

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1
COMUE UNIVERSITÉ BRETAGNE LOIRE

ÉCOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : Informatique

Par

Alexandre RIO

Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables

Un Jumeau Numérique pour les microgrilles

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 26 Février 2021
Unité de recherche : Irisa

Rapporteurs avant soutenance :

Sébastien GÉRARD Directeur de Recherche CEA List
Sébastien MOSSER Professeur of Software Engineering Université du Québec à Montréal (UQAM)

Composition du Jury :

Président :	Reda BENDRAOU	Professeur d'Université Paris Ouest Nanterre la Défense
Examineurs :	Reda BENDRAOU	Professeur d'Université Paris Ouest Nanterre la Défense
	Anne-Cécile ORGERIE	Chargé de Recherche CNRS Rennes
	Sébastien GÉRARD	Directeur de Recherche CEA List
	Sébastien MOSSER	Professeur of Software Engineering Université du Québec à Montréal (UQAM)
Dir. de thèse :	Olivier BARAIS	Professeur d'Université Université de Rennes 1
Co-dir. de thèse :	Yoann MAUREL	Maitre de conférences Université de Rennes 1

Invité :

Valentin MAURICE Responsable Recherche et Développement Groupe OKWind

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Sébastien Mosser et Sébastien Gérard d'avoir accepté de rapporter le travail de ces 3, presque 4, années. Je remercie Anne-Cécile Orgerie et également Reda Bendraou d'avoir présidé ce jury.

Concernant ce qui m'a amené à cette thèse, je souhaite dans un premier temps remercier Fabrice Lamarche pour ses conseils face à mes questions et à mes hésitations avant de me lancer dans cette aventure. Je remercie Johann Bourcier, pour m'avoir donné l'opportunité de découvrir la recherche à l'étranger ; Nicolas Harrand, Franck Fleurey et plus largement l'équipe au SINTEF.

Dans un second temps, je remercie l'entreprise OKWind et en particulier son président Louis Maurice, pour avoir proposé un sujet et un terrain d'expérimentation si intéressant, et pour m'avoir laissé de l'autonomie pour l'explorer. Pour être sûr de n'oublier personne, je remercie le bureau d'étude d'OKWind dans son ensemble.

Je remercie les équipes DiverSE et Tacoma, devenue EASE, l'ensemble des permanents et en particulier Olivier et Yoann mais également Jef, et plus récemment, Alexis et Nicolas avec qui j'ai partagé mon bureau.

De manière plus personnelle, je tiens à remercier Kristell pour son soutien sur la majeure partie de cette thèse, mais également mes amis, les différents salons IRC et même nos différents bots pour leur distraction et leur utilité parfois relative.

Pour finir, je remercie les communautés de pandoc, vim, neovim et plus largement les communautés Open Source pour fournir des outils si modulaires et personnalisables, rendant le travail de rédaction un peu plus facile.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	V
Liste des tableaux	XI
Table des figures	XV
Table des listings	XVIII
1 Introduction	1
1 Vers une décentralisation de la production	1
2 Défi : optimiser l'usage des énergies renouvelables dans les microgrilles	3
3 Contexte industriel	5
4 Objectif : modélisation et déplacement d'activité	5
5 Proposition : représentation et méthodologie de gestion d'une exploitation par un jumeau numérique	8
6 Points durs	10
7 Méthodologie et évaluation	10
8 Contributions	12
9 Valorisation de cette thèse	13
10 Plan de ce manuscrit	15
I État de l'art	17
2 Contexte	19
1 Une consommation grandissante	20
1.1 La consommation chez les particuliers	21
1.2 La consommation des secteurs industriels et agricoles	22
1.3 Transports : l'essor des véhicules électriques	23
2 Structure des réseaux électriques	25

2.1	La grille : concentration de la production	25
2.2	Production décentralisée : la microgrille	35
3	Politiques incitatives à l'utilisation des énergies renouvelables	46
3.1	Aspects législatifs	46
3.2	Aspects économiques	48
3.3	Aspects pratiques	48
4	Synthèse	51
3	Exemples et cas d'application	53
1	Description de cas applicatifs	53
1.1	Site d'élevage type	54
1.2	Site industriel type	57
2	Exemple d'analyse industrielle	59
2.1	Analyse des outils et méthodes actuelles	59
2.2	Dimensionnement pour un site type	60
2.3	Optimisation des activités	62
2.4	Intégration des moyens de stockage	62
2.5	Suivi d'installation temps réel	63
3	Conclusion	65
4	État de l'art	67
1	Dimensionnement	69
2	Optimisation par déplacement	72
2.1	Déplacement par stockage	75
2.2	Déplacement orienté machines	79
2.3	Déplacement d'activités	84
3	Prédiction et simulation	87
3.1	Prédiction de production	87
3.2	Prédiction de consommation	89
3.3	Simulation et temps réel	89
4	Récapitulatif de l'existant	91
	Approches existantes	92
II	Proposition : Un jumeau numérique pour le pilotage des microgrilles	97
5	Outils conceptuels pour les Jumeaux Numériques	99
1	Jumeau Numérique actuel dans l'industrie	100
2	Solutions existantes : intégration d'une infrastructure de type models@run.time pour le pilotage	102
	Middleware d'intégration	102
3	Ingénierie Dirigée par les Modèles	106

6	Proposition : un jumeau numérique pour les microgrilles des installations industrielles	113
1	Proposition : un Jumeau Numérique pour l'énergie	114
1.1	Caractéristiques attendues pour la gestion d'énergie	114
1.2	Architecture proposée	116
2	Cadre de validation expérimentale	119
2.1	Démarche	119
2.2	Analyse de terrain et cas d'application	122
2.3	Exigences issues du terrain	124
2.4	Définition des cas d'usage industriels	124
	Résumé des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles	128
3	Synthèse et liens aux points durs	129
III	Réalisation et validation	131
7	RegulDSL : une abstraction et un langage dédié au cœur d'un jumeau numérique	133
1	Construction de l'abstraction, définition et apport de l'ingénierie dirigée par les modèles	135
2	Méthodologie suivie pour la construction de cette abstraction	144
	Première itération	144
	Deuxième itération	144
	Troisième itération : approche actuelle	145
3	Description des abstractions	147
3.1	Niveau global	147
3.2	Description et exécution	148
3.3	Représentation des machines et des données	148
3.4	Gestion du stockage	150
3.5	Gestion des activités et de la variabilité	151
3.6	Extensibilité au niveau méta modèle	155
3.7	Réutilisabilité	156
3.8	Prédiction et services tiers	157
3.9	Contrôle du monde physique	157
4	RegulDSL : un langage dédié à la régulation de l'énergie	159
4.1	Philosophie du langage	159
4.2	Tour d'horizon de la syntaxe concrète	160
4.3	Sémantique opérationnelle	161
4.4	Exemples simples d'utilisation de RegulDSL	162
5	Utilisation de RegulDSL pour explorer l'espace de dimensionnement d'une installation et optimiser le pilotage d'une installation	166
	Optimisation et Demand Response	166
6	Limites et critiques de l'approche proposée	168
	Choix de la stratégie d'optimisation	168
	Simulation discrète	168

Méthodes de Demand Response	169
Encapsulation et accessibilité des plugins	169
Facilité d'évolution et traitement des erreurs	169
8 Implémentation et validation	173
1 Implémentation de notre Jumeau Numérique gestionnaire d'énergie	174
1.1 Méta modèle et structures de données	174
1.2 RegulDSL : langage et outils dédiés à l'énergie	174
2 Validation	179
Matériel utilisé	179
2.1 Cas d'usage n° 1 : Dimensionnement de générateur solaire	180
2.2 Cas d'usage n° 2 : Optimisation de l'organisation des activités	186
2.3 Cas d'usage n° 3 : Gestion du stockage	191
2.4 Cas d'usage n° 4 : Suivi temps réel	194
2.5 Bilan des évaluations	198
9 Conclusion et perspectives	201
1 Synthèse	201
Notre contribution	202
2 Perspectives	203
2.1 Au-delà de l'électricité	203
2.2 Systèmes autonomiques	203
Appendice et bibliographie	207
Annexes	209
1 Grammaire complète du langage RegulDSL	209
Licences	215
Photographies	215
Icônes	215
Bibliographie personnelle	217
Bibliographie	230

