HAL
open science

# Approche hybride d'optimisation pour la gestion d'énergie dans le bâtiment

Grégory De Oliveira

## To cite this version:

Grégory De Oliveira. Approche hybride d'optimisation pour la gestion d'énergie dans le bâtiment. Optimisation et contrôle [math.OC]. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENT002 . tel-00934755

**HAL Id: tel-00934755**

**https://theses.hal.science/tel-00934755**

Submitted on 22 Jan 2014

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

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

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

SPÉCIALITÉ : **Automatique Productique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

PRÉSENTÉE PAR

**Grégory DE OLIVEIRA**

THÈSE DIRIGÉE PAR **Mireille JACOMINO** ET CODIRIGÉE PAR **Stéphane PLOIX**

PRÉPARÉE AU SEIN DU

**Laboratoire G-SCOP**

DANS **l'École Doctorale : Électronique, Électrotechnique, Automatique & Traitement du Signal**

# Approche hybride d'optimisation pour la gestion d'énergie dans le bâtiment

THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE **15 février 2013**,

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

**Monsieur Hervé GUÉGUEN**

Professeur à Supélec-Rennes, Rapporteur

**Monsieur René MANDIAU**

Professeur à l'Université de Valenciennes, Rapporteur

**Monsieur Christian GHIAUS**

Professeur à l'INSA-Lyon, Examinateur

**Monsieur Duy Long HA**

Chef de projet, Chef de projet au CEA-INES, Examinateur

**Madame Mireille JACOMINO**

Professeur à Grenoble-INP, Directrice de thèse

**Monsieur Stéphane PLOIX**

Professeur à Grenoble-INP, Co-Directeur de thèse

# Table des matières

**Remerciements** **7**

**Introduction générale** **9**

**1 Gestion de l'énergie : Contexte général et problématique** **13**
1.1 Contexte énergétique . . . . . 13
1.1.1 Contexte énergétique mondial . . . . . 13
1.1.2 Protocole de Kyoto et paquet climat-énergie . . . . . 16
1.2 Énergies renouvelables . . . . . 18
1.3 Le cas français . . . . . 21
1.3.1 Le paysage énergétique français . . . . . 21
1.3.2 Les énergies renouvelables en France . . . . . 22
1.3.3 Les nouveaux problèmes liés à l'évolution énergétique . . 24
1.4 Le bâtiment . . . . . 27
1.4.1 Gestion énergétique dans le bâtiment . . . . . 29
1.4.2 Du smart grid aux smart homes . . . . . 30
1.4.3 Conclusion . . . . . 33

**2 Problématique de la gestion de l'énergie dans le bâtiment et approches existantes** **35**
2.1 Description de la problématique . . . . . 36
2.1.1 Notion de service . . . . . 37
2.1.2 Mécanisme de pilotage multi-couches . . . . . 39
2.1.2.1 La couche anticipative . . . . . 40
2.1.2.2 La couche réactive . . . . . 40
2.1.2.3 La couche locale . . . . . 41
2.2 Formulation linéaire centralisée du problème . . . . . 41
2.2.1 Service fournisseur . . . . . 42
2.2.2 Service permanent et inconfort . . . . . 42
2.2.3 Service temporaire . . . . . 44
2.2.4 Service non supervisé . . . . . 45
2.2.5 Fonction objectif . . . . . 46

2.2.6 Outils de transformation . . . . . 47
2.3 L'approche non centralisée : les systèmes multi-agents . . . . . 48
2.3.0.1 Principe de modélisation d'un système multi-agent . . . . . 48
2.3.1 Modélisation des agents du système MAHAS . . . . . 49
2.3.1.1 Modélisation d'un agent de type temporaire . . 50
2.3.1.2 Modélisation d'un agent de type permanent . . 51
2.3.2 Fonctionnement du système de gestion énergétique avec les agents . . . . . 51
2.3.2.1 Le mécanisme réactif . . . . . 52
2.3.2.2 Le mécanisme anticipatif . . . . . 52
2.4 Conclusion . . . . . 54

**3 Le cas du service temporaire : modélisation et extension 57**
3.1 Le service temporaire . . . . . 57
3.1.1 Présentation du service temporaire . . . . . 57
3.1.2 Linéarisation de l'inconfort . . . . . 58
3.1.3 Linéarisation du service simple phase . . . . . 59
3.1.4 Nouvelle modélisation du service temporaire . . . . . 60
3.1.5 Comparatif des deux modélisations . . . . . 63
3.2 Le service multi-phase . . . . . 67
3.2.1 Présentation d'un service multi-phase . . . . . 67
3.2.2 Linéarisation du service multi-phase . . . . . 71
3.3 Tests et résultats du service temporaire multi-phase . . . . . 75
3.3.1 Présentation de la procédure de test . . . . . 75
3.3.2 Présentation des résultats . . . . . 79
3.4 Conclusion . . . . . 83

**4 Une approche mixte pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment 87**
4.1 Problème de la prise en compte des équipements dans un système de gestion de l'énergie . . . . . 87
4.1.1 Pourquoi ce problème est un problème de type couplage fort/couplage faible ? . . . . . 87
4.1.2 Formulation du problème à résoudre . . . . . 91
4.2 Spécificité de la solution . . . . . 92
4.2.1 Un système de résolution semi-distribuée . . . . . 92
4.2.2 Les solutions existantes . . . . . 94
4.2.2.1 L'informatique distribuée . . . . . 94
4.2.2.2 Les système multi-agents . . . . . 96
4.3 Solution proposée . . . . . 98

4.3.1 Pourquoi choisir un système multi-agents pour la résolution distribuée ? . . . . . 98
4.3.2 Architecture proposée . . . . . 99
4.3.3 Dialogue agent-superviseur . . . . . 101
4.3.3.1 Échanges agents vers superviseur . . . . . 101
4.3.3.2 Échanges superviseur vers agents . . . . . 101
4.3.3.3 Différentes résolutions . . . . . 102
4.3.4 Principe de fonctionnement . . . . . 103
4.3.4.1 Déroulement d'une itération . . . . . 105
4.3.4.2 Coefficients de pénalisation . . . . . 110
4.3.4.3 Critère de résolution et agents . . . . . 111
4.3.4.4 Différentes méthodes de génération . . . . . 113
4.3.4.5 Mise en place de l'algorithme de recherche tabou 116
4.4 Conclusion . . . . . 117

**5 Services singuliers implémentés 121**
5.1 Spécificités d'un agent . . . . . 121
5.1.1 Fonctionnement général . . . . . 121
5.1.2 Déroulement d'une itération . . . . . 122
5.1.3 Critère de résolution et satisfaction . . . . . 124
5.2 Création d'un premier agent de test . . . . . 125
5.2.1 Modélisation de l'agent machine à laver . . . . . 125
5.2.2 Satisfaction de l'agent . . . . . 129
5.2.3 Introduction de la satisfaction dans le sous-problème de l'agent . . . . . 130
5.2.4 Résolution du sous-problème . . . . . 131
5.3 Création d'un second agent de test . . . . . 137

**6 Validation de l'approche hybride : Tests et résultats 139**
6.1 Description générale des tests . . . . . 139
6.2 Objectif et déroulement . . . . . 140
6.2.1 Caractéristiques des agents . . . . . 141
6.2.2 Déroulement des tests . . . . . 142
6.3 Résultats et interprétation . . . . . 144
6.3.1 L'influence de l'approche de résolution hybride . . . . . 144
6.3.2 L'influence de la génération des coefficients de pénalisation 146
6.4 Conclusion . . . . . 149

**Conclusion générale et perspectives 155**

**Bibliographie 165**

# Remerciements

Je tiens d'abord à remercier mes directeurs de thèse Mireille JACOMINO et Stéphane PLOIX pour m'avoir encadré pendant ces trois années. Travailler avec eux fut un plaisir, ils m'ont permis d'apprendre et d'avancer dans ce projet.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepter de juger mon travail et s'être déplacé.

Mes remerciements vont aussi au laboratoire G-SCOP, notamment tout le personnel administratif et la direction. Évidemment, l'ambiance si particulière flottant dans l'atmosphère du laboratoire permet de travailler dans un climat léger et agréable pour le travail. C'est pour cette raison que je remercie Samuel, Christophe, Marwane, Alexandre, Laura, Hélène, Yanis, Benjamin, Bertrand, etc...

Je souhaite également remercier particulièrement mes amis pour m'avoir soutenu pendant ces 3 ans, quelques soient les épreuves : Maxime, Bertrand, Damien, Grégory, Cécile, William, Iulia, Nicoletta, Charlotte, Audrey B. et Tiphaine.

Je ne pourrais jamais assez remercier mes parents qui m'ont permis d'arriver où j'en suis, et toujours soutenu.

Enfin, je remercie également tous les gens que j'aurais involontairement oublié de remercier.

# Introduction générale

Après avoir longtemps été oublié, l'environnement est devenu une des priorités de l'Homme. Suite à la dégradation perpétuelle de ce dernier pour le progrès, l'environnement possède dorénavant un statut de bien commun à léguer aux futures générations et nécessaire à la vie de tous. Endiguer la détérioration de l'environnement nécessite des changements de comportements et la découverte de nouvelles méthodes pour se développer durablement. L'Homme doit apprendre à vivre en accord avec les limites que lui offre la planète. Réduire la consommation énergétique, avec le développement d'équipements basse consommation est un premier pas vers le développement durable, de même que la démocratisation des énergies renouvelables. Cependant, un effort doit être effectué par chacun sur la manière de consommer l'énergie. Est-ce que tout est autorisé en matière de consommation énergétique ?

Jusqu'à présent, les fournisseurs d'énergie pouvaient répondre à toutes les situations possibles, tous les pics de consommation, car les infrastructures étaient conçues pour cela et le permettaient. Avec la croissance incessante de la consommation énergétique, ce n'est plus le cas. Les infrastructures sont sous dimensionnées, l'énergie est de plus en plus difficile à produire, et acheminer. Pour contourner ce problème, la maîtrise de la consommation énergétique devient une priorité. Elle s'applique à plusieurs niveaux, comme la ville, le quartier, et enfin le dernier maillon, le bâtiment. Les travaux présentés dans ce manuscrit se situent dans ce cadre.

La maîtrise de la consommation dans le bâtiment consiste en une gestion des flux énergétiques présents, peu importe leur nature. En utilisant les prévisions météorologiques, les informations en provenance de fournisseurs d'énergie et les données environnementales du bâtiment, il devient possible d'aider ce dernier à maitriser sa consommation de ce dernier à travers un système de gestion de l'énergie dédié. La présente thèse a pour objectif de proposer une nouvelle approche d'optimisation à intégrer dans un système de gestion de l'énergie électrique dans le bâtiment.

La présentation de ce travail est scindée en 6 chapitres.

Le premier chapitre intitulé ***Gestion de l'énergie : Contexte général et problématique*** présente le contexte énergétique et environnemental mondial, ainsi que la problématique liée à la gestion de l'énergie. Le chapitre traite d'abord le cas mondial, avant de s'attarder sur le cas de la France, pour conclure sur l'importance du bâtiment dans le processus de maîtrise de la consommation. Les "Smart Grid" sont introduits comme solution au problème de maitrise de la consommation, ainsi que les "Smart Homes" qui définissent la notion de pilotage intelligent des charges dans le bâtiment.

Le second chapitre nommé ***Problématique de la gestion de l'énergie dans le bâtiment et approches existantes*** s'attarde sur la problématique de la gestion des flux énergétiques dans le bâtiment, et sur le fonctionnement général d'un système de gestion de l'énergie. La notion de service et le mécanisme de pilotage général multi-couche sont introduits. Ces deux éléments sont ensuite repris dans la présentation de deux approches d'optimisation existantes sur lesquelles s'appuient ce travail. La première approche est une méthode centralisée linaire utilisant de la programmation linéaire mixte. La seconde approche s'inspire du paradigme agent pour mettre en place une optimisation distribuée.

Le troisième chapitre intitulé ***Le cas du service temporaire : modélisation et extension*** propose de décrire le fonctionnement du service temporaire dans le cas de l'approche linéaire centralisée. Le modèle du service temporaire est exprimé au travers d'équations linéaires, décrivant son comportement et son modèle de confort. Deux approches pour la modélisation sont présentées et comparées. Dans ce travail de thèse, le mot d'ordre est d'augmenter les possibilités du système de gestion. Dans cette optique, le service multi-phase dérivé du service temporaire est créé, développé et testé.

Le quatrième chapitre appelé ***Une approche mixte pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment*** présente l'approche développée dans ce travail de thèse. Les besoins d'une telle approche sont explicités après que la problématique soit introduite. Les caractéristiques générales nécessaires de la solution sont déterminées dans un premier temps. La solution particulière développée est par la suite décrite dans son fonctionnement et son architecture.

Le cinquième chapitre ayant pour titre ***Services singuliers implémentés*** se concentre sur les services singuliers et leur fonctionnement dans le système de gestion. La description de leurs attributs généraux fait l'objet de la

première partie du chapitre. S'ensuivent deux parties présentant les deux services singuliers élaborés pour les besoins du travail.

Le dernier chapitre nommé ***Validation de l'approche hybride : Tests et résultats*** teste les performances de l'approche développée, en les comparant à l'approche centralisée. Les performances de l'approche linéaire centralisée liées à l'introduction du service multi-phase sont aussi mise en parallèles.

# Chapitre 1

# Gestion de l'énergie : Contexte général et problématique

## 1.1 Contexte énergétique

### 1.1.1 Contexte énergétique mondial

De nos jours, l'énergie est au centre des toutes les préoccupations. Que ce soit d'un point de vue politique, économique ou écologique, une prise de conscience collective s'est opérée. L'avancée technologique sans interruption a mis en évidence les dangers encourus pour la planète et ses habitants. Plusieurs traces sont déjà visibles, avec la disparition d'espèces animales et végétales, ou la fonte des pôles. La course au progrès nécessite beaucoup d'énergie, de même que la démocratisation des nouvelles technologies. Les besoins évoluent en même temps que la technologie. Un exemple frappant de ce phénomène est le téléphone portable et l'Internet. La figure 1.1 illustre l'évolution du nombre d'abonnés de téléphonie mobile ainsi que l'évolution du nombre d'utilisateurs d'Internet.

La croissance du nombre d'abonnés et d'utilisateurs est exponentielle de 1990 à 2003. Cette explosion d'utilisation augmente les besoins énergétiques. Pour chacune des avancées technologiques modifiant les besoins et la vie de l'être humain, la facture énergétique nécessaire s'alourdit. Il faut de plus en plus d'énergie pour satisfaire les besoins de l'Homme. Un autre facteur décisif qui influence grandement l'évolution de la consommation énergétique est l'évolution de la population mondiale. La population mondiale a triplé en 50 ans, passant de 2 milliards à 6 milliards (voir figure 1.2). En suivant les prévisions des Nations Unies ([2]), l'accroissement de la population mondiale ne devrait pas s'arrêter, alourdissant une nouvelle fois la facture énergétique.

Le rapport du World Wide Fund for Nature ([3]) atteste que les ressources consommées par l'Homme sont supérieures de 20% à ce que la Terre produit

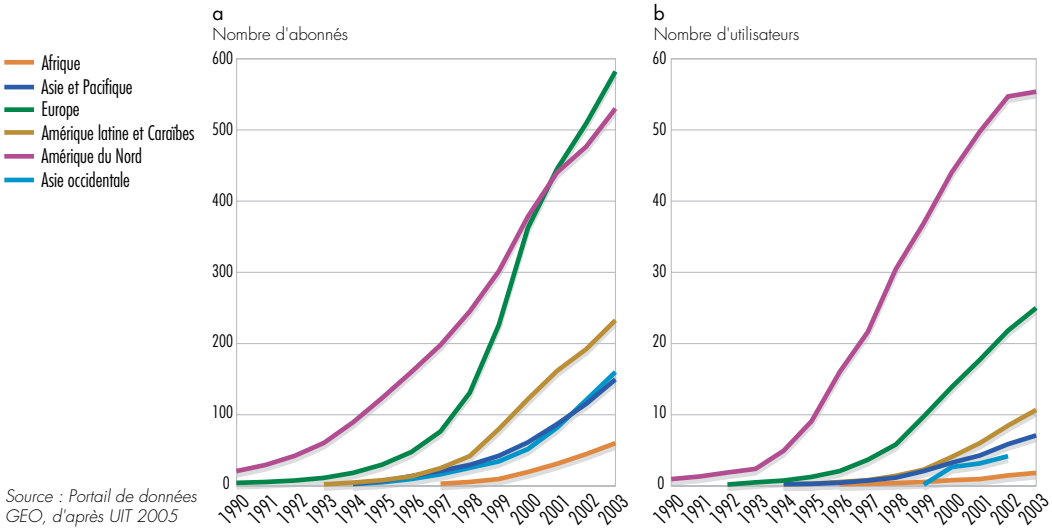


FIGURE 1.1 – (a) Téléphones mobiles, par 1 000 habitants et (b) utilisateurs d'Internet, par 100 habitants, par région [1]

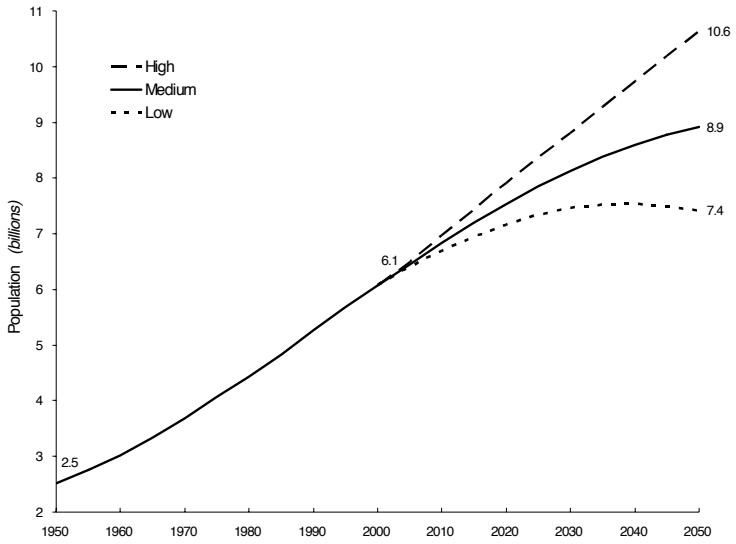


FIGURE 1.2 – Évolution et prévision de la population mondiale de 1950 à 2050 [2]

pour une période donnée. De même, la demande énergétique de l'Homme a doublé de 1971 à 2007 (voir figure 1.3). L'énergie non renouvelable correspond à 89,8% de la consommation totale selon le rapport de l'International Energy Agency ([4]). Le pétrole représente la plus grande partie (32,8%), suivi du charbon (27,2%), puis du gaz naturel (20,9%) et enfin du nucléaire (5,8%). Les réserves mondiales d'hydrocarbures sont limitées, donc la production de ce type d'énergie ne peut être éternelle. En effet, bien que de nouvelles réserves soient encore découvertes, elles se situent bien plus profondément et sont difficilement accessibles, nécessitant de mettre en œuvre des moyens importants pour l'extraction. Une des conséquences de la diminution et de la raréfaction des réserves est une hausse importante du prix des hydrocarbures. L'exploitation et la recherche de nouvelles réserves coûtent chères en raison de la difficulté d'accès et de leur qualité moindre. Les différents évènements historiques modifient épisodiquement la valeur du prix du baril de pétrole. Cependant, la diminution des réserves augmente constamment le prix du baril comme le montre la figure 1.4.

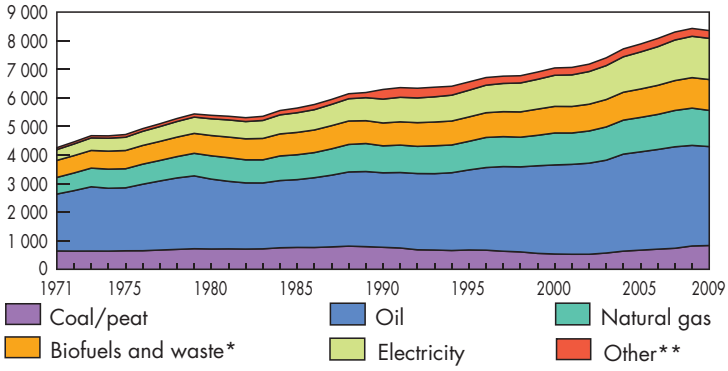


FIGURE 1.3 – Évolution de la consommation énergétique mondiale en million de tonnes équivalent pétrole ([4])

La production d'énergie à partir des hydrocarbures, en plus de diminuer les réserves disponibles, est polluante. Des millions de tonnes de gaz à effet de serre sont rejetés dans l'atmosphère pour la production d'énergie (voir figure 1.5). L'impact des énergies fossiles sur les émissions de $CO_2$ grandit au fil des années, pour atteindre les 30 milliards de tonnes par an en 2009. Le réchauffement climatique, via l'effet de serre, découle de l'augmentation massive des rejets de $CO_2$. Il suffit d'étudier l'évolution de la température globale pour se faire une idée des modifications engendrées par l'effet de serre. La figure 1.6 illustre l'évolution de la température globale et fournit aussi des précisions sur son comportement. Sont comparées sur cette figure des régressions linéaires de la température sur différentes périodes. Ce comparatif indique clairement la tendance suivie ces dernières années, la température globale augmente de plus

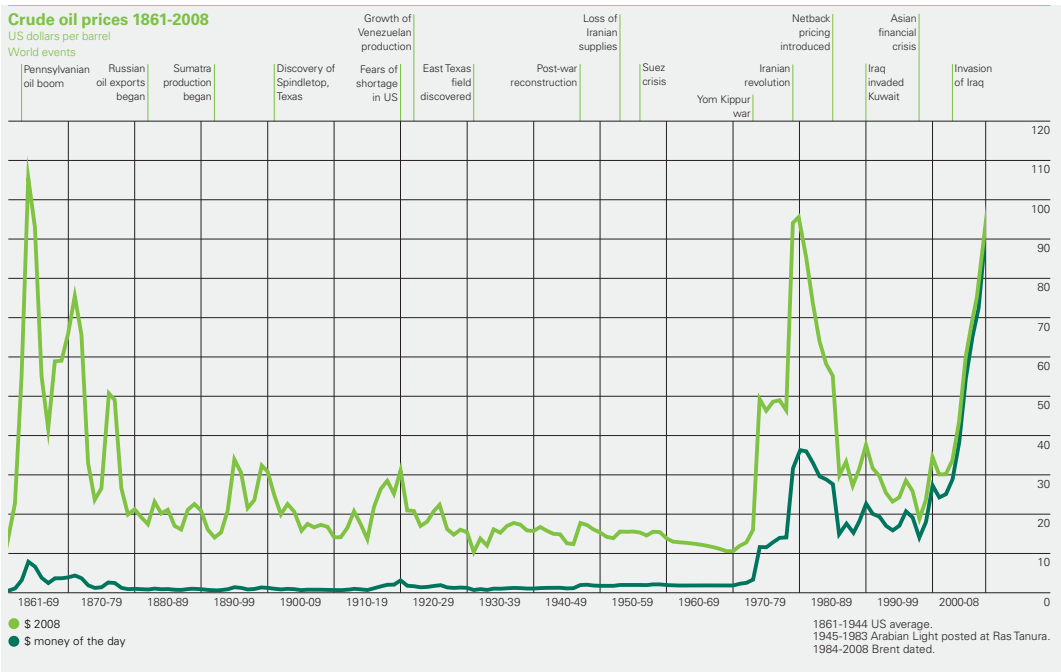


FIGURE 1.4 – Évolution du prix du pétrole en dollar de 2008 et en dollar pour l'année correspondante ([5])

en plus rapidement. Sur les 25 dernières années, le taux d'accroissement de la température a été le plus important du siècle. Dans le même ordre d'idée, il n'a fallu qu'un siècle pour gagner $1C$ de température moyenne. Tout comme l'être humain évolue avec le progrès technologique, le climat est transformé lui aussi.

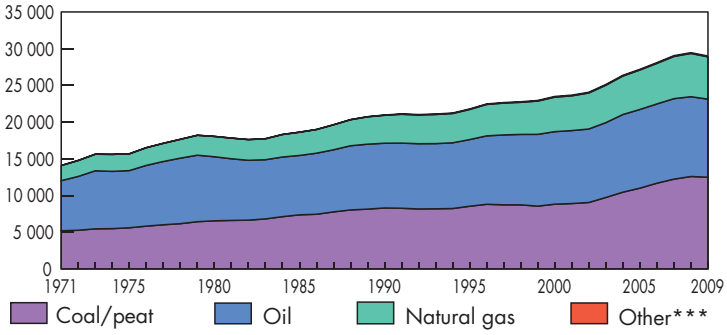


FIGURE 1.5 – Évolution des rejets de $CO_2$ en million de tonnes ([4])

### 1.1.2 Protocole de Kyoto et paquet climat-énergie

Le protocole de Kyoto a été établi après la convention sur le climat de 1992 ([7]). Suite à ce traité, les pays industrialisés le ratifiant s'engagent à atteindre

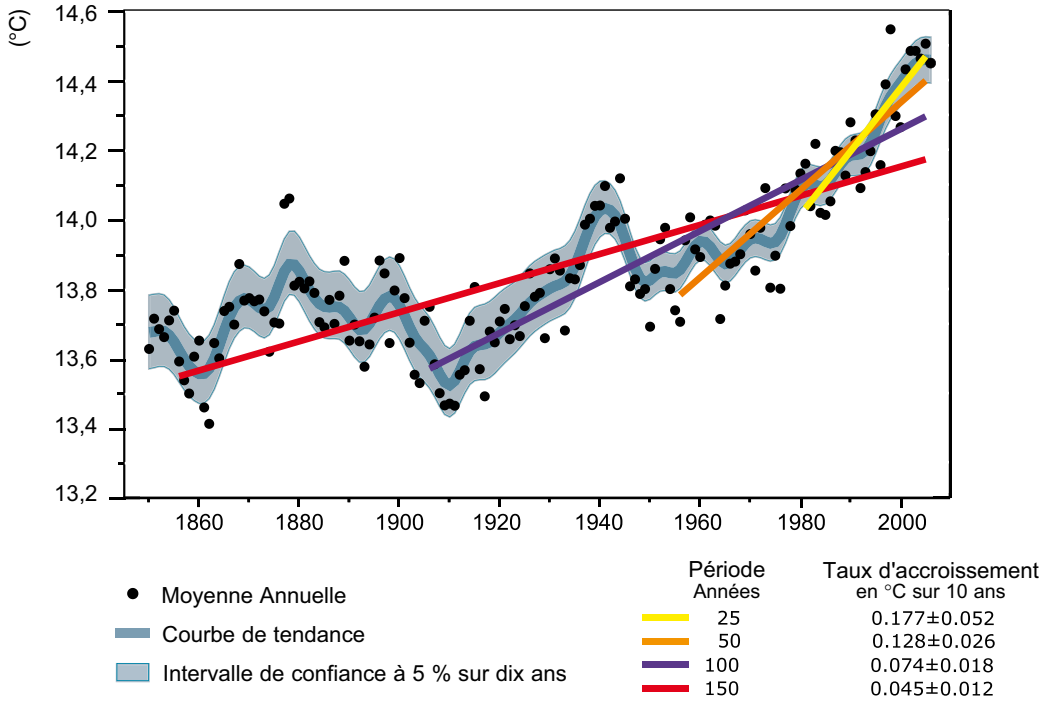


FIGURE 1.6 – Température globale moyenne estimée ($C$) ([6])

les objectifs fixés dans le cadre de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il a été ratifié par 190 pays en octobre 2010. Néanmoins, seuls 38 pays industrialisés ont des obligations de résultats, avec pour objectif une réduction moyenne de 5,2% par rapport aux émissions de 1992 pour les les émissions de six gaz à effet de serre entre 2008 et 2012. Les différents engagements sont modulés suivant les pays : moins 6% par rapport à l'année de référence (1990) pour le Canada et la Japon, moins 8% pour l'Union Européenne. En 2007, en prévision de l'expiration du protocole de Kyoto fin 2012, une nouvelle négociation s'est tenue à Bali ([8]). L'objectif était de conclure un accord international sur l'après Kyoto. Après l'échec de Copenhague en 2009, en décembre 2011, lors de la conférence de Durban en Afrique du Sud, un pas a été franchi vers la conclusion en 2015 d'un nouveau pacte mondial sur le climat ([9]). Une feuille de route est adoptée pour un accord prévoyant l'établissement d'ici 2015 d'un pacte global de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cet accord entrerait en vigueur en 2020. Il est également prévu la possibilité de prolonger le protocole de Kyoto pour une seconde période pour une durée encore à débattre (5 ou 8 ans). Ce nouveau régime fait l'objet de nombreuses tractations. En effet, les données du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) sur l'évolution du climat doivent être prises en compte. Il s'agit aussi d'impliquer les États Unis, absent du protocole de Kyoto ainsi que les nouveaux pays émergents comme la Chine et l'Inde, qui sont les plus gros

émetteurs de gaz à effet de serre. L'objectif fixé est de réduire de 50% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Parallèlement aux manœuvres mondiales pour la protection du climat (protocole de Kyoto), la Commission européenne a adopté le 23 janvier 2008 le paquet climat-énergie ([10]). Cet ensemble de lois a été ensuite officiellement adopté par le Parlement européen en décembre 2008. Le paquet énergie-climat est un plan d'actions visant à mettre en place une politique européenne commune de l'énergie d'un point de vue durable, et aussi de lutter contre le dérèglement climatique. Pour se faire, l'objectif des "$3 \times 20$" est à respecter :

- la part des énergies renouvelables consommées doit s'élever à 20%
- les émissions de $CO_2$ doivent être réduites de 20%
- l'efficacité énergétique doit être améliorée de 20% d'ici 2020

En Europe, en 2008, seuls 8,5% de la consommation énergétique provient de ressources renouvelables et propres ([4]). Elles doivent donc être globalement accrues de 11,5% d'ici 2020. Quatre textes composent le paquet :

- directive 2009/29/CE du 23 avril 2009 : elle modifie la directive 2003/87/CE dans le but d'améliorer le système d'échange de quotas d'émissions de $CO_2$, dit "EU ETS" pour European Union Emissions Trading Scheme.
- directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 : elle vise à promouvoir l'utilisation d'énergies produites à partir de sources renouvelables
- décision numéro 406/2009/CE du 23 avril 2009 : elle fixe les objectifs de limitation des émissions de gaz à effet de serre dans chaque État par rapport à 2005.
- directive 2009/31/CE du 23 avril 2009 : elle traite du stockage géologique du $CO_2$

Le contexte énergétique mondial, ainsi que les différents traités mondiaux et européens concernant l'évolution du climat poussent l'homme à revoir sa copie vis à vis de la gestion énergétique. De plus, les ressources énergétiques utilisées pour le développement de l'espèce humaine s'épuisent. Associés à la pollution générée et à la flambée des prix des hydrocarbures, ces différents handicaps poussent l'être humain à chercher d'autres sources d'énergies : les énergies renouvelables.

## 1.2 Énergies renouvelables

La particularité des énergies renouvelables (EnR) majeures se situe dans la non diminution de la ressource après la consommation de cette dernière, à une échelle humaine. Il existe différentes formes et sources d'énergies renouvelables.

**L'énergie solaire** L'une des principales source d'énergie renouvelable est visible par tous quelque soit le lieu sur Terre, il s'agit de l'étoile au centre du système solaire, le Soleil. Son rayonnement électromagnétique émet de l'énergie qui est récupérée par l'homme. Il existe deux grands types de production directe d'énergies solaires renouvelables :

- l'énergie solaire thermique
- l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire thermique consiste à capter le rayonnement solaire pour augmenter la température d'un objet. Ce type d'énergie est connu depuis longtemps, puisque être au soleil réchauffe. L'emploi de l'énergie solaire thermique s'effectue directement pour chauffer de l'eau sanitaire par exemple, avec un chauffe-eau solaire, ou encore des fours solaires. Une méthode d'utilisation indirecte consiste à produire de la vapeur à partir d'un fluide dans le but d'alimenter des turbines et donc produire de l'électricité (énergie solaire thermodynamique).

L'énergie photovoltaïque utilise également le rayonnement solaire, mais le transforme directement en électricité avec l'aide de l'effet photoélectrique (des électrons sont émis par un matériau lorsque ce dernier est exposé à de la lumière ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée). Le composant électronique utilisé pour la génération d'électricité est la cellule photovoltaïque. Elles sont regroupées pour constituer un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque est usuellement composée de plusieurs panneaux photovoltaïques, une dizaine pour une habitation, des milliers pour une centrale solaire photovoltaïque (872 300 panneaux pour la centrale de Garbardan dans les Landes).

**L'énergie éolienne** Le Soleil n'est pas la seule source d'énergie renouvelable. Si l'énergie solaire fonctionne en récupérant les rayonnements du Soleil, l'énergie éolienne utilise l'énergie mécanique produite par les mouvements des différentes masses d'air, le vent. L'énergie éolienne n'est pas une innovation récente, les moulins à vent mécaniques des meuniers sont utilisés depuis longtemps pour entrainer les meules. De nos jours, la récupération de l'énergie véhiculée par les vents s'effectue par le biais d'éoliennes. Elles transforment l'énergie mécanique en électricité, ou autre énergie. Des champs d'éoliennes existent, fonctionnant comme une petite centrale. Des éoliennes plus petites existent pour les particuliers, elles produisent de l'électricité qui sera consommée sur place.

**L'énergie hydraulique** Similairement à l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques transforment l'énergie mécanique, excepté qu'il s'agit de l'eau dans le cas présent. Le cycle de l'eau (l'eau s'évapore de l'océan pour former les

nuages, puis les nuages libèrent une quantité d'eau en altitude, l'eau redescend jusqu'à l'océan grâce à la pesanteur, etc...) charge cette dernière d'énergie mécanique, notamment lors des pluies ou lors de la descente fluviale vers l'océan. Le retour vers l'océan de l'eau alimente des barrages hydroélectriques qui produisent de l'électricité. Le principe de fonctionnement est le même que celui de l'éolienne à la différence que le fluide entrainant les turbines est de l'eau, et que c'est la pesanteur qui meut l'eau. D'autres énergies hydrauliques existent, elles n'utilisent pas le cycle de l'eau et la gravité mais des sources marines, et sont minoritaires. L'énergie marémotrice par exemple, est crée à partir des mouvements de la marée, ou encore l'énergie osmotique, qui est produite à partir du mélange d'eau de mer et d'eau douce à l'embouchure des fleuves.

**La biomasse** La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, qui sont des sources d'énergies par combustion ou transformation chimique. La biomasse est une énergie renouvelable à la condition que la quantité d'énergie produite excède la quantité d'énergie utilisée pour la produire. Le bois et les biocarburants rentrent dans la catégorie de la biomasse. Une équipe de chercheurs a démontré que la production d'électricité à partir de la biomasse serait plus rentable, à la fois d'un point de vue écologique que économique, que de transformer les matériaux en bio-carburants et s'en servir dans les transports ([11]).

**La géothermie** La Terre possède en son centre un noyau, d'une température supérieure à 5000 $C$ produisant une quantité de chaleur importante grâce à une radioactivité naturelle. Cette quantité de chaleur filtre à travers les différentes couches pour finalement arriver dans la croûte terrestre. Cela se manifeste par des différences de température suivant la profondeur. Plus la profondeur est élevée, plus la température est importante. La géothermie consiste à extraire l'énergie calorifique présente en profondeur, et à la transformer en électricité ou l'utiliser en tant que chauffage.

Bien que illimitées à l'échelle humaine et peu polluantes, les énergies renouvelables possèdent un inconvénient majeur. Leur disponibilité est irrégulière et discontinue. Les ressources renouvelables n'obéissent pas à l'homme, contrairement à l'énergie nucléaire par exemple. Leur production dépend grandement des conditions atmosphériques et de la météo, le vent pour l'énergie éolienne et le soleil pour l'énergie solaire par exemple. Le caractère incontrôlable de la production ne permet pas aux énergies renouvelables d'être la seule source d'énergie. En effet, la production d'énergies renouvelables et la consommation ne sont pas liées sauf pour l'hydraulique.

## 1.3 Le cas français

### 1.3.1 Le paysage énergétique français

La France se démarque au niveau mondial sur le plan énergétique. En effet, le nucléaire tient une place importante dans la production d'énergie depuis que le général de Gaulle en a fait une des priorités pour reconstruire la France au lendemain de la guerre, dans les années 1950, même si ce n'est réellement qu'en 1956 qu'est mis en place le réacteur de Marcoule, précurseur des réacteurs à venir. Cette particularité culturelle et historique se retrouve dans la répartition de la consommation et de la production d'énergie en France ([12]). La production d'énergie en France se focalise à 86% sur l'électricité comme l'illustre la figure 1.7. De plus, 94% de l'électricité est d'origine nucléaire ([12]), signifiant que 80% de l'énergie produite en France provient de réacteurs nucléaires.

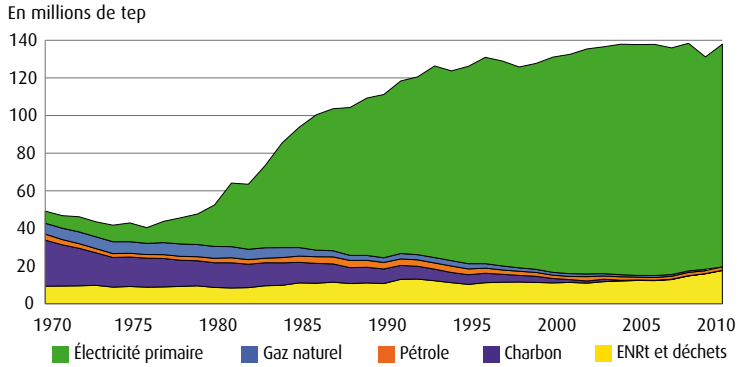


FIGURE 1.7 – Production d'énergie primaire en France ([12])

Au cours de la période 1973-2010, la structure de la consommation a fortement évolué. La part du charbon est passée de 15% à 4%, celle du pétrole de 68% à 31%, alors que la part du gaz était multipliée par deux (7% à 15%), et celle de l'électricité par dix (4% à 43%) ([12]). La production d'énergie en France est donc majoritairement de la production d'électricité (en 2010, $550,3\ TWh$ en totalité dont $407,9\ TWh$ en provenance de l'énergie nucléaire [13]). La production d'électricité ne cesse d'augmenter (voir figure 1.8), due à une croissance constante de la demande. La consommation d'électricité en France a pour la première fois en 2010, excédé les 500 $TWh$. La consommation entre 2009 et 2010 s'est développée de 5,5% pour atteindre $513,3\ TWh$. Cette hausse de la consommation est dûe à 66% à un hiver particulièrement rigoureux, avec des températures très froides, notamment en comparaison de l'année 2009. L'agence météorologique française Météo France souligne qu'il faut remonter à l'année 1987 pour obtenir une année plus froide. Les 34% de la hausse de la consommation de 2009 à 2010 restants, résultent d'une croissance structurelle, conséquence de la reprise économique et du développement

des usages électriques. Malgré une hausse de la consommation électrique, la France reste un pays exportateur d'électricité durant la majorité de l'année. Pour l'année 2010, $66,6\ TWh$ ont été exporté vers les pays frontaliers, tandis que $37,1\ TWh$ furent importés. Les importations d'électricité naissent des pics de consommation, lors des périodes de pointe, typiquement pendant l'hiver où le chauffage fonctionne à plein régime.

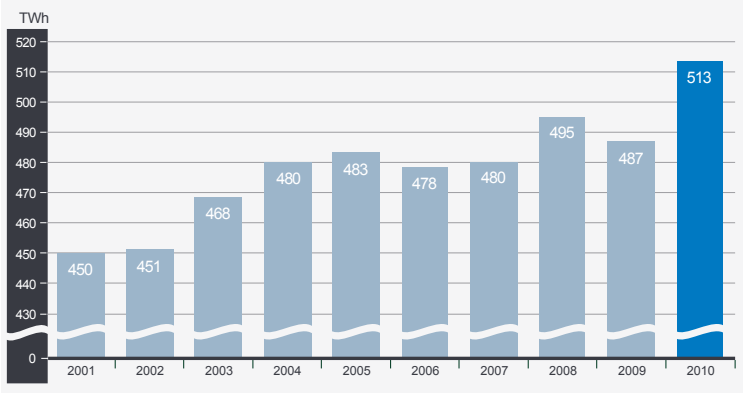


FIGURE 1.8 – Consommation d'électricité en France ([13])

### 1.3.2 Les énergies renouvelables en France

Le paquet énergie-climat mis en place en Europe impose aux pays participants que 20% de leur production énergétique soit d'origine renouvelables en 2020. En 2010, la France est le second producteur et le second consommateur d'énergies renouvelables d'Europe. La France, en tant que pays membre, suit la règle, notamment dans le domaine éolien et solaire. L'éolien poursuit sa croissance (voir figure 1.9) avec, avec 5600 $MW$ installés en France fin 2010. En atteignant ce nombre, la production d'énergie d'origine éolienne a décuplé en 5 ans. Le 12 novembre 2010, un record a été atteint. La puissance instantanée générée par production éolienne a atteint les 4200 $MW$, ce qui correspond à un facteur de charge de 77%. Cependant, en 2010, le facteur de charge horaire varie fortement de 0% à 79% avec une moyenne annuelle de 22%. Ce point illustre le caractère intermittent de la disponibilité de la ressource éolienne. De manière similaire, le parc photovoltaïque présent en France ne cesse de croître, avec une puissance installée s'élevant à 760 $MW$. La figure 1.10 illustre la vitesse de la croissance, notamment avec un parc quatre fois plus important fin 2010 qu'en 2009. L'énergie produite grâce au parc photovoltaïque suit la même progression avec une production estimée à $0,6\ TWh$ en 2010, soit près du quadruple de la production pour l'année 2009.

Le découpage de la production d'énergie d'origine renouvelables en fonction des sources pour l'année 2010 est présenté avec la figure 1.11. En 2010,

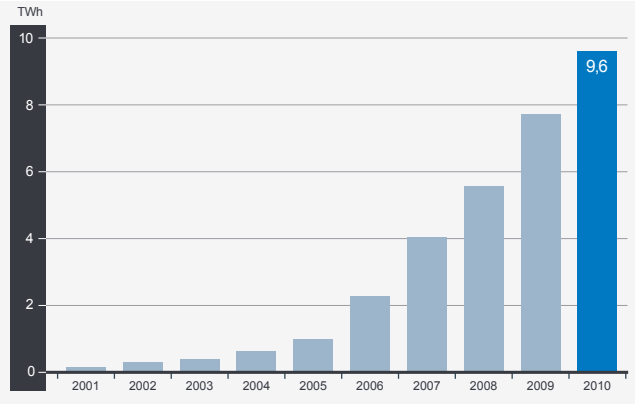


FIGURE 1.9 – Production éolienne en France ([13])

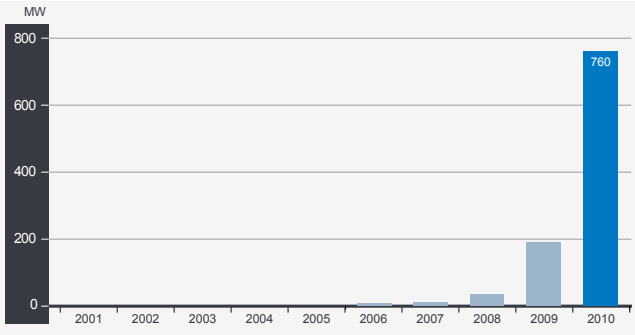


FIGURE 1.10 – Parc photovoltaïque en France ([13])

la production d'énergies renouvelables en France atteint les 22,7 Mtep ce qui correspond à 16,4% de la production énergétique nationale. La répartition s'effectue de la manière suivante :

- 45% pour le bois-énergie
- 24% pour l'hydraulique
- 10% pour les biocarburants
- 7% pour les pompes à chaleur
- 14% pour les autres filières énergétiques

La part réelle de l'électricité d'origine renouvelable est calculée avec les données de production réelle de l'année et vaut 14,5% en 2010 en France. Avec l'entrée en vigueur de la directive du 23 avril 2009 sur les énergies renouvelables, la notion de productions normalisées pour l'hydraulique et l'éolien est créée. Elle permet d'annuler les variations dues aux perturbations climatiques. Selon cette norme, la part normalisée calculée selon la directive depuis 2005 s'élève à 14,7%.

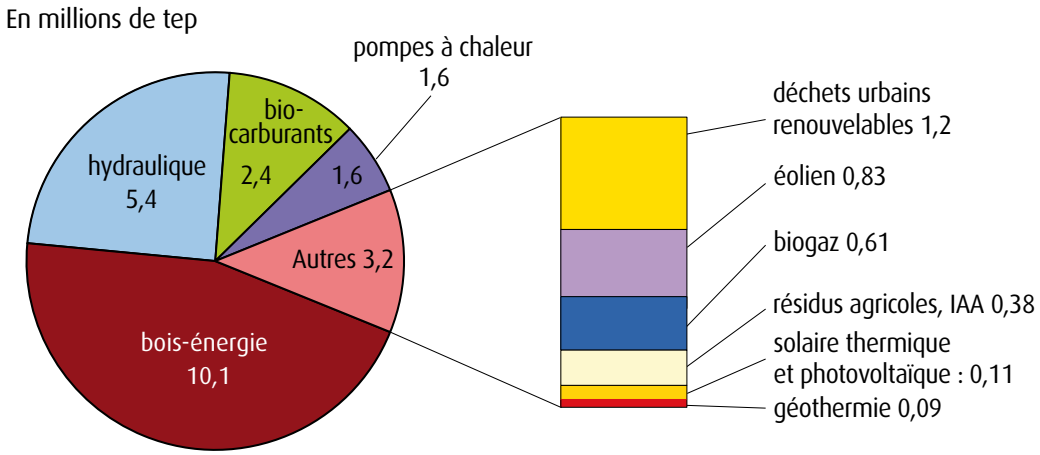


FIGURE 1.11 – Production d'énergies renouvelables par filière en 2010 ([12])

### 1.3.3 Les nouveaux problèmes liés à l'évolution énergétique

Comme décrit précédemment, l'Europe a décidé d'agir dans une optique de développement durable. La France est bien sûr touchée par cette décision, et cela s'illustre notamment avec les différents Grenelle de l'environnement. De plus, historiquement, la France est un acteur majeur dans la production d'énergie sous forme d'électricité dû aux différents programmes nucléaires mis en place après la seconde guerre mondiale. Certaines mutations du paysage énergétique et des mentalités instaurent des nouvelles problématiques à résoudre. Depuis que l'électricité existe, sa production s'effectuait de manière

totalement centralisée, notamment avec les centrales nucléaires, avant d'être acheminée vers les consommateurs partout sur le territoire. Le réseau mis en place à l'époque avait pour objectif de pouvoir transporter l'électricité dans ces conditions précises, des centrales vers l'ensemble du pays. Cependant, l'évolution des mentalités, la croissance économique, les obligations mondiales et l'introduction des énergies renouvelables ont modifiés ces conditions. Plus particulièrement, les énergies renouvelables ont inséré dans le réseau électrique français de nouveaux points de production, avec la démocratisation des éoliennes et des installations photovoltaïques, modifiant alors le schéma de production, l'orientant vers une production décentralisée. Un point crucial dans la modification du marché énergétique est illustré par la figure 1.12. Cette dernière représente la consommation électrique par secteur, et le changement est flagrant entre 1970 et 2010. Le secteur résidentiel/tertiaire qui était très peu consommateur d'électricité, a dramatiquement augmenté ses besoins en électricité, jusqu'à dépasser le secteur de l'industrie, pour finalement devenir le secteur le plus consommateur, loin devant le secteur industriel. La figure 1.13 présente un exemple de consommation d'électricité sur une journée en France : il s'agit du 8 février 2012. Chaque journée suit les mêmes étapes et présente une forme de consommation similaire. La courbe de consommation journalière est le reflet de la vie quotidienne. En hiver, la courbe de consommation électrique évolue comme suit :

- peu de consommation la nuit
- une pointe le matin, avec une augmentation de 4 à 8 heure
- un diminution l'après midi
- une pointe le soir, vers 19 heures en hiver

Ces variations de consommations sont cycliques. La forme de la consommation varie peu suivant les saisons, les quatre phases sont présentes et s'enchainent, seule l'amplitude des différentes phases fluctue.

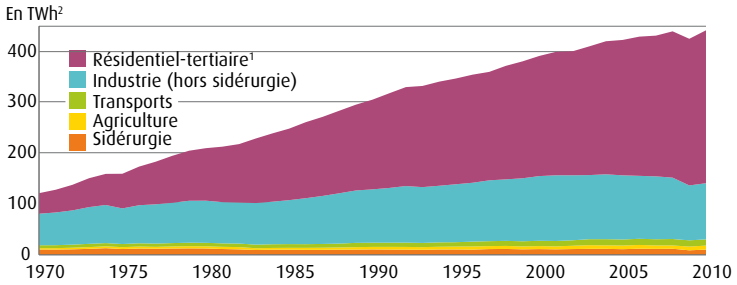


FIGURE 1.12 – Consommation finale d'électricité par secteur en 2010 ([12])

À l'approche des 19 heure en hiver, la consommation électrique française atteint son paroxysme. Électroménager, télévisions, chauffage électrique sont massivement employés. Cela conduit à un pic de consommation important. De

plus, hiver après hiver, la quantité d'électricité mise en jeu lors de ces pics de consommation augmente. Cette augmentation est la traduction de l'évolution technologique, avec la multiplication des équipements électriques à caractères domestiques. Les hivers de plus en plus froids contribuent aussi à cet état de fait, puisque le chauffage électrique est très répandu en France. En 2006, 30% des ménages français utilisaient le chauffage électrique comme chauffage principal ([14]), en 2009, 80% des logements construits ont été équipés de chauffage électrique. En effet, la consommation électrique varie significativement en fonction de la température, ainsi si la température diminue d'un degré, la surconsommation provenant du chauffage s'élève environ au double de la consommation de Marseille. Les pics de consommation sont un réel problème. Il faut beaucoup d'électricité pour satisfaire tous les besoins, et ne pas provoquer un black-out du réseau. Les fournisseurs d'électricité sont alors obligés d'allumer des centrales produisant de l'électricité onéreusement, en plus d'importer de l'électricité, entrainant des surcoûts.

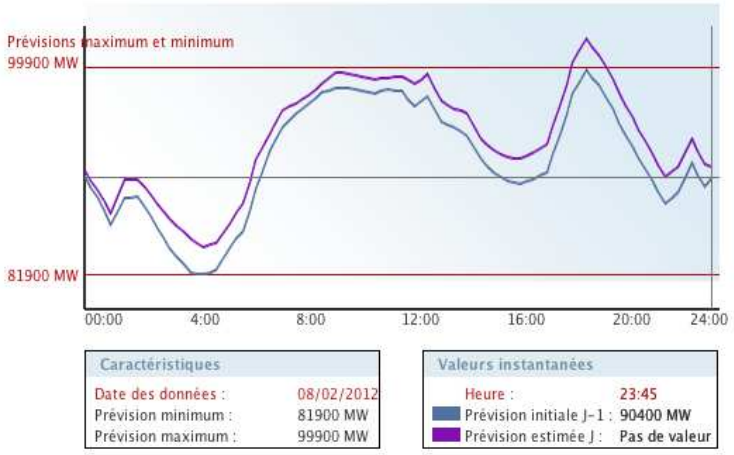


FIGURE 1.13 – Exemple de consommation journalière d'électricité en France ([15])

Les énergies renouvelables introduites en France allègent la charge sur les centrales, en injectant directement sur le réseau l'électricité produite. Des centrales nucléaires sont éteintes profitant de la disponibilité des énergies renouvelables. Cependant, un problème majeur existe, la quantité d'énergie issue des sources d'énergies renouvelables tel que l'éolien ou encore le solaire, varie d'un instant à l'autre et ne peut pas être contrôlée. L'évolution de la production d'énergie solaire est donnée en exemple avec la figure 1.14. La production journalière a la forme d'une courbe de Gauss centrée sur midi, la totalité de la production s'effectuant entre 4 et 20 heure. Ce constat est trivial puisque sans soleil, il est impossible de produire. Mis en parallèle avec la figure 1.13, la divergence entre les périodes de consommation intenses et les périodes de

production solaires est mise en évidence. Cette conclusion est la même dans le cas de l'éolien et appuie le fait qu'il faut adapter la production d'électricité en fonction de la production d'énergie renouvelable, en gardant à l'esprit que les énergies renouvelables ne peuvent pas servir à alimenter la population en cas de pics du fait du caractère non controllable des ces énergies.

