coût tarifaire + la taxe sur l'ensemble des kWhe consommés, la prime fixe sera retranscrite sur ce que l'on vend
- ✓ Le coût de production pure lui correspond au coût tarifaire + la taxe + la prime fixe retranscrit sur 1 heure de fonctionnement.

Cela permettra d'englober l'ensemble des coûts de la consommation électrique pour les rapportés au prix de vente des kWh froid vendu et en déterminer les bénéfices escomptés.

5. Seuil de rentabilité de l'installation

Le prix de vente du kWh froid est constant au cours du temps. Il s'élève à 20€/MWh. Ainsi, il devient primordial de savoir quel est le COP économique minimal à avoir :

$$COP_{économique} = \frac{Coût\ élect}{Vente\ froid} = \frac{€/kWhe}{€/kWhf} = \frac{€/kWhe}{€/kWhf} = \frac{kWf}{kWe}$$

En faisant le rapport du tarif électrique avec la taxe incluse au tarif de vente froid, j'arrive à déterminer le tableau suivant :

Tableau III.A.5-1 : « Évaluation du COP économique à maintenir ».

COP économique				
P	HPH	HCH	HPE	HCE
7,894	4,234	2,8425	2,537	1,753

Ce tableau est représentatif des COP minimaux à obtenir pour ne pas vendre à perte. On remarque qu'en Hiver il faut absolument faire attention aux heures de pointes et privilégier les productions à faible consommation.

Si on fixe un COP de l'installation à 3, il faudrait fournir une puissance minimale pendant une heure pour permettre de combler la prime fixe :

$$Prime\ fixe + \frac{Q_f}{COP}\ xCo\hat{u}t_{\ élect} = Q_f * Prix\ de\ vente_{\ froid}$$

$$Q_f = \frac{Prime\ fixe}{Prix\ de\ vente_{\ froid} - \frac{Co\hat{u}t_{\ élect}}{COP}}$$

Les tarifs électriques d'heures et pointes et heures pleines hiver ayant un COP économique inférieur à 3, je ne les prend pas en compte :

Tableau III.A.5-2 : « Puissance minimale à fournir pour un COP de 3 selon les tarifs horaires »

Puissance minimal à fournir avec un COP de 3		
HCH	HPE	HCE
2712,67	1804,98	971,09

On remarque, que les puissances à escompter sont facilement atteignables en Été et quasi impossible en Hiver hors heures creuses.

Néanmoins, la température plus faible permettra de diminuer la puissance absorbée par les aéros et de doper les performances des DRY. Donc globalement, si on gère correctement le déstockage et le freecooling, le mois d'Hiver.

Ainsi, du fait de la température moyenne plus faible en Hiver, on peut avoir des COP plus important, on peut jouer plus avec le déstockage ou encore avoir un gain au niveau du freecooling.

B. Analyse des producteurs

Afin d'optimiser la gestion de la production frigorifique, il est important d'identifier l'ensemble des consommateurs prépondérant associés aux modes de production.

Une fois identifiés, je vais déterminer la consommation électrique théorique de chaque mode de production en fonction de la charge appelée. Ce qui me permettra d'évaluer leurs performances énergétiques en vue de diminuer le coût de la production.

1. Identification des consommateurs en fonction du type de production

Les principaux consommateurs énergétiques sont essentiellement les groupes froids, les pompes et les aéros. Les autres auxiliaires sont négligeable en comparaison.

Hypothèse III.B.1-1 : La régulation, les instruments de mesures et les variateurs de vitesse des pompes sont négligeables devant ces consommateurs.

D'après l'analyse fonctionnelle et le PID Trane, les différents types de production frigorifique regroupent les consommateurs suivants:

- **La Production direct :** GF direct – Aéros – Pompes réseau condenseur et évaporateur

- **La Production indirect :** GF indirect – Aéros – Pompes réseau condenseur et primaire GF- pompes réseau primaire et secondaire Échangeur

- **Le Déstockage :** Pompes déstockage – pompes réseaux primaire et secondaire de l'échangeur 700 ou 800

- **Le Freecooling :** Aéros - pompes réseaux primaire et secondaire de l'échangeur 900

Hypothèse III.B.1-2 : Les pompes départ réseau étant commune à chacun des modes de production, je ne les prend pas en compte dans mes calculs de performances.

2. Méthode de calcul

Pour déterminer l'efficacité d'un type de production, il est nécessaire d'établir une relation permettant de connaitre la consommation électrique pour fournir de l'eau glacée à 5°C, en fonction de la charge appelée.

Ainsi, à partir des données fournisseur que j'ai pu recenser, je vais effectuer un bilan des consommations électriques de l'ensemble des éléments non négligeable, d'un mode de production. Pour englober mon résonnement, je vous invite à l'annexe 4 page 14-19 : « Schémas de calculs de la consommation électrique des types de production ».

a) Hypothèses de calculs

Pour commencer, il est important de délimiter mon étude. Ainsi, je me place dans les conditions suivantes :

Hypothèse III-B-a)-1 : Régime dynamique stationnaire

Hypothèse III-B-a)-2 : Régime de température établi selon l'analyse Trane

- 3/9°C réseau primaire
- 5/11°C réseau secondaire
- -5/0°C pour la production de glace

Hypothèse III-B- a)-3 : L'ensemble des réseaux sont équilibrés en débit.

(1) Groupes froid

Les annexes de « L'intention de commande du 15/11/2010, Site de la centrale d'énergie du Nouvel Hôpital de Metz », fournies un ensemble de documents techniques sur le process frigorifique. J'ai ainsi pu en ressortir des abaques propres au groupe froid direct et indirect.

Ils permettent de suivre l'évolution du coefficient EER (Efficiency Energy Ratio) en fonction du pourcentage de charge (voir annexe 3 page 3 à 5).

Le coefficient EER correspond au rapport entre la puissance frigorifique produite et la puissance consommée par le compresseur, en d'autre terme c'est le « COP propre de la machine » :

$$EER = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}_{compresseur}}$$

La différence entre le coefficient EER et COP est que le COP correspond à la puissance finale récupérée sur la somme de l'énergie dépensé pour la récupérer :

$$COP = \frac{\dot{Q}_F^{finale}}{\Sigma \dot{W}_e} = \frac{\dot{Q}_F^{finale}}{\Sigma \dot{W}_{GF} + \Sigma \dot{W}_{pompes} + \Sigma \dot{W}_{Aéros}}$$

Le pourcentage de charge correspond à l'énergie froid produite rapportée sur la puissance maximale délivrable par le type de production : Direct (5/11°C) – Indirect (3/9°C).

Ainsi, pour évaluer la consommation électrique, j'ai retracé ces abaques pour en ressortir une fonction cubique permettant de déterminer le coefficient EER suivant la charge appelée (voir annexes 3 page 3 à 5).

Ainsi, connaissant la puissance frigorifique produite et le coefficient EER associé, il est facile de déterminer la puissance électrique consommée par le compresseur.

$$\dot{W}_{compresseur} = \frac{\dot{Q}_F}{EER}$$

(2) Pompes

Pour transmettre l'énergie frigorifique d'un producteur jusqu'au circuit secondaire, il doit y avoir des pompes.

Ces pompes ont été dimensionnées pour que le débit maximal véhiculé par les pompes sous un delta T donné corresponde à la puissance maximale du producteur associé.

De par la plage de débit admissible par une pompe associé à un producteur frigorifique cela induit une plage de puissance donnée pour un delta T de 6°C, selon le type de fluide connecté sur le réseau évaporateur.

Ainsi, ayant récupéré les fiches de données techniques des pompes, j'ai pu en ressortir un tableau de synthèse (voir annexes 4 page 10).

b) Détermination des débits des pompes

(1) Pompes rattachées au circuit évaporateur

Les pompes qui sont rattachées au circuit de l'évaporateur du groupe froid, ont un débit nominal correspondant à la puissance froid maximale du groupe pour un régime de température donné.

Ainsi, la modification de la charge frigorifique d'un groupe induit une variation du débit des pompes correspondant à 20 Hz jusqu'à 50Hz.

(2) Pompes rattachés au circuit condenseur

Les pompes connectées sur le circuit condenseur permettent d'évacuer les calories générées par la compression du fluide frigorigène via un échangeur tubulaire.

Le débit des pompes dépendant de la température extérieure, je fais l'hypothèse que les pompes condenseur correspondent en fréquence à celles côté évaporateur. Ce qui me permet de me mettre dans un cas défavorable.

(3) Pompes stockage

Pour stocker de la glace, il faut obligatoirement avoir un producteur de froid négatif qui fournit les frigories. Ainsi, le débit des pompes de stockage ont un débit qui correspond aux pompes évaporateur des GF indirect qui produisent du froid négatif.

$$q_v^{Stockage} = \Sigma\, q_v^{Indirect}$$

(a) Pompes de déstockage

Le déstockage est un type de production frigorifique, la puissance pouvant être fournie dépend uniquement des caractéristiques des pompes, mise à part les conditions de températures liées à la charge des bacs.

(4) Pompes échangeurs

(a) Primaire

Le résonnement est le même qu'avec les pompes de stockage : le débit primaire dépend de la somme des producteurs connectés à ces pompes.

(b) Secondaire

Hypothèse II.B.3.c) : Je me place dans le cadre d'un échangeur adiabatique, donc sans pertes thermique.

Comme le régime de température est constant, je pose :

$$\alpha = \rho \ Cp \ \Delta \mathrm{T}$$

En effectuant le bilan thermique et en prenant en compte l'efficacité de l'échangeur, on arrive à :

$$\varepsilon \ \alpha_{primaire} q v_{primaire} \ = \ \alpha_{secondaire}$$

L'efficacité de l'échangeur ε dépend du nombre de plaque de l'échangeur mais aussi de l'état de l'échangeur (corrosion, tarte, etc.).

N'ayant pas réussi à récupérer à temps, l'évaluation de l'efficacité en fonction du débit, et du temps, je me place dans un cas défavorable d'une efficacité de 90%

c) Détermination de la Puissance absorbée par les principaux consommateurs

(1) Pompes

Les pompes installées sur le site sont équipées d'un variateur de vitesse. Il permet de moduler le débit en fonction de la demande, et don faire de précieuses économies d'énergie

D'après la littérature, on peut en ressortir l'évolution du débit en fonction de la fréquence apportée à la pompe :

D'après : « Le manuel du pompage en assainissement, GRUNDFOS ASSAINISSEMENT, p84 : 6.1.4) Courbes de pompes en variation de fréquence », je peux ressortir les corrélations suivantes:

$$q_v = \frac{f}{f_{50Hz}} q_v^{50Hz}$$

$$H = H_{50Hz}\left(\frac{f}{f_{50Hz}}\right)^2$$

Le manuel du pompage en assainissement, GRUNDFOS ASSAINISSEMENT, p84 : « 7.4.2) Calcul de l'énergie consommée ».

$$W_{élect} = {W_{élect}}^{50Hz}\left(\frac{f}{f_{50Hz}}\right)^3$$

$$W_{élect} = {q_v}^3\left(\frac{\rho\, H_{50Hz}}{\eta_{gr}\left(q_v^{50Hz}\right)^2}\right)$$

$$W_{élect} = \beta {q_v}^3$$

Ainsi, en fonction des caractéristiques techniques apportées par les fiches des pompes, je peux déterminer selon la fréquence généré le débit et la puissance absorbée de chacune des pompes.

(2) Aéroréfrigérants

La consommation d'un DRY dépend de la quantité d'énergie que l'on veut évacuer mais surtout de la température extérieur.

D'après le 1er principe de la thermodynamique :

$$\dot{W}_{compresseur} + \dot{Q}_F + \dot{Q}_C = 0$$

Et avec l'expression du travail électrique:

$$\dot{W}_{compresseur} = \frac{\dot{Q}_F}{EER}$$

On en ressort que la chaleur à évacuer correspond à :

$$\dot{Q}_C = \left(\frac{EER + 1}{EER}\right)\dot{Q}_F$$

Les seules données techniques que j'ai pu recueillir sont qu'à 32°C extérieur la puissance évacuable est de 1MW. D'après la loi de convection on a :

$$\dot{Q}_C = hS_{Echange\ DRY}\left(\mathrm{T_{paroi}} - \mathrm{T_{ext}}\right)$$

En considérant $hS_{Echange\ DRY}\mathrm{T_{paroi}}$ et en considérant la température de paroi comme constant à 42°C. Ainsi, à 20°C extérieur je peux quantifier la chaleur évacuable

$$\dot{Q}_C = 4400kW/DRY$$

La consommation électrique est linéaire en fonction du nombre de DRY sollicité. Ainsi, je fais l'hypothèse que l'évacuation de calorie suit cette même loi, je peux ainsi déterminer la puissance électrique en fonction de la charge frigorifique :

Un dry est constitué de 14 ventilateurs d'un DRY à une puissance nominale de 2.88kWe. Donc, ramener sur un DRY : 40.32 kWe.

$$W_E^{DRY} = \frac{\left(\frac{EER+1}{EER}\right)\dot{Q}_F}{\dot{Q}_{\max DRY\ 32°C}}\ W_E^{Max\ DRY}$$

Avec :

$$\dot{Q}_{\max DRY\ 32°C} = 1000\ kWf$$

Et :

On arrive donc à :

$$W_E^{DRY} = 40.32\ \frac{\left(\frac{EER+1}{EER}\right)\dot{Q}_F}{1000}$$

3. Production direct

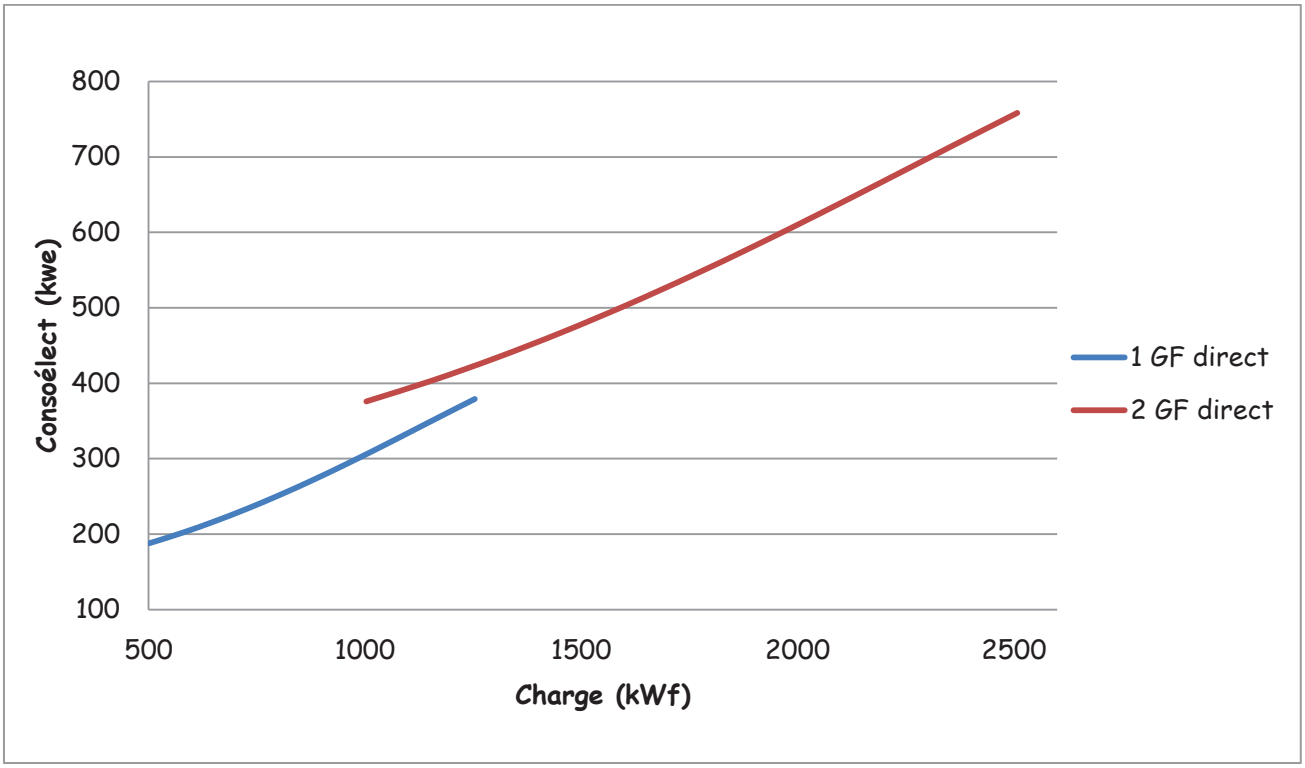
a) Influence de la charge appelée sur les performances de la production

À partir du résonnement détaillé précédemment, j'ai pu en ressortir l'évolution de la puissance totale absorbée, de la production directe, en fonction de la charge appelée, pour différentes température entrée condenseur (eau glycolée) :

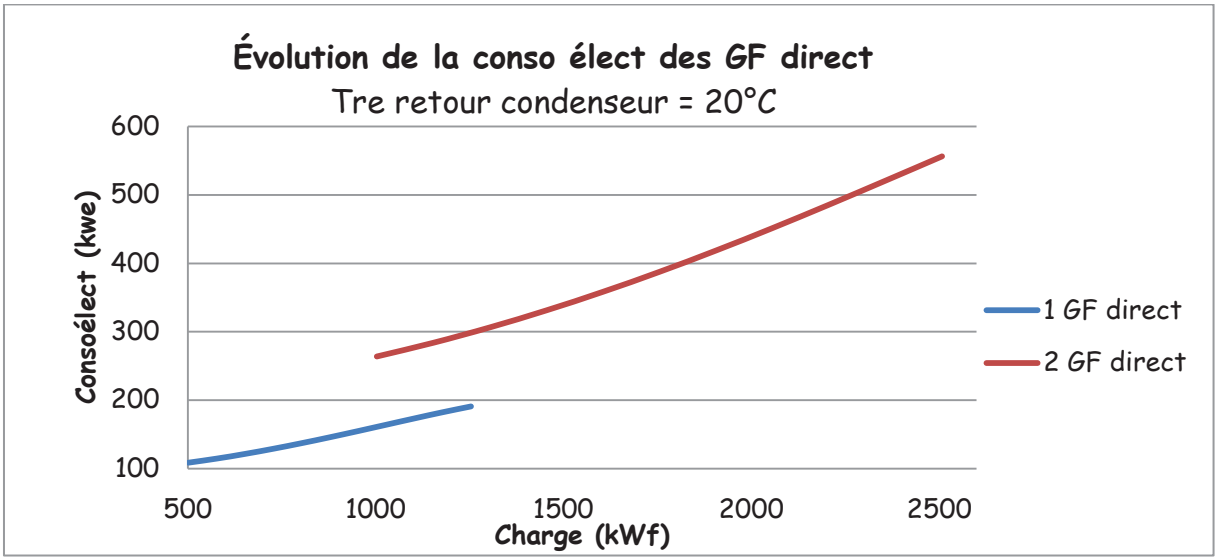
(1) Influence de la température de retour du condenseur

Selon la température de retour au condenseur, l'efficacité du groupe varie. Avec les données techniques fournissent (Annexes page XXX), j'ai cherché estimé l'amplitude de variation de la puissance absorbée.

Graphique III.B.3.a).1)-1 : « Évolution de la puissance électrique absorbée par la production direct en fonction de la charge appelée, pour une température retour au condenseur égal à 32°C».



Graphique III.B.3.a).1)-2 : « Évolution de la puissance électrique absorbée par la production direct en fonction de la charge appelée, pour une température retour au condenseur égal à 20°C».



On constate clairement que les performances thermiques de la production directe sont nettement supérieures à basse température : pour deux groupes à pleine puissance : l'écart de puissance absorbée est d'environ 54 kWe entre une température d'entrée condenseur de 32 et 20°C.

Tableau III.B.3.a).1-1: « Comparaison de la puissance absorbée d'un groupe froid entre une température d'entrée condenseur de 32°C et 20°C».

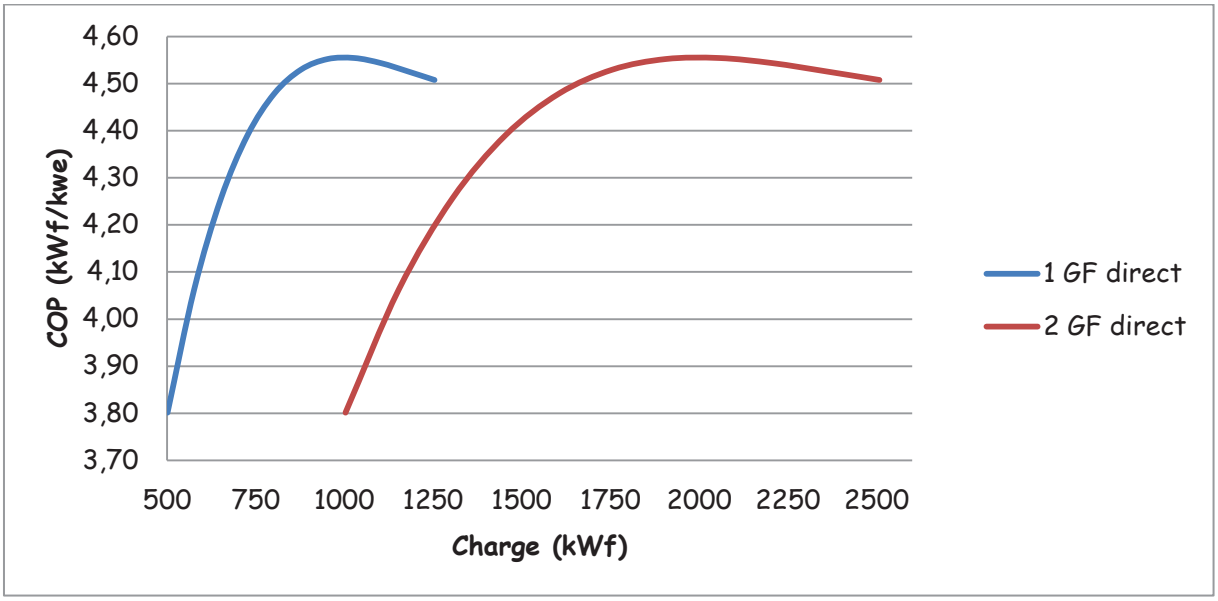
	Qf (kWf)	Welect (kWe)	ΔWelect (kWe)
32°C	1250	379	189
20°C		190	

On voit bien que les conditions extérieures influence énormément les performances d'un groupe. Néanmoins, il faut garantir un écart suffisant entre la Basse pression et la Haute pression du groupe, on ne doit descendre en dessous de 20°C en entrée évaporateur, sinon on augmente les risques de retour d'huile.

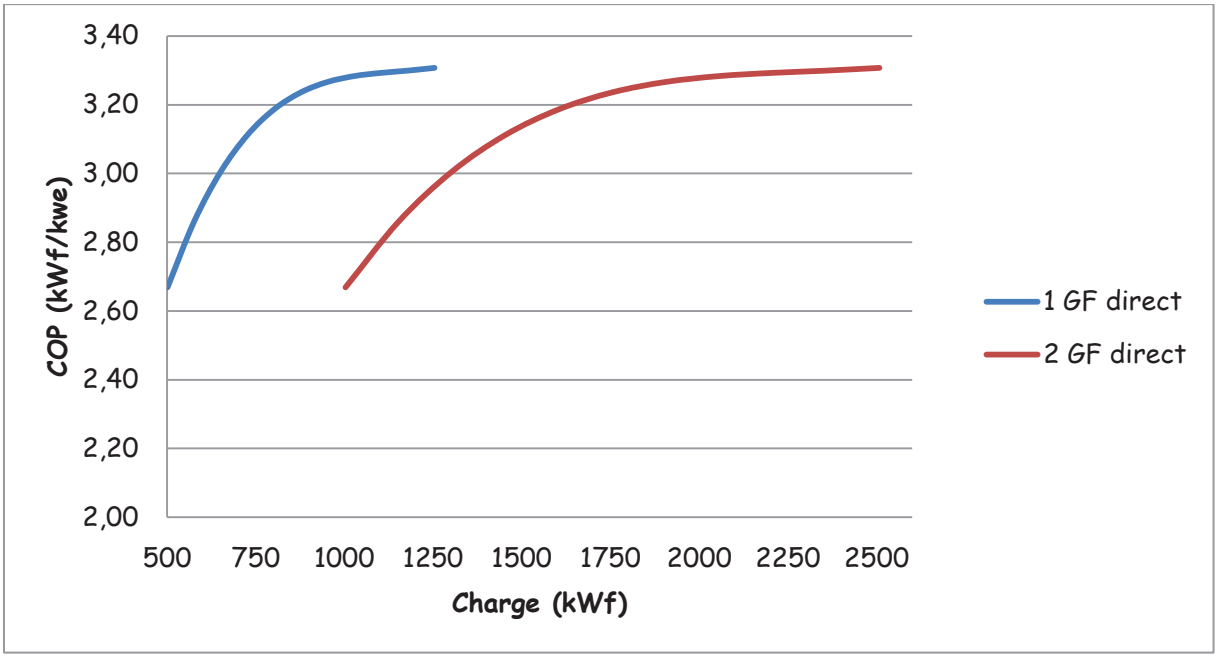
Une étude de sensibilité au niveau de l'utilisation des pompes secondaire et des DRY serait intéressante à effectuer. Toutefois, nous n'avons pas réussi à récupérer les données des DRY permettant d'estimer la puissance calorifique évacuable selon les conditions extérieures. Et le retour d'expérience n'est pas suffisant.

(2) Évolution du COP en fonction de la carge frigorifique appelée

Graphique III.B.3.a).2)-1 : « Évolution du COP de la production direct en fonction de la charge appelée, pour une température retour au condenseur égal à 20°C».



Graphique III.B.3.a).2)-2 : « Évolution du COP de la production direct en fonction de la charge appelée, pour une température retour au condenseur égal à 32°C».



On remarque que l'optimum des performances à 20°C de température entrée évaporateur est décalée et le correspond pas au maximum de la charge appelée comme à 32°C.

(3) Gestion de la cascade de producteurs directs

Les graphiques **III.B.1.a)-1** et **III.B.1.a)-2**, nous montre que pour une même puissance appelée, il est plus intéressant d'utiliser un groupe à pleine puissance que 2 groupes à puissance réduit.

Tableau III.B.3.a).3)-1 : « Comparaison de la puissance absorbée de la cascade de producteurs direct pour une même charge frigorifique et une température de retour condenseur de 32°C»

	Qf (kWf)	**Welect** (kWe)	**ΔWelect** (kWe)
1GF	**1254**	**379**	**54**
2GF		**433**	

Tableau III.B.3.a).3)-2 : « Comparaison du COP de la cascade de producteurs direct pour une même charge frigorifique et une température de retour condenseur de 32°C»

	Qf (kWf)	**COP** (kWf/kWe)	**ΔCOP** (kWf/kWe)
1GF	**1254**	**3,31**	**0,3**
2GF		**3.01**	

Il est marquant d'avoir un écart d'environ 54 kWe entre deux gestions de la cascade pour une même puissance froid donnée. Ainsi une mauvaise utilisation de la gestion peut rapidement faire grimper la consommation électrique du système, ce qui intégré sur du long ou moyen terme peut rapidement coûter très cher…

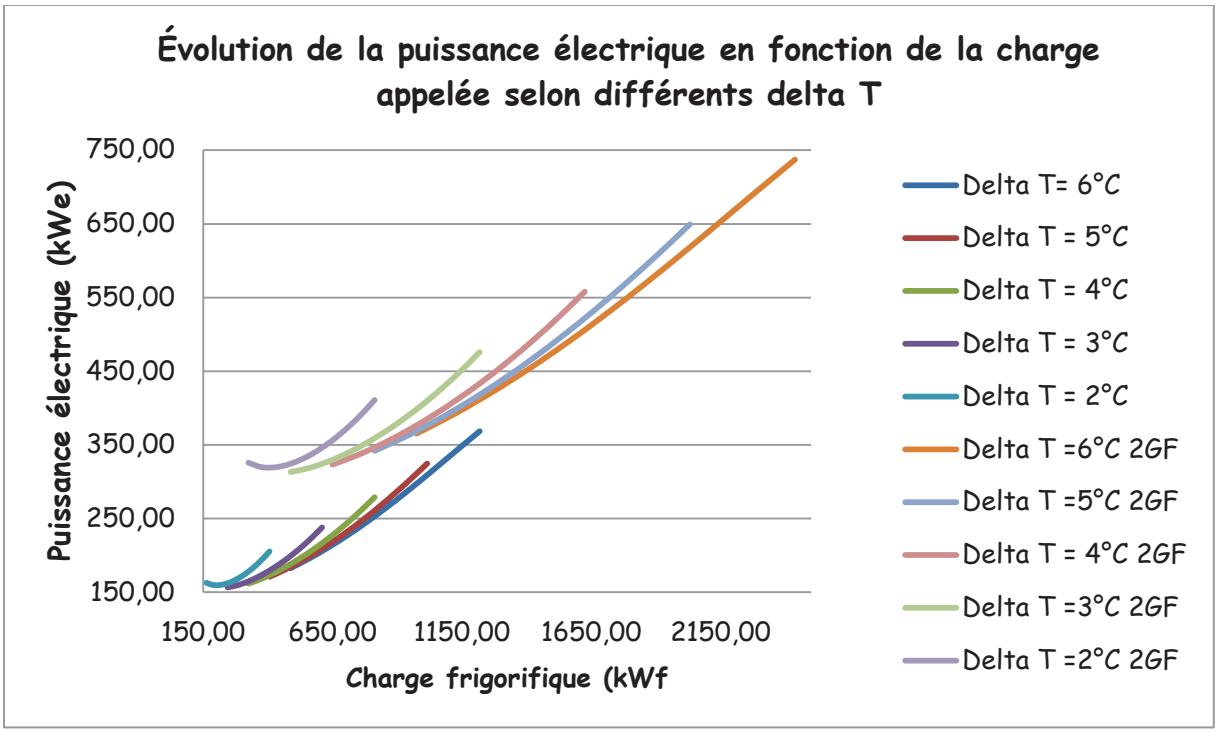
Ainsi, il devient intéressant de savoir selon les périodes, quelle charge frigorifique va appeler le NHM et le HFME. On pourra ainsi, adopter une gestion plus adéquate, en enclenchant le nombre de producteur adéquate.

b) Influence du delta T sur les performances de la production

D'un point de vue exploitation, le régime de températures peut varier en fonction de la consommation énergétique du HFME et NHM. Ainsi, il est important d'étudier cette variation afin de mieux la gérer.

