
Optimisation du système de rafraîchissement

5.1	Méthodes d'aides à la décision en conception	98
5.1.1	Méthode OIA : les fonctions d'acceptabilité.....	99
5.1.2	Méthode OIA : l'agrégation	100
5.2	Identification des objectifs de conception	100
5.2.1	Définitions des fonctions de service et contraintes.....	101
5.2.2	Définition des critères sélectionnés et monétisation.....	102
5.2.2.1	Définition du coût d'usage	102
5.2.2.2	Coût de fabrication.....	102
5.2.2.3	Définition du confort d'été	103
5.2.2.4	Définition de l'encombrement	105
5.2.2.5	Impact environnemental.....	105
5.2.3	Besoin en confort du cas d'étude et performances du système actuel	106
5.3	Analyse multicritères du système	107
5.3.1	Variables de conception et de pilotage du système rafraîchissement	107
5.3.2	Résultats de l'optimisation	109
5.3.2.1	Optimisation par la valeur du coût global.....	109
5.3.2.2	Optimisation par la méthode OIA.....	112
	Synthèse du chapitre 5	117

L'objectif de ce chapitre est de montrer les possibilités que permettent les outils de simulation et de co-simulation pour l'aide à la conception de systèmes intégrés de rafraîchissement de l'air utilisant des matériaux à changement de phase. L'étude de cas présentée ici se base sur la maison NAPEVOMO pour laquelle le modèle thermique a déjà été validé dans le chapitre précédent. Après avoir déterminé les limites du système et analyser les fonctions et les contraintes, les critères de performances du système sont définis et convertis sur une échelle monétaire unique afin de minimiser le coût de le système de rafraîchissement. Dans cette première application, l'optimisation se limitera au nombre d'échangeurs, à leurs dimensions, au débit d'air et aux températures de pilotages.

5.1 Méthodes d'aides à la décision en conception

Les outils d'aide à la conception basés sur des techniques d'optimisation ont pour but de déterminer les dimensions, les matériaux et l'architecture globale permettant d'obtenir le comportement optimal suivant des critères de performance préalablement définis. Par conséquent, l'outil doit généralement simuler des centaines voire des milliers de configurations différentes générées aléatoirement pour converger vers des solutions optimales.

Pour tester chaque configuration, un modèle d'évaluation de la conception est défini. Ce modèle demande de définir des paramètres de conception (x), leur domaine de variabilité (Ω), des variables de performance (y) et des objectifs (f) de conception. La figure 5. 1 représente le processus d'optimisation itératif. Chaque solution candidate est générée par la sélection des paramètres de conception (x) dans leur domaine de variabilité (Ω). La réponse du modèle d'évaluation est ensuite évaluée en comparant les variables de performances (y) et les objectifs attendus par le concepteur (f). Les solutions candidates évaluées sont alors classées pour déterminer les meilleures.

La génération de solutions candidates peut-être « déterministe », c'est-à-dire, que toutes les combinaisons possibles des paramètres de conception sont testées. L'optimisation consiste en une seule itération lors de laquelle toutes les solutions candidates seront évaluées. Cependant, le nombre de solutions à évaluer peut devenir important pour des problèmes de conception complexes. Il est alors possible d'utiliser une génération de solutions « stochastique » (algorithmes génétiques, par essais), afin de converger plus rapidement vers l'optimum global.

L'algorithme génétique est le plus utilisé pour l'optimisation en conception car il est réputé pour sa facilité d'implantation (Quirante, 2012). Selon Collignan (Collignan, 2011) qui a comparé les performances de différents algorithmes (génétique, essais particulière, système immunitaire), l'algorithme n'est pas nécessairement rapide mais assure la convergence pour quasiment tous les tests contrairement aux autres. Calqué sur la sélection naturelle, l'algorithme génétique croise les gènes (variable de conception) d'une population « parents » (solutions candidates de l'itération $n-1$) par paire pour générer une population « enfant » (solutions candidates de l'itération n). Une mutation est également opérée sur chaque croisement, c'est-à-dire, qu'une part des valeurs des variables de conception (x) sont sélectionnées aléatoirement sur le domaine de variabilité (Ω).

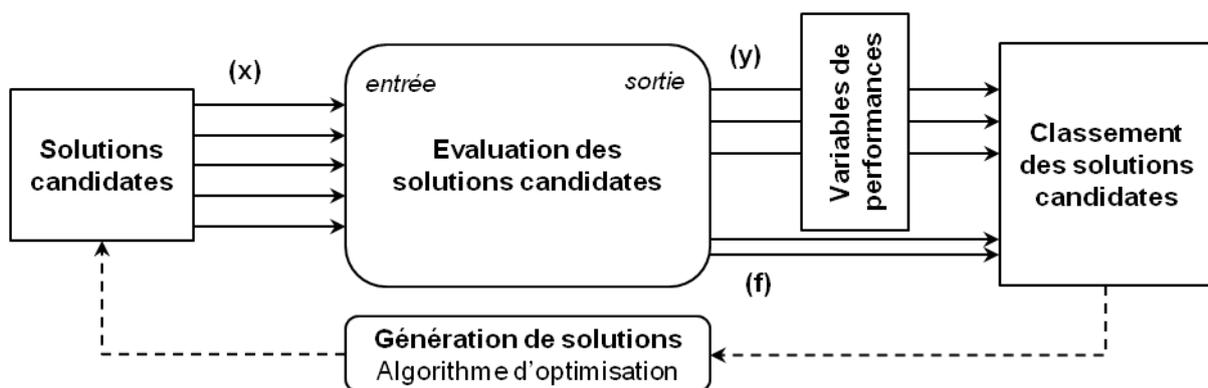


Figure 5. 1 : Schéma du processus d'optimisation d'après (Quirante, 2012)

La fonction objectif peut-être un ensemble de relations logiques représentant la satisfaction ou non des objectifs (f) fixés par le concepteur, ce sont des méthodes « ensemblistes ». Ces méthodes permettent de formaliser simplement les objectifs mais elles permettent d'évaluer si une solution candidate atteint les objectifs mais elles ne permettent pas de classer les solutions entre elles et donc ne déterminent pas d'optimum mais un ensemble de solutions respectant les objectifs de conception.

La fonction objectif peut être également une fonction continue. Dans ce chapitre deux méthodes d'évaluation par des fonctions continues ont été utilisées : la monétisation des critères et la méthode OIA. La monétisation consiste à affecter une valeur monétaire à chaque critère. La valeur monétaire est utilisée comme une pondération pour la hiérarchisation de chaque critère par rapport aux autres. Cette conversion, développée dans le paragraphe 5.2.2, s'appuie sur la méthodologie d'évaluation technico-économique des climatiseurs en France de Grignon-Massé (Grignon-Massé, 2010). La méthode OIA (Observation, Intéprétation, Agrégation) (Collignan, 2011; Quirante, 2012) uniformise les critères de conception par l'intermédiaire de fonctions d'acceptabilité variant entre 0 et 1. Les résultats sont ensuite pondérés puis agrégés en prenant en compte la volonté du concepteur.

5.1.1 Méthode OIA : les fonctions d'acceptabilité

Les fonctions d'acceptabilité initialement définies par Harrington (Harrington, 1965) et utilisées par Sebastian et al. (Sebastian et al., 2010) évaluent la satisfaction de chaque variable de performance y_i dont l'objectif f_i peut-être (a) maximiser, (b) minimiser ou (c) cibler. La figure 5. 2 présente les allures des trois fonctions d'acceptabilité suivant l'objectif fixé.

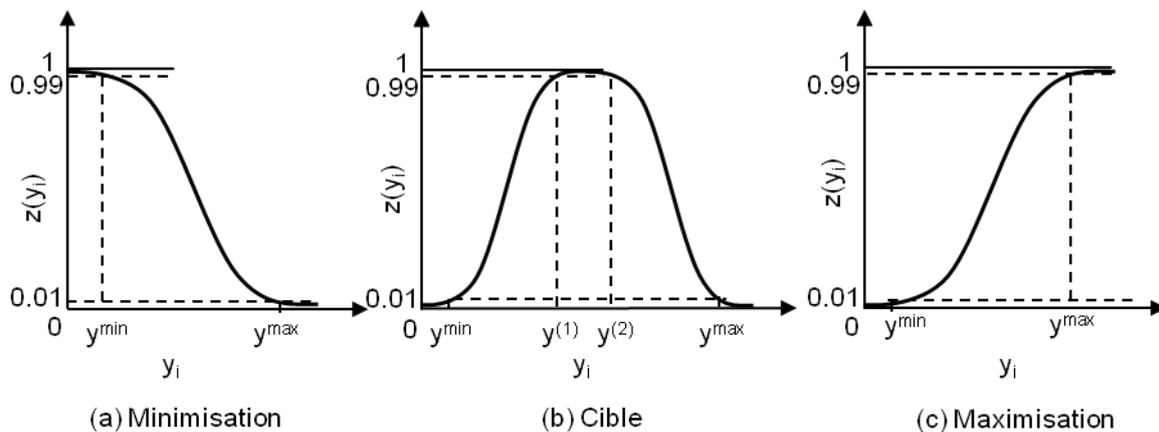


Figure 5. 2 : Allures des fonctions d'acceptabilité

La formulation des fonctions d'acceptabilité est présentée dans le tableau 5. 1.