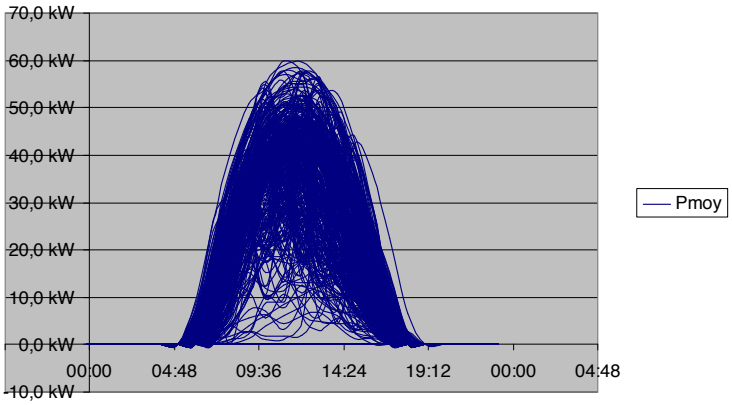


FIGURE 1.14 – Exemple de courbes de production journalières d'énergie solaire en France ([16])

Ces problématiques identifiées au niveau du réseau et de la production sont une conséquence directe de la courbe de consommation nationale. En se positionnant d'un point de vue consommation d'électricité, au lieu de se placer d'un point de vue production, un acteur important émerge. Il s'agit du secteur résidentiel et tertiaire comme l'illustre la figure 1.12, plus particulièrement le bâtiment.

## 1.4 Le bâtiment

Le secteur résidentiel et tertiaire est le plus grand consommateur d'électricité en France. Ce constat est similaire pour la consommation d'énergie primaire. Comme l'illustre la figure 1.15, le secteur résidentiel et tertiaire consomme 43% de l'énergie totale consommée en France, devant le secteur du transport qui possède une part à hauteur de 31%.

À la vue de la voracité en énergie du secteur résidentiel et tertiaire, l'intérêt d'agir sur ce secteur précisément est nécessaire. Le secteur résidentiel et tertiaire s'articule autour d'un acteur majeur : le bâtiment. De nombreux leviers d'actions existent pour augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments, et agir sur la consommation du secteur. Plusieurs moyens sont à disposition. Le premier d'entre eux est l'amélioration de la conception. [17] propose par exemple un algorithme afin d'améliorer l'architecture des bâtiments avec pour objectif de profiter au mieux de la radiation solaire, que ce soit de manière

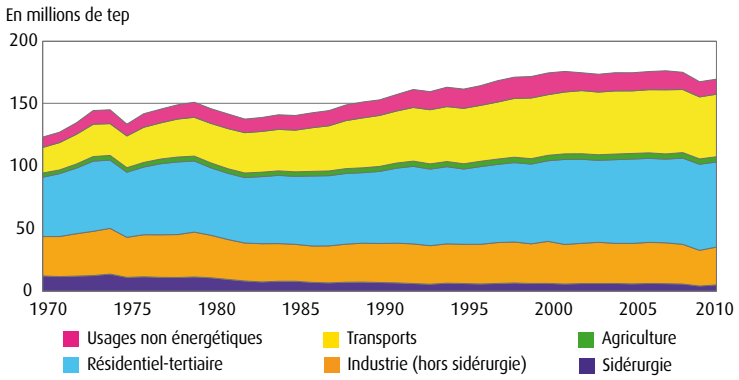


FIGURE 1.15 – Consommation d'énergie finale par secteur en France ([12])

passive ou active. La modification de l'architecture pour répondre à un besoin énergétique est aussi discuté dans [18].

Des travaux sont aussi conduits en prenant en compte l'occupant du bâtiment. [19] présente une méthode de réduction de la consommation énergétique d'un bâtiment en sensibilisant les occupants. La consommation électrique ainsi que la consommation en gaz leur sont indiquées. Ils prennent conscience de leur consommation et la réduisent. Ce travail n'agit pas directement sur le bâtiment mais sur le facteur humain, explorant un champ d'action différent. [20] et [21] sondent et étoffent la prise en compte du facteur humain dans le bâtiment.

D'autres pistes cherchent à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments comme dans [22]. De nombreux facteurs sont à prendre en compte pour augmenter l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Ces derniers sont sociaux, financiers, environnementaux, énergétiques ou encore architecturaux. Une méthode d'optimisation multi-objectif est proposée dans le but d'identifier l'importance des différents facteurs dans le processus.

Le bâtiment d'aujourd'hui est aussi moderne, faisant la part belle à la technologie. Les énergies renouvelables deviennent aussi une part intégrante du fonctionnement d'un bâtiment. Énergie thermique solaire avec un chauffe eau solaire, panneaux photovoltaïques ou éolien urbain pour la production d'électricité deviennent de plus en plus courant. [23] révèle un système de contrôle automatique, où la demande est totalement intégrée dans le système de production du bâtiment qui contient un ensemble de sources renouvelables et des moyens de stockage. Dans le même ordre d'idées, [24] compare quatre méthodes de pilotage pour un système avec une installation autonome photovoltaïque et diesel avec des batteries.

Le caractère complexe du bâtiment offre un large champ d'investigations et de perspectives pour la recherche. La problématique étudiée ici est la gestion de l'énergie dans le bâtiment, plus particulièrement l'énergie électrique.

### 1.4.1 Gestion énergétique dans le bâtiment

Plusieurs études ont été menées durant les deux dernières décennies traitant de la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Un certain nombre d'auteurs se sont intéressés aux systèmes HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) en proposant des stratégies de contrôle optimale. Dans le cas de [25] et [26], la stratégie tient compte de la capacité de stockage thermique d'un bâtiment. Chaque bâtiment absorbe de la chaleur à un rythme qui lui est propre dépendant des matériaux utilisés pour la construction, de l'architecture, etc... Grâce à cela, la consommation du HVAC peut être déplacée des périodes de pointes vers les périodes creuses dans une certaine mesure. Plus particulièrement, économiser jusqu'à 10% de l'énergie d'un bâtiment est possible suivant ce protocole selon [26].

Cependant, ces approches ne prennent pas en compte les contraintes de ressource d'énergie. Généralement, ce sont les besoins d'autonomie des systèmes isolés [27] ou les limites de production d'énergie totale des fournisseurs pour les systèmes connectés au réseau, qui contraignent les ressources énergétiques.

Dans la littérature, l'importance et la complexité d'un système de gestion énergétique intelligent et autonome dans le bâtiment, plus particulièrement pour le secteur résidentiel, sont parfaitement connus. La gestion de l'énergie, notamment à propos des stratégies de coûts ou encore de prévision de la consommation énergétique sont des axes de recherche étudiés ([28], [29]). D'autres travaux ([30], [31]) se focalisent plus sur la logique floue (fuzzy logic), les réseaux de neurones (neural network), la commande optimale ou prédictive dans le cadre des conditions thermiques dans les habitations.

Un système de gestion de l'énergie dans le bâtiment résidentiel s'occupe majoritairement de la gestion des équipements électroménagers, grâce à un réseau de communication ayant pour objectif de créer des interactions offrant un moyen de contrôle du système sur les équipements ([32]). La présence de ce réseau de communication permet d'embarquer un mécanisme de gestion des charges (nommé contrôle distribué dans [33]). Selon [34], un système de gestion d'énergie dans le bâtiment contient des méthodes organisant les activités des consommateurs et des fournisseurs d'énergie, dans l'optique d'adapter les capacités de production d'énergie avec les besoins des consommateurs. Cette solution a pour but de limiter les pics de consommation. En 1997, [35] défini la notion de gestion de l'énergie ainsi que de systèmes de contrôle. L'ensemble des équipements présents dans le système sont contrôlés via des calculateurs embarqués capables de communiquer avec des protocoles standard.

Pour qu'un système de gestion de l'énergie dans le bâtiment fonctionne correctement, des moyens de communication et les aspects techniques associés

doivent être mis en œuvre, de même que l'architecture logicielle et matérielle. [36] explicite les besoins technologiques pour la mise en place de cette communication, tandis que les différentes architectures pour une gestion optimale de l'énergie sont développées dans [37], [38] et [39].

La littérature comporte des travaux traitant de la présence de moyens de production locale associée ou non à des procédés de stockage ([40],[41], [42]). Le système de contrôle présenté dans [40] est un contrôle adaptatif optimal pour un système photovoltaïque hybride autonome avec stockage, utilisant la commande prédictive conjointement avec l'introduction d'un système de contrôle en temps réel. La commande prédictive permet d'anticiper une solution pour la commande du chauffage et la climatisation. La gestion des charges électriques présentes dans le bâtiment est étudiée dans [64] et [43], avec un système de gestion anticipatif sur le long terme et réactif sur une échelle de temps plus restreinte, et une approche du problème suivant la programmation dynamique est présentée dans [44]. [45] expose des analyses détaillées des techniques de la gestion de charge.

### 1.4.2 Du smart grid aux smart homes

Après avoir étudié le paysage énergétique français, le rôle majeur du bâtiment dans l'évolution énergétique débutée en Europe, avec le paquet énergie-climat ou encore le nouveau plan d'actions prévu en 2015 par la conférence de Durban organisée en 2011 par l'ONU, ne laisse aucune place au doute. Les bâtiments consomment énormément d'énergie particulièrement d'électricité. Néanmoins, atteindre les objectifs fixés nécessite plus que seulement un travail sur le bâtiment lui-même, tel que modifier l'architecture ou les matériaux de construction. L'obligation d'inclure le facteur humain, avec l'occupant du bâtiment, s'avère nécessaire. Les occupants doivent s'investir dans la gestion du réseau électrique, et comprendre l'influence de leur consommation sur ce dernier. Il s'agit du premier pas vers des consommateurs informés, capable d'ajuster ou réduire leur consommation, en fonction de la production. L'objectif à long terme est que les consommateurs aident à la gestion du réseau pour faciliter l'équilibre entre la production et la consommation sur le réseau, ce qui est difficile notamment à cause de l'augmentation forte des sources d'énergies renouvelables sur le réseau. Des solutions restent encore à être développées du côté de la demande, notamment sur le contrôle direct des équipements domestiques ou encore la modification du coût de l'électricité pour modifier la courbe de consommation.

Le concept de "Smart Grid" est né pour répondre à cette problématique. Jusqu'à aujourd'hui, l'équilibre entre les consommateurs et les producteurs a été atteint par l'adaptation de la production d'énergie sur la base de différentes

dynamiques de prix qui sont reliées à la bourse de l'énergie. Par exemple, la bourse POWERNEXT européenne contient différents marchés : le jour-en-avant, l'équilibre. . . Ces marchés possèdent un horizon temporel différent et des protocoles d'échanges. Globalement, le "Smart Grid" est représenté comme un réseau de distribution électrique, instrumenter avec des nouvelles technologies telles que la télécommunication, l'optimisation logicielle, etc... L'objectif avec le "Smart Grid" est l'optimisation de la production et de la distribution afin d'éviter les pics de consommations et coordonner l'utilisation des énergies renouvelables avec la consommation ([46]). Cela se traduit par une mise en relation plus adaptée entre l'offre, les producteurs et la demande, les consommateurs, sécurisant l'approvisionnement et améliorant la compétitivité de la production électrique. Un point important soulevé précédemment est la multiplication des sources d'énergies renouvelables particulièrement avec les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Ces nombreuses sources présentent un caractère intermittent et diffus de leur disponibilité, ce qui est problématique pour le contrôle de la production.

Le consommateur devient un levier important du fonctionnement du réseau électrique, il peut produire, auto-consommer, réinjecter sur le réseau. De même, de nouvelles habitudes de consommation voient le jour avec le progrès technologique. Un exemple est l'intégration des véhicules électriques, avec la démocratisation des prototypes électriques et les premières voitures totalement électriques mises en vente. Le "Smart Grid" a pour charge de prendre en compte tous ses aspects nouveaux et complexes pour gérer au mieux le réseau électrique ([47], [48], [49]). Conjointement avec l'évolution du réseau vers un modèle de plus en plus décentralisé en ce qui concerne la production, des outils sont nécessaires pour le fonctionnement du "Smart Grid" comme des compteurs communicants et intelligents, qui ont pour fonction d'alerter et prévenir les situations de crise énergétique (pics de consommation). Les aspects technologiques du smart grid ont été étudiés dans [50] et [51]. Le facteur crucial pour le fonctionnement du "Smart Grid" est la communication, elle autorise le partage d'informations entre les différents acteurs présents sur le réseau, que ce soit du point de vue de la production ou de la consommation, et ainsi prévenir les états de crise.

Les "Smart Grids" existent déjà dans plusieurs pays comme l'Espagne, avec la ville de Malaga. Cette ville espagnole a démarré le programme "Smart City", visant à développer un réseau électrique intelligent. L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau est aussi inscrite dans le cahier des charges. Malaga a réalisé une économie sur sa consommation énergétique de près de 20% depuis la mise en place du projet en 2009. Au Japon, un projet illustrant l'intégration totale entre résidence et voiture, a été mis en place dans le village de "Rokkasho" ([52]). Lorsque le besoin en électricité se fait sentir, la résidence puise dans la

batterie de la voiture qui sert alors de réserve lorsqu'elle n'est pas utilisée.

Pour conclure, le smart grid autorise la gestion de la demande, avec communication bidirectionnelle qui offre aux occupants la possibilité de gérer leurs consommations au cours des différentes heures de la journée, de modifier leurs habitudes en fonction des informations reçues, auxquelles ils sont susceptibles de répondre (« Demande side Management »).

En réponse à la difficulté croissante de contrôler la production, due au développement important des productions de type énergies renouvelables, la gestion des charges dans le bâtiment est de plus en plus étudié ([53]). Deux méthodes différentes sont abordées dans la littérature :

- la première méthode consiste à piloter directement les charges. Des signaux de délestages sont envoyés par les revendeurs d'énergie (ou par les nouveaux acteurs nommés agrégateurs) à différentes catégories de charges. Dans cette approche de contrôle direct, les clients (ou occupants) ne reçoivent que des signaux de délestage. Ils ont alors le choix d'arrêter ou non un appareil, ce qui entraine des pénalités ou non.
- le seconde méthode consiste à piloter les charges indirectement en modifiant le prix de l'électricité. Ce dernier est ajusté en fonction de la disponibilité de l'électricité. Dans cette méthode, le consommateur choisit d'adapter ou non son comportement en fonction du prix de l'énergie. L'occupant a la liberté d'ajuster la consommation en fonction de son comportement et de privilégier son confort au détriment du prix. Cependant, ce gain de liberté est contre-balancé par une implication plus importante pour les occupants.

Une erreur serait de considérer la gestion des charges comme un moyen d'économiser de l'énergie. En effet, ce point de vue est réducteur puisque le meilleur moyen d'économiser de l'énergie est de ne pas la consommer. Le contrôle des charges offre la possibilité à l'occupant de réduire ses coûts énergétiques en s'adaptant à la disponibilité de l'énergie, en coordonnant ou non ses besoins avec les informations extérieures reçues à partir du réseau. Cette liberté dans le compromis entre efficacité énergétique et confort est primordiale pour l'occupant. Il reçoit de l'énergie et produit du confort. Ce concept d'énergie/confort est corrélé avec la notion d'efficacité énergétique, qui illustre la capacité d'un équipement à fournir un service pour une quantité donnée d'énergie ([54]).

Une " Energy Smart Home" gérant l'énergie dans un bâtiment devrait être équipée d'un logiciel de conseil énergétique, et non pas de décision, qui informe l'occupant sur les différents choix possibles en fonction des acteurs extérieurs au bâtiment comme le réseau, les conditions météorologiques ou la disponibilité de l'énergie. Ce logiciel gérerait, soit directement soit en conseillant les occupants, alors les équipements et les systèmes énergétiques présents dans le

bâtiment pour répondre aux exigences de l'occupant et les contraintes de son environnement.

La formalisation fournie par [55] permet d'identifier le rôle de la gestion de l'énergie dans le bâtiment : il s'agit d'un système de contrôle de l'énergie maximisant l'efficacité énergétique en tenant compte du compromis coût/confort désiré par l'occupant. Les demandes de l'occupant et le coût de l'énergie variant en fonction du temps, la gestion de l'énergie dans le bâtiment consiste en un problème d'optimisation dynamique à résoudre.

### 1.4.3 Conclusion

L'homme n'a pas cessé d'évoluer, augmenter son confort et progresser technologiquement, oubliant les idées de pérennité. Cette marche en avant ininterrompue du progrès s'est vu accompagné de problèmes environnementaux liés à l'augmentation de la consommation électrique. Plusieurs efforts ont été faits pour les résoudre tel que le protocole de Kyoto. Néanmoins, le secteur résidentiel/tertiaire a continué sa croissance énergétique et les rejets de gaz à effet de serre ont suivi la même logique. Pour les fournisseurs, l'objectif a toujours été de satisfaire le consommateur en fournissant l'énergie quand elle est demandée, notamment dans le domaine de l'électricité, et ce, sans considération environnementale. Ce mode de pensée est condamné avec la raréfaction des sources d'énergies fossiles. Pour remédier à ce problème, l'homme développe de nouvelles technologies pour conserver son mode de vie tout en ajustant les besoins énergétiques, dans l'optique d'un développement durable. La réduction de la consommation énergétique n'est pas la seule piste explorée, la manière de consommer est importante. Nos travaux se concentrent sur la gestion de la consommation dans le secteur résidentiel/tertiaire. Ils proposent d'étendre une méthode de coordination automatique de la consommation d'énergie dans le bâtiment en fonction des contraintes et préférences liées à l'utilisateur et aux fournisseurs d'énergie. Les travaux s'attachent à augmenter les possibilités offertes avec l'ajout de nouveaux modèles de consommation et de résolution pour différents équipements, permettant d'avoir plus de souplesse dans la gestion énergétique, en développant une nouvelle approche de résolution pour le système de gestion de l'énergie.

# Chapitre 2

# Problématique de la gestion de l'énergie dans le bâtiment et approches existantes

**Objectif et optimisation recherchée** Ce travail se place dans le cadre de la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Chacun des équipements du bâtiment que l'on veut gérer possède ses propres caractéristiques de consommation énergétique. La consommation est continue dans le cas d'un réfrigérateur, tandis qu'elle est ponctuelle pour un four électrique. Ces différents types de consommation introduisent un pilotage différent des équipements, avec une approche différente. Cependant, dans le cas d'un chauffage, il n'est pas utile de le garder en fonctionnement lorsque l'habitant n'est pas présent. Ceci traduit l'influence des besoins de l'habitant sur le fonctionnement des équipements, puisque celui-ci qui décide quand et comment fonctionnent les équipements. Le bâtiment est un cadre large pour la gestion de l'énergie et peut être difficile suivant la configuration, c'est pourquoi la maison a été retenue. L'objectif de ce travail est l'optimisation de la consommation électrique des différents équipements d'une maison tenant compte des particularités des équipements et de l'usager. L'énergie électrique n'est pas le seul critère intervenant dans l'optimisation. En effet, le fonctionnement des équipements dépend aussi des préférences de l'utilisateur. Cela se traduit dans le cas d'un chauffage, par la température désirée dans l'habitat, tandis que pour un four, il s'agit de la date de départ ou de fin. L'optimisation s'effectue à partir des différents modèles de consommation des équipements, des préférences de l'utilisateur et aussi du prix de l'électricité. En France, l'électricité ne comprend que deux tarifs distincts, l'heure pleine et l'heure creuse. Avec la grille de tarif pour la journée suivante, les préférences utilisateurs et les modèles des équipements, l'optimisation doit créer un plan de consommation électrique global pour l'habitation pour le prochaine journée. Celui-ci doit minimiser le coût financier tout en conservant un haut niveau de

satisfaction pour l'habitant. Par exemple, le plan de consommation préconisera d'exécuter la machine à laver durant les périodes d'heure creuse, le chauffage sera aussi éteint en l'absence d'habitant.

Ce chapitre se concentre sur la présentation des systèmes de gestion de l'énergie. Le premier d'entre eux propose une approche linéaire centralisée avec la création d'un programme linéaire mixte ([56], [57] et [58]). Le second expose une approche de résolution décentralisée par le biais des systèmes multi-agents ([59] et [60]).

## 2.1 Description de la problématique

Le problème de gestion des flux énergétiques dans le bâtiment traité dans cette thèse concerne la gestion des sources et des charges dans le cadre du bâtiment, qu'il soit résidentiel ou non. Cela consiste à ajuster la courbe de consommation du bâtiment en fonction d'éléments extérieurs pouvant avoir une influence sur le comportement d'un système bâtiment qui inclut l'enveloppe, les équipements et les occupants. Le problème ainsi défini est une application des problèmes généraux d'ordonnancement sous contraintes de ressources cumulatives suivants : cumulative scheduling problem CuSP défini par [61] et energy scheduling problem EnSP défini par [62]. Les préférences des occupants entrent en ligne de compte pour les choix à effectuer, de même que le coût de l'énergie. Le coût énergétique présenté ici ne se limite pas à un coût financier, le tarif du kilowatt heure par exemple. Le coût énergétique peut inclure aussi le coût environnemental, avec le rejet de $CO_2$. La gestion de l'énergie ne vise pas à réduire la consommation énergétique du bâtiment, mais à ajuster la consommation en fonction du meilleur moment de la journée pour chaque activité. En effet, lors du chapitre précédent, la prévisibilité des pics de consommation électrique a été démontrée. Utiliser un système de gestion de l'énergie offre la possibilité de limiter les pics en retardant ou avançant les activités prévues dans le bâtiment. Les études présentées précédemment ([61] et [62]) s'attachent à mettre en place un tel système de gestion, cependant, les stratégies de gestion proposées, bien qu'optimales, ne s'appliquent qu'à un seul équipement, sans tenir compte des contraintes de ressources énergétiques disponibles (i.e la ressource cumulative est vue comme une donnée constante). Leur objectif est seulement la minimisation de l'énergie consommée.

Le système de gestion de l'énergie présenté dans cette thèse ne traite que la consommation électrique. Il fait suite au travail de [63], dans lequel est présentée une formulation du problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment sous la forme d'un problème d'ordonnancement sous contraintes d'allocation de ressource. Dans ce travail, l'énergie électrique est la ressource partagée

entre les différents équipements. Ils sont séparés en deux catégories distinctes, les producteurs (réseau électrique, panneaux photovoltaïques, éolienne, etc...) et les consommateurs (équipements domestiques). Le système communique en temps réel avec les différents équipements, leur indiquant leurs consignes de production/consommation en fonction des données réelles de consommation/production reçues des équipements. Le calcul des consignes s'effectue avec une optimisation à moyen terme délestant ou non les charges électriques du bâtiment. Néanmoins, ces consignes sont calculées sur un horizon moyen terme, utilisant les prévisions sur cet horizon des conditions météorologiques et tarifaires de l'électricité. Un écart entre la réalité et les prévisions nécessite un ajustement des consignes envoyées aux équipements pour garantir une optimisation correcte puisque la consommation/production électrique peut varier. Typiquement, un écart de température est subit par le système comme une perturbation qui doit être corrigée. Pour répondre à ce problème global, comprenant une optimisation à moyen terme et une capacité de régulation des perturbations, une architecture en trois couches a été développée ([64]). Le système de gestion présenté est centralisé. Les travaux menés au cours de cette thèse contribuent à l'élaboration de cette architecture de gestion.

### 2.1.1 Notion de service

Le système de gestion de l'énergie développé dans les travaux précédents gère par optimisation la consommation des équipements dans le bâtiment. Chaque équipement présent réalise un type de service particulier. Plusieurs équipements peuvent fournir le même type de service, comme un ordinateur et une télévision. Bien que le nombre d'équipements disponibles dans un bâtiment puisse être important, le nombre de types de services différents est restreint. La première catégorisation des équipements consiste à identifier leur rapport à l'énergie. Deux catégories existent, les services fournisseurs d'énergie (stockage/destockage inclus) et les services à l'occupant. Les services fournisseurs d'énergie regroupent l'ensemble des équipements produisant de l'énergie électrique pour le bâtiment, tels que les panneaux photovoltaïques, le réseau électrique (assimilé à un équipement fournissant de l'énergie) ou encore les groupes électrogènes. Les services à l'occupant englobent tous les équipements consommant de l'électricité pour produire du confort à l'occupant. Une télévision et une machine à laver offrent toutes deux un service à l'occupant. Les services à l'occupant sont liés à des équipements qui transforment de l'énergie pour répondre à un besoin spécifique de l'utilisateur.

Les services à l'occupant sont plus nombreux que les services fournisseurs, en partie à cause des progrès technologique dans le domaine de l'hygiène et du confort à la personne. Afin de différencier les services à l'habitant en fonction de

leurs caractéristiques, une classification est effectuée. Cette dernière identifie les caractéristiques de consommation de l'équipement afin de dégager des modèles.

Les différences entre les services se définissent avec les questions suivantes :

- le service est-il pris en compte individuellement par le système de gestion ? (supervisable) Cette question permet de savoir si le système de gestion de l'énergie a un quelconque moyen de modifier la consommation électrique de l'équipement associé.
- le service consomme-t-il de l'électricité pendant la totalité de l'horizon de planification ?

Un service est supervisable s'il répond au moins à une de ces propositions :

- la puissance consommée par l'équipement associé peut être modulée par le système de gestion (modulable)
- le fonctionnement de l'équipement associé peut être interrompu sans le détériorer par le système de gestion (interruptible)
- la date d'exécution du service peut être modifiée par le système de gestion (décalable)

Un service supervisable, dont la consommation s'effectue sur la totalité de l'horizon est dit ***permanent***. Un congélateur ou un radiateur entrent dans cette catégorie. Un service ***permanent*** est modulable puisqu'il s'agit du seul levier d'action disponible au vue de la nature permanente de la consommation. Tout service à l'occupant supervisable n'étant pas ***permanent*** est de type ***temporaire***. Les services ***temporaires*** sont supervisables lorsqu'ils sont décalables et/ou interruptibles. Les services ***temporaires*** ont une demande spécifique d'exécution qui leur est associée. Une machine à laver, ou encore un four sont des exemples de services temporaires, interruptible pour la machine à laver et décalable pour le four. Enfin, les services non supervisables sont appelés services ***non supervisés***. L'ensemble des équipements non gérés par le système de gestion rentrent dans cette catégorie. Les équipements n'ayant aucune liberté d'exécution tels que la télévision ou l'éclairage illustrent cette catégorie. Le système sait qu'ils existent, mais n'a aucun pouvoir sur eux. Cette classification permet de définir précisément les contours du problème d'optimisation, et d'identifier précisément le rôle et le comportement de chaque équipement du bâtiment d'un point de vue énergétique.

Une classification des activités dans l'habitat est décrite dans [65] et [66]. Elle s'appuie sur le niveau d'automatisation et le nombre d'activations d'un équipement. Les équipements faiblement automatisés avec beaucoup d'activations correspondent aux services non-supervisés alors que les équipements largement automatisés ayant uniquement une activation permanente correspondent souvent aux services permanents. Les équipements nettement automatisés avec plusieurs activations correspondent aux services temporaires.

### 2.1.2 Mécanisme de pilotage multi-couches

Un problème important pour le système de gestion de l'énergie dans le bâtiment est la gestion des incertitudes. Elles sont nombreuses et proviennent de diverses origines, chacune ayant un impact différent sur le système. Les origines varient notamment à cause de l'occupant, ouvrant une porte ou changeant le réglage d'un thermostat, en passant par les prévisions météorologiques incertaines par nature, ou par les incertitudes sur le modèle de comportement d'un équipement. Afin de limiter l'influence des incertitudes et les traiter au mieux avec le système, une structure de contrôle générale en 3 couches inspirée par les travaux de [67] est mise en place. Utiliser un système de contrôle multi-couches a l'avantage d'augmenter la réactivité du système par rapport aux incertitudes, en divisant le problème global en sous-problèmes. Les couches présentes (voir figure 2.1) dans le système sont :

- la couche anticipative
- la couche réactive
- la couche locale

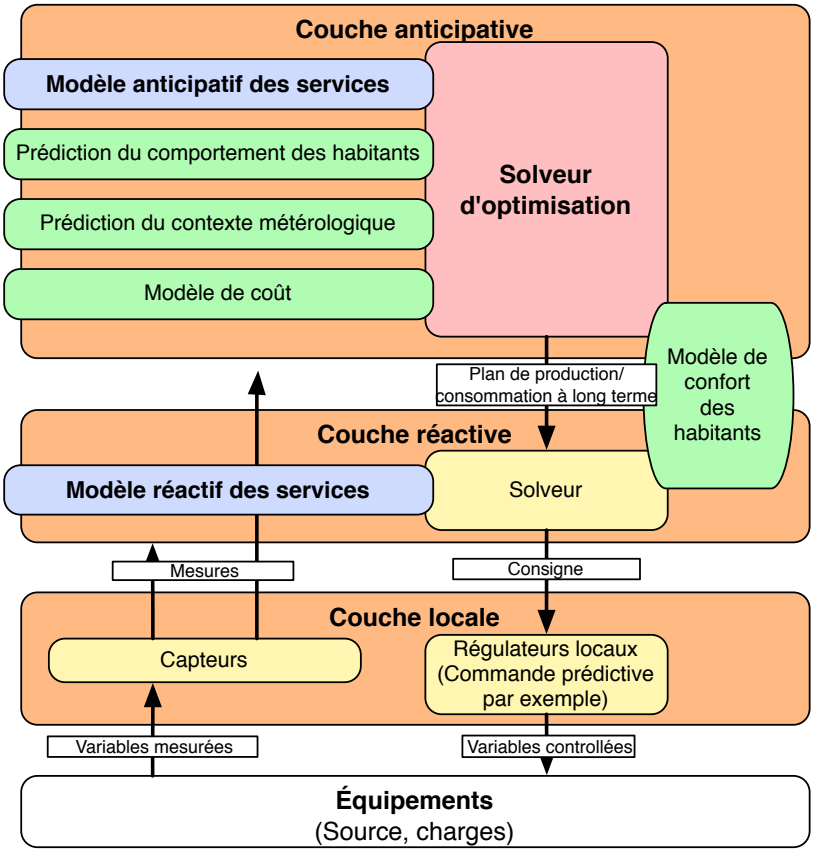


FIGURE 2.1 – Mécanisme de pilotage multi-couche

Chacune des couches se différencie par l'horizon d'optimisation sur laquelle elle agit. La couche anticipative travaille sur l'horizon le plus long, typiquement 24 heures, la couche réactive sur un intervalle de temps de l'ordre de l'heure, et enfin la couche locale agit en temps réel. Afin d'assurer le bon fonctionnement du système, un flux d'informations existe entre les différentes couches pour transmettre les données et informations. Globalement, le système planifie la consommation/production pour un horizon de 24 heures avec la couche anticipative. Ce plan est transmis ensuite à la couche réactive qui se charge de l'adapter en fonction des conditions réelles, i.e. les perturbations. Enfin la couche locale se charge de faire respecter la consigne aux équipements. Il s'agit d'un mécanisme de résolution hiérarchisé, où la solution globale obtenue est affinée à un niveau inférieur possédant un horizon plus faible, jusqu'à obtenir une solution réalisable et applicable par les équipements. Les travaux présentés dans cette thèse se concentre sur l'introduction de nouveaux modèles anticipatifs de services et la modification du solveur d'optimisation.

#### 2.1.2.1 La couche anticipative

La couche anticipative du système a pour rôle la planification de la consommation/production d'électricité pour la journée suivante. Pour se faire, le système a à sa disposition l'ensemble des informations sur l'environnement du bâtiment :

- les prévisions météorologiques, notamment le rayonnement solaire et la température
- la puissance disponible en provenance du réseau
- les prévisions des besoins des occupants. Les occupants programment leur besoin pour la journée suivante, ainsi que leur présence
- le prix de l'électricité sur le marché

La planification s'effectue pour une journée de 24 heures avec une période d'échantillonnage $\Delta$ valant une heure. La récupération de nouvelles données météorologiques plus récentes par le système provoque une nouvelle résolution du problème d'optimisation.

#### 2.1.2.2 La couche réactive

La couche réactive a pour rôle d'ajuster le plan de consommation reçue de la couche anticipative en fonction des conditions réelles d'utilisation. L'horizon de travail est nettement plus faible que celui de la couche anticipative. Ici, la taille de l'horizon est d'une heure avec une période d'échantillonnage $\Delta_r$ d'une minute. Les interventions de l'occupant sont autant de perturbations modifiant le plan de consommation et nécessitant l'intervention de la couche réactive. Ouvrir une porte en hiver fait chuter la température, ce qui modifie le plan. La

couche réactive doit alors augmenter le chauffage sur l'heure en respectant les contraintes énergétiques pour respecter au mieux le plan prévu par la couche anticipative, et ne pas faire chuter le confort de l'occupant. Elle peut alors couper, ou décaler temporellement certains équipements non prioritaires dans le cas où l'énergie disponible est faible ou totalement indisponible. Ce délestage est différent de celui pratiqué par la couche anticipative : il est de durée plus faible et dans les limites préconisées par la couche anticipative. Néanmoins, dans le cas où aucune perturbation n'intervient ou n'est intervenue, la couche réactive ne modifie pas le plan de consommation et transmet à l'identique les consignes de pilotage de la couche anticipative vers la couche locale.

#### 2.1.2.3 La couche locale

La couche locale est la couche liée au système de commande des équipements. Elle a pour but de faire appliquer les consignes reçues depuis la couche réactive. Cette couche peut aussi créer de nouvelles données à partir des différents capteurs présents, comme par exemple un indicateur de présence à partir des capteurs thermiques et d'ouverture de porte. Cela se rapproche de la notion d'estimation d'état existant en automatique. La couche locale possède aussi un rôle de sécurité en gérant les différents actionneurs afin d'éviter les situations interdites. Sa capacité d'action est proche du temps réel.

Les travaux effectués dans cette thèse se concentrent sur le mécanisme anticipatif.

## 2.2 Formulation linéaire centralisée du problème

Les travaux effectués par [67] et étendue dans [68] proposent une modélisation du problème de gestion d'énergie dans le bâtiment pour le mécanisme anticipatif sous la forme d'un programme linéaire mixte à optimiser. L'optimisation planifie la consommation d'énergie sur l'horizon de planification en trouvant le meilleur compromis possible entre le coût de l'énergie consommée et l'inconfort de l'occupant qui doivent être minimisés. La disponibilité de l'énergie est aussi une contrainte du problème. Le solveur d'optimisation utilise la programmation linéaire mixte, et l'ensemble des modèles anticipatifs des services sont linéaires.

Soit $H$ l'horizon de planification, qui est échantillonné en $n$ périodes de temps de durée $\Delta$. Les variables de décision du problème sont les quantités d'énergies attribuées sur une période dans le cas d'un service permanent, et la date de fin d'exécution pour les services temporaires. L'objectif est de calculer l'énergie consommée par chaque service pour chaque période de l'horizon de planification avec l'aide des variables de décisions et en fonction des paramètres

du problème. L'électricité est une ressource cumulative partagée, dont le coût et la disponibilité sont supposés constants pour chaque période. Chaque service présent est notée $S$.

### 2.2.1 Service fournisseur

Un service fournisseur est défini pour le problème, comme un service alimentant le bâtiment en électricité, avec une puissance et un coût fixé sur chaque période de planification. Ce type de service est caractérisé par deux paramètres, qui sont des données du problème :

- la puissance disponible lors de la période $k$ notée $P(S, k)$
- le prix de l'électricité produit par cette source lors de la période $k$ noté $C(S, k)$. Si le service est le réseau électrique, alors le prix est celui du marché de l'énergie, mais dans le cas d'un service associé à une éolienne par exemple, le prix de l'électricité peut être nul voir négatif en cas de revente.

Pour chaque période de l'horizon, l'énergie que l'on demande à un service de fournir notée $E(S, k)$ ne doit pas dépasser l'énergie totale disponible, et la contrainte (2.1) s'en assure.

$$\forall S \in \mathcal{S}^F \forall k \in [\![0; n-1]\!]; E(S, k) \leq P(S, k) \times \Delta \tag{2.1}$$

Néanmoins, plusieurs services fournisseurs peuvent être présents dans le même bâtiment. Lors de l'optimisation, le système de gestion doit vérifier que la consommation n'excède pas la production, il s'agit de l'équilibre énergétique décrit avec l'équation (2.2).

$$\forall k \in [\![0; n-1]\!]; \sum_{S \in \mathcal{S}^F} E(S, k) = \sum_{S \in \mathcal{S}^O} E(S, k) \tag{2.2}$$

$\mathcal{S}^F$ est l'ensemble des services fournisseurs d'énergies et $\mathcal{S}^O$ est l'ensemble des services à l'occupant, qui regroupe les services ***permanents***, ***temporaires*** et ***non supervisés***.

### 2.2.2 Service permanent et inconfort

**Modèle de comportement** Comme définit précédemment, les services ***permanents*** répondent à une consigne et consomment sur la totalité de l'horizon. Souvent, les services permanents sont des équipements appliquant une certaine température dans un espace clos, une pièce pour un radiateur, l'intérieur d'un réfrigérateur pour ce dernier. L'objectif ici, est de calculer les températures de

consigne pour chaque service ainsi que l'énergie consommée, et ce, en fonction du coût et des préférences de l'occupant. Un service ***permanent*** $S$ est défini par :

- $T_{in}(S,t)$ la température intérieure de la zone thermique associée
- $T_{out}(S,t)$ la température extérieure
- $T_{opt}(S,t)$ la température optimale souhaitée par l'occupant
- $P(S,t)$ la puissance consommée par le service
- $\phi(S,t)$ la puissance de la radiation solaire, des occupants et équipements dans la zone
- $G, G_s$ le gain du modèle du premier ordre de la puissance du chauffage et de la radiation solaire, respectivement.
- $\tau(S)$ la constante de temps du modèle du premier ordre

La variation dynamique de la température intérieure de la zone associée au service est exprimée avec le modèle présenté dans l'équation (2.3).

$$\begin{aligned}\frac{T_{in}(S,t)-T_{out}(S,t)}{dt} = & \frac{-1}{\tau(S)} \times (T_{in}(S,t)-T_{out}(S,t)) \\ & + \frac{G}{\tau(S)} \times P(S,t) + \frac{G_s}{\tau(S)} \times \phi(S,t) \end{aligned} \tag{2.3}$$

Le comportement thermique d'une HVAC peut être modélisé avec une représentation d'état. [66] propose un représentation d'état d'ordre 1 du modèle thermique dans un but de contrôle. Une approche par analogie électrique présentée par [69] fournit un modèle du second ordre. Cependant, le modèle du premier ordre a été préféré. Le modèle thermique utilisé et exposé dans l'équation (2.3) est un modèle continu, qui a besoin d'être discrétisé pour être inclus dans la formulation du problème. En utilisant les outils classiques existant en automatique, tels que les bloqueurs d'ordre 0, le modèle discret du service est calculé dans l'équation (2.4). Ce modèle est associé au type de service permanent dans l'existant, et est déjà programmé.

$$\begin{aligned}&\forall k \in [\![0; n-1]\!]; \\ &T_{in}(S,k+1) = e^{\frac{-\Delta}{\tau(S)}} \times T_{in}(S,k) \\ &\quad + (1-e^{\frac{-\Delta}{\tau(S)}}) \times T_{out}(S,k) \\ &\quad + (1-e^{\frac{-\Delta}{\tau(S)}}) \times G \times E(S,k) \\ &\quad + (1-e^{\frac{-\Delta}{\tau(S)}}) \times G_s \times \phi(S,t)\end{aligned} \tag{2.4}$$

Les variables de décision sont $E(S,k)$ et $T_{in}(S,k)$, tandis que $T_{out}(S,t)$, $T_{in}(S,0)$, $\tau(S)$, $\phi(S,k)$, $G$ et $G_s$ sont des données du problème.

**Modèle de confort** Le confort de l'occupant est une donnée difficile à quantifier précisément, puisque dépendant de beaucoup de facteurs, humains notamment. Pour remédier à cela, la notion d'inconfort de l'occupant est aussi introduite puisqu'en rapport direct avec le confort. Il s'agit de la perception d'un niveau de satisfaction atteint par rapport à un but fixé au préalable. Pour chaque service, une fonction d'inconfort est défini grâce à cette approche. Elle quantifie le ressenti de l'occupant vis à vis d'un service, ce qui se rapproche de la notion présentée par [70].

Pour chacun des services, la fonction d'inconfort dépend des préférences de l'occupant. L'inconfort d'un service est défini par une fonction sur l'intervalle $[0\%, 100\%]$, avec un inconfort très mauvais proche de 100% et excellent près des 0%.

Le confort thermique possède plusieurs définitions en fonction du type de bâtiment, mais aussi de la qualité de l'air, notamment l'humidité et la vitesse de déplacement. Un modèle pour le confort thermique est présenté dans [71]. Grâce à celui-ci, un indice $I(S,k)$ évalue l'inconfort de l'occupant pour chaque période de l'horizon de planification. La température optimale $T_{opt}(S,k)$, ainsi que les températures minimales et maximales acceptables notée $T_{min}(S)$ et $T_{max}(S)$ sont nécessaire pour le calcul de l'inconfort. Usuellement, un occupant souhaite que la température dans une pièce soit comprise entre 18°C et 22°C lorsqu'il est présent. Le système de gestion doit donc calculer la meilleure consigne de température pour que l'inconfort de l'occupant soit minimal tout en minimisant aussi le coût de l'énergie.

La modélisation de l'inconfort de l'occupant est donnée par la fonction (2.5) représenté avec la figure 2.2.

$$I_S = \begin{cases} \dfrac{T_{opt}(S,k) - T_{in}(S,k)}{T_{opt}(S,k) - T_{min}(S,k)} \times a_1 & \text{si} \quad T_{in}(S,k) \leq T_{opt}(S,k) \\ \dfrac{T_{in}(S,k) - T_{opt}(S,k)}{T_{max}(S,k) - T_{opt}(S,k)} \times a_2 & \text{si} \quad T_{in}(S,k) > T_{opt}(S,k) \end{cases} \tag{2.5}$$

avec la contrainte que $T_{min}(S,k) \leq T_{in}(S,k) \leq T_{max}(S,k)$ $a_1$ et $a_2$ sont des constantes du système décrivant la zone de confort de l'occupant. [72] propose une autre méthode d'évaluation de l'inconfort des occupants en utilisant le PMV (predicted mean vote).

### 2.2.3 Service temporaire

Les services ***temporaires*** représentent les équipements ayant plusieurs phases de fonctionnement. Leur modèle de comportement, et le processus utilisés pour les modéliser sont détaillés dans le chapitre suivant, conjointement avec l'extension développée dans ce travail de thèse.

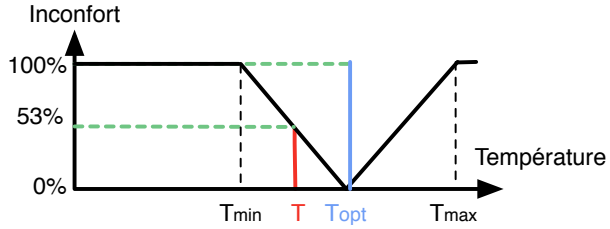


FIGURE 2.2 – Représentation d'une fonction d'inconfort d'un service permanent

**Modèle de confort** L'inconfort pour une service temporaire fonctionne de manière semblable à l'inconfort pour un service permanent, suivant des paramètres différents pour le calculer. L'efficacité d'un service temporaire tel que le lave vaisselle par exemple, est jugée par l'utilisateur avec la date de fin d'exécution. En effet, l'usager s'attend à ce que ce dernier termine à l'heure prévue. De ce fait, la qualité de l'exécution d'un service temporaire dépend de la durée du décalage effectué. Un critère d'inconfort est introduit pour chaque service temporaire. Il quantifie l'inconfort de l'utilisateur entre la date de fin attendue et la date de fin réelle obtenue après décalage. L'équation (2.6) présente la formule utilisée pour les calculs de l'inconfort pour le service $S$. $f_{opt}(S)$ est la date de fin optimale pour l'usager (i.e. celle attendue, le satisfaisant au maximum), tandis que $f_{min}(S)$ et $f_{max}(S)$ sont respectivement les dates de fin minimale et maximale acceptables.

$$I_S = \begin{cases} \dfrac{f(S) - f_{opt}(S)}{f_{max}(S) - f_{opt}(S)} & \text{si} \quad f(S) > f_{opt}(S) \\ \dfrac{f_{opt}(S) - f(S)}{f_{opt}(S) - f_{min}(S)} & \text{si} \quad f(S) \leq f_{opt}(S) \end{cases} \tag{2.6}$$

La fonction d'inconfort utilisée est représentée dans la figure 2.3. Lorsque la date de fin réelle du service coïncide avec la date optimale, l'inconfort est nul. Plus la date de fin réelle s'éloigne de la date optimale, plus l'inconfort croit jusqu'à atteindre l'inconfort maximal de 100%, à partir des dates minimale et maximale acceptables. Le choix de la fonction d'inconfort n'est pas unique, et peut suivre d'autre évolution, telle qu'être binaire, avec un inconfort soit nul, soit total.

### 2.2.4 Service non supervisé

Pour les services ***non supervisés***, le système sait qu'ils existent mais n'est pas capable de les contrôler ou de les piloter, à l'instar de l'éclairage. Néanmoins, leur consommation énergétique est prévue en ajoutant un matelas

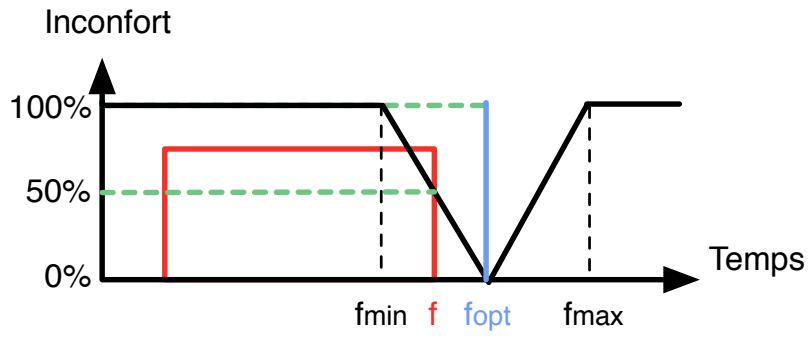


FIGURE 2.3 – Représentation d'une fonction d'inconfort d'un service temporaire

d'électricité uniquement pour leurs usages. Ce matelas consiste en un profil de consommation énergétique, ayant une valeur d'énergie attribuée par période de l'horizon d'optimisation. L'énergie consommée par un service non supervisé pour une période $k$, contrairement à un service supervisé, n'est pas une variable mais une donnée notée $U_k(S)$. Elles sont calculées à partir d'une prédiction de l'utilisation du service par l'occupant. Selon les informations disponibles sur l'utilisation du service, l'épaisseur du matelas varie et s'adapte en fonction de la prédiction.

$$\forall S \in \mathcal{S}^{NS}, \quad E(S,k) = U_k(S) \tag{2.7}$$

### 2.2.5 Fonction objectif

Le problème d'optimisation à résoudre est multi-objectif. Il faut minimiser l'inconfort de l'occupant qui est agrégé avec le coût énergétique. C'est un compromis à obtenir pour le système d'optimisation. Pour se faire, une fonction objectif est à minimiser, qui est présentée dans l'équation (2.8).

$$\begin{aligned} J &= \sum_{S\in\mathcal{S}} \sum_{k=0}^{n-1} C(S,k)E(S,k) + \\ &\quad \frac{\beta}{\sum_{S\in\mathcal{S}} \alpha(S)} \times \left( \sum_{S\in\mathcal{S}^P} \sum_{k=0}^{n-1} \alpha(S)I(S,k) + \sum_{S\in\mathcal{S}^T} \alpha(S)I(S) \right) && (2.8) \\ \mathcal{S} &= \mathcal{S}^P \cup \mathcal{S}^T \cup \mathcal{S}^{NS} && (2.9) \end{aligned}$$

L'ensemble des paramètres $\alpha(S)$ sont des données fixant la priorité des services les uns par rapport aux autres pour le confort. Les préférences des occupants sont alors respectées en favorisant les services qu'il désirent. Le paramètre $\beta$

règle l'importance du coût énergétique par rapport au confort. $\alpha(S)$ et $\beta$ sont fournis par l'occupant au système via une interface homme machine lui permettant de choisir l'orientation de l'optimisation, économique, confort ou mixte. L'ensemble des équations présentés ainsi que les moyens pour les linéariser sont les bases du problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment.

[67] posent les fondations de la modélisation sous forme de programme linéaire mixte. Néanmoins, l'ensemble des résultats présentés ne sont pas calculés de manière directe mais avec des heuristiques de résolution, tel que le recuit simulé, l'algorithme génétique, ou encore la recherche taboue ([73]).

### 2.2.6 Outils de transformation

La formulation du problème de gestion de l'énergie dans l'habitat contient à la fois des modèles de comportement à variables discrètes et continues, des équations différentielles et des modèles de qualité avec des non linéarités comme le modèle d'inconfort. Dans le but d'obtenir un programme linéaire mixte pouvant être résolu par divers solveurs connus et efficaces, des transformations ont l'obligation d'être opérées sur les équations précédentes. Les outils utilisés lors de la thèse sont présentées ici, avant d'être employés pour la linéarisation.

Fondamentalement, une proposition notée $\mathcal{X}$ est soit *vraie* soit *fausse*. Quelque soit la proposition $\mathcal{X}$, il est possible de lier une variable binaire $\delta \in \{0,1\}$ à cette proposition telle que : $\mathcal{X} = (\delta = 1)$. D'après [74], la transformation en problème linéaire standard peut être effectuée en utilisant des bornes inférieures et supérieures de $dom(ax - b; x \in dom(x)) \subset [m, M]$. Il est alors possible de relier des variables binaires à des équations linéaires (voir équation 2.10).

$$\delta = (ax - b \leq 0) \leftrightarrow \begin{cases} ax - b \leq M(1-\delta) \\ ax - b > m\delta \end{cases} \tag{2.10}$$

Par exemple, la proposition $a_1 x \leq b_1 \leftrightarrow a_2 x' \leq b_2$ peut être reformulée de façon linéaire avec la transformation précédente :

$$\begin{cases} a_1 x - b_1 \leq M(1-\delta) \\ a_1 x - b_1 > m\delta \\ a_2 x' - b_2 \leq M(1-\delta) \\ a_2 x' - b_2 > m\delta \end{cases}$$

avec $dom(a_1 x - b_1; x \in dom(x)) \cup dom(a_2 x' - b_2; x' \in dom(x')) \subset [m, M]$.

Dans plusieurs cas tels que des valeurs absolues, des variables semi continues apparaissent. Il s'agit du produit d'une variable binaire par une variable continue. Ces variables semi continues doivent être reformulées dans le but

d'obtenir des contraintes linéaires mixtes. L'ajout de variables auxiliaires est parfois nécessaire.

Soit une variable semi-continue $z = \delta \times x$ avec $\delta \in \{0, 1\}$ et $x \in [m, M]$. Cela signifie que $\delta = 0 \rightarrow z = 0$ et $\delta = 1 \rightarrow z = x$. $z$ peut être transformée en problème linéaire mixte représenté par :

$$z = \delta \times x \leftrightarrow \begin{cases} z & \leq M \times \delta \\ z & \geq m\delta \\ z & \leq x - m(1-\delta) \\ z & \geq x - M(1-\delta) \end{cases} \tag{2.11}$$

Ces transformations sont utilisés pour retirer les non linéarités présentes dans les modèles de l'inconfort et des services temporaires.

## 2.3 L'approche non centralisée : les systèmes multi-agents

La première partie du chapitre a présenté un système de gestion de l'énergie centralisé, avec un processus de résolution linéaire permis par la connaissance complète de l'environnement du bâtiment. Dans cette seconde partie, une approche différente est exposée, le système de gestion de l'énergie multi-agent. Ce système est appelé MAHAS dans [75]. L'objectif du système MAHAS est de calculer dynamiquement une politique de production et de consommation tout en prenant en compte les critères déjà évoqués précédemment que sont le confort de l'usager, et les contraintes de disponibilité et de fonctionnement des différents équipements.

#### 2.3.0.1 Principe de modélisation d'un système multi-agent

Un système multi-agent se propose de résoudre un problème en adoptant une architecture et une résolution distribuées. La résolution se base sur le principe de coopération entre les différents agents présents dans le système. Les agents agissent ensemble dans un environnement partagé, où toutes les entités présentes doivent pouvoir communiquer et interagir entre elles. Un agent communique avec les autres en envoyant un ensemble de solutions de son problème local. La résolution du problème global s'effectue étape par étape, durant lesquelles les agents s'échangent des informations et négocient entre eux pour obtenir une solution globale à partir des solutions locales aux agents. Chacun des agents agit comme un solveur, et possède une partie de la capacité de résolution du système. La solution globale est construite à partir des solutions locales qui sont modifiées à chaque étape de négociation. Pour mettre en place un tel système, les agents doivent posséder plusieurs caractéristiques :

- il est capable de communiquer avec ses semblables et de se faire comprendre.
- il contient un modèle de comportement.
- il est capable de résoudre son sous-problème local, en explorant l'espace des solutions pour diminuer son inconfort. Il cherche à satisfaire au mieux son objectif.

