

État de l'art des systèmes solaires et d'optimisation des paramètres

1.1 État de l'art des systèmes solaires

Le soleil est probablement la source d'énergie la plus disponible sur Terre. Une énergie qui peut se transformer en chaleur, par le moyen des panneaux solaire thermiques, ou en électricité, par le moyen des cellules photovoltaïques.

Après la crise pétrolière dans les années 70, l'Europe commence à concentrer ses efforts pour réduire sa dépendance aux énergies non renouvelables en provenance des sources fossiles qui se concentrent dans des régions géographiques spécifiques dans le monde. Or, dans ces dernières décennies, la motivation change à cause de l'urgence environnementale et par les soucis écologiques.

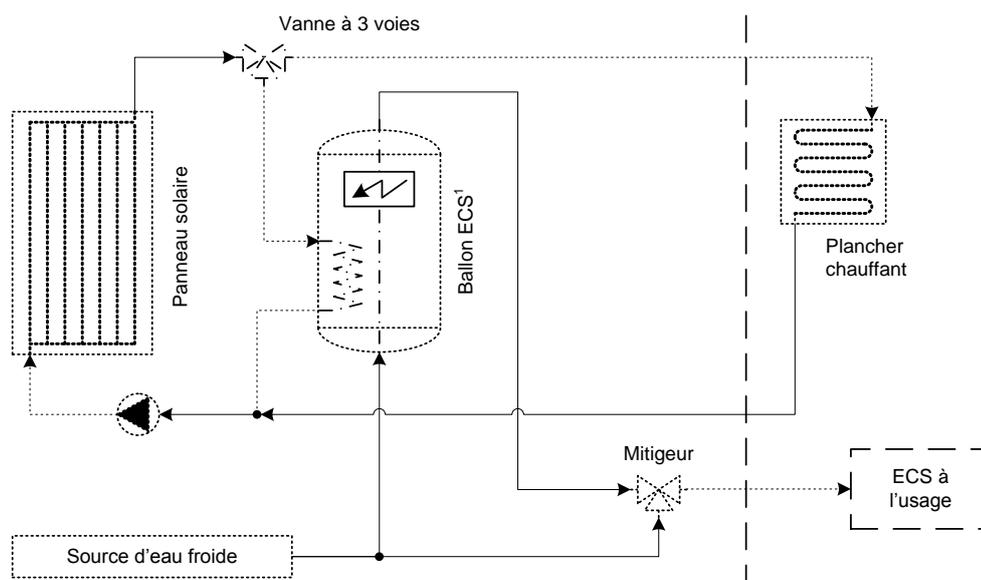
Ces efforts ont débuté avec les petits systèmes solaires individuels pour la production d'eau chaude sanitaire, puis, à partir du milieu des années '80, avec les systèmes solaires combinés. Soutenue par les recherches scientifiques, cette tendance se renforce aujourd'hui ; le milieu industriel trouve cette technologie intéressante en vue de la création d'un nouveau marché plus écologique et durable.

1.1.1 Chauffe-eau solaire individuel (CESI)

Les premiers chauffe-eaux solaires ont été commercialisés aux Etats-Unis entre les années 1890 et 1920 [1]. En France, on commence à maîtriser l'installation des Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) dans les années '70 ; ce secteur a connu un développement stable durant les années '90 [2].

1.1.2 Système solaire combiné (SSC)

Suite au succès des CESI, une nouvelle typologie voit le jour qui est connue sous le nom de Plancher Chauffant Solaire Direct (PSD) ; La Figure 1.1 montre un schéma hydraulique de base de ce système.



¹ avec une source d'appoint comme une résistance électrique intégré, une chaudière à bois ou à gaz

Figure 1.1 : Schéma hydraulique d'un plancher solaire direct

La connexion directe entre le panneau solaire et le plancher chauffant se fait sans aucun stockage temporaire d'énergie ; en revanche, une partie de l'énergie est stockée grâce à la masse du plancher et à l'inertie de l'enveloppe du bâtiment. Avec ce système, un chauffage d'appoint s'impose car il se trouve que l'inertie du plancher rend le temps de réponse assez long ce qui entraîne une gêne occasionnelle lors du démarrage du système. La conception et la philosophie de régulation de ce système jouent néanmoins un rôle primordial dans la performance finale obtenue, ce qui varie d'un fabricant à l'autre.

Le système PSD a été commercialisé principalement en France entre 1986 et 1992 ; moins de 300 unités de PSD ont été vendues avant l'an 2000 [3]. Nous pourrions attribuer cette tendance à une régulation (contrôle-commande) non-adaptée à ces systèmes ainsi qu'à leur conception qui reste, dans la plupart des cas, rarement optimisée (faute de procédure de dimensionnement) ce qui décourage les investisseurs potentiels.

Les Systèmes Solaires Combinés (SSC) emploient la même approche multifonction que celle des PSD ; ils sont capables de fournir de l'ECS et du chauffage ; la typologie de SSC rajoute cependant un stockage d'énergie thermique captée ou de celle produite au sein du système. Un SSC dispose donc d'un stockage thermique sous forme de ballon hydraulique qui se recharge par la source solaire ; puis cette énergie sera soustraite en fonction des besoins du système [4].

Quand les premiers systèmes solaires combinés ont fait leur apparition sur le marché, des conceptions complexes ont envahi le domaine des SSC. La majorité de ces conceptions cherche à répondre aux exigences des conditions locales spécifiques comme : le climat, les contraintes techniques du site d'installation et le type de bâtiment associé.

L'industrie de l'époque offert des SSC moins chers mais certains manquaient fortement de la connaissance scientifique. Une première enquête internationale menée en 1997 a révélé, tous climats confondus, plus de vingt conceptions différentes [3].

Cette divergence des conceptions a mené à une coopération internationale dans le cadre de la Tâche 26 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) en 1998. Cette collaboration a permis d'analyser et de classer le plus grand nombre possible de conceptions de SSC au niveau international. La Tâche a mobilisé 25 experts dans 9 pays membre de l'AIE ; le rapport final de la tâche a analysé 21 modèles de SSC. Ce travail a ainsi contribué d'une façon directe à la valorisation des conceptions les plus performantes présentes sur le marché ; suite à cette tâche, des efforts de normalisation des installations solaires ont été lancés en 2004 [5].

Actuellement, nous n'avons pas de définitions communes des termes ou des procédures standardisées de test pour ce type des systèmes solaires. Aucune méthode n'est actuellement disponible pour trouver la solution dite « la meilleure » pour une conception proposée d'un système solaire multifonction dans des conditions données ; ce qui constituera donc le sujet principal de cette étude.

1.1.2.1 Méthodes de dimensionnement des SSC préalables à la Tâche 26 de l'AIE

Dans la littérature, le dimensionnement des systèmes solaires combinés se faisait par trois méthodes principales [6]. La première méthode emploie des tableaux qui intègrent en eux-mêmes la performance du panneau comme une fonction de ces caractéristiques, son site d'installation et son orientation [7].

La méthode « f-chart » utilise des corrélations des résultats de centaines de simulations où les paramètres de simulations ont été modifiés pour obtenir les corrélations désirées [8]. Cette

méthode offre le moyen d'estimer la fraction de la charge thermique qui devrait être fournie par l'énergie solaire pour un système donné. Le paramètre primaire de dimensionnement est la surface du panneau solaire ; d'autres paramètres secondaires sont également pris en compte comme le volume du ballon de stockage thermique et le débit du fluide. La méthode a été développée pour trois configurations standards.

La troisième méthode repose sur des simulations dites « raccourcies » faites uniquement pour des jours représentatifs des données météo et les résultats sont extrapolés pour estimer une performance à long terme [9].

Ces méthodes, dans la plupart des cas, soit sont basées sur les données des simulations préfinies pour estimer la performance du système, soit elles emploient des hypothèses simplificatrice pour économiser le temps de calcul. La méthode « f-chart » a été développée pour dimensionner des SSC génériques dont les schémas sont prédéfinis [10].

1.1.2.2 Méthode FSC de comparaison des SSC

Au cours de la Tâche 26 de l'AIE, neuf schémas de SSC ont été modélisés. Pour faciliter le choix d'un système SSC particulier qui conviendrait plus aux contraintes techniques du site d'installation, ce travail a également donné naissance à une méthodologie de comparaison des systèmes solaires combinés appelée « la procédure de la Fraction Solarisable de Consommation (FSC) ».

La méthode FSC élaborée au cours du travail de l'AIE permet la caractérisation des SSC se trouvant dans des climats divers, avec des panneaux solaires dont la surface ainsi que l'orientation et l'inclinaison sont variables, et finalement pour des charges thermiques différentes en chauffage et ECS [10].

Dans les deux paragraphes suivants, nous illustrons brièvement les indicateurs de performance employées dans le cadre du travail de la Tâche 26 ainsi que la méthode FSC.

1.1.2.3 Indicateurs de performance pour la méthode FSC

Le premier indicateur est la fraction d'économie d'énergie thermique. Cette fraction prend en compte seulement l'énergie fossile économisée par le SSC comparée au système de chauffage de référence sans recours à la source renouvelable. Autrement dit, elle indique l'économie d'énergie basée sur la quantité de carburant fossile consommé par le système solaire comparée avec celle consommée par le système de référence [10]:

$$f_{sav,therm} = 1 - \frac{E_{aux}}{E_{aux,ref}} \quad (1)$$

où $f_{sav,therm}$ est la fraction d'économie d'énergie thermique, E_{aux} est l'énergie primaire en provenance d'une source non renouvelable qui sera économisée par SSC, $E_{aux,ref}$ est l'énergie primaire consommée par un système de référence sans recours à une source renouvelable.

Le deuxième indicateur est la fraction d'économie d'énergie thermique étendue. Comme son nom l'indique, il est une définition plus large de la fraction d'économie d'énergie thermique. Cette valeur prend en compte l'énergie électrique consommée par les composants du système comme : les pompes, les vannes commandées et les régulateurs, aussi bien pour le système solaire que pour le système de référence. Par définition, les systèmes solaires seront alors classés en fonction de la plus basse consommation électrique des composants [10] :

$$f_{sav,ext} = 1 - \frac{E_{aux} + W_{par}}{E_{aux,ref} + W_{par,ref}} \quad (2)$$

où $f_{sav,ext}$ est la fraction d'économie d'énergie thermique étendue, W_{par} est l'énergie électrique consommé par les équipements secondaires du SSC, et $W_{par,ref}$ est l'énergie électrique consommé par les équipements secondaires du système de référence sans recours à une source renouvelable.

Le but d'un système solaire combiné est de garder la température intérieure dans la zone climatisée autour de la température de consigne et de délivrer de l'eau chaude sanitaire à une température prédéfinie. Au cas où ce système n'arrive pas à remplir ces critères, une pénalité devrait être rajoutée à la demande d'énergie en considérant que cette addition va récompenser le manque de confort chez l'utilisateur. Le troisième et le dernier indicateur est la fraction d'indicateur d'économie ; il prend alors en compte le confort thermique dans les locaux et l'ECS sous la forme de pénalité qui s'ajoute à la consommation d'énergie [3] :

$$f_{si} = 1 - \frac{E_{aux} + W_{par} + (Q_{pen} - Q_{pen,ref})}{E_{aux,ref} + W_{par,ref}} \quad (3)$$

où f_{si} est la fraction d'indicateur d'économie, Q_{pen} est une consommation supplémentaire rajoutée à la consommation totale d'énergie du système pour récompenser le manque du confort thermique, $Q_{pen,ref}$ est une consommation supplémentaire rajoutée à la consommation totale d'énergie pour récompenser le manque du confort thermique du système de référence sans recours à une source renouvelable.

1.1.2.4 Méthodologie de la fraction solarisable de consommation (FSC)

La méthodologie FSC ne prend pas en compte des facteurs comme le climat, les charges thermiques du chauffage et de l'ECS et la surface du panneau solaire [11]. La FSC (Équation (4)) est considérée comme la fraction théorique maximale d'économie d'énergie qu'un système solaire combiné peut atteindre s'il n'y a pas des pertes thermiques [12].

$$FSC = \frac{Q_{sol,use}}{E_{ref}} \quad (4)$$

où FSC est la fraction solarisable de consommation, $Q_{sol,use}$ est l'énergie solaire, E_{ref} est la consommation du système de référence sans recours à une source renouvelable.

La valeur de FSC peut être considérée comme étant la fraction d'économie d'énergie maximale théorique ; il est possible d'atteindre cette valeur seulement si le SSC n'a pas de pertes thermiques. La comparaison de FSC avec la valeur réelle de fraction d'économie d'énergie réalisée par le SSC donne une bonne indication de la fiabilité du système étudié [10].

La fraction d'économie d'énergie peut être donnée en fonction de FSC qui peut être identifiée par la régression suite aux tests réalisés sous différentes conditions de climat, type de bâtiment et de la surface des panneaux solaires :

$$f_{sav} = a.FSC^2 + b.FSC + c \quad (5)$$

où f_{sav} est la fraction d'économie d'énergie, a, b et c sont les coefficients de régression qui forment les caractéristiques FSC du système solaire combiné étudié.