Pour cela, je me place dans la condition suivante : étude d'un GF direct pour une température de retour condenseur de 32 °C (cas défavorable), et je fais varier le delta de température du régime d'eau sur le réseau secondaire.

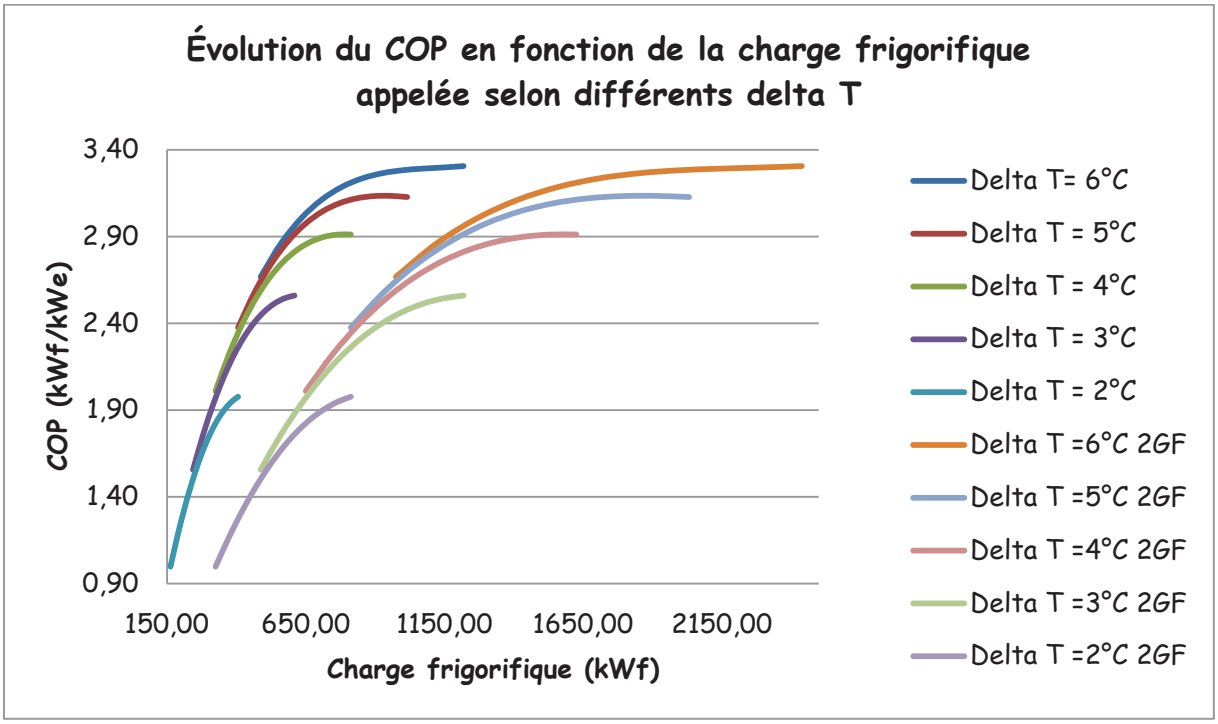
Graphique III.B.3.b)-1: « Évaluation de la puissance électrique en fonction de la charge appelée selon différents delta T pour une température d'entrée au condenseur de 32°C »



Remarque :

On constate que la diminution du delta T entraine une surconsommation électrique et abaisse fortement la capacité de production. Au niveau de la centrale, il faut mieux diminuer les débits pour augmenter le delta ou asservir une régulation sur le tertiaire. L'augmentation du delta T peut venir du fait que l'on submergé au niveau de la consommation. Il faut donc devancer ce genre de cas de figure par une prévision de charge.

Graphique III.B.3.b)-2 « Évaluation du COP en fonction de la charge appelée selon différents delta T pour une température d'entrée au condenseur de 32°C »

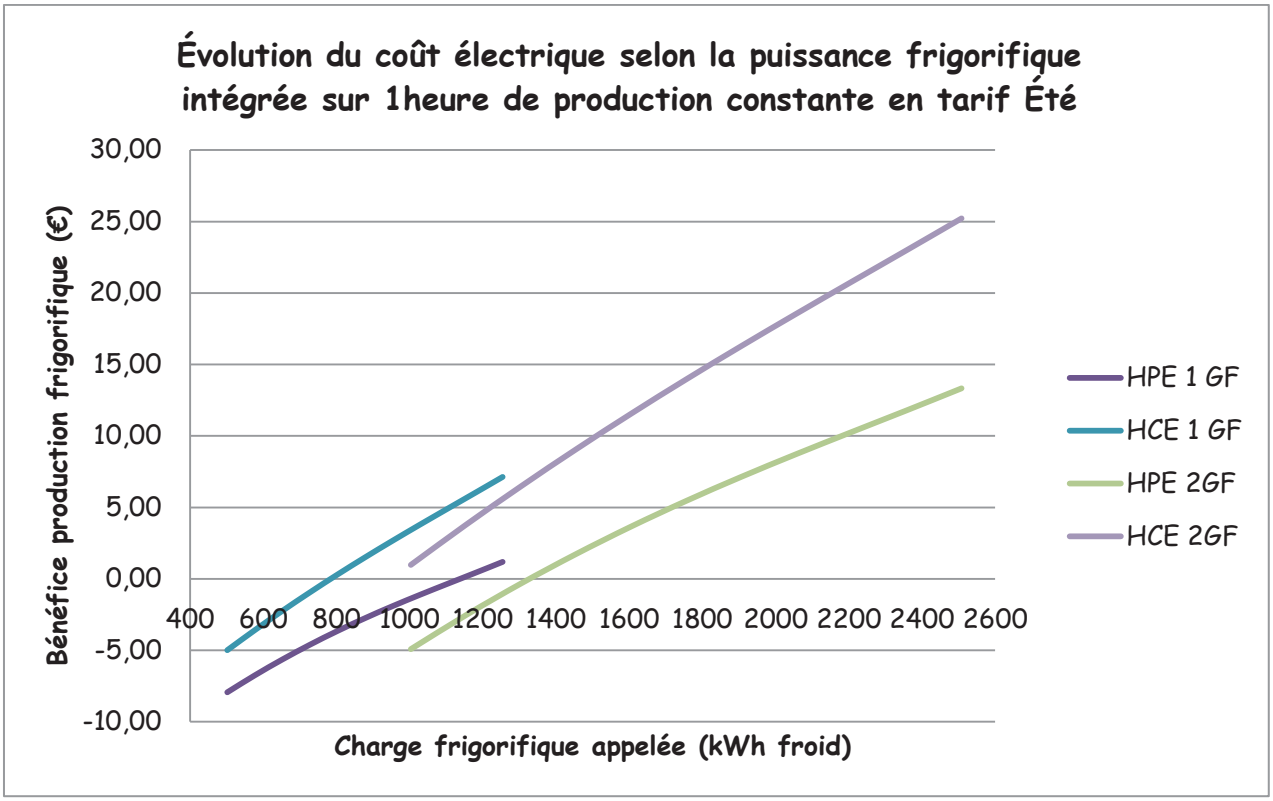


On peut émettre les mêmes remarques que précédemment, mais ajouter que plus le delta T diminue plus les écarts de COP augmente. Cela souligne bien que c'est un élément clé de conduite.

c) Évaluation des bénéfices escomptés en fonction de la charge appelée

Pour savoir quel type de producteur utiliser, il est important de savoir combien il peut apporter comme bénéfices. Ainsi, pour cela j'ai appliqué la procédure détaillé page XXX. Ainsi, j'ai pu en ressortir l'évolution des bénéfices en fonction de la charge appelée de la production directe pour un delta T de 6°C:

Graphique III.B.3.c)-1: « Évolution du coût électrique selon la puissance frigorifique intégrée sur 1heure de production constante en tarif Été »

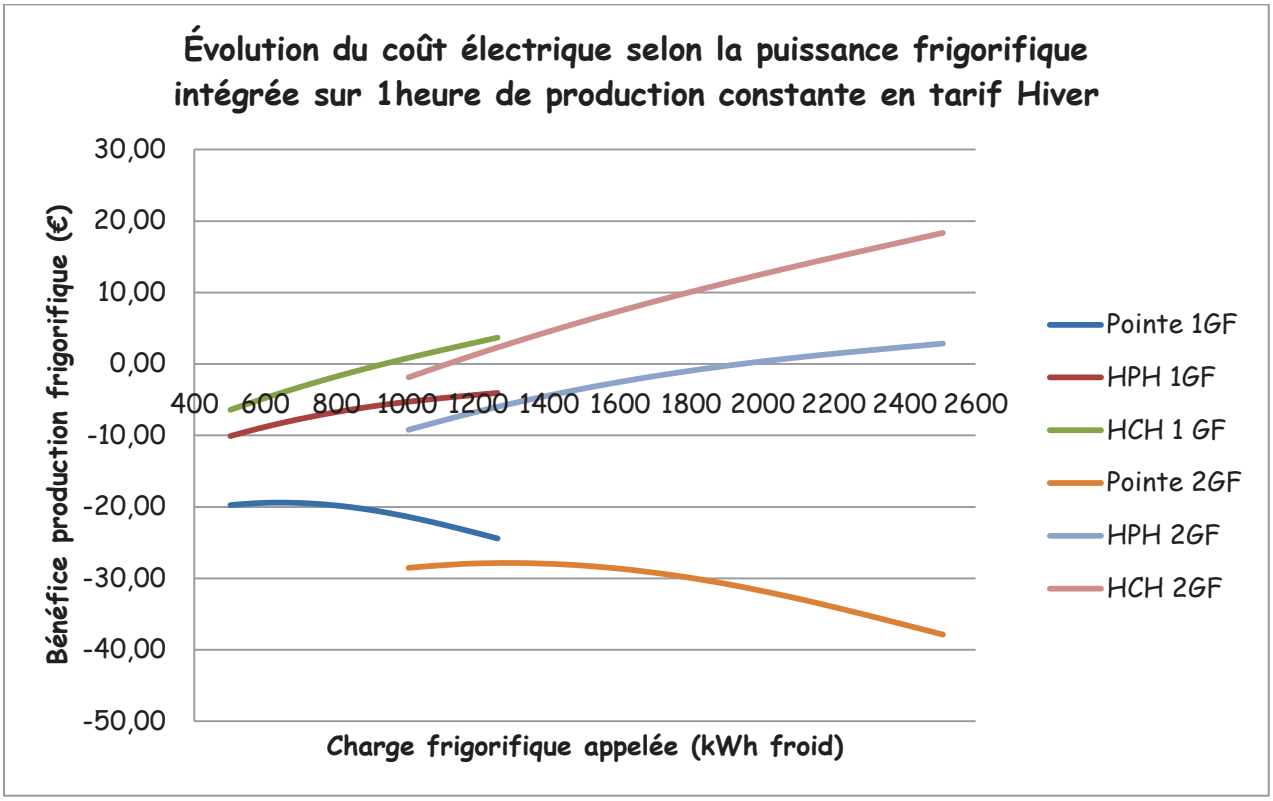


Remarque :

On remarque qu'en été, il est difficile d'atteindre le seuil de rentabilité en heure pleine. Il faudrait pousser la production à environ 1300 kW froid pour deux groupes froid en fonctionnement afin d'escompter à effectuer des bénéfices.

Le tarif horaire en heures creuses étant environ deux fois moins cher, on remarque l'obtention de bénéfices à partir de 800 kW froid produit avec un groupe, et tout le temps avec deux groupes.

Graphique III.B.3.c)-2: « Évolution du coût électrique selon la puissance frigorifique intégrée sur 1heure de production constante en tarif Hiver »



Remarque :

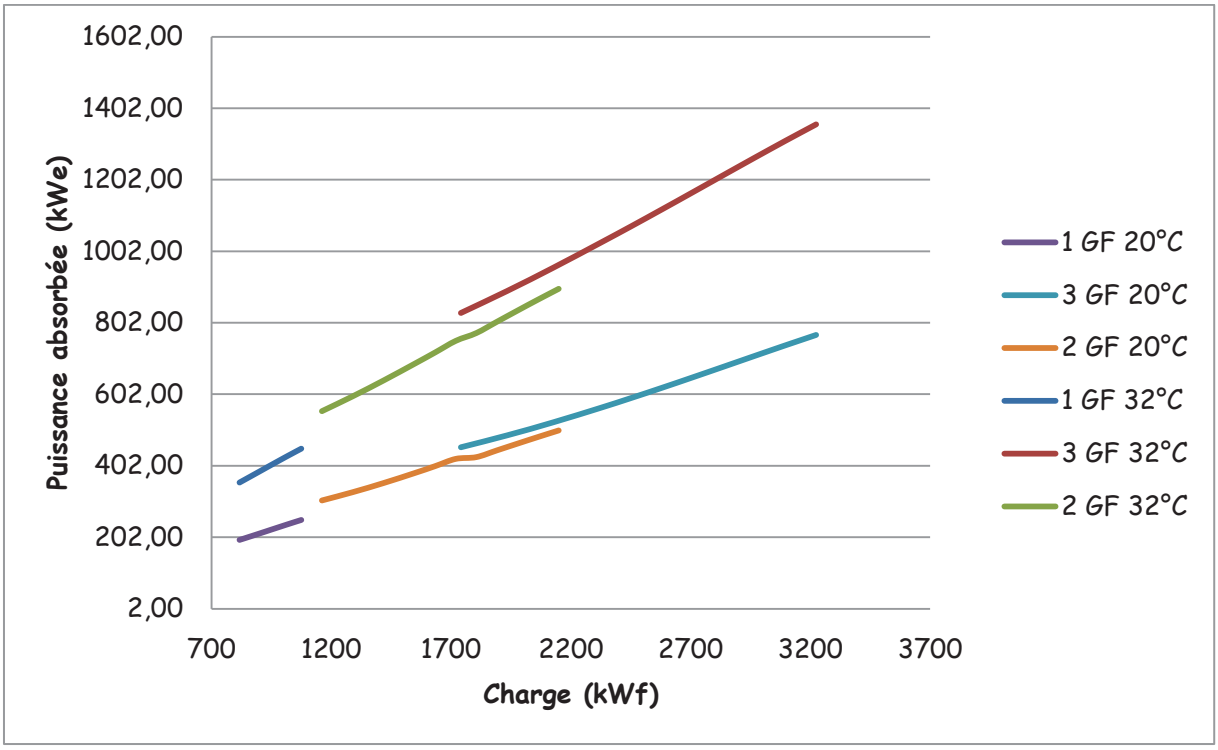
Pour ce qui est de la production hivernale, on constate que elle est difficilement rentable hors heures creuse. On remarque que la production en heures de pointes n'est totalement pas intéressante. Ainsi, pendant ces heures, il faudrait absolument trouver un autre moyen de production : le déstockage.

4. Production indirect

a) Consommation électrique

D'après la procédure décrite précédemment, la consommation énergétique de la production indirecte évolue en fonction de la charge appelée de la façon suivante :

Graphique III.B.4.a): « Évolution de la puissance absorbée par la production indirecte en fonction de la charge frigorifique appelée ».



Remarque :

On remarque la plage de puissance appelée 1180 à 1254 kWf n'est pas possible avec 1 ou 2 GF indirect. En effet, cela est dû à la fréquence minimale des pompes KSB (PO 301/401 et 500) qui s'élève à 27 Hz.

Néanmoins, on constate toujours la même chose que pour les groupes directs : il faut mieux fonctionner au maximum de la charge d'un groupe pour optimiser ses performances et que les performances sont de loin supérieur avec une température de retour de 20°C.

La variation de régime de température induira donc des pertes beaucoup plus importante que celle de la production directe.

Le tableau suivant montre l'écart de consommation électrique entre un groupe à pleine charge frigorifique et un groupe supplémentaire à charge inférieur :

Tableau III.B.4.a): « Comparaison de la puissance absorbée pour une température de retour condenseur de 32°C ».

	Qf (kWf)	Welect (kWe)	Delta Welect (kWe)
2 GF	2150	500	23
3 GF		523	

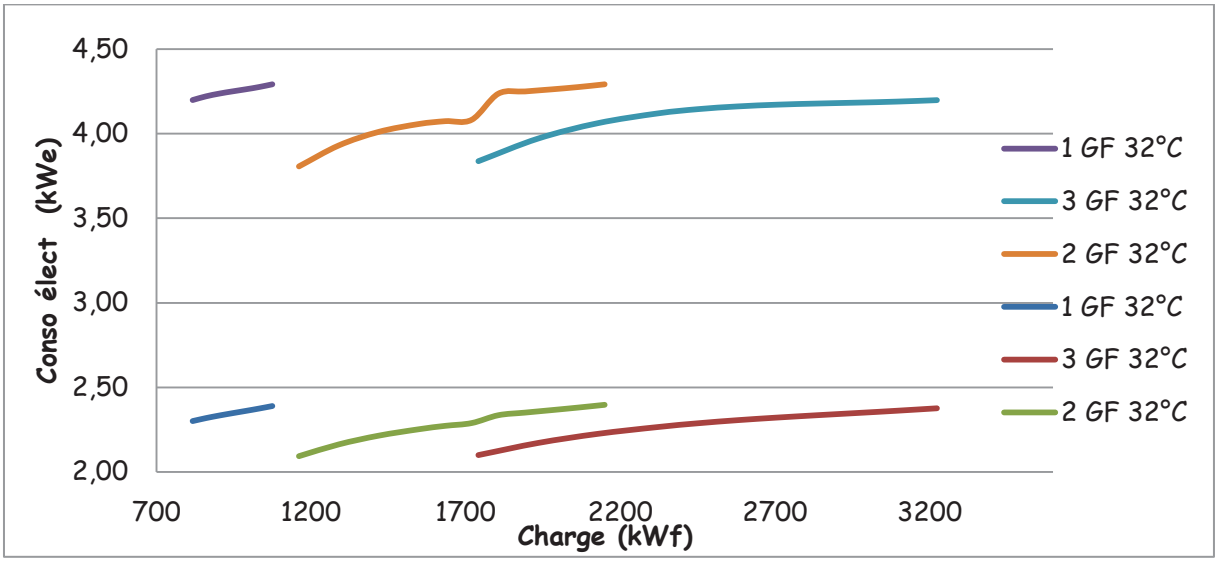
Il est marquant d'avoir un écart d'environ 23 kWe, ainsi la mauvaise utilisation de la cascade peut rapidement faire grimper la consommation électrique du système.

On remarque que la consommation frigorifique des groupes froids indirects est de loin supérieure à celle indirecte. Ceci s'explique par l'utilisation de pompes supplémentaires pour générer de l'eau glacée à 5°C. De plus la nature du fluide caloporteur est moins efficace et nécessite des pompes de puissance supérieure pour fournir un même débit.

b) Évolution du COP en fonction de la charge

L'évolution du coefficient de performance confirme la remarque précédente, comme le montre le tableau suivant :

Graphique III.B.4.b): « Évolution du COP de la production indirecte en fonction de la charge frigorifique appelée »



Le tableau suivant montre l'écart de COP entre un groupe à pleine charge frigorifique et un groupe supplémentaire à charge inférieur :

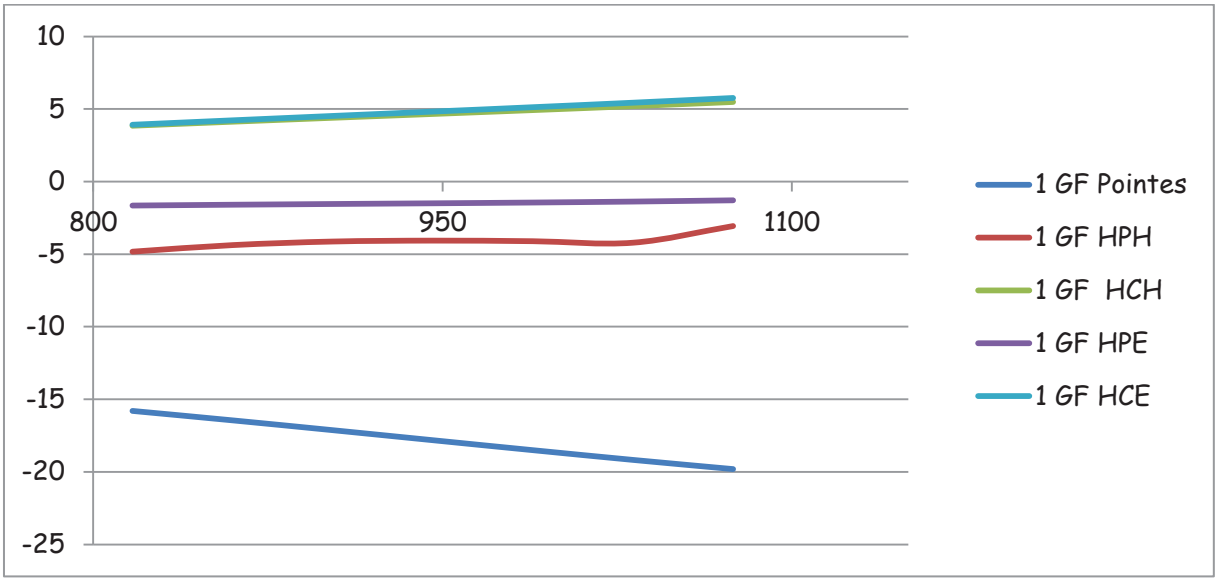
Tableau III.B.4.b): « Comparaison du COP pour une température de retour condenseur de 32°C ».

	Qf (kWf)	COP (kWf/We)	delta COP (kWf/We)
2 GF	2300,00	2.66	0,14
3 GF		2,52	

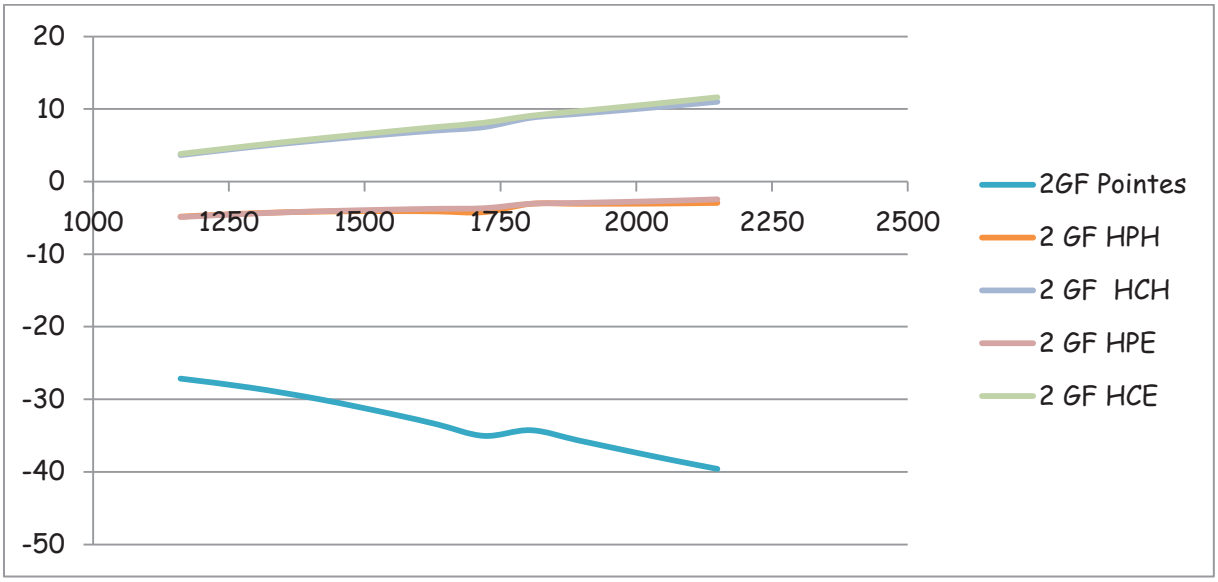
On remarque qu'en fonction du COP économique minimal est difficilement atteignable en heures pleine Été. Ainsi, ce mode de production ne devra être utilisé qu'en dernier recourts.

c) Évolution du coût électrique

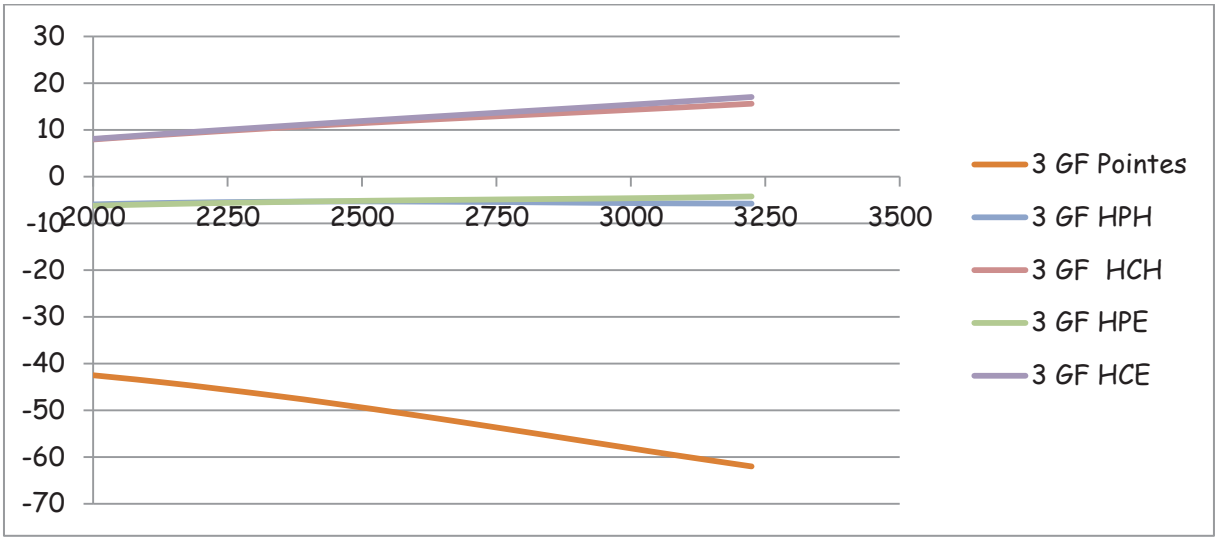
Graphique III.B.4.c)-1 : « Évolution des bénéfices hors prime fixe pour un groupe en fonctionnement selon différents tarifs horaire à une charge supposée constante sur 1 heure »



Graphique III.B.4.c)-2: « Évolution des bénéfices hors prime fixe pour 2 groupes en fonctionnement selon différents tarifs horaire à une charge supposée constante sur 1 heure »



Graphique III.B.4.c)-3: « Évolution des bénéfices hors prime fixe pour 3 groupes en fonctionnement selon différents tarifs horaire à une charge supposée constante sur 1 heure »



Remarque :

On remarque que peu importe le nombre de groupe enclenchés, la rentabilité de ce mode de production est difficilement atteignable hors heures creuses. Ainsi, il faudra le prendre en dernier recours de production.