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Consommation électrique instantanée et annualisée de différents appareils domestiques	22
2.2	Types de centrales hydroélectriques ainsi que leurs caractéristiques principales	29
2.3	Coût et rejet moyens de gaz à effet de serre par sources d'énergie en France pour les années 2018 et 2019 [112, 16]	34
2.4	Comparaison de différentes technologies de batterie chimique en termes de coût, durée de vie et encombrement.	43
3.1	Récapitulatif de la situation du site type d'élevage. La situation idéale est celle recherchée dans cette thèse.	57
4.1	Extrait de l'état de l'art en matière de modélisation et d'optimisation de la régulation de l'énergie	95
6.1	Résumé des exigences identifiées pour un Jumeau Numérique dédié à l'énergie	128
7.1	Résumé du contenu et du code couleur utilisé dans le méta modèle	147
8.1	Comparatifs des résultats de simulation, les estimations sont marquées d'un astérisque *	184
8.2	Résumé de l'évaluation du cas d'étude n° 1 de dimensionnement	185
8.3	Comparatifs de l'impact de l'installation d'une batterie sur une installation équipée de panneaux solaires dans 2 approches différentes	193
8.4	Rappel des exigences identifiées pour un Jumeau Numérique dédié à l'énergie et cas d'usage dans lequel ils sont étudiés	199

TABLE DES FIGURES

1.1	Illustration de déplacement d'activité	7
1.2	Résumé des deux actions souhaitant être réalisées par des experts sur un site industriel	7
1.3	Structure d'un jumeau numérique et interactions avec son système physique	9
1.4	Déroulement de notre méthodologie de collecte des exigences et de validation	11
2.1	Évolution de la consommation électrique dans le monde entre 1973 et 2016.	20
2.2	Répartition de la consommation par secteur, toutes énergies confondues. Source : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, données 2017.	21
2.3	Schéma simplifié de la structure du réseau électrique	26
2.4	Carte du réseau haute tension en France	27
2.5	2 types d'éoliennes à axe horizontal	30
2.6	Différents types de cellules photovoltaïques et d'installation	31
2.7	Décomposition des 3 principales composantes de l'énergie solaire en fonction de l'installation	32
2.8	Évolution du tarif d'achat en vente totale comparé au tarif réglementé pour un particulier en c€/kWh	36
2.9	Éolienne à axe vertical fabriquée par Noveol, de 3m de diamètre et produisant 6kW . . .	37
2.10	Centrale de panneaux tracké sur deux axes	38
2.11	Différence de production pour une même journée entre une installation solaire fixe et tracking sur 2 axes.	38
2.12	Profil sur 24 heures d'un mix énergétique d'un site industriel	40
2.13	Illustration de deux façons possibles de faire de l'autoconsommation collective	47
3.1	Profil de consommation d'une semaine type, les journées sont plutôt semblables. Les lignes noires montrent les changements de jour à minuit et les zones jaunes indiquent les périodes de 7h00 à 20h00.	54
3.2	Consommation totale hebdomadaire par jour. La consommation est croissante en phase d'élevage puis fortement réduite pendant le vide sanitaire avant de reprendre une phase croissante.	56

3.3	Profil de consommation d'une semaine type, les jours de semaines sont semblables tandis que la consommation est très faible durant le weekend. Les lignes noires montrent les changements de jour à minuit et les zones jaunes indiquent les périodes de 7h00 à 20h00.	57
3.4	Logigramme des différents cas d'usage possible lors d'une étude d'amélioration des performances énergétiques	59
3.5	Extrait d'un tableur permettant de simuler un fonctionnement de batterie	62
3.6	Exemples d'installation de deux types de compteurs électriques	64
4.1	Dimensionnement de moyen de production et stockage par algorithme génétique proposé par [126]	70
4.2	Résumé des moyens d'action sur la consommation inspirée de [82]	73
4.3	Cartographie du Demand Side Management fondé sur [99, 111, 11]	74
4.4	Cycle de charge d'une batterie d'un état initial $SOC_{début}$ à un état final SOC_{fin}	77
4.5	Répartition de la consommation d'une machine-outil industrielle	80
4.6	Modélisation d'une fraiseuse sous la forme d'une machine à états par [37]	81
4.7	Réseau de Pétri modélisant une fraiseuse, deux convoyeurs et un robot [36]	83
4.8	Représentation des consommations facilitant le load shifting , les couleurs représentent des contraintes de placement similaires.	85
4.9	Illustration de la saisonnalité pour une exploitation agricole et des quantités relatives d'énergie, inspiré de [1]	86
4.10	Illustration d'utilisation d'un service d'apprentissage du point de vue d'un outil de gestion de l'énergie	88
5.1	Illustration du Jumeau Numérique tel que défini dans la littérature	101
5.2	Architecture simplifiée d'un middleware d'intégration de capteurs et de services	103
5.3	Architecture OSGi, 3 bundles sont chargés	105
5.4	Étapes de création d'un domaine d'abstraction et d'outils de modélisation	107
5.5	Exemple de DSL textuel dédié à l'agriculture proposé par [17]	108
5.6	Un langage graphique et textuel dédié à l'agriculture et à l'optimisation des ressources pour l'irrigation des cultures par [17]	109
6.1	Schéma global simplifié de notre proposition de Jumeau Numérique enrichi pour la gestion de l'énergie et ses interactions avec les différents acteurs et le site physique instrumenté	115
6.2	Pictogrammes utilisés pour représenter les différents personnas d'acteurs	120
6.3	Logigramme des différents cas d'usage possibles lors d'une étude d'amélioration des performances énergétiques	123
7.1	Place du langage dédié dans l'approche globale	134
7.2	Étape amont de dialogue entre l'Expert et l'Utilisateur exploitant le site industriel ou agricole.	135
7.3	L'Expert configure des blocs réutilisables issus d'un registre de composants	136
7.4	Illustration d'un déplacement d'activité favorisant la production locale d'énergie	137

7.5	Représentation du problème d'optimisation décrit, un chemin optimisé est représenté en pointillés rouges	138
7.6	Illustration des abstractions, le producteur associe un coût nul à sa production tandis que le consommateur associe un coût identique.	140
7.7	L'Expert configure des blocs réutilisables issus d'un registre de composants	141
7.8	Illustration de l'hétérogénéité capturée au sein du modèle, une machine peut pointer vers un service tiers ou un capteur d'une machine physique.	142
7.9	Détail de la boucle de rétroaction proposée	143
7.10	Vue globale simplifiée du méta modèle et de sa racine	147
7.11	Méta classes responsables de l'exécution des modèles	148
7.12	Méta classes chargées de modéliser les données de consommation et production	149
7.13	Illustration des abstractions, le producteur associe un coût nul à sa production tandis que le consommateur associe un coût identique.	150
7.14	La gestion du stockage est proche de celle des activités d'un point de vue méta modèle	152
7.15	Méta classes permettant de capturer la variabilité et la flexibilité des activités	154
7.16	Méta classes permettant de laisser à l'utilisateur la liberté d'étendre	156
7.17	Un modèle peut inclure des références externes à d'autres modèles	157
7.18	Intégration de service de prédiction au niveau méta modèle	157
7.19	Branchement du modèle au système réel physique	158
7.20	Structure de l'optimisation proposée suivant le patron de conception Stratégie	167
8.1	Illustration de l'éditeur dédié au langage Reguldsl développé dans cette thèse	175
8.2	Détail des vues de l'éditeur dédié au langage Reguldsl en Figure -Figure 8.1	176
8.3	Représentation d'une partie du problème d'optimisation décrit dans le DSL en Listing - ?? 7.8. Les différents cas possibles de début de l'activité du matin sont autant de choix possibles pour la phase d'optimisation. Un chemin optimisé est représenté en pointillés rouges	189
8.4	Diagramme mettant en avant les liens entre les abstractions et les équipements phy- siques. Le tracker fournit ses données tandis que l'activité "création" est en charge du pilotage du stockage "tank"	196
8.5	Suivi dans la plateforme dédiée, le graphique en haut représente les flux d'énergie élec- trique et celui du bas l'état de charge du moyen de stockage au cours du temps. La pro- duction d'énergie est en vert, la consommation teinte de rouge. La ligne verte correspond à un seuil de sécurité que le système essaie de maintenir.	197