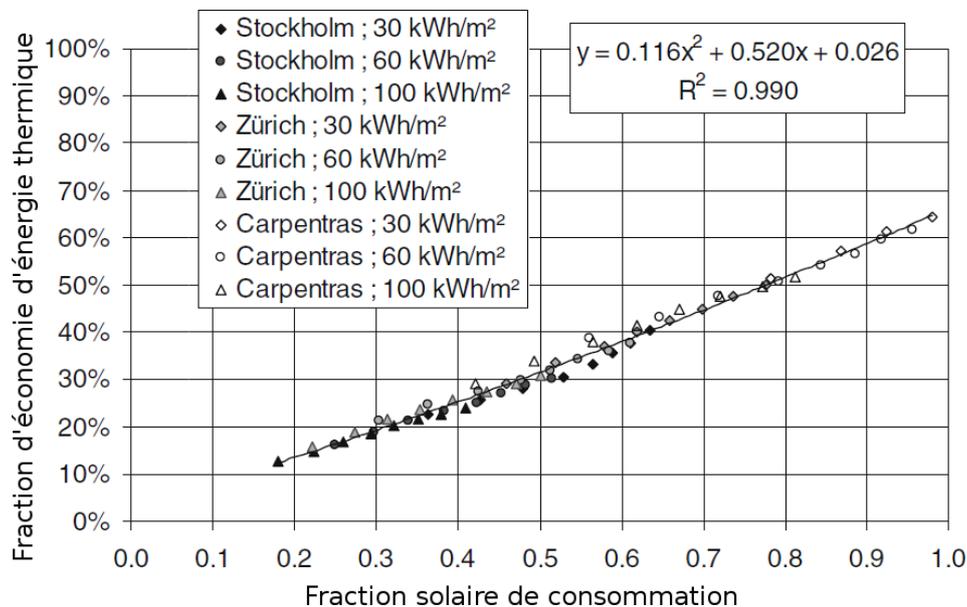


Figure 1.2 : Fraction solarisable de consommation pour un système étudié par la Tâche 26 (source : [10])

La Figure 1.2 illustre la méthode FSC ; la ligne continue, représentée par l'équation en haut et à droite de la même figure, est déduite par régression autour des points de tests dans neuf cas d'un système PSD étudié par la Tâche 26 de l'AIE.

1.1.3 Techniques de production de froid

La réduction des émissions de gaz à effet de serre et notamment de dioxyde de carbone (CO₂) est une préoccupation importante des chercheurs et des ingénieurs. Les Bâtiments à Haute Efficacité Énergétique (BHEE) contribuent désormais à la réduction des besoins d'énergie thermique en hiver, mais ils posent néanmoins un nouveau défi pour le confort d'été.

Avec le changement climatique, la demande du confort des occupants est accentuée en été. En secteur résidentiel, l'augmentation de cette demande est estimée à 35% en moyenne depuis 2001. En France, les ventes des unités individuelles de petites puissances (de moins de 18 kW) ont atteint plus de 300 000 climatiseurs à compresseur électrique vendus en 2005 [13].

Les nouvelles réglementations en matière d'efficacité thermique exigent désormais des bâtiments mieux isolés et plus efficaces énergétiquement. Elles prévoient la maîtrise de l'architecture comme un moyen pour diminuer au maximum les besoins de rafraîchissement. Cependant, l'optimisation architecturale ne peut pas, à elle seule, satisfaire les exigences énergétiques ; le développement des techniques performantes alternatives s'avère alors incontournable pour accompagner ces nouvelles démarches réglementaires.

Les techniques de refroidissement à compression mécanique ont déjà fait leur preuve en ce qui concerne le rendement et la performance énergétique ; ces techniques sont bien connues depuis des années et aujourd'hui encore, elles sont toujours utilisées dans nos réfrigérateurs et dans nos climatiseurs.

Le Coefficient de Performance (COP) d'une machine frigorifique est le rapport entre la quantité d'énergie transférée par la machine et celle consommée par la même machine afin de réaliser ce transfert. Une machine frigorifique à compression mécanique générique a un COP caractéristique de 3,0 ou mieux. Malgré cette performance, le compresseur mécanique reste alors un consommateur mal adapté aux sources renouvelables comme le solaire. La puissance électrique consommée par ces appareils est considérée comme importante surtout quand il

s'agit du rafraîchissement des espaces habitables et en conséquence des pics de consommation électrique peuvent toujours avoir lieu pendant les périodes estivales.

Dans le même temps, les préoccupations environnementales se renforcent de plus en plus en appuyant sur la nécessité de limiter des rejets de gaz à effet de serre, la réduction et l'élimination progressive des fluides frigorigènes nocifs employés dans les Pompes à Chaleur (PAC) à compression mécanique et notamment les chlorofluorocarbures (CFC). Les CFC sont responsables pour une bonne partie de la destruction de la couche d'ozone.

Pourtant, la compression mécanique de fluide frigorigène n'est pas l'unique méthode de production de froid. Il existe depuis 1850 la technique de production de froid par absorption donc le grand public connaît déjà des applications de loisirs comme des réfrigérateurs pour voiliers ou pour les caravanes. Au Japon et aux États-Unis, la climatisation par absorption détient une grande partie du marché de climatisation du grand tertiaire neuf [5].

1.1.3.1 Principe thermique de la machine frigorifique à absorption

Le transfert de chaleur nécessite normalement la présence d'au moins deux sources de chaleur. Car selon le théorème de Carnot, un générateur thermodynamique doit recevoir de la chaleur d'une source à basse température et la rejeter dans une autre source à une température plus élevée par le moyen d'un apport de travail mécanique. Une machine frigorifique à absorption est un générateur thermodynamique qui échange de la chaleur parmi, au moins, trois sources de chaleur à trois niveaux différents de température (Figure 1.3).

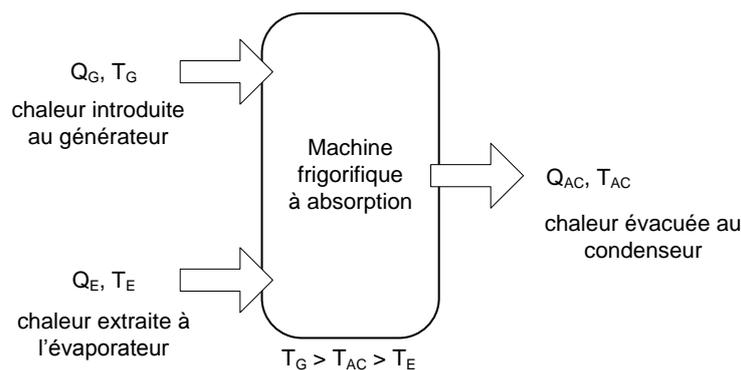


Figure 1.3 : Principe thermique d'un cycle frigorifique à absorption

D'après la même Figure 1.3, en appliquant les deux principes de la thermodynamique, on obtient alors :

$$W + Q_G + Q_E + Q_{AC} = 0 \quad (6)$$

et

$$\frac{Q_G}{T_G} + \frac{Q_E}{T_E} + \frac{Q_{AC}}{T_{AC}} + \Delta S = 0 \quad (7)$$

où W est le travail, Q_G est la chaleur introduite au générateur, Q_E est la chaleur extraite à l'évaporateur, Q_{AC} est la chaleur évacuée au condenseur de la machine, ΔS est le changement d'entropie du système, T_G est la température au générateur, T_E est la température à l'évaporateur, T_{AC} est la température au condenseur.

Si on considère le cas d'une pompe à chaleur qui extrait de la chaleur d'une enceinte à basse température et rejette ensuite cette chaleur dans l'environnement, la combinaison de l'Équation (6) et de l'Équation (7) peut s'écrire :

$$W = Q_G \left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_G} \right) + Q_E \left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_E} \right) + T_{AC} \cdot \Delta S \quad (8)$$

Les termes Q_G, Q_E étant obligatoirement positifs et le terme multiplié par Q_G étant négatif, l'Équation (8) montre que le travail nécessaire pour que la machine fonctionne peut être nul si le terme Q_G est positif. On a donc :

$$Q_G \left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_G} \right) + Q_E \left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_E} \right) + T_{AC} \cdot \Delta S = 0 ; W = 0 \quad (9)$$

La conception d'une machine frigorifique basée sur ce principe est alors possible et même sans avoir besoin d'ajouter aucun travail mécanique. Une pompe à circulation (Figure 1.4) est cependant nécessaire pour la plupart des machines frigorifiques à absorption afin de garantir la bonne circulation du fluide frigorigène entre les zones à pression différente.

Le COP d'une machine frigorifique caractérise sa performance énergétique ainsi que sa rentabilité ; il est défini par le ratio de la chaleur produite par la machine au travail mécanique consommé par le moteur du compresseur de la pompe à chaleur :

$$COP = \frac{|Q|}{W} \quad (10)$$

Une machine frigorifique à absorption n'a pas besoin d'un travail mécanique pour fonctionner ; son coefficient de performance est alors :

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G} \quad (11)$$

On peut exprimer ce COP à l'aide de l'Équation (9) comme :

$$COP = \frac{\left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_G} \right)}{\left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_E} \right)} - \frac{T_{AC} \Delta S}{Q_G \left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_E} \right)} \quad (12)$$

En divisant la dernière équation par T_{AC} et en considérant que la machine est réversible, donc $\Delta S = 0$, on obtient :

$$COP_{rev} = \frac{\left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_G} \right)}{\left(-1 + \frac{T_{AC}}{T_E} \right)} \quad (13)$$

Nous avons déjà mentionné que le COP d'une machine frigorifique à compression mécanique s'élève à 3,0 ou mieux. La machine frigorifique à absorption, quant à elle, a un COP typique qui se situe entre 0,5 et 0,7 pour une machine à simple effet, et entre 0,8 et 1,0 pour un double effet.

1.1.3.2 Comparaison entre la machine frigorifique à absorption et celle à compresseur mécanique

Le principe du schéma technique d'une machine frigorifique à absorption ressemble en grande partie à celui d'une machine à compression mécanique ; on y trouve un condenseur, un évaporateur et un détendeur (Figure 1.4).

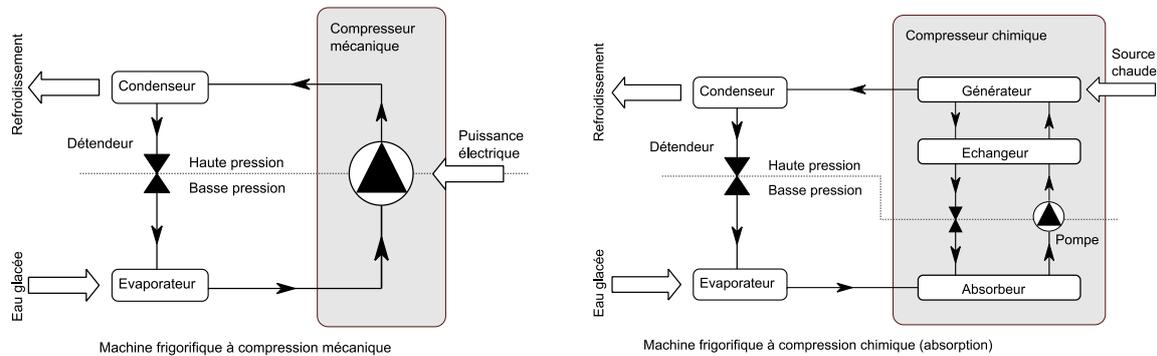


Figure 1.4 : Comparaison entre les systèmes de refroidissement à absorption et ceux à compression mécanique

D'un point de vue d'ensemble, les deux systèmes (Figure 1.4) apparaissent identiques sauf pour la section compression qui est représentée par un rectangle gris ; un compresseur chimique remplace ainsi le compresseur mécanique à moteur électrique. À la différence de ce dernier, le cycle de compression chimique emploie un couple frigorigène-absorbant comme une solution saline concentré de sels de bromure de lithium (LiBr) et d'eau (H₂O), ou de l'eau (H₂O) et de l'ammoniaque (NH₃). Toutefois, le cycle de compression chimique est maintenu obligatoirement sous vide ; certaines machines peuvent avoir une pompe qui permet de faire un tirage au vide permanent ce qui entraîne une augmentation de la consommation électrique totale de la machine.