Le système MAHAS ([75]) est une application particulière d'un système multi-agent coopératif adapté au problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment. D'autres options existent, cependant, le niveau de similitude est important entre le système MAHAS et l'approche centralisée présentée, facilitant le rapprochement et la mise en œuvre.

Dans le système MAHAS , chaque équipement présent dans le bâtiment se voit associé un agent logiciel. L'agent pilote l'équipement, en fonction des contraintes énergétiques définies avec les autres agents. Pour se faire, le modèle de comportement de l'équipement doit être connu par l'agent ; cependant, la multitude d'équipements différents existants ainsi que l'évolution permanente de la technologie rend difficile cette contrainte. En suivant le même principe que pour l'approche centralisée, la notion de service a été mise en place. Un service est défini comme le résultat d'une transformation d'énergie par un ou plusieurs équipements en réponse à un besoin particulier de l'occupant. Les services sont partagés en deux catégories : les services temporaires et les services permanents, de la même manière que dans l'approche centralisée.

### 2.3.1 Modélisation des agents du système MAHAS

Les agents sont construits à partir de la notion de service et de la fonction de satisfaction, définissant ainsi les agents de type temporaires et de type permanents. Un agent peut piloter plusieurs équipements. Un agent ne connait que son propre modèle de comportement, c'est-à-dire la connaissance interne, la connaissance partagée entre les agents correspond à l'analyse des données reçues en provenance des autres agents. La connaissance interne de l'agent contient l'ensemble des données ne pouvant être formalisées de manière générale. Elle estime les besoins énergétiques et calcule les profils des consommation/production du service. La connaissance partagée regroupe les données communiquées entre agents qui sont formalisées dans une forme standard compréhensible par tous les agents. Les informations sur l'estimation et sur les prévisions de la consommation/production entrent dans cette catégorie. La connaissance partagée permet l'élaboration du plan global de consommation/production du bâtiment.

Contrairement à la connaissance interne, la connaissance partagée de l'agent temporaire contient l'ensemble des informations nécessaires qui seront trans-

mise aux autres agents. Cette connaissance est modélisée par une réalisation contenant :

- un profil de puissance $\Pi = (P_{S,k}, ..., P_{S,k+l})$ où $P_{S,m} \neq 0$ représente la puissance consommée/produite par le service $S$ sur l'intervalle s'étendant de la période $k$ à $k+l$. $l$ est la longueur de l'horizon sur lequel est traité le problème d'affectation d'énergie. La durée $\Delta_S$ est calculée à partir de la longueur du profil de consommation/production $length\Pi$ lorsque $P_{S,m} \neq 0$.
- une valeur de fonction d'inconfort notée $\sigma$ dépendant de la nature de l'agent. Cette valeur est rattachée au profil de consommation/production proposé par l'agent.

Une réalisation correspond donc à un profil de puissance noté $(k, \Pi, \sigma)$ sur un intervalle de temps $[k, k+l]$.

Les modèles d'inconfort des agents sont définis de la même manière que dans l'approche centralisée. Cependant, d'autres modélisation existent.

#### 2.3.1.1 Modélisation d'un agent de type temporaire

Un service de type temporaire est défini temporellement par la durée d'exécution et la date de fin désirée par l'occupant. Ce service est décalable temporellement, soit en retardant l'exécution, soit en démarrant plus tôt. La connaissance interne d'un agent de type temporaire peut être caractérisée par :

- une variable caractéristique du service dépendant de la date de fin d'exécution AETi. AETi est la date de fin réelle du service.
- une fonction de satisfaction dépendant de la différence entre la date de fin réelle AETi et la date de fin souhaitée par l'occupant notée RETi, mais aussi de la date de fin au plus tôt EETi et la date de fin au plus tard LETi.
- un modèle de comportement définissant la consommation/production d'énergie pour le service. Un automate à états finis définit les étapes de fonctionnement du service. Chaque étape $j$ du service $S$ est définie par sa durée notée $\Delta_S(j)$ et sa puissance notée $P_S(j)$. La durée totale du service temporaire est $\Delta_S = n_S \times \Delta$ pour le service $S$. $\Delta$ est la durée de la période d'échantillonnage de l'horizon de planification. Les durées $\Delta_S(j)$, les énergies consommées/produites $P_S(j)$ ainsi que les étapes de fonctionnement sont également connues (voir figure 2.4). Entre deux états de fonctionnement, le temps de transition est nul. Cependant, dans ce modèle, une interruption du service est possible, la consommation sera nulle pendant une certaine durée. Une étape est interruptible si elle peut ne pas consommer d'énergie pour une durée d'interruption minimale et que la durée maximale d'interruption ne soit pas dépassée. De plus, il n'est

pas possible que la somme des interruptions excède une valeur précise.

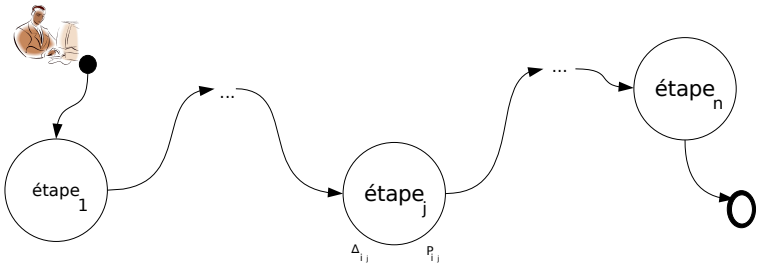


FIGURE 2.4 – Automate à états finis du comportement d'un agent de type temporaire

#### 2.3.1.2 Modélisation d'un agent de type permanent

Contrairement au service de type temporaire, l'agent de type permanent est caractérisé par une quantité d'énergie variant suivant la période. Comme décrit précédemment, cette quantité attribuée d'énergie consommée ou produite n'est pas fixe et peut être modifiée suivant la période.

Comme pour un service de type temporaire, un service de type permanent possède sa propre connaissance interne définie par :

- la variable caractérisant le service, la température dans le cas d'un service de chauffage par exemple.
- un modèle de comportement décrivant le fonctionnement du service en fonction de l'énergie attribuée pour l'activité, et/ou d'autres données. Le modèle de comportement n'est pas forcément linéaire et peut prendre la forme d'une équation différentielle.
- une fonction de satisfaction dépendant des variables décrivant le fonctionnement du service.

### 2.3.2 Fonctionnement du système de gestion énergétique avec les agents

Ce système MAHAS s'inspire de l'approche centralisée présentée précédemment en reprenant l'architecture de pilotage multi-couche générale (voir figure 2.1). Le système MAHAS propose un solveur d'optimisation différents ainsi que de nouveaux modèles anticipatifs et réactifs des services.

Le système de gestion de l'énergie MAHAS mis en place propose deux niveaux de contrôles distincts :

- le mécanisme anticipatif pourvu d'un horizon de planification important avec une période d'échantillonnage de l'ordre de l'heure

- le mécanisme réactif, d'horizon de planification plus faible (de l'ordre de l'heure) et avec une période d'échantillonnage courte

La couche locale possède la même fonction que dans l'architecture générale.

#### 2.3.2.1 Le mécanisme réactif

Le mécanisme réactif possède un rôle similaire à la couche réactive présente dans le système de gestion centralisée linéaire. Son objectif est la prise en compte des perturbations pour éviter une interruption totale des services (le disjoncteur qui coupe le courant dans le cas du bâtiment). Pour gérer ces imprévus, le mécanisme déleste les services pouvant être interrompus. La différence avec une délesteur classique provient de la capacité des agents à négocier entre eux pour définir quels seront les services délestés.

Le comportement du mécanisme réactif s'appuie sur un processus de stimulus-réponse. Dans le système MAHAS ([59]), l'état courant du système est déterminé grâce à la notion de satisfaction, ce qui lui permet ensuite de décider quel comportement suivre. Lorsque la satisfaction d'un agent chute en dessous du seuil limite autorisé, le mécanisme réactif entre en action ; l'agent concerné commençant alors à négocier avec les autres agents.

Comparativement avec le principe de Système Multi-Agents réactif, les agents du mécanisme réactif suivent un processus de stimuli-réponse ([76]), et ils possèdent des capacité de communication (envoi/réception de messages). Pour le mécanisme anticipatif, les obligations et rôles d'un agent sont telles que :

- il doit surveiller en permanence sa satisfaction ;
- il doit avertir les autres agents lorsque sa satisfaction chute en dessous du seuil limite ;
- il doit analyser les demandes reçues des autres agents, et faire des propositions en retour ;
- il doit choisir les propositions les plus intéressantes pour lui lorsqu'il reçoit des réponses à ses demandes.

Pour répondre à ces critères, l'agent se sert d'une boucle infinie durant laquelle il observe son niveau de satisfaction à chaque boucle. Si le seuil critique est atteint, il engage le processus de négociation avec les autres agents.

#### 2.3.2.2 Le mécanisme anticipatif

Le mécanisme anticipatif présent dans le système de gestion de l'énergie MAHAS a pour objectif la planification de la consommation/production des différents services présents dans le bâtiment, afin de prévoir les situations délicates et les gérer en amont autant que possible. Pour se faire, les prédictions de

consommation des services ainsi que les prédictions de disponibilité de l'énergie doivent être connues pour les sources d'énergie. La prédiction se base sur les données programmées par les occupants sur leur utilisation du service et aussi les conditions météorologiques. Le fonctionnement du mécanisme réactif s'appuie sur les degrés de flexibilité des services, en modifiant l'exécution des services pilotables suivant leur nature. Certains équipements électriques sont capables de stocker de l'énergie sous forme thermique tel qu'un chauffe eau. Ce sont des services de type permanent, donc le système peut leur faire stocker de l'énergie grâce à leur nature modulable pour alléger la consommation dans le futur. Dans le même ordre d'idée, les services de type temporaire sont décalables temporellement comme un lave linge (retarder ou avancer). Comme pour le cas centralisé linéaire, le mécanisme antcipatif est celui ayant le niveau d'abstraction le plus élevé dans l'architecture du système de gestion de l'énergie, avec un horizon de l'ordre de 24 heures pour une période d'échantillonnage d'une heure. Le mécanisme réactif existe pour combler ce niveau d'abstraction élevé, et avoir une vision plus proche de la réalité et de l'équipement. Il est totalement transparent pour le mécanisme anticipatif, puisque ne travaillant pas sur les même échelle de temps.

**Principe de résolution** En ne limitant pas les possibilités des agents, ces derniers généreraient la totalité des profils de puissances réalisables. Cependant, pour calculer un plan global pour l'ensemble du bâtiment, les combinaisons de profils énergétiques doivent être étudiées, cela se représente par un arbre de recherche. La taille de l'arbre de recherche est énorme notamment à cause du nombre de profils générés par chaque agent, et aussi la taille de l'horizon de planification. L'augmentation du nombre de services dans le problème fait exploser la taille de l'arbre de recherche.

Le mécanisme anticipatif découpe le problème global en sous-problèmes indépendants, puis résout chaque sous-problème afin d'obtenir une solution globale acceptable. La complexité des sous-problèmes est inférieure à celle du problème global puisque, d'une part, le sous-problème ne contient pas l'ensemble des services présents dans le bâtiment, et d'autre part, l'horizon de planification d'un sous-problème est inférieur ou égal à l'horizon de planification global ([77]). Le point important dans le mécanisme anticipatif est la nécessité pour les agents de coopérer entre eux afin de fournir une planification de la consommation/production d'énergie.

La résolution de ce type de problème nécessite beaucoup de ressources de calcul notamment à cause de la nature des systèmes domotiques et la gestion de l'énergie, mais surtout de bande passante pour les communications. Pour contourner ce problème, plusieurs méthodes sont disponibles : fournir des ressources de calcul à chaque agent, ou décentraliser la résolution. [78] propose une

solution regroupant ces deux méthodes avec une approche par des agents pour le problème de satisfaction de contraintes, dans lequel les agents se regroupent pour résoudre ce type de problème. Partant de ce postulat, un agent nommé "agent solving" est rajouté au système. Il est pourvu de ressources de calcul, et son rôle est d'aider à la fabrication du plan de consommation/production d'énergie, à partir des plans locaux calculés par les agents. L'ajout de cet agent permet d'éviter la surabondance de ressources de calcul nécessaire chez les agents, mais aussi de diminuer la quantité d'informations échangées entre les agents. L'intérêt de cette approche est la distribution de la résolution. Chaque agent calcule un ensemble de plans de consommation qui lui est propre à partir de sa connaissance interne et de la connaissance partagée par les autres agents. Et "l'agent solving" se charge de construire une solution globale satisfaisante à partir de tous les plans locaux reçus en provenance des agents avec une méthode de résolution exacte. Cependant, une telle méthode permet de trouver une "bonne" solution au problème et pas forcément la solution optimale.

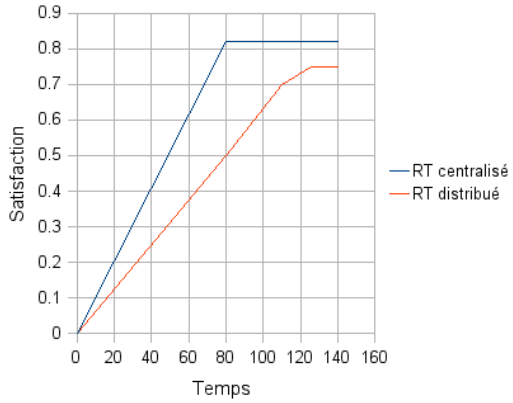


FIGURE 2.5 – Comparaison entre le mécanisme MAHAS et le mécanisme centralisé

## 2.4 Conclusion

Les deux approches présentées dans ce chapitre proposent une méthode différente pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment. En comparant les performances du système de gestion à l'approche centralisée présentée par [67] et l'approche de résolution via les agents présentée par[75], les limites et avantages de chacune des méthodes sont identifiés. Elles présentent une architecture de résolution similaires avec un niveau de résolution anticipatif ayant un niveau d'abstraction important pour prévoir la consommation/production sur une longue durée et éviter les situations de crises prévisibles ; auquel est associé un niveau de résolution réactif se chargeant de gérer les imprévus et les

perturbations à courtes échelles temporelles. Les deux approches respectent la même architecture générale, mais se différencient au niveau des modèles anticipatifs et réactifs des services ainsi que du solveur d'optimisation.

L'approche centralisée offre de meilleures performances lors de la résolution du problème et parvient à trouver la solution optimale dans chacun des cas où le problème est solvable, en conservant une satisfaction globale plus importante et avec une durée de résolution plus faible (voir figure 2.5). Cela s'explique par la présence d'échanges et d'analyses d'informations entre les agents augmentant la durée de résolution. De plus, l'approche centralisée recherche la solution optimale contrairement à l'approche avec agents, d'où l'écart entre les niveaux de satisfaction globale. Cependant, l'approche centralisée est limitée. Dans la réalité, le système n'est pas fixe, la configuration des différents équipements changent fréquemment, et les attentes de l'occupant aussi. Or pour que l'approche centralisée fonctionne correctement, il est nécessaire que l'environnement d'exécution soit parfaitement connu et défini. C'est contraire à un système ouvert où l'ajout et le retrait d'équipement s'effectue sans devoir reprendre la configuration à chaque fois, ni modifier l'algorithme d'optimisation, qui doit potentiellement pouvoir gérer tout type de contraintes. L'approche distribuée utilisant les agents offre des performances moindres, néanmoins il peut être plus simple d'introduire un agent dans le système. Pour certains équipements, le modèle de comportement nécessite une linéarisation délicate à effectuer pour être introduit dans le système de gestion centralisé. Un nouvel équipement peut être introduit dans le système MAHAS sans rien changer au niveau de l'algorithme de résolution ni de la configuration.

Augmenter les possibilités du système de gestion de l'énergie en intégrant des nouveaux modèles de comportement linéaires, et en associant la méthode de résolution centralisée avec la méthode de résolution distribuée avec les agents est l'objectif des travaux présentés.

# Chapitre 3

# Le cas du service temporaire : modélisation et extension

L'approche centralisée, présentée dans le chapitre précédent, identifie le type de services auquel appartient un équipement afin de modéliser son comportement. La flexibilité et la liberté de la modélisation dépendent du nombre de types de services disponibles. Augmenter la diversité nécessite l'introduction de nouveaux types de services supplémentaires. Dans cette optique est crée le type de service multiphase. La compréhension de ce dernier a comme pré requis la compréhension du service temporaire.

## 3.1 Le service temporaire

### 3.1.1 Présentation du service temporaire

La consommation d'un service temporaire peut être décalée temporellement comme une tâche dans les problèmes de planification. Des formulations en temps continu de ce type de problème existent dans la littérature ([79], [80] et [81]). Néanmoins, les résultats présentés concernent des problèmes avec des contraintes de ressources disjonctives. Au lieu de calculer la date de départ des différentes tâches, l'objectif est de déterminer la séquence d'exécution à partir de ressources partagées. Dans les problèmes de gestion de l'énergie, déterminer une telle séquence n'est pas le nœud du problème puisque plusieurs services peuvent s'exécuter en même temps. Les dates de départ et de fin peuvent être synchrones avec une période anticipative. Cela conduit à une formulation discrète du problème. Néanmoins, cette approche restreint l'espace des solutions et limite la précision des modèles en approximant la durée d'une tâche par un multiple de $\Delta$. La solution alternative retenue introduit la possibilité pour les services temporaires d'être décalés de manière continue. Soient $DUR(S)$, $f(S)$ et $P(S)$ respectivement la durée d'exécution du service $SRV(S)$, la date de fin

et la puissance nécessaire au fonctionnement du service $S$. D'après [82], la durée potentielle de consommation (durée effective si positive) $d(S,k)$ d'un service $S$ pendant une période anticipative $[k\Delta,(k+1)\Delta[$ est fournie par l'équation (3.1) (voir figure 3.1).

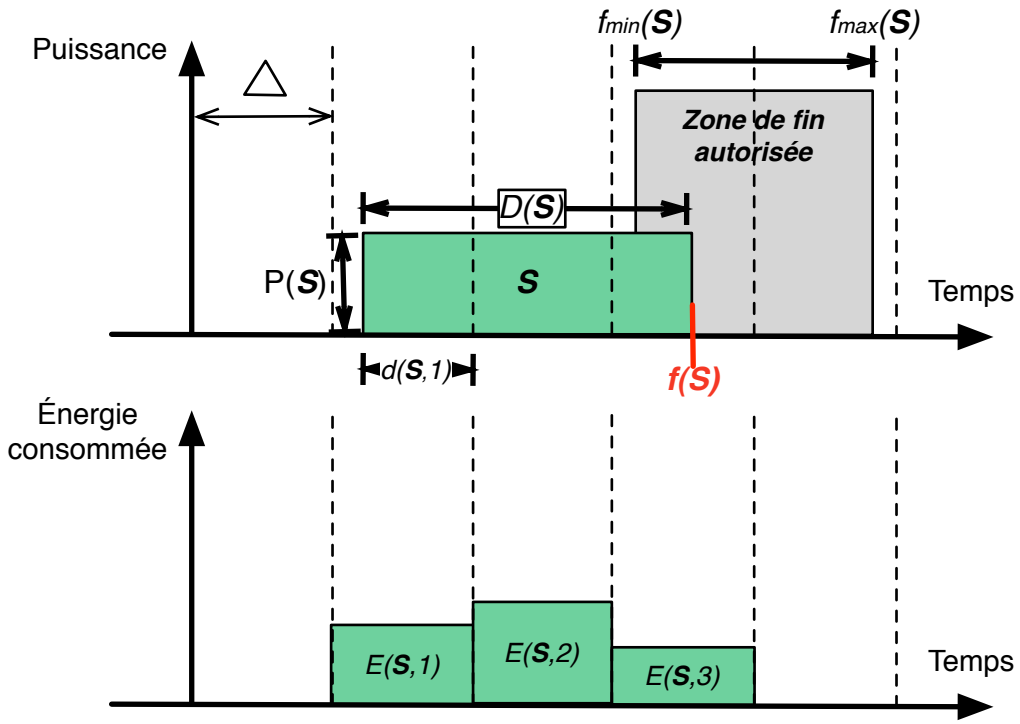


FIGURE 3.1 – Décalage d'un service temporaire

$$d(S,k) = \min(f(S),(k+1)\Delta) - \max(f(S) - D(S), k\Delta) \tag{3.1}$$

À partir de la durée, la consommation $E(S,k)$ du service $S$ pendant une période anticipative $[k\Delta,(k+1)\Delta]$ est obtenue grâce à l'équation (3.2).

$$E(S,k) = \begin{cases} d(S,k)P(S) & \text{si } d(S,k) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.2}$$

Dans ce modèle, $E(S,k)$ et $d(S,k)$ sont des variables de décision résultant de la variable de décision $f(i)$, qui représentent le décalage du service $S$.

### 3.1.2 Linéarisation de l'inconfort

L'équation d'inconfort présentée en (2.6) possède des non linéarités. Il est nécessaire de linéariser cette équation afin de l'inclure dans le problème linéaire mixte à résoudre. Pour se faire, une variable binaire $\delta_a$ respectant $\delta_a = 1 \leftrightarrow$

$f(i) \leq f_{opt}(S)$ est introduite. Ainsi, l'équation (2.6) est reformulée sous une forme linéaire mixte pour chaque service $S$ (équation 3.3).

$$\begin{aligned} I_S &= \delta_a \times \frac{(f(S)-f_{opt}(S))}{f_{opt}(S)-f_{min}(S)} \\ &+ (1-\delta_a) \times \frac{(f_{opt}-f(S))}{f_{max}(S)-f_{opt}(S)} \end{aligned} \tag{3.3}$$

Grâce à l'équation (2.10), la forme équivalente de la condition contenant $f(i) \leq f_{opt}(S)$ est fournie par l'équation (3.4).

$$\begin{cases} f(i) - f_{opt}(S) \leq (f_{max}(S) - f_{opt}(S))(1-\delta_a) \\ f(i) - f_{opt}(S) \geq (f_{min}(S) - f_{opt}(S))\delta_a \end{cases} \tag{3.4}$$

Le produit $\delta_a \times f(S)$ présent dans l'équation (3.3) n'étant pas linéaire, une formulation équivalente est obtenue grâce à l'ajout d'une variable semi-continue $z_a$. D'après l'équation (2.11), la transformation de la variable semi-continue $z_a = \delta_a \times f(S)$ est présentée dans l'équation (3.5).

$$\begin{cases} z_a &\leq (f_{max}(S) - f_{opt}(S))\delta_a \\ z_a &\geq (f_{min}(S) - f_{opt}(S))\delta_a \\ z_a &\leq f(S) - (f_{min}(S) - f_{opt}(S))(1-\delta_a) \\ z_a &\geq f(S) - (f_{max}(S) - f_{opt}(S))(1-\delta_a) \end{cases} \tag{3.5}$$

Les équations (3.3) jusqu'à (3.5) modélisent l'inconfort sous une forme linéaire mixte en accord avec le problème.

### 3.1.3 Linéarisation du service simple phase

Il est possible de modéliser $E(S,k)$ en utilisant une variable binaire $\delta_{t0}(S,k) = (d(S,k) \geq 0)$ et une variable semi continue $z_{t_0}(S,k) = \delta_{t0}(S,k)d(S,k)$ comme dans les équations (2.10) et (2.11). La modélisation est représentée par les équations (3.6) à (3.12). $n$ est le nombre de périodes de l'horizon, tandis que $\Delta$ est la durée de la période d'anticipation.

$$d(S,k) \leq \delta_{t0}(S,k)n\Delta \tag{3.6}$$
$$d(S,k) > (\delta_{t0}(S,k) - 1)\, n\Delta \tag{3.7}$$
$$E(S,k) = -z_{t_0}(S,k)P(S) \tag{3.8}$$
$$z_{t_0}(S,k) \leq \delta_{t0}(S,k)n\Delta \tag{3.9}$$
$$z_{t_0}(S,k) \geq -\delta_{t0}(S,k)n\Delta \tag{3.10}$$
$$z_{t_0}(S,k) \leq d(S,k) + (1 - \delta_{t0}(S,k))\, n\Delta \tag{3.11}$$
$$z_{t_0}(S,k) \geq d(S,k) - (1 - \delta_{t0}(S,k))\, n\Delta \tag{3.12}$$

Néanmoins, des non linéarités existent encore dans le modèle au travers des fonctions min et max présentes dans l'équation (3.1). Deux variables binaires $\delta_{t1}(S,k)$ et $\delta_{t2}(S,k)$ sont introduites pour corriger ce problème. Elles

sont définies comme suit :

$$\begin{aligned}\delta_{t1}(S,k) &= (f(S)-(k+1)\Delta \geq 0)\\ \delta_{t2}(S,k) &= (f(S)-D(S)-k\Delta \geq 0)\end{aligned}$$

En utilisant l'équation (2.10), les équations linéaires de comportement des variables binaires $\delta_{t1}(S,k)$ et $\delta_{t2}(S,k)$ sont :

$$f(S)-k\Delta \leq \delta_{t1}(S,k)n\Delta \tag{3.13}$$

$$f(S)-k\Delta \geq (\delta_{t1}(S,k)-1)\,n\Delta \tag{3.14}$$

$$f(S)-D(S)-k\Delta \leq \delta_{t2}(S,k)n\Delta \tag{3.15}$$

$$f(S)-D(S)-k\Delta \leq (\delta_{t2}(S,k)-1)\,n\Delta \tag{3.16}$$

Avec l'introduction de $\delta_{t1}(S,k)$ et $\delta_{t2}(S,k)$, les fonctions min et max présentent dans l'équation (3.1) sont linéarisées (voir équations (3.17) et (3.18)).

$$\begin{aligned}f_{min}(S,k) &= \delta_{t1}(S,k+1)(k+1)\Delta\\ &+ (1-\delta_{t1}(S,k+1))\,f(i)\end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}s_{max}(S,k) &= \delta_{t2}(S,k)(f(S)-D(S))\\ &+ (1-\delta_{t2}(S,k))\,k\Delta\end{aligned} \tag{3.18}$$

avec $\min(f(S),(k+1)\Delta) = f_{min}(S,k)$ et $\max(f(S)-D(S),k\Delta) = s_{max}(S,k)$. Cette linéarisation introduit dans les équations (3.17) et (3.18) des produits semi-continus (i.e. $\delta_{t1}(S,k) \times f(S)$ et $\delta_{t2}(S,k) \times f(S)$), qui sont linéarisés à leur tour avec l'outil présenté dans l'équation (2.11).

La durée $d(S,k)$ est alors évaluée avec l'équation (3.19).

$$d(S,k) = f_{min}(S,k) - s_{max}(S,k) \tag{3.19}$$

Les équations (3.6) à (3.19) modélisent le décalage temporel d'un service temporaire.

### 3.1.4 Nouvelle modélisation du service temporaire

Dans la modélisation du service temporaire présentée précédemment, la date de fin du service évolue continument, de même que les dates de fin minimale et maximale autorisées. La nouvelle approche propose de sous-échantillonner les périodes et de faire coïncider les différentes dates et durées avec des multiples de la sous-période choisie.

**Paramètres** Plusieurs nouveaux paramètres sont nécessaires pour l'introduction des équations de modélisation :

- $r$ nombre de sous-périodes contenues dans une période d'optimisation $\Delta$
- $\nabla$ durée de la sous-période
- $f(S)$ date de fin du service $S$ avec $f \in [F_{min}; F_{max}]$
- $F^{\nabla}_{min}(S)$ date de fin minimale autorisée pour le service $S$ dans l'échelle $\nabla$
- $F^{\nabla}_{max}(S)$ date de fin maximale autorisée pour le service $S$ dans l'échelle $\nabla$
- $D^{\nabla}(S)$ durée du service $S$ dans l'échelle $\nabla$
- $E^{\Delta}(S)$ énergie moyenne consommée par le service $S$ pendant la période $\Delta$ en Wh.
- $E^{\nabla}(S)$ énergie moyenne consommée par le service $S$ pendant la sous-période $\nabla$ en Wh.

Les équations (3.20) à (3.25) explicitent les valeurs des différents paramètres introduits. Les équations (3.21), (3.22) et (3.23) expriment la conversion des différentes dates et durée présentes dans l'échantillonnage usuel vers le sous échantillonnage, tout en arrondissant à l'entier le plus proche. L'énergie moyenne consommée par sous-période est obtenue avec l'équation (3.25) à partir de l'énergie moyenne consommée pour une période d'échantillonnage. Dans le cas de l'énergie moyenne consommée par période d'échantillonnage, l'équation (3.24) a cette forme afin d'obtenir un résultat en watt heure.

$$\nabla = \frac{\Delta}{r} \tag{3.20}$$

$$F^{\nabla}_{min}(S) = round\left(\frac{F_{min}(S)}{\nabla}\right) \tag{3.21}$$

$$F^{\nabla}_{max}(S) = round\left(\frac{F_{max}(S)}{\nabla}\right) \tag{3.22}$$

$$D^{\nabla}(S) = round\left(\frac{D(S)}{\nabla}\right) \tag{3.23}$$

$$E^{\Delta}(S) = \frac{\Delta \times P(S)}{3600} \tag{3.24}$$

$$E^{\nabla}(S) = \frac{\Delta \times P(S)}{3600 \times r} \tag{3.25}$$

**Formulation mathématique** Soit $\mathbb{K}(S) = [K_{min}(S), K_{max}(S)]$ avec

$$K_{min}(S) = floor\left(\frac{F_{min}(S) - D(S)}{\Delta}\right)$$

et

$$K_{max}(S) = floor\left(\frac{F_{max}(S)}{\Delta}\right)$$

L'intervalle $\mathbb{K}(S)$ représente l'ensemble des indices des périodes d'échantillonnage durant lesquelles le service $S$ a la possibilité de consommer de l'énergie. $K_{min}(S)$ est l'indice minimale obtenue à partir de la durée et de la date de fin minimale autorisée ; et $K_{max}(S)$ est l'indice maximale calculé grâce à la date de fin maximale autorisée. L'indice $k$ est utilisé par la suite pour désigner les périodes d'échantillonnage.

Soit $\mathbb{I}(S) = [r \times K_{min}(S), r \times K_{max}(S)]$. Suivant le même schéma, $\mathbb{I}(S)$ est l'ensemble des indices des sous-périodes d'échantillonnage durant lesquelles le service $S$ a la possibilité de consommer de l'énergie. L'indice $i$ est utilisé par la suite pour désigner les sous-périodes d'échantillonnage.

Soit $E_k^{\nabla}(S)$ la consommation du service $S$ pendant la période $k$, pour tout $k \in \mathbb{K}(S)$, et $E_i^{\nabla}(S)$ la consommation du service $S$ pendant la sous-période $i$, pour tout $i \in \mathbb{I}(S)$.

$$k \in \mathbb{K}(S), E_k^{\nabla}(S) = \sum_{i=r\times k}^{r\times k+r-1} E_i^{\nabla}(S) \tag{3.26}$$

L'équation (3.26) expose la valeur de l'énergie consommée sur une période $k$ en fonction de la consommation énergétique dans les sous-périodes qui la composent. Cette équation de modélisation est le lien entre entre les deux niveaux d'échantillonnage.

Soit $f^{\nabla}(S)$ la date de fin du service $S$ dans le sous-échantillonnage, avec

$$f^{\nabla}(S) \in [F_{min}^{\nabla}(S), F_{max}^{\nabla}(S)]$$

Il vient alors

$$f^{\nabla}(S) = \frac{f(S)}{\nabla}$$

Les sous-périodes de consommation du service $S$ doivent pouvoir être identifiées avec l'aide de contraintes. La condition présentée dans l'équation (3.27) joue ce rôle.

$$\delta_i = 1 \iff i \in [f^{\nabla}(S) - D^{\nabla}(S), f^{\nabla}(S) - 1] \tag{3.27}$$

L'équation (3.28) représente les implications sous-entendues par la condition précédente. L'équation (3.29) a pour objectif de vérifier que le nombre de sous-périodes détectées comme périodes de consommation du service $S$ conduit bien à une durée de consommation égale à la durée nominale $D(S)$.

$$\forall i \in \mathbb{I}(S), \delta_i \rightarrow \begin{cases} i \geq f^{\nabla}(S) - D^{\nabla}(S) \\ i \leq f^{\nabla}(S) - 1 \end{cases} \tag{3.28}$$

$$\sum_{i \in \mathbb{I}(S)} = D^{\nabla}(S) \tag{3.29}$$

L'équation (3.28) n'est pas linéaire, mais grâce au patron de linéarisation présenté dans le chapitre précédent, deux équations sont introduites pour la modéliser linéairement. Elles sont données par les équations (3.30) et (3.31).

$$\begin{aligned}
&\forall i \in \mathbb{I}(S), \\
&f^{\nabla}(S) - i \leq (1-\delta_i) \times (F^{\nabla}_{max}(S) - r \times K_{min}(S)) + D^{\nabla}(S) \times \delta_i \quad (3.30)\\
&f^{\nabla}(S) - i \geq (1-\delta_i) \times (F^{\nabla}_{min}(S) - r \times K_{max}(S)) + \delta_i \quad (3.31)
\end{aligned}$$

Cela conduit à l'équation (3.32) qui est la contrainte définissant l'énergie consommée par le service$S$ pendant la sous-période $i$.

$$\forall i \in \mathbb{I}(S), E^{\nabla}_i(S) = \delta_i \times E^{\nabla}(S) \quad (3.32)$$

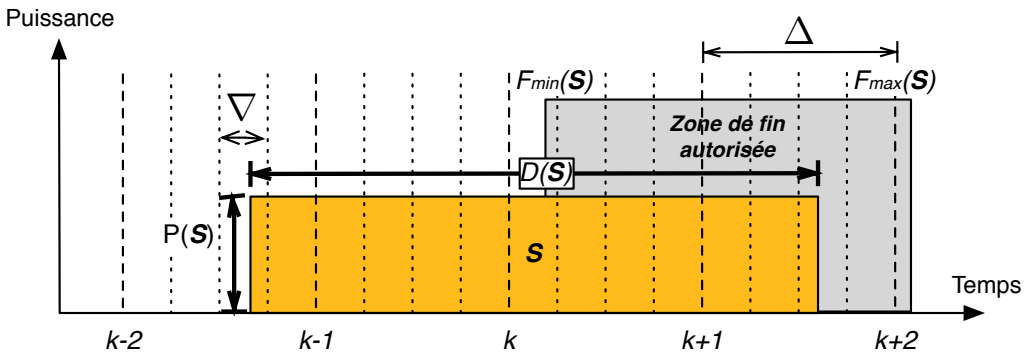


FIGURE 3.2 – Représentation du service temporaire

La figure 3.2 illustre un service temporaire, avec les différents paramètres qui lui sont liés permettant de le décrire. La nouvelle modélisation présentée modifie légèrement le service temporaire pour faciliter le calcul. Ce changement est visible sur la figure 3.3. Les changements à noter sont la durée qui est un multiple de la sous-période, de la même manière que les dates de fin minimales et maximales autorisées.

Enfin, la figure 3.4 présente l'énergie consommée par le service $S$ pour chaque période. Il s'agit du résultat de l'optimisation du service temporaire. Sur la figure 3.3, lors de la période $k-2$, le service consomme uniquement lors de la dernière sous-période. Lors de la conversion en énergie par période, cette dernière est répartie sur l'ensemble de la période concernée, ideme pour la période $k+1$.

### 3.1.5 Comparatif des deux modélisations

Afin de comprendre les différences entre les deux modélisations du service temporaire, plusieurs tests ont été effectués. Pour ce faire, dix instances de

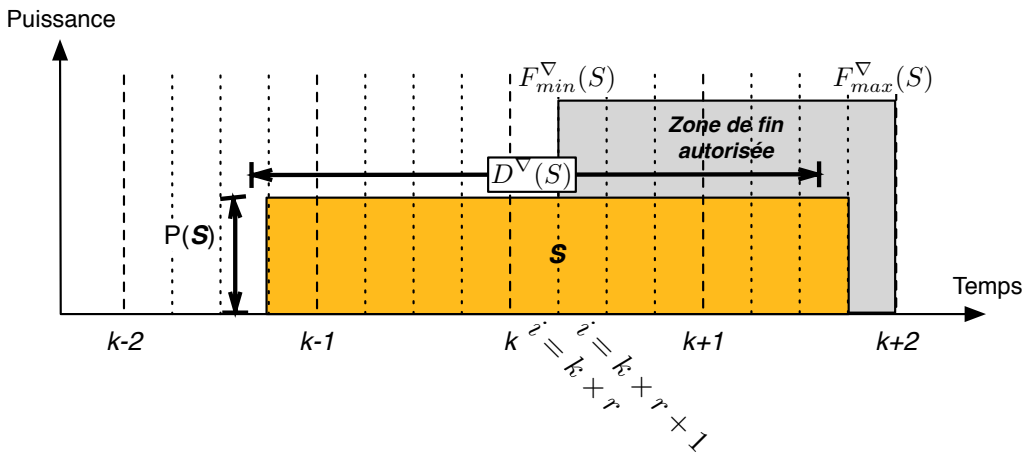


FIGURE 3.3 – Modification du service temporaire avec la nouvelle modélisation

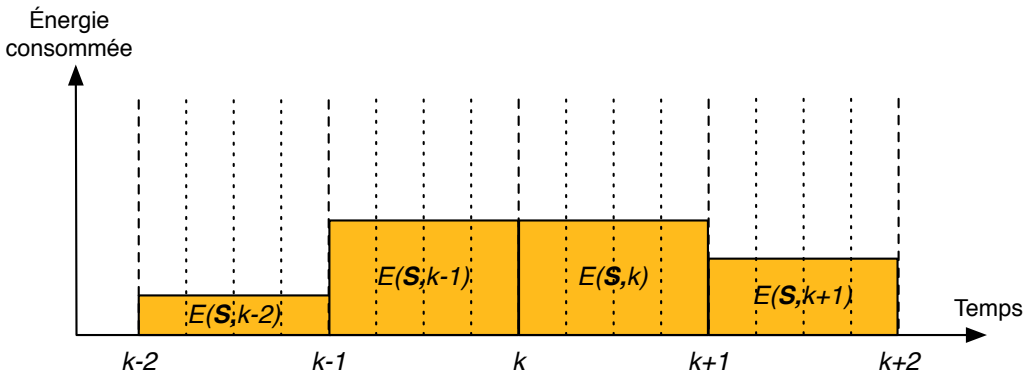


FIGURE 3.4 – Énergie consommée calculée avec la nouvelle modélisation

tests ont été crées, rassemblant les différentes situations possibles, que ce soit tous les services avec une date de fin similaire et peu de liberté (zone de fin autorisée faible), à l'inverse avec les dates de fin différente et une liberté importante. Les services temporaires sont identiques pour chacune des instances, i.e. leur durée de fonctionnement ainsi que la puissance consommée ne sont pas modifiées. L'objectif visé avec ces décisions est d'identifier les différences provenant de la modélisation. Chaque instance est résolue avec tous les services modélisés suivant la première méthode, et suivant la seconde, avec trois sous-échantillonnages différents. Six services temporaires sont présents dans chaque instance.

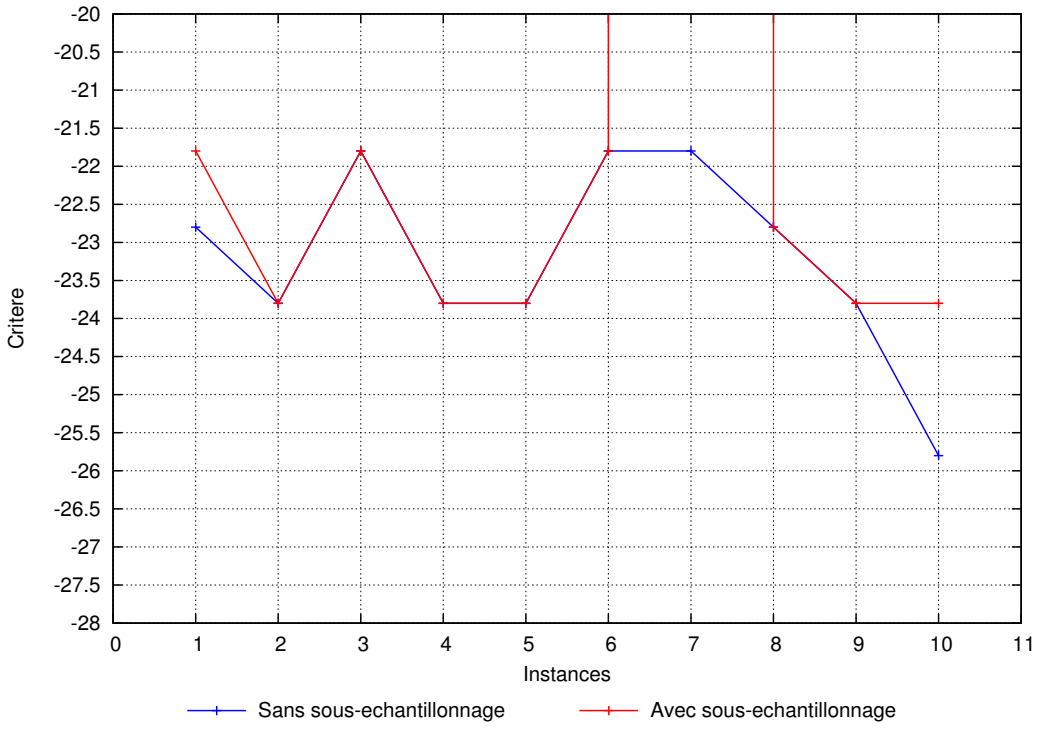


FIGURE 3.5 – Valeur du critère pour les différents tests

La figure 3.5 représente l'évolution du critère de résolution dans les cas avec et sans sous-échantillonnage. L'instance 7 n'a pas de solution dans le cas de la résolution avec sous-échantillonnage tandis que la résolution sans sous-échantillonnage obtient une solution. L'instance 7 propose la même date de fin optimale ainsi que la même fenêtre de temps autorisée. Cela est dû aux équations (3.21) à (3.23). Lors de ce changement d'échelle pour l'échantillonnage, des arrondis sont effectués transformant le problème original en problème voisin. Ce dernier n'est alors pas forcément solvable comme dans le cas de l'instance 7, ou dans les cas 1 et 10, la valeur du critère est plus importante, donc la solution est dégradée par rapport au problème original résolu sans

sous-échantillonnage. La différence s'explique par l'attribution plus ou moins importante d'énergie pour le service sous-échantillonné, dû à la réduction ou augmentation de la durée du service. Arrondir les dates de fin optimale et préférées peut aussi interdire des solutions et le rendre non solvable.

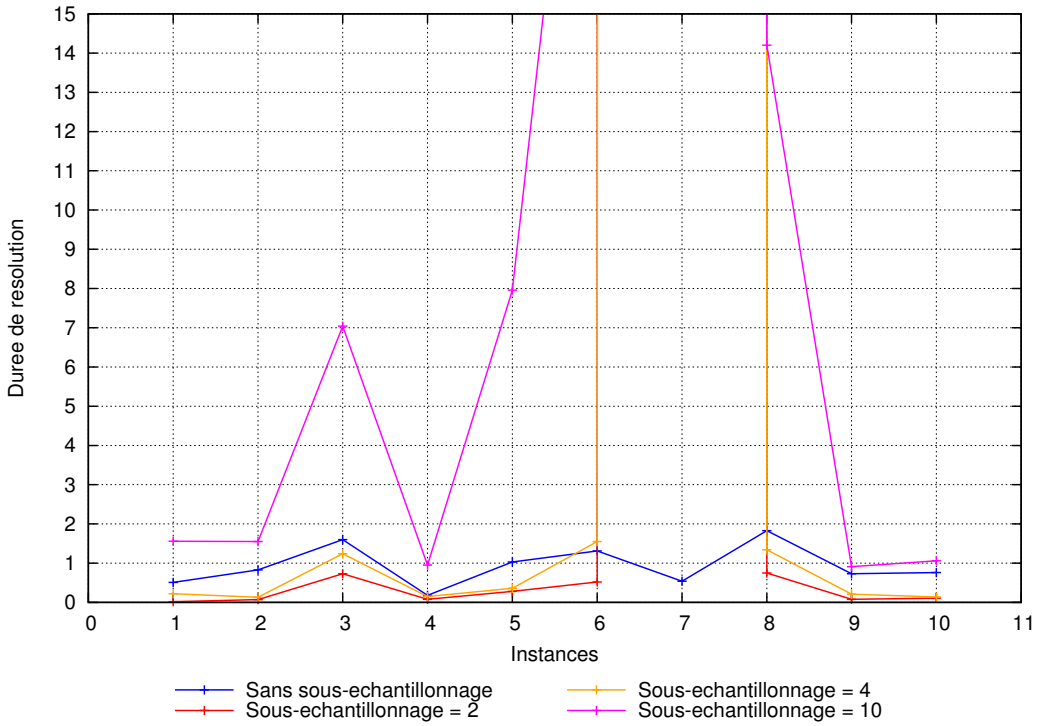


FIGURE 3.6 – Durée de résolution pour les différents tests

La figure 3.6 représente la durée de résolution des instances. Première constatation, lorsque le sous-échantillonnage augmente, la durée de résolution augmente aussi comme attendu. Avec un sous échantillonnage de 4 pour chaque service, la résolution est plus rapide que sans sous-échantillonnage. Choisir un sous échantillonnage élevé augmente la durée de résolution mais modifie peu la valeur du critère. Ce dernier est différent seulement pour des centièmes. Ceci s'explique par la quantité négligeable d'énergie qui est rajoutée ou enlevée en modifiant le sous-échantillonnage. Avec des valeurs énergétiques plus importantes, cette influence serait plus importante et décisive. Dans le cas étudié, avec des équipements réels ayant des puissances de l'ordre du kilowatt, l'influence du sous-échantillonnage sur le critère est négligeable.

En conclusion, dans les conditions proches de la réalité du bâtiment, modéliser des services temporaires grâce à la seconde méthode permet une résolution plus rapide, mais apporte une dégradation de la solution dans quelques cas. En effet, suivant les paramètres du service, la durée de consommation allouée au service peut être plus importante que la valeur réelle, entrainant lors de la mo-

délisation une consommation d'énergie plus importante. De plus, contraindre les dates de fin et de départ à coïncider avec une sous période limite le placement du service, interdisant des solutions pouvant s'avérer meilleures.

## 3.2 Le service multi-phase

Le service de type temporaire présenté précédemment est une introduction à la modélisation et l'ajout des équipements à fonctionnement limité temporellement, tel que le lave vaisselle, ou le sèche linge. La modélisation de consommation est peu précise, ne prenant pas en compte les éventuelles évolutions de la puissance de l'équipement lors de son fonctionnement. A titre d'exemple, la consommation électrique d'une machine à laver est différente lors de l'essorage comparativement au chauffage de l'eau. Afin d'affiner la modélisation de la consommation de ces équipements, le service temporaire multi-phase est introduit dans les modèles proposés. L'objectif, avec l'introduction de ce nouveau type de service, est de pouvoir modéliser les modulations de puissance de l'équipement. Le second objectif est la modélisation des zones pendant lesquelles l'équipement ne consomme pas d'électricité, bien qu'il soit en fonctionnement, comme par exemple, lors du passage de lavage à essorage pour une machine à laver. De plus, la prise en compte de ces zones, et leur différenciation permet d'introduire de nouvelles possibilités pour l'optimisation.

### 3.2.1 Présentation d'un service multi-phase

Avant de présenter le modèle de consommation du service multi-phase, il est nécessaire de définir les propriétés d'un tel service et d'expliciter les notations utilisées. L'introduction du type de service multi-phase a pour objectif de modéliser la consommation d'équipements ayant plusieurs phases de fonctionnement, avec des caractéristiques différentes. Un équipement modélisé avec un service multi-phase présente un certain nombre de caractéristiques :

- il possède plusieurs phases de consommation différentes, chacune caractérisée par une puissance et une durée propres
- il existe une durée minimum à respecter entre deux phases. Celle-ci peut être nulle.
- il existe une durée maximum à respecter entre deux phases. Celle-ci peut être nulle.

Ces caractéristiques précisent les possibilités offertes par le type de service multi-phase. La figure 3.7 illustre deux nouvelles possibilités offertes pour la modélisation. Dans le premier cas, l'équipement présente plusieurs phases de consommation différentes s'enchainant sans temps d'arrêt entre eux, avec des puissances et durées différentes. Le second cas est un équipement pour lequel

l'enchainement des phases de fonctionnement n'est pas instantané, mais un temps d'arrêt est marqué. Le type de service multi-phase permet de modéliser la consommation de ces équipements, contrairement au service temporaire simple.

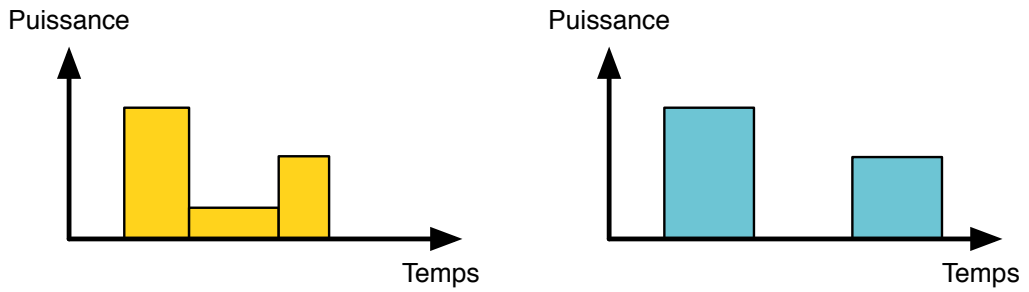


FIGURE 3.7 – Deux profils de consommations modélisables par le type multi-phase

Le projet dans lequel s'effectue ces travaux est un partenariat entre plusieurs laboratoires et entreprises. L'identification des équipements effectués par un partenaire permet de raccrocher à la réalité la nécessité de modéliser des équipements par un service multi-phase. Deux équipements illustrent ce point : la machine à laver et le lave vaisselle. Leur consommation est présentée avec les figures (3.8) et (3.9). La consommation réelle est représentée par la courbe bleue, qui est celle mesurée, d'où son allure. La courbe rouge est la consommation retenue pour décrire et modéliser l'équipement. Les deux équipements traités ici peuvent être modélisés via l'utilisation des services temporaires, cependant l'évolution de la consommation lors de leur cycle d'utilisation montrent des périodes d'activités différentes, notamment des valeurs de puissance consommée variant fortement. Dans le cas du lave vaisselle, trois modes de fonctionnement différents sont identifiés, correspondant d'une part au chauffage de l'eau pour le lavage, requérant beaucoup d'énergie, le lavage à proprement parlé consommant moins d'énergie associé au rinçage, et enfin le séchage, gourmand lui aussi en énergie. Dans le cas de la modélisation du lave vaisselle par un service temporaire, ce dernier consommerait la puissance maximale pendant toute la durée de fonctionnement ; tandis qu'avec la modélisation par un service de type multi-phase se matérialiserait par trois phases distinctes (puissance et durée différentes), sans aucun intervalle temporel entre leur exécution. La création du service multi-phase permet d'améliorer la précision de la modélisation de ces équipements.

**Notation** Les notations définies ci-dessous sont illustrées avec la figure 3.10 présentant un service multi-phase ayant deux phases.