LISTINGS

4.1	Exemple de formule obtenue par regression pour lier les valeurs environnementales à une irradiance nécessaire au calcul de production d'énergie.	88
6.1	Coûts associés aux sources d'énergie pour permettre de favoriser l'autoconsommation .	117
6.2	Exemple de coût associé à la grille pour représenter un tarif variable dans le temps et favoriser certaines périodes de fonctionnement.	117
7.1	Déclaration d'un site industriel nommé UsineA	160
7.2	Déclaration de plusieurs contexte d'exécution pour le site UsineA	160
7.3	Déclaration d'une configuration d'activité ayant un coût et uniquement un profil de consommation	160
7.4	Déclaration de plusieurs activités réutilisant des configurations et définissant des récurrences d'évènements	161
7.5	Déclaration d'une batterie de 1000unité-heures, pouvant être des wattheures et d'une profondeur de décharge 30%, les puissances maximales de charges et décharges sont spécifiées par la configuration cycleBatterie qui n'est pas décrite	161
7.6	Modèle d'exécution d'un site contenant un générateur sur une année.	163
7.7	Suivi temps réel d'un point de production et de consommation en vue d'une étude d'optimisation	163
7.8	Définition d'une activité de consommation constante avec une variabilité et une flexibilité. .	164
7.9	Définition d'une batterie électrique à partir de quelques caractéristiques.	165
8.1	Implémentation d'un plugin pour représenter le coût variable d'un contrat de fourniture d'électricité	176
8.2	Implémentation d'une stratégie minimisant le coût de la prochaine décision à court terme	177
8.3	Modélisation d'un scénario à évaluer fondé sur des fichiers de production et consommation obtenus sur le terrain ou à l'aide de services tiers.	181
8.4	Modélisation de la variabilité d'une activité à consommation constante dans une installation ayant un tracker solaire et d'autres consommations.	187
8.5	Modélisation d'un scénario à évaluer contenant 1 producteur et 1 consommateur fondés sur des fichiers issus de relevés, ainsi qu'une batterie définie par ses caractéristiques. . .	191

8.6	Extrait de la modélisation permettant le suivi et le pilotage d'un site industriel expérimental	194
IX.1	Grammaire Xtext du langage RegulDSL	209

INTRODUCTION

Résumé

Un des moyens d'améliorer l'efficacité énergétique des sites industriels est la décentralisation des sources de production. Seules les énergies renouvelables peuvent être installées localement tout en maintenant un niveau de rejet de gaz à effets de serre acceptable. Cette décentralisation s'accompagne de problématiques de dimensionnement des moyens de production et de stockage, de gestion des surplus de production et d'intégration aux sites industriels et à leurs équipements. Ces problèmes sont très spécifiques à chaque site et très liés au matériel installé. Cependant ces problématiques nouvelles ont vu émerger des outils complexes et spécifiques à chaque situation. Il ressort un besoin d'unification de ces méthodes et d'une meilleure intégration des capteurs du monde physique. Dans cette thèse, nous proposons une nouvelle approche modulaire et évolutive fondée sur de la simulation et de la modélisation des activités pour optimiser leur planification autour d'une notion de Jumeau Numérique dédiée à la gestion de l'énergie.

SECTION 1

VERS UNE DÉCENTRALISATION DE LA PRODUCTION

L'efficacité énergétique est une préoccupation avec une influence importante sur l'économie et l'écologie. Les enjeux climatiques actuels poussent à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, mais leur prix et leur production irrégulière fait qu'elles sont encore trop peu utilisées. Leur utilisation est d'autant plus faible dans les pays où le prix de l'électricité est faible, comme en France. Cela fait de l'amélioration de l'utilisation de ces énergies renouvelables un enjeu majeur.

En France, les principales sources de production d'énergie sont les 19 centrales nucléaires. Elles produisent 402TWh en 2016, soit 72.3% de part de la production d'électricité, répartie sur le territoire. L'un des points forts des centrales nucléaires est qu'elles rejettent très peu de gaz à effet de serre : de l'ordre de 20gCO₂/kWh. Ceci est équivalent à la production éolienne, légèrement inférieur à la production photovoltaïque, mais 20 fois moins qu'une centrale à gaz et au moins 40 fois moins qu'une centrale à charbon. L'utilisation massive de centrale nucléaire fait en revanche que la production française est très centralisée : chaque consommateur dépend d'une production faite à grande distance : l'électricité doit donc parcourir de nombreux câbles et transformateurs. Ces différentes étapes induisent des pertes, par exemple l'effet Joule qui représente les pertes dues à la distance de câble est estimé entre 2 et 3.5% de la production totale française. Une trop forte centralisation a deux effets négatifs majeurs :

1. les pertes en lignes, pour atteindre toutes les régions consommatrices d'énergie,
2. la dépendance au prix des consommateurs, et de ses variations, fixées par les opérateurs du réseau.

Pour remédier aux pertes en ligne, une solution est donc de **décentraliser** cette production, pour une entreprise souhaitant être en maîtrise de son énergie la solution est d'installer des générateurs d'énergies renouvelables. Ces sources d'énergie rejettent moins de gaz à effet de serre que la majorité des centrales [112]. Cette production locale lui permet de se rendre moins dépendante du réseau électrique national : de ses fluctuations de **prix** ainsi que de ses rares, mais possibles, pannes. Cette indépendance du réseau apporte un bénéfice économique direct à l'entreprise, mais lui permet également de possiblement alléger son impact en CO₂ rejeté dans l'air de par son utilisation d'énergies renouvelables. La production locale d'énergie permet à une entreprise de réduire l'impact des fluctuations de prix de l'électricité sur son activité lui offrant donc plus de liberté sur son organisation ainsi qu'une meilleure visibilité au long terme sur ses investissements.

Les sites isolés : trop reculés ou dans des zones difficiles d'accès telles que des îles ou des zones de hautes montagnes sont très dépendantes de leurs sources d'énergie. Ils reposent généralement sur l'utilisation de générateurs au diesel ou au fioul. Ces générateurs ont l'avantage de produire de manière constante et facilement prévisible, en revanche ils consomment des énergies fossiles et rejettent d'importantes quantités de gaz à effet de serre c'est pourquoi ils ne représentent pas une solution viable sur le long terme.

En dépit de leur popularité, les énergies renouvelables ne sont pas pour autant une *Silver Bullet* [15], leur intégration est plus complexe que l'installation de générateurs diesel : leurs productions irrégulières dépendant de facteurs externes, principalement de conditions météorologiques. Le peu de solutions commerciales permettant d'optimiser leur usage s'explique par l'importance des données de terrain. Pour une implantation géographique, l'historique de production est nécessaire pour raffiner ou estimer un *productible* : la production moyenne d'un moyen de production d'énergie sur une longue période. Plus cette période est longue, de l'ordre de l'année ou de plusieurs années, plus l'estimation sera proche de la production réelle obtenue sur le terrain. À l'inverse, plus cette période est courte plus l'impact de la météo et de la saisonnalité sera important ce qui produira des estimations erronées.

Pour faciliter l'intégration des moyens de production, il convient de réduire les pertes de transformation et d'éviter au maximum les surplus de production. Pour ce faire, il faut donc rapprocher les moyens de production des consommateurs et produire le même ordre de grandeur de quantité d'énergie que la consommation. Ce rapprochement des moyens de production crée des **microgrilles** [109]. Pour être adoptée, la décentralisation doit être rentable économiquement. Elle s'accompagne de nombreux challenges pour rester compétitive économiquement par rapport à l'utilisation de la grille seule, autrement dit, sans moyens de production locaux :

- les moyens de production d'énergie et de stockage doivent être correctement **choisis et dimensionnés**,
- la production locale doit être en **adéquation** avec la consommation pour réduire au maximum les surplus d'énergie,
- des changements dans les habitudes de consommation doivent être pertinents d'un point de vue économique, écologique et humain,
- la mise en œuvre de ces changements demande une certaine **intégration** et un certain **contrôle** du matériel existant.