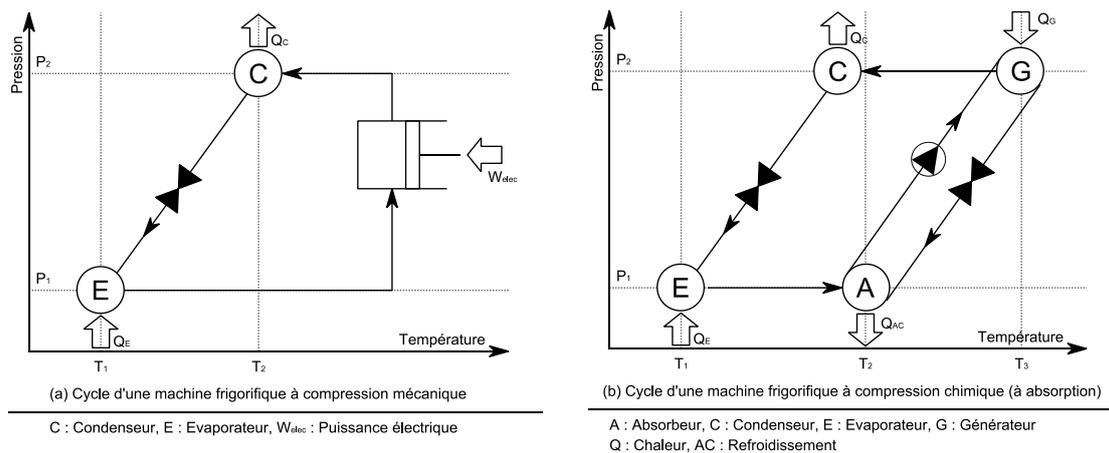


Figure 1.5 : Diagramme de Dühring pour les cycles frigorifiques à compression mécanique et à compression chimique (source : [14])

Le diagramme de Dühring (Figure 1.5) est un outil pratique pour connaître le comportement d'une solution sous différentes conditions d'un processus sous vide. Sur ce diagramme on peut constater que le cycle à compression mécanique a deux niveaux distincts de température (T₁, T₂) ; le cycle de la compression chimique a cependant un niveau supplémentaire de température (T₁, T₂, T₃). Sous cet angle, le premier se fait appeler un générateur thermodynamique ditherme et le deuxième un générateur thermodynamique tritherme.

1.1.3.3 Cycle de compression chimique

Tandis que la compression mécanique est réalisée par le moyen d'un moteur électrique avec un piston de type rotatif en général, la compression chimique, quant à elle, est réalisée en quatre étapes (Figure 1.5). La Figure 1.6 illustre les quatre éléments d'un cycle de compression par absorption à simple effet de type solution de bromure de lithium (H₂O/LiBr).

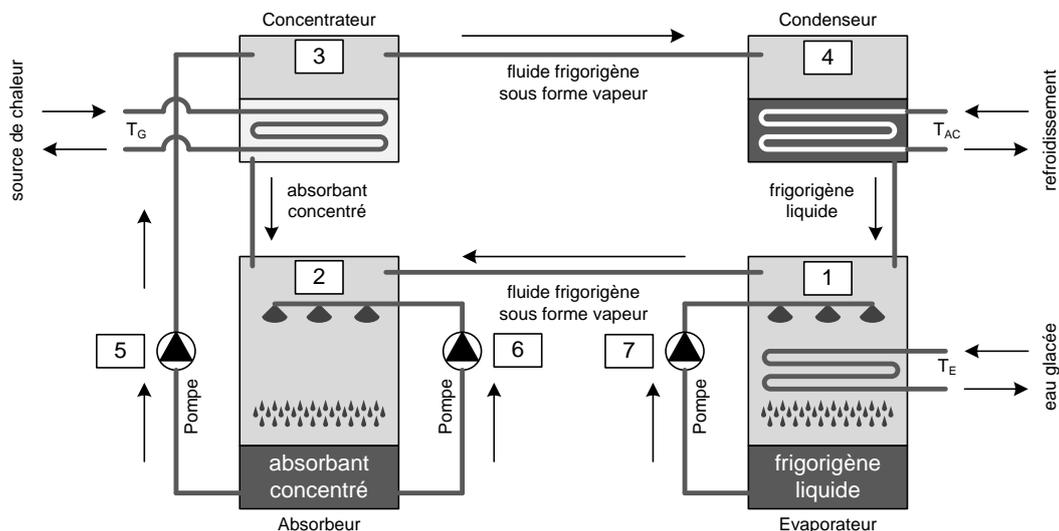


Figure 1.6 : Cycle de compression chimique de couple LiBr/H₂O [15]

Dans l'absorbeur (n°2 dans la Figure 1.6), la vapeur du fluide frigorigène (H₂O) est absorbée par une solution saline concentrée de sels de bromure de lithium (LiBr) ; la solution diluée est ensuite transférée vers le concentrateur (n°3 dans la Figure 1.6) à l'aide d'une pompe à solution (n°5 dans la Figure 1.6). Une fois dans le concentrateur, la solution saline diluée est amenée à l'ébullition grâce à l'échangeur au fluide chaud en provenance de la source de chaleur T_G ; elle libère ainsi la vapeur du frigorigène (H₂O) à haute pression qui est dirigée ensuite vers le condenseur (n°4 dans la Figure 1.6).

Un fluide de refroidissement passe régulièrement dans le condenseur à une température T_{AC} plus basse que la vapeur de frigorigène mais plus élevée que la température dans le circuit d'eau glacée, T_E . Après la récupération du frigorigène sous forme liquide, elle retourne enfin dans l'évaporateur (n°1 dans la Figure 1.6) où elle sera vaporisée sous vide et à haute pression sur l'échangeur dans lequel passe le fluide caloporteur du circuit d'eau glacée. Ce processus extrait de la chaleur du fluide caloporteur en transformant le frigorigène de forme liquide en vapeur qui est dirigée à nouveau dans l'absorbeur. La solution saline concentrée qui est restée dans le concentrateur est acheminée vers l'absorbeur pour un nouveau cycle.

1.1.3.4 Amélioration du cycle de compression chimique

À partir de la configuration à simple effet illustrée précédemment dans la Figure 1.6, des configurations plus complexes à double effet (ex. à deux étages) visent à améliorer le COP du cycle frigorifique à absorption. L'augmentation de la complexité (plus d'échangeurs et plus de pompes dans le circuit) ainsi que les irréversibilités dues aux transferts thermiques entre le concentrateur et le condenseur et dans les échangeurs font que le COP final ne dépasse pas la valeur 1,0, au mieux et que le coût final du système est plus élevé.

Cependant, des simples améliorations sont toujours possibles du cycle à simple effet. La chaleur de la solution saline concentrée en sortant du concentrateur peut être utilisée pour chauffer la solution diluée qui rentre dans le concentrateur en provenance de la pompe (n°5 dans la Figure 1.6).

La technologie d'absorption dépend en grande partie de l'efficacité des quatre échangeurs principaux : l'évaporateur, l'absorbeur, le condenseur et le concentrateur. Dans ce contexte, une nouvelle génération d'échangeurs rotatifs voit le jour ; l'agitation supplémentaire des liquides dans les échangeurs augmente l'efficacité de l'échange thermique. Ce concept a été utilisé dans

une machine frigorifique de puissance de 4,5 kW [16] ; La Figure 1.7 montre le tambour de la machine avec les quatre sections principales du cycle d'absorption.

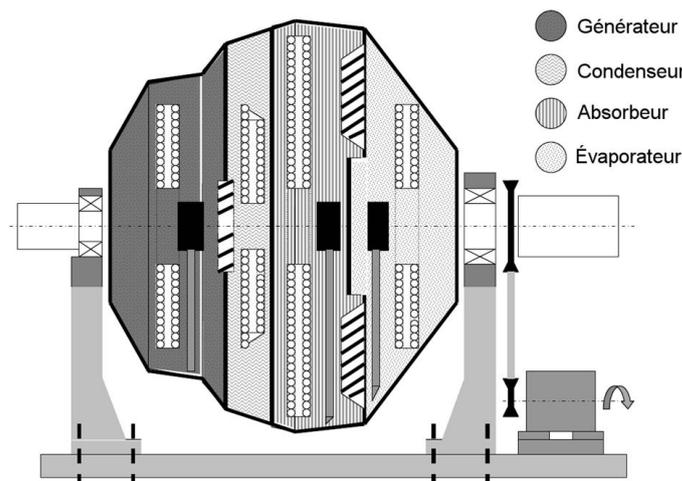


Figure 1.7 : Échangeur rotatif (le tambour) d'une machine frigorifique à absorption (source: [16])

Cette technologie utilise les forces rotationnelles qui, à leur tour, augmentent le transfert de chaleur et de masse ; elle sert également comme une pompe hydraulique pour la solution. Le maintien au vide de l'ensemble de la partie en rotation est garanti grâce aux raccords rotatifs et le système est ainsi fermé hermétiquement [17].

Des contraintes thermiques s'imposent cependant au niveau des supports de rotation où des fluides qui circulent avec un écart de température qui peut atteindre 30°C (fluide frigorigène à 12°C et fluide de refroidissement à 42°C). Le concepteur a pris ce point en compte avec des joints renforcés ce qui fait émerger un autre problème, d'ordre acoustique, à cause des bruits lors du démarrage et de l'arrêt de la machine (bruits constatés lors des essais sur la machine dans les locaux d'EDF).

1.1.3.5 Intérêt de la production de froid par absorption

Le COP donne une idée de l'efficacité énergétique d'un cycle frigorifique. Celui d'une machine frigorifique à absorption à simple effet se situe entre 0,7 et 1,0 (§1.1.3.1). Mais contrairement à une machine frigorifique à compression mécanique, une machine à absorption peut être alimentée en énergie qui pourrait provenir d'une source inépuisable, gratuite et constamment renouvelable comme le solaire, par exemple. Ce qui fait d'elle une offre sérieuse, d'autant de plus qu'elle n'utilise aucun fluide nocif que les réglementations internationales interdisent progressivement comme les chlorofluorocarbures (CFC).

Aujourd'hui, la gamme de puissances disponibles pour ces machines s'élargit avec les petites puissances pour lesquelles de réelles opportunités s'offrent dans de nombreux secteurs du bâtiment (individuels, petits résidentiels et tertiaires).

Le coût d'investissement d'une machine à absorption de petite puissance peut actuellement paraître élevé¹ par rapport au choix limité des fabricants et des puissances disponibles. Des études comparatives des coûts totaux (d'investissement, de maintenance et d'exploitation) des solutions doivent être réalisées afin d'effectuer les meilleurs choix pour les maîtres d'ouvrages et la clientèle.

¹ Prix moyen d'un climatiseur électrique de 4.5 kW_{ref} est de 2000€ ; pour une machine frigorifique à absorption de la même puissance le prix s'élève à 9500€.

En 2007, une enquête mondiale sur les systèmes de refroidissement assistés par l'énergie solaire a révélé la domination de la technique du refroidissement par absorption sur le marché. La Figure 1.8 montre la part de chaque technologie [18] : absorption, adsorption, froid par dessiccation solide et froid par dessiccation liquide.

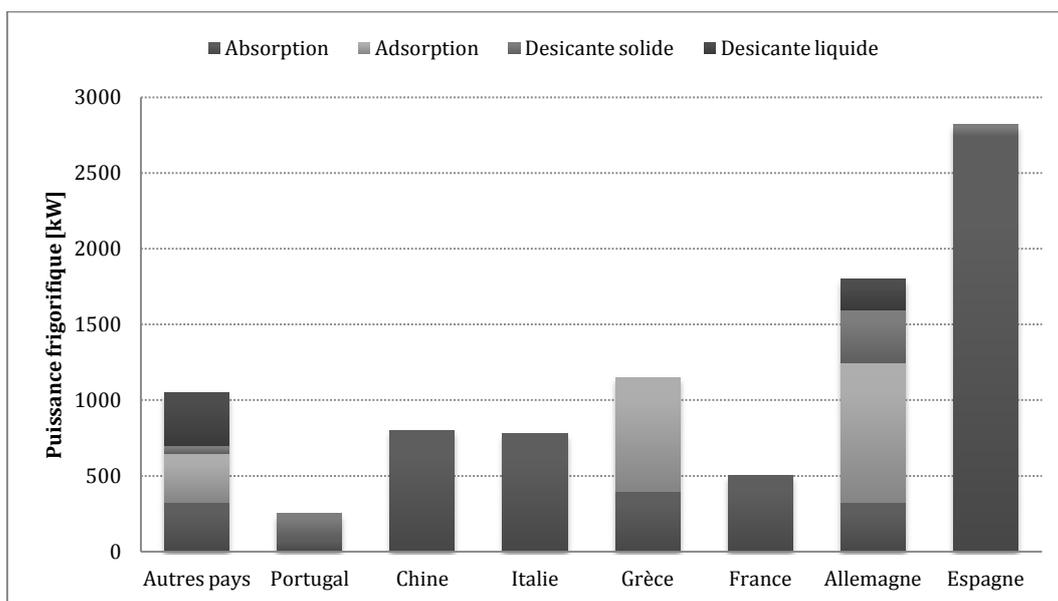


Figure 1.8 : Distribution mondiale de la puissance frigorifique assisté par l'énergie solaire (source : [18])

1.1.3.6 Revue des installations de climatisation solaire en Europe

Plusieurs recensements des installations solaires ont été effectués depuis 2000. En avril 2007 et lors d'un atelier parallèle à une réunion de l'AIE, on a annoncé le total de 120 installations de climatisation solaire en Europe (toutes tailles, toutes technologies tous statuts confondus) [5]. Plus d'une cinquantaine de ces installations sont destinées aux bâtiments tertiaires ; la plupart ont le plus souvent le statut de projet pilote, voire de prototypes et seulement quelques-unes sont des installations commerciales.