Mais aussi que l'augmentation du COP par les conditions extérieures favorable permet de compenser l'augmentation du tarif horaire.

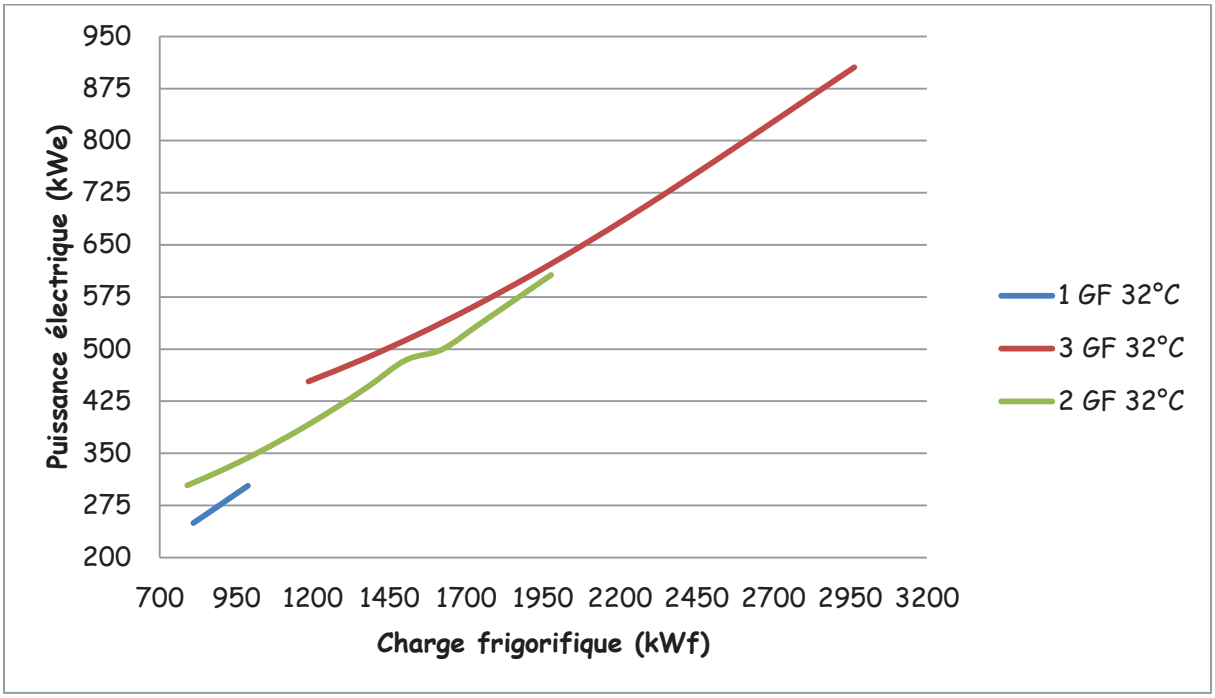
5. Stockage/Déstockage

a) Stockage

(1) Évolution de la puissance absorbée

En procédant de la manière décrite page XXX, je suis arrivé à déterminer la puissance absorbée en fonction de la charge frigorifique souhaité pour le stockage.

Graphique III.B.5.a)-1): « Courbes de puissances électriques en fonction de la charge frigorifique souhaitée »



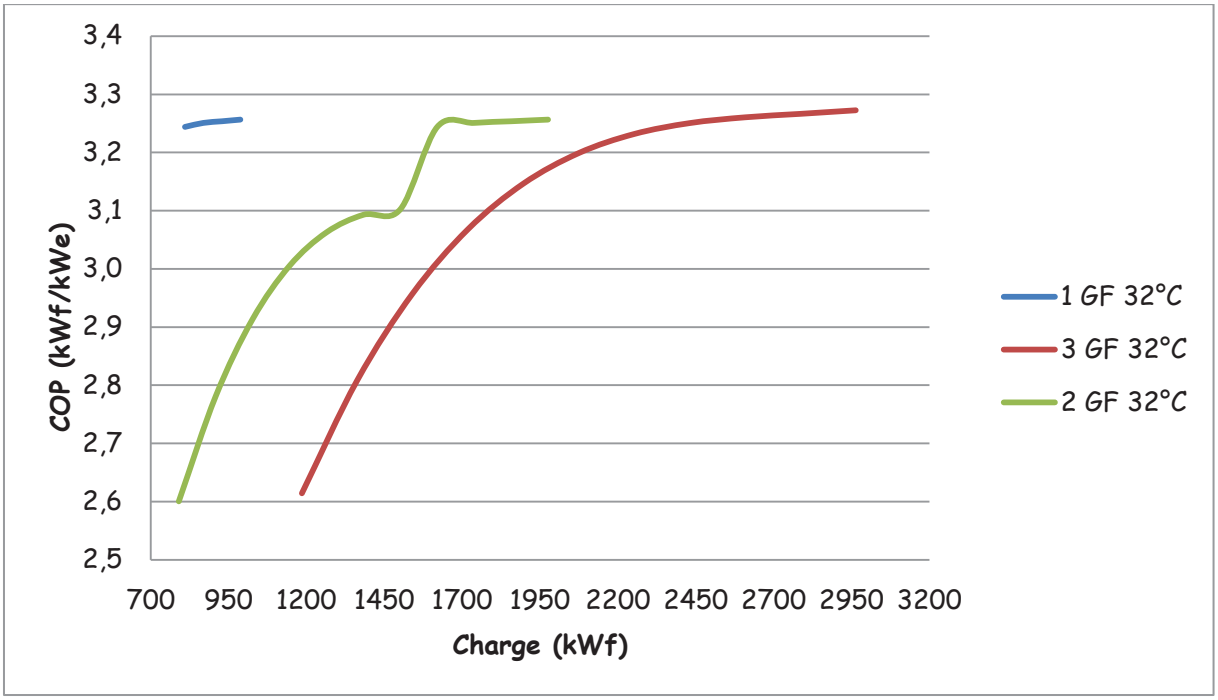
Pour que le débit du groupe froid corresponde au moins au minimum de débit admissible à 20 Hz d'une pompe de stockage, un groupe froid en fonctionnement ne peut fonctionner qu'à une puissance restreinte de son spectre. C'est pour cela que la courbe représentative du stockage avec un seul groupe froid est aussi petite.

On observe une légère perturbation de la puissance électrique vers 1600 kWf. Cette perturbation est due à l'enclenchement d'une deuxième pompe de stockage en parallèle. Cela permet de faire travailler ces deux pompes à fréquence réduite, et ainsi de diminuer la puissance absorbée. Pour 3 GF enclenchés, le débit minimal des deux pompes en parallèle est associé aux débits de production de froid par les groupes.

(2) Évolution du COP

À partir de puissances électriques calculées en fonction de la charge frigorifique souhaitée, je peux en déterminer l'évolution du COP en fonction de cette dernière.

Graphique III.B.5.a)-2): « Courbes de COP en fonction de la charge frigorifique souhaitée »



Comme déjà exprimé en 1.), la fluctuation de COP pour 2 groupes enclenchés est due au démarrage d'une deuxième pompe de stockage permettant de diminuer la puissance absorbée.

Globalement, on remarque qu'à charge appelée maximale, peu importe le nombre de groupes enclenchés, les performances énergétique sont quasi similaires.

Ainsi, l'analyse de l'évolution du COP en fonction de la puissance frigorifique appelée n'est pas concluante pour évaluer le nombre de groupes à enclencher. Ainsi, une évaluation économique permettra de savoir quel type de cascade sera la plus propice.

(3) Évaluation économique

Le nombre de groupes enclenchés détermine la vitesse de stockage d'énergie frigorifique. Ainsi, comme la tarification horaire varie au cours du temps, on peut évaluer selon le niveau de glace des bacs et le temps mis à les remplir, la combinaison la plus adéquate en fonction du coût de production.

L'analyse fonctionnelle TRANE page 3, précise que la puissance frigorifique réelle du stockage est de 914kWf. Ce qui d'un point de vue technique impose une fréquence des pompes évaporateur des groupes froid à 47Hz. Ainsi, pour mon étude je me placerai dans le cadre d'une utilisation des groupes à la puissance décrite dans l'analyse fonctionnelle, avec les hypothèses suivantes :

Hypothèse XXX : Je considère que le groupe s'enclenche directement au maximum de sa puissance.

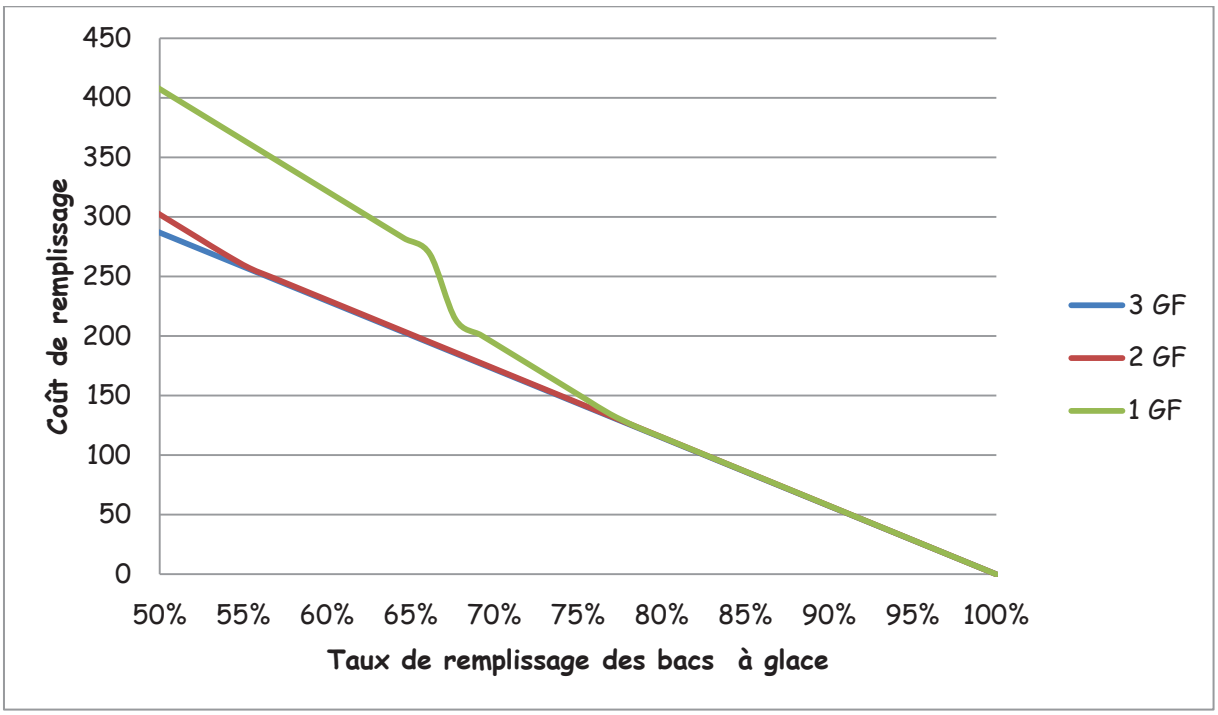
Hypothèse XXX : Je néglige la cinétique de formation de glace, et donc me place dans un cadre idéal : Stockage linéaire au cours du temps

$$Énergie\ frigorifique\ stockée = Puissance\ froid\ X\ temps$$

Hypothèse XXX : Je considère que le critère d'arrêt du groupe (Température de retour stockage=2°C), se fait instantanément.

Pour garantir les 4,5MW froid au bout d'une heure, l'ingénieur Joseph Sanchez à déterminer une quantité de glace minimale à garantir estimée à 50% de la capacité de l'ensemble des bacs. En partant des hypothèses et de cette dernière contrainte, j'ai pu en déterminer l'évolution du coût électrique de la production de 16,25 MWh froid.

Graphique III.B.5.a)-3)-1: « Évolution du coût électrique en fonction de la quantité d'énergie à stocker pour une tarification électrique Hiver»



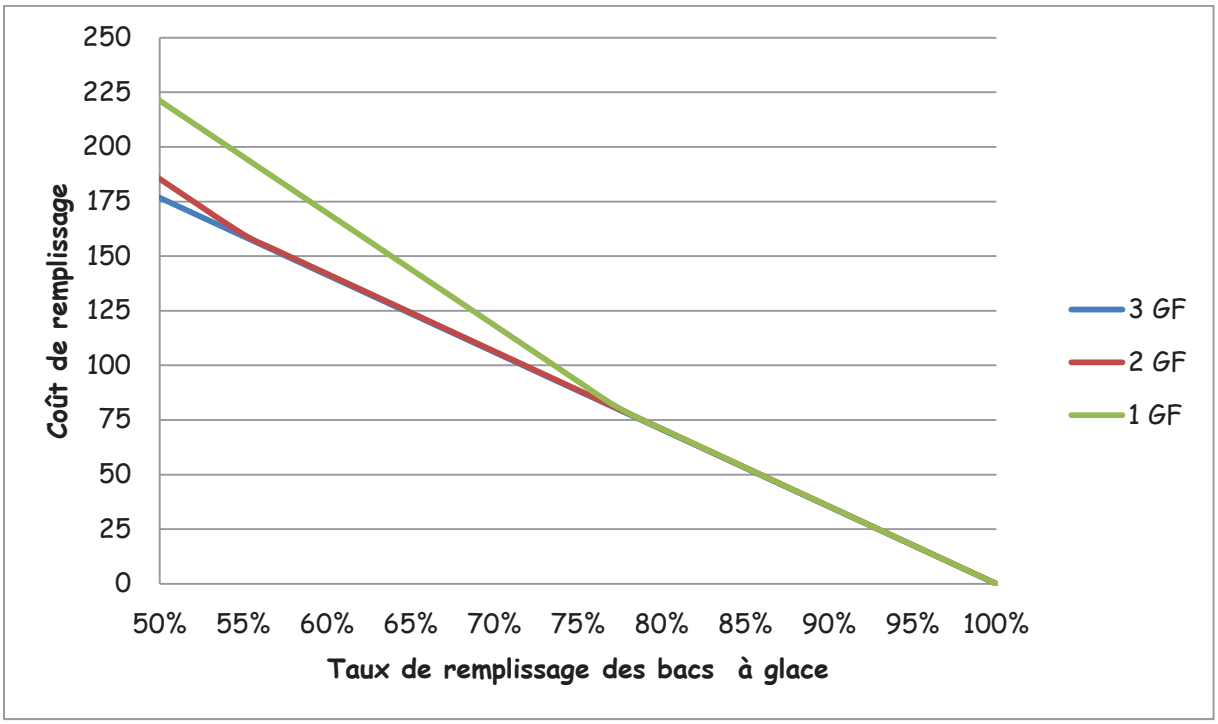
Le temps mis au stockage d'un seul groupe en fonctionnement n'est pas du tout intéressant face à 2 ou 3 groupes en marche. Néanmoins, vers 75% de la capacité des bacs, l'ensemble de ces combinaison s'équivalent. En effet, cela s'explique facilement du faite des performances énergétiques similaire et de la capacité à remplir les bacs pendant les heures creuses. Cette conclusion est applicable pour la comparaison des courbes 2 et 3GF.

En augmentant le niveau de glace minimal à maintenir à 52%, on remarque que le coût du stockage est similaire. En effectuant cette opération on pourrait garantir un groupe en sécurité.

Si la consommation énergétique du HFME et NHM ne nécessite pas l'utilisation d'un groupe froid indirect en production. On pourrait considérer le stockage de glace avec seulement 2 groupes. Cela permettrait de diminuer la puissance souscrite n'environ 300kWe. Ce qui pondéré au coefficient d'évaluation de la prime fixe équivaudrait une économie d'environ 16k€ par ans.

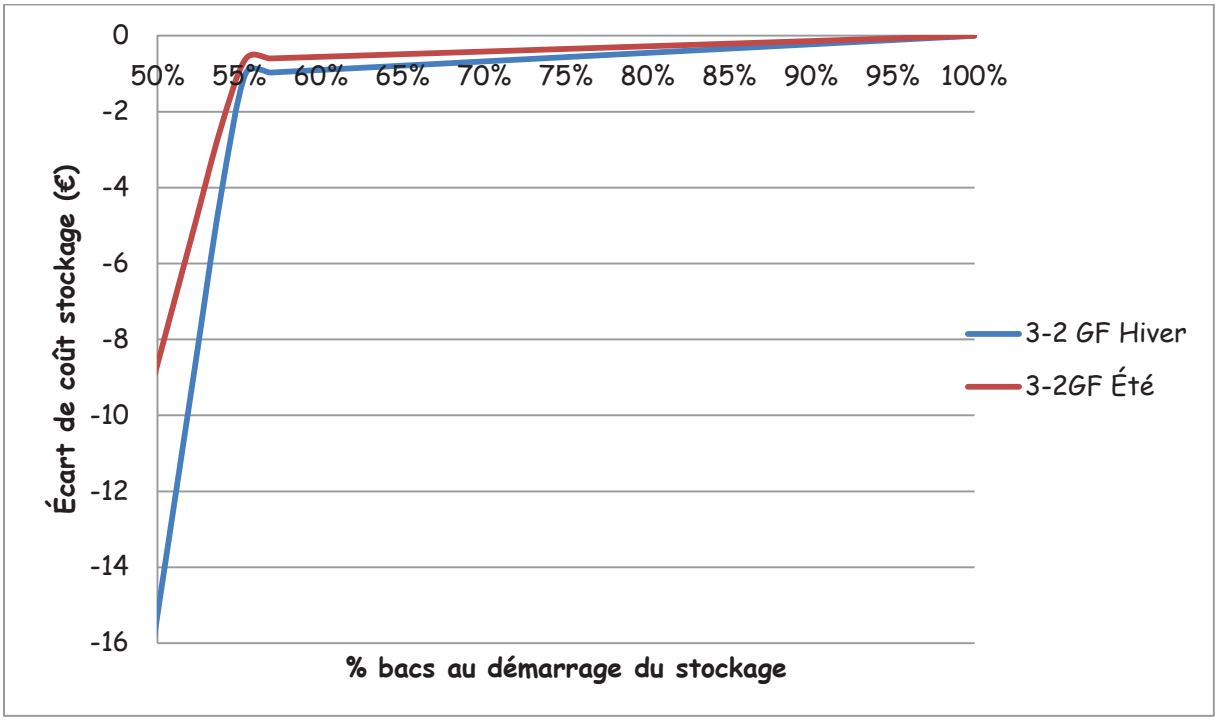
Néanmoins, la puissance souscrite correspond à la puissance maximale utilisé par l'intégralité de la centrale. En période de canicule l'enclenchement des groupes froid, nous a poussés à consommer environ 1800kWe. Ainsi, le stockage avec 2 groupes au lieu de 3 n'a aucun sens.

Graphique III.B.5.a)-3)-2: « Évolution du coût électrique en fonction de la quantité d'énergie à stocker pour une tarification électrique Été»



On remarque que pour une tarification électrique en été, on diminue de 200€ le coût du stockage de 50% de la capacité des bacs. De plus, on remarque que le seuil de performances similaire est toujours d'un départ de 75%.

Graphique III.B.5.a)-3)-3: « Évaluation de l'écart de coût du stockage par 3 et 2 Groupes froid »



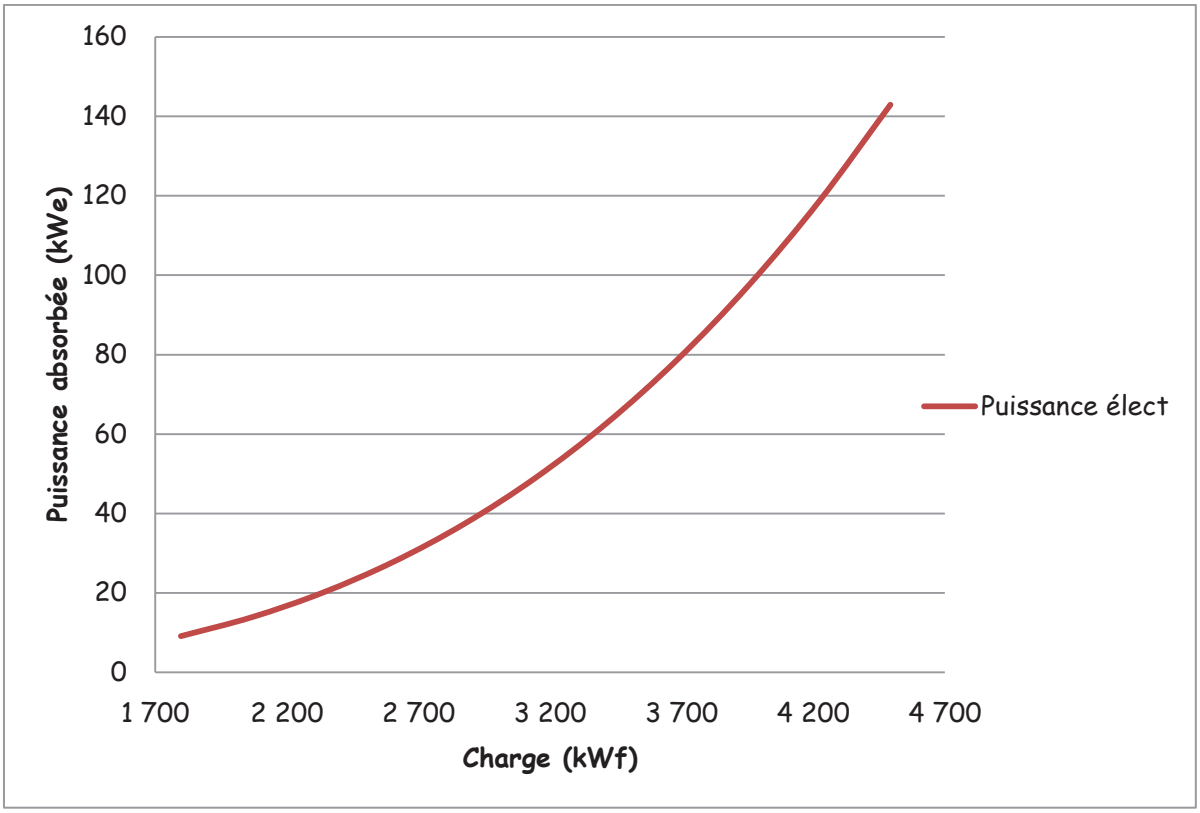
Bilan stockage: Le stockage avec 2 groupes froid n'a aucun sens car la puissance souscrite n'est pas imposée par la puissance électrique absorbée par le stockage. De plus, le faite de stocker avec 3 groupes permet de diminuer le temps de stockage et donc de stocker un maximum de froid pendant les heures creuses.

b) Déstockage

(1) Puissance absorbée

Pour déterminer l'évolution de la puissance absorbée en fonction de la charge appelée, je me suis placé dans le cas où je passais par l'échangeur 800, car le débit minimal associé à celui des pompes de déstockage correspondent.

Graphique III.B.5.b)-1): « Évolution de la puissance absorbée en fonction de la charge frigorifique appelée pour la production par déstockage »

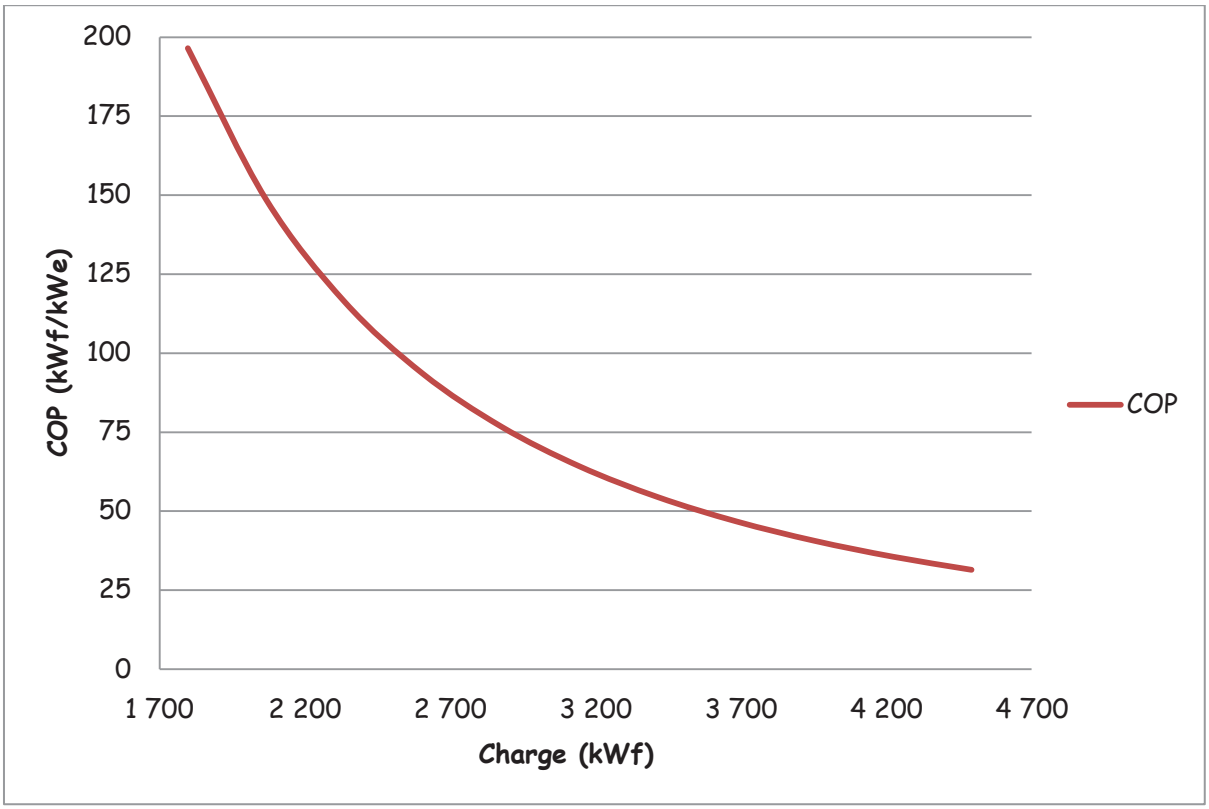


Le déstockage ne faisant appel qu'à des pompes, on remarque que l'évolution de la puissance absorbée est quadratique. Ainsi, il faudrait au maximum travailler sur des basses fréquences pour permettre d'optimiser les performances.