SECTION 2

DÉFI : OPTIMISER L'USAGE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LES MICROGRILLES

Favoriser l'usage des énergies renouvelable pose de nombreux défis à la communauté scientifique. Deux façons existent pour aider à leur développement : les actions politiques et l'attractivité économique, la première pouvant impacter la seconde par la forme de subventions. Pour être compétitive sur le plan économique, l'énergie produite localement doit donc être inférieure ou égale au coût de l'électricité venant de la grille. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse au point de vue technique qui favorise l'attractivité économique hors subvention. Nous choisissons ici les microgrilles car elles représentent un secteur propice à l'exploration, avec des activités à taille humaine.

L'augmentation de la rentabilité s'obtient en jouant sur plusieurs facteurs :

1. le **dimensionnement** des moyens de production afin qu'ils correspondent aux besoins. Surdimensionner implique plus de frais d'investissement qui ne pourront pas nécessairement être amortis, car la surproduction repartirait sur la grille à un prix de rachat beaucoup trop faible. Sous-dimensionner est un moyen d'être sûr de consommer l'intégralité de sa production, mais implique que peu de consommation est effacée et donc que le site dépend encore grandement de la grille. Trouver le bon équilibre est une tâche complexe afin de trouver le bon équilibre entre les bonnes journées de production et les mauvaises.
2. l'**adéquation de la consommation et de la production** si les journées sont trop différentes les unes des autres ou si la production varie trop, aligner la production sur la consommation est un moyen efficace d'améliorer la performance des moyens de production.

3. la **capacité de prédiction** des aléas météorologiques et humains ont un impact sur la performance d'un site. La prédiction de ces aléas est un point clé de l'efficacité énergétique. Ces méthodes peuvent également être utilisées en dimensionnement ou alignement de la consommation.

Ces trois points constituent des challenges importants qui ont été abordés depuis quelques années par la littérature scientifique. L'augmentation de la part d'énergie renouvelable est généralement le résultat d'une optimisation économique, mais il est possible de vouloir optimiser d'autres aspects. Ces autres aspects peuvent inclure : l'optimisation de l'autonomie énergétique [33] d'un site ou l'optimisation du bilan carbone. Tous ces aspects peuvent se regrouper sous le terme de **coût** à optimiser même si nous utilisons le terme de coût économique dans cette thèse, il est peut-être remplacé par n'importe quel autre facteur sans changement dans les notions et approches discutées.

Pour l'identification de ces challenges par les experts et la communauté scientifique, plusieurs **problématiques** se présentent et limitent la démocratisation des pratiques d'autoconsommation. Nous les regroupons en 4 thèmes :

1. **Synthèse** Comment fournir une vue synthétique et précise des moyens à mettre en œuvre pour améliorer l'autoconsommation ?
2. **Analyse** Comment permettre à un expert de comparer différentes approches matérielles et organisationnelles ?
3. **Préconisation** Comment faciliter la mise en œuvre de scénarios estimés au sein d'une entreprise ou d'un site industriel ?
4. **Évolution** Comment suivre les changements d'un site équipé et des nouveaux appareils qu'un gestionnaire voudrait installer ?

Ces aspects sont des préoccupations de la communauté des systèmes électriques et intéressent d'autres communautés telles que celle des réseaux IoT et du génie logiciel. Ces préoccupations sont l'objet de nombreux projets de recherche. L'installation de moyens de production locaux représente un investissement important pour une entreprise, améliorer la fiabilité des estimations de production et les possibles réductions de facture d'électricité est un aspect déterminant. Il existe des outils de modélisation précis pour estimer plus finement la production à partir de données environnementales, par exemple en utilisant des techniques d'apprentissage machine (*Machine Learning*).

Les outils existants sont limités pour deux raisons principales :

- Ils nécessitent des connaissances très fines en informatique, du domaine ou des machines et outils. Elles sont donc difficiles à estimer par un référent énergie par exemple qui n'a pas forcément d'expertise sur les moyens de production,
- ils sont sur-spécialisés sur un moyen de production, par exemple l'estimation de production de panneaux solaires fixes, ou sur une situation précise : la gestion d'un parc batteries pour un site isolé par exemple.

Pour être *efficace* d'un point de vue énergétique, une consommation doit :

- être réalisée au bon moment par rapport aux moyens de production locaux,
- prendre en compte au mieux les moyens de stockage,
- utiliser la machine la plus adaptée et la mieux dimensionnée.

SECTION 3

CONTEXTE INDUSTRIEL

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec OKWind¹. OKWind est une entreprise française d'une cinquantaine d'employés située à Vitré (35) fondée en 2009. Elle conçoit et fournit à ses clients des générateurs d'énergies renouvelables tels que des éoliennes à axe vertical ainsi que des trackers solaires. OKWind promeut un développement d'infrastructure de type **microgrille** et équipe des sites industriels et agricoles en maximisant leur autonomie énergétique.

OKWind suit la production de ses générateurs ainsi que la consommation totale des sites qu'elle équipe afin d'améliorer ses services et fournir à ses clients une interface de suivi de leur installation. Chaque site équipé peut être vu comme une microgrille, utilisant la grille lorsque la production locale n'est pas suffisante. OKWind souhaite fournir à ses clients une brique logicielle capable de modéliser leurs activités en termes de consommation énergétique afin de correctement choisir et dimensionner des moyens de production d'énergie renouvelable et de stockage à mettre en place. Cet outil doit être en mesure de prendre des décisions ou de conseiller l'utilisateur final sur sa façon de consommer et stocker de l'énergie en prenant en compte ses besoins courants et à venir et son environnement direct, comme ses conditions météorologiques.

L'entreprise OKWind fournit les cas d'utilisation servant à valider les contributions de cette thèse. Les expérimentations sur le terrain décrites plus loin dans ce manuscrit sont réalisées chez des clients volontaires. Les données réelles utilisées lors des diverses simulations proviennent des capteurs installés chez ses clients, soit collectées indépendamment au travail de cette thèse, soit dans le cadre de cette thèse.

Dans une optique de croissance et d'industrialisation, OKWind cherche à améliorer ses méthodes en se dotant d'une nouvelle méthodologie capable de s'adapter à la diversité croissante des entreprises et de leurs systèmes électriques afin d'accompagner ses clients vers une meilleure efficacité énergétique [29, 13].

SECTION 4

OBJECTIF : MODÉLISATION ET DÉPLACEMENT D'ACTIVITÉ

Notre objectif est la conception d'une méthodologie outillée :

- permettant la **simulation** de fonctionnement et l'évaluation de scénarios,

1. Site web accessible à l'adresse : <https://okwind.fr>

- permettant la **prédiction** de la consommation et de la production d'énergie,
- fournissant des **préconisations** de déplacement des activités de l'entreprise ciblée afin d'améliorer son efficacité énergétique.

En plus de ces fonctionnalités attendues par les experts du domaine, plusieurs propriétés sont nécessaires :

- **simple à utiliser** pour un expert du domaine. Cette personne peut être un référent énergie ou un expert du secteur d'activités de l'entreprise. Elle connaît le matériel utilisé par les différents *process* du site industriel, mais n'a pas de connaissances poussées en physique ou en électricité.
- **évolutif** pour pouvoir prendre en compte des innovations constantes du secteur des énergies renouvelables et du stockage de manière générale.

Le but de cette modélisation est de permettre de comparer des organisations d'entreprises différentes en termes de matériel installé : panneaux solaires, références de machines industrielles, moyens de stockage et d'horaires des activités au sein d'une journée ou d'une semaine.

La comparaison de deux configurations d'un site reste subjective, un expert doit pouvoir évaluer **plusieurs critères** simultanément pour choisir le meilleur compromis. Ils peuvent consister en :

- favoriser uniquement l'aspect économique, pour amortir le plus rapidement les investissements et réduire au maximum les factures d'énergie,
- réduire au maximum les émissions de gaz à effet de serre en privilégiant au maximum les énergies renouvelables qu'importe le coût économique,
- impacter le moins possible les activités des employés de l'entreprise en agissant uniquement sur du matériel contrôlable de manière automatique ou en ne faisant des changements de planning que s'ils sont très rentables et ne modifient pas les horaires de travail.