Objectifs	Fonctions correspondantes
Minimiser	$z(y_i) = \exp[-\exp(\beta + \alpha y_i)]$ $\text{où } \alpha = \frac{\ln\left[\frac{\ln(0,01)}{\ln(0,99)}\right]}{y_{max}-y_{min}} \text{ et } \beta = \ln[\ln(0,99)] - \alpha y_{min}$ (5- 1)
Cibler	$z(y_i) = \exp\left[-\left \left(\frac{2y_i-(U+L)}{U-L}\right)^n\right \right] \text{ avec } = \frac{\ln[\ln(0,99)]}{\ln\left(\left \frac{2y^{(1)}-(U+L)}{U-L}\right \right)}$ $,U = \frac{y_{max}+y^{(2)}}{2} \text{ et } L = \frac{y_{min}+y^{(1)}}{2}$ (5- 2)
Maximiser	$z(y_i) = \exp[-\exp(\beta + \alpha y_i)]$ $\text{où } \alpha = \frac{\ln\left[\frac{\ln(0,01)}{\ln(0,99)}\right]}{y_{max}-y_{min}} \text{ et } \beta = \ln[\ln(-0,99)] - \alpha y_{max}$ (5- 3)

Tableau 5. 1 : Fonctions d'acceptabilité d'après (Sebastian et al., 2010)

Les variables de performance (y) uniformisées (z) sur une seule et unique échelle peuvent alors être agrégées pour former une seule et unique fonction objectif. Plusieurs méthodes d'agrégation sont possibles et sont donc présentées dans le paragraphe suivant.

5.1.2 Méthode OIA : l'agrégation

L'agrégation a pour objectif de transformer un problème multi-objectif en problème mono-objectif représenté par une seule et unique fonction. Chaque critère est pondéré par un facteur de préférence (w_i) représentant la préférence que donne le concepteur à chaque variable de performance par rapport aux autres. L'indice de performance global (IPG) défini par Scott et Antonsson (Scott et Antonsson, 1998) comme suit, permet de représenter les différents types d'agrégation possibles :

$$IPG = \sqrt[s]{\frac{w_1 z(y_1)^s + \dots + w_i z(y_i)^s + \dots + w_n z(y_n)^s}{w_1 + \dots + w_i + \dots + w_n}}, \quad (5-4)$$

où w_i est la préférence donnée la variable y_i , $z(y_i)$ est l'acceptabilité de la variable de performances y_i (équations (5- 1) à (5- 3)) et s est le niveau de compromis qui peut prendre ou tendre vers les valeurs suivantes $[-\infty ; 0 ; 1 ; +\infty]$.

- Si $s \rightarrow -\infty$, l'agrégation est faite par le minimum. l'indice de performance (IP) prend alors la valeur minimale des variable d'interprétation $z(y_i)$ telle que :

$$IPG = \min [z(y_1), \dots, z(y_i), \dots, z(y_n)] \quad (5-5)$$

- Si $s = 0$, l'indice de performance globale devient alors la moyenne géométrique pondérée des variables d'interprétation $z(y_i)$ telle que :

$$IPG = [z(y_1)^{w_1} \times \dots \times z(y_i)^{w_i} \times \dots \times z(y_n)^{w_n}]^{\frac{1}{w_1 + \dots + w_i + \dots + w_n}}. \quad (5-6)$$

- Si $s = 1$, l'indice de performance globale devient la moyenne arithmétique pondérée des variables d'interprétation $z(y_i)$ telle que :

$$IPG = \frac{w_1 z(y_1) + \dots + w_i z(y_i) + \dots + w_n z(y_n)}{w_1 + \dots + w_i + \dots + w_n} \quad (5-7)$$

- Si $s \rightarrow +\infty$, l'agrégation est faite par le maximum. l'indice de performance globale prend alors la valeur maximale des variables d'interprétation $z(y_i)$ telle que :

$$IPG = \max [z(y_1), \dots, z(y_i), \dots, z(y_n)] \quad (5-8)$$

D'après Quirante, l'agrégation est dite « sur-compensatoire » quand $s > 0$, c'est-à-dire que les bonnes performances d'un seul critère peuvent garantir un indice de performance global élevé malgré des valeurs réhébitoraires pour d'autre critères. Ce type d'agrégations est donc considéré comme inapproprié à la conception. Quand $s=0$, l'agrégation est dite « compensatoire » car elle a pour but d'améliorer la performance globale par la détérioration de la plus faible des performances individuelles. Enfin, l'agrégation est dite « non compensatoire » quand $s \rightarrow -\infty$ car elle vise à améliorer la pire des performances individuelles, en prenant le risque de réduire la performance globale.

5.2 Identification des objectifs de conception

L'analyse fonctionnelle est une approche de conception exprimant les besoins de l'utilisateur sous forme de fonctions. L'objet technique devient donc un moyen d'assurer les activités de l'utilisateur. La fonction principale ou « d'usage » est celle qui satisfait le besoin. Selon la norme Afnor X 50-151 (NF, 1991), « une contrainte est

une limitation à la liberté de choix du concepteur-réalisateur d'un produit ». Ces contraintes peuvent être imposées par la réglementation, par le marché ou par la stratégie de l'entreprise. Pour chaque fonction ou contrainte, un critère et des niveaux associés sont définis pour évaluer si l'objet conçu respecte bien les objectifs fixés par le concepteur.

5.2.1 Définitions des fonctions de service et contraintes

Le besoin rempli par le système est le maintien du confort estival dans une zone occupée délimitée, le bâtiment ne réussissant pas à le maintenir. Le système agit donc seulement sur la température intérieure et non sur les deux autres paramètres du confort : l'humidité et la vitesse de l'air. Le tableau 5. 2 résume la fonction de service et les contraintes qui ont été jugées pertinentes pour la conception du système de rafraîchissement.

Repère	Enoncé fonctionnel	Critère	Niveaux
Fonctions de service			
FS1	Maintenir le confort thermique estival	Degrés-heures	< 60 °C.h⁻¹
Contraintes			
C1	S'intégrer a bâtiment	Encombrement	< 1 m² occupé
C2	Ne pas générer de nuisance sonore	Niveau de bruit (LnAT)	45dB - 90dB
C3	Eviter les sources d'inconfort thermique	Vitesse d'air intérieure	< 0,22 m/s P < 0,2 m/s TP
C5	Limiter l'impact environnemental	EI-99	< Impact Clim
		GWP 100a (kg CO₂-eq)	< impact Clim
C6	Ne pas augmenter le risque incendie		Validation du concept
C7	Etre économiquement abordable	Coût d'usage	< Coûts Clim
		Coût de fabrication	
C8	Assurer la maintenabilité	Accessibilité des pièces Mobiles et du MCP	Validation du concept
		Récupération des MCP	Validation du concept
C9	Assurer la fin de vie	Démontabilité	Validation du concept
		Recyclage et réutilisation	Validation du concept

Tableau 5. 2 : Tableau résumant l'analyse fonctionnelle du système

La fonction FS1 et les contraintes C1, C5 et C7 ont été mises en évidence dans le tableau 5. 2 car ce seront les objectifs de conception utilisés dans l'optimisation. Les autres contraintes ne sont pas évaluées car soit elles

doivent être validées par le concepteur, soit l'outil d'évaluation ne permet pas (C6,C8 C9), pour le moment, de les évaluer (C2, C3 C5-EI99).

5.2.2 Définition des critères sélectionnés et monétisation

Parmi les critères de performance établis par l'analyse fonctionnelle du système, nous avons choisi d'en intégrer quatre pour l'optimisation de la solution : FS1, C1, C5, C7. Les paragraphes qui suivent définissent les critères ainsi que leur monétisation.

5.2.2.1 Définition du coût d'usage

Le coût d'usage est principalement lié à la consommation d'électricité du ventilateur (la consommation des registres est négligée). Le coût de maintenance du système est également négligé.

La consommation électrique du ventilateur dépend du débit d'air (Q_v), des pertes de charges (Δp) et de son rendement (η) :

$$E = \int_0^t \frac{Q_v \Delta p}{3600 \eta} dt$$

Le coût d'usage annuel est donc l'énergie électrique consommée sur toute une année (donnée récupérée lors de la co-simulation) multipliée par le tarif d'achat de l'électricité exprimé en $\text{€}.\text{kWh}^{-1}$. Concernant le tarif, l'Union Française de l'Electricité UFE envisage trois scénarios d'ici 2030 pour la France : 70%, 50% et 20% de production issue de l'énergie nucléaire (*Electricité 2030*, 2013). Le tableau présente l'impact de chaque scénario sur le prix de l'électricité facturé au particulier et aux entreprises. Nous avons calculé un taux d'augmentation annuelle du prix à partir d'une augmentation constante. Selon les scénarios et l'utilisateur, le taux d'augmentation de l'électricité varie entre $1,45\%.\text{an}^{-1}$ et $3,25\%.\text{an}^{-1}$. L'incertitude sur ce taux étant grande, nous avons choisi d'utiliser la valeur moyenne entre les deux extrema de l'intervalle [1,45 – 3,25] soit $2,35\%.\text{an}^{-1}$.