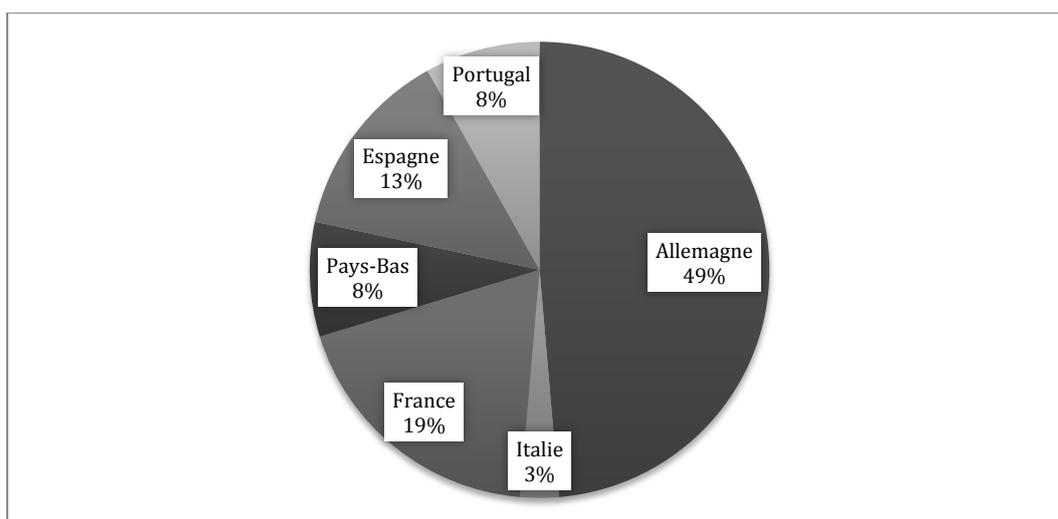


Figure 1.9 : Installations de climatisation solaire de 6 pays européennes entre 1999 et 2000 (source : [5])

Il subsiste encore des verrous technologiques et financiers à la diffusion de la technologie de rafraîchissement ou de climatisation solaire. Le recensement mentionné a référencé 36 installations se trouvant toutes dans six pays européens dont la répartition est montrée dans la Figure 1.9.

Des sept installations de climatisation à absorption en France recensées en 2000, seulement deux sont toujours en fonctionnement, dont les caves viticoles de Banyuls (66) (fonctionnement continu depuis 1991) et les bureaux du CSTB à Sophia Antipolis (fonctionnement saisonnier) ; les autres ont toutes été rapidement arrêtées après leur mise en fonctionnement dans les années '80 (la période de fonctionnement la plus longue a été de 5 ans). Cette situation est due, en grande partie, aux défaillances techniques rencontrées à cause de la régulation ou des composants mal dimensionnés [5].

De nouvelles installations de climatisation solaire à absorption ont vu le jour en France dont deux installations en Guadeloupe et pour le hall d'essais du CSTB à Sophia Antipolis. Ces installations ont été mises en œuvre dans le cadre du projet européen SOLARCLIM 2000 en 2003 et une troisième installation à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) à Chambéry en 2009.

1.1.3.7 *Revue des installations de climatisation solaire dans le monde*

Des statistiques au niveau mondial sur les installations de production de froid solaire nous informent de l'existence d'environ quatre-vingt installations de ce type [18]. Autour de 60% de ces installations sont dédiées à l'usage industriel, 15% sont destinées aux laboratoires et aux centres d'éducation, 6% au secteur hôtellerie-restauration et finalement 9% aux fins diverses comme des hôpitaux et des centres sportifs.

La majorité des installations investiguées ont recours à la production de froid par absorption ; 53% des installations emploient des capteurs solaires plans, 37% des capteurs sous vide et seulement 10% des capteurs paraboliques et des capteurs à air.

D'après les travaux de la Tâche 38 de l'AIE (de 2006 à 2010), les termes standards qui régissent le domaine de la climatisation solaire dans le monde ne sont pas encore définis, ce qui a été avant le cas avec des systèmes solaires combiné (SSC).

1.1.3.8 *Production des machines à absorption de petites puissances*

En Europe, de nouvelles machines frigorifiques à absorption de petites puissances sont en phase de développement et certaines machines sont passées du stade de prototype au stade d'essai et même à la production. Le Tableau 1.1 présente trois machines à absorption de petites puissances proposées pour le marché mondial avec un aperçu de leurs caractéristiques [19].

Tableau 1.1 : Machines à absorption de petites puissances étudiées dans le cadre du projet ABCLIM-SOL

Fabricant	EAW	Sonnenklima	Rotartica
Couple frigorigène-absorbant	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiBr	H ₂ O / LiBr
Puissance frigorifique [kW_{ref}]	15	10	4.5
Température de régénération (entrée/sortie) [°C]	90 / 80	75 / 65	90 / 85
Température de refroidissement (entrée/sortie) [°C]	30 / 35	27 / 35	30 / 35
Température d'eau glacée (entrée/sortie) [°C]	17 / 11	18 / 15	13 / 10
COP	0,71	0,77	0,67
Puissances électrique [W]	300	120	600

Le bromure de lithium (LiBr), qui est utilisé comme absorbant dans ces machines, a le défaut de se cristalliser aux températures élevées du circuit de refroidissement (supérieure à 45°C) [20]. Ce fait limite la température de régénération (T_G dans la Figure 1.6) à moins de 105°C maximum pour les machines à simple effet d'un seul étage. Diverses approches sont employées pour

surmonter ce problème comme : l'amélioration du transfert de chaleur et de masse afin de baisser la montée en température de la solution, la modification du cycle thermodynamique ou un système de contrôle avancé qui empêche la cristallisation et la corrosion [21].

Sachant que le COP d'une machine de petite puissance est souvent inférieur à 1,0, l'intérêt de production du chaud en utilisant des machines à absorption en mode inversée n'est pas envisageable avec la technologie actuelle.

1.1.4 Systèmes solaires multifonction multi-source intégrés aux bâtiments

Étant une source propre et illimitée, l'énergie solaire représente un enjeu majeur économique et environnemental. Les systèmes solaires sont améliorés continuellement en ajoutant de nouvelles fonctionnalités. Les machines frigorifiques de petites puissances permettent de réaliser des systèmes pour le chauffage, le refroidissement et l'ECS qui sont alimentés par la source solaire et par une source d'appoint auxiliaire à énergie fossile classique.

1.1.4.1 Schéma de principe des systèmes solaires multifonction multi-source

Le schéma de principe technologique d'un SYSMFS est illustré dans la Figure 1.10 ; il est important de souligner que ce schéma n'est pas unique. Toutefois, nous pouvons toujours trouver plus d'une configuration d'un schéma hydraulique d'un SYSMFS qui peut être inspiré soit par un SSC, l'ancêtre du SYSMFS, soit par d'après un schéma recommandé par le fabricant de la machine frigorifique à absorption.

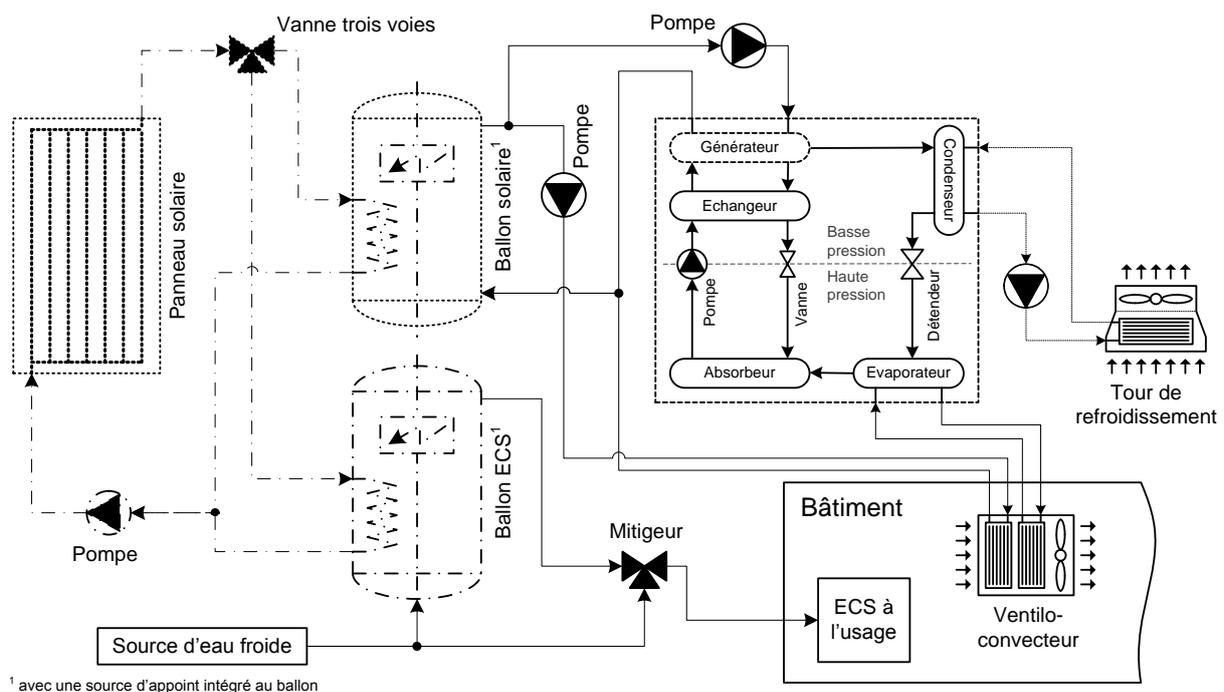


Figure 1.10 : Schéma de principe technologique d'un SYSMFS

Dans le cas de la Figure 1.10, le fluide caloporteur circule entre le panneau solaire et les ballons de stockage thermique. Il transporte la chaleur captée par le panneau solaire au ballon solaire principal, au ballon ECS, ou aux deux ballons en même temps suivant les besoins de chaque ballon. Le ballon solaire principal fournit de l'eau chaude soit directement à la batterie chaude du ventilo-convecteur, qui se trouve dans l'espace climatisé, soit à la machine frigorifique à absorption, qui alimente la batterie froide du ventilo-convecteur pour le refroidissement de l'espace climatisé. La chaleur soustraite de l'espace climatisé est rejetée vers l'environnement extérieur au bâtiment par le moyen d'une tour de refroidissement.

Le ballon ECS, quant à lui, fournit de l'eau chaude sanitaire à une température entre 50°C et 75°C. Le mitigeur installé à la sortie de ce ballon mélange cette eau avec l'eau de la source froide afin de diminuer sa température à environ 55°C pour l'usage ménager.

Dans cette configuration, des résistances électriques intégrées aux ballons thermiques font office d'une source d'énergie d'appoint. Ces résistances injectent de la chaleur directement dans l'eau du ballon solaire et celle du ballon d'ECS, selon le besoin. L'ensemble est sous la gestion d'un ou plusieurs contrôleurs suivant la conception et la philosophie du contrôle-commande utilisée. Il est cependant possible de substituer ces résistances par une chaudière à bois ou à gaz ; dans ce cas, des configurations supplémentaires peuvent être créées suivant l'emplacement de la chaudière dans le circuit.

Afin d'éviter le démarrage répétitif de la machine à absorption, un stockage de froid peut être prévu à sa sortie pour accumuler la chaleur produite lors du cycle de fonctionnement. Cette procédure augmente le coût d'investissement du système final ainsi que sa complexité (type de stockage, capacité optimale, etc.). Ce type de stockage est cependant conseillé par le fabricant de certaines machines comme Sonnenklima 10 kW_{ref} (voir Tableau 1.1).

1.1.4.2 Dimensionnement des systèmes solaires

Certaines spécificités de la source solaire rendent inconvenient l'utilisation des méthodes classiques basées sur le régime stationnaire pour le dimensionnement d'un système à énergie solaire. Les systèmes CVC classiques sont, quant à eux, dimensionnés en fonction des pics des charges thermiques du bâtiment ; le système devrait théoriquement couvrir les pertes ou les gains thermiques éventuels en mode de fonctionnement normal. La puissance nominale de la source (chaudière ou climatiseur) est alors déterminée avec une marge de sécurité jusqu'à 120% de la puissance nécessaire afin d'assurer le confort dans toutes circonstances.

Sachant que ces systèmes classiques ne contiennent généralement aucun stockage thermique à long ou à court terme, l'énergie produite au sein du système est directement consommée par les équipements de diffusion de chaleur dans les espaces desservis. Si le système contient un stockage thermique, le problème de dimensionnement devient plus compliqué car il faut bien trouver un compromis entre ce qui est produit, ce qui est consommé et ce qui est stocké.

Pour ces systèmes, on fait toujours l'hypothèse d'une source stable, constante et disponible ; en cas de demande, elle sera capable de fournir la puissance demandée ou bien une partie de sa puissance nominale (charge partielle) sous des conditions que l'on peut qualifier comme extrêmes. En conséquence, dans les solutions à énergie classique, l'appoint n'existe que rarement ou il est présent sous la forme d'une chaudière de substitution.

Pour les systèmes à énergie renouvelable, le dilemme s'explique simplement par la Figure 1.11 ; cette figure représente la variation du besoin (chauffage et ECS) du bâtiment et la disponibilité de l'ensoleillement sur l'année. L'ensoleillement est en phase avec le besoin de refroidissement mais pas avec celui du chauffage. La surface de captage doit être alors dimensionnée en tenant compte de la valeur variable d'ensoleillement pendant toute l'année.