En plus de cette analyse de compromis, appelée *trade-off analysis* dans la littérature [113, 52], un gestionnaire de site industriel a pour objectif de mettre en œuvre les changements suggérés par cette phase d'analyse. Au-delà des possibles changements d'horaires des activités humaines, l'usage de batteries pour stocker des surplus de production d'énergies renouvelables et le déclenchement d'un chauffe-eau au bon moment sont des actions automatisables. Le déplacement d'activités, illustré en Figure -Figure 1.1, à des fins d'optimisation énergétique fait parti du domaine du **Demand Response** [120, 129] et plus spécifiquement du **Demand Shifting**.

Nous avons identifié deux phases pour mener à bien cette optimisation de l'efficacité énergétique :

- correctement dimensionner des moyens de production ou de stockage à installer sur un site industriel,
- optimiser les heures et durées des activités pour avoir lieu au meilleur moment, au regard de la production d'énergie.

La Figure -Figure 1.2 reprend donc ce double objectif : être en mesure de calculer au mieux

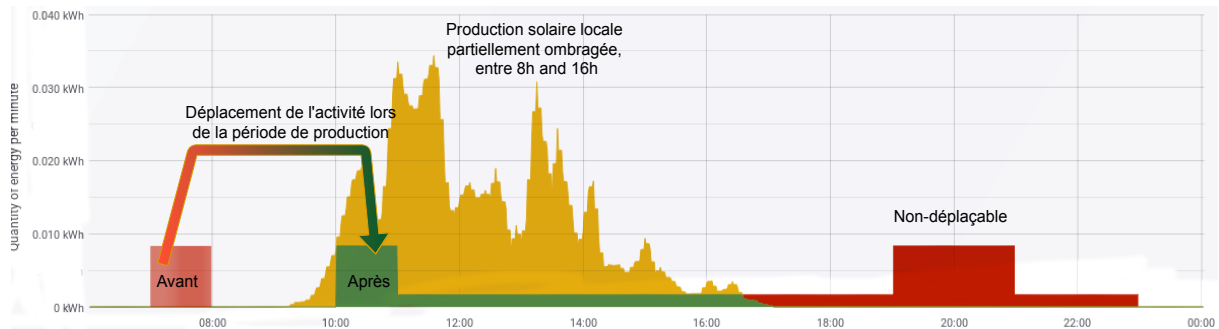


FIGURE 1.1 – Illustration de déplacement d'activité

la meilleure taille et puissance de générateurs à installer de manière prospective, en se basant sur des données de consommation suite à une campagne de mesure par exemple et l'objectif continu de suivre au jour le jour la consommation d'un site pour y appliquer une politique d'optimisation fondée sur l'observation et sur les résultats de simulation.

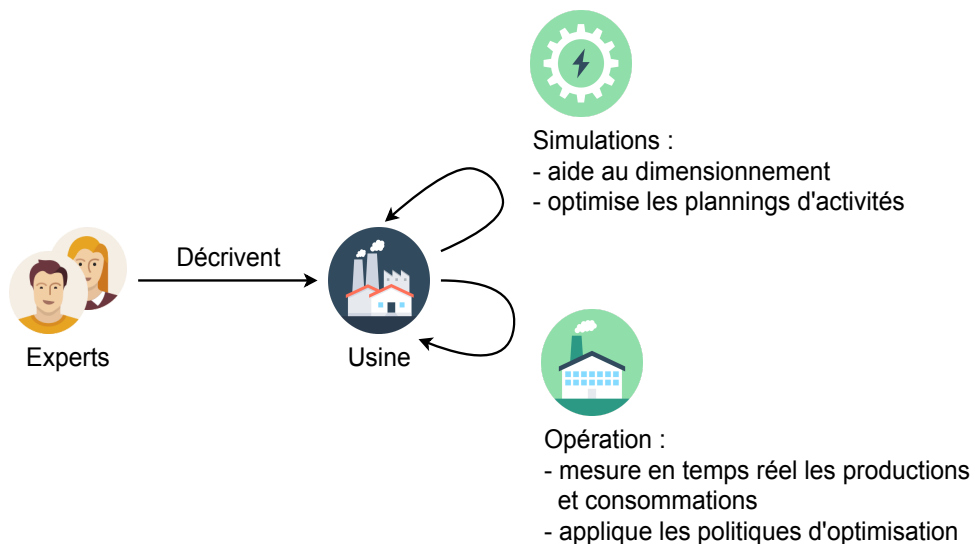


FIGURE 1.2 – Résumé des deux actions souhaitant être réalisées par des experts sur un site industriel. L'objectif final est l'amélioration de l'efficacité énergétique.

De nombreuses études sont menées sur la modélisation précise de fonctionnement de technologies spécifiques de batterie d'un point de vue électrique, sur la prévision de production d'éoliennes ou de panneaux solaires. Cependant, très peu de recherche s'intéresse à l'intégration de ces solutions au sein d'un outil commun qu'une entreprise pourrait utiliser.

Nous nous intéressons à la consommation des entreprises, des industriels et des agriculteurs [104]. Leur consommation est très importante et leurs activités organisées et modélisables. Paradoxalement, l'essentiel des recherches s'est concentré sur le résidentiel alors que la modélisation y est plus complexe. Les consommations électriques y sont moins homogènes, chaque personne consomme de l'éner-

gie différemment, à des moments différents et est beaucoup moins tolérante à accepter des changements dans ses habitudes, principalement à cause des contraintes liées au rythme de vie. De notre point de vue, le choix du résidentiel tient du fait que les données sont plus facilement à acquérir et à utiliser. Le secteur industriel utilise des machines utilisant un courant triphasé et de plus grande puissance, le matériel d'acquisition y est donc plus cher et plus difficile à installer. À cela s'ajoute le secret industriel, peu d'entreprises sont prêtes à divulguer les références exactes de leurs machines et de leur façon de s'en servir.

Plutôt que de nous intéresser à de faibles consommations présentes dans un grand nombre de foyers, nous nous concentrons ici sur les consommations plus importantes d'entreprises. Nous pensons en effet que ces activités sont beaucoup plus prédictibles, modifiables et déplaçables. Il est ainsi possible d'optimiser les processus métiers pour favoriser l'utilisation des énergies renouvelables. Ceci pose un certain nombre de défis que nous détaillons dans la partie suivante.

Pour répondre à ces challenges nous proposons de les intégrer à une modélisation unique : un *jumeau numérique*, afin de simuler le comportement énergétique d'un site et explorer l'impact des choix de matériel.

SECTION 5

PROPOSITION : REPRÉSENTATION ET MÉTHODOLOGIE DE GESTION D'UNE EXPLOITATION PAR UN JUMEAU NUMÉRIQUE

Les termes de Jumeau Numérique ou *Digital Twin* [55], sont des termes issus de la communauté de l'Industrie 4.0 et ont fait l'objet de plusieurs définitions plus ou moins proches. Negri *et al.* [96] proposent une revue de l'utilisation de ce terme dans différents domaines de l'industrie. Schroeder *et al.* soulignent l'importance des équipements permettant un lien avec les appareils physiques dans leur définition :

Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems. — [118]

Edward M. Kraft y ajoute les objectifs de simulation et de prédiction des comportements :

An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available models, sensor information, and input data to mirror and predict activities/performance over the life of its corresponding physical twin. — [77]

Les jumeaux numériques s'inscrivent dans la continuité des approches dirigées par les modèles (IDM) et notamment les *model@runtime*. Leur idée commune est de maintenir une modélisation pendant l'exécution d'un système complexe [45, 2]. Il est possible de synchroniser les changements venant du physique dans le modèle et d'agir sur lui afin d'impacter le système exécuté.

Fondée sur ces définitions nous proposons la définition suivante pour le reste de ce document :

Le *Jumeau Numérique* décrit une **vue globale** et simplifiée d'un site industriel, voir Figure - Figure 1.3, ou plus généralement d'une microgrille avec des échanges d'énergie. Ces échanges sont issus de moyens de consommation et de production d'énergie réelles agissant comme sources de données.