	Référence 2010	Scénarios de la part du nucléaire dans l'électricité française d'ici 2030 (€/MWh)					
		70%		50%		20%	
		Prix	Taux (%)	Prix	Taux (%)	Prix	Taux (%)
Pour les entreprises	78	110	1,73	129	2,55	148	3,25
Pour les particuliers	126	168	1,45	189	2,05	211	2,61

Tableau 5. 3 : Prix de l'électricité à l'horizon 2030 suivant 3 scénarios sur la part du nucléaire (*Electricité 2030*, 2013)

Nous supposons que le système a une durée de vie de 30 ans avec un remplacement des MCP au bout de 15 ans. Au 1er janvier 2013, le prix de l'électricité était de $0,1263 \text{ €}.\text{kWh}^{-1}$. En considérant un taux d'inflation du prix de l'électricité égal à $2,35\%$, le prix moyen de l'électricité sur ces 30 ans est égal à $18,47 \text{ cts}.\text{kWh}^{-1}$.

5.2.2.2 Coût de fabrication

Le cout de fabrication comptabilise le coût des matériaux ainsi que les procédés de mise en forme et d'assemblage de l'échangeur. Pour cette première application de l'outil d'optimisation, nous avons choisi de fixer les matériaux composant l'échangeur-stockeur. L'enveloppe des échangeur-stockeurs est faite en pin maritime

des landes (*pinus mesogeensis*) d'épaisseur 2 cm et l'encapsulation est faite d'alliage d'aluminium (série 6000). De plus, nous avons choisi de considérer un coût unitaire (au kg) de fabrication des encapsulations unique indépendamment du facteur de forme B. Les coûts des matériaux et des procédés sont les valeurs médianes des intervalles de coût définis par le logiciel CES EduPack (EduPack, 2007)

Composant	Type	Unité	PU	Durée de vie
Aluminium	Matériau	kg	2,195	30
Extrusion aluminium	Procédé	P	4,68	-
PET	Matériau	kg	1,37	15
Injection plastique	Procédé	P	1,5	-
Paraffine	Matériau	kg	6,5	15
Bois Pin	Matériau	m ³	1 020	30
Remplissage/Assemblage	Procédé	H	15	-

Tableau 5. 4 : Matériaux et procédés considérés dans la fabrication du système de rafraîchissement

Le réseau de ventilation fictif est composé des éléments de base présentés dans le tableau 5. 5. A partir du deuxième échangeur-stockeur, deux coudes sont ajoutés et deux fois la hauteur du caisson à la longueur de la gaine rigide par échangeur car nous supposons que les caissons sont empilés.

	Quantité	Prix unitaire Avec mise en œuvre (€)	Durée de vie
Gaine rigide (m)	5	120,07	30
Coudes (p)	4	37,55	30
Grille rectangulaire (p)	2	124,04	30
Ventilateur (p)	1	148	15
Registres (p)	4	75	15

Tableau 5. 5 : Composant du réseau de ventilation

5.2.2.3 Définition du confort d'été

Comme évoqué dans le paragraphe 1.2, le confort thermique dépend de 3 paramètres : la température, l'humidité et la vitesse de vent. Le système développé agit sur un seul de ces trois paramètres, la température. Nous avons donc choisi d'utiliser les critères de confort adaptatif dépendant seulement de la température extérieure moyenne. Boulet (Boulet, 2009) répertorie dans sa thèse les différentes courbes de température intérieure de confort en fonction de la moyenne mensuelle ou hebdomadaire de la température extérieure. Selon l'auteur, la meilleure définition de la température de confort est la suivante :

$$T_{conf} = 0,255 T_{ext,ref} + 18,9, \quad (5- 9)$$

avec $T_{ext,ref}$ défini telle que :

$$T_{ext,ref} = [T_{ext\ j-1} + 0,8 T_{ext\ j-2} + 0,6 T_{ext\ j-3} + 0,5 T_{ext\ j-4} + 0,4 T_{ext\ j-5} + 0,3 T_{ext\ j-6} + 0,2 T_{ext\ j-7}]/3,8 \quad (5- 10)$$

Selon De Dear et Brager (DeDear et al., 1997) les limites de confort à 90% de satisfaction est de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ et à 80% de satisfaction, $\pm 3,5^{\circ}\text{C}$ autour de la température de confort. Pour caractériser l'inconfort, Grignon-Massé (Grignon-Massé, 2010) propose d'utiliser le degré-heure qui est l'intégrale suivant le temps de la différence entre la température intérieure de la maison et la température de confort définie. Contrairement au taux d'inconfort qui décompte le nombre d'heures de dépassement par rapport au nombre d'heure d'occupation, le degré-heure met en évidence l'écart entre la température intérieure et la température limite supérieure de confort.

Pour comparer les différents coûts avec l'inconfort que le système n'aura pas pu éviter, le degré-heure doit être monétisé. Grignon-Massé préconise de définir le coût du degré-heure à $0,6 \text{ €} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ par occupant pour les secteurs tertiaire et résidentiel. Nous avons étudié le coût du degré-heure dans la maison NAPEVOMO. Pour cela, deux simulations avec des consignes différentes sont exécutées. Pour la première simulation, une consigne de température est fixée à 26°C correspondant à la consigne demander par les réglementations RT2012 et HQE (cf. paragraphe 1.2) pour les bâtiments climatisés. Le besoin en puissance de refroidissement de la maison est présenté en figure 5. 3. Pour la deuxième simulation, aucune consigne de température n'est fixée afin de calculer les degré-heures de dépassement de la température de confort fixée dans la relation (5- 9). La figure 5. 4 présente les degré-heures de dépassement en fonction du temps.

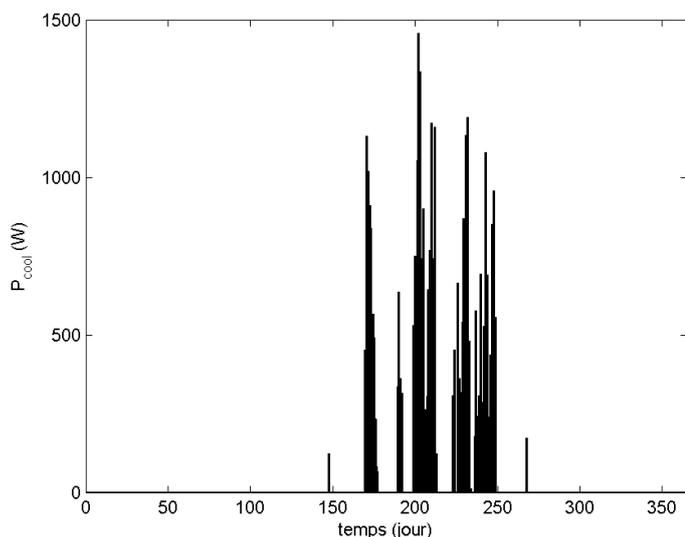


Figure 5. 3 : Puissance de refroidissement appelée par la maison NAPEVOMO pour une consigne de température à 26°C

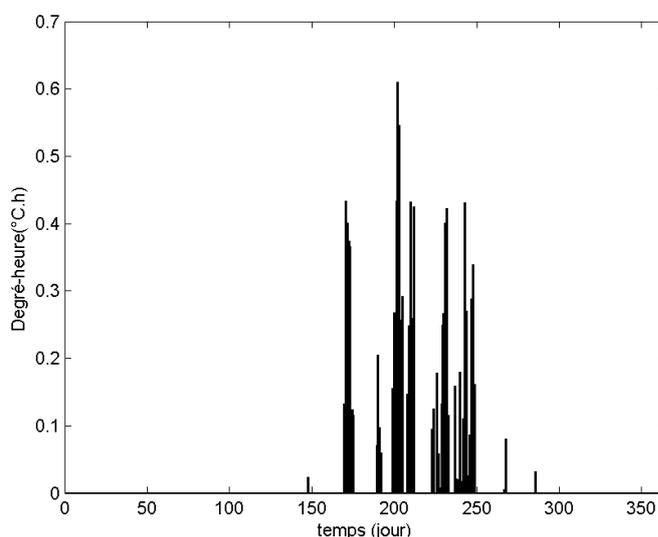


Figure 5. 4 : Degré-heure de la maison NAPEVOMO sans consigne de température calculé par rapport à la température de confort avec une acceptabilité à 90%

Les résultats de simulations montrent que le besoin total de climatisation sur la période estivale est de 236 kWh et que le nombre de degré-heures de dépassement est égal à $178^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ pour 200 heures d'inconfort (soit un taux d'inconfort de 3,15% sur les 6411 heures d'occupation). En prenant les hypothèses présentées dans le tableau 5. 6 et d'un prix moyen de l'électricité sur une durée de vie de 8 ans égal à $0,140 \text{ €} \cdot \text{kWh}^{-1}$ (prix de base $0,126$

€.kWh⁻¹ avec une inflation du prix de l'électricité de 2,35%.an⁻¹), le coût du degré-heure évité est égal à 0,59 €.°C⁻¹.h⁻¹ par occupant.