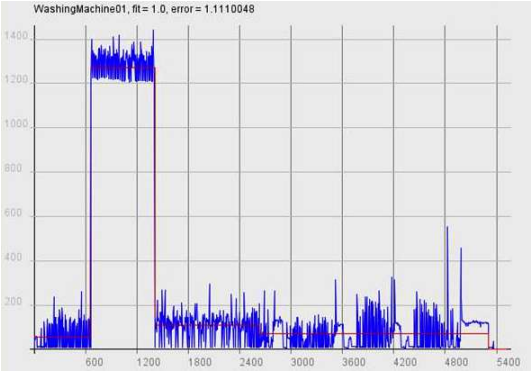


FIGURE 3.8 – Consommation électrique d'une machine à laver

FIGURE 3.9 – Consommation électrique d'un lave vaisselle

- $n$ la taille de l'horizon d'optimisation
- $\Delta$ est la durée d'une période anticipative
- $k \in [\![0; n-1]\!]$ indice de la période anticipative
- $\mathbb{J}$ nombre de phases du service $S$
- $d(S, j, k)$ est la durée potentielle de consommation (durée effective si supérieur à 0) de la phase $j$ du service $S$ dans la période $k$
- $f(S, j)$ est la date de fin de la phase $j$ du service $S$
- $f_{min}(S, j)$ est la date de fin au plus tôt de la phase $j$ du service $S$
- $f_{max}(S, j)$ est la date de fin au plus tard de la phase $j$ du service $S$
- $E(S, k)$ est l'énergie consommée durant la période $k$ par le service $S$
- $D(S, j)$ est la durée totale de la phase $j$ du service $S$
- $P(S, j)$ est puissance consommée par la phase $j$ du service $S$
- $L_{min}(S, j)$ est le temps minimal entre la phase $j$ et la phase $j+1$ du service $S$
- $L_{max}(S, j)$ est le temps maximal entre la phase $j$ et la phase $j+1$ du service $S$

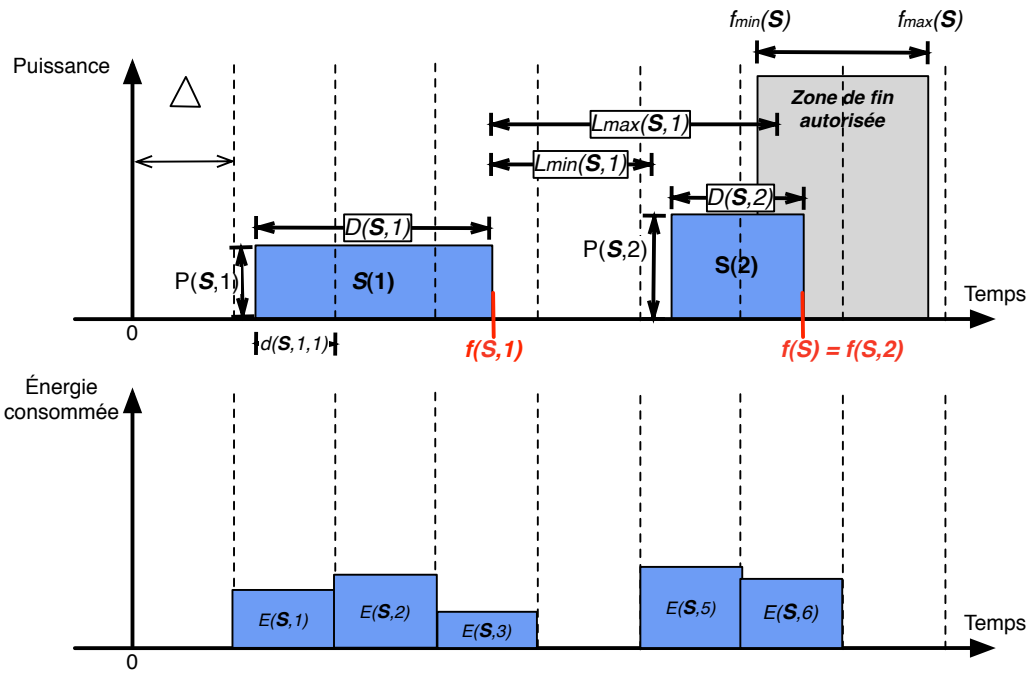


FIGURE 3.10 – Décalage d'un service temporaire

Similairement au service temporaire simple, la durée potentielle de consommation (durée effective si positive) $d(S, j, k)$ de la phase $j$ d'un service $S$ pendant une période anticipative $[k\Delta, (k+1)\Delta[$ est fournie par l'équation (3.33).

$$d(S, j, k) = \min(f(S, j), (k+1)\Delta) - \max(f(S, j) - D(S, j), k\Delta) \qquad (3.33)$$

Contrairement au cas du service temporaire simple, la fin du service ne permet pas de calculer la durée potentielle de consommation, mais la fin de la phase correspondante. La date de fin $f(S)$ du service $S$ étant une variable de décision, par soucis d'uniformité, les dates de fin de la phase $j$ sont choisies pour le calcul de la durée potentielle. Chacune des dates de fin $f(S, j)$ des phases découle de la date de fin du service.

L'énergie consommée par une phase $j$ du service $S$ pendant la période $k$ est présentée dans l'équation (3.34). Cette équation est similaire au cas du service simple phase. Cependant, elle symbolise la consommation d'une seule phase.

$$E(S, j, k) = \begin{cases} d(S, j, k)P(S, j) & \text{si } d(S, k) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.34}$$

La consommation globale d'un service multi-phase pour une période donnée $k$ est alors la somme de toutes les consommations énergétiques de chaque phase comme le présente l'équation (3.35).

$$E(S, k) = \sum_{j=1}^{\mathbb{J}} E(S, j, k) \tag{3.35}$$

### 3.2.2 Linéarisation du service multi-phase

En suivant le même procédé que dans le cas du service temporaire simple, il est nécessaire de linéariser les équations de modélisation de la consommation énergétique. L'énergie consommée pendant la période $k$ par la phase $j$ du service $S$ est linéarisée grâce à l'ajout d'une variable binaire $\delta_{t0}(S, j, k) = (d(S, j, k) \geq 0)$. Une variable semi continue

$$z_{t_0}(S, j, k) = \delta_{t0}(S, j, k)d(S, j, k)$$

est aussi introduite. Cette dernière variable est la durée effective de consommation de la phase $j$ du service $S$ pendant la période $k$. Contrairement à $d(S, j, k)$, cette dernière est obligatoirement positive ou nulle. L'ajout de ces deux variables, utilisées conjointement avec les équations de linéarisation (2.10) et (2.11) permet la linéarisation de $E(S, j, k)$. Les équations (3.36) à (3.42) représentent la modélisation.

$$
\begin{aligned}
d(S,j,k) &\leq \delta_{t0}(S,j,k)\Delta && (3.36)\\
d(S,j,k) &\geq [\delta_{t0}(S,j,k)-1]n\Delta && (3.37)\\
E(S,j,k) &= -z_{t_0}(S,j,k)P(S,j) && (3.38)\\
z_{t_0}(S,j,k) &\leq \delta_{t0}(S,j,k)\Delta && (3.39)\\
z_{t_0}(S,j,k) &\geq 0 && (3.40)\\
z_{t_0}(S,j,k)) &\leq d(S,j,k)+[1-\delta_{t0}(S,j,k)]n\Delta && (3.41)\\
z_{t_0}(S,j,k) &\geq d(S,j,k) && (3.42)
\end{aligned}
$$

L'expression de l'énergie totale consommée par période exprimée dans l'équation (3.35) est déjà linéaire donc elle n'a pas besoin d'être modifiée.

Cependant, la durée potentielle de consommation présente toujours des non linéarités avec les fonctions *min* et *max*. Avec l'aide des outils mis en place pour la linéarisation dans le cas du service temporaire, les non linéarités sont gérées similairement. Deux variables binaires sont définies (voir équations (3.43) et (3.44)).

$$
\begin{aligned}
\delta_{t1}(S,j,k) &= (f(S,j)-(k+1)\Delta \geq 0) && (3.43)\\
\delta_{t2}(S,j,k) &= (f(S,j)-D(S,j)-k\Delta \geq 0) && (3.44)
\end{aligned}
$$

L'équation (2.10) permet d'écrire les équations linéaires de comportement de $\delta_{t1}(S,j,k)$ et $\delta_{t2}(S,j,k)$ :

$$
\begin{aligned}
f(S,j) &\leq (k+1)\Delta+\delta_{t1}(S,j,k)[f_{max}(S,j)-(k+1)\Delta] && (3.45)\\
f(S,j) &\geq f_{min}(S,j)+\delta_{t1}(S,j,k)[(k+1)\Delta-f_{min}(S,j)] && (3.46)\\
f(S,j) &\leq [D(S,j)+k\Delta]+\delta_{t2}(S,j,k)[f_{max}(S,j)-[D(S,j)+k\Delta]] && (3.47)\\
f(S,j) &\geq f_{min}(S,j)+\delta_{t2}(S,j,k)[[D(S,j)+k\Delta]-f_{min}(S,j)] && (3.48)
\end{aligned}
$$

Dans le cas du multi-phase, les bornes utilisées pour la linéarisation sont plus restreintes que dans le cas du service temporaire simple. En effet, fournir des bornes trop larges peut créer des problèmes au solveur utilisé lors de la résolution. Il est nécessaire de définir les bornes au plus justes pour éviter les M contraintes lors de la résolution par le solveur. Lors de la résolution, si les bornes utilisées dans les équations sont importantes, il est possible que le solveur ne puisse pas résoudre le problème ; car, notamment avec CPLEX, il n'arrive pas à couper les suffisamment de branches de l'arbre des solutions lors de l'utilisation du Branch and Bound.

L'introduction des variables binaires $\delta_{t1}(S,j,k)$ et $\delta_{t2}(S,j,k)$ sert à linéariser les fonctions *min* et *max* présentent dans l'équation (3.33). Les équations (3.49) et (3.50) présentent la modélisation linéaire des deux fonctions.

$$\begin{aligned} f_{min}(S,j,k) &= \delta_{t1}(S,j,k)(k+1)\Delta \\ &+ (1-\delta_{t1}(S,j,k))\, f(S,j) \end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned} s_{max}(S,j,k) &= \delta_{t2}(S,j,k)(f(S,j)-D(S,j)) \\ &+ (1-\delta_{t2}(S,j,k))\, k\Delta \end{aligned} \tag{3.50}$$

avec $\min(f(S,j),(k+1)\Delta) = f_{min}(S,j,k)$ et $\max(f(S,j)-D(S,j),k\Delta) = s_{max}(S,j,k)$. Cette linéarisation introduit dans les équations (3.49) et (3.50) des produits semi-continus (i.e. $\delta_{t1}(S,k) \times f(S)$ et $\delta_{t2}(S,k) \times f(S)$). La linéarisation des ces produits est effectuée avec l'ajout de deux variables semi-continues $z_1(S,j,k)$ et $z_2(S,j,k)$, ainsi qu'avec l'utilisation de l'outil présenté dans l'équation (2.11). Les équations (3.51) à (3.58) constituent le modèle linéaire décrivant leur fonctionnement.

$$z_1(S,j,k) \leq \delta_1(S,j,k) f_{max}(S,j) \tag{3.51}$$

$$z_1(S,j,k) \geq \delta_1(S,j,k) f_{min}(S,j) \tag{3.52}$$

$$z_1(S,j,k) \leq f(S,j) \tag{3.53}$$

$$z_1(S,j,k) \geq f(S,j) - [1-\delta_1(S,j,k)] f_{max}(S,j) \tag{3.54}$$

$$z_2(S,j,k) \leq \delta_2(S,j,k) f_{max}(S,j) \tag{3.55}$$

$$z_2(S,j,k) \geq \delta_2(S,j,k) f_{min}(S,j) \tag{3.56}$$

$$z_2(S,j,k) \leq f(S,j) \tag{3.57}$$

$$z_2(S,j,k) \geq f(S,j) - [1-\delta_2(S,j,k)] f_{max}(S,j) \tag{3.58}$$

La durée $d(S,j,k)$ est alors obtenue avec l'équation (3.59).

$$d(S,j,k) = f_{min}(S,j,k) - s_{max}(S,j,k) \tag{3.59}$$

Une contrainte existe pour s'assurer que la durée de chaque phase est bien atteinte (voir équation (3.60)).

$$D(S,j) = \sum_{p=1}^{n} z_3(S,j,p) \tag{3.60}$$

Les équations (3.36) à (3.60) sont nécessaires pour modéliser le comportement et le décalage d'une phase d'un service multi-phase. Il faut rajouter l'ensemble de ces équations autant de fois que de phases.

Après avoir définies les équations de modélisation d'une phase, des équations globales pour le service multi-phase sont crées pour modéliser les liens entre les phases. Des contraintes de précédence sont mises en place, elles limitent l'écart entre les phases suivant les paramètres de l'équipement.

$\forall j \in [\![0;\mathbb{J}-1]\!]$,

$$L_{min}(S,j) \leq f(S,j+1) - f(S,j) - D(S,j+1) \leq L_{max}(S,j) \tag{3.61}$$

L'équation (3.61) contraint la durée entre les phases $j$ et $j+1$ à ne pas dépasser le temps maximal et aussi à excéder le temps minimal. Pour conserver l'homogénéité des équations, les variables de décision utilisées sont les dates de fin des phases au lieu des dates de départ. Cette équation n'est pas valable pour la dernière phase du service. En effet, la date de fin de la dernière phase du service étant la date de fin du service, celle-ci intervient dans les équations linéaires de l'inconfort, qui sont identiques au cas du service temporaire simple. Afin de s'assurer que toutes les phases se déroulent pendant l'horizon d'optimisation, et éviter les débordements temporels, l'équation (3.62) est ajoutée. Elle force la date de fin de la première phase à être supérieure à la durée de celle-ci.

$$f(S,1) \geq D(S,1) \tag{3.62}$$

Pour terminer la modélisation du service multi-phase, il faut rajouter l'équation de calcul de l'énergie totale consommée par période précédemment citée (voir équation (3.35)).

L'ensemble des équations présentées dans cette section, utilisées conjointement avec les équations de l'inconfort modélisent le décalage temporel d'un service temporaire multi-phase.

**Calcul de $f_{min}(S,j)$ et $f_{max}(S,j)$** Contrairement au service temporaire simple, les bornes utilisées dans les équations de modélisation sont plus restreintes. En effet, utiliser des bornes larges lorsqu'un majorant est nécessaire peut poser des difficultés de résolution informatique du problème. Dans le cas présent, le solveur utilisé par le système de gestion est le logiciel CPLEX d'ILOG. La méthode utilisée est un branch and bound, et lors de l'étape de coupe des branches inutiles, si les bornes sont trop larges, le solveur est dans l'incapacité de choisir et de couper. Il n'arrive alors pas à résoudre le problème. En affinant les bornes, ce point bloquant est levé.

Le calcul de $F_{min}(i,j)$ s'effectue comme suit. Deux expressions sont possibles pour :

$$\forall j \in [\![0;\mathbb{J}-1]\!],$$

$$f_{min_1}(S,j) = f_{min}(S,\mathbb{J}) - \sum_{p=j}^{\mathbb{J}-1}[D(S,p+1) + L_{max}(S,p)] \tag{3.63}$$

$$f_{min_2}(S,j) = \sum_{p=1}^{j} D(S,p) + \sum_{p=1}^{j-1} L_{min}(S,p) \tag{3.64}$$

L'équation (3.63) présente le calcul progressant à partir de la contrainte de fin du service par rapport à ce qu'il reste à exécuter après la phase $j$. Il

s'agit de la date de fin minimale à laquelle sont soustraites les durées entre phase maximales et la durée des phases. Dans l'équation (3.64), le calcul est effectué en comptant à partir de l'origine de l'horizon de planification, ce qui a été exécuté avant la phase $j$ dans le cas idéal, c'est-à-dire avec les durées entre les phases minimales. À partir de ces deux expressions, $f_{min}(S, j)$ est obtenue avec l'expression présentée dans l'équation (3.65).

$$\begin{aligned} &\forall j \in [\![0; \mathbb{J} - 1]\!], \\ &\quad f_{min}(S, j) = max[f_{min_1}(S, j), f_{min_2}(S, j)] \end{aligned} \tag{3.65}$$

Effectuer un maximum des deux expressions permet d'être plus précis sur la borne inférieure. L'expression pour calculer $f_{max}$ est :

$$\begin{aligned} &\forall j \in [\![0; \mathbb{J} - 1]\!], \\ &\quad f_{max}(S, j) = f_{max}(S, \mathbb{J}) - \sum_{p=j+1}^{\mathbb{J}} [D(S, p+1) + L_{min}(S, p)] \end{aligned} \tag{3.66}$$

$F_{max}(S, j)$ est calculée suivant le même principe que $F_{min_1}(S, j)$, la durée totale restant à être exécutée ($\sum_{p=j+1}^{\mathbb{J}} D(S, p)$) ainsi que les différents temps associés aux contraintes de précédence ($\sum_{p=j}^{\mathbb{J}-1} L_{min}(S, p)$) sont soustraits à la date de fin au plus tard.

Grâce à ce calcul de $f_{min}(S, j)$ et de $f_{max}(S, j)$, il est possible d'estimer la satisfaction du service. En effet, si $f_{min}(S, j) \geq f_{max}(S, j)$ pour une valeur de $j$, alors le service ne sera pas satisfait. $f_{min_2}(S, j)$ peut être plus grand que $f_{min_1}(S, j)$ et $f_{max}(S, j)$ donc la phase $j$ n'aura pas le temps de s'exécuter, illustrant alors que les paramètres du service et la demande de l'usager ne sont pas compatibles.

## 3.3 Tests et résultats du service temporaire multi-phase

Afin d'examiner l'efficacité et les limites du service temporaire multi-phase, et les comparer au service temporaire simple, une procédure de tests est définie, puis les résultats sont présentés.

### 3.3.1 Présentation de la procédure de test

Pour mesurer l'efficacité et les limites des services multi-phases implémentés dans le système de gestion de l'énergie, un algorithme de création d'instances de test est créé. Lors de l'exécution de l'algorithme, différents paramètres sont disponibles permettant de vérifier l'influence de chacun. L'algorithme de création

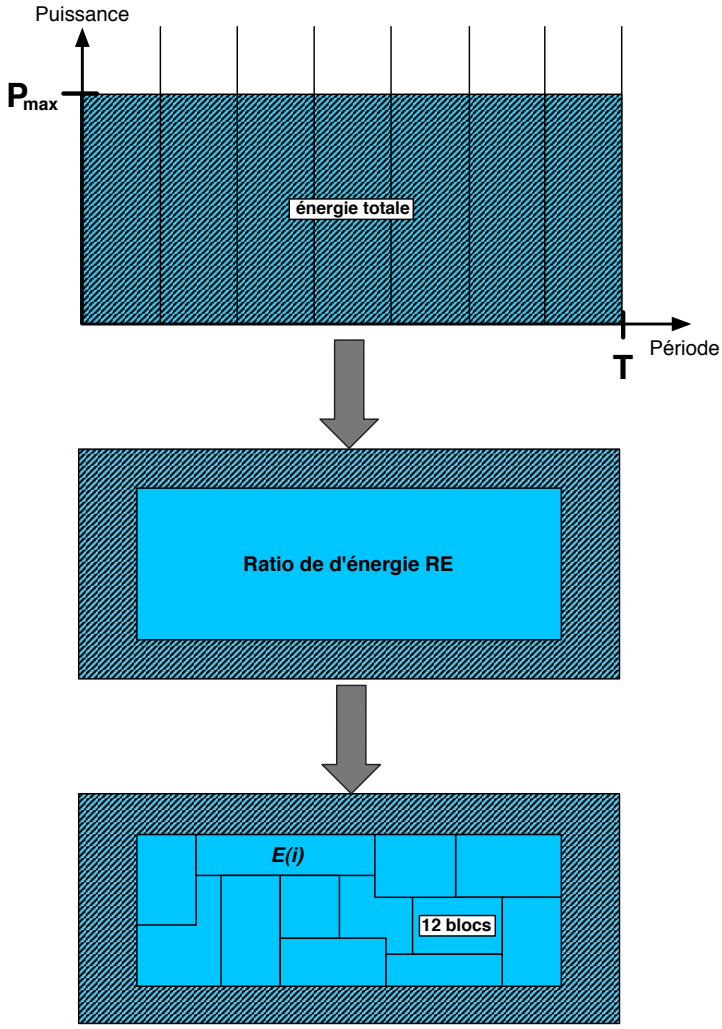


FIGURE 3.11 – Répartition de l'énergie

d'instances fabrique les différents services qui doivent être exécutés. Comme il s'agit de tester les services multi-phases, les instances ne contiennent que des services temporaires simples et multi-phases.

Le commencement de l'algorithme consiste à calculer l'énergie totale disponible lors de l'horizon de planification (voir équation 3.67). Une portion de l'énergie totale est conservée pour être attribuée aux services. Le paramètre régissant la proportion d'énergie est un pourcentage nommé le ratio d'énergie $RE$. La portion d'énergie $RE * E_{totale}$ est la quantité d'énergie que consomment les services qui seront crées pour l'instance. Ensuite, $RE * E_{totale}$ est répartie de façon aléatoire en douze blocs énergétiques. Chacun des blocs possède une énergie $E(i)$, ce qui signifie que le service créé à partir de ce bloc consomme $E(i)$. C'est à partir des douze blocs que sont construits les différents services composants l'instance. Comme l'indique la figure 3.12, en moyenne dans une

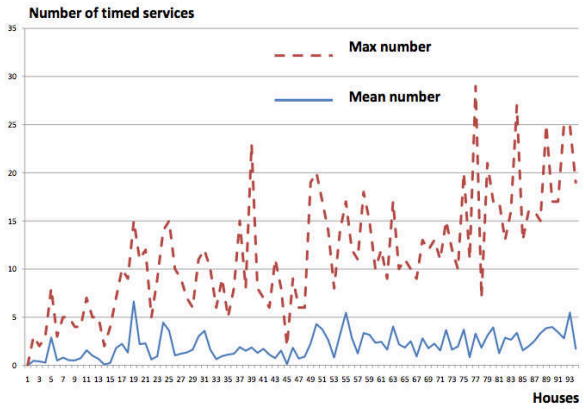


FIGURE 3.12 – Nombre de services temporaires observés dans 100 maisons

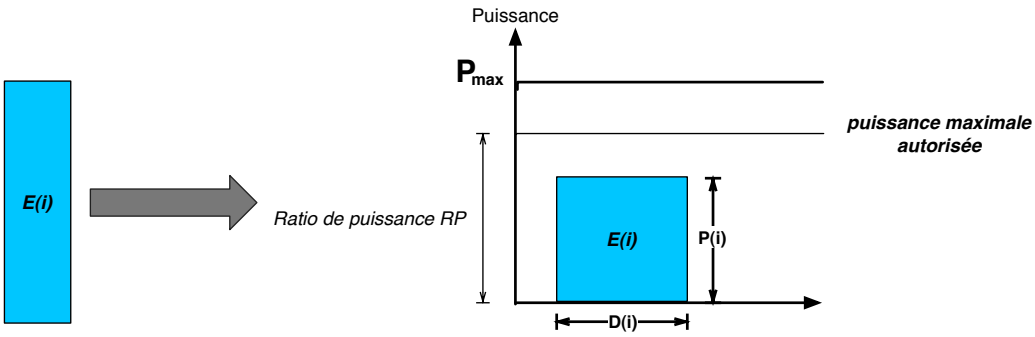


FIGURE 3.13 – Calcul de la puissance et de la durée d'un bloc

habitation, il existe cinq services temporaires. Si le nombre de blocs choisi est de douze, c'est dans l'optique de respecter l'observation du domaine d'application et s'offrir plus de liberté. Modifier $RE$ permet d'identifier l'influence du pourcentage d'énergie utilisée par rapport à l'énergie disponible. La figure 3.11 résume la répartition de l'énergie en blocs.

Une fois les douze blocs d'énergie créés, il faut définir leurs caractéristiques en tant que service temporaire. Premièrement, chacun des blocs se voit attribuer une puissance calculée aléatoirement, mais inférieure à $RP * P_{max}$. $P_{max}$ est la puissance maximale disponible, et $RP$ est le ratio de puissance autorisé, limitant la puissance consommée par chaque bloc à un pourcentage de la puissance maximale (figure 3.13). Le facteur $RP$ permet de fixer la puissance maximum, ce qui se traduit par une durée plus longue lorsque ce dernier est faible. La durée est calculée ensuite à partir de la puissance obtenue (equation 3.68).

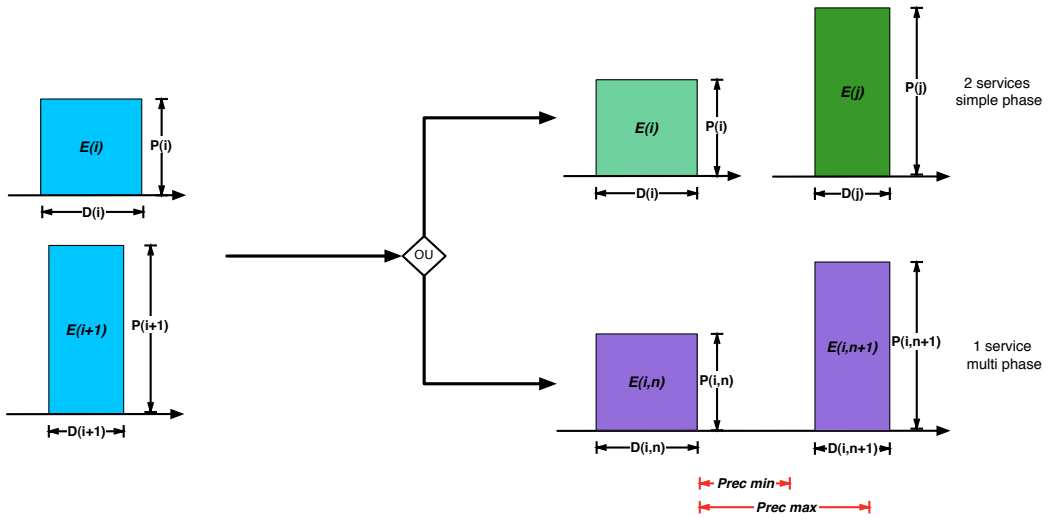


FIGURE 3.14 – Répartition des blocs en services

$$E_{totale} = \sum_{k=0}^{n} E_k(i) \tag{3.67}$$

$$D(i) = \frac{E(i)}{P(i)} \tag{3.68}$$

Une fois la puissance et la durée de chaque bloc calculées, ces derniers sont répartis en services. La figure 3.14 illustre ce processus. Le nombre de services simple phase, le nombre de services multi-phases ainsi que le nombre de phases pour ces derniers sont des paramètres modifiables. Modifier la répartition des services permet d'évaluer les différences de fonctionnement entre services temporaires, et aussi identifier les meilleures configurations de services. Lorsque des blocs sont rassemblés pour devenir un service multi-phase, les contraintes de précédence sont tirées aléatoirement dans un intervalle défini par les paramètres *prec min* et *prec max*.

Enfin, pour terminer, chacun des services créés à partir des blocs se voit attribuer une zone de fin autorisée. Celle-ci est une portion de l'espace disponible restant. L'espace disponible restant propre au service est obtenu en faisant démarrer celui-ci à 0 et en considérant l'intervalle entre chaque phase comme minimal pour les services multi-phases. La zone de fin de chaque service est une portion de l'espace disponible restant pour ce service. Le ratio de temps $RT$ détermine le pourcentage conservé. La date de début de la zone est obtenue aléatoirement, dans le but que le service puisse s'exécuter correctement. L'intervalle dans lequel est tiré aléatoirement la date de début de la zone de fin autorisée est présenté dans l'équation (3.69).

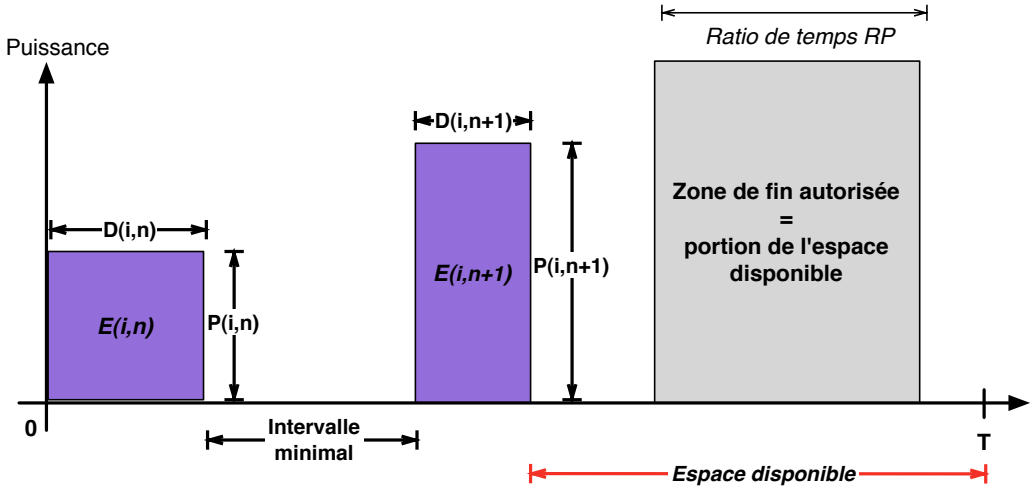


FIGURE 3.15 – Calcul de la fenêtre de fin

$$debut \in \left[\sum ((D(i,S) + prec(i,S))\,; n - RT * espace_disponible_restant\right] \tag{3.69}$$

À la fin de l'algorithme, une instance de test est obtenue respectant les paramètres $RE, RP, RT, prec\ min, prec\ max$, le nombre de services simple phase, multi-phase et le nombre de phases. Chacun des différents paramètres est modifié indépendamment des autres afin d'étudier son influence. La présence de tirage aléatoire dans l'algorithme de création d'instance est la conséquence d'une volonté de diversifier les instances construites à partir du même jeu de paramètres.

### 3.3.2 Présentation des résultats

Afin d'observer l'influence des paramètres, cent instances sont générées pour chaque jeu de paramètres. Les valeurs initiales des paramètres sont :

- quatre services temporaires simple et quatre services multi-phases à 2 phases sont présents
- l'horizon est de 12 heures (T = 12)
- la puissance maximale autorisée d'une phase correspond à 90% de la puissance maximale du fournisseur (RP = 0,9)
- la proportion d'énergie attribuée aux différents services est de 50% (RE = 0,5)
- la zone de fin autorisée pour les services est la totalité de l'horizon (RT = 1)
- le prix est fixe sur l'horizon

Le nombre d'itérations est l'information permettant la comparaison entre différents jeux de paramètres. La résolution des problèmes s'effectue avec le solveur CPLEX d'ILOG, et le temps de calcul est limité à 15 minutes.

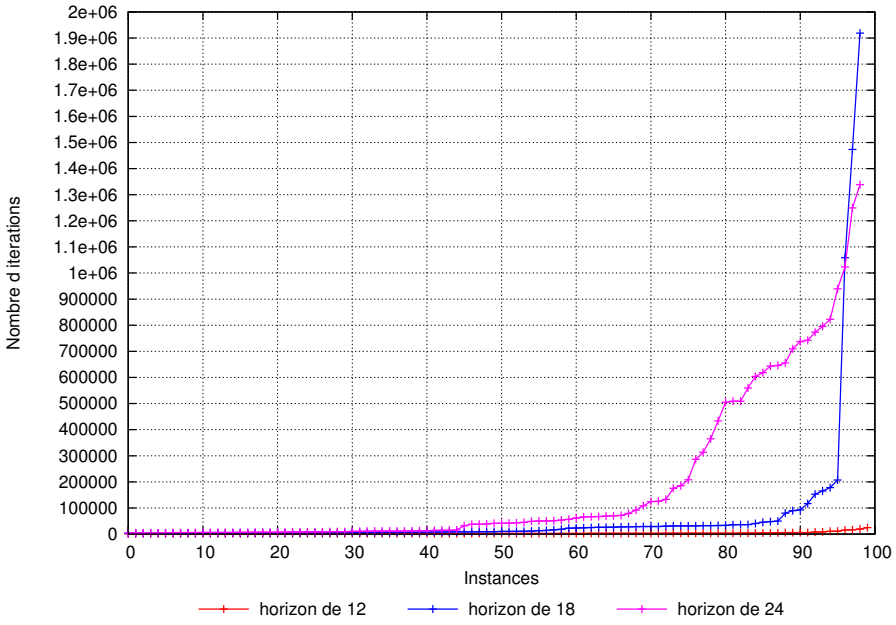


FIGURE 3.16 – Évolution du nombre d'itérations en fonction de la taille de l'horizon

Les figures 3.16 et 3.17 illustrent les résultats obtenus en modifiant la taille de l'horizon. Le nombre d'itérations augmente en fonction de l'accroissement de l'horizon. Ceci est dû à l'augmentation du nombre de contraintes et de variables. En effet, la taille du problème double lorsque la taille de l'horizon double (voir figure 3.17). Malgré une hausse importante du nombre d'itérations pour résoudre une instance avec un horizon de 24 heures, 98% d'entre elles sont tout de même résolues dans le quart d'heure autorisé.

L'impact des services multi-phases sur la résolution est présenté avec la figure 3.18. L'introduction de contraintes entre les blocs simplifie la résolution. L'agencement différent des blocs entre services temporaires simples et services multi-phases (i.e. l'introduction de nouvelles contraintes entre les blocs) n'augmente pas la complexité ni la taille du problème (voir figure 3.19).

Le ratio de puissance sur la résolution (voir figure3.20) n'a pas une influence déterminante sur la résolution, les nombres d'itérations suivant la répartition des services restent voisins.

Contrairement au ratio de puissance, la modification du ratio de d'énergie influence la complexité du problème et le nombre de d'itérations (voir figure3.21). En effet, plus l'utilisation de la ressource augmente, plus la résolution est difficile. Similairement, le ratio de temps modifie la difficulté de la

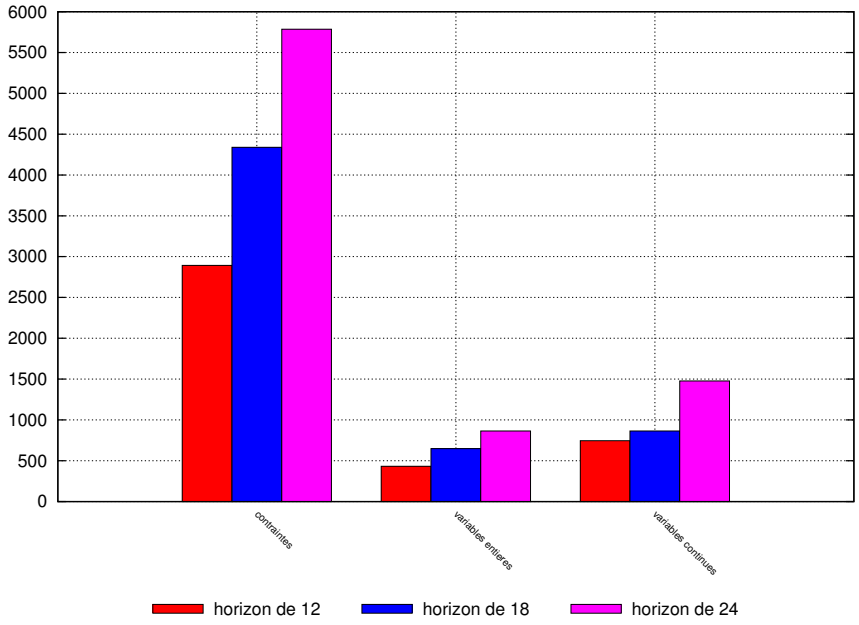


FIGURE 3.17 – Évolution du nombre de contraintes et variables en fonction de la taille de l'horizon

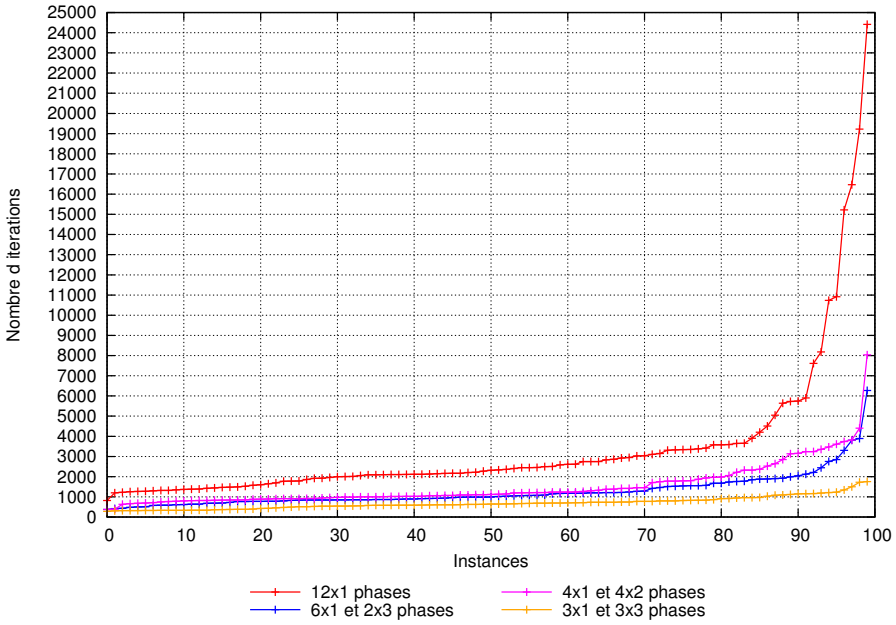


FIGURE 3.18 – Évolution du nombre d'itérations en fonction des services présents

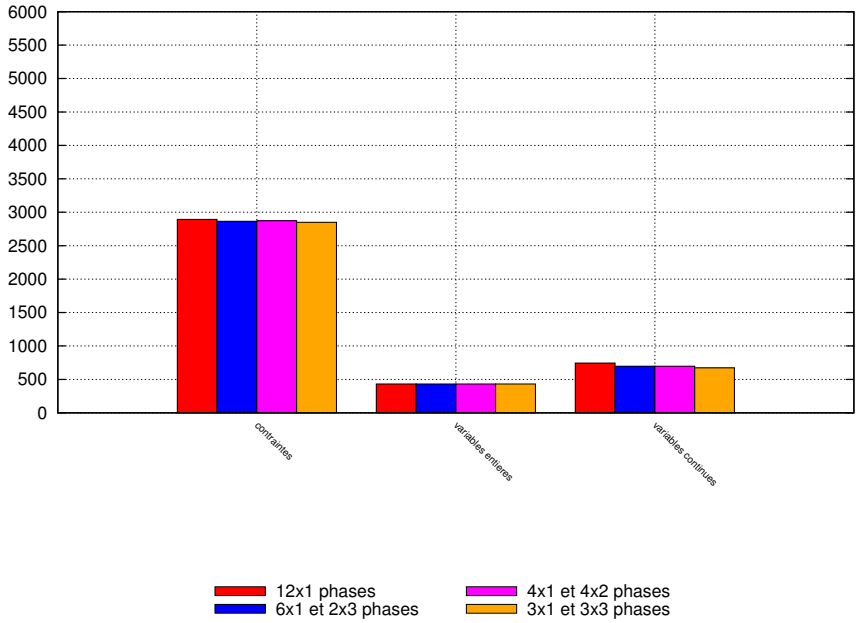


FIGURE 3.19 – Évolution du nombre de contraintes et variables en fonction des services présents

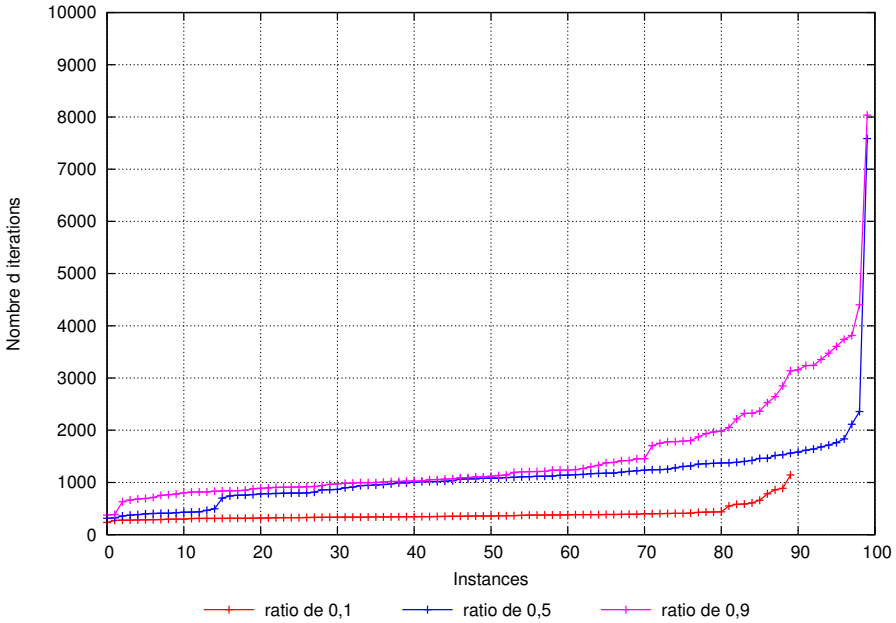


FIGURE 3.20 – Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio de puissance

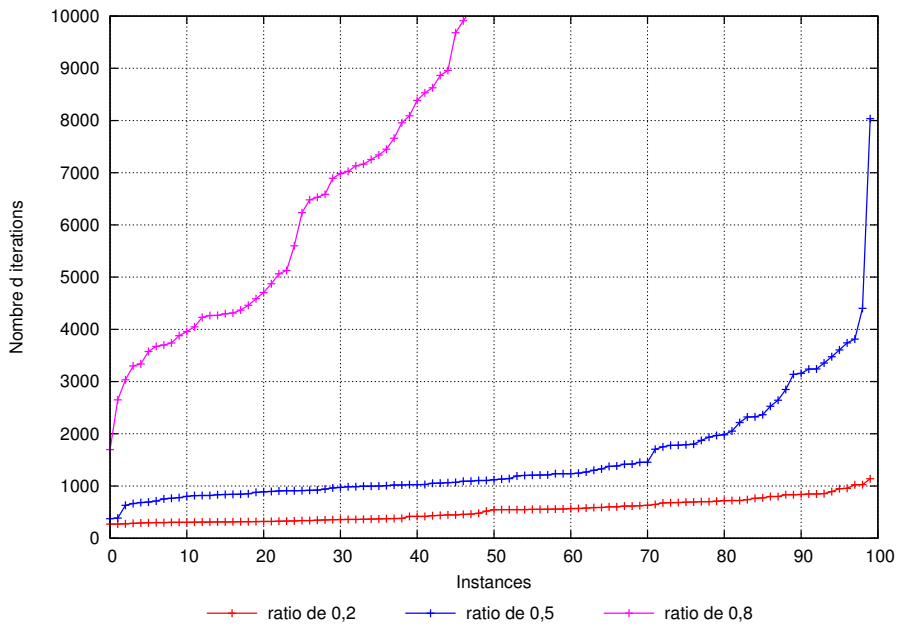


FIGURE 3.21 – Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio d'énergie

résolution. La réduction de la taille de la fenêtre de temps diminue la combinatoire et la complexité du problème (voir figure3.22).

Enfin, un prix variable a été introduit au lieu de fixer le prix sur l'horizon. La variabilité du prix augmente considérablement le nombre d'itérations (voir figure3.23). Cependant, tous les problèmes ont été résolus, bien que la complexité soit plus importante.

## 3.4 Conclusion

Les 98% des cas étudiés avec 12 blocs et un horizon de 24 heures sont résolus dans la limite de 15 minutes autorisées. L'objectif est d'optimiser la consommation d'un bâtiment dans son ensemble en pilotant un maximum des charges présentes pour la journée suivante. Il faut pour cela que la durée de calcul nécessaire à l'optimisation soit en accord avec la réalité, c'est à dire qu'elle soit plus courte que l'horizon de planification. Avec une limite de 15 minutes pour la résolution du problème, cette condition de viabilité de la solution est respectée dans 98% des cas. De plus, le nombre d'équipements pilotables considérés dans les tests est en accord avec la réalité, puisqu'en moyenne ce dernier s'élève à cinq, ce qui est inférieur aux conditions de tests. L'introduction du type de service multi-phase dans la bibliothèque de modèles disponibles ne modifie pas la difficulté de la résolution. Les paramètres réellement influent sur la durée de la résolution sont l'horizon d'optimisation et surtout l'énergie disponible par rapport à l'énergie nécessaire. Cependant, la durée de résolution du problème

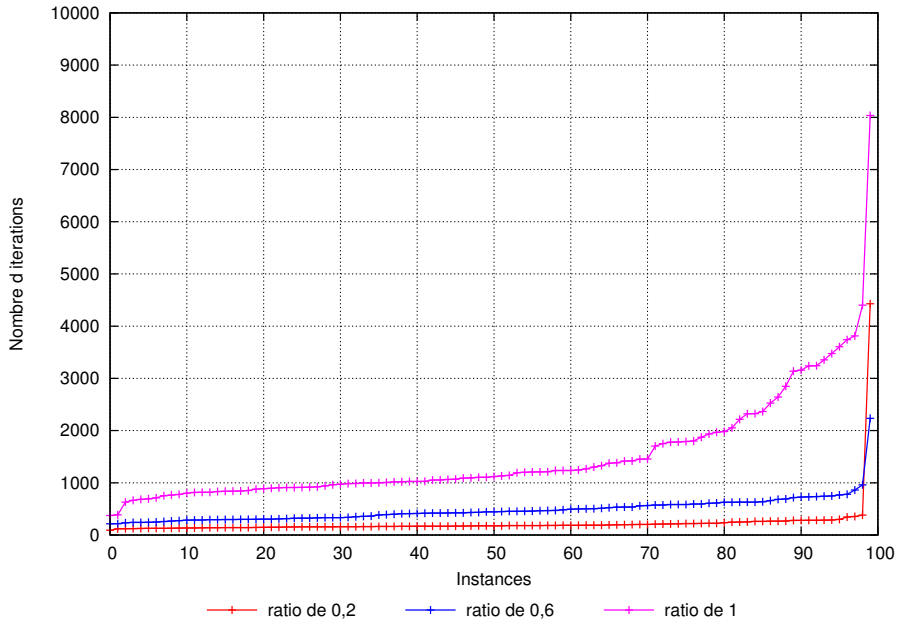


FIGURE 3.22 – Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio de temps

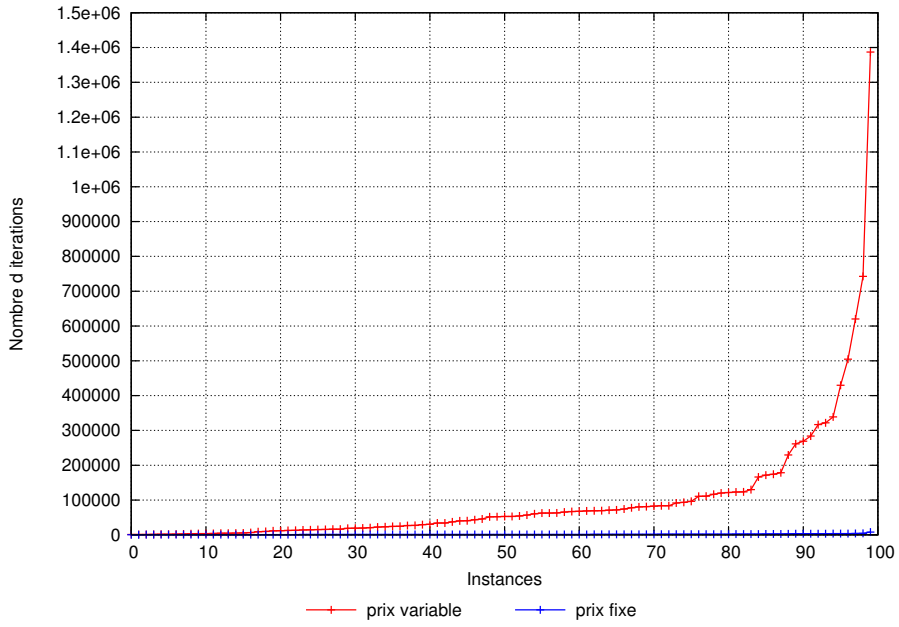


FIGURE 3.23 – Évolution du nombre d'itérations en fonction du prix

augmente avec la taille de l'horizon, mais une solution est trouvée dans 98% des cas. La modification du ratio d'énergie influence fortement la durée de la résolution ; puisque dans les cas où l'énergie nécessaire est très proche de l'énergie disponible (ratio d'énergie élevé), la durée de résolution augmente fortement, dépassant la limite autorisée. Néanmoins, dans le cas d'un bâtiment du secteur résidentiel et tertiaire, les cas de restriction forte d'énergie sont peu courants. D'un point de vue applicatif, l'ajout du type de service multi-phase améliore la précision de la modélisation, tout en respectant les besoins inhérents à la planification. Il s'agit du premier pas dans l'augmentation des possibilités de prise en compte des équipements par le système de gestion et d'optimisation.

La nouvelle méthode de modélisation des services temporaires introduite dans ce chapitre améliore les possibilités du système de gestion de l'énergie, notamment en ce qui concerne la résolution. La nouvelle modélisation permet une résolution plus rapide lorsque le sous-échantillonnage est faible. Dans une situation adaptée, modéliser les services temporaires avec la nouvelle méthode peut significativement réduire le temps de résolution tout en ne dégradant pas excessivement la solution. Un exemple illustrant ce phénomène serait un bâtiment comprenant un nombre important de services temporaires. Le principe de la nouvelle méthode s'accorde avec ce type de situation. L'introduction de la nouvelle méthode d'optimisation ouvre d'autres aspects et perspectives pour le système de gestion de l'énergie.

# Chapitre 4

# Une approche mixte pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment

Les chapitres précédents se concentraient sur la présentation des différentes approches existantes (centralisée et système multi-agents) pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Les intérêts de chacune des approches ont été démontrés. L'objectif des travaux est d'assembler les deux approches, pour proposer un système de gestion de l'énergie ayant une résolution mixte. Ce chapitre se concentre sur la construction de ce système.

## 4.1 Problème de la prise en compte des équipements dans un système de gestion de l'énergie

### 4.1.1 Pourquoi ce problème est un problème de type couplage fort/couplage faible ?

Le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment se présente sous la forme d'un problème d'optimisation de configuration d'un système bâtiment. La résolution de ce problème s'effectue de manière centralisée dans l'environnement du système de gestion d'énergie. Un solveur récupère les modèles des différents services, construit le problème et le résout. Le problème construit ne comporte que des équations linéaires, chacun des services étant modélisé linéairement. Néanmoins, ce type de résolution centralisée admet des limites dues à la particularité de certains équipements. Dans le but d'améliorer la précision et l'exactitude du problème à résoudre, la modélisation des équipements

est la cible d'efforts particuliers. Un premier pas dans ce sens est la création des services linéaires multi-phases. L'implémentation des services temporaires est affinée à l'aide de ce type de modèles. L'ajout de ce type de services ne permet pas pour autant de tenir compte de façon précise de certains équipements dont le comportement se conforme mal au services et équipements types construits. Ainsi, leur intégration dans l'optimisation avec les outils et modèles présents est peu efficace. Ils sont la plupart du temps introduit comme des équipements non supervisés, le système d'optimisation sait qu'ils existent et prévoit un matelas d'énergie à leur attention. Cette mesure est un palliatif, même si un matelas peut être prévu sur toute la journée pour un équipement qui ne fonctionne qu'une heure. Certains équipements possèdent des caractéristiques spécifiques qu'il est difficile ou peu rentable d'intégrer dans un système de résolution générique. Ces difficultés sont de plusieurs natures. Certains équipements sont compliqués voir impossible à linéariser comme un chauffe-eau solaire par exemple. D'autres équipements ont leur modèle non dévoilé par le fabricant : le modèle doit être encapsulé dans un composant logiciel. Il existe plusieurs situations pour lesquelles il est nécessaire d'ajouter des solveurs secondaires au solveur central du système de gestion de l'énergie. Il s'agit d'utiliser un solveur embarqué avec les modèles qui ne peuvent ou ne doivent pas être intégré aux modèles du solveur central. Les limitations proviennent de la nature intrinsèque de l'équipement mais aussi de la volonté ou non du concepteur de conserver ses modèles.

Les limitations correspondent à quatre catégories particulières :

- Les équipements dont le modèle ne doit pas être exposé. Pour le solveur, ce type d'équipement doit être pris en compte sous la forme d'un service non supervisé. Ces équipements se comportent suivant un schéma STIMULI-RÉPONSE. Ils vont attendre une requête du solveur et répondre en fournissant des informations sur leur comportement. Néanmoins, les informations envoyés ne décrivent pas totalement le comportement du service. Il s'agit seulement de bribes d'informations nécessaire à l'intégration. Dans la pratique, il s'agit d'équipements dont le fabricant refuse de communiquer le modèle de comportement.

- Certains équipements parfaitement connus et modélisés, comme une machine à laver présentent des comportements spécifiques. Plusieurs programmes différents sont disponibles sur chaque machine à laver. Il peut y avoir un lavage à 30°C sans essorage, ou encore un programme avec prélavage, lavage à 90°C avec essorage. Il est impossible de modéliser ce type de cas particuliers avec un service multi-phase. Le comportement général de l'équipement est connu mais représenter le cas particulier d'un équipement sous forme linéaire peut s'avérer long et peu rentable.

- Quelques équipements possèdent un modèle de comportement modélisé de façon non linéaire, comme avec une représentation d'état d'ordre élevé. Par exemple, une pompe à chaleur est modélisée par des équations non linéaires dépendant de la température extérieure. Ce type d'équipement nécessite une linéarisation du modèle de comportement pour être pris en compte dans le système centralisé de gestion d'énergie. Une telle linéarisation n'est pas toujours possible suivant la complexité du modèle de comportement. De même, le résultat de la linéarisation peut lui même être trop complexe pour s'inclure dans le système de gestion. Si le nombre d'équations linéaires obtenues après linéarisation est important, il peut handicaper la résolution.