(2) COP

Comme cité précédemment, on remarque que de bas débit permettent d'avoir de meilleures performances. Néanmoins, pour avoir un avis justifié sur les performances réelles de la production par déstockage, il faudrait prendre en compte l'énergie permettant de stocker la glace

Graphique III.B.5.b)-2): « Évolution du COP en fonction de la charge frigorifique appelée pour la production par déstockage »



(3) COP économique

Pour évaluer la rentabilité du déstockage face aux différents tarifs horaires, j'utilise la notion de COP économique introduit précédemment. Ainsi, j'ai pondéré les puissances en fonction du coût horaire pendant la consommation électrique du stockage et du déstockage :

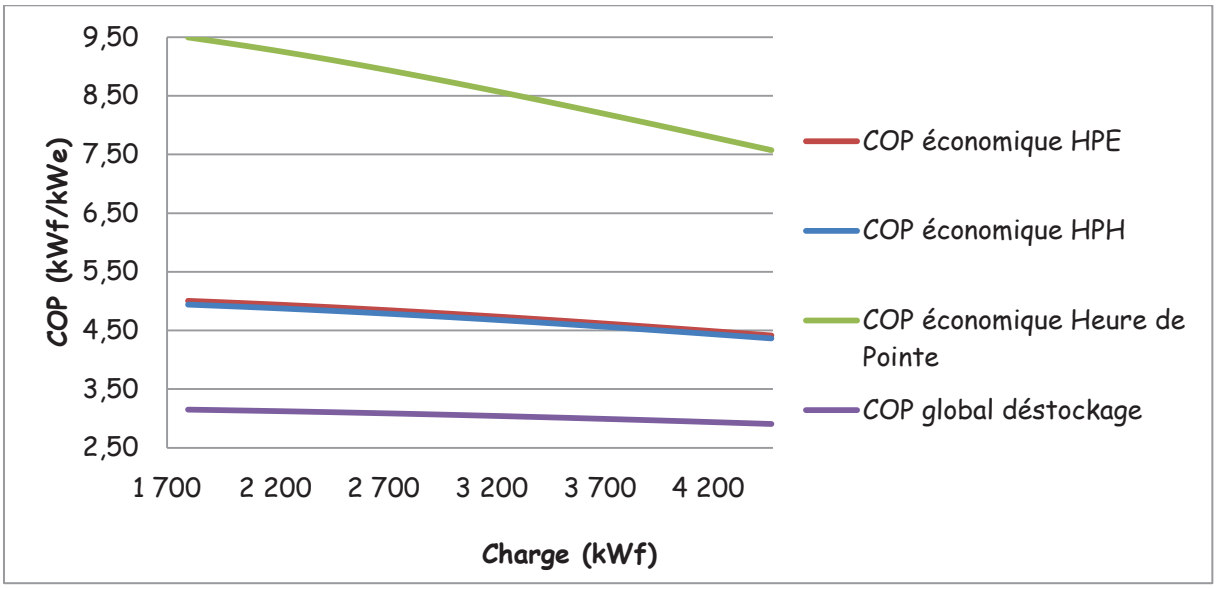
Pondération du COP en fonction des tarifs horaires.

$$COP = \frac{\dot{Q}_F}{\Sigma\left(\dot{W}_e^{Stockage} + \dot{W}_e^{Déstockage}\right)}$$

COP économique :

$$COP = \frac{\dot{Q}_F * C_{Q_F}}{\Sigma\left(C_{W_e^{Stockage}} * \dot{W}_e^{Stockage} + C_{W_e^{Déstockage}} \dot{W}_e^{Déstockage}\right)}$$

Graphique III.B.5.b)-3): « Évolution du COP économique en fonction de la charge frigorique et selon différents tarifs horaires »



COP économique				
P	HPH	HCH	HPE	HCE
7,894	4,234	2,8425	2,537	1,753

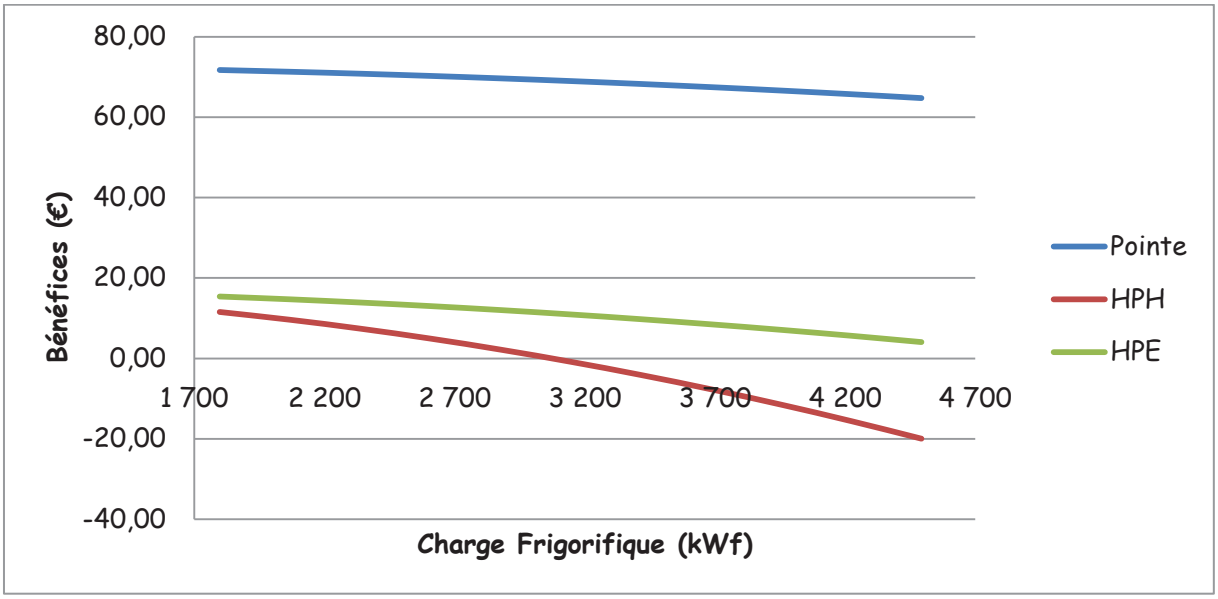
En comparaison au COP économique minimum déterminé précédemment, on remarque que les COP économique sont facilement atteignable pour de bases puissance. Ainsi, le déstockage est un élément clé pour la gestion de la production frigorifique.

(4) Coût réel du déstockage

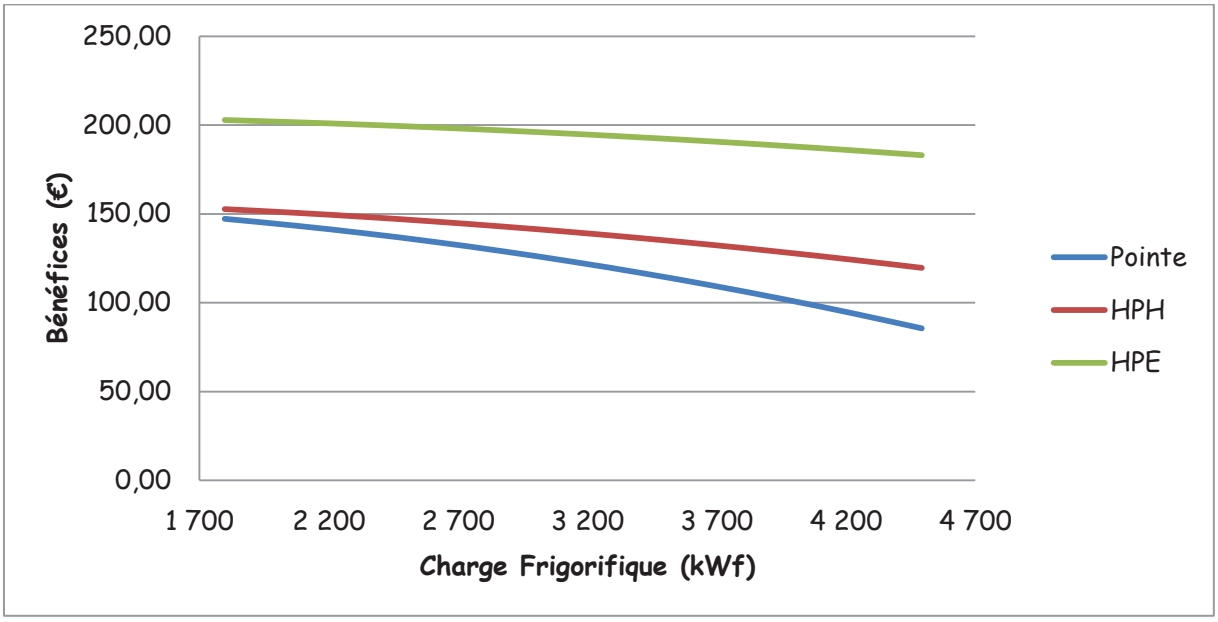
(a) Déstockage de 50% de la capacité des bacs

Pour estimer le coût réel du stockage, je prends en compte le coût du stockage en le ramenant à la puissance de déstockage et j'ajoute le coût du déstockage.

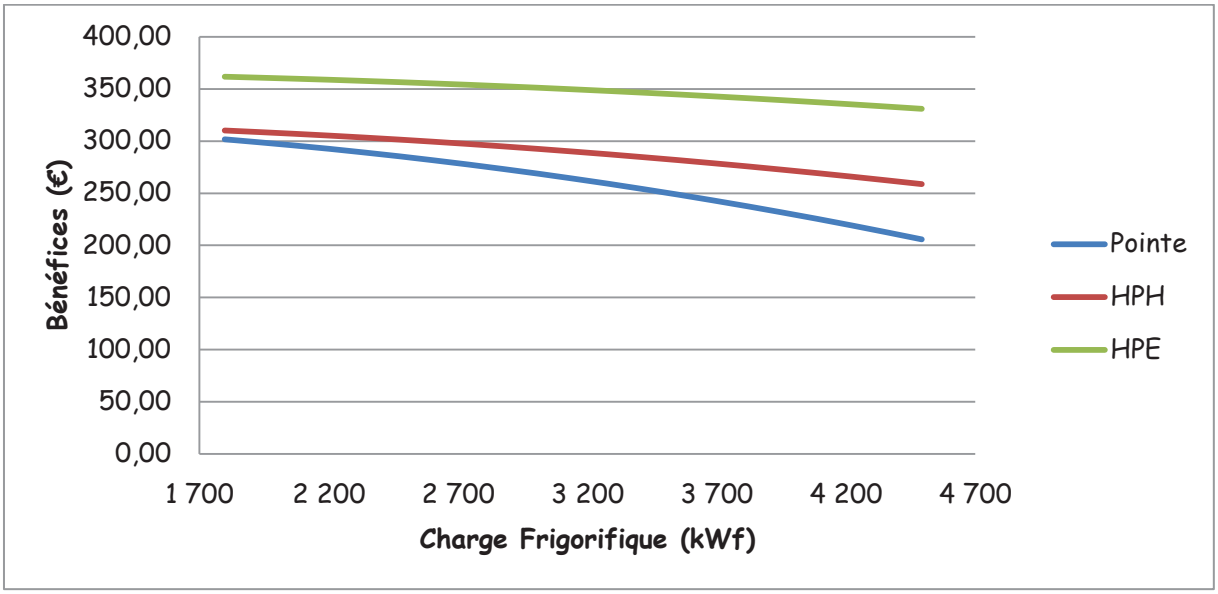
Graphique III.B.5.b)-4)-a)-1: « Évolution des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée comme constante pour un stockage avec 1GF »



Graphique III.B.5.b)-4) -a)-2: « Évolution des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée comme constante pour un stockage avec 2GF »

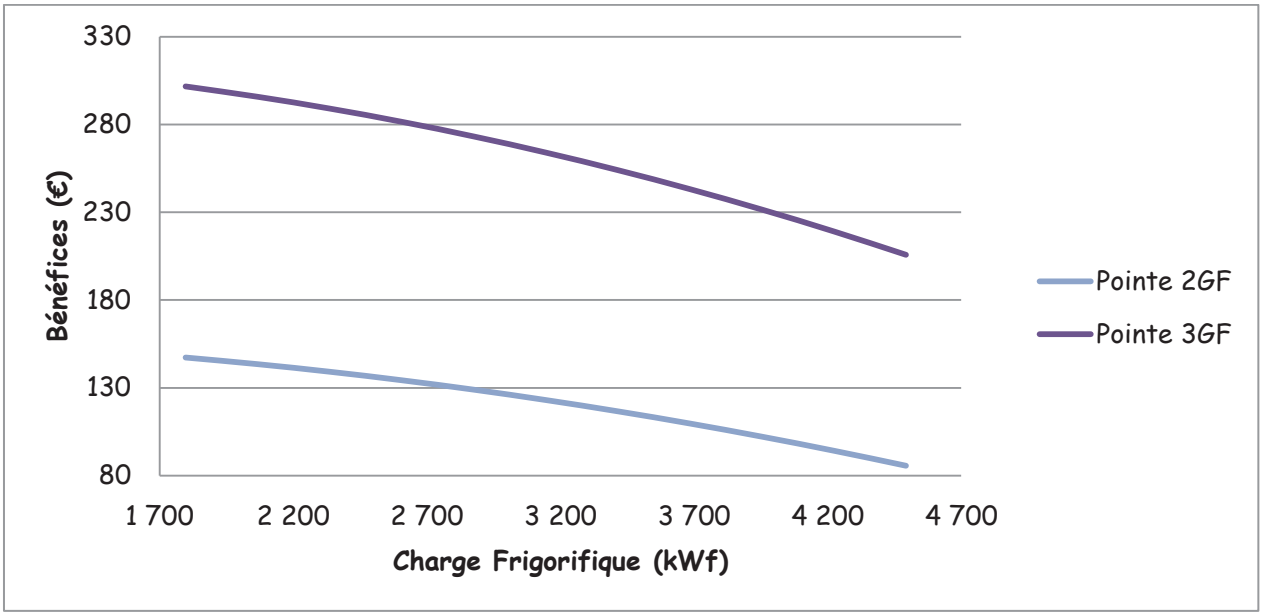


Graphique III.B.5.b)-4) -a)-3:« Évolution des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée comme constante pour un stockage avec 3GF »

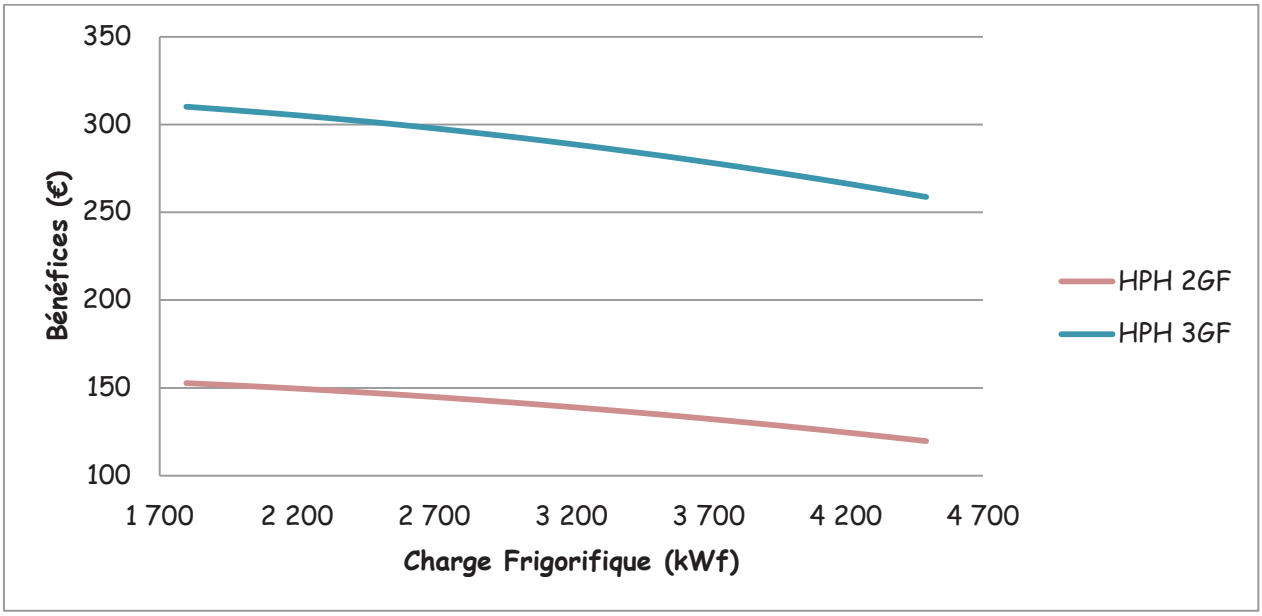


Remarque : On observe qu'il est très peu favorable de stocker avec un groupe. En revanche stocker avec 2 ou 3 groupes et fortement rentable, même en heure de pointe.

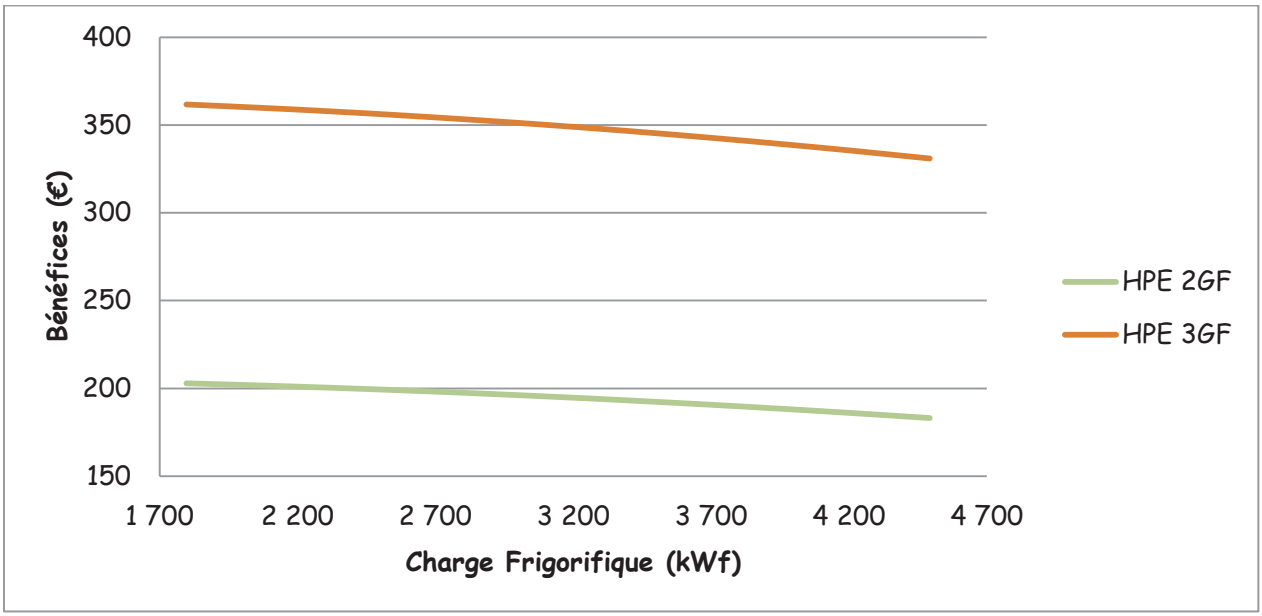
Graphique III.B.5.b)-4) -a)-4 : «Comparaison des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée entre un stockage avec 3 et 2 GF en heure de pointe»



Graphique III.B.5.b)-4) -a)-5: «Comparaison des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée entre un stockage avec 3 et 2 GF en heure pleines Hiver»



Graphique III.B.5.b)-4) -a)-6: « Comparaison des bénéfices en fonction de la charge frigorifique considérée entre un stockage avec 3 et 2 GF en heure pleines Été »

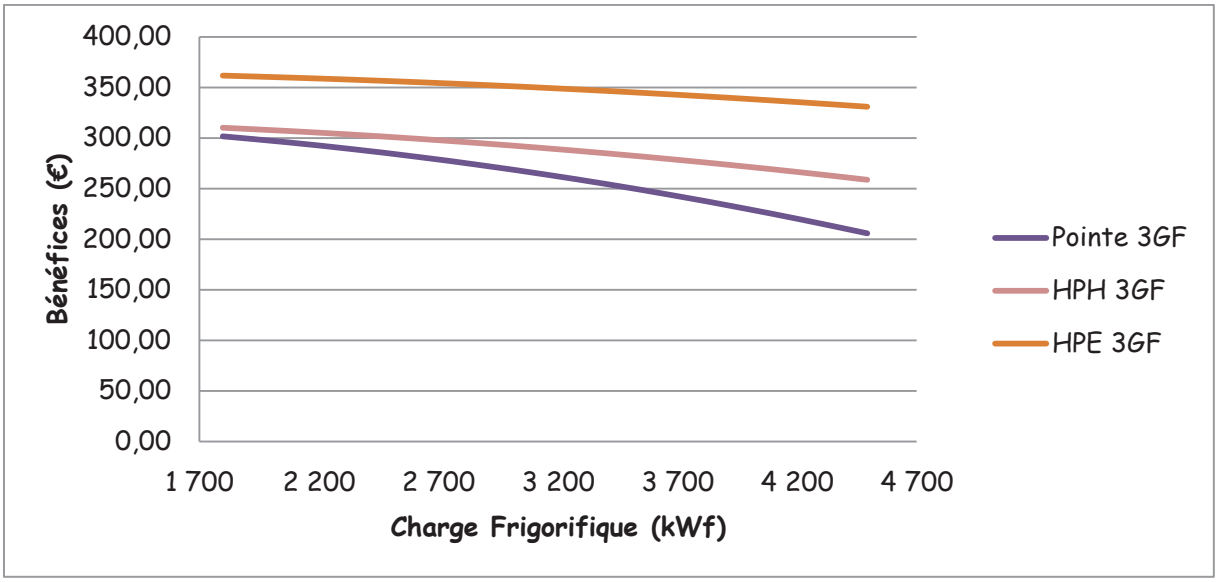


(b) Déstockage de 70% de la capacité des bacs

Le déstockage de 50% de la capacité permet de garantir une puissance de 4.5MW pendant 4h. Néanmoins, si on diminué cette marge pour garantir la production pendant une heure, cela permettrait d'effectuer plus de bénéfices.

Ainsi, dans cette partie je me place dans le cas d'un stockage avec 3 groupes pendant 8h d'heures creuses. On arrive ainsi à la courbe de bénéfices suivante :

Graphique III.B.5.b)-4)-b): « Évolution des bénéfices escomptés pour un déstockage des bacs de 70% pour une charge frigorifique constante au niveau du temps »



c) Bilan Stockage/ Déstockage

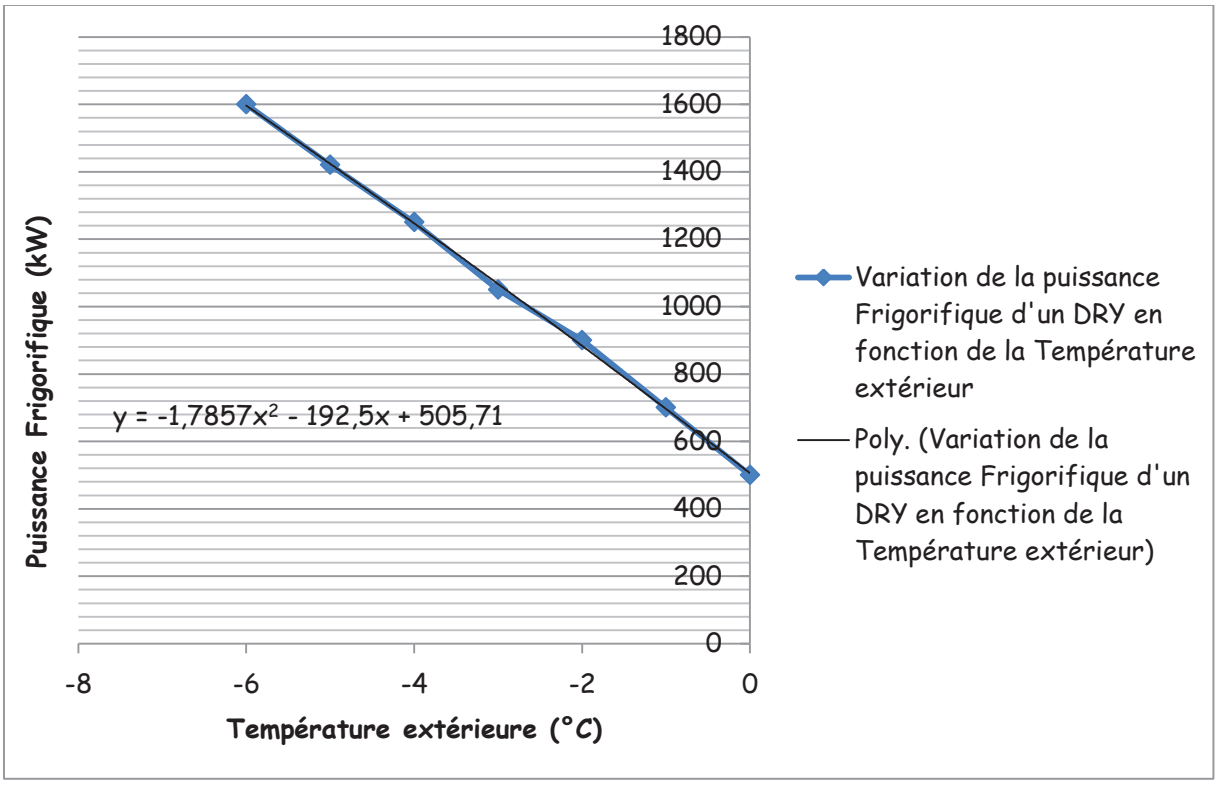
Le déstockage est un élément clé à la production énergétique hors heures creuses. Néanmoins, la puissance de déstockage doit absolument être bien gérée. Déstocker à trop grande puissance ne permet pas d'une part de faire des bénéfices. Et d'autre part limites fortement la tenue dans le temps de la production. Ainsi, en Hiver la gestion du stock en fonction des tarifs horaires devra attirer fortement notre attention.

6. Production par Freecooling

Le freecooling consiste à récupérer les frigories de l'air extérieur via des aéroréfrigérant, quand les conditions techniques et économiques le permettent. Ainsi, l'intérêt de l'étude de ce mode de production est d'évaluer les conditions nécessaires pour l'utilisation et de déterminer les plages de puissance que l'on peut escompter.

D'après les informations transmissent via mail, par Mr CABASSON, Chez de projet TRANE, nous permettent d'avoir l'évolution de la puissance frigorifique récupérable en fonction de la température extérieur.

Graphique III.B.6.: « Évolution de la puissance frigorifique récupérable par DRY en fonction de la température extérieure pour un régime d'eau glycolée de 3/9°C en entrée échangeur et une hygrométrie extérieure de 50%»



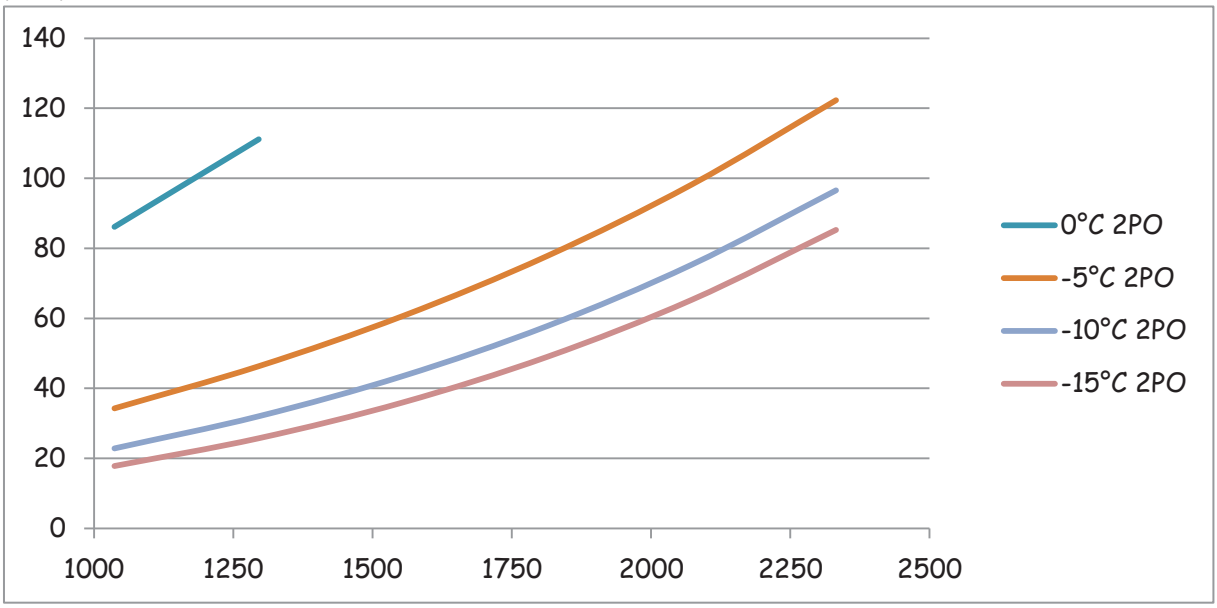
Sources : « Données techniques Aéroréfrigérant TRANE, 15/05/2012 »

En intégrant une courbe de tendance, j'ai pu déterminer la puissance récupérable en fonction des contraintes de l'échangeur 900 : Débit min et max des pompes et nombre de DRY-COOLER enclenchés.

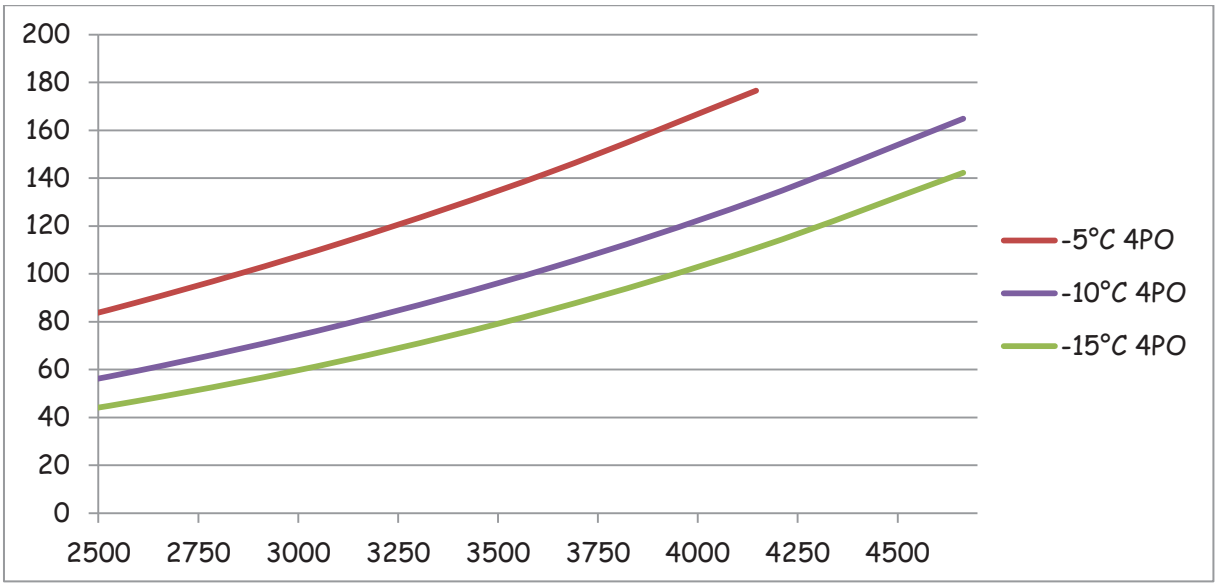
N'ayant pas de retour de la société TRANTER, je me place dans le cadre d'une efficacité d'échangeur de 90%.

a) Étude de la consommation énergétique pour un régime de 3/9°C

Graphique III.B.6.a)-1: « Évolution de la puissance absorbée en fonction de la puissance frigorifique disponible pour différentes températures extérieures avec 2 pompes en fonctionnement».