Caractéristiques	Valeur
Puissance du climatiseur (kW)	2,7
Coût d'achat avec mise en œuvre (simple split réversible)	1 720 (Groupe Moniteur, 2010)
Coût de maintenance (€.an-1)	105
EER	3,2
Température de consigne (°C)	26

Tableau 5. 6 : Hypothèses concernant la climatisation

La coût du degré-heure évité calculé pour NAPEVOMO est très proche de celui défini par Grignon-Massé qui est 0,6 €.°C⁻¹.h⁻¹. Cependant, le résultat est très sensible car la climatisation fonctionne plus longtemps dans un bâtiment qui surchauffe et donc la part de l'investissement dans le degré heure est moins importante. Par exemple, La même simulation a été exécutée avec pour seule différence un débit de ventilation divisé par deux (ventilation hygiénique et sur-ventilation). Le coût du degré-heure est alors de 0,15 €.°C⁻¹.h⁻¹.

Le coût choisi du degré-heure dépassé par rapport à la limite de confort pour la suite de l'étude est égal à 0,6 €.°C⁻¹.h⁻¹.

5.2.2.4 Définition de l'encombrement

La surface occupée par un système dans un bâtiment représente un coût induit par l'achat ou la location de ce bâtiment. Il est donc important dans la conception d'un système d'établir des limites d'encombrement. Cependant, la totalité du système étant encore au stade de conception préliminaire, aucun emplacement d'installation n'a été fixé : faux plafond, sol comme actuellement dans NAPEVOMO ou dans un local dédié. Nous avons choisi l'hypothèse que le système serait dans un local technique. De plus, s'il y a plusieurs échangeurs-stockeurs ceux-ci sont considérés empilés jusqu'à atteindre le plafond fixé à 2,5 m. De plus, il est prévu 0,5 m de part et d'autre des échangeur-stockeurs pour les conduites de ventilation.

$$\text{coût}_{\text{encomb}} = \text{coût}_{\text{SH}} Y_{\text{ech}} (L_t + 1) \frac{N_{\text{ech}} Z_{\text{ech}}}{2.5}, \quad (5- 11)$$

où coût_{m^2} est le coût moyen de la surface habitable d'un logement. Dans le département de la Gironde (33), le prix moyen de la surface habitable est défini à 2163€.m⁻².

5.2.2.5 Impact environnemental

L'outil développé permet de calculer l'impact environnemental suivant l'analyse du cycle de vie en utilisant la base de données Ecoinvent (Centre for Life Cycle Inventories, s. d.). Il est donc possible de calculer l'impact environnemental suivant les différentes méthodes proposées dans cette base de données telles que : Eco-Indicator 99, CML 2001, Impact 2002+, IPCC 2007. Il existe des méthodes qui calculent le dommage (end-point) en normalisant les impacts environnementaux comme l'eco-indicateur 99 ce qui permet de donner une valeur finale unique. Cependant, l'eco-indicateur 99 comme toute normalisation est actuellement critiqué (Khalifa, 1999;

Sleeswijk et al., 2008) pour le manque de base de données locales des dommages réalisés par l'émissions des différents polluants.

Pour cette étude, nous avons choisi seulement le critère GWP100a (Effet de serre à un horizon de 100 ans) de la méthode IPCC 2007 car la production de gaz à effet de serre est le seul critère pour lequel nous pouvons trouver des valeurs monétaire représentant un contexte global et local. Grignon-Massé dans son étude utilise un coût de l'émission de GES égal à 150 €.t_{eq}CO₂⁻¹ qui est, selon le GIEC, le prix permettant une stabilisation des émissions de CO₂. Cependant, ce coût ne prend pas en compte le contexte actuel ni la mise en place progressive de taxe carbone. Le rapport de Michel Rocard (Rocard, 2009) sur la conférence Climat et Energie préconise un prix de la tonne de CO₂ émise à 32 € avec un taux d'actualisation de 6% pour atteindre 100€ en 2030. Si l'on suppose une augmentation sur une durée de vie du système de 30 ans (2014-2044), le coût de la tonne de CO₂ est égale à 111€.t_{eq}CO₂⁻¹.

5.2.3 Besoin en confort du cas d'étude et performances du système actuel

Pour définir le besoin de la maison NAPEVOMO, la co-simulation présentée dans le paragraphe 3.3 est utilisée. Contrairement au paragraphe 4.2.1.3, des scénarios d'occupations et de puissances dissipées associés sont renseignés dans le modèle thermique de la maison. La figure 5. 3 montre une comparaison des températures intérieures de la maison NAPEVOMO avec et sans le système de rafraîchissement équipé du prototype N°1 en fonction de la température extérieure moyenne de référence T_{ext,ref} définie dans le paragraphe 5.2.2.3.

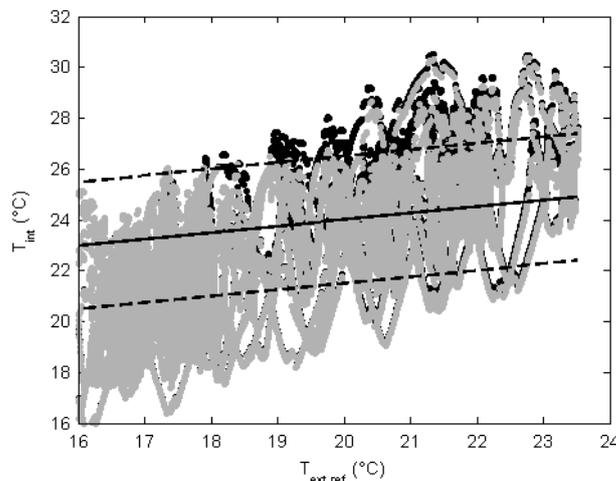


Figure 5. 5 : Température intérieure de NAPEVOMO en fonction de la température moyenne de référence sans systèmes de rafraîchissement (noir) et avec le prototype N°1 (gris clair) ; simulations entre 5 mai et 22 octobre

En figure 5. 5, le système permet de garder la température intérieure de la maison en dessous de la limite de confort supérieure jusqu'à une température extérieure moyenne de 20,5 °C. Pour une température extérieure moyenne comprise entre 20,5°C et 22,5°C, la température intérieure avec le système fonctionnant est réduite par rapport à la température sans système mais dépasse tout de même la limite de confort supérieure. Enfin au dessus de 22,5°C, le système a un très faible impact sur la température intérieure.

Dans le tableau 5. 7, les performances du système installé dans NAPEVOMO sont comparées à un système de climatisation conventionnel défini dans le tableau 5. 6. A partir des résultats de Grigon –Massé, les phases de fabrication et les pertes de fluide en fin de vie d'un tel système représentent 1 693 kg eq CO₂. La consommation

électrique annuelle du système de climatisation pour NAPEVOMO est évaluée à 40,92 kWh.an⁻¹. Par conséquent, le coût de consommation électrique est égal à 227 € sur une durée de 30 ans avec un tarif de l'électricité de 18,47 cts€.kWh⁻¹ (cf. paragraphe 5.2.2.1) et la production de gaz à effet de serre est évaluée à 129 kgeqCO₂.

Critères	Prototype N°1	Système Climatisation 2kW (3 systèmes)
FS1 – Degré-heure	1 090 (60,6°C.h ⁻¹ .an ⁻¹)	0
C1 – Encombrement	1 239	0
C5 – GWP 100a	148,7 (1 352 kgCO ₂ eq)	573
C7 – Coût de fabrication avec mise en œuvre	6 575	5 160 (3 x 1 720)
C7 – Coût d'usage	54,26	227
Coût sur le cycle de vie	9 106	5 959

Tableau 5. 7 : Comparaison du prototype N°1 avec un système de climatisation conventionnel

Sur un cycle de vie de 30 ans, l'utilisation d'un système de climatisation a un coût moins important d'environ 3000€ par rapport un système équivalent à celui installé dans NAPEVOMO. Cependant les opérations de maintenance n'ont pas été considérées car il existe une grande incertitude sur les opérations nécessaires sur le futur système. Or, une économie pourra être faite sur ce système par rapport à une climatisation. L'objectif est d'obtenir un système économiquement compétitif avec une climatisation et avec les meilleures performances de confort.

5.3 Analyse multicritères du système

5.3.1 Variables de conception et de pilotage du système rafraîchissement

Chaque solution candidate est définie par des variables de conception et des variables de pilotage. Les variables de conception définissent les caractéristiques discriminantes d'une solution candidate par rapport à une autre comme la géométrie, les dimensions et les matériaux. Les variables de pilotage définissent le fonctionnement et les interactions entre le système et son environnement. Les variables de pilotage sont ici le débit d'air et les consignes (température, état de charge/décharge) présentées dans le tableau 3. 5.

Pour cette première application de l'optimisation du système de rafraîchissement utilisant des MCP, nous proposons d'optimiser la géométrie des échangeurs-stockeurs ainsi que les variables de pilotage telles que le débit et les températures de consigne. Par conséquent, le réseau de ventilation et les matériaux seront donc fixés. L'échangeur-stockeur est donc composé d'un caisson en pin maritime d'épaisseur fixée à 2 cm et l'encapsulation est en alliage d'aluminium.