- Il s'agit des équipements dont le fonctionnement est régit par des "règles de comportement". Par exemple, des volets roulants programmés par l'habitant. C'est un cas de "end-user programming". A la différence des équipements non linéaires, ce type d'équipements fournit directement une solution à partir des règles sans effectuer la moindre optimisation.

Un parallèle existe entre la notion de couplage fort/couplage faible en informatique, et l'intégration des équipements dans le système de gestion de l'énergie. En informatique, le couplage mesure le niveau d'interaction entre des composants logiciels échangeant de l'information ([83]). Dans le cas d'un couplage fort, beaucoup d'informations sont échangées entre les différents composants logiciels ; tandis qu'un couplage faible illustre un faible échange. Plusieurs niveaux de couplage existent, et dans l'idéal avoir le couplage le plus faible possible est une nécessité pour obtenir une bonne architecture logicielle.

Dans le cas du système de gestion de l'énergie dans le bâtiment, le système est couplé avec les différents équipements installés. Cependant, le niveau de couplage varie fortement suivant la nature de l'équipement. L'ensemble des équipements pouvant être modélisés de manière linéaire sont fortement couplés avec le système de gestion. La totalité de leur propriété est connue par le système. A contrario, les équipements entrant dans une des catégories précédemment citées ne sont que faiblement couplés avec le système de gestion ; peu d'informations sont échangés, et le système a une connaissance restreinte de l'équipement. Les équipements fortement couplés sont résolus par un optimiseur central tandis que les faiblement couplés par des optimiseurs secondaires dédiés.

Dans le cadre du travail présenté, l'avantage des équipements avec couplage fort par rapport au couplage faible est la parfaite connaissance de l'environnement (le bâtiment) pour le système, associé à un contrôle total sur ce qui

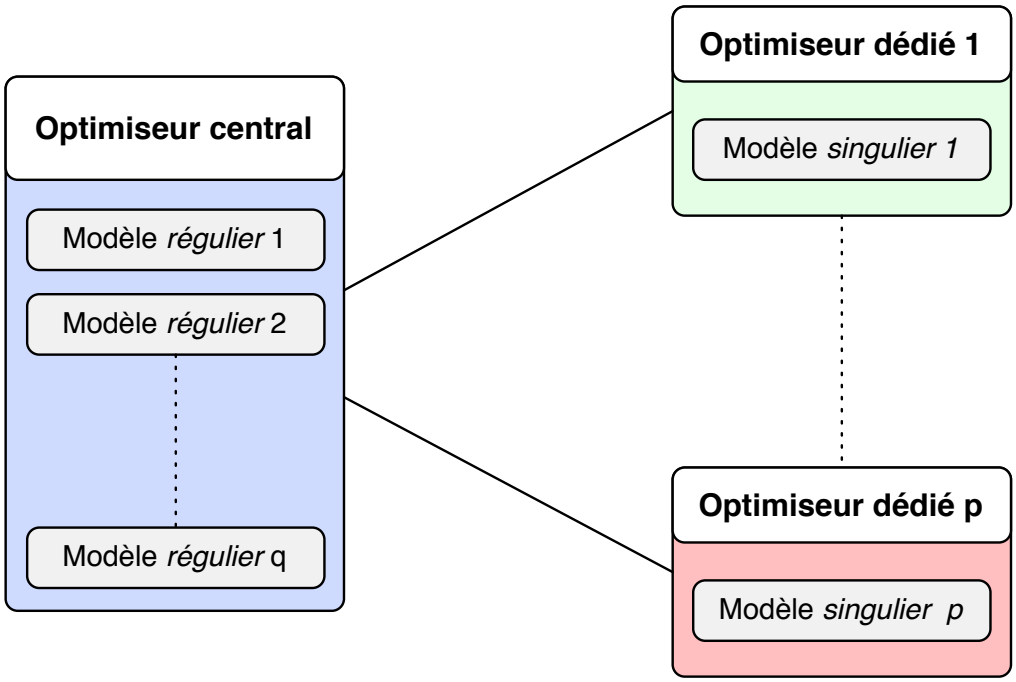


FIGURE 4.1 – Répartition des ressources et modèles dans le cadre du problème

se produit dans l'environnement. En contrepartie, la quantité d'informations nécessaire est importante pour que le système puisse jouir d'une telle connaissance ; et les limitations du système peuvent restreindre son ouverture vis à vis d'équipements, notamment dans le cas d'équipements appartenant aux catégories pré-citées. L'avantage des équipements à couplage faible vis à vis du couplage fort est la liberté induite au niveau de la résolution. Néanmoins, cette liberté se traduit par une perte de contrôle et de précision pour le système de gestion, le manque d'informations entrainant une compréhension plus faible de l'équipement, donc les décisions à prendre deviennent plus empiriques et moins précises vis à vis des capacités réelles de l'équipement.

Dans la suite, les équipements à couplage fort sont appelés équipements *"réguliers"*. Le modèle de ce type d'équipements est connu en détail par le système de gestion de l'énergie. Un système de gestion linéaire les intègre parfaitement dans la résolution. Le équipements de type couplage faible sont référer comme des équipements dits *"singuliers"*. Ces équipements présentent les limitations définies précédemment, leur modèle de comportement est inconnu pour le système et peu d'informations sur le modèle ne sont communiquées. La figure 4.1 représente la répartition des ressources et modèles dans le cadre du problème.

### 4.1.2 Formulation du problème à résoudre

Le système de gestion de l'énergie électrique développé vise à gérer l'ensemble des équipements présents dans le bâtiment afin de répondre au mieux aux sollicitations de l'occupant. L'un des points principaux dans la description du problème global est la variété des équipements à prendre en compte. Le parallèle avec la notion de couplage en informatique, ainsi que l'identification de limitations, permet de réduire la variété à deux types d'équipements présentant des caractéristiques opposées pour le système de gestion : les équipements *réguliers* et les équipements *singuliers*. Le système de gestion de l'énergie se doit d'intégrer dans son processus d'optimisation tous les équipements présents dans le bâtiment, quelque soit leur niveau de couplage. Il est important pour avoir un système efficace de posséder cette capacité d'inclure la totalité des équipements présents. Le système doit être capable d'interagir avec les deux types de couplages possibles pour les équipements, même si les interactions entre lui et les équipements sont différents suivant le couplage. Le problème à résoudre pour l'intégration de tous les types d'équipements, est de réussir à joindre l'approche centralisée pour les équipements *réguliers*, avec une approche plus adaptée pour la gestion des équipements *singuliers*.

Un couplage fort est synonyme de contrôle pour le système de gestion sur l'équipement. Le système connait parfaitement le modèle de l'équipement et décide lui-même du comportement que ce dernier doit adopté, le contrôle est total. Le système de gestion décrit par [67] illustre ce principe. Les équipements sont modélisés linéairement par le système de gestion. La résolution s'effectue de manière centralisée avec le système de gestion qui rapatrie toutes les informations et effectue tout le travail d'optimisation. Cette vision du système de gestion de l'énergie ne permet pas la prise en compte précise des équipements *singuliers* puisque le manque d'informations sur le modèle empêche toute modélisation précise. Un inconvénient des équipements *singuliers* est le manque de contrôle du système de gestion sur leurs décisions internes. Leurs domaines de liberté concernant leur consommation n'est pas connu par le système contrairement aux équipements *réguliers*. Afin de pouvoir prendre en compte ces équipements malgré le couplage faible et créer le plan de consommation, le système a besoin de pouvoir orienter les recherches locales effectuées. Sans cette possibilité d'orientation des recherches, les équipements *singuliers* seraient des boîtes noires perturbant le fonctionnement du système de gestion en empêchant une planification et optimisation correctes.

Les équipements *singuliers* sont un point bloquant pour le système de gestion de l'énergie centralisée linéaire. La connaissance restreinte par le système de gestion empêche la centralisation des informations. Le système de gestion n'a qu'une vague idée de son environnement et ne peut donc pas construire de

problème global proche de la réalité. La solution est donc d'effectuer un partage de la résolution en accord avec la répartition des informations détenues par chacun. Les équipements s'occupent de résoudre leur sous-problème respectif au vu de leurs informations internes et des informations mises à disposition par les autres équipements présents ; afin que l'ensemble des équipements puissent s'accorder sur une solution globale satisfaisante. Il est nécessaire que les équipements *singuliers* puissent communiquer et échanger de l'information avec le système.

Le système de gestion contrôle les équipements dans l'optique de fournir une planification de la production/consommation pour l'horizon de planification considéré. La création du plan tient compte de l'occupant, notamment en intégrant ses besoins dans le problème à optimiser. L'environnement du bâtiment est également un facteur intervenant dans l'optimisation. Il se manifeste au travers de différentes variables le définissant. Le prix de l'électricité et sa disponibilité renseignent le système sur la source primaire énergétique pour l'optimisation. Afin d'ajuster au mieux la consommation/production, la température extérieure ainsi que le rayonnement solaire sont nécessaires pour les équipements tels que les panneaux photovoltaïques pour la production, ou le chauffage pour ajuster la température. Avec les informations sur l'environnement et les besoins de l'occupant, le système de gestion de l'électricité doit fournir une planification. L'objectif est de trouver le meilleur compromis entre satisfaction des besoins de l'utilisateur et coût financier réduit. Le système de gestion crée un problème global comprenant les représentations des besoins de l'occupant, les données de l'environnement et les informations obtenues des équipements. Ce problème doit prendre en compte tous les équipements présents, qu'ils soient *réguliers* ou *singuliers*. Le problème est résolu avec l'aide d'un optimiseur qui fournit le plan de consommation/production pour chacun des équipements et le plan global pour le bâtiment.

## 4.2 Spécificité de la solution

### 4.2.1 Un système de résolution semi-distribuée

**Pourquoi ce type de système ?** Le problème général consiste à proposer un système de gestion de l'énergie ayant la capacité de gérer tous les niveaux de couplage dans les équipements, ainsi que toutes les limitations de ces derniers. Mettre en place un système de gestion présentant une architecture de résolution semi-distribuée permet de répondre au problème général. L'aspect centralisé est conservé avec le système de gestion s'occupant directement des équipements *réguliers* dans le cadre de la résolution ; tandis que les équipements *singuliers* échangent des informations avec les différentes entités pré-

sentes pour réussir à obtenir une solution globale en accord avec les décisions prises par le système de gestion. L'aspect distribué se retrouve dans la présence d'intelligence embarquée dans les équipements, qui se traduit par des capacités de résolution et de communication. Tous les types de couplages sont intégrables dans le système de gestion. Faire l'impasse sur l'intégration d'un équipement devient une solution extrême. Mélanger les deux approches offre plus de flexibilité et de malléabilité au système de gestion. La configuration du bâtiment (nombre d'équipements, nature des équipements,etc...) est moins figée, puisque l'ajout d'un équipement *régulier* nécessite beaucoup de connaissance. Les équipements intégrés sont aussi plus à même d'avoir un modèle de comportement proche de la réalité grâce à l'approche semi-distribuée.

**Nature et capacités des entités communicantes** La mise en place d'une approche de résolution semi-distribuée requiert des besoins obligatoires à remplir pour assurer le bon fonctionnement. Pour rendre possible la résolution distribuée, les équipements *singuliers* se voient associés une entité homogène à un solveur dédié possédant tous les attributs nécessaires pour le fonctionnement de l'approche distribuée. Cette entité représente l'équipement pour le système de gestion. Il s'agit d'une entité logicielle contenant le modèle de comportement de l'équipement *singulier* dans ses moindres détails. L'entité est la représentation abstraite de l'équipement *singulier*. Elle connait l'ensemble des propriétés de l'équipement et les différents modèles de comportements possibles. Son rôle est d'être l'interface entre la réalité physique qu'est l'équipement, et l'aspect logiciel représenté par le système de gestion, en faisant le lien entre ces deux aspects. Le système de gestion n'interagit pas directement avec l'équipement mais avec cette entité. Plusieurs capacités sont indispensables :

- l'entité possède des capacités de résolution internes. Le problème global est découpé en sous-problèmes locaux propres à chaque équipement *singulier*, donc l'entité associée doit être capable de résoudre le sous-problème local qui lui est associé.
- l'entité sait communiquer avec le système de gestion. La communication autorise l'échange d'informations entre le système et les équipements *singuliers*, et permet la création du sous-problème local.
- l'entité comprend les informations reçues par le système de gestion, et communique suivant un protocole défini par le système de gestion.

**Capacités et nature des communications** La mise en place d'une architecture semi-distribuée implique la présence d'un protocole de communication entre les différents acteurs intervenant dans la résolution. Un réseau de communication existe entre le système de gestion et les différents équipements présents dans le bâtiment. Chaque acteur présent sur le réseau doit répondre

à un protocole de communication uniforme pour tous. Le système de gestion et les entités liées aux équipements pour le système de gestion ont par obligation des capacités de communication. Ils doivent être capable de recevoir des informations permettant une résolution locale compatible avec la résolution globale en provenance des autres acteurs présents. Dans le cas du système de gestion, ce dernier envoie des informations sur l'environnement, sur l'énergie avec sa disponibilité et son prix. Cependant, le besoin d'orienter les recherches des équipements *singuliers* rend inévitable la présence du facteur d'orientation des recherches dans les informations envoyées par le système de gestion. Dans ses capacités de communication, le système de gestion doit posséder la faculté de recevoir les informations en provenance des entités communicantes ou des équipements *réguliers*. Les informations reçues par le système de gestion proviennent des entités communicantes et contiennent toutes les informations jugées nécessaire par l'entité pour que le système de gestion puisse les intégrer dans la résolution. Les entités possèdent aussi des contraintes de communication en rapport avec les contraintes du système de gestion. Elles doivent être capable de recevoir les informations transmises par le système de gestion, et aussi de lui répondre (voir figure 4.2). L'architecture semi-distribuée introduit des contraintes de communication importantes pour les acteurs présents dans le bâtiment. Le système de gestion, ainsi que les équipements doivent s'y adapter pour assurer l'utilisation efficace des possibilités offertes.

### 4.2.2 Les solutions existantes

#### 4.2.2.1 L'informatique distribuée

Un système informatique distribué est un ensemble de calculateurs interconnectés via un réseau de communication. Chaque élément du système est autonome, et exécute ses propres opérations ([84]). Un logiciel médiateur se charge alors de coordonner les activités et d'activer les différentes entités. D'ordinaire, la distribution du système est masquée pour l'utilisateur et les programmeurs. Un système distribué est transparent pour l'usager. Toute la complexité inhérente à la distribution telle que le partage des informations ou des tâches est camouflée pour ne laisser voir qu'un seul et unique système. De par sa nature, un système distribué est généralement séparable en plusieurs entités autonomes. Contrairement à un système centralisé, aucune entité n'existe pour gérer le système, chacun s'occupant de son propre fonctionnement. La technologie utilisée dans les entités n'est plus limitée puisque il n'y a aucune obligation ; l'entité est responsable de son fonctionnement, peu importe le langage de programmation utilisée (C++, Java, Python, etc...) pour la coder. Le système d'exploitation accueillant les entités n'est pas limité de la même manière. Les entités du système fonctionnent simultanément pour profiter de

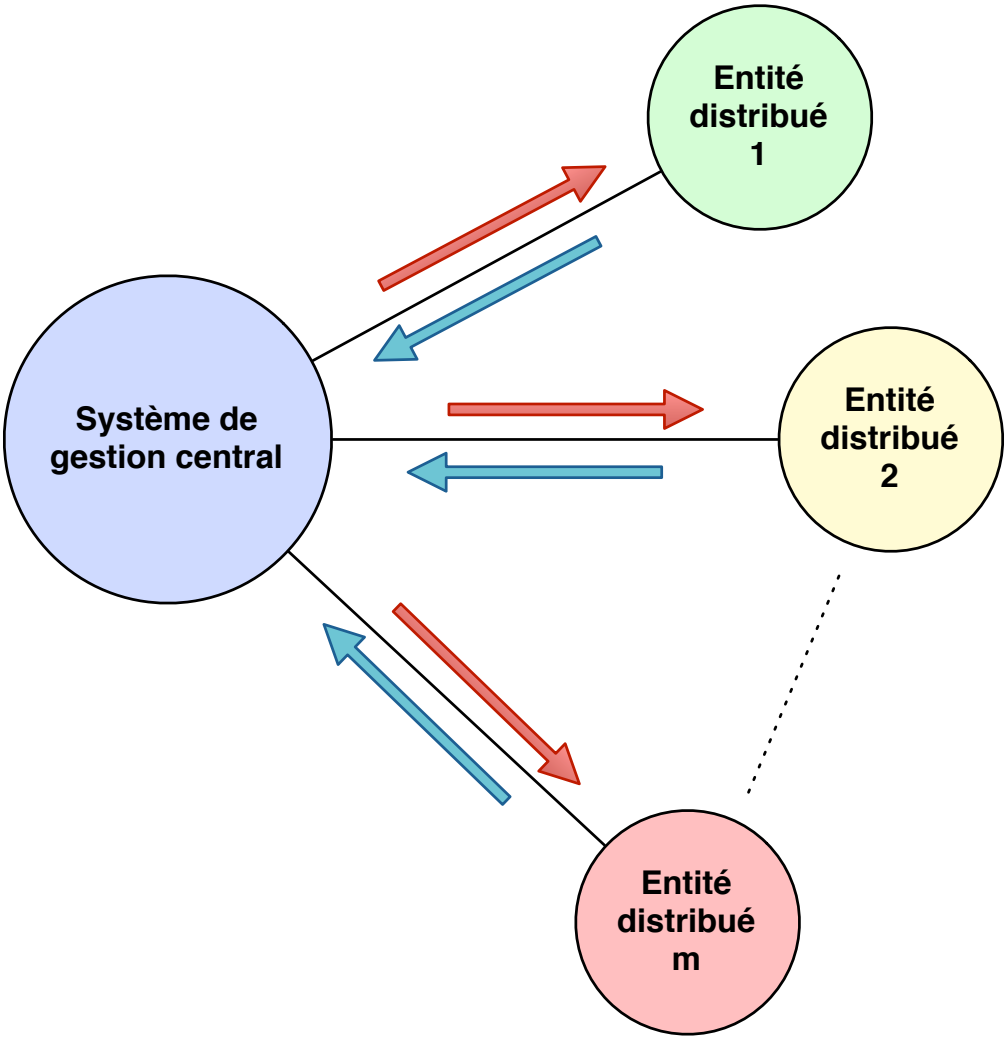


FIGURE 4.2 – Lien entre les différentes entités du système

l'architecture distribuée. Néanmoins, les systèmes distribués présentent plusieurs limites telles que le besoin de trafic réseau.

L'utilisation d'un système distribué est souvent motivée par des besoins :

- **extensibilité :** ajouter une entité est plus simple dans le cadre d'un système distribué.
- **ouverture :** les entités du système possèdent des interfaces clairement définies, facilitant l'extensibilité.
- **hétérogénéité :** le langage de programmation des entités n'est pas figé ; pour un même système, plusieurs langages et systèmes d'exploitation peuvent être utilisés.
- **accès aux ressources et partage :** le système distribué met en place un réseau (matériel, logiciel et données) pour le partage des ressources.
- **tolérance aux pannes :** les systèmes distribués sont plus tolérants aux pannes que les systèmes centralisés puisqu'il suffit de remplacer une entité par une autre équivalente.

Un exemple célèbre d'architecture distribuée est le SETI@Home ([85]) issu du projet Search for Extraterrestrial Intelligence ([86]). Ce projet utilise les ordinateurs volontaires d'Internet pour effectuer du décryptage de signaux spatiaux. Chacun des 5 millions d'ordinateurs décryptent une portion de ciel différente. Ce projet a rendu crédible l'architecture distribuée ainsi que le calcul distribué, même si aucune vie extra terrestre n'a été découverte.

#### 4.2.2.2 Les système multi-agents

Les systèmes multi-agents sont issus de l'intelligence artificielle distribuée, qui est une sous-discipline de l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle distribuée est construite sur trois dogmes :

- la résolution distribuée autorise le découpage du problème global en un ensemble de sous-problèmes. Chaque sous-problème est résolu par une des entités distribuées, puis les connaissances du problème sont partagées dans l'optique de trouver une solution globale.
- l'intelligence artificielle développe des algorithmes de résolutions parallèles améliorant les performances des systèmes informatiques.
- les systèmes multi-agents préfèrent une approche décentralisée de la modélisation et se focalisent sur les caractéristiques collectives des systèmes.

Les systèmes multi-agents se sont beaucoup développés ces deux dernières décennies notamment grâce à la faculté de modéliser et simuler des systèmes dits complexes ; i.e. intégrant de nombreux composants interagissant dynamiquement entre eux et l'environnement du système. Un système multi-agent cherche une manière de coordonner un ensemble d'agents pour qu'ils résolvent un problème global, mais de manière collective, en résolvant d'abord leur sous-

problème. La coopération, la coordination et l'intéraction entre agents sont des points primordiaux pour l'efficacité d'un système multi-agents. La nature décentralisée des systèmes multi-agents se prête bien à la modélisation d'un système complexe. Comme pour l'informatique distribuée, ils sont adaptés aux systèmes hétérogènes et ouverts.

L'agent est la pierre angulaire d'un système multi-agents. Un agent est une entité réelle ou virtuelle dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement qu'il est capable de percevoir et sur lequel il est capable d'agir ([87] et [88]). A partir de cette définition, un agent est défini comme une entité physique ou virtuelle :

- qui est autonome
- qui est capable d'agir dans un environnement
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents
- qui est mû par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser)
- qui possède des ressources propres
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune)
- qui possède des compétences et offre des services
- qui peut éventuellement se "reproduire"
- qui a un comportement qui tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences à sa disposition, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications reçues.

Les systèmes multi-agents sont proches de l'architecture distribuée, mais présentent un niveau de coopération et d'interaction entre les composants plus important. En effet, la résolution d'un problème par un système multi-agents s'effectue en plusieurs itérations. Lors de chacune des itérations, un processus de dialogue et de partage de l'information s'engage entre les agents. La résolution des sous-problèmes est alors effectuée à partir des informations obtenues. Le caractère itératif de la résolution permet d'utiliser le potentiel des agents, et aussi d'affiner la précision de la solution à chaque itération, en définissant de plus en plus précisément les informations partagées par les agents. Les agents sont autonomes, et la résolution de leur sous-problème ne répond qu'à leur critère local. Un agent n'a aucune idée de la pertinence de sa solution vis à vis de la solution globale.

## 4.3 Solution proposée

### 4.3.1 Pourquoi choisir un système multi-agents pour la résolution distribuée ?

Les agents possèdent l'ensemble des caractéristiques obligatoires pour la mise en place de la solution. Un agent possède des capacités de communication natives et communique avec les différents acteurs du réseau. Les équipements présentant une des limitations énumérées précédemment s'intègrent dans le paradigme agent. Ces équipements possèdent un comportement particulier qu'ils sont les seuls à connaitre. Leur comportement n'est pas limité, quasiment tout est possible, que ce soit une machine à laver avec plusieurs programmes de lavage, ou un chauffe-eau solaire : ils peuvent comporter des principes de résolution dédiés à un équipement. Il s'agit d'un aspect important dans le choix des agents. Les équipements sont divers et variés avec une diversité importante dans les modèles de comportement. En adoptant le paradigme agent pour ceux-ci, ils conservent leur comportement et modèle particulier mais offre la possibilité d'être intégrer plus finement dans le processus d'optimisation. En effet, intégrer ces derniers en utilisant les modèles linéaires oblige à faire des compromis et ignorer certains aspects de fonctionnement pour s'insérer dans le moule MILP. Ces équipements sont totalement inconnus pour leur environnement. Le système de gestion les perçoit uniquement comme des "boîtes noires". Chacun de ces équipements correspond dans notre étude, à un agent. Reprendre le paradigme agent pour intégrer les équipements *singuliers* est en accord avec le manque de précision sur le comportement des équipements. Le processus itératif permet aux agents d'améliorer leur réponse au problème global, en améliorant les limites de leur sous-problème local. Il est nécessaire de définir quelques propriétés des agents :

- Ils n'ont qu'une représentation limitée de leur environnement. Cette dernière dépend de plusieurs éléments décrits par la suite.
- Ils savent communiquer avec le superviseur.
- Ils sont capables de résoudre un sous-problème du problème global sous certaines conditions.
- Ils sont capables d'appliquer la décision choisie par le superviseur.

En plus de leurs propriétés, les agents sont différenciés entre eux avec l'aide de deux critères. Les méthodes de résolution interne aux agents sont différentes suivant les équipements. De la même manière, les informations renvoyées par les agents dépendent de la nature de l'équipement. Cependant, le problème étudié se concentre sur la consommation électrique, limitant les informations envoyées à l'agent. Du point de vue du système de gestion, la méthode de résolution de l'agent n'est pas importante tant que le résultat est obtenu. L'agent

doit répondre aux requêtes. Une méthode différente fournira une solution différente, mais le comportement du système de gestion reste identique. Néanmoins, l'aspect principal de l'étude concernant l'énergie électrique, les données de communication envoyées par l'agent concernent le besoin de consommation électrique. Les agents sont aussi le moyen de considérer le bâtiment comme un "système complexe" évolutif où la configuration peut changer aisément.

### 4.3.2 Architecture proposée

Le problème à résoudre est l'optimisation de la consommation électrique dans l'habitat. Le problème existant est constitué des éléments suivants :

- des services temporaires décalables temporellement (machine à laver programmable,...). La date de début de leur mise en route est calculée par le superviseur. Ils ont une ou plusieurs phases dans leur modèle, avec contraintes temporelles de précédence entre les phases.
- des services permanents modulables sur chaque période (chauffage,...). La consigne de puissance est calculée par le superviseur pour chaque étape de l'horizon d'optimisation.
- des services non supervisés (luminaire,...). Le superviseur sait qu'ils existent mais ne possède aucun levier d'action sur eux.

Avec ce type de services, la résolution du problème d'optimisation s'effectue en une seule itération, les modèles des différents équipements ne subissant aucune transformation au cours du temps.

**Architecture** L'introduction des services de type agents entraine une modification du fonctionnement du système de gestion. L'architecture du système de résolution est étoffée afin de prendre en compte les services *"singuliers"*. Celle-ci est représentée sur la figure 4.3. Chaque équipement *singulier* se voit lié à une entité ayant connaissance d'un modèle de comportement et possédant des capacités de résolution, il s'agit alors d'un service *singulier* répondant à un besoin manifesté par l'occupant auquel répond l'équipement *singulier*. Les agents sont le moyen de prendre en compte les services *singuliers*, il s'agit de l'entité interface entre le système de gestion et l'équipement.

Chacun des blocs présents dans l'architecture possède son propre rôle. Deux catégories sont à séparer, les blocs liés aux services et les blocs liés à la résolution du problème. Aux services sont liés les blocs : service *régulier* et service *singulier* ; tandis que le reste des blocs concerne la résolution du problème. Premièrement, le gestionnaire de résolution intégré au système de gestion de l'énergie est le superviseur. Ce module s'occupe de la gestion de l'algorithme de résolution centralisée, il décide quelles sont les informations envoyées aux agents. La gestion de la communication avec les agents est effectuée par l'Agent

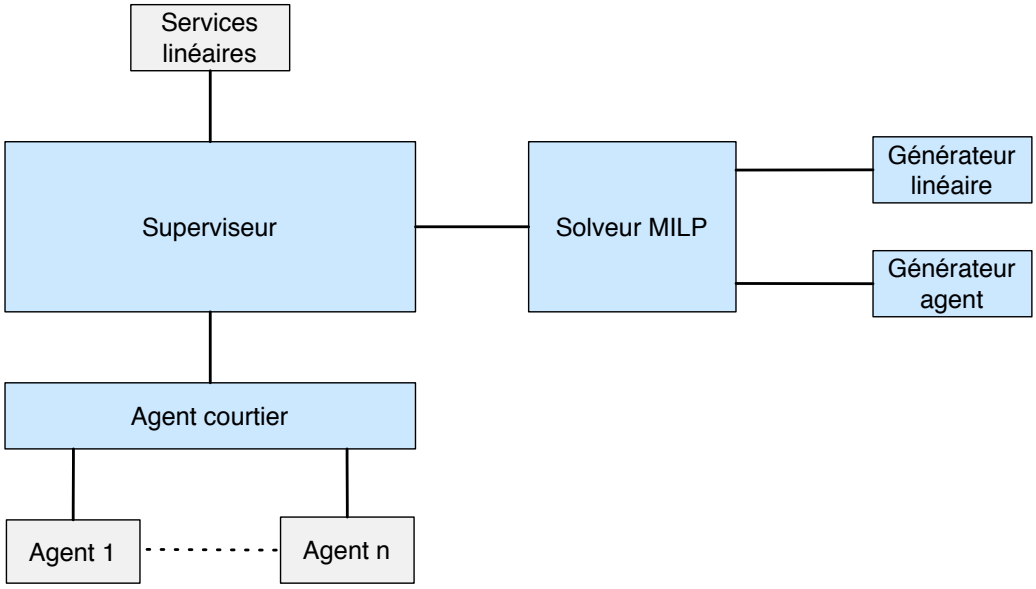


FIGURE 4.3 – Architecture de fonctionnement

Courtier. Ce dernier met en forme les informations reçues par les agents pour qu'elles soient lisibles et compréhensibles par le superviseur. Il se charge aussi de transmettre les informations en provenance du superviseur vers chacun des agents. Si le superviseur s'occupe de la gestion de l'algorithme de résolution, la résolution effective des problèmes MILP est effectuée par le solveur MILP. Le problème MILP est construit à partir des données des services obtenues par le superviseur. Il transmet ces données au solveur MILP qui à son tour construit le problème MILP à résoudre. La construction ne s'effectue pas au sein du solveur. Ce dernier fait appel au module correspondant au type de service à adjoindre au problème qui se charge alors d'ajouter les équations correspondantes au problème à partir des données fournies par le superviseur. Ces modules de générateur de services sont séparés entre services réguliers linéaires, déjà présents, et services singuliers agents qui furent implémentés au cours de ce travail.

L'architecture mise en place a été choisie afin de s'intégrer au mieux dans ce qui existait auparavant, c'est à dire le système de gestion centralisée et linéaire. L'architecture proposée conserve l'aspect centralisée et linéaire de la résolution déjà existant, et dans l'optique de distribuer la résolution intègre les agents. Ils résolvent des sous-problèmes dont les paramètres extérieurs sont fixés par le superviseur. La résolution devient semi-distribuée, avec toujours le superviseur associé au solveur MILP qui résout le problème global à partir des solutions des sous-problèmes obtenues par les agents.

### 4.3.3 Dialogue agent-superviseur

Le choix des agents pour l'intégration introduit le principe d'échange entre superviseur et les agents. Cela se matérialise par un transfert d'informations entre ces composants. Les informations échangées sont différentes suivant le sens de communication.

#### 4.3.3.1 Échanges agents vers superviseur

Le problème d'optimisation globale à résoudre est la planification de la consommation électrique dans un bâtiment. Les agents sont ici des services consommant de l'électricité suivant un modèle qui leur est propre. Le sous-problème de chaque agent consiste à construire plusieurs plans de consommation différents. Une telle planification de la consommation est appelée un profil de consommation. Il se présente sous la forme d'un vecteur de données. Dans le cas où l'horizon de planification est une journée et la période anticipative d'une heure, le vecteur est de taille 24 puisqu'il y a 24 périodes d'une heure. Chaque composant de ce vecteur contient la consommation électrique prévue par l'agent pour la période concernée. Il se note $E_k^j(S)$, signifiant qu'il s'agit de la consommation électrique planifiée pour la période $k$ lors de l'itération $j$. Les notations seront affinées par la suite. Ce qui est envoyé par les agents au superviseur sont les solutions de leur sous-problème, soit plusieurs profils de consommation proposés. Chaque profil de consommation se voit associé une valeur de satisfaction représentant la capacité du profil à satisfaire l'agent. Celle-ci est aussi envoyée. Les agents envoient vers le superviseur un ensemble de profils de consommation avec leur satisfaction associée.

#### 4.3.3.2 Échanges superviseur vers agents

Si les informations transférées par les agents vers le superviseur sont des profils de consommation, ce qui est transmis par le superviseur aux agents sont des informations décrivant l'état de la résolution. Les agents possédant leurs propres capteurs, ils possèdent de l'information sur leur environnement voisin ; néanmoins, ils ne possèdent pas d'informations sur l'environnement global du système dont ils ont besoin pour la résolution des sous-problèmes. Afin de construire un sous-problème en cohérence avec le problème global, l'agent doit obtenir des informations sur le prix de l'électricité pour chaque période, ainsi que des informations sur la quantité d'électricité maximale dont il peut se servir par période. Dans cette optique, un type de variables est créé. Il s'agit des coefficients de pénalisation. Ils se présentent sous la forme d'un vecteur $\mathbb{P}$ de données de la même taille que l'horizon d'optimisation, avec une valeur par période. L'objectif des coefficients de pénalisation est de signifier aux agents

où il est plus propice d'utiliser de l'énergie, ils sont le levier d'action nécessaire au superviseur pour orienter les recherches des agents. Le superviseur envoie vers les agents un ensemble de vecteurs de coefficients de pénalisation.

#### 4.3.3.3 Différentes résolutions

La solution proposée pour intégrer les équipements *singuliers* s'inspire du paradigme agent et en reprend certaines caractéristiques. Le mécanisme d'optimisation de l'énergie effectue une optimisation sur plusieurs itérations, où le superviseur communique à chaque itération avec les agents. Les approches de gestion de communication utilisées lors de la résolution globale, couvrent un large panel de possibilités. Le nombre d'itérations effectuées lors de la résolution n'est pas fixe, de même que le nombre de profils envoyés par les agents ; ils dépendent de l'orientation donnée à la résolution comme l'illustre la figure 4.4. La résolution peut s'effectuer en une seule itération, il suffit que le superviseur envoie comme requête aux agents l'envoi d'un nombre important des solutions de leur sous-problème. Le nombre de profils reçus par le superviseur est alors grand et ainsi que la combinatoire a géré pour le superviseur. Il s'agit du cas extrême minimisant le nombre d'itérations. La mise en place de cette approche limiterait le caractère évolutif des agents, qui affine leur solution grâce aux expériences précédentes. Le nombre de solutions envoyées par les agents est certes grand, mais ne fournit aucune garantie sur la faisabilité de ces solutions. Il est possible qu'aucune ne soit valide pour le superviseur. Augmenter le nombre de profils envoyés permet de limiter cela, mais comme l'espace de solution est généralement infini, il est impossible de toutes les envoyer. Et le calcul d'un nombre important de profils par l'agent augmente sa charge de travail. Le cas extrême contraire consiste à maximiser le nombre d'itérations en envoyant un seul profil par agent à chaque itération. Cette approche possède aussi des limites. Le nombre d'itérations sera élevé puisque une seule solution ne peut être évaluée à chaque itération. Il faut un grand nombre d'itérations pour parcourir l'espace des solutions et améliorer la réponse. L'envoi d'un seul profil par agent limite considérablement les possibilités pour le superviseur. À chaque itération, le superviseur n'a qu'un profil par agent donc aucune combinatoire ni choix de sa part pour répondre au problème global. Une solution bonne pour l'agent ne l'est pas forcément pour le problème global.

Quelque soit l'approche choisie, le choix des profils est totalement laissé entre les mains des agents. Ils parcourent leur espace des solutions à leur guise, le superviseur n'intervient pas. L'optimisation de la communication entre en scène dans l'optique de fournir un levier d'action sur la résolution local des agents. Celui-ci ne permet pas de décider totalement comment s'effectue la résolution du sous-problème mais aiguille les agents dans une certaine zone de

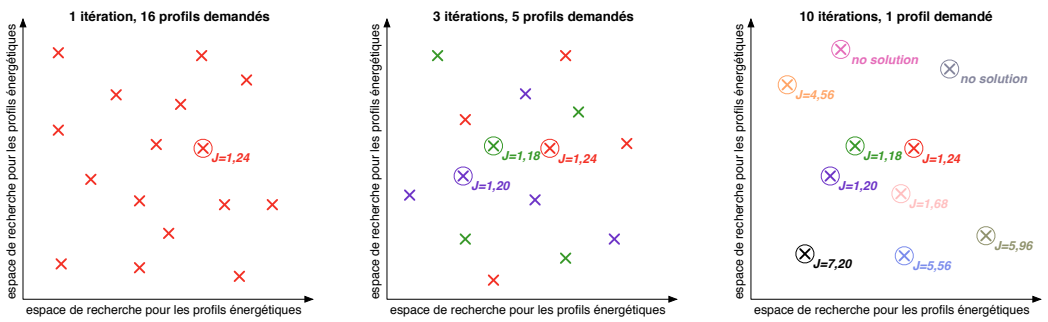


FIGURE 4.4 – Différentes approches de résolution

leur espace des solutions. L'approche retenue est un compromis entre nombre d'itérations et nombre de profils. Le nombre de profils fournis est plus faible que dans le cas extrême. Le rôle du superviseur est de choisir à chaque itération le meilleur profil de consommation au sens du problème global. Le nombre d'itérations est ajusté en accord avec le nombre de profils envoyés. Cela permet de parcourir l'espace des solutions plus rapidement et de laisser une liberté plus importante pour le superviseur.

### 4.3.4 Principe de fonctionnement

La solution retenue est une architecture semi-distribuée, plus spécifiquement avec l'intégration d'agents dans le système de gestion de l'énergie pour l'intégration des équipements *singuliers*. Comme décrit précédemment, le système reprend le principe de la résolution sur plusieurs itérations présent dans le paradigme des agents. Le fonctionnement du système de gestion se voit modifié dans l'optique d'autoriser une résolution semi-distribuée combinée à l'utilisation d'un réseau de communication. Ces deux facteurs sont indispensables dans le cadre d'une solution viable pour le système de gestion décrit précédemment. Le déroulement de la résolution se retrouve modifié afin d'intégrer ce processus de dialogue et de résolution itérative. La figure 4.5 illustre le principe de fonctionnement de l'algorithme. En accord avec les principes indispensables, l'algorithme de résolution s'effectue sur plusieurs itérations.

**Notations** Les notations utilisées par la suite pour décrire le problème sont présentés ci-dessous :

- $n$ taille de l'horizon d'optimisation
- $k \in [\![0; n-1]\!]$ indice de la période anticipative
- $j$ indice de l'itération courante
- $N$ la taille de la population qui est constituée de vecteurs de coefficients de pénalisation

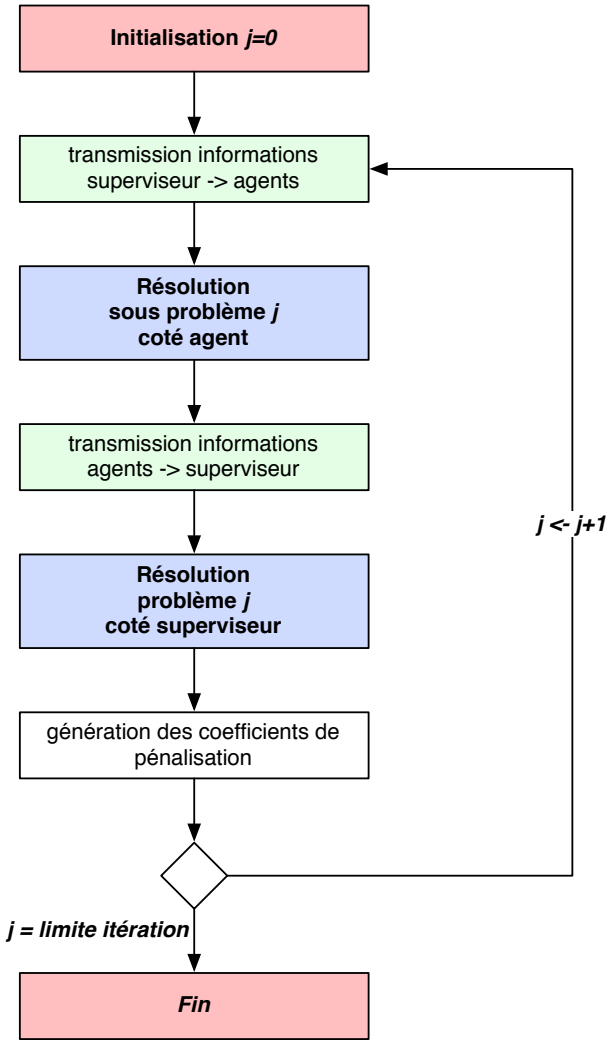


FIGURE 4.5 – Représentation du principe de fonctionnement de l'algorithme de résolution

- $\mathbb{P}_i^j(k, \forall k)$ vecteur $i$ de coefficients de pénalisation pour l'itération $j$ [1]
- $\mathcal{S}^R$ l'ensemble des services *réguliers*
- $\mathcal{S}^S$ l'ensemble des services *singuliers*
- $\mathcal{S}^T = \mathcal{S}^R \cup \mathcal{S}^S$ l'ensemble des services
- $S$ un service appartenant à $\mathcal{S}^T$
- $E_k^{max}$ énergie totale disponible durant la période $k$
- $E_k^j$ énergie totale disponible durant la période $k$ une fois les services *réguliers* placés pour l'itération courante (énergie disponible pour les agents)
- $E_k^j(S)$ énergie consommée par le service $S \in \mathcal{S}^T$ durant la période $k$ pour l'itération courante
- $E_k(S, \mathbb{P}_i^j)$ énergie consommée par le service agent $S \in \mathcal{S}^S$ durant la période $k$ pour la proposition correspondant au vecteur de coefficients de pénalisation $\mathbb{P}_i^j$
- $T_k$ tarif de l'énergie durant la période $k$
- $C_k$ le coût financier totale de l'énergie consommée durant la période $k$
- $\upsilon(S)$ caractéristiques d'une demande de service $S$ des occupants (la température des radiateurs, l'heure de fermeture de stores, etc...)
- $I(\upsilon(S))$ inconfort lié au service linéaire $S \in \mathcal{S}^R$
- $I(\upsilon(S), \mathbb{P}_i^j)$ inconfort lié au service agent $S \in \mathcal{S}^S$ pour la proposition correspondant au vecteur $\mathbb{P}_i^j$

#### 4.3.4.1 Déroulement d'une itération

Une itération de la résolution globale s'effectue en 6 étapes. Tout commence avec le superviseur qui envoie aux différents agents les informations nécessaires définissant l'environnement afin de permettre la création des sous problèmes (figure 4.6). Les informations envoyées seront détaillées ensuite. Cette étape consiste d'abord en un envoi par le superviseur des informations vers l'agent courtier. Ce dernier fait le lien entre le superviseur et les agents, transmettant à tous les agents les informations en provenance du superviseur, et remontant les informations depuis les agents vers le superviseur.

À partir de leur représentation de l'environnement, chaque agent crée son sous-problème et le résout (figure 4.7). La résolution du sous-problème peut s'effectuer de différentes manières suivant la nature de l'agent. Après la résolution des sous-problèmes, tous les agents obtiennent un ensemble de solutions valables qui leurs sont propres. L'ensemble des solutions est envoyé par chaque agent à l'agent courtier(figure 4.8). Celui-ci est l'interface avec le superviseur. Il adapte le format des "solutions agents" et les regroupe en un seul gisement d'informations les contenant toutes. L'agent courtier transmet ensuite le gise-

1. il y a plusieurs indicateurs de recherche à chaque itération

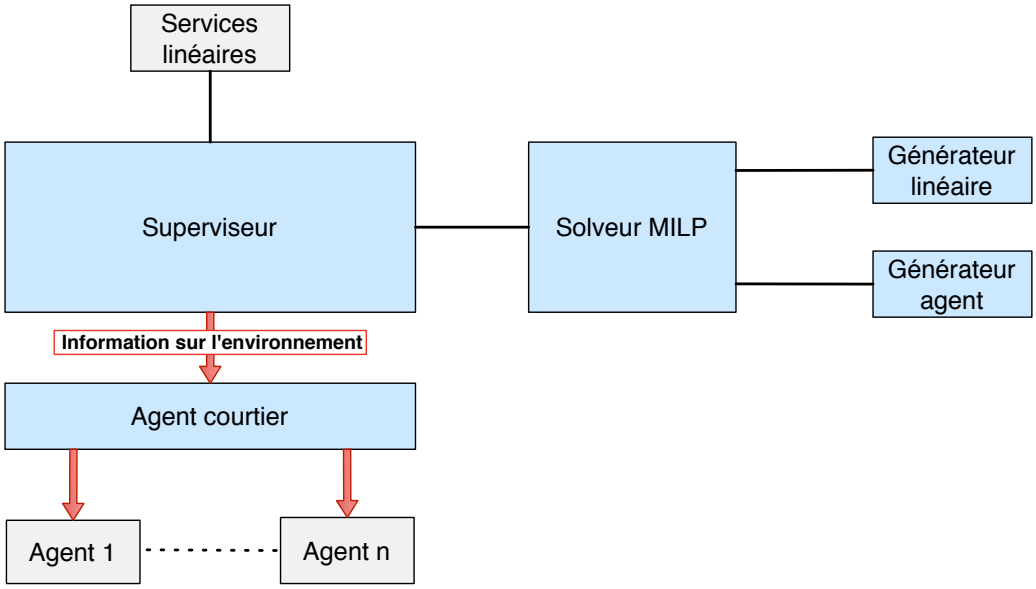


FIGURE 4.6 – Envoi des informations sur l'environnement

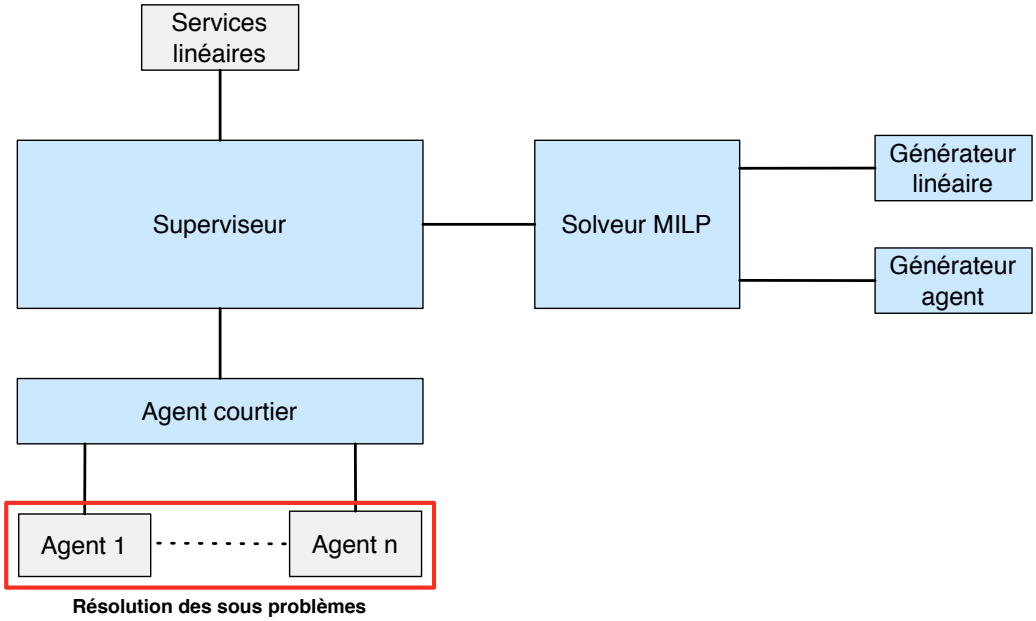


FIGURE 4.7 – Résolution des sous problèmes

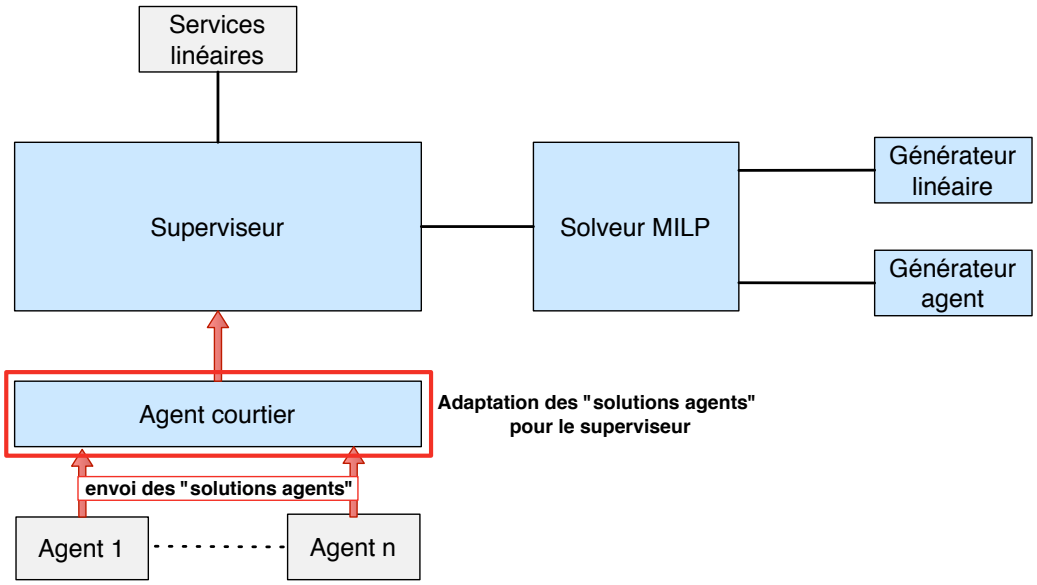


FIGURE 4.8 – Envoi des solutions agents

ment complet au superviseur.

À la réception de ce dernier qui contient les "solutions agents", le superviseur construit une entité contenant les informations sur le problème global(figure 4.9). Pour se faire, il fusionne les informations sur les services *réguliers*, qu'il possède déjà et qui sont immuables d'itération en itération, avec les "solutions agents". Le fichier obtenu est le problème complet pour l'itération courante. Le problème complet est alors envoyé au solveur MILP. Le problème MILP à résoudre est construit. Le solveur MILP lit les informations sur le problème complet, notamment les différents types de services présents et appelle alors les générateurs associés aux différents services présents (figure 4.10).

Les générateurs construisent l'instance MILP du problème complet en ajoutant les équations linéaires décrivant les services réguliers. Il s'ensuit la résolution du problème par le solveur MILP (figure 4.11). La solution globale obtenue pour l'itération en cours est transmise au superviseur. Enfin, le superviseur étudie la solution obtenue dans le cadre de la résolution globale (figure 4.12). Cette solution est alors caractérisée pour de futures itérations. Dans le cas où la résolution continue, une nouvelle itération débute comme dans la figure 4.6, et les différentes étapes s'enchainent de nouveau. Si la solution obtenue durant l'itération est meilleure que celle retenue jusqu'à présent, alors elle la remplace.