Graphique III.B.6.a)-2: « Évolution de la puissance absorbée en fonction de la puissance frigorifique disponible pour différentes températures extérieures avec 4 pompes en fonctionnement».



Remarque :

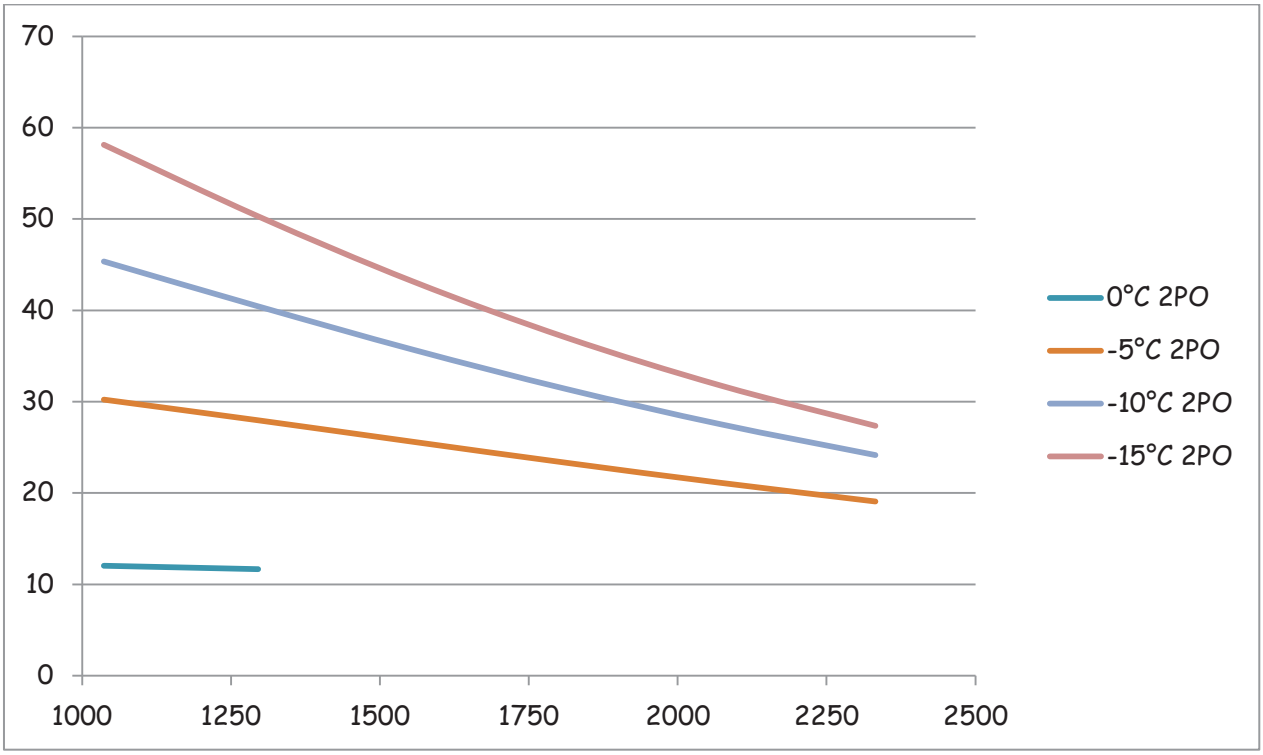
On observe que sur des températures extrême de -5/-10/-15°C, on peut récupérer le maximum de puissance que peut transmettre l'échangeur, et cela pour de faible consommation énergétique. Néanmoins pour des températures inférieures, la production frigorifique devient de moins en moins possible.

De plus, on observe qu'il faut au plus vite gérer la cascade de producteur quand les conditions extérieures le permettent. On pour ainsi diminuer fortement la consommation énergétique (40kW pour -5°C extérieur à 2500kW froid).

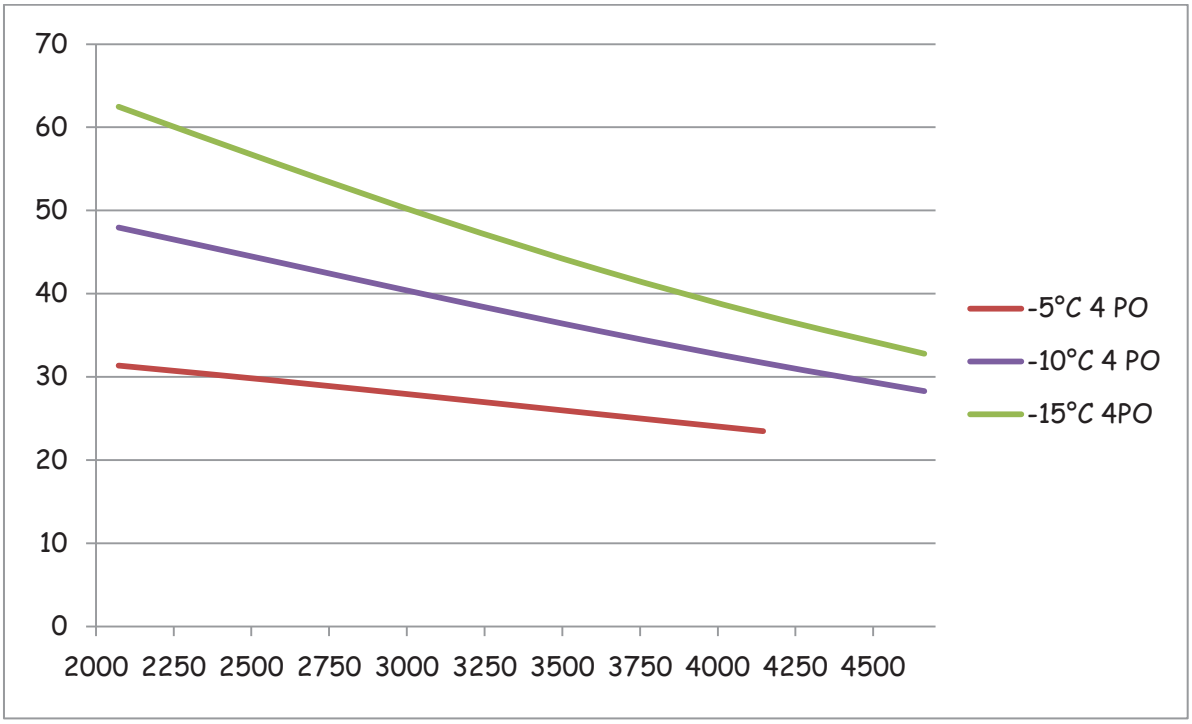
b) COP fonction de la charge frigorifique récupérable

L'évaluation du coefficient va nous permettre de comparer les performances du freecooling aux autres types de production, pour en ressortir le seuil minimal d'enclenchement.

Graphique III.B.6.b)-1 : « Évolution de la puissance absorbée en fonction de la puissance frigorifique disponible pour différentes températures extérieures avec 2 pompes en fonctionnement».



Graphique III.B.6.b)-2 : « Évolution de la puissance absorbée en fonction de la puissance frigorifique disponible pour différentes températures extérieures avec 4 pompes en fonctionnement».



Remarques :

Même en retirant toutes les pompes et aéros associées à la production directe (COP=EER), on ne peut espérer un COP que de 6.5. Ainsi, le freecooling est donc de loin plus performant que les autres types de production. De plus, le COP minimal obtenable est supérieure au COP économique en heure de pointe

c) Évaluation des seuils de puissance

Pour estimer quels sont les température maximale acceptable pour la production frigorifique par freecooling, j'ai effectué le tableau suivant (Tableau XXX), qui met en évidence que la production d'eau glacée à 5°C par freecooling n'est possible uniquement pour des températures inférieures à 0.9°C avec un COP de 8.36, ce qui reste toujours super intéressant.

Tableau III.B.6.c): « Évaluation de la puissance absorbée et du COP en fonction de la pui

	Puissance frigo estimée (kWf)			Puissance absorbée (kWe)			
Text	1 DRY	2 DRY	3 DRY	1 DRY	2 DRY	3 DRY	1
-5	1 423,59	2 847,18	4 270,77	44,14	111,23	224,21	32
-4	1 241,80	2 483,60	3 725,40	50,47	100,95	189,49	24
-3	1 060,01	2 120,02	3 180,03	46,63	93,27	163,59	22
-2	878,22	1 756,44	2 634,66		104,27	145,20	
-1	696,43	1 392,86	2 089,29		92,42	133,05	
0	514,64	1 029,28	1 543,92		85,40	136,66	
0,5	423,75	847,49	1 271,24			129,72	
0,9	351,03	702,06	1 053,09			125,94	

d) Bilan Freecooling

Le freecooling est le mode de production le plus intéressant. Néanmoins, il dépend des conditions extérieures. Ainsi, pour des températures inférieures à 0.9°C, l'utilisation de ce mode en production d'eau glacée à 5°C sera à mettre en priorité.

La connexion avec le retour du réseau secondaire pour son refroidissement, représente une utilisation tout autant intéressante et la pratique devra confirmer le seuil de 2°C extérieure pour l'enclenchement des DRY. En effet, le COP étant tellement élevé que refroidir de 2°C la température extérieur faira augmenter le COP globale même en diminuant celui des groupes froids directes.

C. Gestion de la production

1. Mode de fonctionnement

Le process étant composé de 5 types de production de froid, il en découle un nombre théoriques de combinaisons

Néanmoins, ce nombre de combinaison théorique est réduit par les contraintes techniques du process. À partir du plan PID du process froid (Annexe 3 page 3), je peux en ressortit le tableau des contraintes techniques suivant :

Tableau III.C.1-1 : « Tableau des impossibilités techniques de production frigorifique ».

	Combinaison	Raison
1	**Stockage et déstockage en même temps**	Conduite bacs à glace commune au Stockage et déstockage
2	**Stocker de la glace par freecooling**	La puissance des pompes de stockage n'est pas suffisante pour vaincre les pertes de charge des bacs à glace et des aéros
3	**Stocker de la glace par production direct**	Les deux circuits ne communiquent que via les échangeurs à plaques Et le régime de température ne le permet pas

En retirant ces contraintes je suis arrivé à en ressortir 20 combinaisons, comme le montre le tableau suivant :

Tableau III.C.1-2: « Tableau des combinaisons techniquement possible».

1	PROD DIRECTE			
2	PROD INDIRECTE			
3	STOCKAGE			
4	DÉSTOCKAGE			
5	FREECOOLING			
6	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE		
7	PROD DIRECTE	STOCKAGE		
8	PROD DIRECTE	DÉSTOCKAGE		
9	PROD DIRECTE	FREECOOLING		
10	PROD INDIRECTE	FREECOOLING		
11	STOCKAGE	FREECOOLING		
12	DÉSTOCKAGE	FREECOOLING		
13	PROD DIRECT	PROD INDIRECTE	STOCKAGE	
14	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	DÉSTOCKAGE	
15	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	FREECOOLING	
16	PROD DIRECTE	STOCKAGE	FREECOOLING	
17	PROD INDIRECTE	STOCKAGE	FREECOOLING	
18	PROD INDIRECTE	DÉSTOCKAGE	FREECOOLING	
19	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	STOCKAGE	FREECOOLING
20	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	DÉSTOCKAGE	FREECOOLING

Si on définit la production directe prioritaire à celle indirect du faite de ses performances, on peut supprimer l'ensemble des combinaisons indirectes avec d'autres producteurs quand la production directe n'est pas prise en compte…

Ceci, en se plaçant dans le cadre d'un mode non dégradé : aucun producteur n'est défaillant ou rendu indisponible.

De plus, en termes de consommation frigorifique, la production hivernale de plus de 7MW froid est théoriquement impossible.

Ainsi, le tableau suivant reprenant les combinaisons possible techniquement-économiquement et logiquement envisageable :

Tableau III.C.1-3 : « Tableau des combinaisons techniquement économiquement et logiquement envisageable ».

1	PROD DIRECTE			
2	STOCKAGE			
3	DÉSTOCKAGE			
4	FREECOOLING			
5	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE		
6	PROD DIRECTE	STOCKAGE		
7	PROD DIRECTE	DÉSTOCKAGE		
8	PROD DIRECTE	FREECOOLING		
9	STOCKAGE	FREECOOLING		
10	DÉSTOCKAGE	FREECOOLING		
11	PROD DIRECT	PROD INDIRECTE	STOCKAGE	
12	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	DÉSTOCKAGE	
13	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	FREECOOLING	
14	PROD DIRECTE	STOCKAGE	FREECOOLING	
15	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	STOCKAGE	FREECOOLING

2. Proposition de gestion des modes de fonctionnement

a) Mode de fonctionnement retenus

Néanmoins devant ce panel de combinaison envisageable, l'analyse fonctionnel TRANE relève 8 modes de fonctionnement choisi :

Tableau III.C.2-a) : « Combinaison retenue par TRANE ».

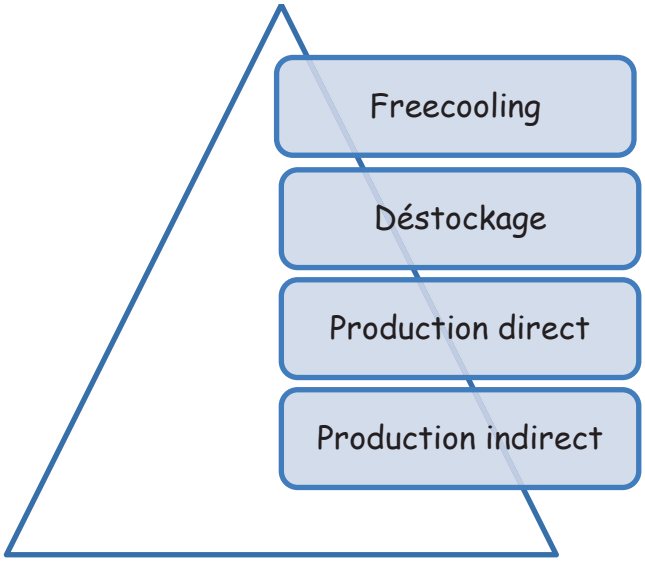
1	PROD DIRECTE		
2	STOCKAGE		
3	DÉSTOCKAGE		
4	FREECOOLING		
6	PROD DIRECTE	STOCKAGE	
7	PROD DIRECTE	DÉSTOCKAGE	
8	PROD DIRECTE	FREECOOLING	
12	PROD DIRECTE	PROD INDIRECTE	DÉSTOCKAGE

La gestion de ces modes de fonctionnement doit être choisie en fonction des performances des producteurs suivant les conditions extérieures et les tarifs horaires.

b) Échelle de performance

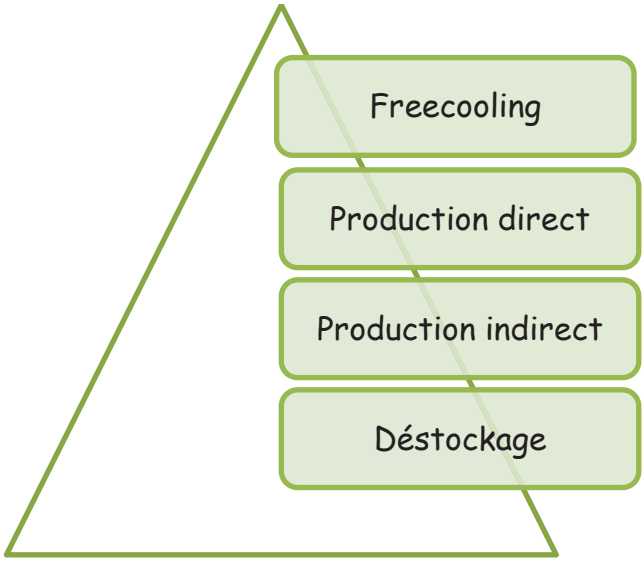
Le travail effectué précédemment confirme l'analyse fonctionnelle TRANE sur le fait que les performances des producteurs peuvent se classés en niveaux. Ainsi, dans le cadre d'un fonctionnement non dégradé, en période d'heures de pointes ou pleines, on peut déterminer les échelles de priorité suivantes :

Schéma III.C.2-b)-1 : « Niveaux de priorité des producteurs en heures de pointes et pleine »



En heures creuses le rapport tarifaire est égal à 1. Ainsi, le déstockage devient moins intéressant que la production indirecte. Ce qui restructure l'échelle de priorité :

Schéma III.C.2-b)-2: « Niveaux de priorité des producteurs en heures creuses »



c) Gestion des combinaisons de producteurs

Ce que ne met pas en évidence l'analyse fonctionnelle TRANE, est que malgré les performances plus avantageuses du déstockage en heures pleines et de pointes, nous sommes contraints en termes de capacité des bacs. Ainsi, pour gérer le stock au mieux, il faut absolument ne pas déstocker à puissance trop élevée.

De plus, en hiver, la présence d'heure de pointe (4h/jour), induit un coût de l'énergie environ 3 fois plus élevé. Ainsi, le déstockage devra être valorisé au maximum pendant ces heures. Pour cela, il faudrait estimer la consommation moyenne d'une journée d'hiver, mais surtout la puissance appelée au long de la journée.

Donc, pendant une journée d'Hiver la prodution directe peut devenir prioritaire pendant quelques heures pour que le déstockage puisse se faire pendant les heures de pointes.

Ainsi, l'optimisation de la gestion de la production ne pourra uniquement se faire qu'en connaissant ces paramètres.

Il ensuit, que l'exploitant doit effectuer un gros travail de retour d'expérience sur la tendance des bâtiments, et surtout déterminer un certain nombre de seuils d'enclenchement de producteur.

(1) Gestion de la cascade d'échangeurs

La connexion thermique entre le réseau primaire et secondaire se fait à travers 3 échangeurs à plaques. À chaque échangeur est associé un ensemble de pompes permettant de véhiculer les frigories au réseau secondaire.

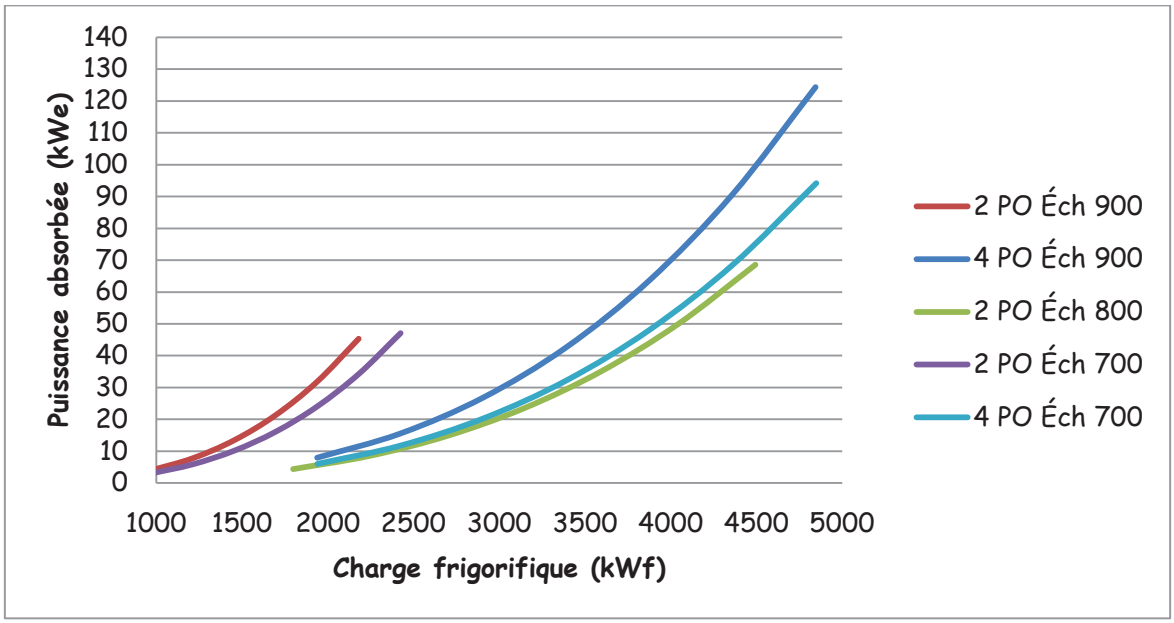
(a) Constitution

Les échangeurs 700 et 900 sont constitués de 2 pompes côté primaire et 2 autres différentes côté secondaire. Les pompes primaires sont identiques de même pour les pompes secondaires. Néanmoins, les caractéristiques des pompes de ces 2 échangeurs sont différentes. L'échangeur 800, lui est constitué de 2 pompes (primaire et secondaire). Les plages de débits de chacun des échangeurs sont quasi identiques.

(b) Évaluation des échangeurs

La consommation électrique des pompes variant au cube du débit appelé, pour diminuer le coût, il est évident de mettre le maximum de pompes en parallèle pour travailler à base fréquence. Néanmoins, pour la sécurité de production, on doit garder un des échangeurs en secours. À l'aide du schéma de calculs détaillé précédemment, j'ai pu évaluer l'influence de la charge appelée sur la puissance électrique absorbée.

Graphique III.C.2-c)-(b)-1: « Influence de la charge appelée sur la puissance électrique absorbée des échangeurs froid ».

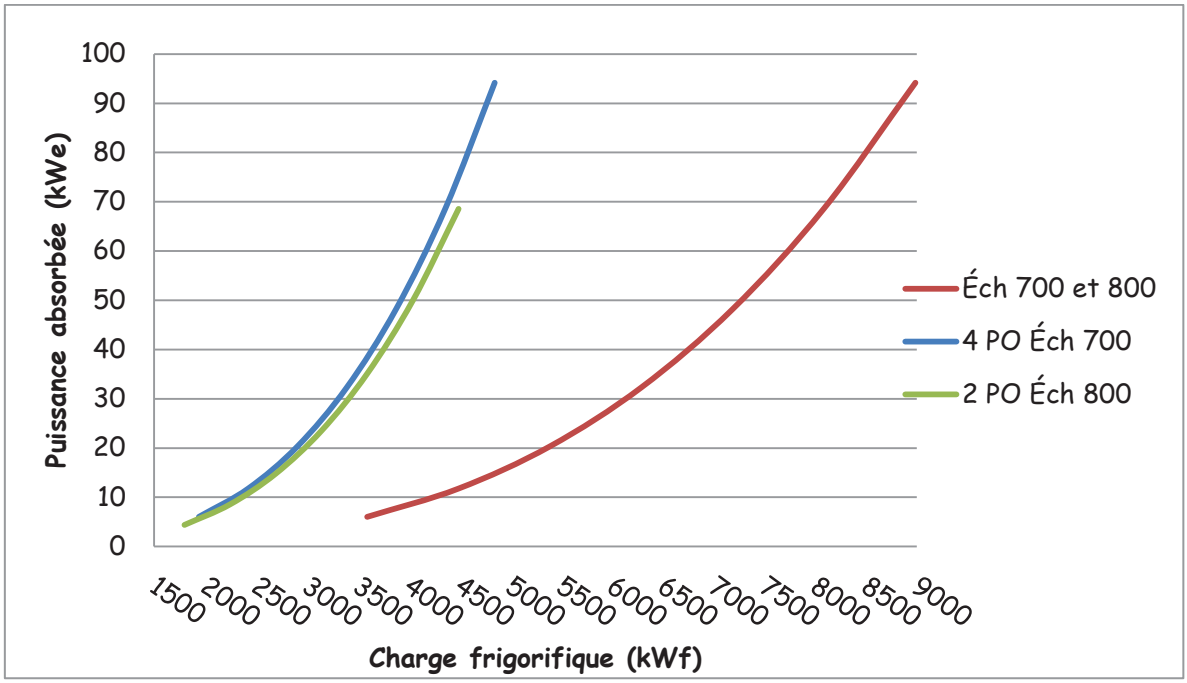


Remarque :

On constate que les combinaisons des pompes de l'échangeur 700 sont plus intéressantes que celles du 900. Ainsi, on privilégiera l'utilisation de l'échangeur 700 au 900.

Pour la plage de débits de l'échangeur 800, on remarque qu'il est beaucoup intéressant d'utiliser ce dernier que l'Éch 700 ou l'Éch 900.

Graphique III.C.2-c)-(b)-2: « Influence de la charge appelée sur la puissance électrique absorbée pour les combinaisons d'échangeurs suivantes ».



Remarque :

Par défaut, l'échangeur 900 est destiné à la sécurité de production et au freecooling. Ainsi, j'ai cherché à évaluer la combinaison des échangeurs 700 et 800. On observe qu'à partir de 3500 kW froid il est clairement intéressant.

Efficacité de 0.9 :

	QF (kWf)	Pa (kWe)	Pa (kWe)
Éch 800	3594,66	37,81	23,09
Éch 800+700		14,71	

Efficacité de 1 :

	QF (kWf)	Pa (kWe)	Pa (kWe)
Éch 800	3594,66	30,76	17,29
Éch 800+700		12,86	

On observe clairement que la baisse de 10% d'efficacité d'un échangeur induit 6,2 kWe de puissance absorbée supplémentaire. Ainsi, pour la gestion de la cascade, il est primordial de suivre les performances des échangeurs.

IV. Retour d'expérience

Le retour d'expérience d'une installation permet de comprendre son fonctionnement réel, et d'y adopter une gestion plus fine en vue d'optimiser la production. C'est l'élément clé de l'amélioration continue.

Du fait que l'Hôpital et la maternité ne soit pas en encore service, je ne peux pas encore avoir une visibilité sur le comportement réel des consommateurs frigorifiques.

Néanmoins, dans cette partie je souhaite vous présenter une démarche de réflexion sur les éléments d'analyse du retour d'expérience et l'étude des besoins actuels du NHM en termes de rafraichissement de l'air.

D. Répartition des points de mesure de consommation frigorifique

La consommation frigorifique varie tout au long de l'année selon :

- La saison
- Le mois
- Les périodes de la semaine
- Et le moment de la journée

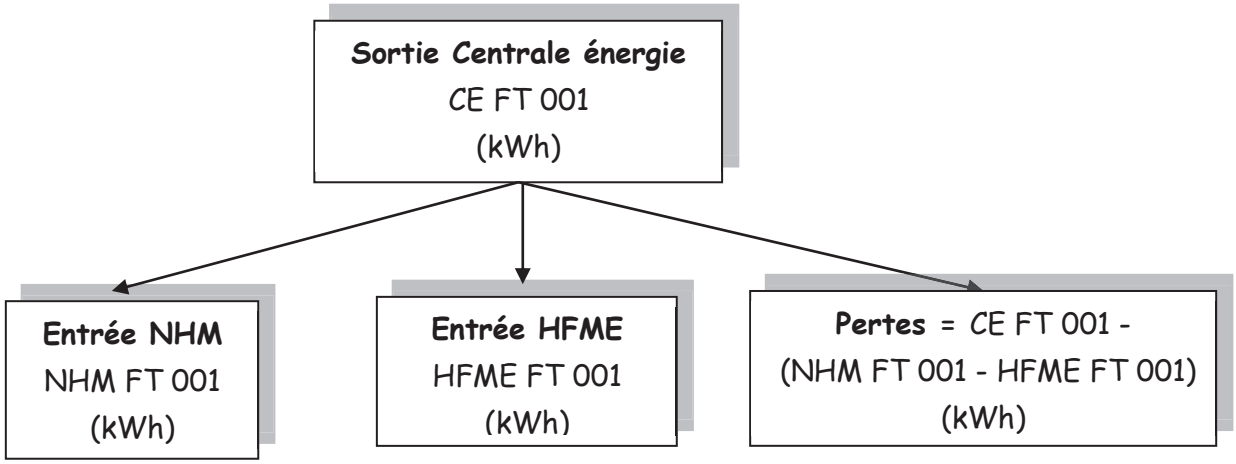
Pour étudier les comportements de consommation, il est primordial de décomposer les systèmes.