Si la surface de captage est dimensionnée en fonction d'ensoleillement d'été, il se peut que le rendement de captage diminue en hiver à cause des pertes thermiques excessives des panneaux surdimensionnés dans ce cas. Dans le sens inverse, le captage sera faible en été vu que les panneaux solaires ne produiront pas suffisamment de chaleur pour faire fonctionner la machine frigorifique en période d'été.

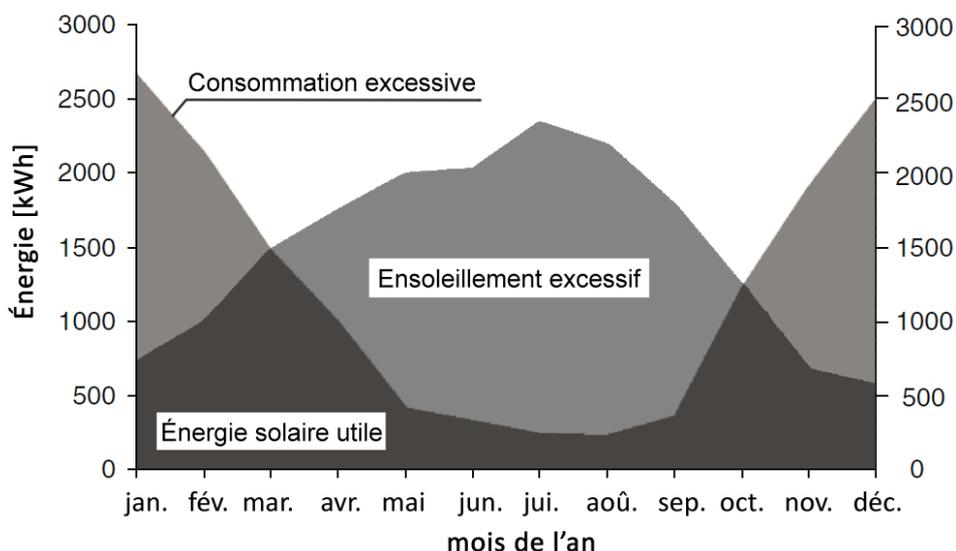


Figure 1.11 : Ensoleillement et la charge thermique (source : [10])

Ce paradoxe rend problématique le dimensionnement de tels systèmes ; l'indisponibilité à la demande de la source renouvelable vient également s'ajouter une pièce supplémentaire à ce puzzle. L'accumulation d'énergie devient alors indispensable pour faire fonctionner le système avec l'énergie de cette source le plus long temps possible.

Des défauts de dimensionnement ont conduit à l'arrêt de plusieurs installations de climatisation solaire en France (climatisation pure, à ne pas confondre avec les SYSMFS). En 2007, l'ADEME a compté 6 installations de ce type hors fonctionnement sur 7 projets français ; on mentionne : l'immeuble de la DOT (France Télécom) à Narbonne (11), l'immeuble de la MAAF à la Seyne sur Mer (13) et l'immeuble EDF à Sainte-Thérèse (Martinique) [5].

Tenant compte de ce qui a été mentionné précédemment, les bonnes valeurs de surface du panneau solaire et du volume de stockage thermique ne doivent donc pas être obtenues avec une méthode classique de pic de charge ; une solution possible est de passer par une optimisation des paramètres.

Une solution consiste à effectuer plusieurs essais avec des valeurs présélectionnées des paramètres ; les résultats requis lors de cette étude paramétrique permettront d'avoir une vision d'ensemble des réponses du système étudié. Le choix se fera avec la meilleure combinaison de paramètres selon un critère imposé (l'énergie fossile consommée, l'énergie solaire utile, le coût de fonctionnement, etc.).

1.2 Optimisation par simulation

Plusieurs méthodes d'optimisation ont été développées au fil du temps ; certaines sont inspirées par l'organisation dans le milieu vivant tandis que d'autres ont été élaborées afin de répondre aux besoins de domaines scientifiques spécifiques.

Aujourd'hui, l'avance majeure dans le domaine de la simulation et de l'informatique permet de modéliser de plus en plus des équipements et des systèmes comme les SYSMFS. Une expérimentation sur un système solaire peut être menée, par exemple, dans des conditions physiques normales ; le temps et le coût économique de cette expérimentation varient selon le but de l'étude. La même expérimentation peut être accélérée avec la modélisation numérique.

L'optimisation par simulation donne alors une possibilité de faire un grand nombre d'essais virtuels dans un temps relativement court en vue d'optimiser la réponse du système étudié en fonction des facteurs présélectionnés. La méthode d'optimisation aide également à réduire le nombre d'essais à effectuer en utilisant une méthode de recherche d'optimum. Le choix de la méthode doit être adapté au domaine d'application ; une stratégie d'avancement non adaptée peut facilement altérer la recherche et l'optimum obtenu n'est plus global mais plutôt local.

Dans un premier temps, les objectifs de ce travail visent à modéliser un SYSMFS ; puis une optimisation de deux paramètres présélectionnés va permettre d'optimiser leurs valeurs pour une meilleure performance selon un critère prédéfini. Trois méthodes d'optimisation seront prises en compte pour cette étape : une étude paramétrique, un algorithme hybride d'optimisation proposé pour les problèmes de simulation des bâtiments et une méthode d'optimisation basée sur les plans d'expériences que nous proposons pour l'optimisation des SYSMFS. Nos attentes pour cette dernière méthode sont l'optimisation des paramètres mais aussi la description de la fonction de coût dans la zone de la réponse optimale.

Dans cette section, le problème de l'optimisation d'un système physique est abordé ; puis, la particularité des problèmes de simulation des bâtiments sera discutée ; ensuite, nous présentons une brève description de l'algorithme d'optimisation hybride que nous allons l'utiliser par la suite et, finalement, nous présentons la méthode d'optimisation par les plans d'expériences.

1.2.1 Problèmes d'optimisation des systèmes physiques

Un système physique peut être représenté avec ses entrées et ses sorties (Figure 1.12). Au cas d'un système dynamique, ce système est normalement exposé aux influences de deux types d'entrées ; des entrées u_i , nommées commandes, dont la magnitude et la durée de leur impact peuvent être contrôlées et des entrées v_i , nommées perturbations, dont la magnitude et la durée d'impact ne sont pas contrôlables. Les perturbations peuvent être mesurables ou non.

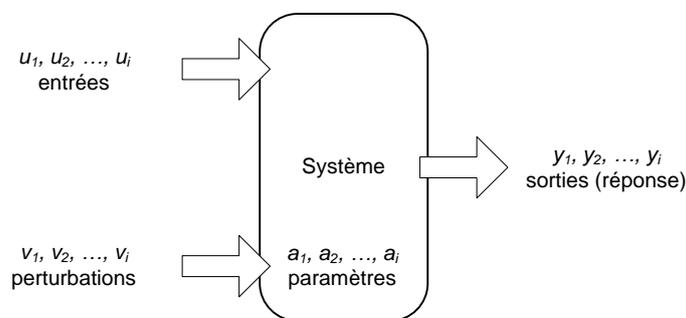


Figure 1.12 : Représentation d'un système physique

Un problème d'optimisation d'un système physique comprend éventuellement des variables indépendantes u_i, v_i , des variables dépendantes y_i et une ou plusieurs fonctions de coût à optimiser. Nous considérons qu'il y a deux voies principales d'optimisation qui se complètent mutuellement : l'optimisation conceptuelle (design) et l'optimisation des paramètres (valeurs).

L'optimisation conceptuelle est l'amélioration d'un système par son concepteur. La créativité humaine joue le rôle essentiel dans le choix des modifications à faire ou des techniques à apporter. Ce fait rend la réalisation d'une procédure d'optimisation conceptuelle automatisée assez compliquée pour le moment, car il faudrait y intégrer plusieurs capacités de reconnaissance de problème et des capacités de décision qui devront prendre en compte les contraintes problématiques pour chaque choix fait. Les exemples de ce type d'optimisation sont

très variés : la modification du schéma technique, le choix du type de ventilateur, l'adoption d'une technique de contrôle et bien d'autres.

L'optimisation des paramètres cherche à trouver « les valeurs optimales » pour l'ensemble des paramètres prédéfinis d'un système choisi sans enfreindre pour autant certaines contraintes imposées. Contrairement à l'optimisation conceptuelle, l'optimisation de paramètres repose sur des algorithmes mathématiques variant selon les conditions et les spécificités de chaque système sujet d'optimisation.

Le problème de conception peut être considéré comme un problème inverse ; on veut trouver une fonction $g(u)$ qui représente le système et qui va reproduire la réponse désirée pour les valeurs u appliquées à son entrée. On considère que la forme de la fonction $g(u|a)$ est connue et a sont ses paramètres, le problème de conception précédent devient alors un problème d'optimisation des paramètres, si on cherche les valeurs des paramètres a afin de minimiser le coût $f(g(u|a))$ du système, ou de contrôle, si on cherche les valeurs des entrées afin de minimiser le coût $f(g(u|a))$ du système. De point de vue mathématique, le problème d'optimisation des paramètres peut être écrit sous la forme :

$$f(g(u|a_o)) \leq f(g(u|a)) ; a \in A \quad (14)$$

où f est la fonction coût du système g ; A est l'espace du problème dans lequel les paramètres a peuvent prendre leurs valeurs, u sont les valeurs d'entrées et a_o sont les paramètres optimaux qui minimisent la fonction coût.

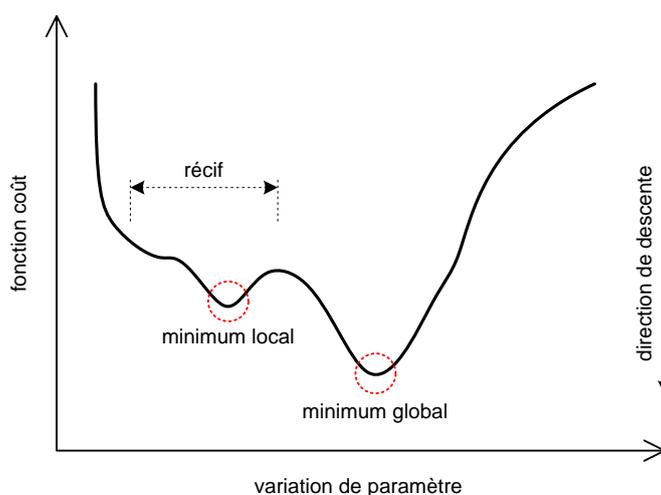


Figure 1.13 : Fonction coût simple en deux dimensions

Une fonction coût est une fonction analytique qui estime la réponse du système sous la forme d'un critère choisi. La Figure 1.13 donne une représentation d'une fonction coût en fonction d'une variable. La courbe de réponse ne constitue pas une descente souple et directe vers le minimum dit « global » mais elle présente des minima locaux.

1.2.2 Paramètres à optimiser

Dans un problème d'optimisation, les paramètres à optimiser peuvent être dépendants d'autres paramètres ou bien complètement indépendants. Une fonction mathématique de la forme $y = f(x)$ représente une relation entre une variable dépendante y et une autre variable indépendante x . La dépendance provient de la causalité entre x et y car la valeur de la deuxième est le résultat de la première à travers la fonction $f(x)$.

Les paramètres à optimiser prennent leurs valeurs dans une plage de variations qui peut être discrète ou continue, selon la nature physique du problème étudié. Une variable continue peut prendre n'importe quelle valeur dans les limites d'un domaine défini tel que :

$$x \in \mathbb{C}: \mathbb{C} = [m, n]; m, n \in \mathbb{R} \quad (15)$$

Une variable discrète peut prendre ses valeurs dans un ensemble fini constitué d'un nombre non-nul de nombres réels tel que :

$$x \in \mathbb{D}: \mathbb{D} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}; x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \in \mathbb{R} \quad (16)$$

L'optimisation par simulation des bâtiments peut être considérée comme un problème aux variables continues et, dans certains cas, aux variables discrètes. Prenons le cas d'une seule pièce d'un bâtiment ; la hauteur des parois est une variante continue, alors que le nombre de fenêtres aux dimensions standards est une variable discrète.

Dans l'étude d'optimisation prévue pour la deuxième phase de ce travail, nous discuterons en détails du type de chaque paramètre à optimiser.

1.2.3 Optimisation par simulations des problèmes liés aux bâtiments

Les outils de simulation des bâtiments permettent désormais de prédire les charges thermiques et le comportement du bâtiment ; ces outils donnent aussi la possibilité de modéliser le bâtiment associé au SSC par exemple.

Certaines particularités doivent être néanmoins prises en compte lors de l'optimisation par simulation dans le domaine du bâtiment. Nous citons, dans les paragraphes suivants, les propriétés de la fonction coût issue des simulations liées aux bâtiments et l'influence de ces propriétés sur la procédure d'optimisation de ces problèmes.

1.2.3.1 Fonction de coût évaluée par la simulation

La fonction de coût ne peut pas être évaluée directement dans les problèmes de simulations liés aux bâtiments ; par contre, une approximation de cette fonction par un outil de simulation est obtenue.