Les variables de conception sélectionnées et leurs intervalles sont présentés dans le tableau 5. 8. Ces variables permettent de définir complètement la géométrie de l'échangeur-stockeur sous conditions de quelques hypothèses :

- L'épaisseur de l'encapsulation est fixée à 0,5 mm quelle que soit sa géométrie
- Les écartements entre les encapsulations sont égaux et constant suivant les axes X et Y (cf. paragraphe 3.2)
- La distance entre les parois du caisson et celle des encapsulations égale à l'écartement entre les encapsulations.

Variables de conception	Intervalles
Nombre d'échangeur (N_{ech})	[1 ; 4]
Nombre de rangées (N_z)	[1 ; 10]
Longueur de l'échangeur-stockeur L_t	[1 ; 3]
Largeur de l'encapsulation (Y_i)	[0.02 0.4]
Facteur de forme de l'encapsulation (B)	[0,05 ; 20]
Masse de MCP (M_{MCP}) par échangeur	[5 ; 100]
Section de passage de l'air (S_a)	[0.036 0.1]
Type de MCP	[RT21 ; RT25, RT28]

Tableau 5. 8 : Variables de conception du système avec leurs domaines de variation

Parmi les consignes présentées dans le tableau 3. 5, nous avons sélectionné pour l'optimisation les deux consignes de températures intérieures T_{ON} et T_{OFF} . La température de consigne de régénération T_{REG} est fixée à 20°C et les états de charge/décharge σ_{max} et σ_{min} sont respectivement fixés à 99% et 1% de MCP liquide. Le tableau 5. 9 présente les intervalles des variables de pilotage.

Variables de pilotage	Intervalles
Débit d'air (Q_v)	[200 ; 600]
Thermostat haut – T_{ON} (°C)	[24 ; 28]
Thermostat bas – T_{OFF} (°C)	[20 ; 23]

Tableau 5. 9 : Variables de pilotage du système avec leurs domaines de variation

La figure 5. 6 montre différentes variables de conception présentées dans le tableau 5. 8 en relation avec la géométrie de l'échangeur-stockeur. A noter que le facteur de forme B est le ratio entre la hauteur interne Z_i et la largeur interne de l'encapsulation Y_i tel que :

$$B = \frac{Z_i}{Y_i} \quad (5- 12)$$

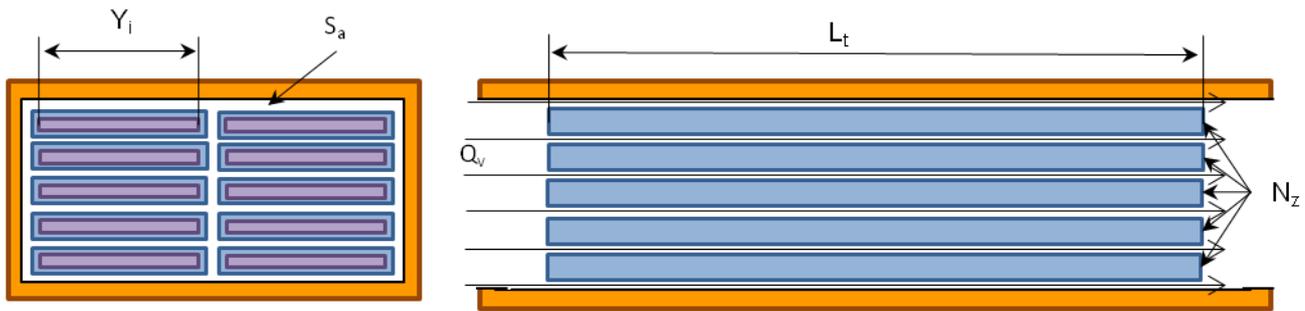


Figure 5. 6 : Schéma d'un échangeur-stockeur avec des variables de conception

La figure 5. 7 montre des exemples de géométries d'échangeur-stockeur en faisant varier la largeur Y_i et le facteur de forme de la section B et en fixant les autres variables à la valeur médiane de leur intervalle de variabilité. La masse de MCP par encapsulation dépend de variables géométriques Y_i , B et L_t . Par conséquent, la masse de MCP contenue dans l'échangeur-stockeur va influencer le nombre de colonnes (N_y) en fonction du nombre de rangées (N_r) fixé. Si la masse contenue dans un seul tube est supérieure à la masse totale contenue dans l'échangeur, la configuration est physiquement impossible. La zone grise correspond aux configurations d'échangeur-stockeur possibles. Les exemples proposés sont des géométries positionnées aux extrémités des intervalles de variabilité de B et Y_i . La géométrie au point rouge n'est pas montrée car les dimensions des encapsulations sont trop petites (de l'ordre du mm) et trop nombreuses (environ 400) pour être représentées.

5.3.2 Résultats de l'optimisation

5.3.2.1 Optimisation par la valeur du coût global

Pour évaluer la performance d'une solution candidate et la comparer avec les autres solutions, l'indice de performance est calculé à partir de la somme des coûts identifiés, dans le paragraphe 5.2.2., de la manière suivante :

$$IPG^{(1)} = \frac{1}{\sum \text{coût}} \quad (5- 13)$$

La figure 5. 9 détaille le processus du calcul de l'indice de performance globale $IPG^{(1)}$ à partir des variables de conception. A l'aide d'un algorithme génétique, une version optimisée du système a été obtenue après 81 itérations de 100 solutions comparées soit 8 100 solutions générées aléatoirement et testées. La figure 5. 8 montre l'évolution de la valeur maximale de l'indice de performance global (IPG) obtenue à chaque itération. La convergence de l'indice $IPG^{(1)}$ est obtenue au bout de 65 itérations.

Le système optimisé est composé d'un seul échangeur-stockeur contenant 8,53 kg de paraffine RT28HC. L'échangeur-stockeur est composé de 2 plaques de dimension 0,12 x 0,03 x 1,53 m. Les dimensions extérieures de l'échangeur sont 0,44 x 0,38 x 2,05 m. Le tableau 5. 10 montre les variables de conception du système actuel et la version optimisée.

Comme le montre le tableau 5. 11, le système optimisé pour une durée de vie de 30 ans représente un coût plus faible qu'un système de climatisation avec une économie de 3 312€ et que le système actuel avec une économie d'environ 6 459€. De plus, la version optimisée du système serait même économiquement plus rentable que l'absence de système. En effet, l'inconfort dans la maison sans système coûte 3 212 € sur 30 ans alors que la version optimisée coûte 2647€. Cependant, le critère de confort pour la version optimisée est dégradé par rapport au système actuel. Cette dégradation représente 20% par rapport au niveau sans système de

rafraîchissement (66% de réduction de l'inconfort avec le système actuel contre 46% pour le système avec la version optimisée).

Les figures 5.10 et 5.11 montrent respectivement une comparaison de la température intérieure de la maison équipée du prototype N°1 et de la version optimisée n°1 avec la température intérieure de la maison sans système de rafraîchissement. La comparaison des deux figures confirme bien la différence de confort entre les versions du système de rafraîchissement. De plus, la différence entre une maison sans système de rafraîchissement et une maison équipée de la version optimisée en figure 5. 11 est faiblement perceptible.

Comme le montre le tableau 5. 11, le système optimisé pour une durée de vie de 30 ans représente un coût plus faible qu'un système de climatisation avec une économie de 3 312€ et que le système actuel avec une économie d'environ 6 459€. De plus, la version optimisée du système serait même économiquement plus rentable que l'absence de système. En effet, l'inconfort dans la maison sans système coûte 3 212 € sur 30 ans alors que la version optimisée coûte 2647€. Cependant, le critère de confort pour la version optimisée est dégradé par rapport au système actuel. Cette dégradation représente 20% par rapport au niveau sans système de rafraîchissement (66% de réduction de l'inconfort avec le système actuel contre 46% pour le système avec la version optimisée).

Les figures 5.10 et 5.11 montrent respectivement une comparaison de la température intérieure de la maison équipée du prototype N°1 et de la version optimisée n°1 avec la température intérieure de la maison sans système de rafraîchissement. La comparaison des deux figures confirme bien la différence de confort entre les versions du système de rafraîchissement. De plus, la différence entre une maison sans système de rafraîchissement et une maison équipée de la version optimisée en figure 5. 11 est faiblement perceptible.