1. Répartition globale de la consommation

La répartition globale de la consommation énergétique se mesure à l'aide de 3 compteurs énergie :

- **Sortie Centrale Énergie :** CE FR FT 001
- **NHM :** CE NHM FT 001
- **HFME :** CE HFME FT 001
- **Pertes énergétiques réseaux et consommation CVC réseau :** CE FR FT 001- (CE NHM FT 001 + CE HFME FT 001)

Schéma IV.A) : « Décomposition globale de la consommation frigorifique :



La conception, l'implantation géographique et le fonctionnement des deux bâtiments étant différentes, il est primordial de savoir évaluer leur comportement dans le temps. Ainsi, les points clés à suivre sous différentes échelles (saisons/ mois/ semaine/ jours) sont :

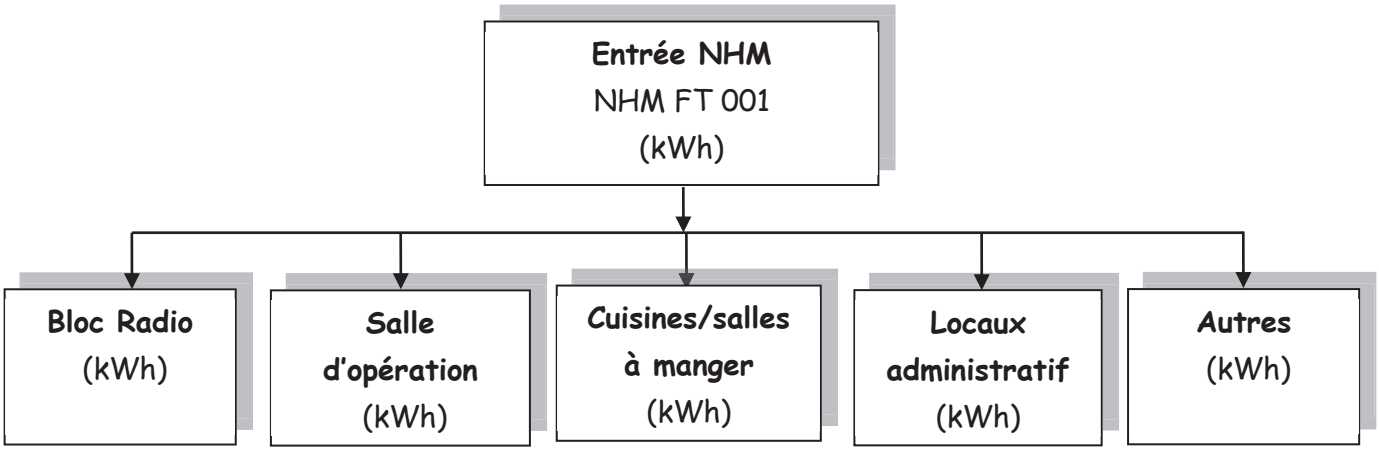
- Charge minimale et maximale
- L'amplitude des variations jour et nuit
- Répartition horaires
- Consommation globale

2. Décomposition en sous-systèmes

Les systèmes NHM et HFME peuvent se décomposer en sous-systèmes. La GTB des bâtiments et les compteurs énergétiques installés, permettront une analyse plus fine de ces différentes zones. Ainsi, quand nous aurons les accès, on pourra ainsi distinguer :

- Les consommations fixes dues à l'utilisation médicale classique (IRM, Salle d'opération, etc.).
- L'influence
  - des variations climatiques (Hr, Text, Apport Solaires)
  - et l'occupation

Schéma IV.B : « Exemple de décomposition des systèmes »



3. Intérêts de la décomposition temporelle

a) Saison

Les saisons de l'année pilotent les conditions extérieures : flux solaire, température, aspect vestimentaire, et autres. Il en découle que la consommation frigorifique va varier le temps. En effet, en théorie on devrait consommer plus de froid en été qu'en Hiver.

Le coût électrique variant aussi pendant les saisons, il devient primordial de savoir quels vont être les plages moyennes de la consommation pour gérer au mieux la production (gestion du déstockage).

b) Fluctuation d'une semaine

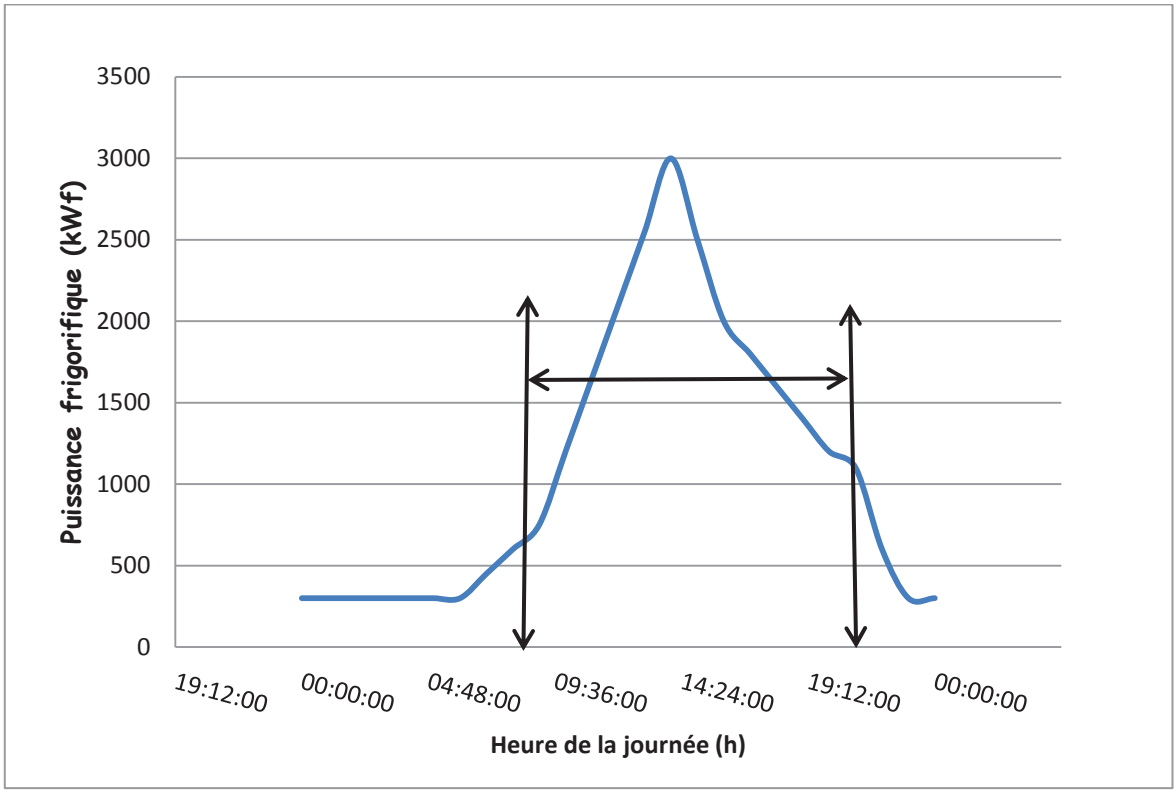
En générale l'occupation des personnels (administratifs et autres) est moins importante sur des jours ouvrés, de même sur les périodes de vacances scolaire et jours fériés. Ainsi, on peut cibler l'importance de cette théorique baisse de la consommation par rapport à une journée « normale ».

c) Fluctuation sur une journée

La demande frigorifique dépend des conditions extérieures (apports solaire max à 12h) et des besoins (par service en majorité réparti de 9h à 19h).

La société TRANE ayant déjà travaillé sur la production frigorifique d'autres Hôpitaux, moins grands et moins récents, ils ont pu me fournir des données représentant la tendance de consommation frigorifique d'un Hôpital à Strasbourg.

Graphique IV.C.3 : « Courbes TRANE, comportement standard de la consommation d'un Hôpital en Été ».



On remarque que le comportement est représentatif de ce qui a été expliqué précédemment en termes de répartition frigorifique. De plus on observe une amplification de la consommation entre 4h et 14h00 de 2 700kW froid. Ainsi, il faudra absolument évaluer ce pique de consommation pour ne pas couler sous la demande et ne plus garantir le régime de température imposé par le contrat de partenariat.

E. Proposition de résonnement pour l'analyse du retour d'expérience

La consommation frigorifique se compose de la manière suivante :

$$\dot{Q}_F^{Totale} = \dot{Q}_F^{Part\ service} + \dot{Q}_F^{Climatisation} + \dot{Q}_F^{Apports\ Interne} + \dot{Q}_F^{Apports\ solaire}$$

Avec :

$\dot{Q}_F^{Part\ service}$: Besoins frigorifiques nécessités pour le refroidissement du matériel médical.

$\dot{Q}_F^{Climatisation}$: Besoins frigorifiques pour refroidir et déshumidifier l'air extérieur.

$\dot{Q}_F^{Apports\ Interne}$: Besoins frigorifiques pour refroidir tous les apports internes, Humain, machines, etc.

$\dot{Q}_F^{Apports\ solaire}$: Besoins frigorifiques nécessités pour refroidir les bâtiments chauffés par apports solaire

- Consommation Hivernale

Les besoins frigorifiques sont logiquement inférieures que ceux de l'Été. Ainsi, on peut ainsi négliger :

- Les apports lumineux étant de loin inférieure que ceux en Été
- Les besoins de refroidissement et déshumidification de l'air extérieur
- Et les apports internes car ils permettent de réchauffer l'air ambiant

Donc, en Hiver les besoins frigorifiques se résume à :

$$\dot{Q}_F^{Totale} = \dot{Q}_F^{Part\ service}$$

Avec une faible part de déshumidification de l'air recyclée chargée en humidité.

- Consommation en Été

La part de service pouvant être connue en Hiver et la part climatisation en Été étant par le retour d'expérience de la période de mise en exploitation connue.

La consommation frigorifique pour la déshumidification peut être approximée :

$$\dot{Q}_F^{Climatisation} = q_m^{entrant} \Delta H + q_m^{entrant} \Delta w\ Lv$$

Les données de consignes étant de l'air à 50% d'Hygrométrie pour 19°C de température sortie CTA. À cela correspond donc une teneur $w_{19°C}^{Hr=50\%}$ et une enthalpie $Hr_{19°C}^{Hr=50\%}$. En connaissant ces paramètres pour l'air extérieur, on peut réussir à remonter à la puissance en considérant un débit fixe (nécessité de maintenir 30% de recyclage d'air au maximum).

De plus, on peut considérer que la teneur en eau est constante sur une journée. Ainsi, l'augmentation de la température décalera les points sur le diagramme psychométrique à humidité constante. On pourra donc peut être avoir une estimation de la pointe frigorifique à 12h et 18h.

F. Analyse des courbes de production frigorifique actuelles

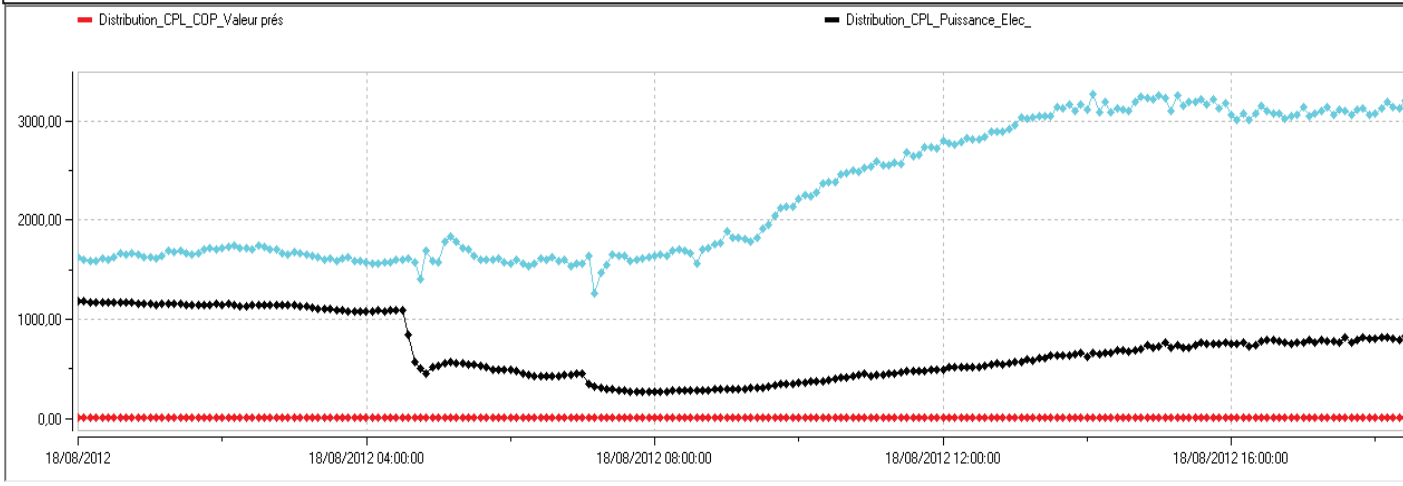
Lors du déroulement de mon stage différentes contraintes ne m'ont pas permis d'avoir une vision précise des besoins réels de l'Hôpital et de la maternité :

- La maternité n'étant finie d'être construite,
- L'occupation partielle et progressive de l'Hôpital
- Les essais et les réglages sur les consommateurs du NHM

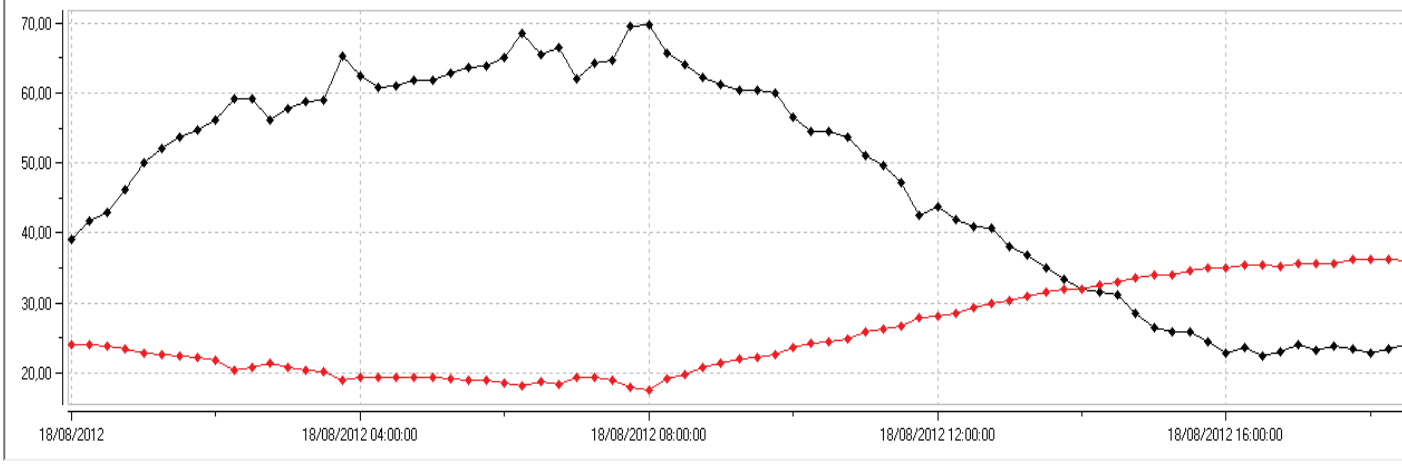
Néanmoins, les climatisations étant presque toutes en fonctionnement, la consommation actuelle donne une tendance du rafraichissement du Bâtiment.

Ainsi, la consommation du NHM pendant la période canicule permet de comprendre quel sera le niveau de consommation frigorifique maximum des climatisations pour rafraîchir le bâtiment.

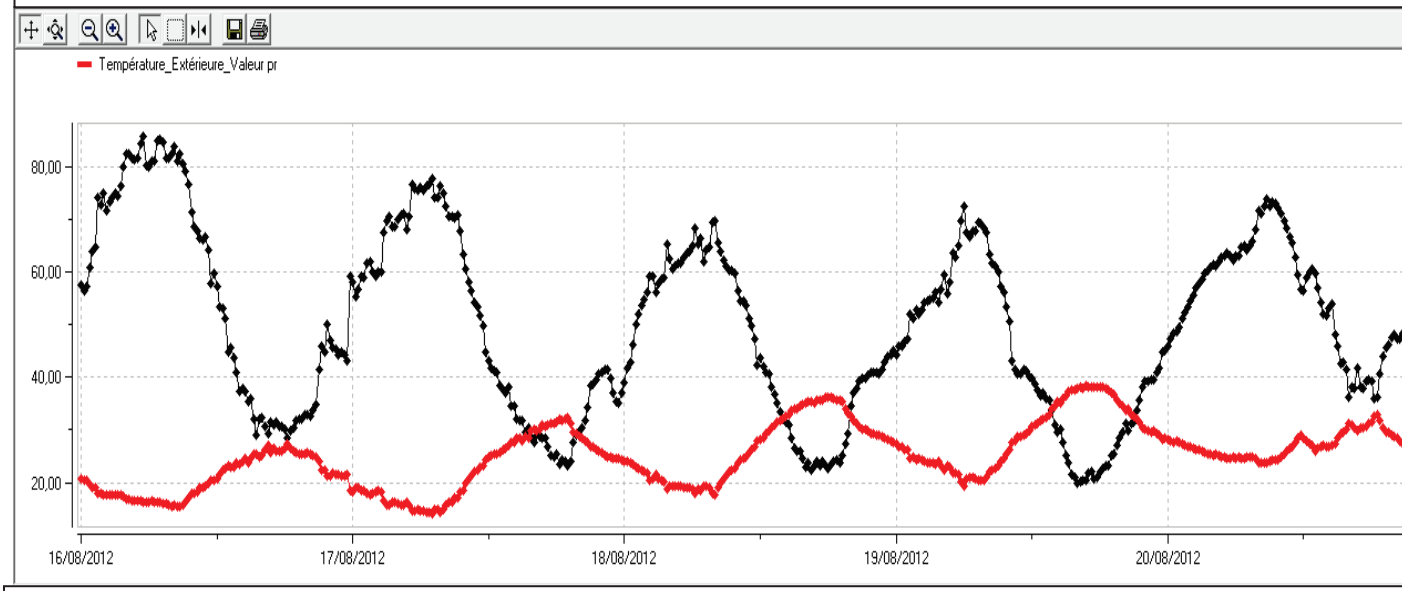
Graphique V.E-1) : « GTC TRANE- Évolution de la température et hygrométrie extérieur du 18/08/



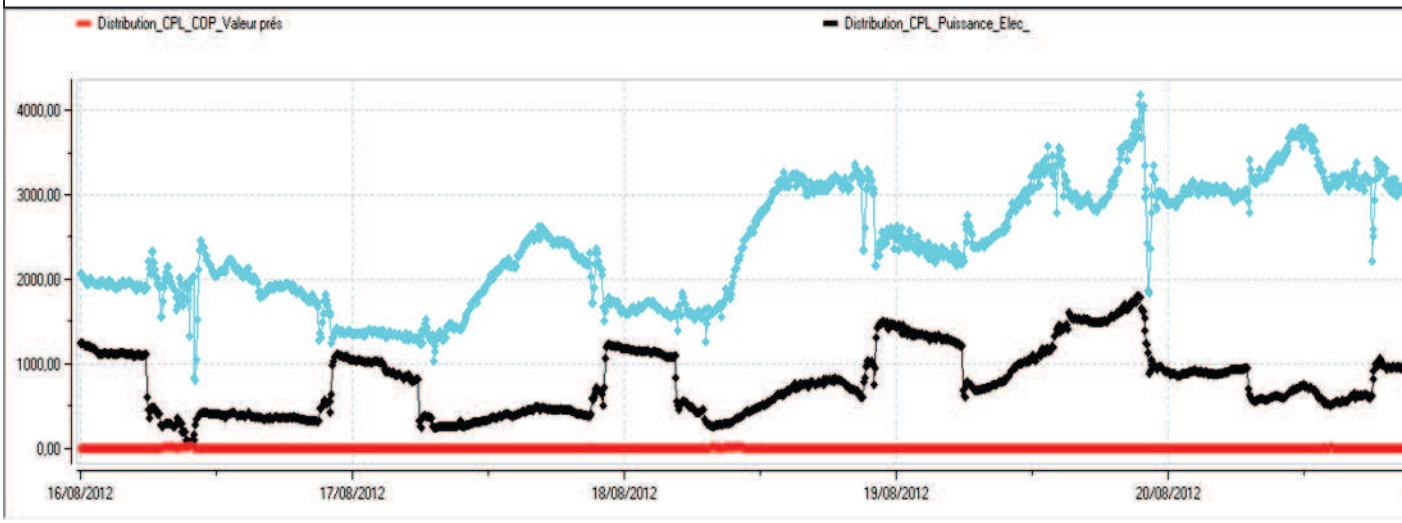
Graphique V.E-2) : « GTC TRANE- Évolution de la puissance froid et électrique du 18 /08/2012 au



Graphique V.E-1) : « GTC TRANE- Évolution de la température et hygrométrie extérieur du 16/08



Graphique V.E-2) : « GTC TRANE- Évolution de la puissance froid et électrique du 16/08/2012 au 2



Remarques : On observe que l'hygrométrie a une tendance inverse à celle de la température extérieur, mais avec une amplitude différentes.

La courbe de puissance frigorifique appelée suit la courbe de la température extérieure. Néanmoins, la puissance maximale atteinte à midi, là où les apports solaires sont plus importants. La température maximale arrive vers les 17-18h.

Il parait donc possible d'évaluer la consommation frigorifique en connaissant les apports lumineux et l'hygrométrie extérieure par la méthode décrite en **III.) IV.D**

Les apports solaires étant plus difficile à évaluer, on pourra toutefois évaluer au niveau de la GTC siemens de l'Hôpital les apports solaire en fonction du rafraichissement des poutres froid en n'oubliant pas de prendre en compte les apports interne.

IV. Conclusion

A. Conclusion Technique

L'étude que j'ai pu effectuer représente une base de réflexions permettant d'aborder l'exploitation frigorifique de la centrale. Ainsi, j'ai pu émettre de nombreuses informations complémentaires à l'analyse fonctionnelle TRANE. Notamment sur la gestion des producteurs en fonction de l'estimation de charge, en vue de garantir la production dans le temps et de diminuer le coût de la production par la suite.

En effet, une fois les réglages réseaux finalisés, et l'expérience progressive du site permettront de compléter les éléments que je laisse en suspens :

- Correction des courbes de Puissance électriques absorbées en fonction des courbes réseaux réelles
- Détermination du nombre de producteur enclenchés et gestion du stock de glace suivant la courbe de charge estimée en fonction de la période de production

B. Conclusion personnelle

Cette expérience en entreprise m'a offert une fabuleuse expérience pour ma future insertion professionnelle. En effet, elle a été enrichissante et complète tant d'un point de vue technique qu'humain.

J'ai ainsi pu prouver ma capacité à travailler de manière autodidacte, et à développer mon esprit d'analyse, tout en travaillant en collaboration avec des techniciens et ingénieurs.

Ce stage me conforte dans mes choix professionnels dans le domaine de m'énergie.

DALKIA France
Agence de Metz
4, Avenue Sébastopol
57 073 METZ BP 45 085

Annexes Mémoire :

« Optimisation de gestion de la production frigorifique de la Centrale Énergie du NHM-HFME ».







Tuteur DALKIA : Nicolas HOUOT

Philippe BIANCHI-MIRASOLE
Master 2 MEPP
Promotion 2011-2012

Sommaire Annexes

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE 1

ANNEXE 2 : DIMENSIONNEMENT DES BESOINS FRIGORIFIQUES PAR LE CHR 2

ANNEXE 3 : PID PROCESS FROID-CENTRALE ÉNERGIE NHM-HFME-DALKIA 3

ANNEXE 4: DONNÉES CONSTRUCTEUR GROUPES FROID 4

A. Groupe froid direct 4

B. Groupe froid indirect 5

C. Groupe froid indirect en stockage 6

ANNEXE 5: TABLEAU RÉCAPITULATIF DE L'ÉTUDE DES POMPES 7

ANNEXES 6 : DONNÉES TECHNIQUES DE L'ASCAGEL 8

A. Chaleur spécifique à pression constante 8

B. Masse volumique 10

ANNEXE 7: « SCHÉMAS DE CALCULS DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES DIFFÉRENTS TYPES DE PRODUCTEURS » 12

A. Production Direct 12

C. Production indirect 13

D. Stockage 14

E. Déstockage 15

F. Freecooling 16

ANNEXE 8: « SCHÉMAS DE PRODUCTION » 17

A. Mode freecooling seul 18

B. Mode Freecooling et production directe 18

C. Mode Stockage seul 19

D. Mode Déstockage seul 19

E. Mode Stockage + Direct 20

F. Mode de Production direct 20

G. Mode de Production direct + Déstockage 21

H. Mode de Production direct + Déstockage +Indirect 21

Annexe 1 : Bibliographie

Analyse fonctionnelle TRANE, version A/B/ C/D et E

Cahier des clauses techniques particulières, LOT N°12 : Production frigorifique, Indice C, 14/12/2010, DALKIA France

Commentaires TRANE sur l'analyse fonctionnelle du 24/11/2011

Contrat de partenariat, Centrale d'énergie, programme fonctionnel, 07/03/2010

Contrat Émeraude, Conditions particulières, 07/02/2012

Contrat TRANE select, 12 octobre 2010

Cours IUT de Sénart, Hydraulique industrielle, Thierry BOULAY, 2008

CPA, Conditions particulières d'achat TRANE, 11 octobre 2011

Documentation CALMAC : Stockage d'énergie par accumulation de glace,

Document DALKIA, cahier des clauses techniques, LOT n°12 production frigorifique, version du 27/09/2010

Données techniques Aéroréfrigérant TRANE, 15/05/2012

ERTH Refroidisseur de liquide à condensation par eau, compresseur à vis 20107

SALMSON, Le guide de la prescription, 2012

SALMSON, catalogue, 2012

Techniques de l'ingénieur, BE8940 Aérofrégérants directs secs, Renaud FEIDT

Techniques de l'ingénieur, BE8941 Aérocondenseurs directs secs, Renaud FEIDT

Techniques de l'ingénieur, BE9321, production et stockage de froid, Adrien VADROT

Techniques de l'ingénieur, BE9775, Stockage de froid par chaleur latente, Jean-Pierre DUMAS

Annexe 2 : Dimensionnement des besoins frigorifiques par le CHR

Pour donner une estimation de charge du HFME et du NHM, via l'entreprise PERTUY (Bouygues), le CHR à identifier les différents consommateurs frigorifiques suivants :

- ✓ Batteries froides et ventilo-convecteurs de centrale et mini-centrale de traitement d'air de caractéristiques suivantes
  - Type A: prétraitement d'air, servant à refroidir l'air neuf d'été
  - Type AM: prétraitement d'air, servant à refroidir l'air neuf l'été intégrant un coefficient
  - Type B: servant à refroidir l'air neuf l'été pour assurer les conditions internes en intégrant
  - Type BM: servant à refroidir l'air neuf l'été muni d'un caisson de mélange pour assurer les conditions internes en intégrant un coefficient
  - Unités terminales (ventilo-convecteurs, poutres froide ou équivalent, mini CTA, armoires
- ✓ Unités terminales (ventilo-convecteurs, poutres froide ou équivalent, mini CTA, armoires
- ✓ Boucle pour le refroidissement des IRM et tout autre process
- ✓ Boucle pour les groupes de condensation de chambres froides laboratoires

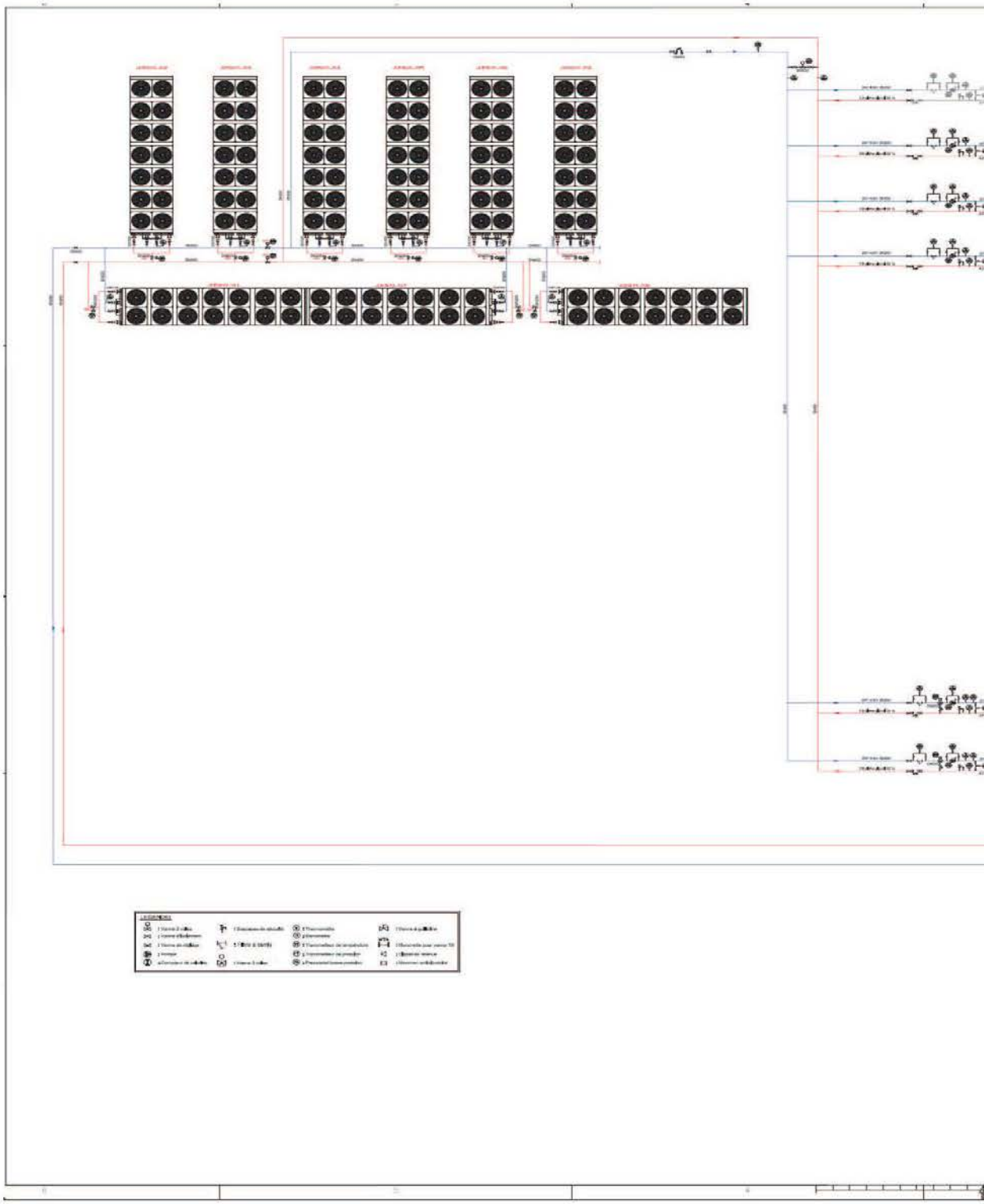
Les données techniques sur le dimensionnement font part de la prise en compte :

- ✓ D'apports suites aux pertes (tuyauteries, collecteurs, etc) estimés à 5% de de la puissance appelée
- ✓ D'un coefficient de foisonnement de 93%

Ainsi, il en découle les tableaux **tableau II.A.2.1 II.A.2.2**

Néanmoins, ces calculs restent théoriques, et surtout leur transparence est inexistante. De plus, l'aspect expérimental peut changer du tout au tout. C'est pour cela que DALKIA se place dans le respect du contrat, et que le pilotage de la centrale et le retour d'expérience du site ne pourra qu'avoir lieu avec le temps et la prise de connaissance du site.