Considérons le problème d'optimisation en variables discrètes et continues de la forme :

$$\min_{x \in X} f(x) \quad (17)$$

$$\text{avec } x \triangleq (x_c, x_d) \in \mathbb{C} \times \mathbb{D}, f: \mathbb{C} \times \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}$$

avec f une fonction coût continue et différentiable que l'on ne peut pas évaluer directement mais qui peut être approximée numériquement avec :

$$f^*: \mathbb{R}_+^p \times \mathbb{C} \times \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R} \quad (18)$$

où le premier argument \mathbb{R}^p représente la précision du solveur numérique, ce qui donne la fonction coût approximée de la forme :

$$f^*(\epsilon, x), \epsilon \in \mathbb{R}_+^p \quad (19)$$

où ϵ est le vecteur qui contient les paramètres de précision pour le solveur numérique [22].

L'approximation la fonction coût est due à la manière dont cette fonction coût est évaluée ; ce processus implique normalement la résolution d'un système d'équations différentielles à

dérivées partielles et différentielles ordinaires couplées aux équations algébriques. Quand la solution analytique n'est pas possible, une solution approximée numériquement est obtenue par l'outil de simulation ; l'optimisation des paramètres s'applique désormais seulement à la fonction approximée [22].

1.2.3.2 Discontinuité de la fonction coût des simulations liées aux bâtiments

Les solveurs numériques des outils de simulation comme TRNSYS [23] ou EnergyPlus [24] utilisent généralement des critères de convergence pour la résolution des équations différentielles partielles, les équations différentielles ordinaires et les équations algébriques ; ces critères dépendent de la variable indépendante x . Une perturbation de cette variable peut ainsi entraîner un changement dans la séquence d'itérations du solveur, ce qui fait apparaître, à son tour, des discontinuités dans la fonction coût approximée $f^*(\epsilon, x)$.

Si la fonction coût approximée $f^*(\epsilon, x)$ est discontinue, la direction de décroissance ou de croissance de cette fonction n'est pas la même que celle de la fonction coût originale $f(x)$. Dans ce cas, l'algorithme d'optimisation peut se terminer aux points non-optimaux ou aux points d'optimum local [22].

Même si l'algorithme d'optimisation ne parvient pas à trouver un optimum global, on peut toujours constater que les valeurs obtenues font que le système soit meilleur en termes de performance que celui sans optimisation.

1.2.4 Optimisation par étude paramétrique

Comme son nom l'indique, une étude paramétrique consiste à mener un nombre d'expériences sur le système à optimiser en changeant chaque fois la valeur d'un des paramètres étudié et en gardant les autres inchangés. Il s'agit normalement d'étudier l'effet qu'un seul facteur peut avoir sur le comportement du système. Une optimisation par étude paramétrique inclut toutes les valeurs possibles dans l'espace du problème étudié ce qui est un avantage du point de vue des informations obtenues et un désavantage de point de vue du temps de calcul. L'estimation du coût par simulation demande généralement plus de temps que celui requis par un algorithme d'optimisation pour déterminer les nouvelles valeurs des paramètres à optimiser et de lancer la simulation.

Une étude paramétrique avec un petit nombre de paramètres (deux au maximum) permet de tracer une courbe ou une surface représentant la réponse du système en fonction de ses paramètres contrôlables (surface de réponse). Ces graphiques sont utiles pour comprendre rapidement l'effet de chaque paramètre sur la réponse du système car elles permettent d'identifier clairement et sans doute les valeurs optimales locales et les valeurs optimales globales. Lors de notre travail, l'optimisation par études paramétriques sert à valider la précision et l'efficacité des algorithmes d'optimisation testés.

1.2.5 Algorithme hybride d'optimisation

Les outils de simulation, comme TRNSYS [23], n'offrent pas toujours la possibilité d'effectuer une optimisation des paramètres sur le modèle développé. Des codes plus spécialisés intègrent des algorithmes d'optimisation ; ainsi, ces codes peuvent être reliés à l'outil de simulation afin d'optimiser les systèmes modélisés.

Le code d'optimisation générique GenOpt [22] est un outil destiné à l'optimisation d'une ou plusieurs fonctions coûts avec ou sans contraintes. Ce code peut être couplé à des outils de simulation si ces derniers sont capables de lire et d'écrire leurs données d'entrée et leurs résultats dans des fichiers en format texte simple. Des algorithmes d'optimisation intégrés dans

ce code peuvent être utilisés pour les problèmes d'optimisation dont la fonction coût est approximée numériquement [22].

D'une manière générale, il n'existe pas un algorithme d'optimisation qui soit bon pour tout faire car chacun a ses limites, et ses conditions d'application en dehors desquelles il peut donner des résultats erronés. Pour cela, le code d'optimisation générique GenOpt implémente plusieurs méthodologies d'optimisation comme : la méthode de Nelder-Mead [25], l'algorithme de recherche du modèle généralisé (GPS) [26] et l'optimisation par essais particuliers (PSO) [27].

Le code d'optimisation GenOpt offre également un algorithme hybride qui combine deux familles d'algorithmes « GPS » et « PSO ». Une brève introduction de chaque algorithme sera présentée dans ce manuscrit ; l'algorithme hybride sera utile pour son application au modèle de SYSMFS développé dans la partie simulation de cette étude.

1.2.5.1 Algorithme d'optimisation de type GPS

L'algorithme GPS (Generalized Pattern Search) est un algorithme pour les problèmes d'optimisation qui ne requiert pas l'existence du gradient de la fonction coût. L'algorithme, dans sa forme standard, est applicable pour les fonctions coûts continues différentiables, sous la condition que ces dernières soient évaluées exactement sans approximation. Or, la majorité des problèmes d'ingénierie dépend de l'approximation numérique de la fonction coût qui peut subir des discontinuités dues à l'utilisation des solveurs numériques. L'application directe de cet algorithme aux problèmes de simulation des bâtiments n'aboutit pas à une convergence ; un algorithme hybride de cette méthode est proposé donc pour les fonctions coût approximées numériquement [28].

Aujourd'hui, plusieurs versions modifiées de l'algorithme original sont en phase de développement pour que cet algorithme soit applicable dans plus de situations. Les algorithmes GPS ont des points communs dans leur démarche pour trouver l'optimum. D'abord, ils construisent un maillage dans l'espace du problème ; chaque algorithme a sa propre loi pour choisir le nombre fini de points de son maillage (un facteur de taille). C'est cette loi qui différencie les algorithmes GPS entre eux comme « Hooke-Jeeves » ou « la recherche de coordonnées » [29].

Ce maillage est ensuite exploré selon des règles propres à chaque méthode de la famille d'algorithmes GPS. Si un point du maillage a une valeur inférieure à une valeur initiale choisie de la fonction coût, la recherche d'optimum se poursuit avec le même facteur de taille du maillage généré. Sinon le maillage sera raffiné avec un facteur de taille réduit et la procédure se répète.

Cet algorithme peut être combiné avec un autre type d'algorithme plus adapté à la recherche globale. L'algorithme hybride obtenu est proposé pour le domaine de simulation des bâtiments où l'approximation de la fonction coût est souvent rencontrée.

1.2.5.2 Algorithme de Hooke-Jeeves (HJ)

L'algorithme de Hooke-Jeeves [30] est une méthode de recherche d'optimum qui utilise la force brute² tout en étant efficace par rapport aux autres méthodes [31]. La proposition de Hooke et Jeeves, fait que la méthode n'a pas besoin de la dérivée de la fonction coût pour avancer. Dans sa recherche, elle ne suit pas une seule ligne suivant la direction de descente ; elle prédit plutôt des démarches discrètes selon les directions de recherche possibles.

² Cette méthode calcule toutes les solutions possibles avant de décider quelle est la meilleure

D'abord, un scalaire ϵ est choisi car il va servir de critère d'arrêt pour la méthode ; un point initial x_1 ainsi que la taille du motif h sont également des paramètres à fixer pour l'algorithme. La procédure répétitive de la recherche de Hooke-Jeeves se résume à deux mouvements comme nous montre la Figure 1.14 [32].

Un premier mouvement exploratoire qui évalue puis enregistre la valeur de la fonction coût en x_1 , puis des essais sont faits avec des étapes discrètes et en suivant des directions d'exploration $\{v_j\}$. La valeur de la fonction dans chaque direction $f(x_1 + v_j)$ sera comparée avec la valeur au point courant x_1 et seulement la valeur où $f(x_1 + v_1) \leq f(x_1)$ (pour un problème de minimisation) sera prise en compte. Ce mouvement va aboutir sur une des deux situations suivantes : soit il trouve un nouveau point x_2 avec une meilleure valeur de la fonction coût, soit il échoue. Dans ce dernier cas, la taille de motif sera réduite puis un nouveau mouvement exploratoire sera initié au même point x_1 . Toutefois, si le mouvement exploratoire réussit, l'algorithme ne se déplace pas au nouveau point pour faire une nouvelle exploration mais il va initier un mouvement de recherche par motif avec la direction de recherche $d = x_1 - x_2$.

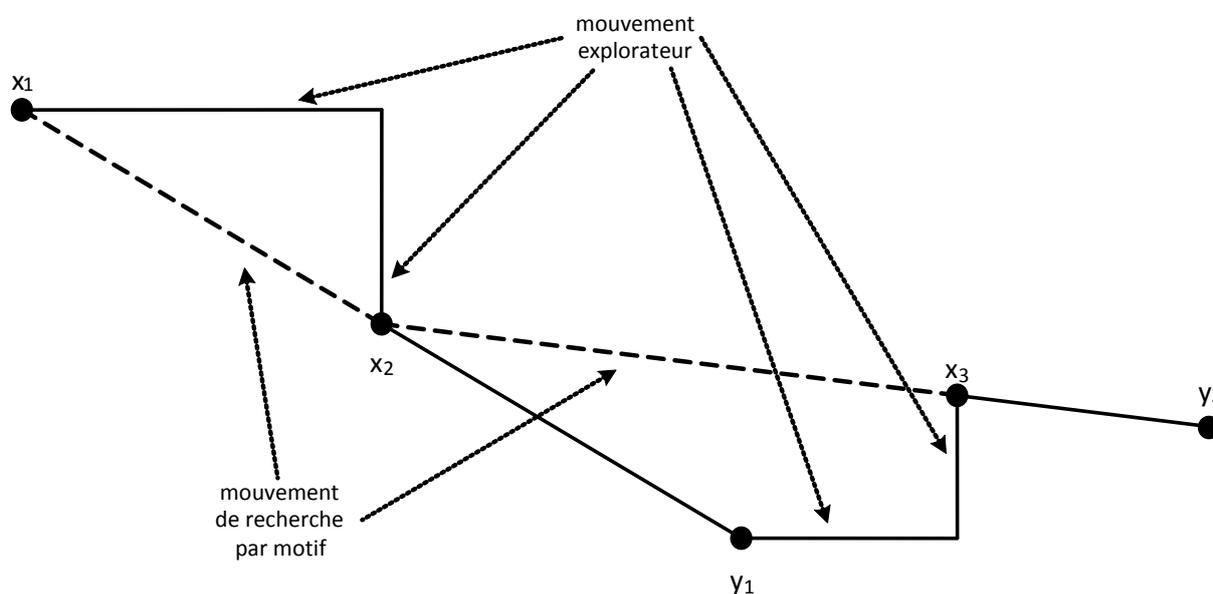


Figure 1.14 : Méthode de Hooke-Jeeves, source : [33] modifiée pour un problème de minimisation

Le mouvement de recherche par motif emploie la direction et les valeurs trouvées dans le mouvement exploratoire précédent car cette méthode est agressive avec des essais bien poussés à chaque fois. L'algorithme fait des essais avec la nouvelle direction de recherche $d = x_1 - x_2$ au nouveau centre x_c :

$$x_c = x_1 + 2d = x_2 + d \quad (20)$$

Si cette dernière manœuvre est vouée à l'échec, un nouveau mouvement exploratoire sera effectué avec la valeur x_2 au centre. L'algorithme se termine une fois que le déplacement devient :

$$\|x_1 - x_2\| < \epsilon \quad (21)$$

Une implémentation modifiée de la méthode de Hooke-Jeeves a été adoptée dans le code d'optimisation GenOpt [22] dont cette étude va se servir en combinaison avec une autre méthode d'optimisation illustrée dans le paragraphe suivant.

1.2.5.3 Algorithme d'optimisation de type PSO

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) s'inspire à l'origine du monde vivant comme le déplacement d'un groupe d'oiseaux ou de poissons. Il s'appuie notamment sur un modèle développé par Eberhart et Kennedy en 1995 [34].

Grâce à des règles de déplacement très simples dans l'espace des solutions, les particules (ou les solutions potentielles) peuvent converger progressivement vers un optimum local. Cette méta-heuristique semble cependant mieux fonctionner pour les espaces en variables continues [35]. En outre, la méthode a beaucoup de similitudes avec d'autres techniques évolutionnistes d'optimisation comme les algorithmes génétiques³ (GA).

L'algorithme PSO est initié avec une population des solutions arbitraires puis une recherche de l'optimum aura lieu en mettant à jour ces générations. Contrairement aux méthodes génétiques, PSO n'a pas d'opérateurs d'évolution ; les solutions potentielles, appelées des « particules », se déplacent dans l'espace du problème suivant d'autres particules optimales courantes. Dans cet espace, les particules sont tracées par leurs coordonnées qui sont, elles aussi, associées à la meilleure solution actuelle « p-meilleure ».