Variables de conception et de pilotage	Prototype N°1	Version optimisée n°1
Nombre d'échangeur – N_{ech} (-)	2	1
Nombre de rangées – N_z (-)	6	2
Longueur de l'échangeur-stockeur – L_t (m)	3,334	1,53
Largeur de l'encapsulation – Y_i (m)	0.026	0,12
Facteur de forme de l'encapsulation – B (-)	1,385	0,25
Masse de MCP par échangeur – m_{MCP} (kg)	100	8,53
Type de MCP	RT21	RT28
Section de passage de l'air – S_a (m ²)	0,0897	0,0361
Débit d'air – Q_a (m ³ .h ⁻¹)	300	206
Thermostat haut – T_{ON} (°C)	26	26,4
Thermostat bas – T_{OFF} (°C)	22	20,9

Tableau 5. 10 : Variables de conception et de pilotage du système actuel et du système optimisé

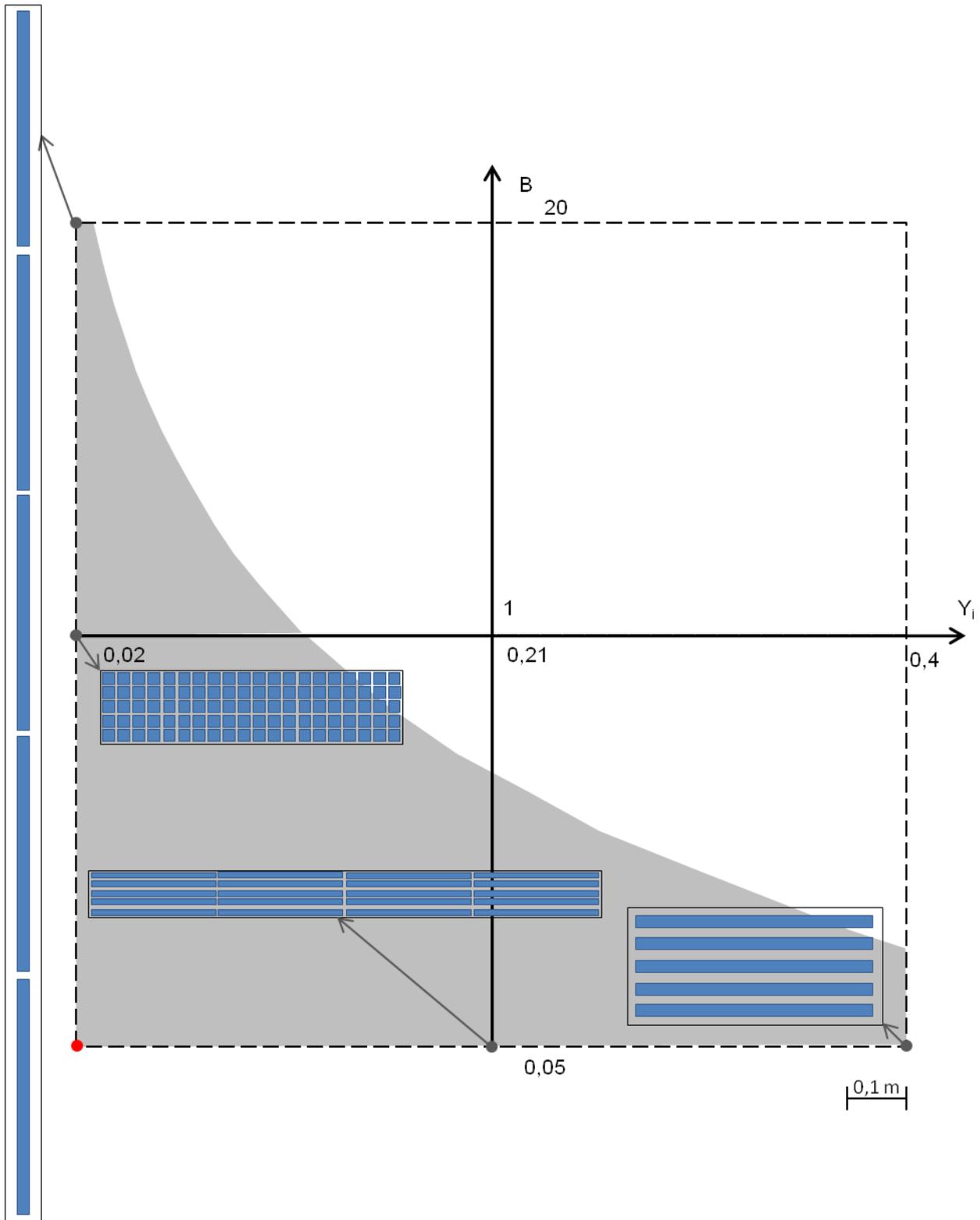


Figure 5. 7 : Exemples de géométries d'échangeur-stockeur possibles en faisant varier le ratio B et la largeur Y_i et en fixant à les autres variables : $N_z=5$; $L_i=2$ m ; $M_{MCP}=62,5$ kg ; $S_a=0.068$ m².

Cette première optimisation en utilisant comme critère de performance la somme des objectifs pondérés par les valeurs monétaires a soulevé la question de satisfaction de la fonction de service. En effet, le critère représentant la fonction de service FS1 est traité au même niveau que les autres critères issus des contraintes. Or, le coût de fabrication du système élevé tend à dégrader le critère de confort. Malgré un coût sur le cycle de vie faible, le

système ne remplit plus sa fonction de service. Par conséquent, il a été choisi de séparer la fonction de service et les contraintes et d'utiliser la méthode OIA pour les agréger en indice de performance IPG⁽²⁾.

Critère	Sans système de rafraîchissement	Climatiseur 2kW (3 systèmes)	Prototype N°1	Version optimisée n°1
FS1 – Degré-heure (€)	3 212 (178,5°C.h ⁻¹ .an ⁻¹)	0	1 090 (60,6°C.h ⁻¹ .an ⁻¹)	17 309 (96,15°C.h ⁻¹ .an ⁻¹)
C1 – Encombrement	0	0	1 239	135,6
C5 – GWP 100a	0	573	148,7 (1352 kgCO ₂ eq)	57,78
C7 – Coût de fabrication avec mise en œuvre	0	5 160 (3 x 1720)	6 575	2 390
C7 – Coût d'usage	0	226	54,26	64,06
Coût sur le cycle de vie	3 212	5 959	9 106	2 647

Tableau 5. 11 : Comparaison des performances du système optimisé avec le système, la climatisation suivant les critères choisis précédemment

5.3.2.2 Optimisation par la méthode OIA

Comme évoqué dans le paragraphe 5.1.1, les fonctions d'acceptabilité ont besoin de points de contrôle établissant les intervalles d'acceptabilité. Dans ce cas, seule la fonction de minimisation est utilisée car le critère de coût global et l'inconfort doivent être minimisés. La valeur de l'inconfort avec le système actuel (60,6 °C.h.an⁻¹) a été choisie comme valeur maximale (y^{\max}) de l'intervalle pour calculer la valeur de la variable d'interprétation z_1 du critère d'inconfort. Concernant les contraintes, il a été choisi de conserver la somme des coûts car il est difficile de définir des intervalles pour chaque contrainte ainsi que des pondérations. le calcul de la variable d'interprétation z_2 représentant le coût des contraintes se base sur le coût du système de climatisation (5959 €) comme borne de la valeur maximale acceptable (y^{\max}). Les valeurs minimales des intervalles d'acceptabilité (y^{\min}) sont égales à 30% des valeurs y^{\max} pour les deux fonctions.