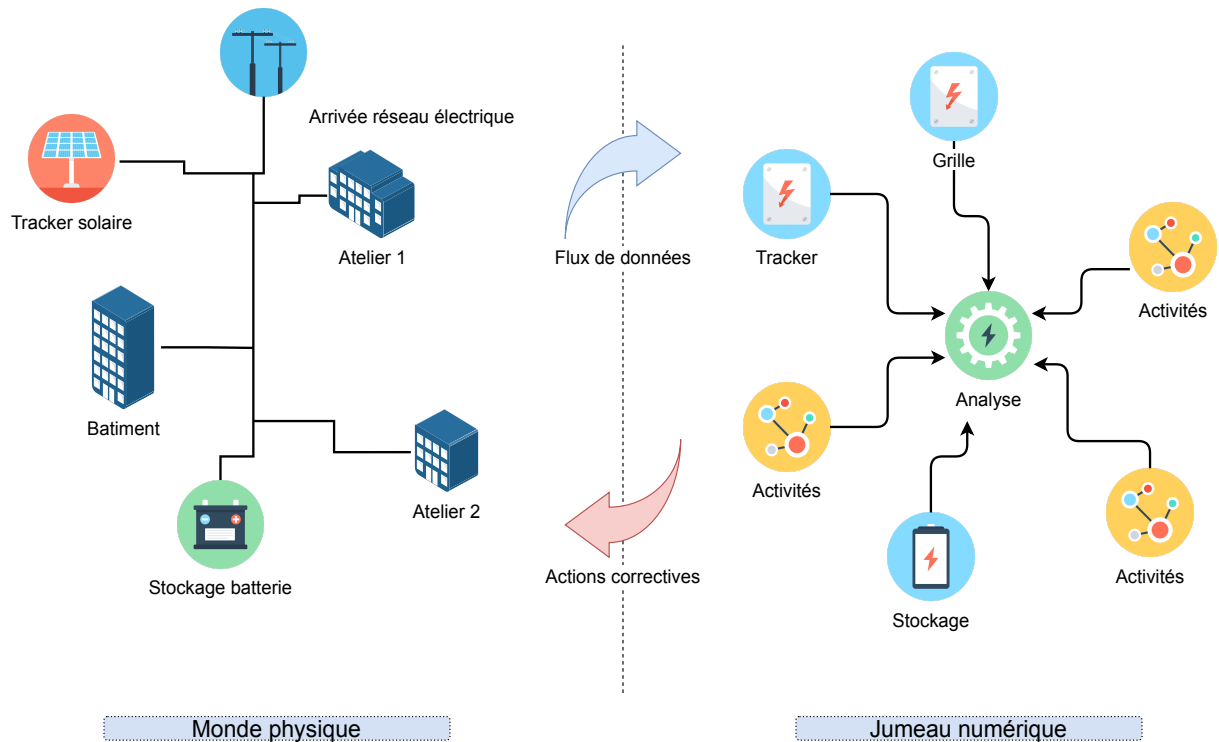


FIGURE 1.3 – Structure d'un jumeau numérique et interactions avec son système physique

Ces sources de données énergétiques sont enrichies par une description des activités humaines et organisationnelles habituelles, en particulier leurs contraintes horaires et leurs dépendances. Le jumeau numérique est utilisé pour :

- simuler des changements de comportement
- évaluer des hypothèses : un changement de matériel, un ajout, une suppression voire même des aléas météorologiques.

Le but de ces simulations est d'estimer la performance de l'ensemble et sert donc d'aide à la décision. Les sources de données constantes de la partie physique peuvent servir de détecteur d'anomalie et participent à la bonne santé de l'ensemble. Pour finir, la vue numérique n'est pas juste une abstraction d'un système physique, elle est également capable d'agir sur ce système avec plus ou moins d'autonomie.

SECTION 6

POINTS DURS

Plusieurs éléments rendent complexe la mise en œuvre d'un Jumeau Numérique efficace dans un contexte de gestion d'énergie. Cette complexité est principalement issue des systèmes électriques et de leur régulation. Notamment, cette complexité s'exprime au travers plusieurs facettes :

- **techniques** : l'intégration des appareils communicants aux *smartgrids* est un marché relativement nouveau, les pratiques s'accordent sur les tendances des réseaux informatiques et donc multiplient les standards et les usages,
- **algorithmiques** : la littérature propose différentes manières d'optimiser certains aspects particuliers d'un réseau électrique en se concentrant sur des problématiques de stabilité notamment, d'autres objectifs peuvent être cherchés et sont autant de nouveaux critères à prendre en compte,
- **moyens de production en évolution** : par leur attractivité écologique et économique les énergies renouvelables se sont grandement développées et diversifiées ces dernières années,
- **appareils consommateurs** : les machines et les consommateurs sont très liés aux pratiques et aux secteurs d'activités. En constante évolution, les possibilités et combinaisons d'appareils dans une installation sont illimitées,
- **moyens de stockage** : les contraintes de stabilité des réseaux électriques et les nouveaux modes de mobilité ont permis une large démocratisation des batteries et du stockage de l'énergie sous toutes ses formes,
- **contraintes et évolutions environnementales** : les systèmes physiques et les interactions humaines sont fortement impactés par leur environnement direct et indirect, jusqu'aux conditions climatiques,
- **abstraction** : trouver le bon niveau d'abstraction entre l'organisation des utilisateurs finaux et les experts utilisant les outils de simulation.

SECTION 7

MÉTHODOLOGIE ET ÉVALUATION

Afin de valider notre approche, nous proposons une méthodologie en 4 étapes en nous aidant d'experts du domaine de l'énergie et des secteurs étudiés ainsi que d'utilisateurs types que nous avons interrogés sur leurs pratiques lors d'entretiens. Le déroulement de notre validation est résumé dans la Figure -Figure 1.4.

Nous évaluons notre proposition de méthodologie en fonction de critères fonctionnels et non fonctionnels établis en collaboration avec les experts et les utilisateurs durant les étapes 1 à 3.

La validation, en étape 4, est réalisée par la simulation et la mesure de données issues d'applications déployées le terrain. Elle cherche à valider notre approche par rapport aux challenges identifiés, et en se comparant aux méthodes actuellement en place.

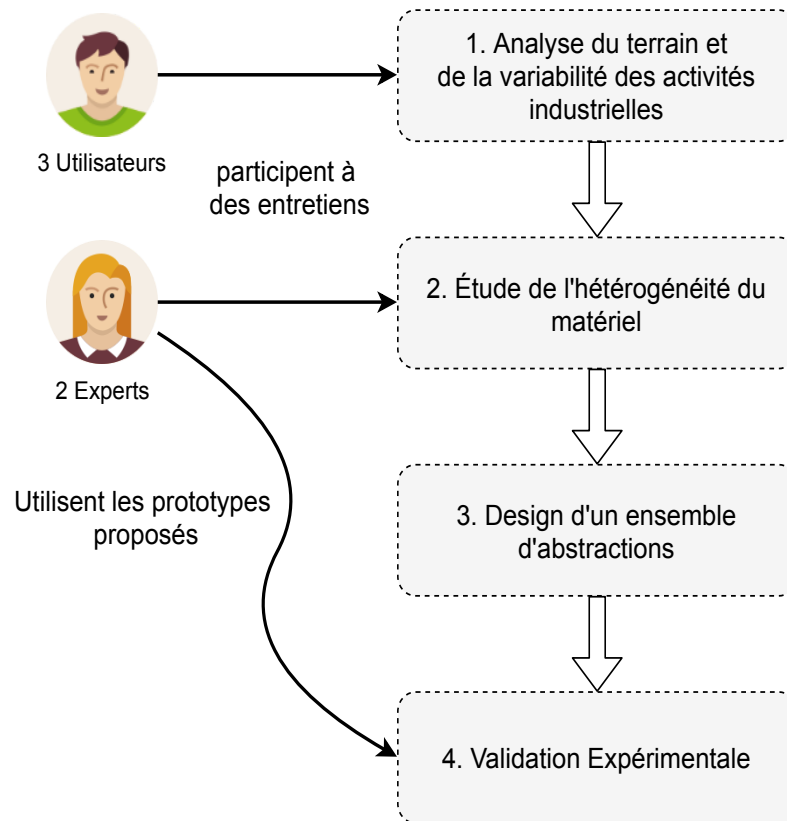


FIGURE 1.4 – Déroulement de notre méthodologie de collecte des exigences et de validation

1. Les **fonctionnalités** attendues sont les suivantes :

- a) **dimensionnement** de matériel électrique tout en permettant une viabilité économique,
- b) **optimisation** des consommations par rapport à une production d'énergie afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'ensemble, cela inclut différentes méthodes de *Demand Response*,
- c) intégration de moyens de **prédiction** se basant sur l'apprentissage de motifs récurrents et permettant d'améliorer la qualité des optimisations,
- d) **suivi** de système en temps réel pour permettre la collecte directe des données et la mise en œuvre des optimisations retenues.