La méthode enregistre et trace, en temps réel, les coordonnées « l-meilleure » d'une autre meilleure valeur qui se trouve également dans le voisinage de la particule « p-meilleure ». Lors que le voisinage de la particule « p-meilleure » devient toute la population dans l'espace des solutions, elle est alors une particule « g-meilleure » ou une meilleure globale.

À une échelle locale (une version locale de la méthode), le concept de l'algorithme consiste à changer la vitesse de convergence de chaque particule vers sa valeur « p-meilleure » et vers ses coordonnées « l-meilleure ». L'accélération est pondérée par des termes différents pour l'accélération vers « p-meilleure » et vers « l-meilleure » [36].

Lors de l'initialisation de l'algorithme, la position de chaque particule dans l'espace du problème est enregistrée. Avec chaque itération, l'algorithme fait bouger les particules en fonction de trois composantes : sa vitesse actuelle (V_k), sa meilleure solution (P_i) et la meilleure solution obtenue dans son voisinage (P_g). Ce qui donne l'équation de mouvement suivante [37], [36] :

$$V_{k+1} = \omega \cdot V_k + b_1 \cdot (P_i - X_k) + b_2 \cdot (P_g - X_k) \quad (22)$$

et

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1} \quad (23)$$

où ω est l'inertie [38], b_1, b_2 sont des tirés aléatoires dans l'espace du problème, X est l'emplacement ou les coordonnées de la particule.

Au fil du temps, la méthodologie de PSO a subi de nombreuses modifications depuis sa forme originale ; la majorité de ces modifications concernent la manière dont la vitesse de particule est mise à jour.

Néanmoins, la méthode PSO a été testée avec succès dans les domaines de la recherche et de l'application ; elle a montré une tendance à trouver des résultats plus fiables, plus vite et dans

³ Algorithme génétique est un processus d'optimisation qui simule l'évolution d'une population d'individus et le mécanisme de la sélection naturelle ; ces individus sont considérés comme des solutions potentielles du problème et seul le plus fort survit jusqu'à la fin [90], [91].

moins de temps que d'autres méthodes. En outre, la méthode PSO ne nécessite qu'un petit nombre de paramètres à ajuster avec peu de variations pour une multitude d'applications [39].

1.2.6 Méthode des plans d'expériences

Un volume important de notre connaissance provient de l'expérimentation. Avec le progrès dans le domaine de l'informatique, la modélisation et la simulation numérique sont devenues des piliers incontournables dans la recherche scientifique. Dans certains domaines de l'ingénierie, une méthodologie de conception par simulation permet désormais de remplacer, sous certaines conditions, les prototypes physiques avant de finaliser la conception. Cette nouveauté scientifique ouvre la voie vers de nouvelles perspectives, mais elle reste néanmoins limitée par des contraintes comme le temps de calcul et la validation des modèles.

Les plans d'expériences se résument par définition à l'organisation des expériences dont le déroulement sera conditionné par les résultats obtenus antérieurement. C'est une façon de procéder indispensable chaque fois que des essais et des erreurs se traduisent par des coûts.

Cette méthodologie de recherche donne d'une manière indirecte l'accès aux nombreux processus dont nous connaissons leur dépendance sur un grand nombre de paramètres externes mais sans que nous en ayons leurs modèles analytiques. En 1747, la médecine a été parmi les premiers domaines à utiliser les plans d'expériences afin de savoir l'efficacité d'une manipulation sur un groupe de patients souffrant de la même maladie [40].

Aujourd'hui, les plans d'expériences ont une place importante dans l'industrie ; des conceptions spéciales de ces plans ont vu le jour pour répondre à certains critères selon le domaine d'applications et leurs coûts respectifs.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux plans d'expériences pour leur qualité de réduire le nombre d'expériences, ou de simulations, à mener ; mais aussi pour sa capacité à prédire le comportement du système étudié sous forme de modèles mathématiques. Ces propriétés vont s'avérer intéressantes pour l'optimisation du dimensionnement de SYSMFS, pourvu que ce processus d'optimisation soit, à la fois, robuste et rapide en termes de temps de calcul.

1.2.6.1 Enjeux des plans d'expériences

Les plans d'expériences aident les chercheurs et les ingénieurs à [41] :

- identifier les relations entre une cause et son effet ;
- déterminer les facteurs qui méritent d'être pris en compte et ceux à négliger ;
- comprendre l'interaction (les corrélations) parmi les facteurs étudiés ;
- minimiser le bruit et l'effet des facteurs incontrôlables lors de l'expérimentation ;
- minimiser le nombre d'expérimentations à mener (par rapport à une étude complète) ;
- prédire le comportement d'un processus dans certaines limites ;
- améliorer la conception ou la variation d'un processus.

Ces plans sont considérés comme une organisation à respecter rigoureusement. Mais il subsiste pourtant des inconvénients qui peuvent rendre ces plans susceptibles :

- d'être sensible à la manière dont ils sont planifiés et maniés ;
- d'être sensible au choix de la conception choisie (factoriel complet, fractionnaire...) ;
- d'ignorer certaines valeurs dans l'espace des variations des facteurs contrôlables qui peuvent contenir des informations importantes (suivant la conception choisie) ;
- de dépendre de l'expérience personnelle.

Les plans d'expériences assurent néanmoins que les facteurs principaux et leurs interactions soient systématiquement examinés. Dans certains cas, les informations recueillies peuvent être plus complètes et plus fiables que celle d'une étude paramétrique (voir §1.2.4) d'un facteur à la fois, qui ignore l'effet d'interactions avec les autres facteurs.

Compte tenu de ces avantages, nous allons tenter d'appliquer une méthodologie d'optimisation par simulation basée sur le concept des plans d'expériences au modèle du SYSMFS qui sera présenté plus tard dans ce manuscrit.

1.2.6.2 Procédés des plans d'expériences

Le concept des plans d'expériences se base sur la compréhension des effets qu'un groupe de paramètres et de variables peut en avoir sur les valeurs de sortie choisies d'un système étudié. Autrement dit, on cible une relation cause-effet entre les paramètres et les variables indépendantes d'un côté et les variables dépendantes de l'autre.

Du point de vue des plans d'expériences, la variable dépendante représente la réponse du système étudié ; les paramètres et les variables indépendantes représentent, quant à elles, les facteurs pour lesquels des expériences sont menées ; les valeurs différentes de chaque facteurs sont appelés les niveaux de facteur.

Les facteurs qui représentent le type de matériaux, le fournisseur, etc. sont considérés généralement comme des facteurs de type qualitatif. Les tests effectués avec ces facteurs ne permettront pas la prédiction par extrapolation en dehors des niveaux testés. En revanche, la température, la tension électrique, etc. sont considérées des facteurs de type quantitatif qui permettront la prédiction et l'investigation compte tenu des données à disposition. En fonction du plan choisi, il est possible de tester simultanément un facteur (soit quantitatif ou qualitatif) ou plusieurs facteurs (tout type confondu) à la fois.

On appelle une « manipulation » chaque combinaison de facteurs dans une expérimentation. Dans une expérimentation d'un seul facteur, chaque niveau de facteur est considéré comme une manipulation ; si l'expérimentation en compte plusieurs, chaque combinaison des niveaux est considérée comme une manipulation.

L'expérience est dite « équilibrée » si le même nombre d'observations est pris pour chacune des manipulations de l'expérience. Si des observations sont répétées pour une manipulation donnée, elles seront appelées des « répliques ».

Généralement, le nombre de manipulations nécessaires pour une expérience est déterminé à base du nombre de niveaux des facteurs à étudier. De cette façon, le volume d'expériences à mener va croître rapidement en fonction de l'augmentation du nombre de facteurs ou en fonction du nombre de niveaux des facteurs. Afin de mieux comprendre l'idée du nombre de plans, nous citons ci-après deux exemples simples.

Considérons une expérience à étudier avec trois facteurs, à trois niveaux pour chaque facteur. Nous aurons donc besoin de $3^3 = 27$ manipulations. Pour quatre facteurs à trois niveaux chacun, $3^4 = 81$ manipulations seront nécessaires. D'après ce raisonnement, les plans d'expériences sont généralement restreints à deux ou à trois niveaux pour chaque facteur afin de minimiser l'effort requis pour les plans factoriels complets (des plans qui demandent que toutes les manipulations pour tous les niveaux des facteurs soient effectuées).

1.2.6.3 Domaine d'étude

La définition d'une fonction mathématique ne peut pas être considérée comme complète si les conditions, dans lesquelles cette fonction est valable, ne sont pas définies ; un processus physique peut être vu comme une fonction avec des paramètres, des entrées et des sorties.

On appelle une « domaine d'étude » les limites dans lesquelles les valeurs choisies des paramètres d'un processus peuvent le rendre valable ; en dehors de ce domaine, le processus pourrait produire des effets indésirables où il pourrait donner des résultats peu fiables.

Les valeurs des paramètres doivent être choisies attentivement ; il est conseillé de ne pas tenter directement avec les valeurs extrêmes aux limites du domaine d'étude. Certaines valeurs extrêmes peuvent générer des combinaisons infaisables au-delà de la capacité des matériels à disposition, du budget alloué à l'étude, des éthiques ou des conditions physiques. Dans certains cas, ces valeurs pourraient même donner des réponses dans une zone asymptote ou proche d'une zone de discontinuité dans la surface de réponse [42].

1.2.6.4 Facteurs réduits pour les modèles locaux

Dans un procédé des plans d'expériences, chaque plan est réalisé sur un sous-domaine du domaine d'étude ; des modèles locaux (linéaire ou quadratique) seront ainsi identifiés dans ces sous-domaines (méthode détaillée ultérieurement dans ce manuscrit).

Une transformation des variables simplifie la manière dont les variables sont manipulées au cours du processus ; elle aide également à mieux comprendre les effets et les corrélations parmi les variables sur une même échelle comprise dans $[-1, 1]$.

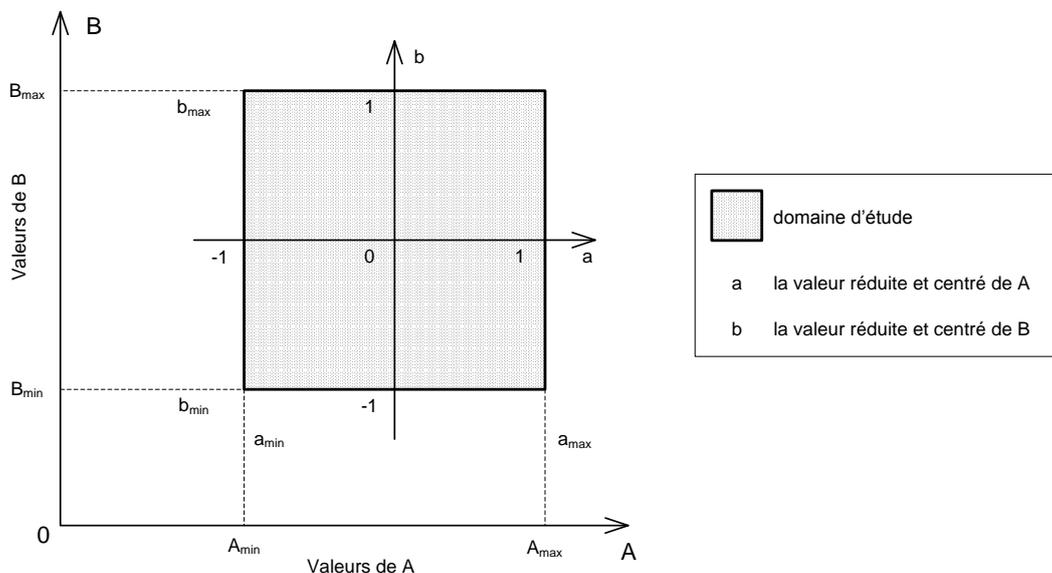


Figure 1.15 : Exemple de sous-domaine de facteurs réduits et centrés

Un modèle local se délimite par la zone hachurée dans la Figure 1.15. Les variables A et B peuvent prendre leurs valeurs dans tout le sous-domaine d'étude comprise entre les intervalles $[A_{min}, A_{max}]$ et $[B_{min}, B_{max}]$ et ce par rapport au système des coordonnées $(A \ 0 \ B)$. Si le système de coordonnées devient $(a \ 0 \ b)$, les mêmes variables pourront prendre des valeurs qui seront comprises dans l'intervalle $[-1, 1]$.

Les variables A et B se transforment désormais en a et b respectivement. La notation des variables en majuscule signifie qu'elles sont en mode « naturelle » tandis que la notation en minuscules indique qu'elles sont en état « réduite ».

La transformation entre l'état naturel du facteur A en état réduit a se fait par :

$$a = \frac{2(A - A_{min})}{A_{max} - A_{min}} - 1 \quad (24)$$

ou

$$a = \frac{A - (A_{min} + \frac{A_{max} - A_{min}}{2})}{\frac{A_{max} - A_{min}}{2}} \quad (25)$$

et dans le sens inverse :

$$A = A_{min} + (\frac{A_{max} - A_{min}}{2}) \cdot (a + 1) \quad (26)$$

Les variables réduites sont également « centrées », ce qui provient du fait que le point d'origine du nouveau système de coordonnées ($a \ 0 \ b$) se trouve au centre et au milieu du sous-domaine des variables réduites.