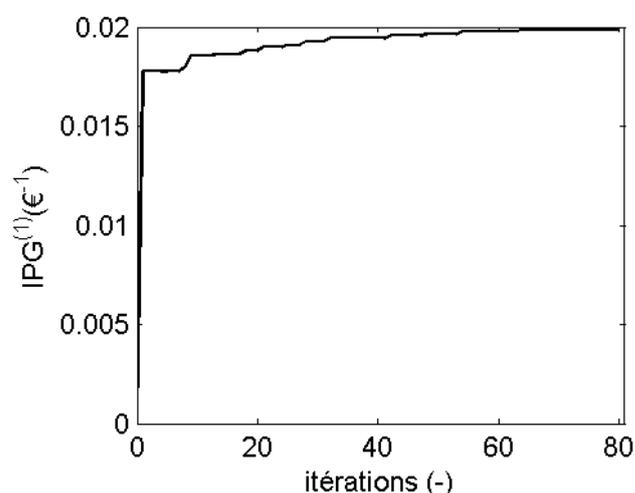


Figure 5. 8 : Indice de performance (IP₁) de la meilleure solution à

chaque itération

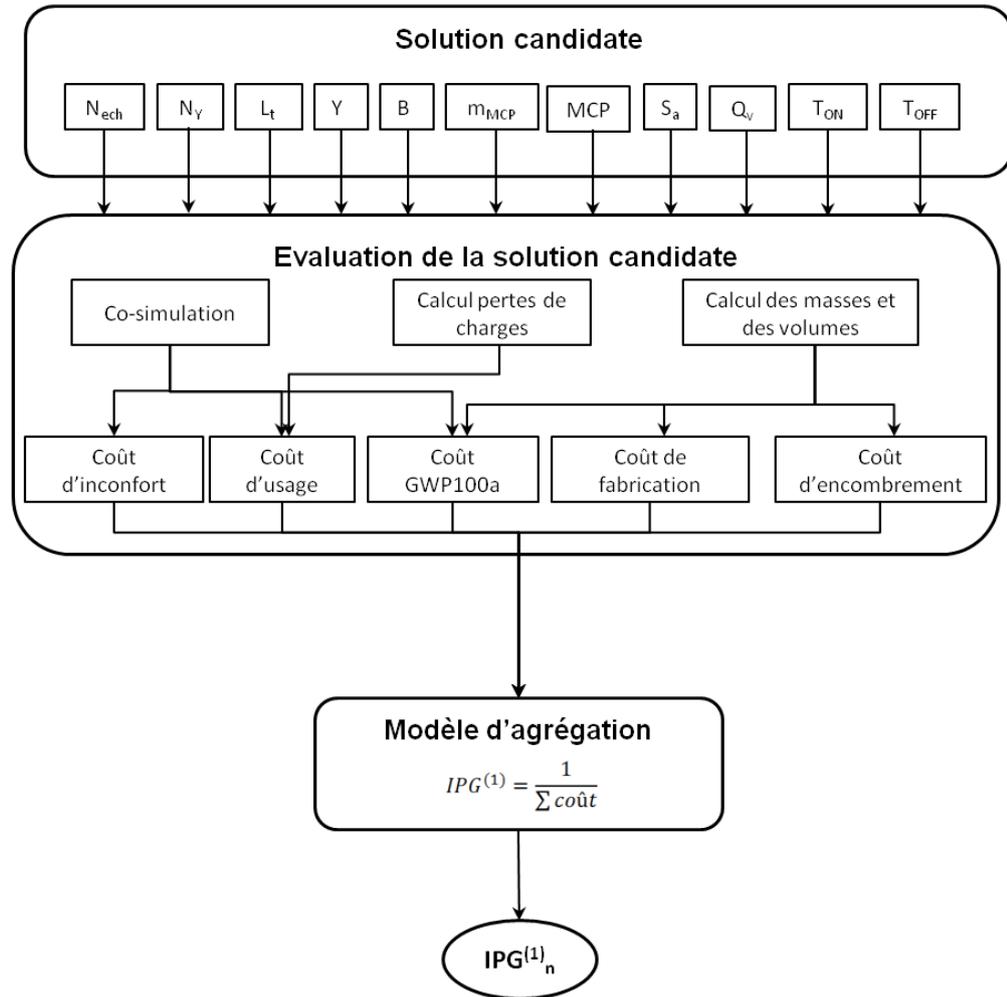


Figure 5. 9 : Schéma du processus de calcul de l'indice de performance global à partir des variables de conception et de pilotage avec la monétisation des variables de performance

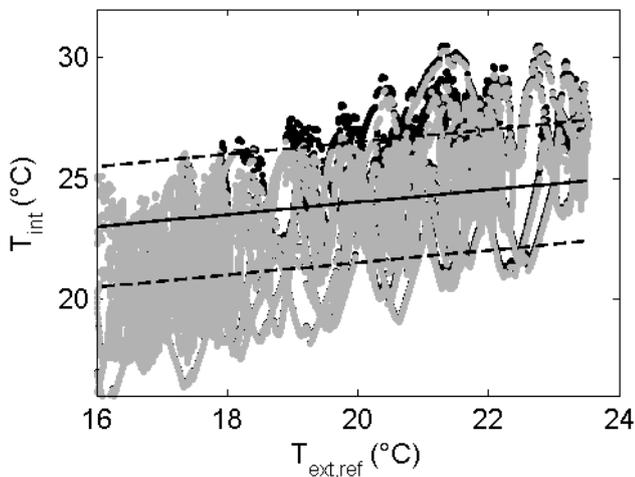


Figure 5. 10 : Température intérieure de NAPEVOMO en fonction de la température moyenne de référence sans systèmes de rafraîchissement (noir) et avec le prototype N°1 (gris clair) ; simulations entre 5 mai et 22 octobre

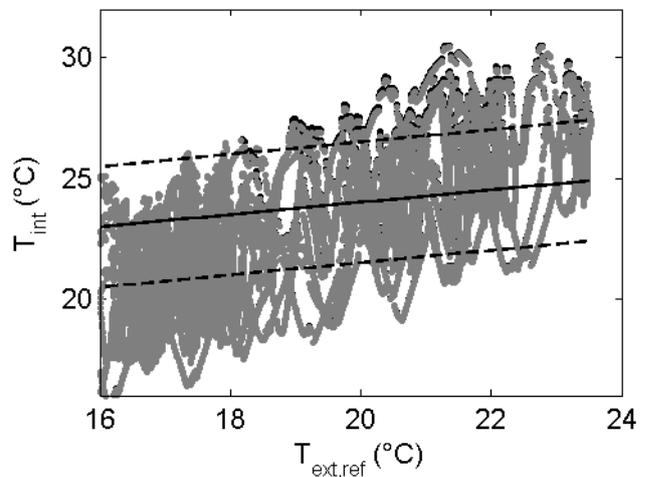


Figure 5. 11 : Température intérieure de NAPEVOMO en fonction de la température moyenne de référence sans systèmes de rafraîchissement (noir) et avec la version optimisée n°1 (gris clair) ; simulations entre 5 mai et 22 octobre

La figure 5. 13 présente le processus permettant d'obtenir l'indice de performance global (IPG) à partir des variables de conception. Les performances du système actuel sont représentées sur les deux graphiques de fonctions d'acceptabilité par un point gris. N'ayant pas de pondération à affecter à chaque objectif, nous avons choisi d'agréger les objectifs en utilisant la valeur minimum des variables d'interprétation z_i , avec un niveau de compromis $s \rightarrow -\infty$. L'indice de performance globale s'exprime donc de la manière suivante :

$$IPG^{(2)} = \min [z_1, z_2] \quad (5- 14)$$

La convergence de l'optimisation est obtenue au bout de 29 itérations de 100 solutions testées à chaque fois. La figure 5. 12 montre l'évolution de l'indice de performance IPG en fonction des itérations.

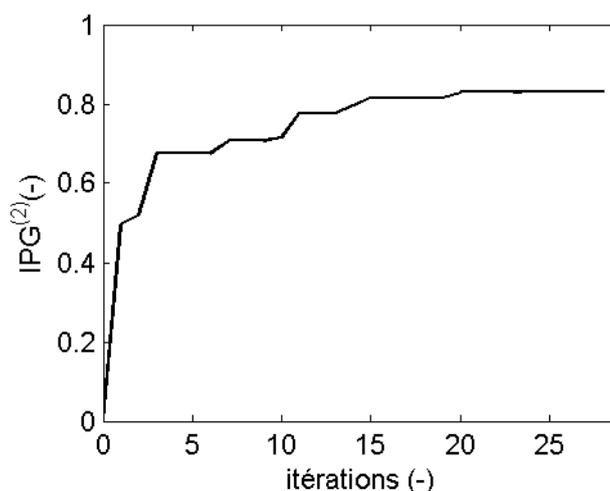


Figure 5. 12 : Indice de performance (IPG⁽²⁾) de la meilleure solution à chaque itération

La version optimisée n°2 du système comprend un seul échangeur-stockeur composé de 9 plaques (0,29 x 0,015 x 2,15 m) remplies au total de 63 kg de paraffine RT28HC(cf. tableau 5. 12). Les dimensions extérieures de l'échangeur-stockeur sont (0,36 x 0,35 x 2,65). Le débit de ventilation est de 275 m³.h⁻¹ et les consignes de température sont [19,6 ; 26,5].

Il est important de noter qu'aucun des variables de conception dans les versions optimisés n°1 et n°2 n'a atteint les extrémités des intervalles de variabilité définis dans le paragraphe 5.3.1. Ceci montre que les intervalles ont été bien choisis.

De plus, le tableau 5. 13 montre que l'inconfort de la version optimisée n°2 est inférieur à celle de la version actuelle du système avec un coût plus faible. Les figures 5.14 et 5.15 montre qu'à partir d'une température extérieure moyenne de 20°C le système optimisé réduit plus l'inconfort que le système actuel alors que la masse de paraffine est quasiment trois fois moins importante. Le système optimisé a un coût de fonctionnement plus élevé que le système actuel (cf. tableau 5. 13) mais le coût de fabrication est quasiment deux fois plus faible.

Variables de conception et de pilotage	Prototype N°1	Version optimisée n°1	Version optimisée N°2
Nombre d'échangeur – N_{ech} (-)	2	1	1
Nombre de rangées – N_z (-)	6	2	9
Longueur de l'échangeur-stockeur – L_t (m)	3,334	1,53	2,15
Largeur de l'encapsulation – Y_i (m)	0.026	0,12	0,29
Facteur de forme de l'encapsulation – B (-)	1,385	0,25	0,05
Masse de MCP par échangeur – m_{MCP} (kg)	100	8,53	63
Type de MCP	RT21	RT28	RT28HC
Section de passage de l'air – S_a (m ²)	0,0897	0,0361	0,06
Débit d'air – Q_a (m ³ .h ⁻¹)	300	206	275
Thermostat haut – T_{ON} (°C)	26	26,4	26,5
Thermostat bas – T_{OFF} (°C)	22	20,9	20

Tableau 5. 12 : Comparaison des variables de conception et de pilotage des systèmes de rafraîchissement : prototype N°1, version optimisée n°1, version optimisée n°2

-Critère	Sans système	Climatiseur 2kW (3 systèmes)	Prototype N°1	Version optimisée n°2
FS1 – Degré-heure °C.h ⁻¹ .an ⁻¹	178,5	0	60,6	52,7
C1 – Encombrement	0	0	1239	345
C5 – GWP 100a	0	573	148,7	81
C7 – Coût de fabrication avec mise en œuvre	0	5 160 (3 x 1 720)	6 575	3 360
C7 – Coût d'usage	0	226	54,26	169
Coût sur le cycle de vie hors inconfort	0	5 959	8016	3 955

Tableau 5. 13 : Comparaison des performances de la version optimisée n°2, du prototype N°1, du climatiseur et sans système