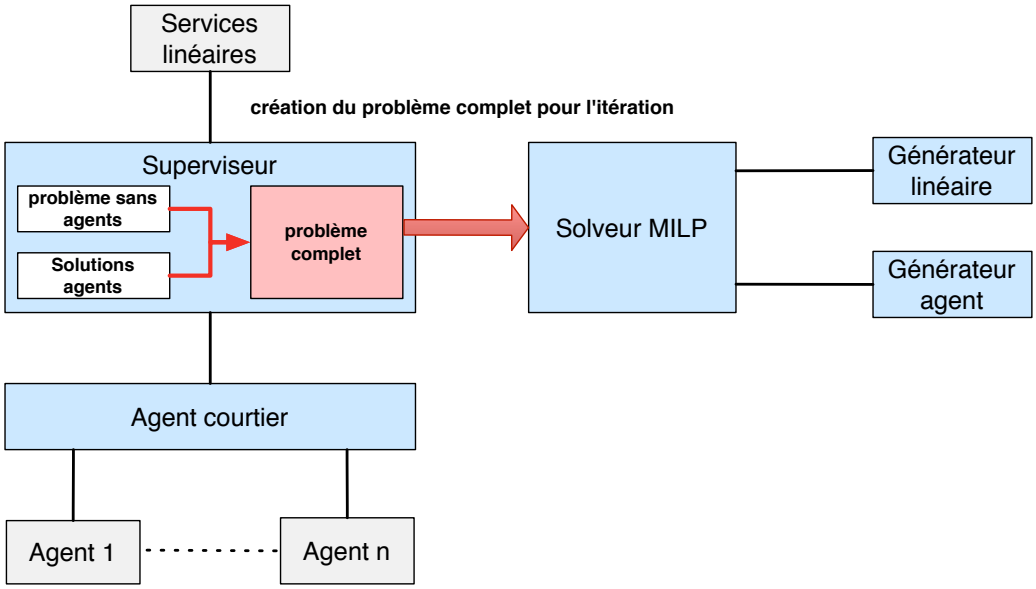


FIGURE 4.9 – Création et envoi du problème complet

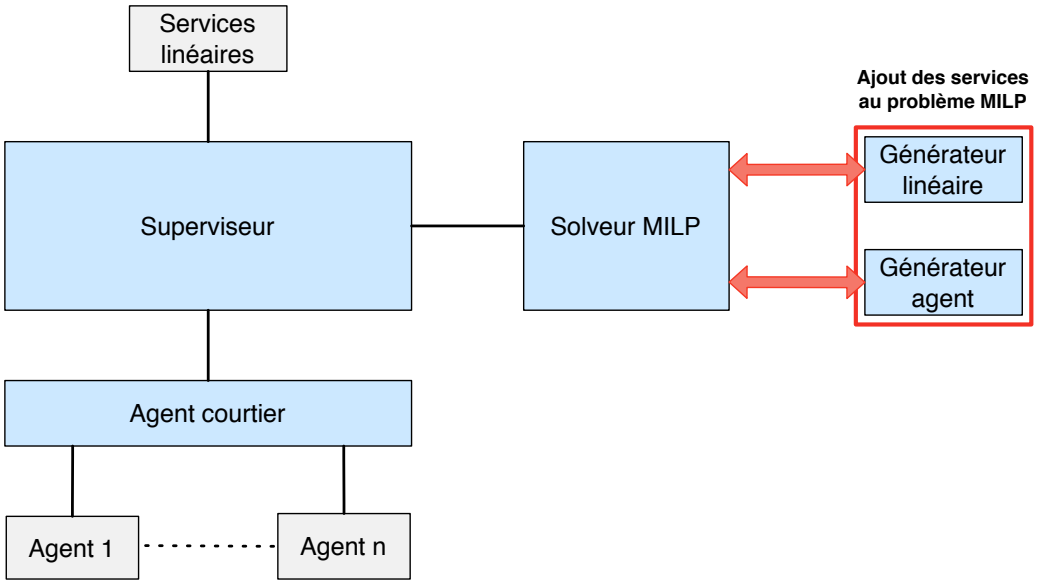


FIGURE 4.10 – Construction du problème MILP

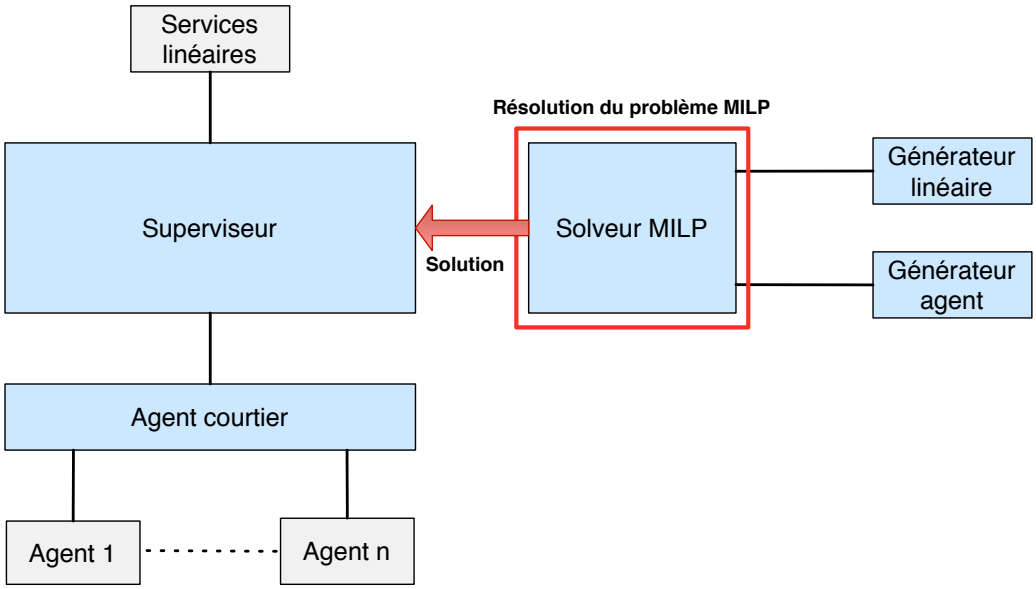


FIGURE 4.11 – Résolution du problème MILP et envoi de la solution

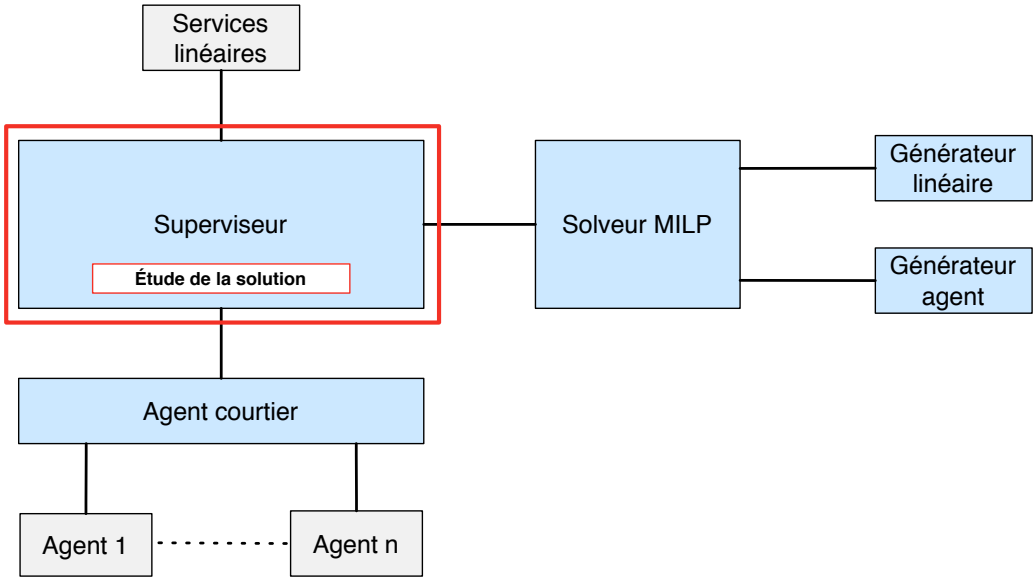


FIGURE 4.12 – Étude et caractérisation de la solution

#### 4.3.4.2 Coefficients de pénalisation

Les agents ont besoin d'informations sur la quantité d'énergie disponible période par période. Les coefficients de pénalisation sont introduits dans ce but. L'objectif des coefficients de pénalisation est d'indiquer aux agents quand il est préférable de consommer de l'énergie.

Les coefficients de pénalisation suivent deux règles particulières :

- lorsque l'énergie disponible pour les agents pendant la période $k$ est faible, le coefficient de pénalisation pour la période concernée doit être élevé.
- lorsque l'énergie disponible pour les agents pendant la période $k$ est importante, le coefficient de pénalisation pour la période concernée doit être faible.

À partir de la solution, l'énergie disponible pour les agents est calculée, pour chaque période, en soustrayant l'énergie consommée par les services *réguliers* à l'énergie totale (voir équation 4.1). Il s'agit de l'énergie pouvant être allouée aux agents lors de la prochaine itération. Un vecteur de coefficients de pénalisation est obtenue à partir de la solution globale de l'itération en cours grâce à l'équation (4.2). La fonction permettant le calcul des coefficients de pénalisation doit donc être bornée et strictement croissante en fonction de l'énergie disponible pour les agents d'après les deux règles à suivre.

$$\forall j \in \mathbb{N}^*, \forall k \in [\![0; n-1]\!],$$

$$E_k^j = E_k^{max} - \sum_{S \in \mathcal{S}^R} E_k^j(S) \tag{4.1}$$

$$\mathbb{P}_0^{j+1}(k) = f_{\mathbb{P}}^k(\mathbb{S}^j) = \frac{1 + E_k^{max}}{1 + E_k^j} \tag{4.2}$$

Cela se traduit par une courbe d'évolution en fonction de l'énergie disponible pour les agents ayant l'allure présentée dans la figure 4.13. Les coefficients de pénalisation doivent suivre ces deux règles afin de rester cohérents avec le problème global. En effet, la solution globale doit minimiser un critère. Les sous-problèmes des agents suivent la même règle dans le même esprit de cohérence. Le fonctionnement interne attendu des agents sera détaillé par la suite. L'intérêt est donc de minimiser le critère en minimisant le coefficient de pénalisation. Il est à retenir que plusieurs vecteurs de coefficients de pénalisation sont transmis aux agents par l'agent courtier afin que ces derniers recherchent dans plusieurs zones différentes de l'espace des solutions.

Ce qui est transmis aux agents est un ensemble de vecteurs de coefficients de pénalisation de la taille de l'horizon de planification. Chaque période de l'horizon se voit associer un coefficient de pénalisation schématisant l'intérêt de celle-ci pour la consommation énergétique. Comme l'indique l'équation (4.2),

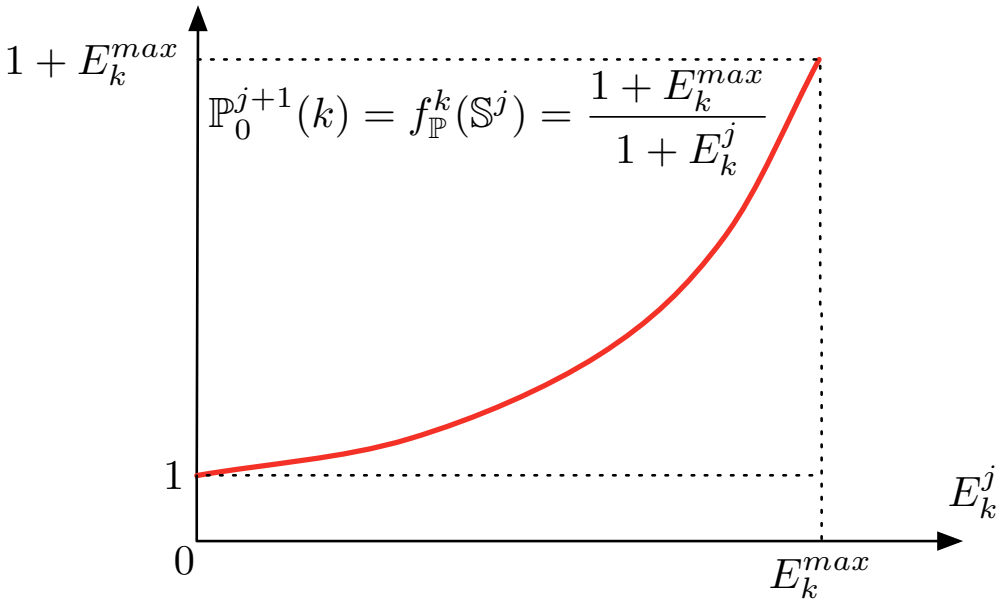


FIGURE 4.13 – Allure de la fonction de calcul des coefficients de pénalisation

les valeurs du coefficient de pénalisation sont bornées pour chaque période, et ne sont pas dépendantes de l'itération courante ; donc d'une itération sur l'autre, les évolutions et modifications sont quantifiables et appréciables par l'agent.

#### 4.3.4.3 Critère de résolution et agents

Lorsque le superviseur communique avec les agents, celui-ci reçoit plusieurs profils de consommation énergétique avec une satisfaction associée. Le nombre de profils est fixé par le superviseur pour ajuster la résolution. Cependant, un agent n'exécute qu'un profil de consommation à la fois sur l'horizon de planification. Le superviseur conserve un seul profil par agent, lors de la résolution du problème, pour que la solution globale calculée soit réalisable. La méthode retenue pour répondre à cette contrainte introduit une variable binaire de décision.

$$\forall S \in \mathcal{S}^S,$$

$$\zeta_i(S) \in \{0, 1\}, \forall i \tag{4.3}$$

$$\sum_i \zeta_i(S) = 1 \tag{4.4}$$

Pour chaque profil $i$ de chaque service de type agent $S$, une variable binaire $\zeta_i(S)$ est introduite (équation 4.3). Cette variable a pour valeur 1 lorsque le

profil $i$ est retenu, 0 autrement. Le superviseur, avec l'ajout de cette variable au problème, possède un moyen de savoir si un profil a été retenu. L'introduction de ces variables binaires $\zeta_i(S)$ permet d'ajouter l'équation linéaire au problème qui limite à un le nombre de profil retenu par service (équation 4.4). Cette équation est la représentation mathématique de l'opérateur binaire ou-exclusif. Comme la somme des variables binaires doit être égale à 1, une seule d'entre elles ne peut être égale à 1 afin de vérifier l'équation. L'ajout de ces équations au problème global est effectué par le générateur agent.

**Différents critères à optimiser** L'objectif global du problème est de minimiser le coût financier et de conserver un niveau de satisfaction suffisant important pour le bien être de l'habitant. Le problème global d'optimisation de l'énergie est construit sous la forme d'un programme linéaire mixte. Il est composé de plusieurs équations définissant le modèle des différents services de la maison. Ces équations sont des contraintes nécessaires à la minimisation du critère global d'optimisation. Le critère global doit tenir compte du coût financier et de la satisfaction dans sa représentation pour être cohérent avec les objectifs. Le critère global à minimiser est présenté dans l'équation 4.5. Ce critère est un assemblage de deux membres. Le premier est le coût financier de l'énergie consommée pour le service concerné. Il représente ce que coûte le service sur l'horizon de planification. Celui-ci s'obtient en sommant sur l'horizon anticipatif le produit de l'énergie consommée par son prix lors de la période courante ($\sum_{k=0}^{n} T_k E_k(S)$). Le second membre est l'insatisfaction du service $I(\upsilon(S))$. L'insatisfaction du service correspond à la capacité du service à répondre aux exigences de l'habitant $\upsilon(S)$. Plus le service est proche des exigences demandées, plus l'insatisfaction sera faible. Par exemple, dans le cas d'un chauffage, si l'écart entre la température actuelle et la température souhaitée est élevée, l'insatisfaction du service chauffage sera élevée aussi. Le paramètre $\lambda$ permet d'ajuster l'importance de l'insatisfaction par rapport au coût financier. Chaque service présent dans le problème possède un coût et une insatisfaction, c'est pourquoi ils sont aussi présents dans le critère global avec la somme sur l'ensemble des services. Une des contraintes pour obtenir une solution au problème est que l'énergie totale disponible pour les services soit supérieure à la somme des énergies consommées. La constante $\lambda$ est un paramètre d'ajustement permettant de privilégier au choix l'influence de l'énergie ou de la satisfaction.

$$J_{global} = \sum_{S \in \mathcal{S}^T} \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k E_k(S) + \lambda \times I(\upsilon(S)) \right) \tag{4.5}$$

Dans la pratique, ce critère global est séparé, avec un critère général du

côté superviseur, et des critères locaux pour les agents. Ces critères respectent les normes définies pour le critère global et respectent le partage entre insatisfaction et coût financier. Il est primordial que le critère local des agents et le critère général du superviseur soient de même nature que le critère global à minimiser dans une optique de cohérence. Le critère général du superviseur est différent du critère global, puisqu'il intègre les services agents dans la résolution et les différencie des services *réguliers*. Le critère général formalisé avec l'équation (4.6) est composé de deux parties semblables. Chacune des deux parties possède la même architecture que le critère global, i.e. un membre traitant du coût financier et un membre traitant de l'insatisfaction. Cependant, la première partie concerne uniquement les services *réguliers*, tandis que la seconde uniquement les services agents. L'intégration des services agents étant différentes, une différenciation est effectuée. La différenciation provient du nombre de profils envoyés par les agents qui force à changer la méthode. L'énergie consommée des services agents dépend du profil sélectionné pour chacun des services. Cette notion de choix de profil déjà mise en avant précédemment, se retrouve dans le critère. En effet, le membre concernant les services de type agent, est une somme sur l'ensemble des profils de chaque agent, de l'influence de chacun des profils sur la consommation énergétique et l'insatisfaction. Un seul profil est conservé par agent donc de cette somme il ne restera que l'influence d'un profil par service agent.

$$\begin{aligned} J_{iter} = & \sum_{S \in \mathcal{S}^R} \left( \sum_k T_k E_k(S) + \lambda \times I(\upsilon(S)) \right) + \\ & \sum_{S \in \mathcal{S}^D} \sum_i \zeta_i \left( \sum_k T_k E_k(S, \mathbb{P}_i^j) + \lambda \times I(\upsilon(S), \mathbb{P}_i^j) \right) \end{aligned} \tag{4.6}$$

#### 4.3.4.4 Différentes méthodes de génération

Comme décrit précédemment, le problème de gestion de l'énergie suit un processus itératif de résolution. À chaque itération, le superviseur résout un problème global, construit à partir des informations reçues des agents. Ce dernier évolue au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmente, puisque les informations envoyées par les agents sont de plus en plus précises. L'objectif du superviseur est d'obtenir une solution satisfaisante au problème global lors de l'arrêt des itérations. Pour se faire, il doit affiner les zones de recherche qui seront transmises aux agents, afin d'ajuster son levier d'action sur les agents (i.e. les coefficients de pénalisation). Le superviseur doit, d'une itération pour la suivante, calculer des nouveaux vecteurs de coefficients de pénalisation, dans l'optique de modifier les solutions des agents. La solution globale est renouve-

lée et possiblement améliorée. Un algorithme d'optimisation pour la génération des vecteurs de coefficients de pénalisation sur l'ensemble des itérations du processus de résolution permet d'utiliser le levier d'action du superviseur en cherchant à maximiser son efficacité. L'objectif est d'utiliser le processus itératif de résolution dû à la communication avec les agents pour optimiser les vecteurs de coefficients de pénalisation. Plusieurs méta-heuristiques existent répondant à ce problème.

**Algorithmes génétiques** Inspirés de la biologie, les algorithmes génétiques sont des méta-heuristiques. Ils font partie de la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur objectif est d'obtenir une solution approchée à un problème donné. Pour se faire, la solution est approchée par itérations successives. Avant d'expliquer le fonctionnement des algorithmes génétiques, il faut d'abord définir certains termes. Un algorithme génétique s'applique à une population d'individus et non pas un seul individu. Chaque individu de la population est une solution au problème. Par analogie avec la biologie, chaque individu d'une population est codé par un chromosome. Ce codage est la représentation génétique choisie pour l'espace des solutions. Il existe plusieurs types de codage, tel que le codage binaire ou le codage à caractères multiples. Chaque chromosome est donc un point de l'espace des solutions. Chaque chromosome est composé de gènes dépendant du codage choisi. Le codage de la population en chromosome est primordial pour le fonctionnement de l'algorithme. L'étape initiale pour un algorithme génétique est la création d'une population initiale générée de façon aléatoire. Un codage en accord avec la nature du problème est défini, et chaque individu de la population est codé sous la forme d'un chromosome. Une fois la population générée, le processus d'évolution commence. Pour chaque génération de la population (une itération de l'algorithme), il faut créer la descendance à partir de la population courante. La sélection d'un groupe d'individus, les "parents" est la première étape. Pour choisir les parents, chaque chromosome de la population courante est évalué. Une fonction d'adaptation mesure la capacité du chromosome à répondre au problème. Grâce à la fonction d'adaptation, les parents sont sélectionnés suivant une méthode de sélection particulière, telle que la sélection par rang, ou la sélection par tournoi. Le groupe de parents est composé des éléments de la population courante qui vont engendrer la nouvelle génération. La création de la nouvelle population est effectuée avec l'étape de croisement. Lors de celle-ci, deux chromosomes sont choisis dans le groupe des parents, et ils engendrent deux chromosomes fils en s'échangeant des gènes. Il existe plusieurs méthodes de croisement comme le croisement simple point, ou le croisement multi-point. La nouvelle population étant générée à partir des meilleurs chromosomes de la génération précédente, la moyenne d'adaptation pour celle-ci est généralement

meilleure : il faut donc vérifier cette propriété. L'étape de croisement conserve le génome, contrairement à l'étape de mutation. Celle-ci intervient après la génération de la nouvelle population lors de l'étape de croisement. Chaque chromosome fils possède une probabilité de subir une mutation. La probabilité de mutation est un paramètre de l'algorithme. La mutation introduit du nouveau matériel génétique dans le problème. La mutation prend différentes formes, dans certains cas, des gènes du chromosome sont modifiés. De nouveaux chromosomes peuvent aussi être générés aléatoirement et remplacés le chromosome fils originel. Après mutation, la nouvelle population est obtenue, et servira à créer une nouvelle génération en suivant le même processus, jusqu'à ce que une des conditions d'arrêt soit atteinte. Plusieurs conditions d'arrêt existent, les plus communes étant :

- une solution satisfaisante est obtenue,
- le nombre maximal de générations est atteint,
- les ressources allouées pour la résolution sont épuisées,
- le maximum d'adaptation est atteint, l'adaptation ne pourra être améliorée avec la création d'une nouvelle génération.

**Recherche tabou** La recherche tabou fut inventée fin des années 1980 ([89] et [90]). Cette méthode fut ensuite ajustée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire et des problèmes d'ordonnancement ([91]). Une autre application de la méthode est la résolution d'un problèmes de satisfaction de contraintes ([92]). La recherche tabou est une méta-heuristique de recherche locale. Le déroulement de la recherche tabou suit un processus de recherche itératif. À chaque itération, l'algorithme cherche à améliorer la solution courante. Pour se faire, à partir de la solution courante, un voisinage est générée, et dans ce dernier, la meilleure solution est retenue. Elle devient la solution courante, etc... Le processus est répétée jusqu'à obtenir une solution satisfaisant les contraintes d'arrêt. Néanmoins, ce processus ne permet que de chercher localement, et l'algorithme de recherche peut tomber dans une situation où d'itération en itération, il retombe sur les mêmes solutions, entrant dans un cycle. Pour éviter ce phénomène, une liste tabou existe ; elle contient les solutions déjà visitées et les interdit à l'algorithme de recherche. La longueur de la liste est variable suivant le problème à traiter. Deux phases distinctes sont présentes dans la recherche tabou, une phase d'intensification et une phase de diversification.

**La phase d'intensification** se caractérise par une recherche rapide d'un ou plusieurs optimum locaux. C'est durant cette phase que la solution courante cherche à être améliorée.

**La phase de diversification** sert à limiter l'effet "locale" présent dans la recherche tabou, puisque celle-ci tend à obtenir un optimum local et non

global. La phase de diversification est un dispositif visant à forcer l'exploration d'autre zone de l'espace de recherche. Des solutions moins intéressantes sont considérées puis affiner pour retrouver un autre optimum local peut être meilleur.

Une phase d'intensification est effectuée, suivi d'une phase de diversification, et ce cycle est répété jusqu'à atteindre les contraintes d'arrêt. L'enchainement de ces deux phases permet d'explorer l'espace des solutions sans rester prisonnier du voisinage d'un optimum local.

La recherche tabou a été préférée aux algorithmes génétiques pour générer les vecteurs de coefficients de pénalisation. Les conditions d'utilisation vis à vis du problème posé sont plus en accord avec la recherche tabou et plus naturelles. Améliorer pas à pas la solution en cherchant dans le voisinage est plus adaptée que de régénérer une population complète à partir de la solution. L'utilisation des algorithmes génétiques est possible, cependant, une des caractéristiques du problème de génération de ces vecteurs est le manque d'informations de l'influence du vecteur sur la solution globale. La quantité d'information nécessaire pour mettre en place un algorithme génétique est beaucoup plus importante que pour la recherche tabou. À chaque itération, un nouvel ensemble de vecteurs est crée, et transmis aux agents. La solution obtenue lors de l'itération est modifiée, mais il est difficile d'identifier la cause puisque l'influence des agents et surtout les opérations internes aux agents est une inconnue à gérer. Que ce soit la sélection, le croisement ou la mutation, il est nécessaire de connaître parfaitement les conséquences des transformations des individus sur la solution générale. La nature secrète des agents empêche la connaissance des ces informations, et rend difficile voire impossible la création des règles de l'algorithme génétique. Avec la recherche tabou, le processus de résolution est naturel. À partir de la solution courante, un vecteur de coefficients de pénalisation est obtenu, et c'est dans son voisinage que la recherche s'effectue.

#### 4.3.4.5 Mise en place de l'algorithme de recherche tabou

L'algorithme de recherche tabou mis en place s'applique à partir de la seconde itération. Pour l'itération courante notée $j$, l'algorithme commence par le calcul du vecteur de coefficients de pénalisation dérivé de la solution obtenue $\mathbb{S}^j$. Ce vecteur est calculé avec l'équation (4.2) et est noté $\mathbb{P}_0^{j+1}$. Il s'agit du vecteur de base utilisé pour la génération des nouveaux vecteurs de coefficients de pénalisation qui seront transmis dans l'itération $j+1$. À partir de $\mathbb{P}_0^{j+1}$, $N$ nouveaux vecteurs sont créés. La création des vecteurs suit l'équation (4.7). Pour chaque vecteur créé, et pour chaque période, l'algorithme tire une valeur aléatoire pour le coefficient de pénalisation correspondant. $\Delta_T$ est un

paramètre qui est ajusté pour modifier la valeur du voisinage de $\mathbb{P}_0^{j+1}$. En choisissant $\Delta_T = 0,1$, le nouveau vecteur possèdent toutes ses valeurs entre 90% et 110% du vecteur $\mathbb{P}_0^{j+1}$. Les vecteurs obtenus de cette façon sont des voisins du vecteur $\mathbb{P}_0^{j+1}$ obtenu à partir de la solution courante.

$$\begin{gathered}\forall j \in \mathbb{N}, \forall m \in [\![1; N]\!], \forall k \in [\![0; n-1]\!], \\ \mathbb{P}_m^{j+1}(k) = \mathbb{P}_0^{j+1}(k) * random(1 - \Delta_T; 1 + \Delta_T) \end{gathered} \tag{4.7}$$

Une fois calculés, les vecteurs sont transmis, les individus de la population sont inclus dans la liste tabou et le superviseur lance la résolution pour l'itération suivante. Une nouvelle solution est obtenue, etc... La taille de la liste tabou est ajustée en fonction des performances désirées. La phase d'intensification consiste à appliquer une valeur faible pour $\Delta_T$, noté $\Delta_{T_I}$, typiquement comprise entre 0 et $0,2$. La phase de diversification utilise le même processus mais avec une valeur de $\Delta_T$, noté $\Delta_{T_D}$, nettement plus importante, comprise entre $0,5$ et 1. La phase de diversification intervient périodiquement suivant un cycle de longueur $C_d$. $\Delta_{T_I}$, $\Delta_{T_D}$ et $C_d$ sont des paramètres de l'algorithme à régler en fonction des performances de même que la longueur de la liste tabou.

**Initialisation** L'initialisation consiste à récupérer les données nécessaires à la modélisation des services linéaires. Ensuite, la première génération est créée avant d'être envoyée aux agents. Lors de l'itération 0 soit l'initialisation, aucune solution n'a été calculée. La création du premier ensemble de vecteurs suit un processus aléatoire. Les valeurs des gènes sont tirés aléatoirement entre 1 et $1 + E_k^{max}$, qui sont les bornes de la fonction permettant de calculer les vecteurs de coefficients de pénalisation.

## 4.4 Conclusion

Le problème général de prise en compte des agents a été solutionné en proposant de les intégrer sous la forme d'agent. Des modifications du processus de résolution ont été effectués pour permettre cela. La méthode proposée se présente sous la forme d'un système semi-distribué présentant un algorithme de résolution itératif en accord avec le paradigme agent. La meilleure solution obtenue lors des itérations est conservée et appliquée par la suite.

L'introduction de l'architecture semi-distribuée pose le problème du dialogue avec les agents et surtout du contrôle par le superviseur sur ces derniers. Le besoin d'orienter les recherches pour les agents est offert grâce aux coefficients de pénalisation introduits. Ils permettent d'indiquer à l'agent où privilégier ses recherches. Une méta-heuristique a été proposée pour la résolution

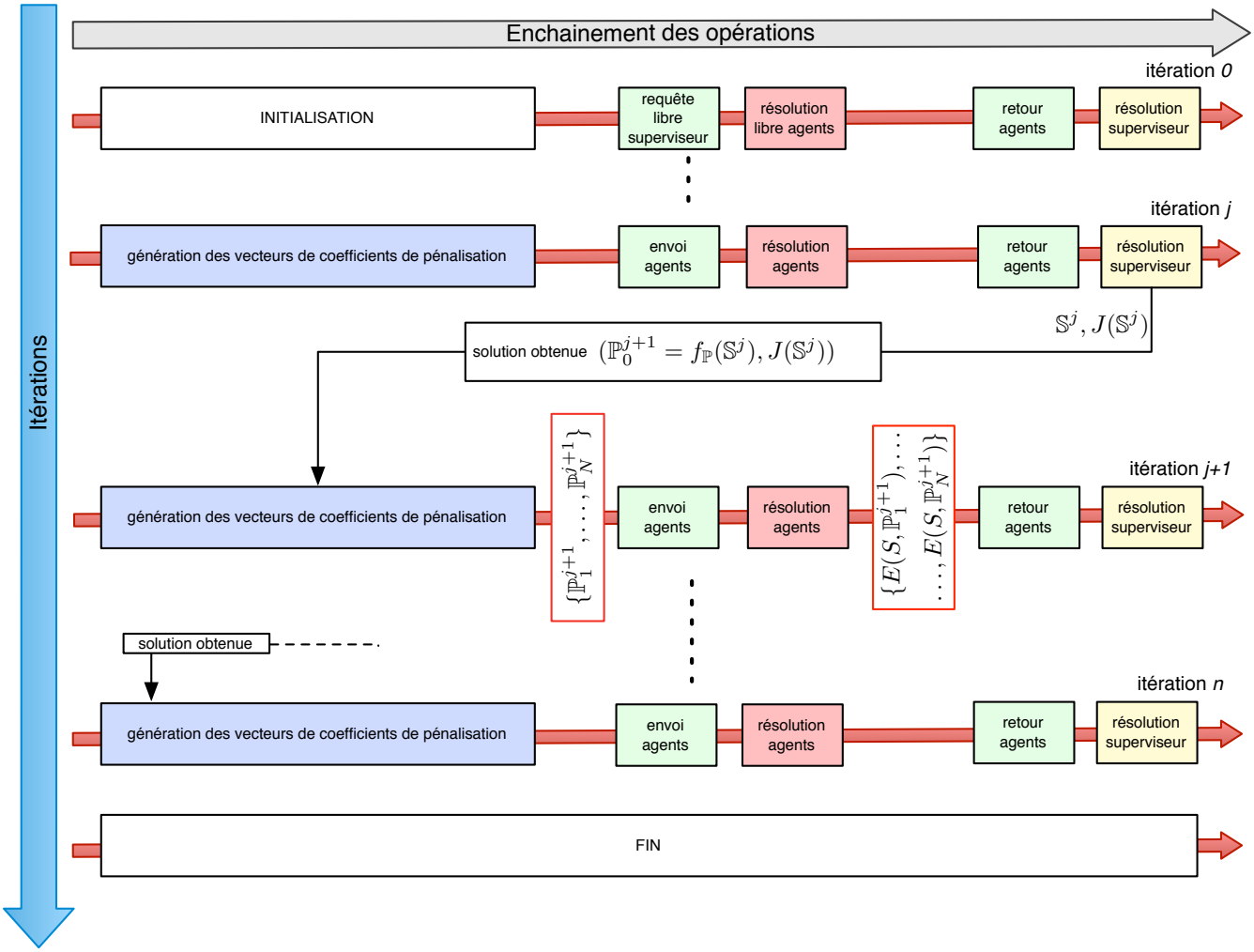


FIGURE 4.14 – Déroulement général de la résolution

globale du problème, incluant une heuristique pour le calcul des coefficients de pénalisation. La génération des vecteurs de coefficients de pénalisation est un problème en soi. Pour y répondre, la recherche tabou a été implémenté, elle se charge "d'optimiser" les vecteurs de coefficients d'itération en itération pour améliorer la solution globale du problème. La figure 4.14 illustre le déroulement de la résolution globale du problème, de la première itération jusqu'à la dernière. Il est aussi nécessaire de développer les agents pour avoir une meilleure vision du fonctionnement de l'algorithme de résolution proposé.

# Chapitre 5

# Services singuliers implémentés

## 5.1 Spécificités d'un agent

La solution proposée pour l'intégration des services *singuliers* voient l'introduction des agents dans la résolution. Dans la première partie du chapitre, les spécificités des agents seront abordées, tandis que les deux parties suivantes présenteront des exemples d'agents crées de toutes pièces.

### 5.1.1 Fonctionnement général

Les services de type agent ont été introduits afin d'augmenter la capacité du système de gestion énergétique pour prendre en compte une diversité plus importante d'équipements. La solution proposée implique la création d'un superviseur gérant la résolution globale, tandis que les agents doivent résoudre un sous-problème local. Comme décrit précédemment, le superviseur, lors de la gestion de la résolution, utilise un outil afin d'orienter les recherches des agents, les coefficients de pénalisation. Le superviseur communique avec les agents au début de chaque itération, après avoir généré la nouvelle population de vecteurs de coefficients de pénalisation. Celle-ci est ensuite envoyée dans sa totalité à l'agent. Ceci introduit une hypothèse importante sur le fonctionnement de l'agent, pour profiter du mécanisme de résolution proposé, l'agent doit être capable de comprendre le superviseur, et donc d'intégrer les coefficients de pénalisation dans la résolution locale. L'agent reçoit donc les vecteurs de coefficients de pénalisation lui indiquant quelles sont les périodes de l'horizon de planification les plus intéressantes pour la consommation. Une seconde hypothèse est introduite ici implicitement. En effet, les coefficients de pénalisation informent l'agent sur la disponibilité de l'énergie électrique. Pour que le mécanisme de résolution proposé fonctionne, l'agent doit consommer de l'électricité. Ce point est discuté par la suite. L'agent reçoit donc $N$ vecteurs de coefficients de pénalisation appelant ainsi pour chacun d'eux une solution lo-

cale. Tous les vecteurs sont différents, il n'y a pas de doublon. Les vecteurs reçus sont des paramètres du problème local propre à l'agent. Cela signifie que pour chaque vecteur, une instance du problème local est à résoudre pour l'agent. Concrètement, l'envoi de plusieurs vecteurs de coefficients de pénalisation a pour objectif de parcourir l'espace des solutions, puisque chacun des vecteurs favorise une zone particulière de recherche. L'espace des solutions du problème local à résoudre pour un agent, est l'ensemble de profils de consommation possibles associé au service concerné. Un profil de consommation est un plan de consommation énergétique sur l'horizon de planification calculé par l'agent. L'espace des solutions peut être infini. La figure 5.1 représente l'intégration des agents dans le système de résolution avec l'introduction de l'agent courtier pour harmoniser et faciliter la communication entre le superviseur et tous les agents. Il y a unicité des vecteurs envoyés à l'agent par le superviseur, c'est à dire que lors de la résolution, peu importe l'itération, jamais un vecteur n'est transmis une seconde fois.

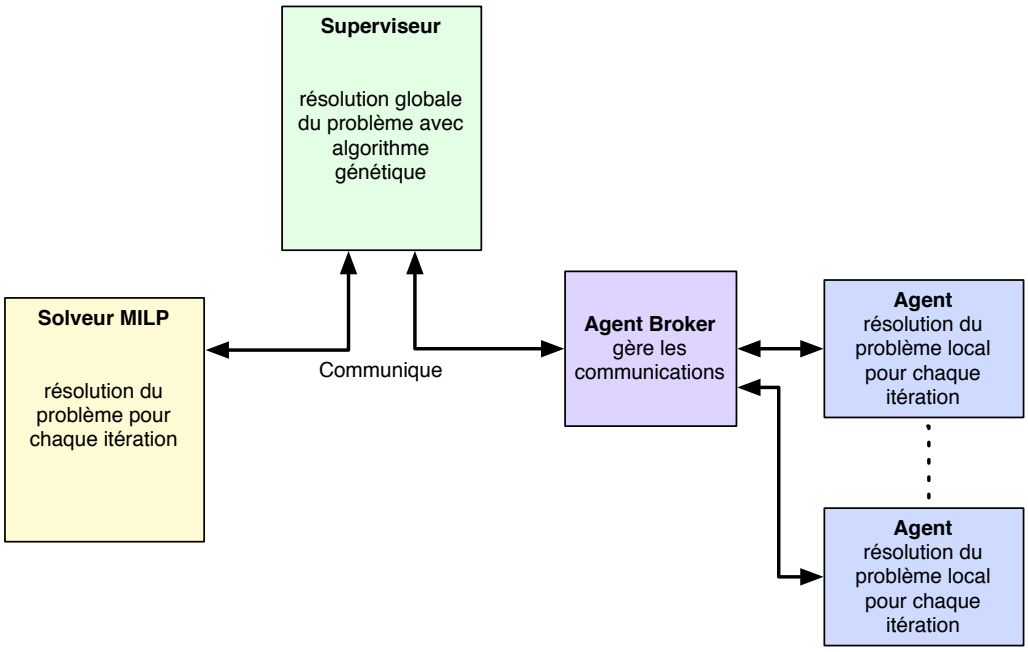


FIGURE 5.1 – Déroulement général de la résolution

### 5.1.2 Déroulement d'une itération

Le démarrage de la résolution pour un agent commence à la réception d'une requête du superviseur contenant un ensemble de taille $N$ de vecteurs de coefficients de pénalisation. Comme décrit précédemment, ces derniers sont des paramètres du sous-problème local à résoudre. Ceux-ci favorisent la consom-

mation dans certaines périodes de l'horizon en les rendant plus attrayantes pour l'agent. L'agent résout donc $N$ instances différentes du sous-problème local. Ces sous-problèmes sont créés à partir des vecteurs des coefficients de pénalisation, qui sont la représentation de l'environnement de l'agent, et aussi des paramètres internes à l'agent. Des limites de fonctionnement ou encore la satisfaction de l'agent sont des paramètres pouvant exister lors de la création du sous-problème. La nature de l'agent introduit un nombre différent de paramètres particuliers à l'agent pour la création des sous-problèmes. Chaque instance du sous-problème est différente puisque les vecteurs de coefficients de pénalisation sont uniques. Chacun des vecteurs de coefficients de pénalisation $\mathbb{P}_i^j i \in [\![1; N]\!]$ favorise une zone de recherche spécifique $\mathbb{Z}_i^j i \in [\![1; N]\!]$ de l'espace des solutions. Tous les profils de consommation d'une zone de recherche sont des solutions voisines pour l'instance du sous-problème associée. Comme entre chaque instance, seul le vecteur de coefficients de pénalisation est différent, cela modifie l'espace de recherche des solutions de l'instance du sous-problème en donnant plus d'importances à certaines zones. Si l'espace des solutions est représenté sous la forme d'un plan en deux dimensions, un vecteur de coefficient de pénalisation $\mathbb{P}_i^j$ limite l'espace des solutions à une portion de plan $\mathbb{Z}_i^j$. La solution de l'instance du sous-problème construite à partir de $\mathbb{P}_i^j$ est incluses dans $\mathbb{Z}_i^j$. Il y a unicité des vecteurs de coefficients de pénalisation, donc par conséquence, chaque instance du sous-problème est unique. Cependant, il est possible que l'intersection des zones de recherche $\mathbb{Z}_i^j$ ne soit pas vide. L'objectif avec l'introduction des vecteurs de coefficients de pénalisation est d'obliger l'agent à chercher dans certaines zones plus intéressantes de l'espace des solutions, tout en évitant de parcourir celui-ci dans sa globalité. En multipliant le nombre de vecteurs envoyés à l'agent, et en instaurant un dialogue sur plusieurs itérations, l'agent explore l'espace des solutions de manière satisfaisante pour le superviseur.

La résolution des sous-problèmes s'effectue ensuite et dépend de la nature de l'agent. Elle peut être non linéaire avec la méthode de résolution de Nelder Mead par exemple. Chaque solution est obtenue par exploration d'une zone de l'espace des solutions dépendant du vecteur de coefficients de pénalisation associé à l'instance résolue. L'objectif de la résolution d'une instance du sous-problème est d'explorer l'espace des solutions dans la zone définie par le vecteur de coefficients de pénalisation associé. La solution obtenue est un plan de consommation énergétique, nommé profil de consommation, respectant les paramètres internes de l'agent et la représentation induite de son environnement. Les $N$ vecteurs de coefficients de pénalisation fournissent $N$ représentations de l'environnement. En effet, les paramètres internes à l'agent réduisent l'espace des solutions, qui est encore affiné avec la représentation de l'environnement.

Une fois toutes les solutions obtenues, c'est-à-dire une solution par instance

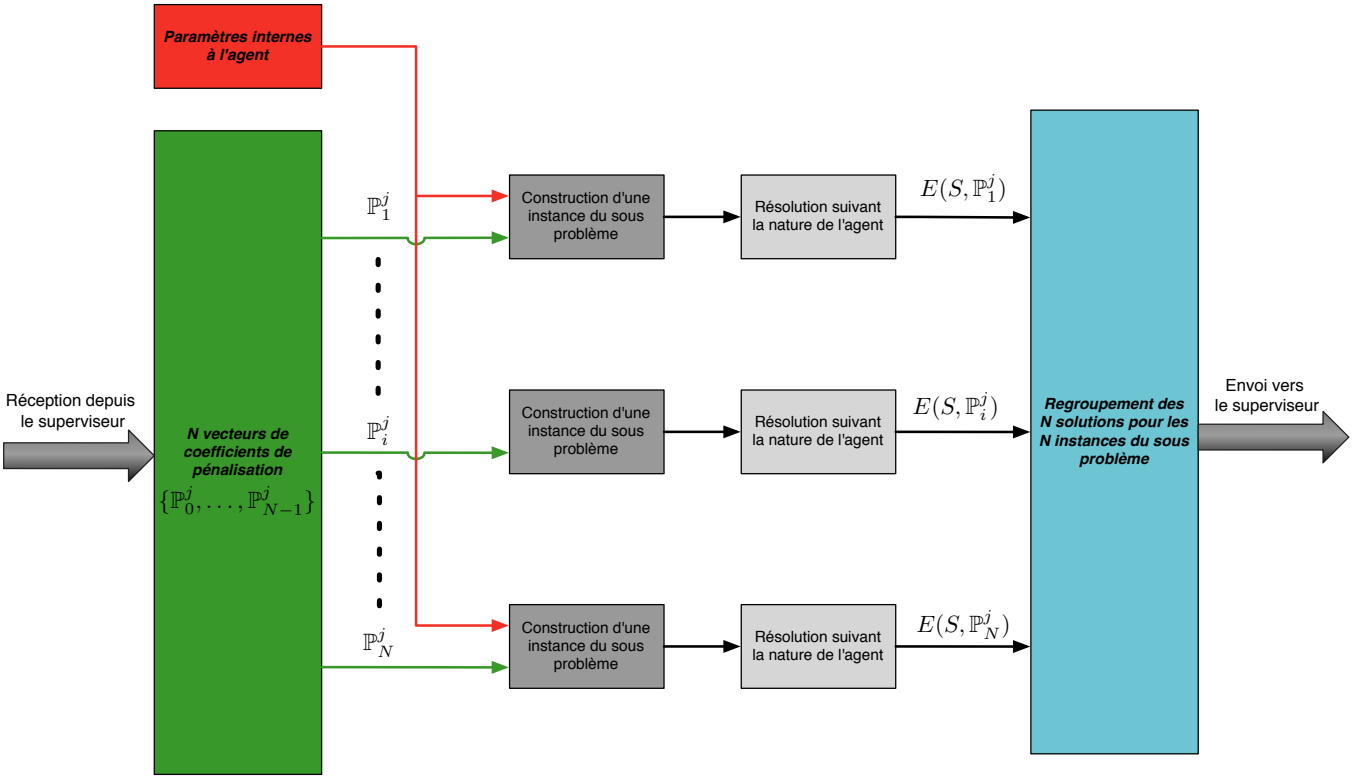


FIGURE 5.2 – Déroulement général de la résolution pour un agent

du sous-problème, ces dernières sont envoyées par l'agent à l'agent courtier puis au superviseur. La figure 5.2 illustre le processus suivi par l'agent lors d'une itération.

### 5.1.3 Critère de résolution et satisfaction

Chaque agent doit résoudre des sous-problèmes locaux afin de fournir des profils de consommation au superviseur. Les sous-problèmes à résoudre sont des problèmes de minimisation de critère. Similairement au cas général présenté précédemment, le critère à minimiser dans le cas des agents possède deux influences distinctes. Il est présenté avec l'équation (5.1) avec $C_k$ le coût financier totale de l'énergie consommée durant la période $k$ et $E(k, \theta)$ l'énergie consommée par l'agent pendant la période $k$. $C_k$ est calculé à partir du prix de l'énergie et de la répartition de la consommation. L'agent doit être capable de résoudre le sous-problème ayant ce type de critère.

$$J_{agent}(\mathbb{P}_i^j) = \sum_{k=0}^{n-1} \mathbb{P}_i^j(k) * C_k * E(k, \theta) + \lambda \times I(\theta) \tag{5.1}$$

La première partie concerne toujours la disponibilité de l'énergie et son coût. Néanmoins, la différence notable avec le critère est l'ajout des coefficients de pénalisation dans la formule de calcul. Minimiser ce membre consiste à minimiser l'énergie consommée, sachant qu'un coefficient de pénalisation important pour une période augmente le "coût" de la période. Les coefficients de pénalisation influencent la résolution interne aux agents en affectant un coût supplémentaire aux périodes inintéressantes. La seconde partie concerne l'insatisfaction de l'agent. La notion d'insatisfaction pour un agent est ouverte, puisque la liberté inhérente aux agents fait que la modélisation de la satisfaction peut revêtir beaucoup de formes différentes suivant la situation. Le critère à minimiser pour les agents est similaire au critère global dans un souci d'homogénéité de la résolution.

## 5.2 Création d'un premier agent de test

Pour les besoins de l'étude, il a été nécessaire de créer un agent pour tester le fonctionnement du système de résolution global. L'agent modélisé est une machine à laver qu'il est possible d'interrompre à tout moment. Les services agents mis en place dans le problème, fonctionnent en suivant un principe similaire aux services linéaires. Il s'agit de créer des profils de consommation à partir des vecteurs de coefficients de pénalisation et du tarif effectif transmis par le superviseur. Néanmoins, la satisfaction de l'agent intervient aussi, mais de manière différente.

### 5.2.1 Modélisation de l'agent machine à laver

La machine à laver est modélisée par une machine à états. La particularité de la machine à laver modélisée pour les tests est que son fonctionnement est totalement interruptible. Ainsi, chacun des modes de fonctionnement que sont le prélavage, le chauffage, le lavage et l'essorage peuvent être interrompus. De la même manière, après chaque mode de fonctionnement, un temps d'attente est possible avant de lancer l'exécution du mode de fonctionnement suivant. Il ne s'agit pas d'une interruption mais d'une attente, puisque l'activité effectuée durant ce mode est arrivée à son terme. Les interruptions et attentes représentent des états de la machine à laver qui sont pris en compte par le modèle. Chacun des états représentés dans la figure 5.3 correspond à un état de fonctionnement de la machine à un instant donné. L'ensemble des états retenus pour la modélisation sont :

- E0 : État de départ, la machine est à l'arrêt.
- E1 : Étape de prélavage. Elle peut être interrompue ($P$).
- E2 : Étape de chauffage de l'eau. Elle peut être interrompue ($C$).

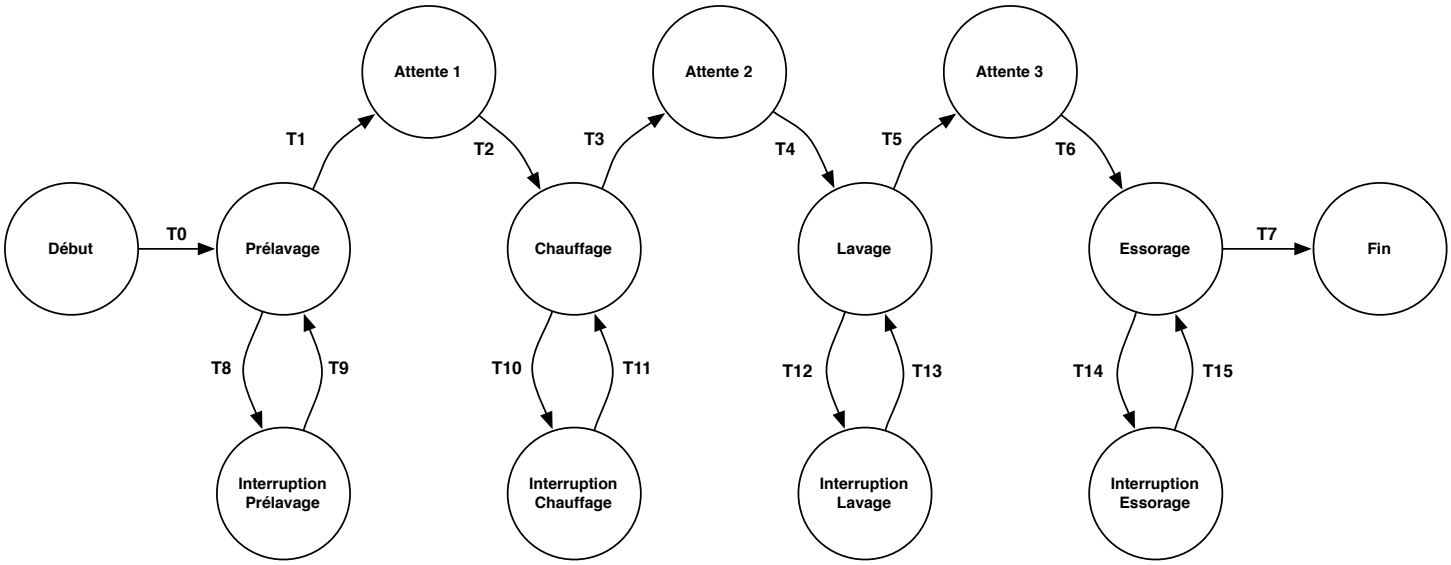


FIGURE 5.3 – Réseau de Petri représentant la machine à laver

- E3 : Étape de lavage. Elle peut être interrompue ($L$).
- E4 : Étape de essorage. Elle peut être interrompue ($E$).
- E5 : État de fin, la machine est à l'arrêt après avoir effectuée son cycle de lavage.
- E6 : Attente entre le prélavage et le chauffage ($A1$).
- E7 : Attente entre le chauffage et le lavage ($A2$).
- E8 : Attente entre le lavage et l'essorage ($A3$).
- E9 : Interruption pendant le prélavage ($IP$).
- E10 : Interruption pendant la chauffage ($IC$).
- E11 : Interruption pendant le lavage ($IL$).
- E12 : Interruption pendant l'essorage ($IE$).

La durée passée dans un état interruption ou d'attente est fixe. Cependant, il est possible de ne pas quitter l'état afin d'augmenter la durée de l'interruption. La durée d'un état interruption est un paramètre de l'agent. Dans le cas présent, la durée est un pourcentage de la phase interrompue. Différentes variables sont présentes afin de s'assurer que la durée des états "normaux" n'excèdent pas leur durée nominale. La durée d'un état d'attente ou d'interruption est notée $\mathcal{T}_{nom-etat}$. De la même manière, $t_{nom-etat}$ est le temps écoulé dans l'état. $N_E$ états d'attente et/ou d'interruption sont autorisés au total. Les états d'attente et d'interruption ayant une durée fixe, c'est le nombre de passages dans l'état qui permet d'ajuster la durée de l'attente totale. À cette fin est introduit un compteur nommé $C_{Ai}$, comptant le nombre de passages dans l'état $Ai$, il évolue lors du parcours de la machine à état. $N_{Ai}$ est le nombre

d'occurrences de l'état, tandis que $L_{Ai}$ est le nombre limite d'occurrences de l'état. Les limites sont des paramètres de l'agent qui sont fixées par le constructeur ou concepteur du modèle. Le nombre d'occurrences n'évolue pas lors du fonctionnement de la machine à états, mais sa valeur peut être modifiée entre deux instances de fonctionnement.