2. **l'extensibilité** est nécessaire à l'évolution des systèmes et à la gestion de l'ajout de nouveaux matériels dans les sites industriels,

3. **l'accessibilité** en comparant notre approche et une approche plus manuelle en termes de rapidité de prise en main et de résultats obtenus.

Ces deux derniers critères sont propres à la méthodologie et à son utilisation dans un contexte industriel.

SECTION 8

CONTRIBUTIONS

Dans cette thèse, nous décrivons une méthodologie outillée fondée autour de la construction d'un **jumeau numérique** pour représenter les interactions énergétiques au sein d'une entreprise ou n'importe quel système de microgrille. Cette abstraction commune permet de manipuler les algorithmes d'optimisation issus de la littérature sur l'ensemble préoccupation énergétique. Ce jumeau permet de contrôler son pendant physique, simuler son comportement et dimensionner d'éventuels ajouts de matériel.

La construction de ce jumeau numérique est accessible à une personne non experte des systèmes informatiques contrairement à la majorité des méthodes de la communauté. Ce jumeau fournit à un expert les abstractions de haut niveau nécessaires pour répondre aux challenges que nous avons identifiés au travers de nos contributions :

1. Le dimensionnement est rendu possible par la simulation des différents composants et par l'évaluation de la performance énergétique de l'ensemble au travers d'un **langage et d'un éditeur dédiés**, aux problématiques de représentation des activités consommatrices d'énergie. Ce DSL permet d'aider un expert à décider de la taille idéale d'un moyen de production ou de stockage,
2. Une **architecture extensible** permettant d'intégrer la constante évolution du matériel qu'un expert peut vouloir inclure. Cette extensibilité peut permettre de d'abord utiliser une représentation très simple d'un appareil dans un premier temps et laisser à un expert la possibilité d'utiliser par la suite une représentation plus complexe, mais plus fidèle au réel par la suite. De cette manière il est possible de construire rapidement des modèles de sites industriels pour obtenir des résultats préliminaires et de raffiner ce modèle partie par partie.
3. Un **outil de simulation**, reposant sur l'ingénierie dirigée par les modèles [117], de simulation et d'optimisation permettant **d'exécuter et analyser différents scénarios**. Notamment, pour permettre la mise en correspondance de la consommation par rapport à la consommation nous proposons un moyen d'appliquer différentes méthodes de *Demand Response* de la littérature afin d'optimiser les activités représentées. Cette optimisation permet d'extraire des recommandations à fournir pour les personnes exploitant les sites pour être appliquées dans les cas où le matériel ne peut pas directement être piloté au travers de la représentation virtuelle du site. L'intégration de ces éléments de *Demand Response* nous permet de fournir un outil d'analyse de compromis à un expert lui permettant d'atteindre un objectif qu'il peut fixer au niveau global : tel que l'optimisation économique de l'ensemble ou le meilleur taux d'autonomie énergétique.

Notre contribution repose sur l'utilisation de techniques d'ingénierie dirigées par les modèles, (IDM), pour représenter la variabilité des activités humaines et matérielles.

Un pic de consommation peut être causé par une machine qu'une entreprise ne soupçonnerait pas, pensant sa consommation minime. L'identification des consommations est une étape importante dans l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les entreprises utilisent beaucoup de machines différentes tout au long de la journée, si les machines-outils, telles que les perceuses et découpeuses laser, sont facilement identifiables et assimilables à une personne ou à un groupe de personne et donc facilement déplaçable cela peut être plus compliqué à l'échelle d'un site industriel. Être en mesure d'intégrer les contraintes humaines de partage et de conflit d'utilisation d'une machine pour être en mesure d'effectuer des déplacements ou des actions sur la consommation électrique tout en respectant une qualité de service est au cœur de notre volonté d'aborder la représentation au niveau des activités et non seulement au niveau des machines.

Nos contributions ont également abordé plusieurs challenges techniques peu étudiés dans la littérature, notamment :

- **La prise en compte de tous les aspects énergétiques dans une vue globale.** Notre volonté est de proposer une vision d'ensemble d'un site industriel d'un point de vue énergétique. Cela signifie être en mesure de faire fonctionner différents appareils à différente échelle de temps, en intégrant leurs contraintes de fonctionnement, leurs interactions ainsi que leur usure. Ces points sont adressés par notre modèle regroupant ces aspects sous des abstractions communes et principalement détaillées dans le chapitre 7.
- **Une optimisation des activités de l'entreprise.** L'optimisation du fonctionnement d'une entreprise est un problème complexe, il nécessite d'explorer de très nombreuses configurations, d'évaluer l'impact de chaque déplacement d'activité tout en s'assurant de respecter les contraintes propres au secteur d'activité. Notre méthode de calcul pour l'optimisation est présentée avec notre approche au chapitre 6.

SECTION 9

VALORISATION DE CETTE THÈSE

Les travaux développés dans cette thèse sont publiés dans deux conférences internationales à comité de relecture :

- Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Olivier BARAIS et Yoran BUGNI, "Efficient use of local energy : An activity oriented modeling to guide Demand Side Management", in : **MODELS 2018** - 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems [106], sur les aspects d'ingénierie dirigée par les modèles particulièrement détaillés dans le chapitre 7,
- Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Yoran BUGNI et Olivier BARAIS, "Benefits of Energy Management Systems on local energy efficiency, an agricultural case study", in : **SmartGridComm 2019** - IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids [107], pour y présenter l'intérêt d'une vision globale au dimensionnement des moyens de production et stockage pour les microgrilles.

Au niveau national, ces travaux ont également été présentés aux Journées nationales du Génie de la Programmation et du Logiciel **GDR GPL** 2019 afin de discuter avec la communauté du Génie Logiciel des méthodes de calcul utilisées par les communautés des systèmes électriques.

SECTION 10

PLAN DE CE MANUSCRIT

La suite de ce manuscrit se compose de trois parties.

La première partie présente le contexte ainsi que l'état de l'art de l'optimisation de l'énergie. Ses chapitres sont les suivants :

- Le **chapitre 2** détaille l'organisation et la structure du réseau électrique au niveau national ainsi que ses limites écologiques et ses contraintes économiques. La réduction des émissions de gaz à effet de serre passe donc par la décentralisation et le développement des énergies renouvelables. Le développement de ces microgrilles nécessite une instrumentation en smartgrid ainsi que des moyens automatiques pour faire correspondre les périodes de consommation avec celles de production.
- Le **chapitre 3** illustre deux cas d'études applicatifs repris pour la validation expérimentale. Ces situations présentent le matériel présent ainsi que les améliorations naïves possibles. Le chapitre se poursuit sur une présentation d'une analyse industrielle afin de mettre en avant ses limites.
- Le **chapitre 4** présente l'état de l'art dans le domaine du dimensionnement de moyen de production et d'optimisation d'énergie, quelles sont les méthodes actuelles pour mettre en adéquation consommation et production. Les limites de ces approches actuelles viennent de leurs spécificités limitées à certains matériels : ventilation, véhicules électriques, tandis qu'une démocratisation de ces méthodes nécessite une ouverture à bien plus d'appareils.

La deuxième partie concerne notre proposition de contribution aux manques identifiés de l'état de l'art. Elle est composée des chapitres suivants :

- Le **chapitre 5** présente des outils conceptuels étudiés pour leurs propriétés et leur intérêt dans notre vision.
- Dans le **chapitre 6** nous exposons notre proposition générale de construction d'un jumeau numérique. Nous y défendons la modélisation des activités en plus des moyens de production et stockage ainsi que l'utilisation d'un langage dédié pour permettre à un expert d'utilisation facilement ces outils.
- La contribution de cette thèse se poursuit dans le **chapitre 7** avec la présentation de notre approche, en particulier nos choix d'abstractions capturés au sein d'un méta modèle.