1.2.6.5 Etapes de la méthode des plans d'expériences

Une méthodologie des plans d'expériences comporte souvent les étapes principales suivantes : planification, projection, optimisation, test de robustesse et vérification finale [41].

Avant de faire les tests et la collection de données, une planification attentive de ces tests s'avère importante. Un plan bien préparé guide vers une meilleure compréhension du phénomène étudié ; il est même plus facile à exécuter et à analyser de cette façon.

La projection aide à identifier les facteurs importants d'une multitude de paramètres qui peuvent affecter directement ou indirectement le processus étudié. Un certain recul scientifique par rapport au problème étudié est d'une grande importance afin d'éliminer les facteurs insignifiants et de se concentrer sur les facteurs clefs. Les expérimentations de projection sont généralement des plans qui ne demandent que quelques exécutions où la focalisation se porte sur les effets principaux de chaque facteur sans ses interactions avec les autres.

Après l'identification des facteurs principaux, le travail se résume à trouver les meilleures valeurs de ces facteurs qui vont permettre, à leur tour, au système étudié d'atteindre soit une amélioration du rendement, soit une stabilité optimale ou les deux en même temps.

Le bruit et les variations des facteurs incontrôlables sont toujours présents durant une expérimentation. Des soins particuliers doivent être pris afin d'immuniser le processus contre les perturbations qui sont, dans la plupart du temps, en dehors du contrôle de la personne qui mène l'expérimentation (température ambiante, infiltrations, etc.). Pour atteindre cet objectif, une identification de ces perturbations potentielles aide à minimiser les erreurs évitant ainsi le recours aux répliques (expérimentations supplémentaires).

Un dernier test des valeurs optimales trouvées s'impose à la fin de l'étape d'optimisation. Il s'agit simplement de refaire quelques expérimentations avec ces valeurs afin de confirmer le bon fonctionnement du système ainsi que sa réponse au point optimal.

1.2.6.6 Conception des plans d'expériences

Le concept des plans d'expériences a évolué, au fil du temps, en vue de répondre aux différents besoins des domaines où on cherche à réduire le nombre d'essais. Les conceptions de ces plans

varient donc suivant : le nombre de niveaux requis pour les facteurs, le nombre de facteurs pris en compte et le domaine d'application étudié.

Deux conceptions des plans d'expériences sont présentées dans cette section. Ces plans seront employés plus tard dans une procédure d'optimisation par simulation du modèle SYSMFS.

1.2.6.6.1 Plans d'expériences factoriels

L'objectif des plans factoriels réside, dans un premier temps, dans l'identification des facteurs qui ont l'effet le plus significatif sur la réponse du système étudié. Certains plans peuvent cependant déterminer les interactions supplémentaires entre les facteurs du procédé, si nécessaire.

En pratique, les plans factoriels sont classés suivant le nombre de leurs facteurs et le nombre de niveaux de ces facteurs. Les plans factoriels complets, qui n'excluent aucun niveaux, peuvent avoir des facteurs qualitatif, quantitatif ou les deux (voir §1.2.6.2). Mais ces plans sont rarement utilisés dans l'ingénierie car plus il y aura de facteurs et de niveaux, plus le temps nécessaire pour faire toutes les manipulations sera important (Tableau 1.2). Pour cette étude, nous limitons le nombre de niveaux à trois (+1, 0, -1) ; ce choix réduit efficacement le nombre total de manipulations à faire et permet d'obtenir les effets des facteurs et leurs interactions.

Tableau 1.2 : Nombre de manipulations et de facteurs pour les plans factoriels à deux niveaux

Nombre de facteurs	Nombre de manipulations
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128

Le choix du plan affecte directement le modèle prédictif obtenu, car si le plan ne permet pas d'étudier certains effets, le modèle obtenu ne pourrait pas présenter la réponse réelle du système [43]. Dans le cas des plans factoriels complet à deux niveaux, par exemple, seulement une relation linéaire entre la réponse et les facteurs pourrait être déduite. Dans le cas d'interactions entre les facteurs (présence de formes compliquées dans la surface de réponse), le modèle obtenu par les plans factoriels ne représentera pas fidèlement la réponse physique du système réel. Ainsi, les fonctions non linéaires ne sont pas modélisées avec ces plans [42].

Les plans factoriels fractionnaires, quant à eux, sont développés pour être plus économes en temps car ils ne considèrent que certaines combinaisons possibles des facteurs et leurs niveaux. Sachant que suivant les combinaisons exclues, certains facteurs et leurs interactions ne seront pas pris en compte dans le modèle final.

La méthode Taguchi, développée par Genichi Taguchi, est une forme de plan factoriel qui vise à minimiser les fluctuations autour de la valeur de la consigne (qualité des produits finaux). Le nombre de niveaux n'est pas cependant limité, comme pour les plans à deux niveaux ; elle permet d'étudier les effets principaux pour les cas où les nombres de niveaux des facteurs ne sont pas les mêmes.

En ce qui concerne ce travail, nous nous intéressons seulement aux plans factoriels complets dont l'utilité et l'implémentation seront présentées en détail dans le Chapitre 4.

1.2.6.6.2 Plans d'expériences de type méthode de la surface de réponse (RSM)

Sous certaines circonstances, les plans factoriels ne peuvent pas décrire correctement l'effet d'interactions dans la surface de réponse. Une méthode de la surface de réponse s'avère alors une solution plus appropriée pour décrire correctement les effets linéaires et quadratiques dans le modèle.

Les méthodes de la surface de réponse sont utilisées normalement pour déterminer les configurations des facteurs pour lesquelles la réponse du système étudié est optimale. Ce type de plan permet d'estimer, à la fois, l'interaction et les effets quadratiques ; ils sont donc idéaux pour décrire la forme de la surface de réponse locale. Ces méthodes sont également capables de détecter le manque d'ajustement du modèle obtenu avec le strict minimum de manipulations à faire [44], [42].

Des conceptions génériques pour la méthode de la surface de réponse sont disponibles ; on mentionne : les plans de Box-Behnken et les plans centrés composites de Box-Wilson.

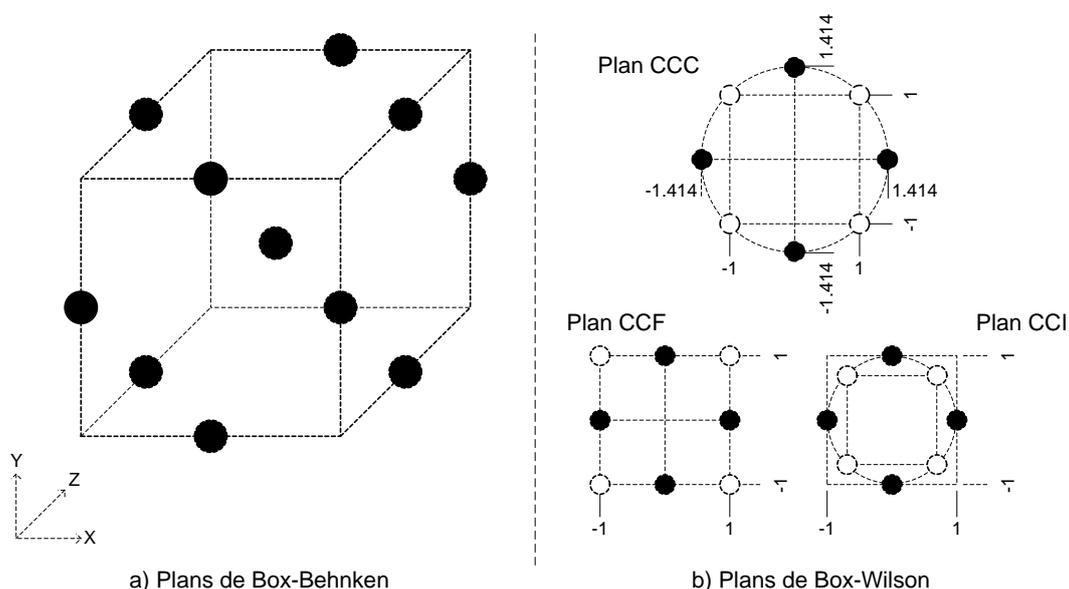


Figure 1.16 : Plans de Box-Behnken et plans centrés composites de Box-Wilson

Les plans de Box-Behnken sont quadratiques par nature ; ils ne proviennent pas d'une forme factorielle ou fractionnelle factorielle. Dans un espace en trois dimensions, les points d'expérimentation sont situés au milieu de chaque arête du cube qui entoure le point du centre (Figure 1.16, a). Ces conceptions ont la particularité d'être pivotable ou proche pivotable ce qui est une propriété souhaitable pour les plans quadratiques. Un plan peut être pivoté autour du point de centre sans changer la variance de prédiction d'autres points dans le plan ; dans ce cas, la variance de la réponse prédite au point qui n'est pas au centre est estimée en fonction de sa distance du centre et pas en fonction de sa position par rapport au centre.

Les plans de Box-Wilson sont appelés communément des plans centrés composites (CCD). Comme le montre la Figure 1.16 (b), il existe trois conceptions possibles pour ce type de plan : central composite circonscrit (CCC), central composite inscrit (CCI) et central composite faces-centrées (CCF).

Nous nous intéressons seulement aux plans de type CCC, qui sont la forme originelle des Box-Wilson. Les deux autres types, CCI et CCF, sont des descendants qui s'appliquent dans des cas spécifiques. Contrairement aux plans de Box-Behnken, ces plans ont une forme implicite de type

factoriel ou fractionnel factoriel. Cela signifie qu'un plan factoriel peut être converti facilement en plan de type CCC en rajoutant des points supplémentaires aux points factoriels comme le montre la Figure 1.17.

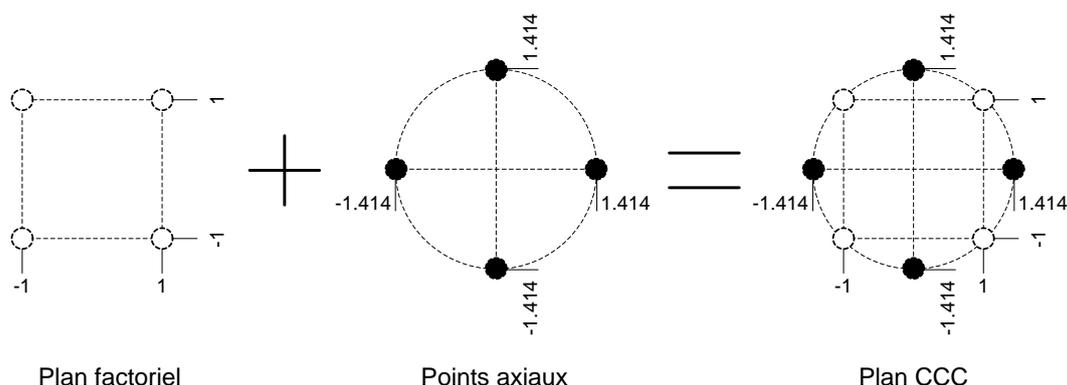


Figure 1.17 : Conversion d'un plan factoriel centré en plan central composite de Box-Wilson (CCC)

Pour que le plan soit pivotable, la distance du centre des points axiaux doit impérativement être égale à [45] :

$$\alpha = \left[\frac{2^{k-f}(n_f)}{n_s} \right]^{1/4} \quad (27)$$

où α est la distance du centre de point axial, n_f est le nombre de réplifications (expérimentations supplémentaires) pour la partie factorielle du plan, n_s est le nombre de réplifications pour la partie en forme d'étoile (points axiaux), k est le nombre de facteurs, $f = 0$ pour le plan factoriel complet.

Lors d'une étude numérique, les expérimentations (simulations) sont reproductibles à l'identique :

$$n_f = n_s = 1 \quad (28)$$

et la distance exprimée par l'équation (27) devient alors pour deux facteurs :

$$\alpha = [2^2]^{1/4} = \sqrt{2} = 1.414 \quad (29)$$

1.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des systèmes solaires génériques qui ont précédé les SYSMFS. Des méthodes du dimensionnement existantes des systèmes solaires et des chiffres concernant l'état actuel du marché solaire dans le monde, sont également présentés. Parallèlement à cette introduction, nous avons rappelé du principe de la technologie de froid par absorption et puis nous avons présenté les nouvelles machines frigorifiques à petites puissances commercialisées.

Dans la deuxième partie du chapitre, une introduction à l'optimisation des paramètres est présentée. Une description brève de l'algorithme d'optimisation hybride existant est alors faite, cet algorithme sert uniquement dans le but d'une comparaison avec l'algorithme d'optimisation par les plans d'expériences que nous allons adapter pour l'étude des systèmes solaires (SYSMFS). L'utilisation de l'optimisation par les plans d'expériences pour le dimensionnement optimal des systèmes solaires est une nouveauté dans ce domaine. Les plans qui seront ultérieurement utilisés dans ce manuscrit sont également décrits dans ce chapitre.