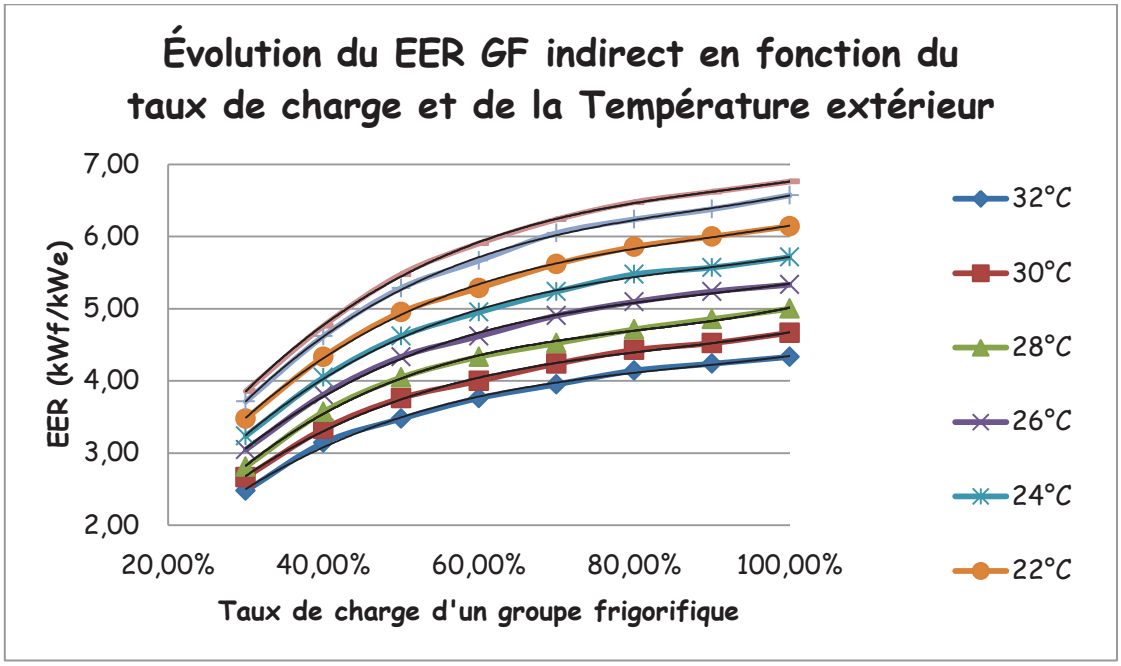
Annexe 3 : PID Process Froid-Centrale Énergie NHM-HFME-Dalkia



Annexe 4: Données constructeur Groupes Froid

A. Groupe froid direct

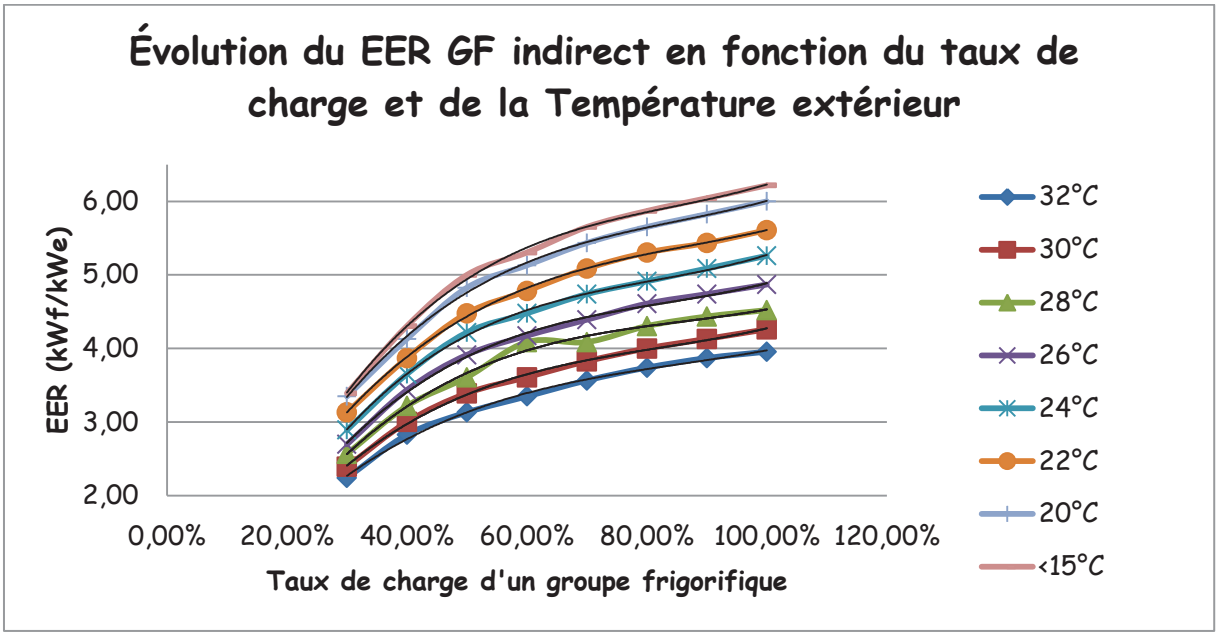
Evolution de l'EER en fonction de Tretour condenseur et de la charge Groupes froid en mode direct régime 5/11°C								
	Text (°C)							
Pourcentage charge	32	30	28	26	24	22	20	15
30,00%	2,48	2,67	2,81	3,05	3,24	3,48	3,71	3,86
40,00%	3,14	3,33	3,57	3,81	4,05	4,33	4,62	4,76
50,00%	3,48	3,76	4,05	4,33	4,62	4,95	5,29	5,48
60,00%	3,76	4,00	4,33	4,62	4,95	5,29	5,67	5,90
70,00%	3,95	4,24	4,52	4,90	5,24	5,62	6,05	6,24
80,00%	4,14	4,43	4,71	5,10	5,48	5,86	6,24	6,48
90,00%	4,24	4,52	4,86	5,24	5,57	6,00	6,38	6,62
100,00%	4,33	4,67	5,00	5,33	5,71	6,14	6,57	6,76



°C	Équation
15	$y = 7,696x^3 - 21,47x^2 + 21,367x - 0,8299$
20	y = 8,5378x3 - 22,686x2 + 21,696x - 0,9796
22	$y = 7,5758x^3 - 20,3x^2 + 19,664x - 0,7868$
24	y = 7,215x3 - 19,398x2 + 18,716x - 0,8141
26	y = 6,734x3 - 18,007x2 + 17,312x - 0,6905
28	y = 9,2593x3 - 22,506x2 + 19,516x - 1,254
30	$y = 6,734x^3 - 17,043x^2 + 15,639x - 0,6565$
32	$y = 5,772x^3 - 15,054x^2 + 14,18x - 0,5522$

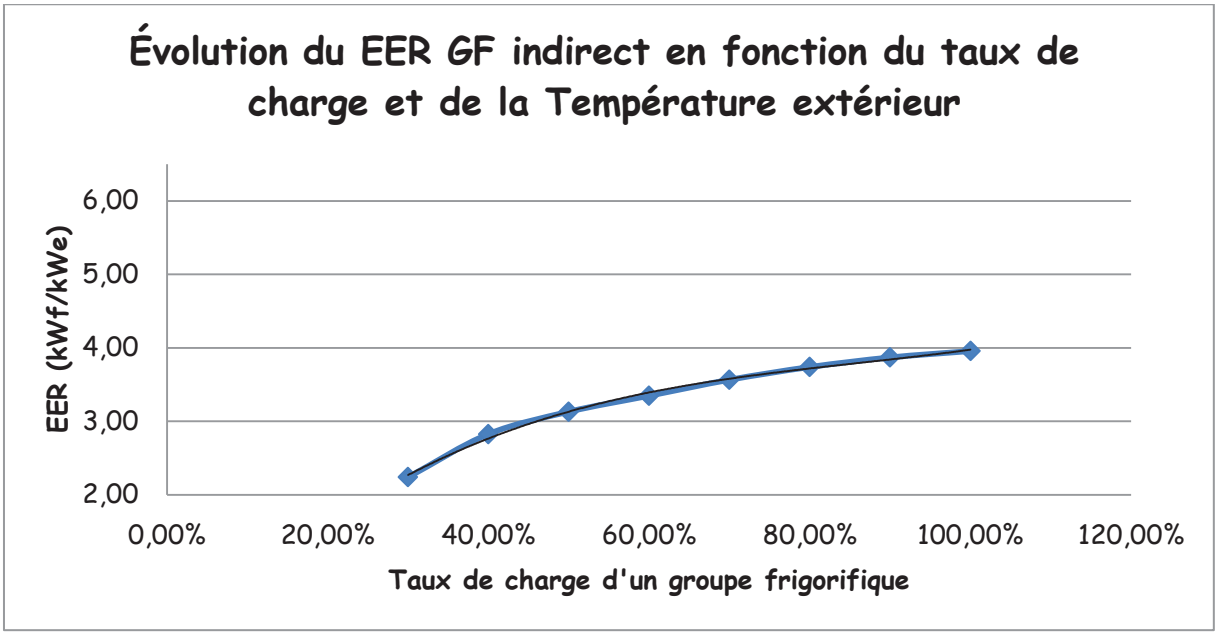
B. Groupe froid indirect

Évolution de l'EER en fonction de Tretour condenseur et de la charge Groupes froid en mode indirect eau glycolée 30% régime 3/9°C								
	Tre retour condenseur (°C)							
Pourcentage charge	32	30	28	26	24	22	20	15
30,00%	2,24	2,39	2,57	2,70	2,89	3,13	3,35	3,39
40,00%	2,83	3,00	3,22	3,43	3,65	3,87	4,13	4,30
50,00%	3,13	3,39	3,61	3,91	4,22	4,48	4,83	5,00
60,00%	3,35	3,61	4,09	4,17	4,48	4,78	5,13	5,30
70,00%	3,57	3,83	4,09	4,39	4,74	5,09	5,43	5,65
80,00%	3,74	4,00	4,30	4,61	4,91	5,30	5,65	5,87
90,00%	3,87	4,13	4,43	4,74	5,09	5,43	5,83	6,04
100,00%	3,96	4,26	4,52	4,87	5,26	5,61	6,00	6,22



°C	Équation
15	y = 9,9912x3 - 25,306x2 + 23,052x - 1,5072
20	y = 8,5639x3 - 21,979x2 + 20,477x - 1,0549
22	y = 7,1366x3 - 18,808x2 + 18,072x - 0,7919
24	y = 9,4971x3 - 23,087x2 + 20,205x - 1,3427
26	y = 8,0149x3 - 19,951x2 + 17,898x - 1,0756
28	y = 6,917x3 - 17,862x2 + 16,417x - 0,941
30	$y = 6,368x^3 - 15,782x^2 + 14,33x - 0,6429$
32	$y = 4,776x^3 - 12,354x^2 + 11,861x - 0,3075$

C. Groupe froid indirect en stockage



Les seules données que j'ai pu récupérer ont les suivantes, elles correspondent quasiment à la production indirect à un retour de 32°C.

Annexe 5: Tableau récapitulatif de l'étude des pompes

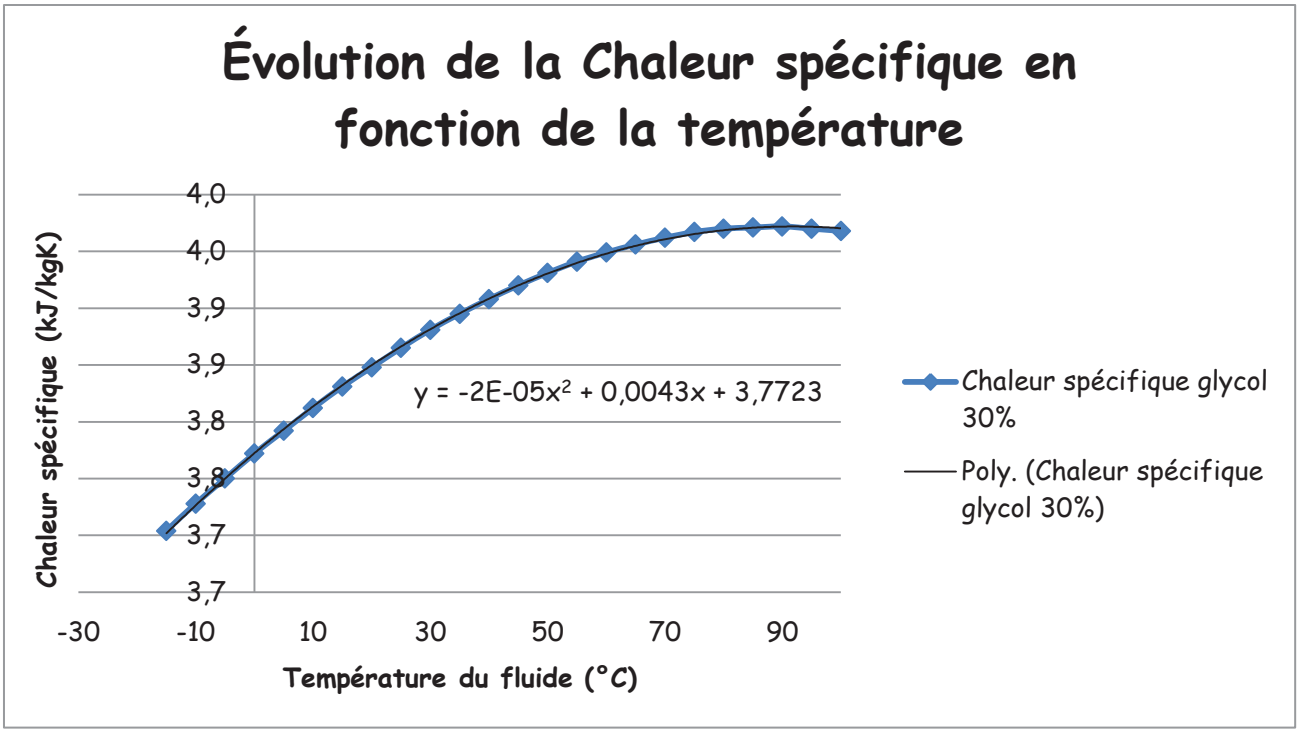
Tableau comparatif pour f= 20Hz et f=50 Hz																	
		Pa (We)		Qv (m^3/h)		HMT (mCeau)		Vitesse de rotation (tr/min)		Rendement	ro	Cp	T°départ	T°retour	delta T	Puissance froid min	Puissan m
		20 Hz	50 Hz	20 Hz	50 Hz	20 Hz	50 Hz	20 Hz	50 Hz		kg/m^3	kJ/kgK	°C	°C	°C	kW FR	kW
KSB	PO 001/002/ 003	3,972745	62,07414	330,388	825,97	3,208	20,05	594	1485	72,70%	1000	4,18	5	11	6	2762,04368	5 75
KSB	PO 004	0,580378	9,068412	219,812	549,53	0,7984	4,99	388	970	82,40%	1000	4,18	5	11	6	1837,62832	3 82
KSB	PO 100/200	0,759013	11,85958	72	180	2,8832	18,02	1177,6	2944	72,50%	1000	4,18	5	11	6	601,92	1 25
KSB	PO 300/400/500	0,714033	11,15676	72,016	180,04	2,7216	17,01	583,6	1459	74,80%	1120,4	3,9292	3	9	6	565,9305344	1 17
KSB	PO 101/201	1,602022	25,03159	112	280	4,32	27	666,4	1666	82,30%	1106,5	3,9292	37	42	5	733,4506667	1 52
SLM	PO 301/401/501	1,613654	25,21335	129,2	323	3,52	22	1092,4	2731	76,80%	1106,5	3,9292	38	42	4	676,8701867	1 41
SLM	PO 700/701	1,00574	15,71469	139,2	348	1,856	11,6	580	1450	70,00%	999,9	4,18	5	11	6	1163,712	2 42
SLM	PO 702/703	1,879484	29,36694	152,4	381	3,168	19,8	580	1450	70,00%	1120,4	3,90412	3	9	6	1189,975776	2 47
SLM	PO 800	1,476573	23,07145	258	645	1,76	11	580	1450	83,80%	999,96	4,18	5	11	6	2156,88	4 49
SLM	PO 801	2,698535	42,16461	282	705	2,56	16	580	1450	72,90%	1120,4	3,90412	3	9	6	2201,92368	4 58
SLM	PO 900/901	0,977803	15,27817	139,2	348	1,856	11,6	580	1450	72,00%	999	4,18	5	11	6	1163,712	2 42
SLM	PO 902/903	2,501045	39,07884	140,4	351	4,576	28,6	580	1450	70,00%	1120,4	3,90412	3	9	6	1096,276896	2 28
SLM	PO 1000/1001/	3,397399	53,08436	140,4	351	5,328	33,3	580	1450	60,00%	1120,4	3,9292	3	9	6	1103,31936	2 29
SLM	PO 1002 /1003	3,397399	53,08436	140,4	351	5,328	33,3	580	1450	60,00%	1106,5	3,90412	-5	0	5	913,56408	1 90
KSB	PO 300/400/500	0,714033	11,15676	72,016	180,04	2,7216	17,01	583,6	1459	74,80%	1106,5	3,9292	-5	0	5	471,6087787	982

Annexes 6 : Données Techniques de l'Ascagel

A. Chaleur spécifique à pression constante

ASCAGEL MEG		Chaleur spécifique [kJ/(kg·K)]							
°C] / X [vol	30	35	40	45	50	55	60	65	70
-60									2,4
-55								2,5	2,4
-50							2,6	2,6	2,5
-45							2,7	2,6	2,5
-40						2,8	2,7	2,7	2,6
-35					2,9	2,8	2,8	2,7	2,6
-30				3,1	2,9	2,9	2,8	2,8	2,6
-25			3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7
-20		3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7
-15	3,7	3,5	3,4	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8
-10	3,7	3,6	3,4	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8
-5,00	3,8	3,6	3,4	3,3	3,1	3,1	3,0	2,9	2,8
0	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9
5,00	3,8	3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9
10	3,8	3,7	3,5	3,4	3,2	3,2	3,1	3,0	2,9
15	3,8	3,7	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0
20	3,8	3,7	3,6	3,4	3,3	3,2	3,2	3,1	3,0
25	3,9	3,7	3,6	3,5	3,3	3,3	3,2	3,1	3,0
30	3,9	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0
35	3,9	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,2	3,1
40	3,9	3,8	3,7	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1
45	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1
50	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1
55	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2
60	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3	3,2
65	4,0	3,9	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3	3,2
70	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2
75	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3
80	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,4	3,3
85	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3
90	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,5	3,4	3,3
95	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,4	3,3
100	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,6	3,5	3,4	3,3

Ces données sont des valeurs communiquées à titre indicatif



En retraçant les points de L'ASCAGEL 30%, j'arrive à en ressortir une courbe de tendance me permettant de facilité le calcul du Cp moyen d'un régime de température.

Chaleur spécifique régime -5/-1°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	-1	Cp (kJ/kgK)	3,768
	-5		3,750
	-5/-1°C		3,76

Chaleur spécifique régime -5/0°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	0	Cp (kJ/kgK)	3,772
	-5		3,750
	-5/-1°C		3,76

Chaleur spécifique régime 3/9°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	3	Cp (kJ/kgK)	3,785
	9		3,809
	3/9°C		3,80

Chaleur spécifique régime 20/42°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	20	Cp (kJ/kgK)	3,850
	42		3,918
	37/42°C		3,88

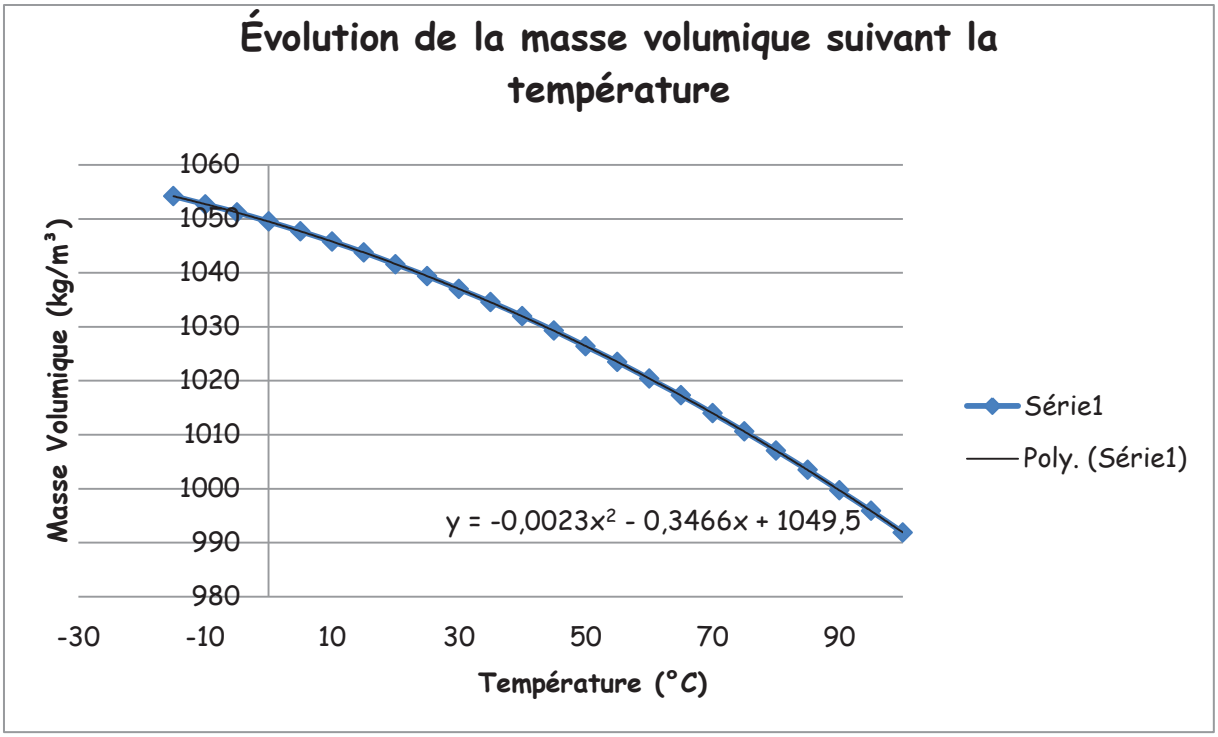
Chaleur spécifique régime 37/42°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	37	Cp (kJ/kgK)	3,904
	42		3,918
	37/42°C		3,91

Chaleur spécifique régime 38/42°C (kJ/kgK)			
Température (°C)	38	Cp (kJ/kgK)	3,907
	42		3,918
	37/42°C		3,91

B. Masse volumique

ASCAGEL MEG	Masse volumique (kg/m³)								
C] / X [vo	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00	55,00	60,00	65,00	70,00
-60									1137
-55								1127,5	1134,4
-50							1117,9	1125,1	1131,8
-45							1115,6	1122,5	1129,1
-40						1105,9	1113,2	1120	1126,4
-35					1095,9	1103,6	1110,7	1117,4	1123,6
-30				1085,7	1093,8	1101,3	1108,2	1114,7	1120,8
-25			1075,4	1083,7	1091,6	1098,9	1105,7	1112	1118
-20		1064,8	1073,5	1081,7	1089,3	1096,4	1103,1	1109,3	1115,1
-15	1054,2	1063,2	1071,6	1079,5	1086,9	1093,9	1100,4	1106,5	1112,2
-10	1052,7	1061,4	1069,6	1077,3	1084,5	1091,3	1097,7	1103,6	1109,2
-5,00	1051,2	1059,6	1067,5	1075	1082	1088,7	1094,9	1100,7	1106,2
0	1049,5	1057,6	1065,3	1072,6	1079,5	1086	1092,1	1097,8	1103,1
5,00	1047,7	1055,6	1063	1070,1	1076,8	1083,2	1089,2	1094,8	1100
10	1045,8	1053,4	1060,7	1067,6	1074,1	1080,4	1086,2	1091,7	1096,9
15	1043,8	1051,2	1058,2	1065	1071,4	1077,5	1083,2	1088,6	1093,7
20	1041,6	1048,8	1055,7	1062,3	1068,6	1074,5	1080,2	1085,5	1090,5
25	1039,4	1046,4	1053,1	1059,5	1065,7	1071,5	1077,1	1082,3	1087,2
30	1037	1043,8	1050,4	1056,7	1062,7	1068,4	1073,9	1079,1	1083,9
35	1034,6	1041,2	1047,6	1053,7	1059,6	1065,3	1070,7	1075,8	1080,5
40	1032	1038,4	1044,7	1050,7	1056,5	1062,1	1067,4	1072,4	1077,1
45	1029,3	1035,6	1041,7	1047,7	1053,4	1058,8	1064,1	1069	1073,7
50	1026,4	1032,6	1038,7	1044,5	1050,1	1055,5	1060,7	1065,6	1070,2
55	1023,5	1029,6	1035,5	1041,3	1046,8	1052,1	1057,2	1062,1	1066,7
60	1020,4	1026,4	1032,3	1037,9	1043,4	1048,7	1053,7	1058,5	1063,1
65	1017,3	1023,2	1029	1034,6	1040	1045,2	1050,2	1055	1059,5
70	1014	1019,9	1025,6	1031,1	1036,5	1041,6	1046,6	1051,3	1055,8
75	1010,6	1016,4	1022,1	1027,6	1032,9	1038	1042,9	1047,6	1052,1
80	1007,1	1012,9	1018,5	1023,9	1029,2	1034,3	1039,2	1043,9	1048,4
85	1003,5	1009,2	1014,8	1020,2	1025,5	1030,5	1035,4	1040,1	1044,6
90	999,7	1005,5	1011,1	1016,5	1021,7	1026,7	1031,6	1036,2	1040,7
95	995,9	1001,6	1007,2	1012,6	1017,8	1022,8	1027,7	1032,3	1036,8
100	991,9	997,7	1003,3	1008,7	1013,9	1018,9	1023,7	1028,4	1032,9