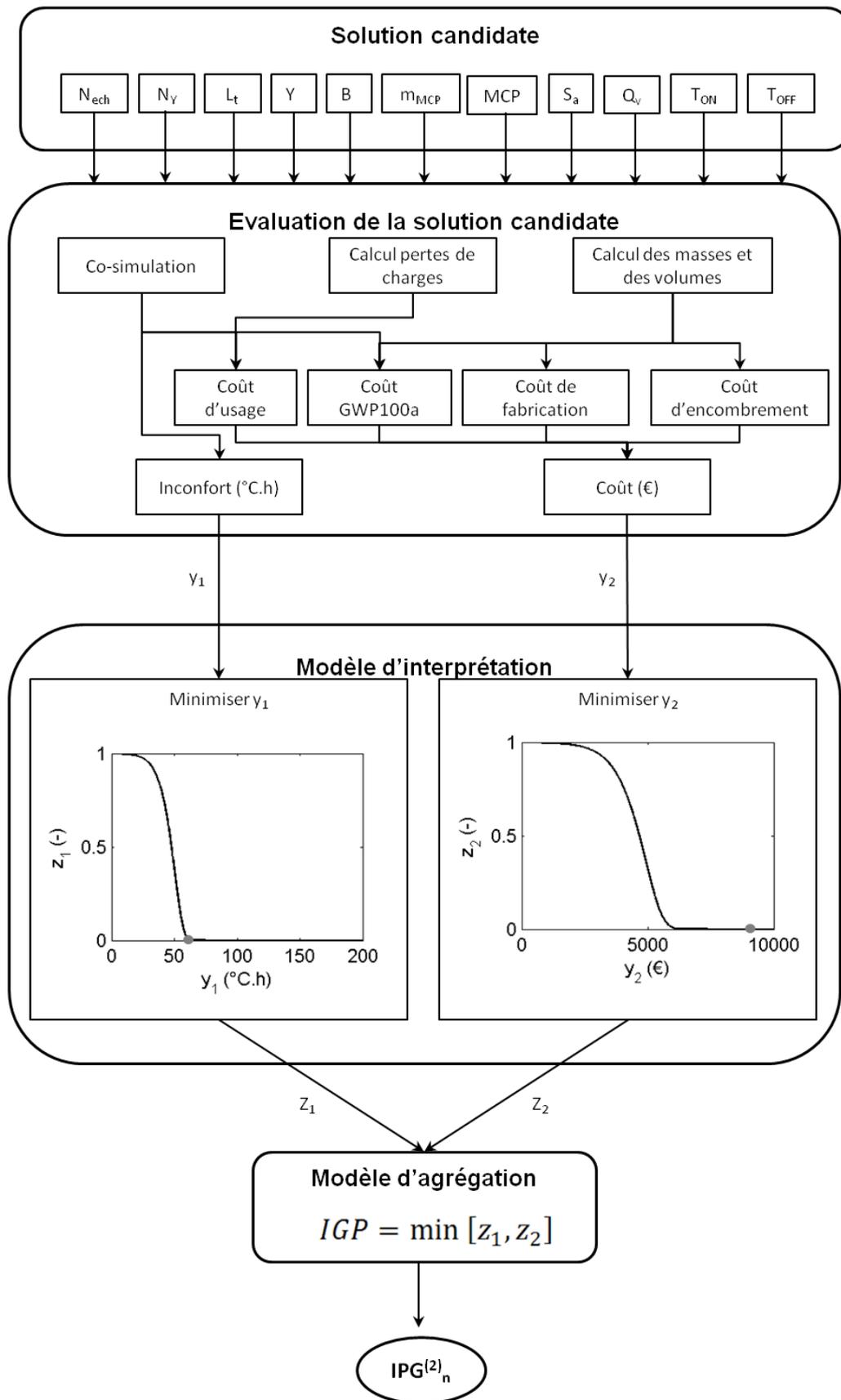


Figure 5. 13 : Schéma du processus de calcul de l'indice de performance global à partir des variables de conception et de pilotage avec la méthode OIA

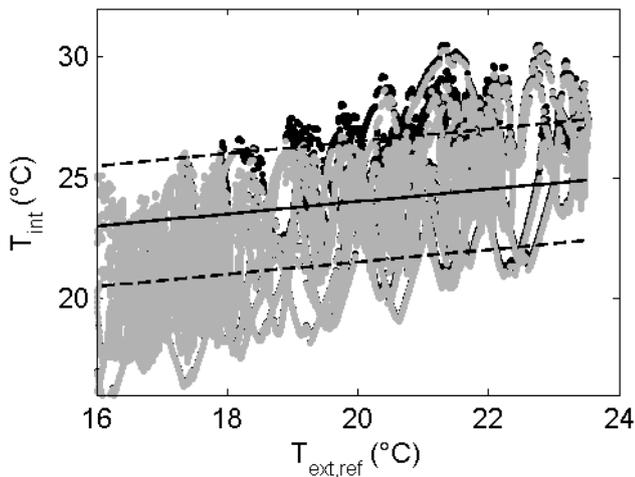


Figure 5. 14 : Température intérieure de NAPEVOMO en fonction de la température moyenne de référence sans système de rafraîchissement (noir) et avec le prototype N°1 (gris clair) ; simulations entre 5 mai et 22 octobre

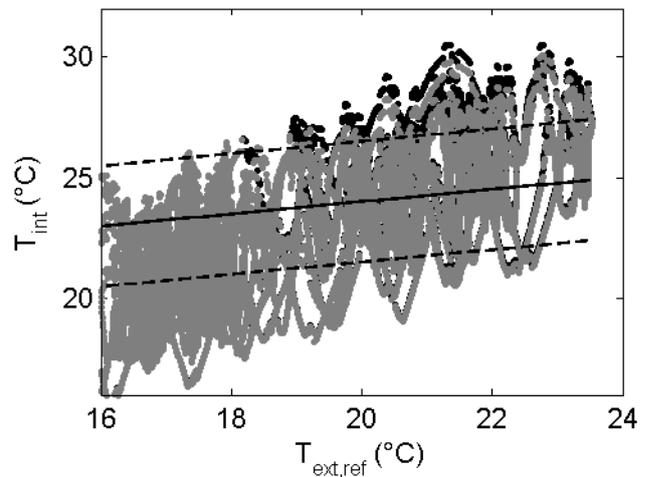


Figure 5. 15 : Température intérieure de NAPEVOMO en fonction de la température moyenne de référence sans système de rafraîchissement (noir) et avec la version optimisée n°2 (gris clair) ; simulations entre 5 mai et 22 octobre

Synthèse du chapitre 5

Dans ce chapitre, la première version d'un outil d'aide à la décision pour la conception préliminaire de système de rafraîchissement est présentée. Cet outil basé sur une méthode d'optimisation intègre dans son modèle d'évaluation, les outils de simulation et de co-simulation présentés dans le chapitre 3. Après avoir défini les critères de performance en utilisant l'analyse fonctionnelle, chaque critère est converti en valeur monétaire.

Concernant l'optimisation, deux approches d'interprétation et agrégation ont été utilisées et comparées. La première interprétation consistant en la somme des critères convertis est la plus simple à mettre en place car contrairement aux fonctions d'acceptabilités utilisées dans la deuxième approche, elle ne nécessite pas de définir pour chaque critère, des intervalles d'acceptabilité. Cependant, son application a montré que la mauvaise performance d'un critère peut donner un système optimal. En effet, la version du système obtenu a des performances de confort plus faibles que la version actuelle, ce qui est réhibitoire selon nous.

La deuxième approche consiste à utiliser des fonctions d'acceptabilité variant entre 0 et 1 et une agrégation choisissant la valeur des DOI la plus faible. Le système obtenu après optimisation est plus performant des points de vue confort et économique que le système actuel. Cette première application est très encourageante et ouvre de nouvelles perspectives d'améliorations de l'outil telles que : compléter avec de nouveaux matériaux, affiner les procédés de fabrication possibles et les coûts associés.

Dans l'objectif de développer un système capable de satisfaire les besoins en confort d'été dans les secteurs résidentiel et tertiaire, il sera nécessaire de multiplier les différentes typologies de bâtiment et différentes météo pour déterminer s'il existe une ou plusieurs configurations pouvant satisfaire un maximum de situations. De plus, la base de données des matériaux devra être enrichie avec d'autres matériaux à changement de phase (avec des propriétés thermiques caractérisées précisément) et d'autres matériaux d'encapsulations (matières plastiques) avec des données standard sur les dimensions.

Cette optimisation a permis également d'invalider un concept erroné qui a été appliqué sur les deux premiers prototypes. Il concerne le surdimensionnement de la masse de MCP installée dans les échangeurs. En effet, le

système installé dans la maison NAPEVOMO était initialement composé de 400 kg (200 kg de RT21 et 200 kg de RT28HC) et le système installé dans la maison SUMBIOSI utilise 250 kg. Ces importantes quantités de MCP ont été installées pour garantir une quantité de stockage suffisante. Mais l'optimisation a montré que 63 kg de RT28HC pouvait garantir des meilleures performances. La masse est probablement limitée par la capacité du système à régénérer la phase solide pendant la nuit.