Voici les transitions découlant de cette notation :

T0 : Événement : déclenchement de la machine à laver ($DE$)
T1 : Prélavage fini ($t_P = t_{prelavage}$) et $N_{IP} = C_{IP}$ ($t_{prelavage}$ est la durée de prélavage)
T2 : État d'attente 1 terminé ($t_{A1} = t_{attente;1}$)
T3 : Chauffage terminé ($Temp_{eau} \geq Temp_{programmee}$) et $N_{IC} = C_{IC}$
T4 : État d'attente 2 terminé ($_{A2}t = t_{attente;1}$)
T5 : Lavage fini ($t_L = t_{lavage}$) et $N_{IL} = C_{IL}$ ($t_{lavage}$ est la durée de lavage)
T6 : État d'attente 3 terminé ($t_{A3} = t_{attente;1}$)
T7 : Essorage fini ($t_E = t_{essorage}$) et $N_{IE} = C_{IE}$ ($t_{essorage}$ est la durée d'essorage)
T8 : État d'interruption prélavage ($IP$) et $t_P < t_{prelavage}$
T9 : État d'interruption prélavage terminé ($t_{IP} = \mathcal{T}_{IP}$)
T10 : État d'interruption chauffage ($IC$) et $Temp_{eau} < Temp_{programmee}$
T11 : État d'interruption chauffage terminé ($t_{IC} = \mathcal{T}_{IC}$)
T12 : État d'interruption lavage ($IL$) et $t_L < t_{lavage}$
T13 : État d'interruption lavage terminé ($t_{IL} = \mathcal{T}_{IL}$)
T14 : État d'interruption essorage ($IE$) et $t_E < t_{essorage}$
T15 : État d'interruption essorage terminé ($t_{IE} = \mathcal{T}_{IE}$)

Toutes les durées des états d'attente sont calculées de la manière suivante :

$$t_{attente;i} = N_{Ai} * \mathcal{T}_{Ai}$$

Certaines équations sont nécessaires pour décrire correctement les transitions, et éviter les erreurs de fonctionnement. L'équation 5.2 empêche le nombre d'états d'interruptions ou d'attentes de dépasser la limite imposée.

$$N_E \geq N_{A1} + N_{A2} + N_{A3} + N_{IC} + N_{IP} + N_{IL} + N_{IE} \tag{5.2}$$

Certaines contraintes de description sont aussi à écrire permettant de limiter le nombre d'interruptions pour chaque état du modèle :

$$
\begin{aligned}
L_{A1} &\geq N_{A1} \\
L_{A2} &\geq N_{A2} \\
L_{A3} &\geq N_{A3} \\
L_{IP} &\geq N_{IP} \\
L_{IC} &\geq N_{IC} \\
L_{IL} &\geq N_{IL} \\
L_{IE} &\geq N_{IE}
\end{aligned}
$$

**Qu'est ce qu'un profil de consommation ?** La modélisation de la machine à laver permet d'établir clairement les besoins nécessaire à la caractérisation d'un profil. Un profil de consommation est une séquence de parcours de la machine à états à laquelle est associée une date de départ. En effet, la séquence de parcours de la machine à états permet de calculer la consommation énergétique à partir d'une date de départ calculée auparavant. La séquence d'enchainements des états caractérise la forme du profil de consommation. Cette séquence dépend du nombre d'interruptions et d'états d'attente. Il s'agit des leviers que possèdent l'agent pour la création de profils de consommation répondant au sous-problème. La figure 5.4 illustre les besoins nécessaires pour la définition d'un profil. Le vecteur de variables ci-dessous définit le nombre d'états d'interruption et/ou d'attente présent dans le profil :

$$
\begin{pmatrix}
N_{A1} \\
N_{A2} \\
N_{A3} \\
N_{IP} \\
N_{IC} \\
N_{IL} \\
N_{IE}
\end{pmatrix}
$$

Ce dernier est calculé lors de l'optimisation afin de répondre au mieux au problème local, ainsi que la date de départ. Ainsi, pour le profil de fonctionnement normal sans interruption, le vecteur est nul. Introduire des interruptions modifie la forme du profil de consommation indépendamment de la date de départ. Lors de la résolution du sous-problème local qui consiste à créer des profils de consommation, l'agent calculera pour chaque profil une date de départ et un vecteur contenant le nombre d'interruptions et d'attentes.

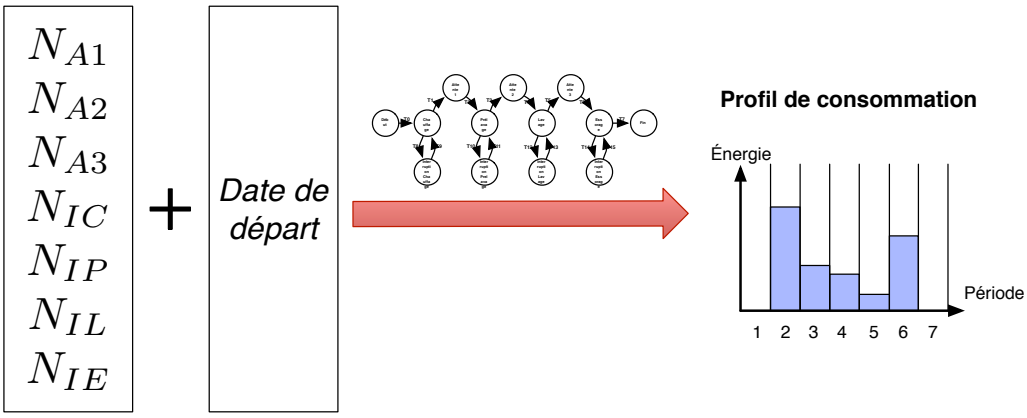


FIGURE 5.4 – Caractérisation d'un profil de consommation

### 5.2.2 Satisfaction de l'agent

La signification de la satisfaction pour un service *singulier* agent est différente de la satisfaction d'un service *régulier* linéaire. En effet, pour ces derniers, la satisfaction représente l'écart entre la valeur mesurée pour la sortie (ex : une température, une date de fin, etc...) par rapport à la consigne, qui est fournie par l'habitant. Dans le cas de l'agent, la satisfaction existe par période, il s'agit de la volonté de l'agent à consommer durant cette période (voir figure 5.5). Choisir de définir la satisfaction de cette façon permet de normaliser les données concernant les agents, en ne se préoccupant pas de savoir si les préférences de l'utilisateur sont des dates ou des températures, ou d'autres données. Cette figure représente la forme générale de la satisfaction pour un agent. Elle est obtenue à partir de plusieurs influences. L'évolution de la satisfaction au cours des périodes est calculée à partir des préférences de l'utilisateur et des contraintes propres dues à la nature de l'agent. Il s'avère que la satisfaction de l'agent est une fonction multi-paramétrique ayant pour variables les préférences de l'utilisateur d'une part, et les limitations ou propriétés propre à l'agent. Dans le cas étudié, l'utilisateur spécifie une date de fin préférée pour sa machine à laver. Cette date est un paramètre pour le calcul de la satisfaction de l'agent spécifique à cet agent. Si l'agent représentait un équipement de type chauffage, les préférences utilisateurs intervenant dans le calcul de la satisfaction seraient la consigne de température à respecter. Les particularités de l'équipement interviennent aussi dans le calcul de la satisfaction. Par exemple, pour une machine à laver, il n'est pas conseillé de conserver le linge mouillé dans le tambour, donc pour y remédier, une limite est présente. Ainsi, en prenant en compte tous ses paramètres internes à l'agent et la satisfaction de l'utilisateur, une fonction de satisfaction propre à l'agent est calculée. Dans le cas présent, les préférences utilisateurs se limitent à une date de fin préférée,

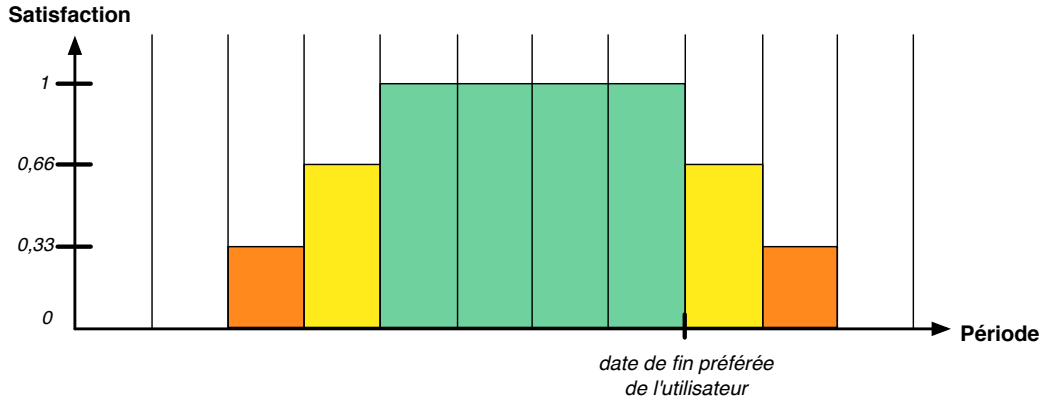


FIGURE 5.5 – Satisfaction de l'agent machine à laver

tandis que les particularités de l'agent modifie la décroissance de la satisfaction et la durée de la zone de satisfaction maximale. La figure 5.5 représente une fonction de satisfaction possible.

### 5.2.3 Introduction de la satisfaction dans le sous-problème de l'agent

La résolution du sous-problème propre à l'agent commence par la réception des vecteurs de coefficients de pénalisation en provenance de l'agent courtier. Ils ont été calculés par le superviseur avec l'aide d'un processus dérivé de la recherche tabou. Un vecteur de coefficients de pénalisation précise à l'agent dans quelle période il est intéressant de consommer de l'énergie. L'introduction de la satisfaction suit ce même principe, lorsque la satisfaction de l'agent pour la période est élevée, il préférera consommer durant cette dernière. La résolution du sous-problème agent consistera pour lui à consommer dans les périodes les plus intéressantes. Pour juger de l'intérêt d'une période, il y a d'abord le coût de l'énergie ainsi que sa disponibilité. Ces deux informations sont calculées par le superviseur et transmises par l'agent courtier. La satisfaction de l'agent intervient ensuite. Une variable regroupant l'influence de la satisfaction, du prix et de la disponibilité de l'énergie pour une période de l'horizon est introduite sous le nom de coefficient agent de la période. Le poids de la période $k$ symbolisé par le coefficient agent est noté $\mathbb{I}(k, \theta)$. Son calcul suit la formule présentée dans l'équation 5.3 où $T_k$ est le prix d'un watt heure.

$$\forall k \in [\![1; n]\!], \mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k) = \frac{\mathbb{P}_i^j(k) * T_k}{max_{v \in [\![1;n]\!]}(\mathbb{P}_i^j(v) * T_v)} * 1Wh + \lambda * \mathbb{I}(k, \theta) \tag{5.3}$$

L'équation de calcul du poids de la période se compose de deux parties distinctes faisant écho au problème global, et leur comportement est semblable

aux coefficients pénalisation. Plus le poids de la période est faible, plus l'agent a intérêt à consommer durant cette dernière. La première partie concerne la disponibilité et le coût de l'énergie, au travers du coefficient de pénalisation associé à la période pour le vecteur concerné et le tarif de l'énergie. Lorsque le tarif et/ou le coefficient de pénalisation sont faibles, consommer de l'énergie pendant la période concernée est intéressant. Celle-ci est normée pour que son influence soit de la même envergure que celle de l'insatisfaction. Le facteur énergie s'applique à $1Wh$ d'électricité pour normé l'influence des coefficients de pénalisation et du tarif pour une unité d'électricité consommée pendant la période concernée. La seconde partie concerne l'insatisfaction de l'agent $\mathbb{I}(k)$. La valeur de l'insatisfaction est 1 auquel la satisfaction est soustraite. L'utilisation de l'insatisfaction dans la formule du poids est sollicité par la nature du sous-problème. L'agent doit sélectionner les périodes avec les valeurs de coefficients agents les plus faibles. Il minimise les valeurs de coefficient agent sur les périodes où il consomme. Il est donc nécessaire que les différentes influences rassemblées dans le coefficient agent de la période fonctionnent dans le même sens, i.e. si c'est intéressant, le coefficient agent est faible. L'introduction de ces coefficients est une méthode d'intégration particulière de l'insatisfaction propre à l'agent concerné.Ils sont introduits pour que l'agent puisse définir grâce à l'heuristique présentée par la suite les périodes les plus intéressantes pour la consommation. Le plan de consommation n'est pas calculé directement à partir du poids.

### 5.2.4 Résolution du sous-problème

L'heuristique de résolution mise ne place dans l'agent présenté se décompose en deux étapes distinctes. La première consiste à identifier la zone la plus intéressante pour l'exécution de l'agent en identifiant la zone de consommation de poids minimale. Cette étape est nécessaire par la suite pour créer un profil de consommation inclus dans cette dernière. Le calcul du profil qui résout le sous-problème s'effectue ensuite avec l'aide d'un algorithme de branch and bound. Pour le bon déroulement de l'algorithme, la date de départ de la consommation doit être ensuite calculée. La création du profil de consommation avec la minimisation du critère s'effectue lors de cette étape.

**Identification de la zone d'exécution** La taille de la séquence est un paramètre qui dépend de la nature de l'agent. Dans le cas présent, l'agent est associé à un équipement dont le fonctionnement possède une durée $d$ qui lui est propre, deux heures ici. Une séquence de trois fois la durée d'exécution est le maximum pour que le service se déroule correctement, autorisant deux fois la durée d'exécution en temps d'interruption. Si la taille de la séquence

excède trois fois la durée de fonctionnement du service, le bon fonctionnement du service est remis en cause. Concrètement, interrompre trop longtemps ou trop souvent le service, comparativement à sa durée de fonctionnement, nuit à ses performances. Soit $X_k$ un échantillon de coefficients agents de taille $m$ (voir équation 5.4). Pour un horizon de planification de taille $n$, $n-m$ échantillons de taille $m$ existent. Il faut identifier le meilleur échantillon parmi l'ensemble.

$$\forall k \in [\![1; n-m]\!], X_k = \{\mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k), \ldots, \mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k+m)\} \tag{5.4}$$

L'identification de la séquence consiste à choisir un des échantillons $X_k$. Pour ce faire, l'ensemble des $n-m$ échantillons sont ordonnés suivant la valeur de leur moyenne (équation 5.5). L'ensemble des échantillons possibles est ordonné. Ensuite, les échantillons dont la moyenne (voir équation 5.5) est proche de la moyenne du meilleur échantillon sont conservés. L'écart entre les deux moyennes doit être inférieur à 10% pour que ce dernier soit conservé. Ces différents paramètres peuvent être ajustés en fonction de la liberté à fournir à l'agent. Il est possible de modifier la valeur du pourcentage afin de conserver plus de séquences. L'ensemble des échantillons conservés subit un nouveau traitement permettant de conserver le meilleur d'entre eux. L'échantillon avec la plus grande variance (équation (5.6)) est retenue comme étant le meilleur pour trouver une date de départ correcte. Lors de l'optimisation définissant le profil qui est effectué ensuite, la consommation de l'agent est repartie dans les périodes avec les coefficients agents les plus faibles. Ainsi, avec une variance importante, les coefficients agents de l'échantillon ayant les plus faibles valeurs sont inférieurs à ceux présents dans un échantillon de moyenne similaire mais avec une variance plus faible. Il s'agit d'accorder plus d'importance aux séquences contenant les coefficients agents les plus faibles, puisqu'ils représentent les périodes les plus intéressantes.

$$\forall k \in [\![1; n-m]\!],$$

$$E(X_k) = \frac{\sum_{p=0}^{m} \mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k+p)}{m} \tag{5.5}$$

$$V(X_k) = \frac{\sum_{p=0}^{m} \left(\mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k+p) - E(X_k)\right)^2}{m} \tag{5.6}$$

En choisissant les échantillons avec les moyennes les plus faibles, les échantillons choisis sont les plus intéressants, assurant la présences de périodes intéressantes dans ces derniers. En choisissant de sélectionner l'échantillon avec la variance la plus importante, les coefficients agents minimaux seront plus faibles que dans le cas où la variance est faible. L'objectif est d'identifier un

échantillon où la moyenne est faible pour s'assurer que les périodes sont intéressantes, tout en conservant des coefficients agents les plus faibles possibles. Ce procédé vise à minimiser à identifier l'échantillon minimisant l'expression présentée dans l'équation (5.7).

$$min_{h\in[\![1;n-6]\!]} J_{intermdiaire}(h) = \sum_{k=h}^{h+6} \mathcal{P}_{\mathbb{P}_i^j}(k) \tag{5.7}$$

L'algorithme de recherche de la zone d'exécution est résumé dans l'algorithme 1.

$\mathfrak{L}$ : **liste des échantillons retenus après le calcul de la moyenne** ;
$X_k^*$ : **échantillon final** ;
$\mathfrak{L} = \emptyset$ ;
**Pour** k **de** 0 **à** n-m **faire**
  calcul de la moyenne de $X_k$, $E(X_k)$
**Fin Pour**
$E^* = min_{k\in[\![1;n-m]\!]} E(X_k)$
**Pour** k **de** 0 **à** n-m **faire**
  **Si** $(\frac{E(X_k) - E^*}{E^*} \leq 0,1)$ **Alors**
    $\mathfrak{L} \leftarrow \mathfrak{L} \cup \{X_k\}$
  **Fin Si**
**Fin Pour**
$X_k^* \in \mathfrak{L}$ avec $V(X_k^*) = max_{X_k\in\mathfrak{L}} V(X_k)$

Algorithme 1 – Algorithme de recherche de la zone d'exécution

**Choix de la date de départ** Une fois l'identification de la séquence la plus apte à répondre au problème, le choix de la date de départ est au centre des préoccupations. La date de départ est un paramètre servant lors de la création du profil de consommation par l'agent. L'identification de la zone d'exécution permet de restreindre les dates de départ possibles aux périodes contenues dans la séquence. En effet, si une période est intéressante, le maximum d'énergie est consommée pendant celle-ci, inutile donc de débuter l'exécution lors d'une demi-période par exemple. Les périodes de la zone d'exécution sont ordonnées de façon croissante suivant les valeurs de coefficients agents, du plus faible au plus élevé. Comme énoncé précédemment, la taille de la zone d'exécution est de trois fois la durée idéale du service. Afin de s'assurer que l'agent consomme dans les périodes les plus intéressantes de la zone d'exécution, $\lceil \frac{m}{2} \rceil$ sont retenues,

celles présentant les coefficients agents les plus faibles. La période de départ est choisie parmi ces dernières, il s'agit de la période avec l'indice le plus petit parmi les $\lceil \frac{m}{2} \rceil$ périodes retenues. En effet, l'agent consomme durant la totalité de la période s'il le peut, or la zone d'exécution est trois fois plus grande que la durée optimale du service. Retenir $\lceil \frac{m}{2} \rceil$ périodes assure qu'à partir de la date de départ retenue, suffisamment de périodes intéressantes sont disponibles pour la consommation, puisque la durée idéale du service est inférieure à la moitié de la zone d'exécution.

La figure 5.6 illustre le processus de choix de la date de départ. Les coefficients agents introduits ne sont utilisés que pour le calcul de la date de départ.

**Création du profil de consommation** Une fois la date de départ calculée suivant le processus décrit précédemment, l'agent doit créer le profil de consommation. Pour se faire, il optimise le nombre d'interruptions qui est un des paramètres du profil, ce qui modifie le profil de consommation, afin de minimiser le critère agent présenté dans l'équation 5.8. L'agent seul n'a pas d'intérêt à s'interrompre, mais pour répondre au sous-problème, c'est peut être nécessaire.

$$J_{agent}(\mathbb{P}_i^j) = \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbb{P}_i^j(k) T_k E(k,\theta) + \lambda \mathbb{I}(k,\theta)) \tag{5.8}$$

$\theta$ représente les paramètres utilisateurs définissant les conditions d'utilisation, ainsi que les paramètres internes de l'agent. Le critère est homogène au critère global présent dans le superviseur, avec une partie traitant de l'énergie et l'autre traitant de la satisfaction, afin de conserver la même politique d'optimisation. La méthode employée s'appuie sur l'exécution d'un algorithme de Branch and Bound sur un arbre de recherche. Un exemple d'arbre de recherche est présenté dans la figure 5.7. Ce dernier respecte les règles suivantes :

- Chaque niveau de l'arbre correspond à un état d'interruption depuis $N_{A1}$ jusqu'à $N_{IE}$ dans le même ordre que pour le vecteur contenant le nombre d'interruption.
- Un nœud de l'arbre représente un nombre d'interruptions pour le niveau associé.
- Le nombre de nœuds fils pour les parents est défini par le nombre limite d'interruption pour l'état suivant. Par exemple, un nœud parent du niveau $N_{A2}$ possède $L_{A3}$ nœuds fils.
- Un chemin depuis la racine jusqu'à une feuille représente un vecteur d'interruption décrivant un profil.

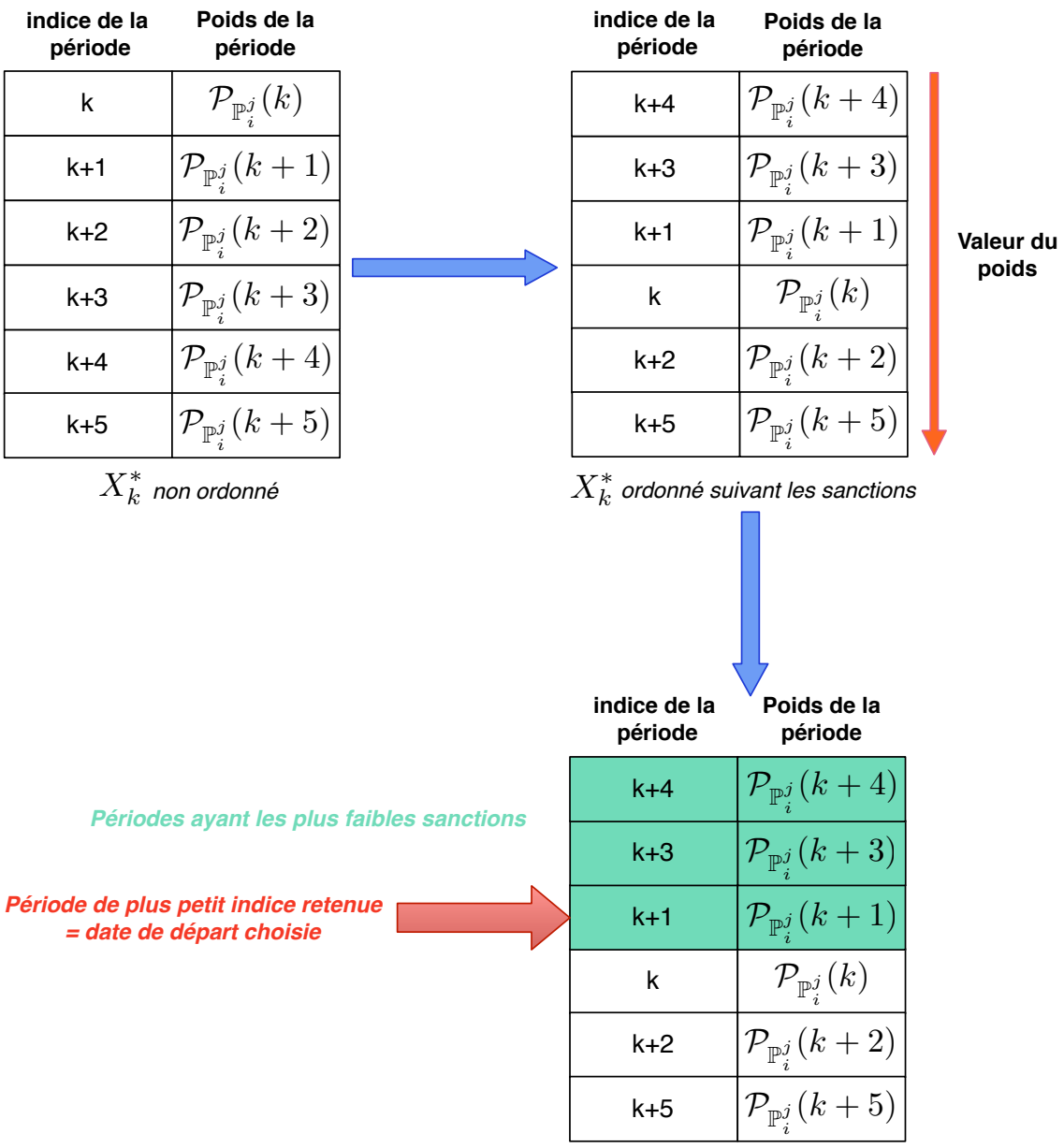


FIGURE 5.6 – Processus de choix de la date de départ

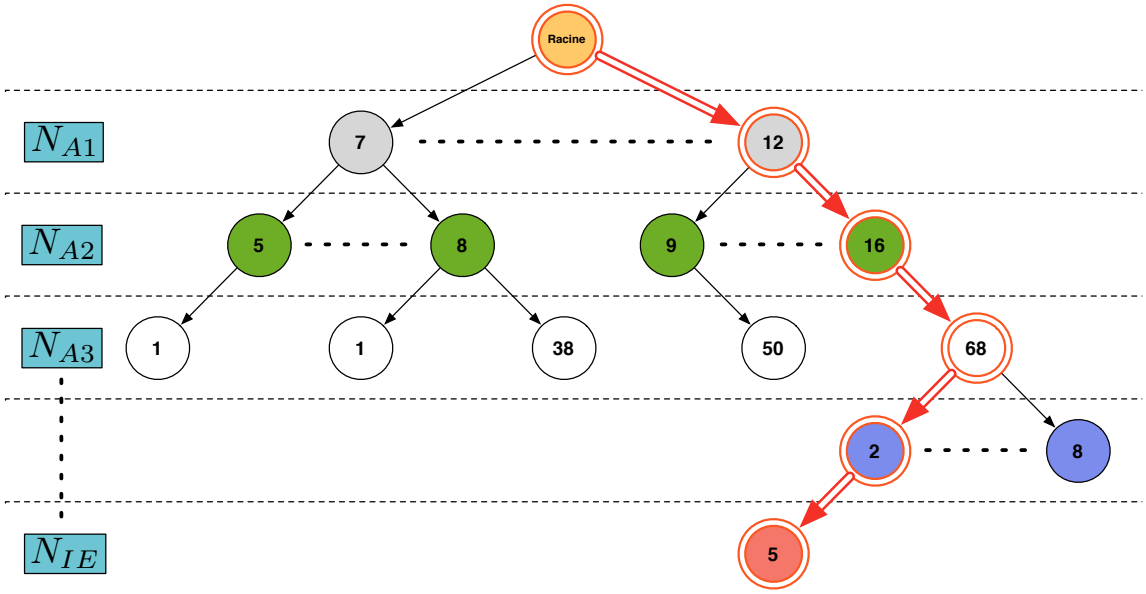


FIGURE 5.7 – Arbre de recherche à optimiser

- Toutes les possibilités de combinaison d'interruptions sont représentées dans l'arbre de recherche.
- Un nœud à au plus un parent.

Lorsque l'on parcourt l'arbre du premier niveau jusqu'à une feuille, l'ensemble des nœuds traversés forme un vecteur contenant le nombre d'interruption, comme décrit précédemment. Un tel chemin est présenté sur la figure 5.7, ce sont les nœuds entourés de rouge. Les paramètres du profil de consommation qui est solution de l'instance du sous-problème sont obtenus en effectuant l'algorithme de Branch and Bound sur l'arbre de recherche, en ayant pour objectif la minimisation du critère présenté dans l'équation 5.8. Le processus de résolution suivi, avec d'abord le calcul de la date de départ, puis le Branch and Bound permet à chaque étape de réduire l'exploration de l'espace des solutions. Le vecteur de coefficients de pénalisation réduit l'espace des solutions lors de la création de l'instance. Le vecteur d'interruption caractérisant le profil de consommation en fonctionnement normal (sans interruptions ni attente) débutant à cette date est le point de départ du Branch and Bound. Lors de celui-ci, le voisinage de ce vecteur est exploré grâce à l'ajout d'interruption et d'attente comme l'illustre la figure 5.8. Le voisinage exploré est plus ou moins proche du profil de départ suivant le nombre d'interruption et d'attente. Un nombre élevé caractérise un voisinage éloigné du point de départ. Le résultat du Branch and Bound est un vecteur d'interruption, qui, combiné à la date de départ, permet de générer le profil solution de l'instance.

En effectuant le processus de résolution pour chaque instance du sous-

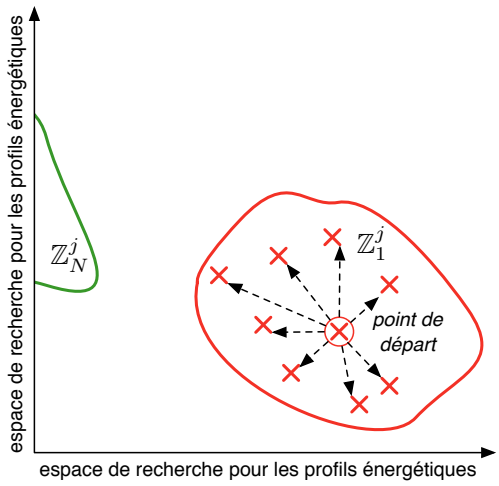


FIGURE 5.8 – Recherche dans l'espace des solutions avec le Branch and Bound

problème, un profil de consommation est obtenu par instance. L'ensemble des profils est alors envoyé au superviseur pour la résolution globale.

## 5.3 Création d'un second agent de test

Un second type d'agent est crée pour tester les limites et l'efficacité de l'algorithme de résolution mixte introduit.

**Fonctionnement de l'agent** L'agent crée est une adaptation des services réguliers présentés dans les chapitres 2 et 3. L'équipement introduit se voit associé un agent qui est construit sur la base des modèles linéaires existants. Comme définit précédemment, un agent se caractérise par un modèle et un solveur associé. Les modèles utilisés ici sont les modèles linéaires des services *réguliers* de type permanents et temporaires. Le solveur associé est identique à celui utilisé par [67]. Il s'agit d'un cas particulier de résolution avec un seul service.

Après réception des données en provenance de l'agent courtier, notamment les coefficients de pénalisation, l'agent construit son sous-problème. Ce dernier modélise le comportement de l'équipement avec un des modèles linéaires existants en fonction de la nature de l'équipement, et crée un problème MILP. Ce sous-problème possède la même forme que celui présenté dans le chapitre 2 excepté que seul un service est présent. Le sous-problème est alors résolu par le solveur interne à l'agent fournissant un profil de consommation. Le critère minimisé par l'agent est présenté dans l'équation (5.9). L'insatisfaction pour le service suit la même règle pour les services permanents et temporaires présentés précédemment.

$$J_{agent}(\mathbb{P}_i^j) = \sum_{k=0}^{n-1} \mathbb{P}_i^j(k) C_k E(k,\theta) + \lambda I(\theta) \tag{5.9}$$

L'introduction de ce type d'agent a pour objectif de comparer les performances lorsque le même service est présent dans le problème global soit sous la forme d'un service *singulier* ou d'un service *régulier*.

# Chapitre 6

# Validation de l'approche hybride : Tests et résultats

Dans ce chapitre, la méthode de tests est présentée ainsi que les résultats obtenus. La discussion des résultats est effectuée en fin de chapitre.

## 6.1 Description générale des tests

Les tests effectués consistent à résoudre plusieurs instances du problème dans des conditions différentes, notamment pour la configuration des différents services. L'objectif des tests est d'illustrer la pertinence de l'introduction des services *singuliers* dans le processus de modélisation et de résolution. Les services présents dans le problème sont au nombre de six. Ce nombre est choisi en fonction de la moyenne des services présents dans un bâtiment, comme présenté dans le chapitre 3. Les services présents pour chaque mode de résolution sont :

- un service *régulier* de type permanent : sa puissance nominale est de 1000 watts. Il s'agit d'un équipement de type chauffage, ajustant sa consommation en fonction de la présence d'un habitant et de la température préférée.
- un service *régulier* de type temporaire : le service temporaire possède une puissance de 2000 watts et une durée d'une heure trente minutes. Les dates de fin sont modifiées suivant le modèle d'insatisfaction du problème.
- un service *régulier* de type temporaire multi-phase : les phases sont au nombre de trois. La première phase dure une heure trente minutes pour une consommation s'élevant à 2000 watts. La durée de la deuxième phase est d'une heure avec une consommation de 1000 watts. Et la dernière phase s'étend sur une heure pour une consommation s'élevant à 1500 watts. La durée maximale entre deux phases est de deux heures.

- un service non supervisé : la consommation du service non supervisé sur l'horizon de planification est présentée dans la figure 6.1. Suivant la configuration du problème, cette dernière est modifiée.

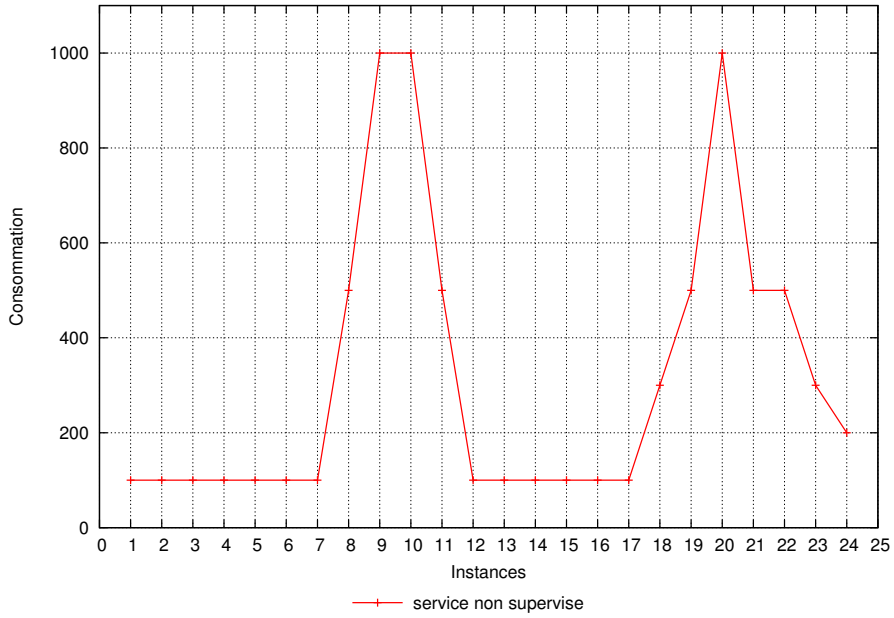


FIGURE 6.1 – Consommation du service non supervisé

La taille de l'horizon de planification est de 24 heures, avec un échantillonnage d'une heure. La source d'électricité utilisée est le réseau électrique, qui est qualifiée par la puissance instantanée autorisée et le prix de la ressource. La puissance délivrée par la source d'électricité est de 4000 watts quelque soit l'instant considéré de l'horizon. Le prix du watt-heure d'électricité suit l'évolution illustrée sur la figure 6.2. L'ensemble de ces caractéristiques ne varient pas durant les tests.

## 6.2 Objectif et déroulement

L'objectif de la phase de tests est d'identifier les limites et les apports des services *singuliers* dans la résolution d'un problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Pour se faire, afin de mesurer directement leur influence, deux services sont ajoutés au problème. La nature des deux services évolue suivant le test proposé. Dans la première configuration de test, les deux services ajoutés sont les agents tels qu'ils sont décrit dans le chapitre 5. Les coefficients de pénalisation sont calculés et utilisés dans la résolution. Dans la deuxième configuration de test, les deux services sont encore une fois les agents décrit dans le chapitre 5 à l'exception que les coefficients de pénalisation n'existent

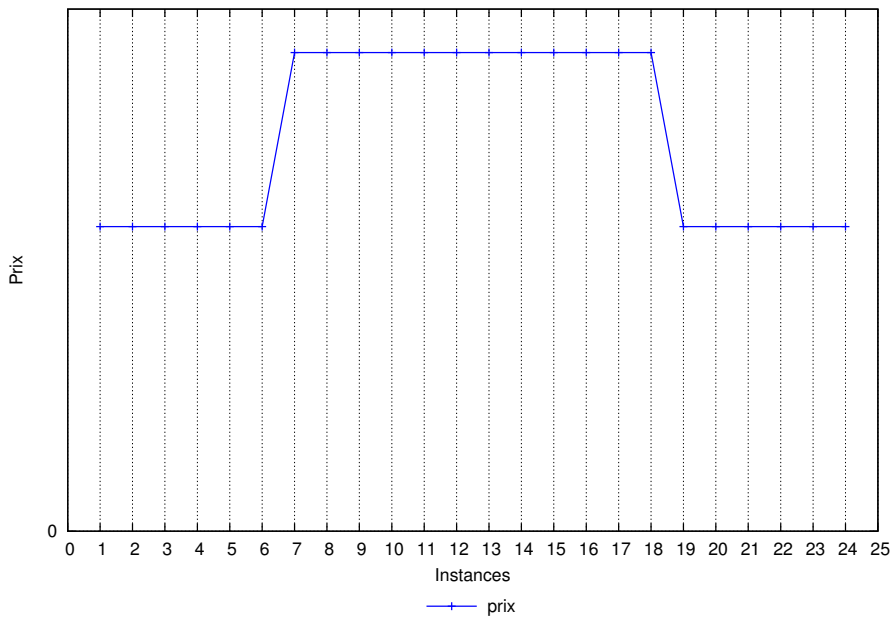


FIGURE 6.2 – Prix du watt-heure d'électricité

pas dans la résolution ; les agents possèdent un libre arbitre total sur leur comportement et sur la génération de profils de consommation. Dans la troisième configuration, les deux services agents sont remplacés par des services de type temporaires *réguliers* construits à partir de leurs données de consommation.

### 6.2.1 Caractéristiques des agents

Les deux agents utilisés sont construits suivant les règles présentées dans le chapitre 5.

**L'agent lave linge** L'agent lave linge dans le cas où sa consommation n'est pas modifiée pour les besoins du problème suit l'évolution illustrée dans la figure 6.3. Les quatre états sont présents avec le prélavage, le chauffage, le lavage et l'essorage. Les puissances pour chacun des états sont, dans le même ordre, 56 watts, 1272 watts, 111 watts et 71 watts. La durée du prélavage est de 650 secondes (0,18 heure). Le chauffage s'achève après 757 secondes (0,21 heure) de fonctionnement. Celui du lavage s'étend sur 1219 secondes (0,34 heure) tandis que l'essorage se termine après 2673 secondes (0,75 heure). Les dates de fin minimales et maximales sont respectivement 11 et 15 heures, pour une date de fin optimale de 13 heures. La consommation de l'agent peut être interrompue 1 heure au maximum.

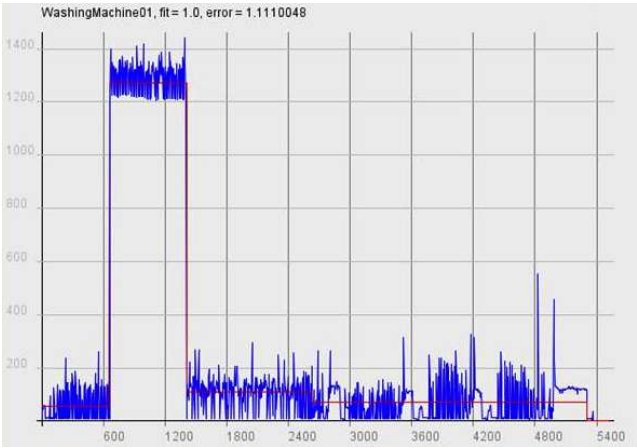


FIGURE 6.3 – Consommation sans interruption du lave linge agent

**L'agent du service temporaire** Ce service agent présente une consommation fixe sur durée précise. Dans le cas idéal où sa consommation n'est pas modifiée, l'agent construit suivant ce modèle consomme une puissance de 1000 watts pour une durée de fonctionnement de $1,5$ heure. La date de fin optimale est 11 heure. Les dates fin minimales et maximales sont respectivement 9 et 13 heures. La consommation de l'agent peut être interrompu 1 heure au maximum.

### 6.2.2 Déroulement des tests

Trois modèles d'insatisfaction du problème sont étudiés. Les différences se situent au niveau des dates de fin des services temporaires *réguliers*. Dans le cas du modèle d'insatisfaction 1 du problème, l'ensemble des services possèdent la même date de fin optimale de 13 heure. Ce modèle d'insatisfaction est le plus contraignant au d'un point de vue énergétique puisque le système doit éviter de dépasser la puissance nominale du réseau. Le troisième modèle d'insatisfaction est le contraire du premier puisque les dates de fin sont très différentes et étendues au cours de la journée pour éviter les conflits d'attribution énergétique. Enfin, le modèle d'insatisfaction 2 est un compromis entre les modèles d'insatisfaction 1 et 3.

Dans un premier temps, l'apport des agents dans la modélisation est vérifié avec trois séries de tests correspondant chacune à un contexte de résolution :

- la résolution s'effectue avec les coefficients de pénalisation
- la résolution s'effectue sans les coefficients de pénalisation. Les agents possèdent uniquement les informations sur le prix de l'énergie et la quantité globale fournie par le réseau à chaque période.
- les deux agents sont remplacés par des services temporaire simple ou multi-phases les approximant.

Pour ces trois contextes de résolution, un agent de chaque type est présent. Le modèle d'insatisfaction étudié ici est le plus contraignant à savoir le premier.

Dans un second temps, afin d'estimer l'efficacité de la méta heuristique, les trois modèles d'insatisfaction décrits précédemment sont résolus avec une génération des coefficients de pénalisation totalement aléatoire à chaque itération. Chacun des modèles d'insatisfaction est résolue 15 fois pour réduire l'influence de l'initialisation de l'algorithme durant laquelle la première population de coefficients de pénalisation est générée aléatoirement. Chaque réalisation comporte 240 itérations, durant laquelle un problème MILP est résolu. La taille de la population de vecteurs de coefficients de pénalisation est de 40.

**Transformation d'un service agent en service temporaire linéaire**
Afin d'illustrer l'apport des agents dans la résolution, ces derniers sont remplacés par des services temporaires les modélisant. Ce processus permet de mesurer l'efficacité entre l'approche linéaire et la nouvelle approche implémentée. La méthode est expliquée sur l'exemple de la machine à laver agent. L'agent machine à laver se compose de quatre états distincts qui seront autant de phases pour le service linéaire multi-phase associé. La consommation de chacune des phases est connue puisqu'il s'agit de la consommation des états. Ce constat est différent pour la durée des phases. En effet, la solution la plus simple consiste à attribuer la même durée aux phases qu'aux états. Cependant, le service multi-phase linéaire ne tient pas compte des possibilités d'interruptions des états. Par exemple, l'agent machine à laver peut être interrompu une heure au total, partageant ce temps à sa convenance entre les états d'interruptions et d'attentes. Pour tenir compte de ce phénomène au plus proche de la réalité de l'agent, il faut attribuer une durée plus grande à chaque état, créant ainsi une "enveloppe" multi-phase des possibilités de consommation réelle de l'agent. Ainsi, augmenter la durée de chaque phase de la durée d'interruption totale autorisée par l'agent englobe l'ensemble des possibilités de consommation de l'agent. Il est nécessaire d'effectuer ce traitement à chaque phase puisque chacune d'elle peut être interrompue.

Le service multi-phase construit à partir de l'agent machine à laver comporte donc quatre phases correspondant aux états de prélavage, chauffage, lavage et essorage. Leur puissance sont 56 watts, 1272 watts, 111 watts et 71 watts conformément à la consommation de l'agent ; tandis que les durées de chaque phase sont de 1,18 heure, 1,21 heure, 1,34 heure et 1,75 heure. Il est plus simple de gérer les états d'attente entre les phases. L'agent peut s'interrompre une heure, donc l'attente maximale entre chaque phase est une heure, et l'attente minimale est nulle.

## 6.3 Résultats et interprétation

### 6.3.1 L'influence de l'approche de résolution hybride

Les tests effectués dans ce paragraphe se concentrent sur l'apport des agents et de la résolution hybride développée et implémentée dans le système de gestion de l'énergie.

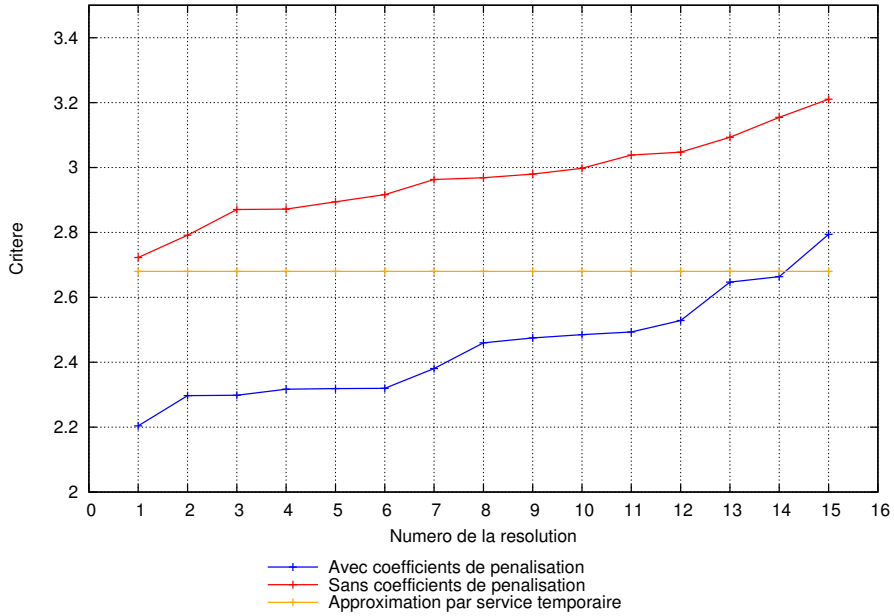


FIGURE 6.4 – Valeur du critère pour 15 résolutions avec un agent de chaque type

Les figures 6.4 et 6.5 représentent les valeurs du critère à minimiser lors de la résolution pour quinze résolutions du problème. Trois courbes sont présentes, la première symbolise l'évolution du critère pour la résolution sans coefficients de pénalisation. La seconde illustre la valeur du critère pour la résolution avec coefficients de pénalisation, tandis que la troisième représente la valeur du critère pour une résolution centralisée en remplaçant les agents par des services temporaires les approximant.

Dans la figure 6.4, les performances du système de gestion lorsque les coefficients de pénalisation sont calculés est flagrante. En moyenne, la valeur du critère est de 2,45 pour la résolution avec coefficients de pénalisation tandis qu'elle n'est que de 2,97 pour la résolution sans coefficient. Cela donne un écart de près de 18% entre les deux moyennes. La résolution linéaire avec services temporaires approximés fourni une valeur du critère égale à 2,68.

Une observation similaire est effectuée avec la figure 6.5. Dans ce cas, les deux agents utilisés sont du type machine à laver. Encore une fois, les perfor-

mances de la résolution avec coefficients de pénalisation est clairement visible, et plus nette, avec des moyennes pour les valeurs du critère plus importantes. La résolution du problème sans coefficients de pénalisation possède une valeur moyenne du critère s'élevant à 3,17, tandis qu'avec coefficients, la moyenne se limite à 2,59. L'écart entre les moyennes s'accroit jusqu'à 20%. La résolution avec services temporaires approximées donne une valeur du critère de 2,87.

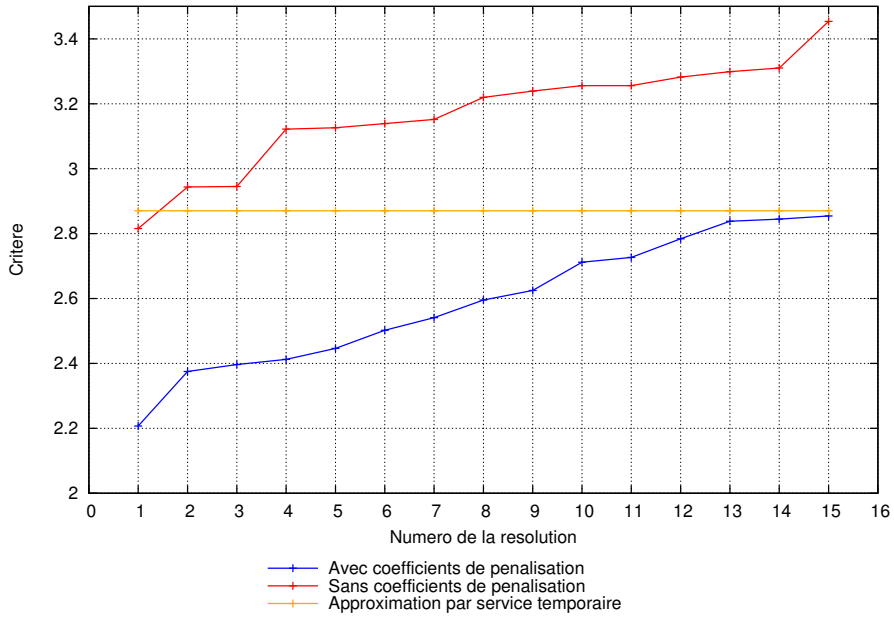


FIGURE 6.5 – Valeur du critère pour 15 résolutions avec deux agents machine à laver

Le constat résultant de ces observations est l'efficacité de l'algorithme de résolution avec coefficients de pénalisation. Ce résultat est en accord avec les prévisions. En effet, l'interaction entre les agents et l'environnement est limitée lorsque les coefficients de pénalisation ne sont pas fournis. Les agents se préoccupent en priorité de leur bien être mais sans savoir où positionner leur consommation vis à vis des autres services présents, mais uniquement vis à vis du prix et de l'énergie totale distribué par le réseau. Cela a pour conséquences un placement de l'énergie totalement indépendant des autres services, perdant l'aspect de résolution globale du problème.

La méthode de résolution semi-distribuée approximée offre aussi de meilleurs résultats que l'approche centralisée. Les services temporaires approximant les agents possèdent une quantité d'énergie attribuée qui est plus importante que la réalité pour tenir compte des différentes possibilités internes aux agents qui ne sont pas modélisées linéairement. Cela se traduit par une consommation plus importante. Cependant, il est nécessaire d'effectuer ces approximations sous peine d'obtenir un plan de consommation globale irréalisable. Néanmoins,

l'approche centralisée avec des services multi-phases approximant les agents fournis des meilleurs résultats que l'approche hybride sans coefficients de pénalisation.

### 6.3.2 L'influence de la génération des coefficients de pénalisation

Les tests présentés dans cette section se concentrent sur la génération des coefficients de pénalisation en comparant la méta-heuristique mise en place à une approche de création totalement aléatoire. Quinze résolutions des trois contextes de résolution décrits précédemment sont effectuées, avec une génération totalement aléatoire à chaque itération de la population de coefficients de pénalisation et avec une génération suivant la méta-heuristique. Ces résultats sont aussi comparés à la résolution dans laquelle les agents sont remplacés par des services temporaires les approximant.

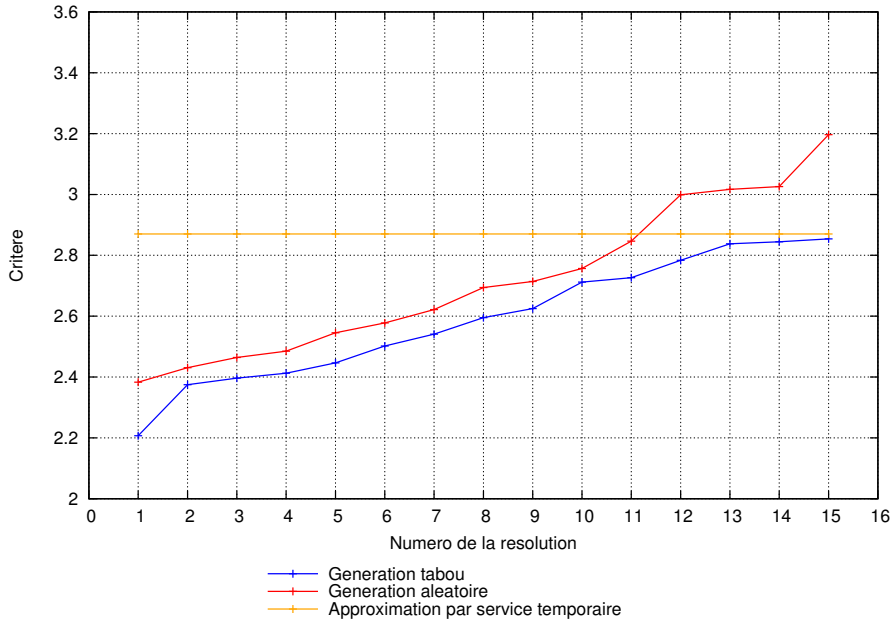


FIGURE 6.6 – Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 1

**Valeur du critère** Les figures 6.6 à 6.8 représentent l'évolution de la valeur du critère pour quinze résolutions des trois modèles d'insatisfaction du problème. L'approche hybride mise en place fournit toujours une meilleure solution au niveau du critère que la génération aléatoire de la population à chaque itération. La valeur du critère dans le cas de la résolution linéaire cen-

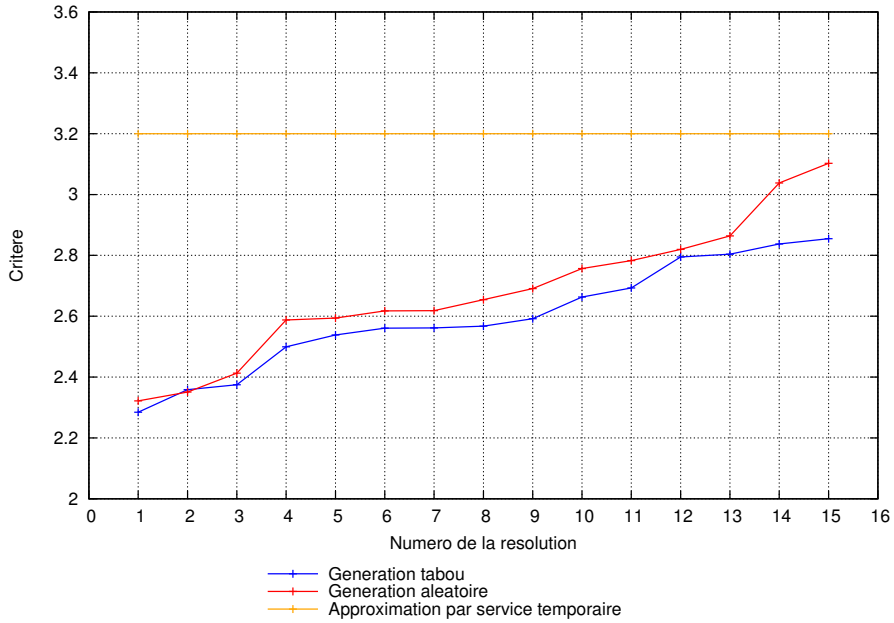


FIGURE 6.7 – Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 2

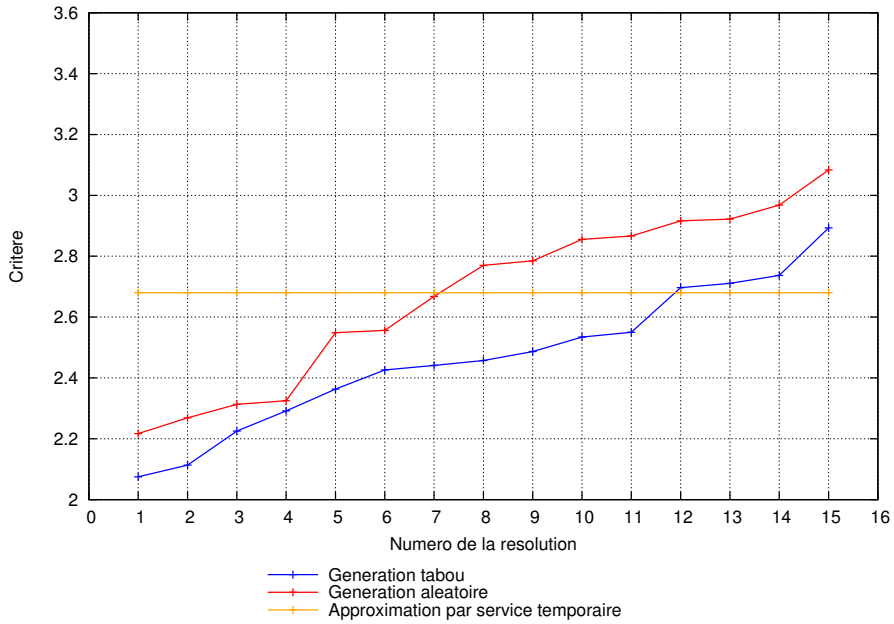


FIGURE 6.8 – Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 3

tralisée est indiquée à titre de comparaison. Dans la majorité des résolutions, l'approche centralisée est plus mauvaise que l'approche hybride implémentée.