Ces données sont des valeurs communiquées à titre indicatif



Masse volumique régime -5/-1°C (kg/m³)			
Température (°C)	-1	Masse volumique (kg/m³)	1049,84
	-5		1051,18
	-5/-1°C		1050,51

Masse volumique régime -5/0°C (kg/m³)			
Température (°C)	0	Masse volumique (kg/m³)	1049,50
	-5		1051,18
	-5/0°C		1050,34

Masse volumique régime 3/9°C (kg/m³)			
Température (°C)	3	Masse volumique (kg/m³)	1048,44
	9		1046,19
	3/9°C		1047,32

Masse volumique régime 20/42°C (kg/m³)			
Température (°C)	20	Masse volumique (kg/m³)	1041,65
	42		1030,89
	20/42°C		1036,27

Masse volumique régime 37/42°C (kg/m³)			
Température (°C)	37	Masse volumique (kg/m³)	1033,53
	42		1030,89
	37/42°C		1032,21

Masse volumique régime 38/42°C (kg/m³)			
Température (°C)	38	Masse volumique (kg/m³)	1033,01
	42		1030,89
	38/42°C		1031,95

Annexe 7: « Schémas de calculs de la consommation électrique des différents types de producteurs »

A. Production Direct

Charge Frigorifique

$$\dot{Q}_F^{Direct\ secondaire} = \alpha_S\ q_v^{secondaire}$$

↓

Pompes évaporateur

$$\dot{W}_e^{PO\ secondaire} = \beta_S\ q_{v\ secondaire}^3$$

$$q_v^{secondaire} = q_v^{Général\ secondaire}$$

↓

Groupe froid direct

$$\dot{W}_e^{GF\ direct} = \frac{\dot{Q}_F^{Prod\ direct}}{EER_{Prod\ direct}}$$

$$EER_{Prod\ direct} = f(\dot{Q}_F^{secondaire}, T_{retour}^{condenseur})$$

↓

Pompes condenseur

$$\dot{W}_e^{PO\ condenseur} = \beta_C\ q_{v\ condenseur}^3$$

Hypothèse de la correspondance des fréquences des pompes condenseur et évaporateur

↓

DRY

$$\dot{W}_e^{DRY} = 40.32\ \frac{\left(\frac{EER_{Prod\ direct}+1}{EER_{Prod\ direct}}\right)\dot{Q}_F^{Prod\ direct}}{1000}$$

Consommation électrique production direct

$$\dot{W}_e^{Totale} = \dot{W}_e^{PO\ Secondaire} + \dot{W}_e^{GF\ Direct} + \dot{W}_e^{PO\ Condenseur} + \dot{W}_e^{DRY}$$

C. Production indirect

Charge Frigorifique

$$\dot{Q}_F^{Général\ secondaire} = \alpha_S\ q_{v\ Secondaire}^3$$

↓

Pompes secondaire échangeur

$$\dot{W}_e^{PO\ secondaire\ éch} = \beta_S\ q_{v\ secondaire}^3$$

$$q_v^{secondaire} = q_v^{Général\ secondaire}$$

↓

Pompes primaire échangeur

$$\dot{W}_e^{PO\ primaire\ éch} = \beta_p\ q_{v\ primaire\ éch}^3$$

$$q_v^{Secondaire\ éch} = \varepsilon\ q_v^{Primaire\ éch}$$

↓

Pompes évaporateur

$$\dot{W}_e^{PO\ évaporateur} = \beta_S\ q_{v\ évaporateur}^3$$

↓

Groupe froid direct

$$\dot{W}_e^{GF\ indirect} = \frac{\dot{Q}_F^{primaire\ indirect}}{EER_{Prod\ indirect}}$$

↓

Pompes condenseur

$$\dot{W}_e^{PO\ condenseur} = \beta_C\ q_{v\ condenseur\ indirect}^3$$

Hypothèse de la correspondance des fréquences des pompes condenseur et évaporateur

↓

DRY

$$\dot{W}_e^{DRY} = 40.32\ \frac{\left(\frac{EER_{Prod\ indirect}+1}{EER_{Prodin\ direct}}\right)\dot{Q}_F^{primaire\ indirect}}{1000}$$

Consommation électrique production indirect

$$\dot{W}_e^{Indirect} = \dot{W}_e^{PO\ secondaire\ éch} + \dot{W}_e^{PO\ primaire\ éch} + \dot{W}_e^{PO\ évaporateur} + \dot{W}_e^{GF\ indirect} + \dot{W}_e^{PO\ condenseur} + \dot{W}_e^{DRY}$$

D. Stockage

Pompes évaporateur

$$\dot{W}_e^{PO\ évaporateur} = \beta_S\ q_{v\ évaporateur}^3$$

Pompes stockage

$$\dot{W}_e^{PO\ secondaire} = \beta_S\ q_{v\ stockage}^3$$

Groupe froid direct

$$\dot{W}_e^{GF\ indirect} = \frac{\dot{Q}_F^{\ Stockage}}{EER_{Prod\ Stockage}}$$

Pompes condenseur

$$\dot{W}_e^{PO\ condenseur} = \beta_C\ q_{v\ condenseur}^3$$

DRY

$$\dot{W}_e^{DRY} = 40.32\ \frac{\left(\frac{EER_{Prod\ Stockage}+1}{EER_{Prod\ Stockage}}\right)\dot{Q}_F^{\ Stockage}}{1000}.\frac{22}{5}$$

Consommation électrique stockage

$$W_e^{Stockage} = W_e^{PO\ évaporateur} + W_e^{PO\ stockage} + W_e^{GF\ stockage} + W_e^{PO\ condenseur} + W_e^{DRY}$$

E. Déstockage

Charge Frigorifique

$$\dot{Q}_F^{Général\ secondaire} = \alpha_S\ q_{v\ Secondaire}^3$$

↓

Pompes secondaire échangeur

$$\dot{W}_e^{PO\ secondaire} = \beta_S\ q_{v\ Secondaire}^3$$

↓

Pompes primaire échangeur

$$\dot{W}_e^{PO\ secondaire} = \beta_p\ q_{v\ primaire\ éch}^3$$

↓

Pompes déstockage

$$\dot{W}_e^{PO\ Déstockage} = \beta_S\ q_{v\ évaporateur}^3$$

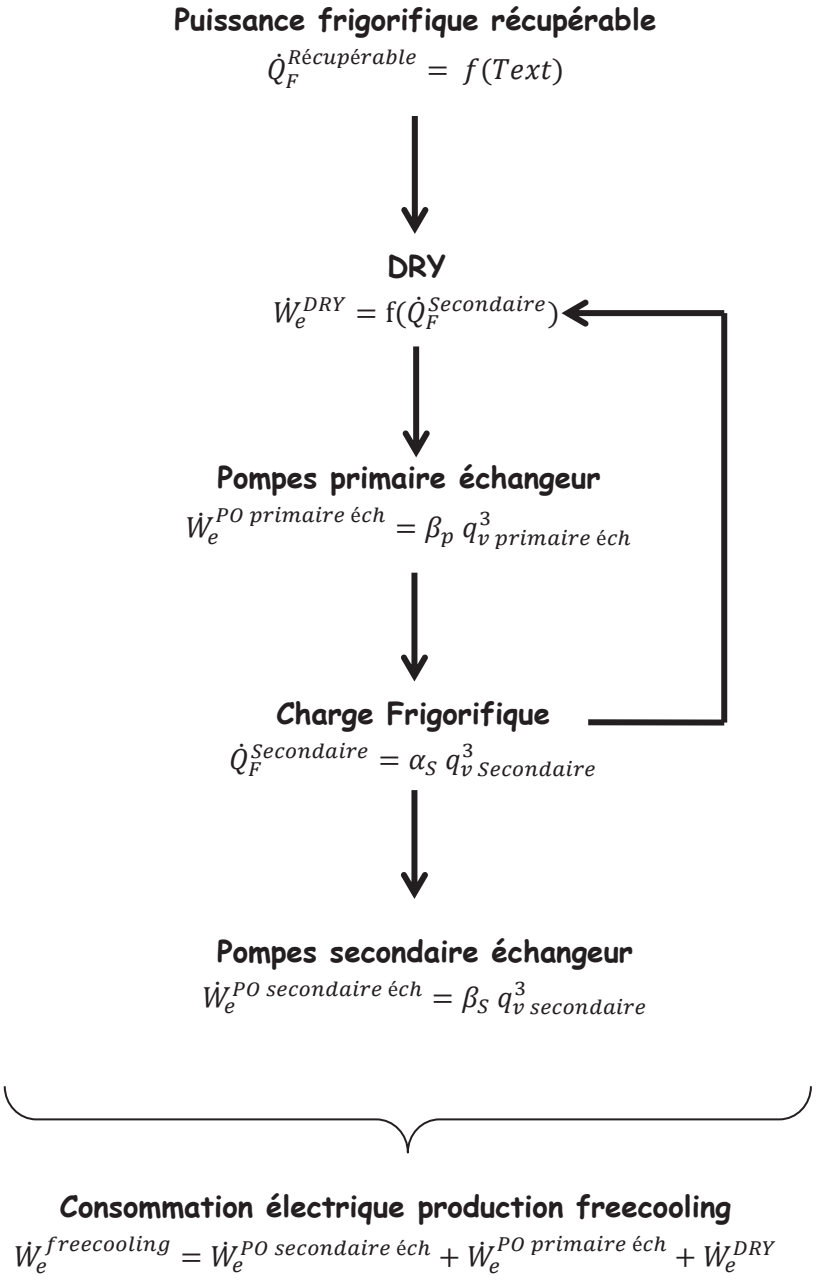
Consommation électrique déstockage

$$\dot{W}_e^{Déstockage} = \dot{W}_e^{PO\ secondaire\ éch} + \dot{W}_e^{PO\ primaire\ éch} + \dot{W}_e^{PO\ Déstockage}$$

Consommation électrique totale déstockage

$$\dot{W}_e^{Totale\ Déstockage} = \dot{W}_e^{Stockage} + \dot{W}_e^{Déstockage}$$

F. Freecooling

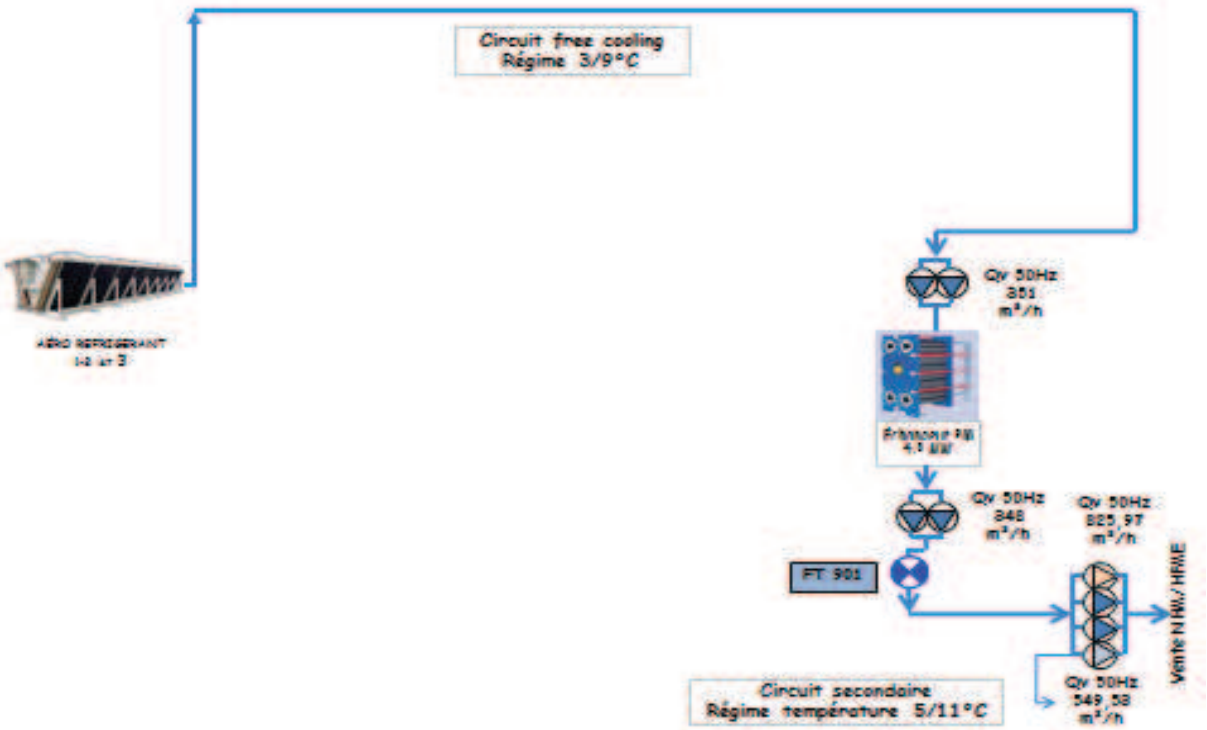


Annexe 8 : « Schémas de Production »

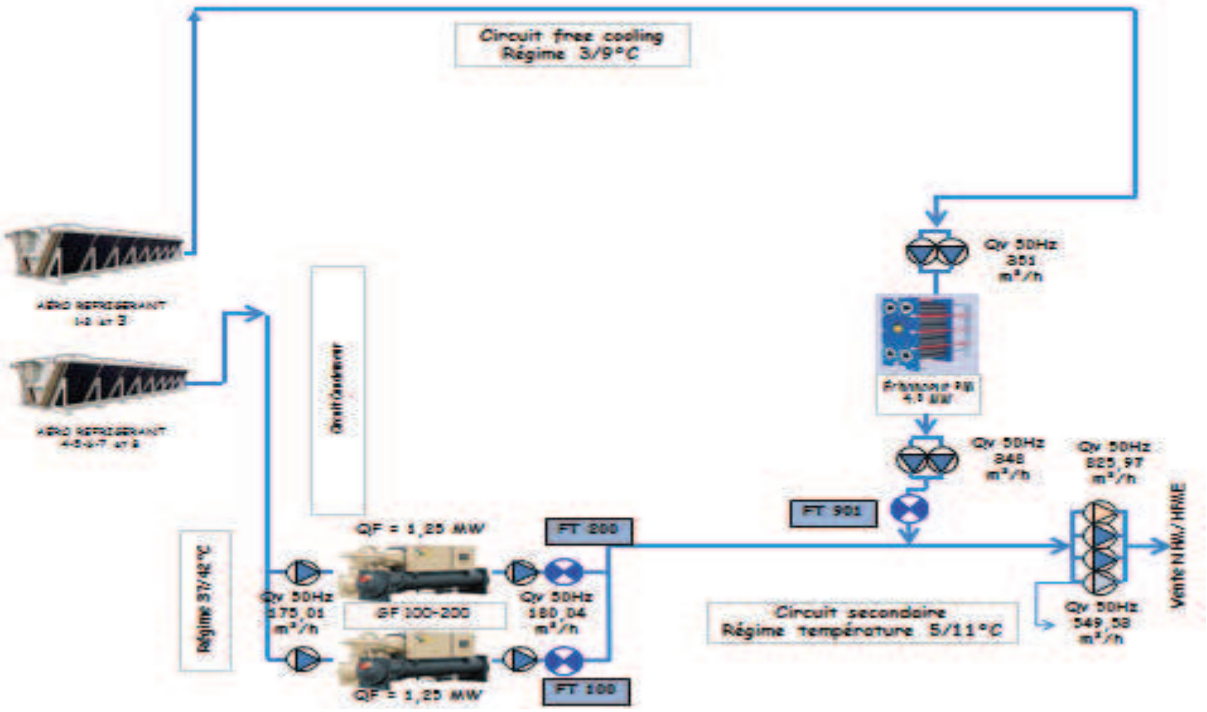
Pour simplifier la compréhension du Process à un technicien ou une personne n'ayant pas suivi l'installation, j'ai effectué des schémas représentatifs des modes de fonctionnement du process froid.



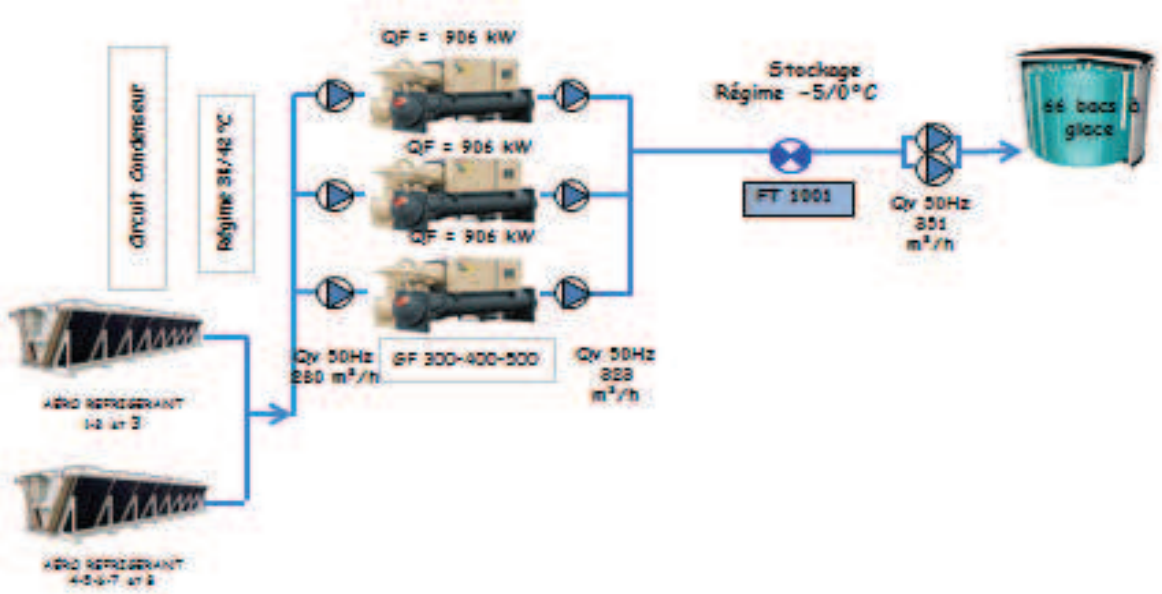
A. Mode freecooling seul



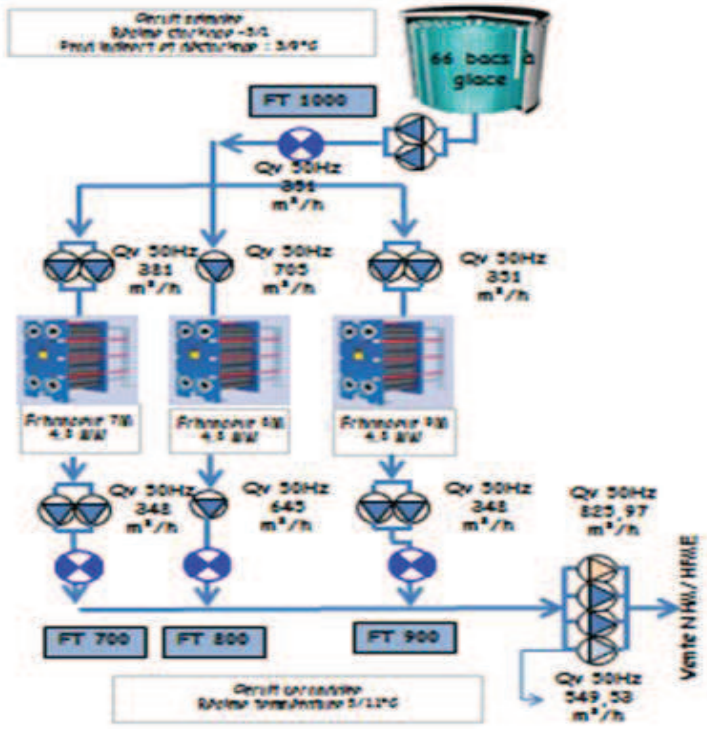
B. Mode Freecooling et production directe



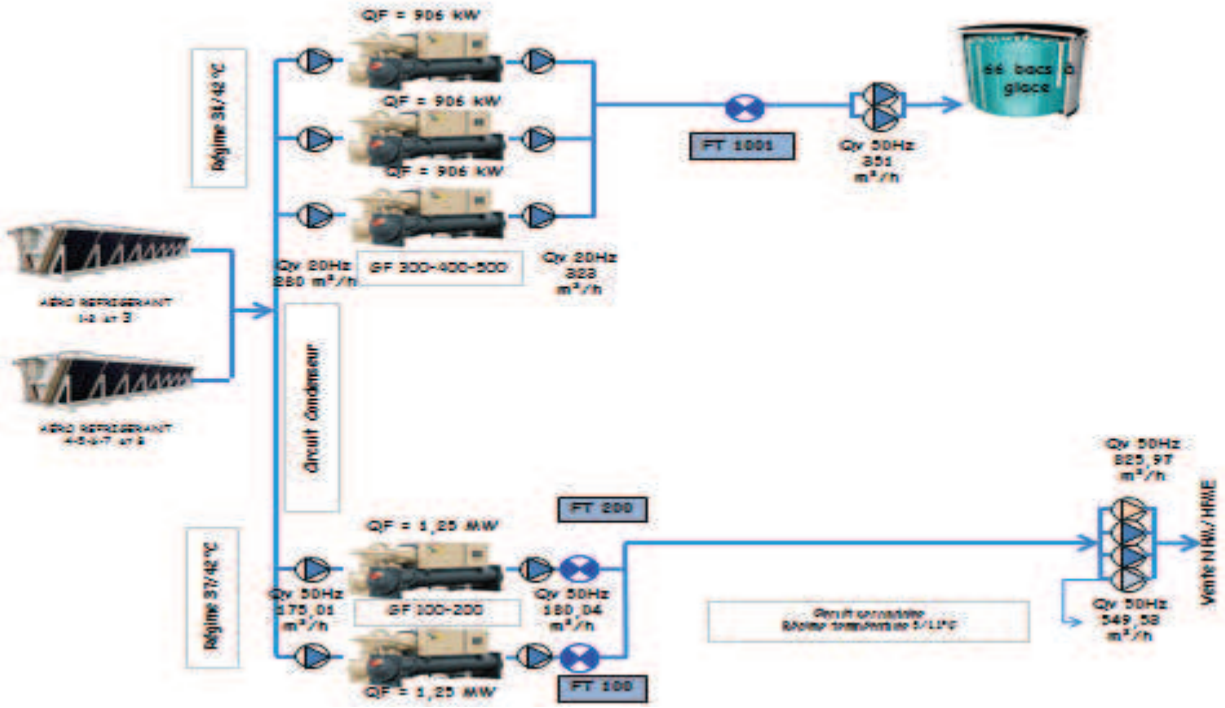
C. Mode Stockage seul



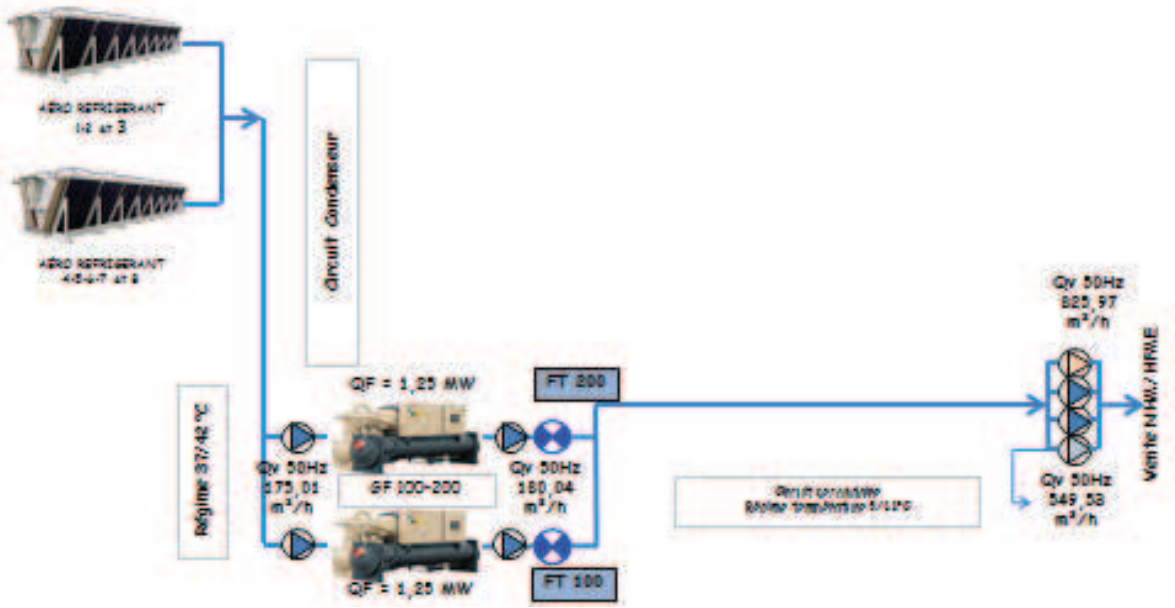
D. Mode Déstockage seul



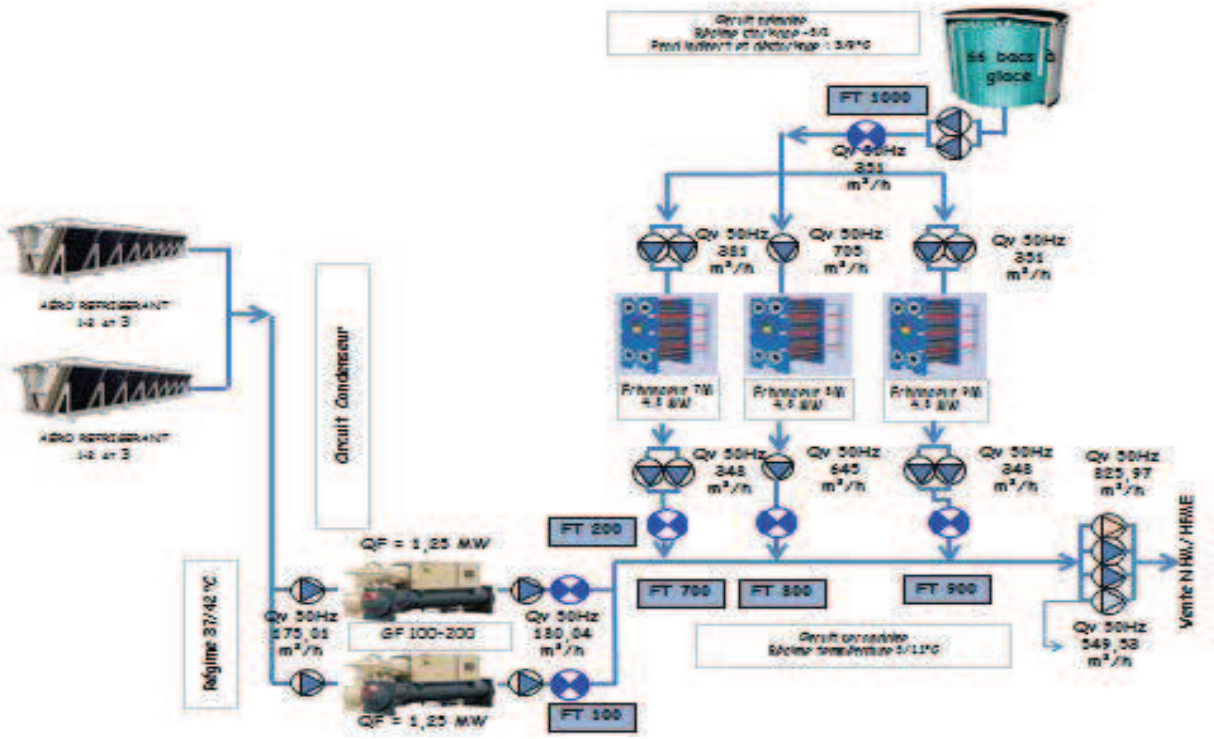
E. Mode Stockage + Direct



F. Mode de Production direct



G. Mode de Production direct + Déstockage



H. Mode de Production direct + Déstockage +Indirect