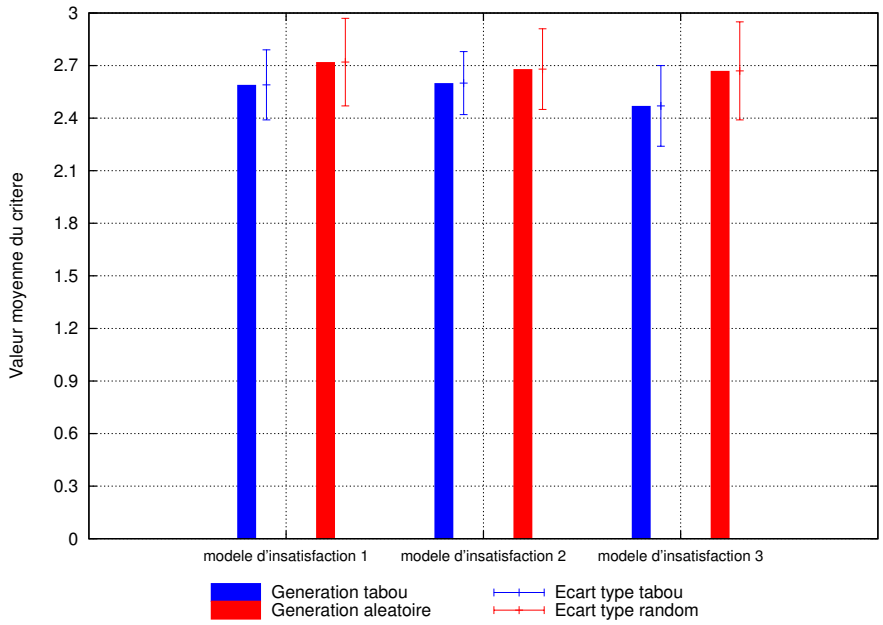


FIGURE 6.9 – Valeur moyenne du critère et écart type pour les trois modèles d'insatisfaction

La figure 6.9 illustre les performances de l'approche hybride avec la méta-heuristique et de la génération aléatoire en comparant les valeurs moyennes des critères obtenues sur les quinze résolutions ainsi que l'écart type résultant. L'approche hybride possède une efficacité plus importante pour chacun des modèles d'insatisfaction d'environ 5% pour le pire cas (i.e. le modèle d'insatisfaction 2) et d'environ 10% pour le meilleur cas (i.e. le modèle d'insatisfaction 3). Une différence est présente sur les valeurs moyennes des critères, mais pas sur l'écart type. La valeur de l'écart type est 10% la valeur moyenne des critères. Comme décrit précédemment, l'initialisation de l'approche hybride possède un caractère aléatoire. Pour limiter l'effet de l'aléatoire, il est nécessaire de résoudre plusieurs fois le même problème afin de ne pas obtenir un cas particulier très mauvais. La faible valeur de l'écart type indique qu'un faible nombre de résolutions est suffisant pour obtenir une solution satisfaisante non éloignée de la solution moyenne. La solution moyenne n'est pas la meilleure solution, mais est déjà meilleure que la solution obtenue avec l'approche centralisée linéaire.

**Vitesse de convergence** Les figures 6.10 à 6.12 représentent la valeur de l'indice de l'itération parmi les 240 donnant la meilleure solution lors de la résolution. Cet indice illustre la vitesse de convergence de l'approche hybride

utilisant la méta-heuristique par rapport à la génération aléatoire. Plus l'indice est faible, plus la convergence est rapide.

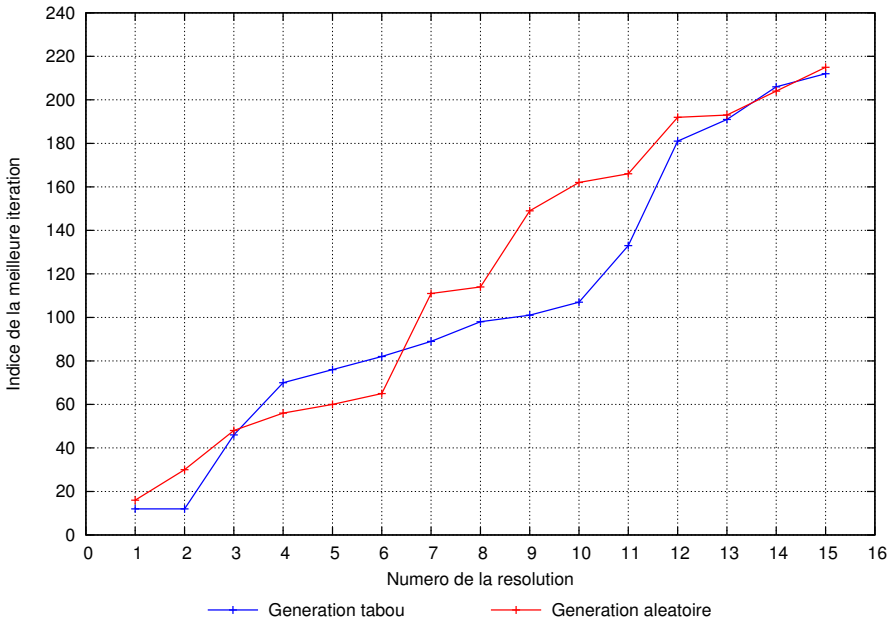


FIGURE 6.10 – Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 1

La figure 6.13 compare les indices moyens pour chaque modèle d'insatisfaction. La convergence s'avère plus rapide avec la méta-heuristique pour la génération. De même, l'écart type est important et similaire pour tous les modèles d'insatisfaction, indiquant une grande variabilité lors des différentes résolutions du problème. La résolution avec l'approche linéaire s'effectue en une seule itération donc comparer les deux approches au niveau de la vitesse de convergence en nombre d'itérations n'a pas lieu d'être.

Les figures 6.14 à 6.19 représentent l'évolution de la valeur du critère pour chaque résolution en fonction de l'itération. Chacune des figures contient 15 courbes. Dans la majorité des cas, la vitesse de convergence entre la méta-heuristique et la génération aléatoire est semblable. Il suffit de 20 itérations pour obtenir la valeur quasiment finale du critère. Au delà de 20 itérations, le critère est amélioré légèrement. Dans le pire cas, présenté sur la figure 6.16, 140 itérations sont nécessaires pour obtenir une valeur satisfaisante du critère.

## 6.4 Conclusion

La première partie des tests a permis de mettre en valeur l'apport de l'approche hybride développée. Cette approche permet d'introduire les agents, et

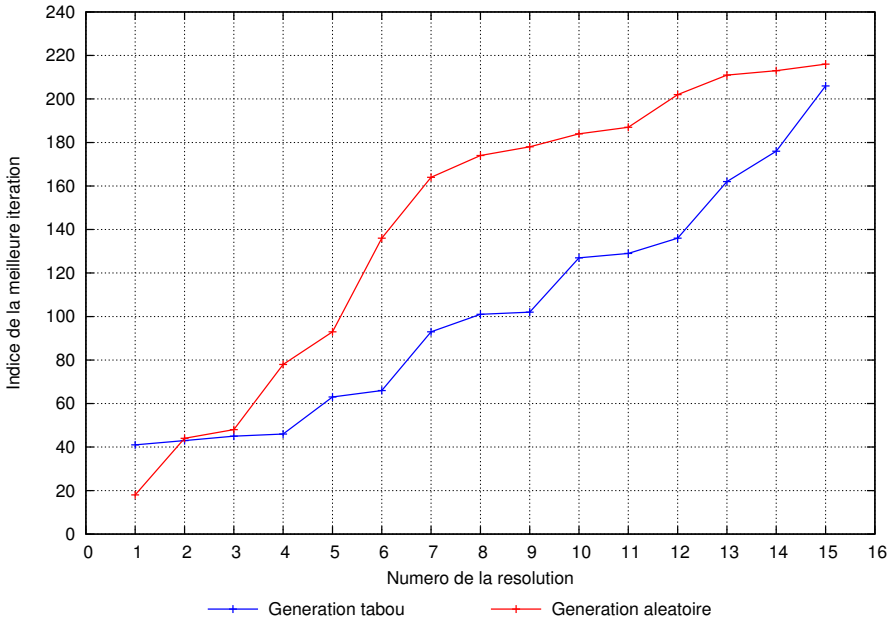


FIGURE 6.11 – Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 2

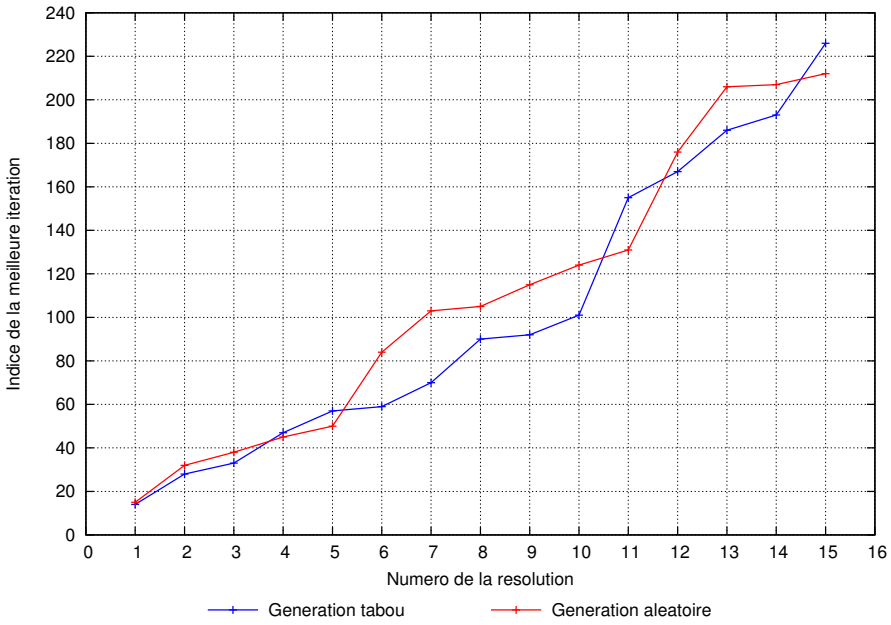


FIGURE 6.12 – Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 3

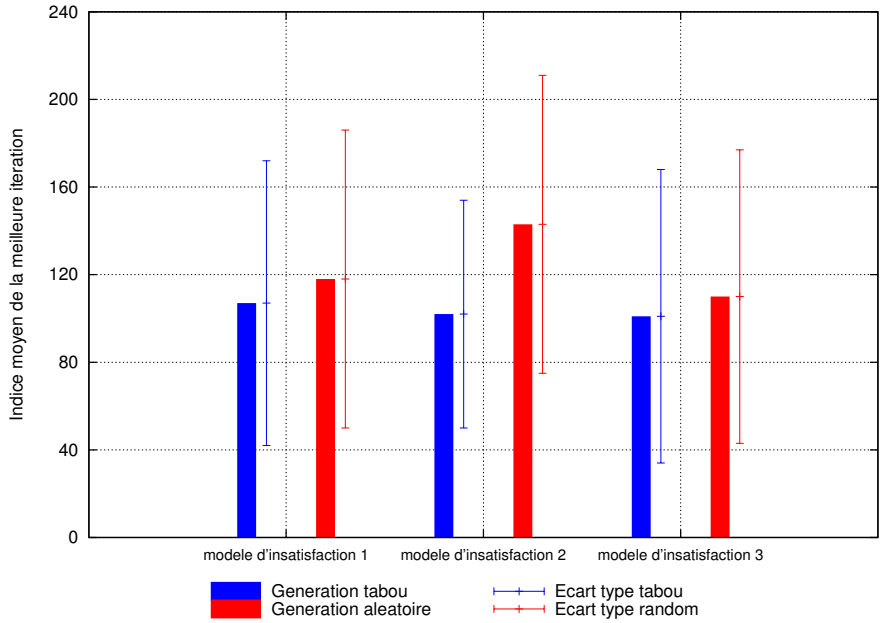


FIGURE 6.13 – Indice moyen de la meilleure itération et écart type pour les trois modèles d'insatisfaction

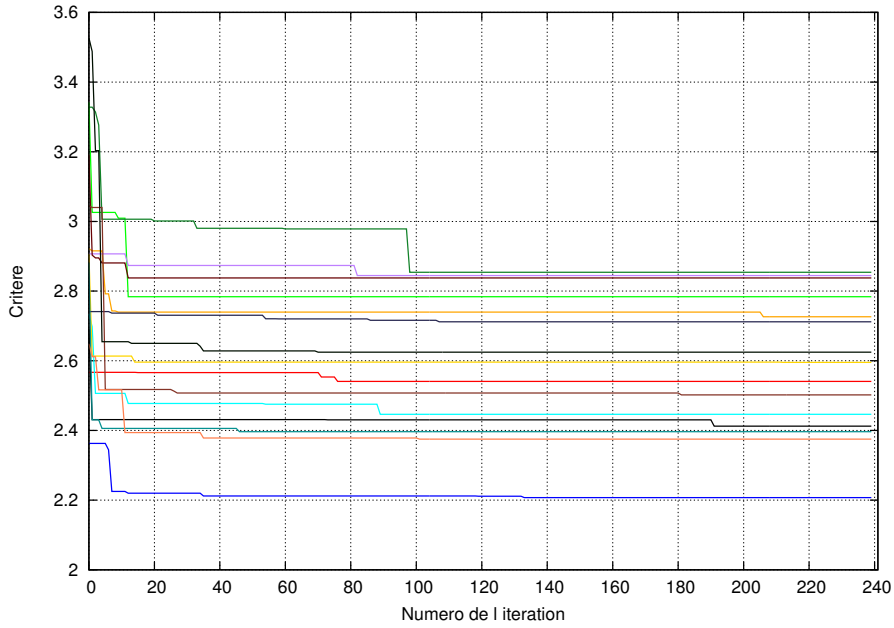


FIGURE 6.14 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 1 et avec la méta-heuristique

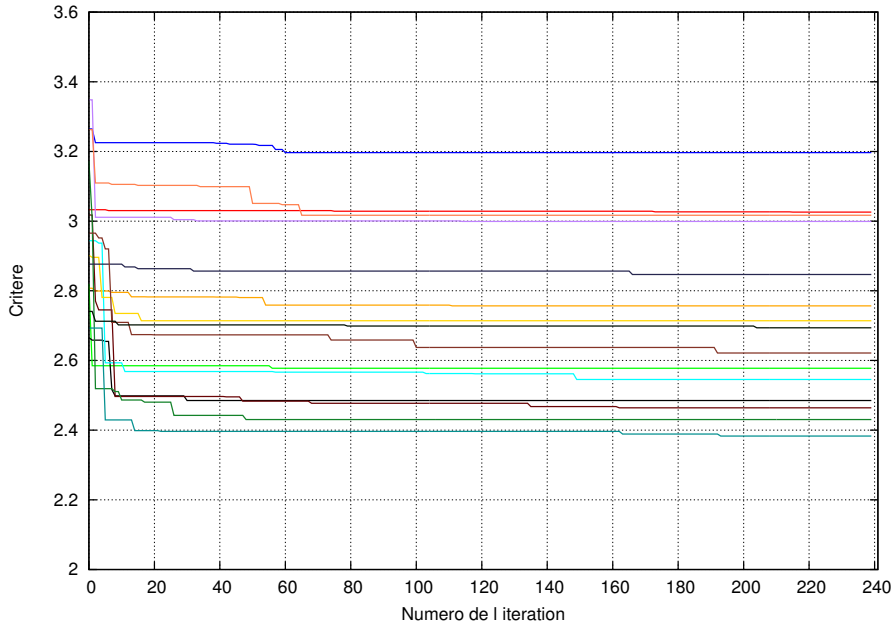


FIGURE 6.15 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 1 et avec génération aléatoire

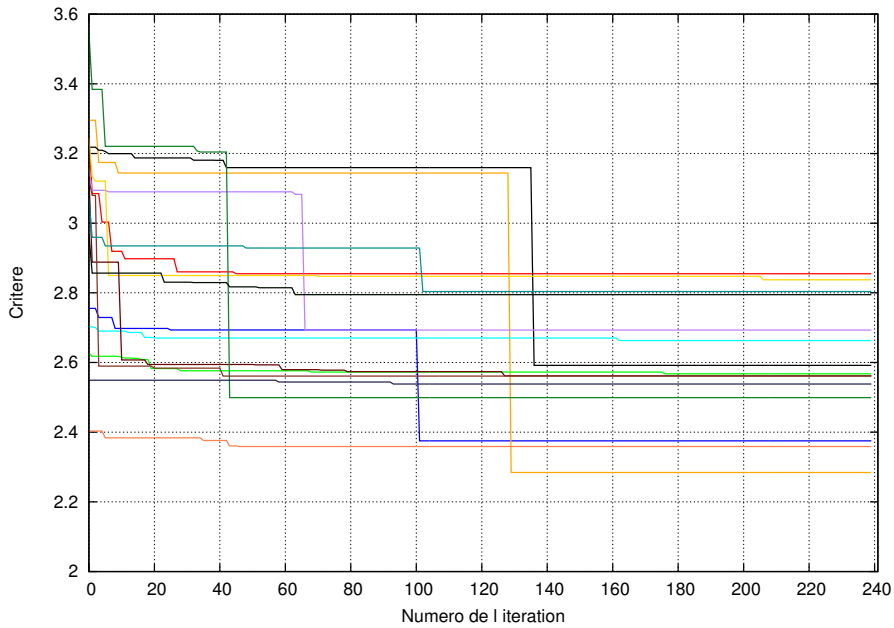


FIGURE 6.16 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 2 et avec la méta-heuristique

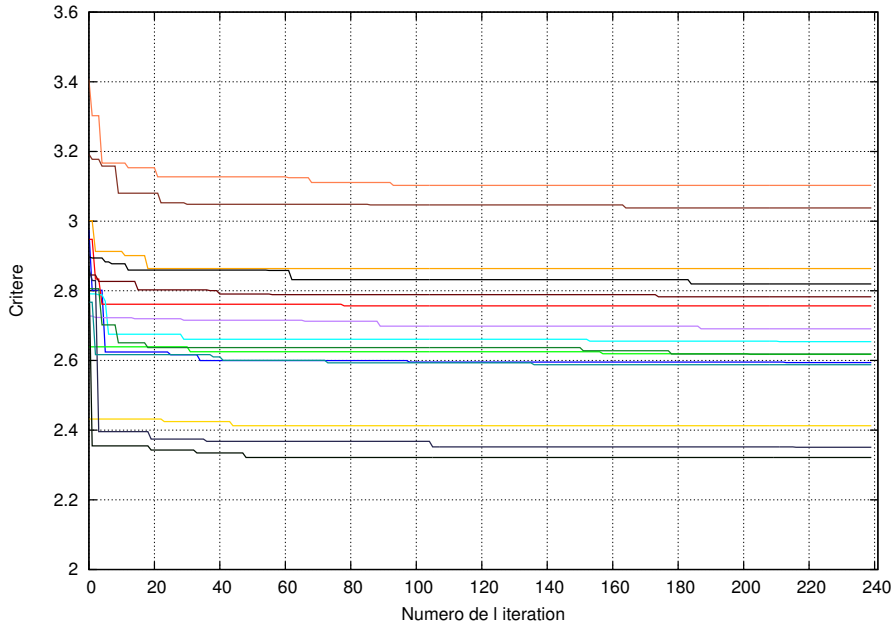


FIGURE 6.17 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 2 et avec génération aléatoire

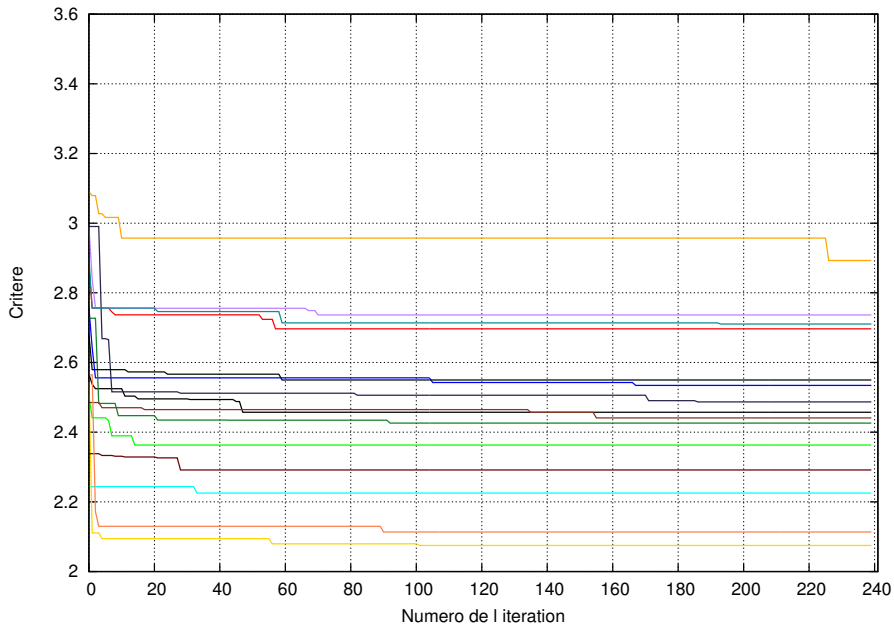


FIGURE 6.18 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 3 et avec la méta-heuristique

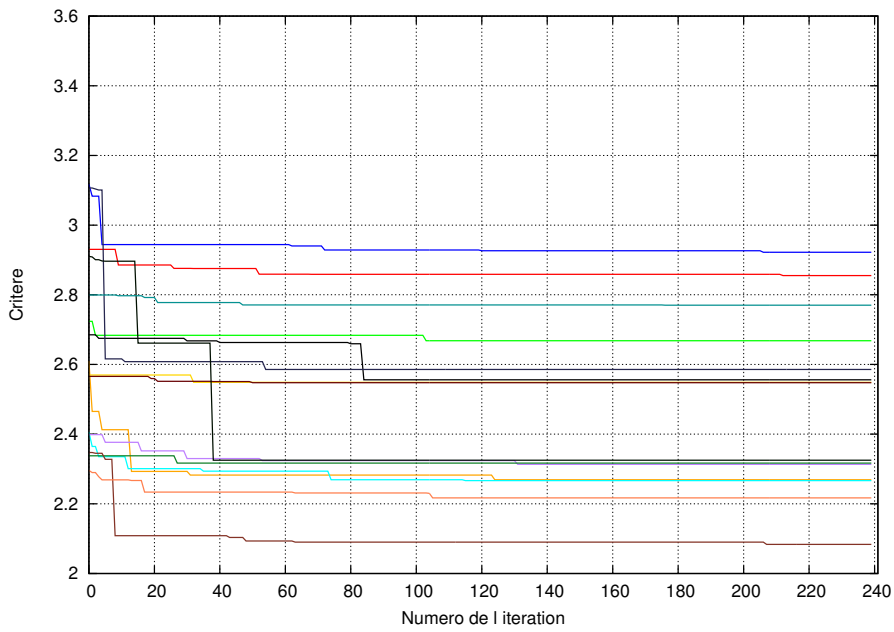


FIGURE 6.19 – Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 3 et avec génération aléatoire

l'ajout des coefficients de pénalisation est un apport significatif dans l'amélioration de la solution par rapport à la même approche sans coefficients de pénalisation. Remplacer les agents par des services multi-phases développés dans le cadre de l'approche centralisée linéaire déjà existante offre des résultats corrects, notamment au niveau de la vitesse de résolution. L'approche hybride avec méta-heuristique de génération des coefficients de pénalisation propose des solutions meilleures mais pour un temps de résolution plus important que dans le cadre de l'approche linéaire. En effet, l'approche centralisée effectue une itération tandis que l'approche hybride en effectue deux cent quarante. Il convient donc de conclure que les deux approches sont efficaces dans un secteur particulier, définissant leur utilisation ou non. Si la vitesse de résolution est primordiale, l'approche centralisée avec des services multi-phases approximant est admissible, tandis que si l'efficacité est recherchée, l'approche hybride avec sans conteste préférable. La seconde partie des tests a mis en évidence l'utilité de la méta-heuristique pour la génération des coefficients de pénalisation. Les vitesses de convergence sont similaires, avec une convergence rapide vers une solution acceptable et correcte. Cependant, l'utilisation de la méta-heuristique fournit de meilleures solutions avec des valeurs du critère inférieures.

# Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse est de proposer des solutions pour augmenter les capacités d'un système de gestion de l'énergie électrique dans le bâtiment.

Dans un premier temps, une extension du service temporaire linéaire, le service temporaire multi-phase, a été introduite dans le système de gestion existant. Il a fallu construire le modèle du service multi-phase avec la contrainte de l'introduire dans un système existant dans le but de faciliter l'analyse comparative d'une approche centralisée avec une approche mixte. Le service multi-phase est en effet très intéressant car il permet de modéliser finement les services temporaires comme ceux offerts par la machine à laver qui est, par ailleurs, utilisée en référence des approches mixtes.

Dans un second temps, les limites de l'approche centralisée linéaire développée par [67] ont été identifiées. Des éléments de réponses sont présents dans le système multi-agent adapté au problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment présenté dans [75]. Notre travail a consisté à proposer une nouvelle approche combinant les avantages des deux approches centralisée et distribuée.

Le résultat de cette "fusion" est une approche hybride s'appuyant sur les agents pour modéliser les équipements *singuliers*. Pour ce faire, et de manière similaire à l'introduction du service multi-phase, l'approche hybride a été développée et introduite dans le système de gestion. Le mode de résolution de cette dernière combine des étapes de dialogue et de négociation propres aux agents avec un superviseur gérant tous les services linéaires qui peut être aussi vu comme un agent.

Après avoir mis en place les agents, la coordination des informations entre le superviseur et les agents a conduit à l'utilisation de coefficients de pénalisation. Leur objectif principal est de coordonner les agents avec le superviseur durant les étapes de résolution itérative.

Le développement de l'approche a nécessité une caractérisation précise du mode de communication utilisé entre les agents et le superviseur. Dans une optique de validation, deux agents particuliers ont été crées à partir des propriétés nécessaires répertoriées. Les deux agents proposent des modes de résolution in-

ternes différents.

Les tests généraux menés ont permis de valider l'intérêt de l'approche hybride développée, en quantifiant le gain obtenu par rapport à l'approche centralisée linéaire utilisant le service multi-phase. L'utilisation de l'approche hybride permet d'obtenir une meilleure solution par rapport à l'approche centralisée utilisant des services multi-phases approximant les agents. Le point fort des agents est la précision induite par la possibilité de prendre en compte des modèles *singuliers* potentiellement non-linéaires. L'attribution énergétique effectuée par le système lors de la résolution peut ainsi être plus proche de la réalité. Utiliser un service multi-phase pour représenter une réalité complexe comme les programmes d'une machine à laver induit des approximations pénalisant la précision de la solution. Cependant, la résolution est nettement plus rapide avec l'approche centralisée puisque ne comptant qu'une seule itération. Ainsi, si la précision est désirée, l'approche hybride est préférable, tandis que si la vitesse de résolution est primordiale, il faut se tourner vers l'approche centralisée moyennant certaines approximations de modélisation. Les coefficients de pénalisation permettent d'améliorer l'efficacité de la méthode d'optimisation en orientant les propositions des agents. L'approche hybride développée permet d'accroitre les possibilités du système de gestion de l'énergie électrique dans le bâtiment.

Il existe plusieurs perspectives à moyen termes pour ce travail :

- la création d'autres modèles d'agent afin d'augmenter la bibliothèque disponible pour la modélisation des équipements *singuliers*. Les deux agents implémentés représentent des équipements particuliers. Leur création suit les règles générales nécessaire à la création d'un agent satisfaisant les contraintes du problème, mais la méthode de résolution interne et le modèle ne sont pas figés.
- la création d'un agent avec un mode de fonctionnement et résolution à base de règle définies par les utilisateurs finaux (End User Programming) est un challenge en soi, nécessitant d'imaginer un système d'intégration des règles fournies par l'utilisateur sous une forme ergonomique acceptable. Le possibilités sont importantes, avec des règles proposant plusieurs choix différents, etc...
- une des particularités des agents présentés dans ce travail est qu'ils doivent correspondre à des services et donc q'une satisfaction doit être définie. Cependant, un équipement n'est pas toujours à lui-seul assimilable à un service. L'approche que nous avons proposé pourrait être étendue pour prendre en compte des agents équipements en étendant le modèle de coopération basé sur les besoins énergétiques et la satisfaction induite par les occupants.

A plus long terme, l'objectif du système de gestion de l'énergie est de gé-

rer tous les flux du bâtiment, qu'ils soient électriques, thermiques, décisionnels, etc... L'intégration de ces différents flux sont autant de nouvelles briques à ajouter au système de gestion. Dans ce travail de thèse, un seul type de flux énergétique est présent, mais avec le développement des énergies renouvelables, les moyens de production locale se démocratisent. Les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques deviennent des sources secondaires, le système de gestion ne s'occupe plus seulement de la consommation mais aussi de la production locale. L'introduction des sources locales modifient le calcul du coût énergétique, notamment en modifiant la répartition de la consommation (privilégier les sources locales ou non, etc...). Une modification du système de calcul du coût est à effectuer. Enfin, des procédés de stockage d'énergie existeront peut-être un jour dans les bâtiments, et doivent être intégrés. Le plus commun est la batterie de la voiture électrique, mais d'autres existent comme les matériaux à changement de phases utilisés pour le stockage thermique. Développer les modèles de ces équipements demande un travail conséquent, notamment pour représenter les différentes interactions puisque plusieurs types de flux énergétiques sont présents. Il s'agit donc de créer un système de gestion des flux complet tenant compte de toutes les possibilités offertes par le bâtiment.

Un axe de recherche important est la prise en compte de l'occupant dans le bâtiment. Jusqu'à présent, l'occupant communique directement avec le système de gestion en indiquant lui-même ses préférences. Il est possible d'imaginer dans le futur des modèles d'occupants plus complexes nécessitant un minimum d'interaction entre ce dernier et le système de gestion. Ce modèle serait intégré directement dans les agents, ou serait un agent à part entière communiquant alors ses préférences aux agents modélisant des équipements. L'important est d'améliorer l'ergonomie du système de gestion pour les occupants et rendre l'expérience d'utilisation plus agréable et simple.

Dans un monde parfait, où l'ensemble des bâtiments sont équipés d'un système de gestion complet de l'énergie, il serait possible de développer des réseaux énergétiques intelligents, tel que les "Smart Grids", où le bâtiment est un acteur majeur, permettant une gestion des flux énergétiques à l'échelle d'une région voir d'un pays et tenant compte de signaux issus du réseau : limitation de consommation maximale ou encouragement à la modulation par des variations de tarifs. Cette perspective illustre l'importance des travaux présentés ici sur l'optimisation des flux énergétiques dans le bâtiment.

# Bibliographie


[1] Geo4 : Programme des nations unies pour l'environnement. Technical report, Secrétariat des Nations Unies, 2007.

[2] World population to 2300. Technical report, Secrétariat des Nations Unies, 2004.

[3] Living planet report 2010. Technical report, World Wildlife Fund, 2010.

[4] Key world energy statistics. Technical report, International Energy Agency, 2011.

[5] Bp statistical review of world energy. Technical report, BP, 2009.

[6] Chiffres clés du climat, france et monde, édition 2012. Technical report, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012.

[7] Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques. Technical report, Secrétariat des Nations Unies, 1992.

[8] Rapport de la treizième session de la conférence des parties tenue à bali du 3 au 15 décembre 2007, convention-cadre sur les changements climatiques. Technical report, Secrétariat des Nations Unies, 2007.

[9] Durban conference delivers breakthrough in international community's response to climate change. Technical report, Secrétariat des Nations Unies, 2011.

[10] Conseil européen de bruxelles 11 et 12 décembre 2008 conclusions de la présidence. Technical report, Conseil de l'Union Éuropéen, 2008.

[11] J. E. Campbell, D. B. Lobell, and C. B. Field. Greater transportation energy and ghg offsets from bioelectricity than ethanol. *Science*, (324) :1055–1057, 2009.

[12] Chiffres clés de l'énergie, édition 2011. Technical report, Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011.

[13] Le bilan électrique français 2010. Technical report, Réseau de Transport d'Électricité, 2011.

[14] Maîtrise d'énergie - chiffres clefs 2007. Technical report, ADEME, 2007.

[15] Rte, courbes de consommations journalières, http ://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/courbes.jsp.

[16] Seuil de 30 % d'insertion des enr – calcul des heures de déconnexion. Technical report, EDF, 2009.

[17] Jérôme Henri Kämpf and Darren Robinson. Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*, 2009.

[18] Essia Znouda, Nadia Ghrab-Morcos, and Atidel Hadj-Alouane. Optimization of mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 39 :148–153, 2007.

[19] Tsuyoshi Ueno, Ryo Inada, Osamu Saeki, and Kiichiro Tsuji. Effectiveness of an energy-consumption information system for residential buildings. *Applied Energy*, 83 :868–883, 2006.

[20] G. Wood and M. Newborough. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances : environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, pages 821–841, 2003.

[21] G. Wood and M. Newborough. Energy-use information transfer for intelligent homes : Enabling energy conservation with central and local displays. *Energy and Buildings*, 39 :495–503, 2007.

[22] Christina Diakaki, Evangelos Grigoroudis, and Dionyssia Kolokotsa. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40 :1747–1754, 2008.

[23] João Figueiredo and João Martins. Energy production system management - renewable energy power supply integration with building automation system. *Energy Conversion and Management*, 2010.

[24] S. Yamamoto, K. Sumi, E. Nishikawa, and T. Hashimoto. an operating method using prediction of photovoltaic power for a photovoltaic – diesel hybrid power generation system. *Electrical Engineering in Japan*, 151(3), 2005.

[25] J. M. House and T. F. Smith. Optimal control of building and hvac systems. In *Proceddings of the American Control Conference, Seattle, Washington*, 1995.

[26] G. Zhou and M. Krarti. Parametric analysis of active and passive building thermal storage utilization. *Journal of Solar Energy Engineering*, (127) :37–46, 2005.

[27] M. Muselli, G. Notton, P. Poggi, and A. et Louche. Pv-hybrid power system sizing incor- porating battery storage : an analysis via simulation calculations. *Renewable Energy*, (20) :1–7, 2000.

[28] G.J. Levermore. Building energy management systems : An application to heating and control. In *E and FN SPON, London*, 1992.

[29] D. Kolokotsa, K. Niachou, V. Geros, K. Kalaitzakis, G.S. Stavrakakis, and M. Santamouris. Implementation of an integrated indoor environment and energy management system. *Energy and Buildings*, (37) :93–99, 2005.

[30] F. Calvino, M.L. Gennusca, G. Rizzo, and G. Scaccianoce. The control of indoor thermal comfort conditions : introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings*, (36) :97–102, 2004.

[31] N. Morel, M. Bauer, M. El-Khoury, and J. Krauss. Neurobat, a predictive and adaptive heating control system using artificial neural networks. *International Journal of Solar Energy*, (21) :161–201, 2000.

[32] Peter Palensky and Ratko Posta. Demand side management in private home using lonworks. In *Proceedings.1997 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, 1997.

[33] K.P Wacks. The impact of home automation on power electronics. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pages 3 – 9, 1993.

[34] K. Wacks. Utility load management using home automation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 37, 1991.

[35] Karl Stum, Roger Mosier, and Tudi Haasl. Energy management systems. Technical report, Porland Energy Conservation Inc.(PECI), 1997.

[36] Smarthouse/smartgrid project - deliverable 1.2 - technology trends for smar- thouse/smartgrid. Technical report, EU/ICT project EU FP7-ICT-2007-2 STREP 224628, 2009.

[37] C. H. Miller. patent us2006/0276938 : Optimized energy management system, 2006.

[38] M. University. Patent gb2448896a : Energy management system., 2007.

[39] M. Hoeynck and B. W. Andrews. Patent us2010/0025483 : Sensor-based occupancy and behavior prediction method for intelligently controlling energy concumption within a building, 2010.

[40] G. P. Henze and R. H. Dodier. Adaptive optimal control of a grid-independent photovoltaic system. *Transactions of the ASME*, (125) :34–42, 2003.

[41] G. Foggia. *Pilotage Optimal de Système Multi-sources pour le Bâtiment.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2009.

[42] J. Eynard. *Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments.* PhD thesis, Université de Perpignan Via Domitia, 2010.

[43] Duy Long Ha, Stephane Ploix, Eric Zamai, and Mireille Jacomino. Control of energy consumption in home automation by ressource constraint scheduling. In *The 15th International Conference on Control System and ComputerScience*, 2005.

[44] Y. Riffoneau. *Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecté au réseau.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2010.

[45] Z.J.Paracha and P.Doulai. Load management : techniques and methods in electric power system. *IEEE Energy Management and Power Delivery*, 1998.

[46] V. Lesgards. Réseaux électriques intelligents et gestion de la demande : concordances et discordes. technical report,. Technical report, EDF Research and Development, 2009.

[47] H. Farhangi. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, (8) :18–28, 2010.

[48] A. Ipakchi and F. Albuyeh. Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, (7) :52–62, 2009.

[49] J. R. Roncero. Integration is key to smart grid management. In *SmartGrids for Distribution. IET-CIRED. CIRED Seminar, Frankfurt, Germany*, 2008.

[50] D. Nestle, C. Bendel, and J. et Ringelstein. Bidirectional energy management interface (bemi) : Integration of the low voltage level into grid communcation and control. in. In *19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, Austria.*, 2007.

[51] K. Kok, S. Karnouskos, D. Nestle, A. Dimeas, C. Weidlich, A.and Warmer, P. Strauss, B. Buchholz, S. Drenkard, N. Hatziargyriou, and V. Lioliou. Smart houses for a smart grid. In *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic*, 2009.

[52] D. QUENARD. Bâtiment à energie positive et mobilité. Technical report, CSTB, 2011.

[53] D. Boeda. *Etude de la contribution du pilotage de charges à la fourniture de services aux réseaux électriques.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2009.

[54] A. B. Lovins. *Encyclopedia of Energy*, volume 2, chapter Energy Efficiency, Taxonomic Overview, pages 383–401. Elsevier, San Diego and Oxford (UK), 2004.

[55] Y. Riffonneau, S. Bacha, S. Ploix, and F. Barruel. Optimal power flow management for grid connected pv systems with batterie. *IEEE Transaction on sustainable energy*, 2011.

[56] D. L. Ha, S. Ploix, F. Wurtz, P. Perichon, and J. Merten. Energy management system for a photovoltaic grid-connected building. In *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2009.

[57] Grégory De Oliveira, Mireille Jacomino, Stéphane Ploix, and Duy Long Ha. Optimal power control for smart homes. In Elsevier, editor, *18th IFAC (International Federation of Automatic Control) World Congress*, 2011.

[58] Grégory De Oliveira, Mireille Jacomino, and Stéphane Ploix. Optimisation de l'énergie dans l'habitat : du smart home au smart grid. In *ROADEF (recherche opérationnelle et aide à la décision)*, 2011.

[59] Shadi Abras, Stéphane Ploix, Sylvie Pesty, and Mireille Jacomino. A multi-agent home automation system for power management. In *The 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, ICINCO 2006*, 2006.

[60] Shadi Abras, Stéphane Ploix, Sylvie Pesty, and Mireille Jacomino. An anticipation machanism for power management in a smart home using multi-agent systems. In *3rd International Conference on ICTTA (Information and Communication Technologies : from Theory to Applications)*, 2008.

[61] P. Baptiste, C. Le Pape, and W. Nuijten. Satisfiability tests and time-bound adjustments for cumulative scheduling problems. *Annals of Operations Resarch*, 92 :305–333, 1999.

[62] Christian Artigues, Pierre Lopez, and Alain Haït. Scheduling under energy constraints. In *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, 2009.

[63] Duy Long Ha. Optimisation de la consommation d'énergie en domotique par ordonnancement sous contrainte de ressources. Master's thesis, Grenoble-INP, 2004.

[64] Duy Long Ha, Stephane Ploix, Eric Zamai, and Mireille Jacomino. A home automation system to improve the household energy control. In *INCOM2006 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, 2006.

[65] D.L. Ha, H. Joumaa, S. Ploix, and M. Jacomino. An optimal approach for electrical management problem in dwellings. *Energy and Buildings*, 45 :1–14, February 2012.

[66] M. Nathan. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. In *Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*, 2001.

[67] D. L. Ha. *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation.* PhD thesis, Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2007.

[68] M.-Hoang LE. *Prise en compte des incertitudes de prédiction dans la gestion des flux d'énergie dans l'habitat.* PhD thesis, Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal, 2011.

[69] H. Madsen and J. Holstb. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and Buildings*, 22(1) :67–79, 1995.

[70] P. Lucidarme, O. Simonin, and A. Liégeois. Implementation and evaluation of a satisfaction/altruism based architecture for multi-robot systems. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002.

[71] AFNOR. Ergonomie des amniances thermiques , détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PDD et par des critères de confort thermique local. *Norme européenne, norme française*, 2006.

[72] Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, and Nathan Mendes. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings*, 40 :1353–1365, 2008.

[73] D. L. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino. Tabu search for the optimization of household energy consumption. In *The 2006 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration IEEE IRI 2006 : Heuristic Systems Engineering September 16-18, 2006, Waikoloa, Hawaii, USA*, 2006.

[74] Alberto Bemporad and Manfred Morari. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints. *Automatica*, 35 :407–427, 1998.

[75] Shadi Abras. *Coopération entre agents embarqués pour la gestion d'énergie dans l'habitat.* PhD thesis, Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique (MSTII) - Grenoble INP, 2009.

[76] J. M. Vidal, P. A. Buhler, and M. N. Huhns. Inside an agent. *IEEE Internet Computing*, 5 :82–86, 2001.

[77] Z. Habbas, M. Krajecki, and D. Singer. Decomposition techniques for parallel resolution of constraint satisfaction problems in shared memory : a comparative study. *International Journal of Computational Science and Engineering (IJCSE)*, 1 :192–206, 2005.

[78] I. B. Jaâfar, N. Khayati, and K. Ghédira. Multicriteria optimization in csps : Foundations and distributed solving approach. *AIMSA*, pages 459–468, 2004.

[79] Pedro M. Castro and Ignacio E. Grossmann. An efficient mipl model for the short-term scheduling of single stage batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 30 :1003–1018, 2006.

[80] J. M. Pinto and I. E. Grossmann. Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems. *Annals of Operations Research*, 81 :433–466, 1998.

[81] J. M Pinto and I.E Grossmann. A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 35 :338–342, 1995.

[82] Patrick Esquirol and Pierre Lopez. *L'Ordonnancement*, chapter 5 Ordonnancement sous contraintes de ressources cummulatives, page 87. L'Ordonnancement, 1999.

[83] R. S. Pressman. *Software Engineering : A Practitioner's Approach, Third Edition*, chapter 10. McGraw-Hill, 1992.

[84] W. Emmerich. *Engineering distributed objects.* John Wiley and Sons. Ltd, 2000.

[85] http ://setiathome.berkeley.edu/.

[86] http ://www.seti.org/.

[87] J. Ferber. *Les systemes multi-agents, vers une intelligence collective.* Paris InterEditions, 1995.

[88] Y. Demazeau and A. R. Costa. Populations and organizations in open multi- agent systems. In *Proceedings of the First National Symposium on Parallel and Distributed AI (PDAI'96), Hyderabad*, 1996.

[89] F. Glover. Tabu-search - part 1. *ORSA Journal of Computing*, pages 190–206, 1989.

[90] F. Glover. Tabu-search - part 2. *ORSA Journal of Computing*, pages 4–32, 1990.

[91] Umit Bilge, Mujde Kurtulan, and Furkan Kiraç. A tabu search algorithm for the single machine total weighted tardiness problem. *Euroupean Journal of Operation Reseach*, 2006.

[92] Nonobe Koji and Ibaraki Toshihide. A tabu search approach to the constraint satisfaction problem as a general problem solver. *European Journal of Operational Research*, 106 :599–623, 1998.

# Table des figures


1.1 (a) Téléphones mobiles, par 1 000 habitants et (b) utilisateurs d'Internet, par 100 habitants, par région [1] . . . . . 14
1.2 Évolution et prévision de la population mondiale de 1950 à 2050 [2] . . . . . 14
1.3 Évolution de la consommation énergétique mondiale en million de tonnes équivalent pétrole ([4]) . . . . . 15
1.4 Évolution du prix du pétrole en dollar de 2008 et en dollar pour l'année correspondante ([5]) . . . . . 16
1.5 Évolution des rejets de $CO_2$ en million de tonnes ([4]) . . . . . 16
1.6 Température globale moyenne estimée ($C$) ([6]) . . . . . 17
1.7 Production d'énergie primaire en France ([12]) . . . . . 21
1.8 Consommation d'électricité en France ([13]) . . . . . 22
1.9 Production éolienne en France ([13]) . . . . . 23
1.10 Parc photovoltaïque en France ([13]) . . . . . 23
1.11 Production d'énergies renouvelables par filière en 2010 ([12]) . . 24
1.12 Consommation finale d'électricité par secteur en 2010 ([12]) . . . 25
1.13 Exemple de consommation journalière d'électricité en France ([15]) 26
1.14 Exemple de courbes de production journalières d'énergie solaire en France ([16]) . . . . . 27
1.15 Consommation d'énergie finale par secteur en France ([12]) . . . 28

2.1 Mécanisme de pilotage multi-couche . . . . . 39
2.2 Représentation d'une fonction d'inconfort d'un service permanent 45
2.3 Représentation d'une fonction d'inconfort d'un service temporaire 46
2.4 Automate à états finis du comportement d'un agent de type temporaire . . . . . 51
2.5 Comparaison entre le mécanisme MAHAS et le mécanisme centralisé . . . . . 54

3.1 Décalage d'un service temporaire . . . . . 58
3.2 Représentation du service temporaire . . . . . 63
3.3 Modification du service temporaire avec la nouvelle modélisation 64

3.4 Énergie consommée calculée avec la nouvelle modélisation . . . . 64
3.5 Valeur du critère pour les différents tests . . . . . 65
3.6 Durée de résolution pour les différents tests . . . . . 66
3.7 Deux profils de consommations modélisables par le type multi-phase . . . . . 68
3.8 Consommation électrique d'une machine à laver . . . . . 69
3.9 Consommation électrique d'un lave vaisselle . . . . . 69
3.10 Décalage d'un service temporaire . . . . . 70
3.11 Répartition de l'énergie . . . . . 76
3.12 Nombre de services temporaires observés dans 100 maisons . . . 77
3.13 Calcul de la puissance et de la durée d'un bloc . . . . . 77
3.14 Répartition des blocs en services . . . . . 78
3.15 Calcul de la fenêtre de fin . . . . . 79
3.16 Évolution du nombre d'itérations en fonction de la taille de l'horizon . . . . . 80
3.17 Évolution du nombre de contraintes et variables en fonction de la taille de l'horizon . . . . . 81
3.18 Évolution du nombre d'itérations en fonction des services présents 81
3.19 Évolution du nombre de contraintes et variables en fonction des services présents . . . . . 82
3.20 Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio de puissance 82
3.21 Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio d'énergie 83
3.22 Évolution du nombre d'itérations en fonction du ratio de temps 84
3.23 Évolution du nombre d'itérations en fonction du prix . . . . . 84

4.1 Répartition des ressources et modèles dans le cadre du problème 90
4.2 Lien entre les différentes entités du système . . . . . 95
4.3 Architecture de fonctionnement . . . . . 100
4.4 Différentes approches de résolution . . . . . 103
4.5 Représentation du principe de fonctionnement de l'algorithme de résolution . . . . . 104
4.6 Envoi des informations sur l'environnement . . . . . 106
4.7 Résolution des sous problèmes . . . . . 106
4.8 Envoi des solutions agents . . . . . 107
4.9 Création et envoi du problème complet . . . . . 108
4.10 Construction du problème MILP . . . . . 108
4.11 Résolution du problème MILP et envoi de la solution . . . . . 109
4.12 Étude et caractérisation de la solution . . . . . 109
4.13 Allure de la fonction de calcul des coefficients de pénalisation . . 111
4.14 Déroulement général de la résolution . . . . . 118

5.1 Déroulement général de la résolution . . . . . 122

5.2 Déroulement général de la résolution pour un agent . . . . . 124
5.3 Réseau de Petri représentant la machine à laver . . . . . 126
5.4 Caractérisation d'un profil de consommation . . . . . 129
5.5 Satisfaction de l'agent machine à laver . . . . . 130
5.6 Processus de choix de la date de départ . . . . . 135
5.7 Arbre de recherche à optimiser . . . . . 136
5.8 Recherche dans l'espace des solutions avec le Branch and Bound 137

6.1 Consommation du service non supervisé . . . . . 140
6.2 Prix du watt-heure d'électricité . . . . . 141
6.3 Consommation sans interruption du lave linge agent . . . . . 142
6.4 Valeur du critère pour 15 résolutions avec un agent de chaque type . . . . . 144
6.5 Valeur du critère pour 15 résolutions avec deux agents machine à laver . . . . . 145
6.6 Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 1146
6.7 Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 2147
6.8 Valeur du critère pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 3147
6.9 Valeur moyenne du critère et écart type pour les trois modèles d'insatisfaction . . . . . 148
6.10 Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 1 . . . . . 149
6.11 Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 2 . . . . . 150
6.12 Indice de la meilleure itération pour 15 résolutions du modèle d'insatisfaction 3 . . . . . 150
6.13 Indice moyen de la meilleure itération et écart type pour les trois modèles d'insatisfaction . . . . . 151
6.14 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 1 et avec la méta-heuristique . . . . . 151
6.15 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 1 et avec génération aléatoire . . . . . 152
6.16 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 2 et avec la méta-heuristique . . . . . 152
6.17 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 2 et avec génération aléatoire . . . . . 153

6.18 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 3 et avec la méta-heuristique . . . . . 153
6.19 Évolution du critère pour les 15 résolutions en fonction du numéro de l'itération pour le modèle d'insatisfaction 3 et avec génération aléatoire . . . . . 154