La troisième partie couvre notre implémentation correspondant à notre proposition et sa validation sur des cas réels puis conclut cette thèse. Sa composition est la suivante :

- Le **chapitre 8** détaille l'implémentation réalisée, les choix techniques réalisés et une critique de leurs potentielles limitations. Différents cas d'usage sont présentés dans un premier temps ainsi que leur validation.
- Pour finir, le **chapitre 9** présente nos conclusions ainsi que nos futurs travaux de recherche.

Première partie

État de l'art

CONTEXTE

Résumé

La structure actuelle du réseau grille ne permet pas le développement de générateurs d'énergie réinjectant directement sur le réseau de manière massive. La solution est donc de consommer directement depuis la production locale. Cela nécessite l'ajout d'appareils de mesure, et par définition le développement d'une smartgrid. L'ajout de matériel est très vite limité par le besoin de connaissance des activités, de leurs consommations associées et de leur évolution. Le choix du matériel à installer est primordial et peut s'avérer compliqué à cause de la complexité de leur fonctionnement, notamment pour les moyens de stockage telles que les batteries.

L'amélioration de l'efficacité énergétique est un problème complexe. Il fait intervenir de nombreux acteurs et systèmes : le fournisseur d'énergie et son prix de vente, les activités humaines consommatrices d'énergie et les appareils eux-mêmes nécessaires à la réalisation de ces activités. En outre, un particulier ou une entreprise peut choisir d'installer des moyens de production d'énergie : panneaux solaires, éoliennes, groupes électrogènes ainsi que des moyens de stockage tels que des batteries. Une conduite efficace de la régulation de l'énergie ne peut se faire qu'avec une bonne compréhension de l'interaction de ces différents acteurs et de leur intégration dans un système global.

Ce chapitre détaille l'importance de chacun de ces aspects dans une vision globale et se décompose comme suit :

- **Consommation** : l'aspect grandissant de la consommation électrique apporte de nouveaux problèmes de réduction des coûts,
- **Structure** : les réseaux électriques sont historiquement structurés en grille, depuis quelques années, cette architecture centralisée est complétée voire remise en question avec l'apparition

- des microgrilles, les instrumenter en smartgrid est une première approche à leur gestion,
- **Incitation** : les différentes politiques incitatives et moyens économiques aident au développement des énergies renouvelables et à favoriser leur développement, mais sont encore trop limitées et manquent d'améliorations techniques [112].

Ces trois aspects évoluent de manières différentes, mais impactent tous l'économie et sont donc à considérer en même temps pour une optimisation de l'énergie et doivent donc être intégrés à la modélisation. C'est pourquoi nous les détaillons dans ce chapitre.

SECTION 1

UNE CONSOMMATION GRANDISSANTE

Depuis le début de l'ère industrielle l'Homme consomme de plus en plus d'énergie, voir Figure -Figure 2.1, il est donc crucial de comprendre comment elle est répartie afin de pouvoir y répondre de manière durable.

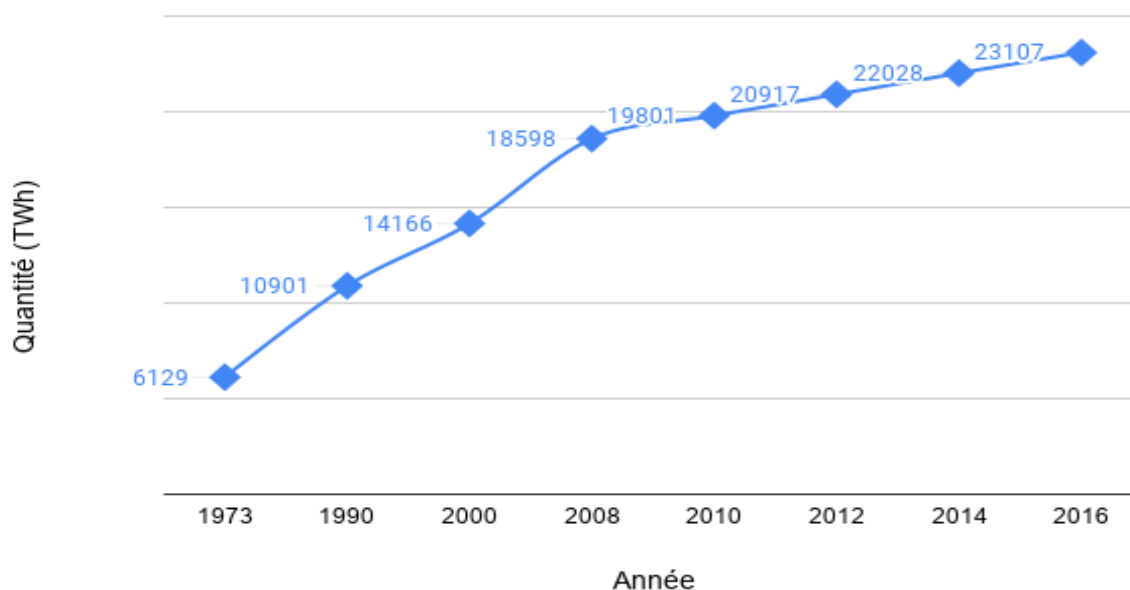


FIGURE 2.1 – Évolution de la consommation électrique dans le monde entre 1973 et 2016. **Source** : IEA Statistics 2018

Cette section se focalise sur la consommation d'énergie au travers des trois profils les plus consommateurs :

- les **particuliers** avec la consommation des foyers du milieu résidentiel,
- les **professionnels** avec la consommation des milieux agricoles, industriels et tertiaires,
- les **transports** permettant notamment aux employés de se rendre sur leur lieu de travail et faire fonctionner les activités professionnelles.

D'un point de vue énergétique, en considérant pétrole, gaz et électricité, ces trois secteurs s'équilibrent presque, voir Figure -Figure 2.2 regroupant le secteur tertiaire au résidentiel. Comme nous le verrons notamment au chapitre 4 *État de l'art* la littérature s'est beaucoup intéressée au premier et dernier point. Notre thèse se focalise plus particulièrement sur le milieu professionnel. Cependant, il est intéressant d'avoir en tête les contraintes des milieux particuliers, car de nombreux travaux ciblent ce domaine.

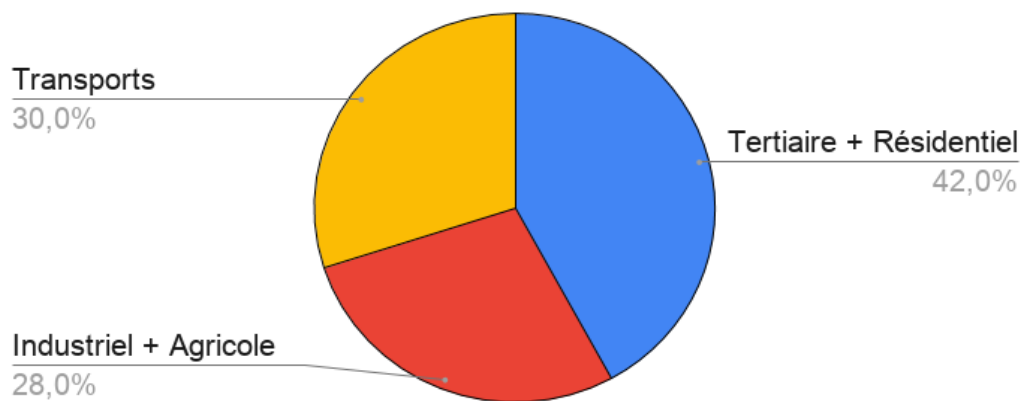


FIGURE 2.2 – Répartition de la consommation par secteur, toutes énergies confondues. **Source** : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, données 2017.

1.1 La consommation chez les particuliers

Les particuliers partagent beaucoup d'appareils électriques en commun : réfrigérateur, télévision, lave-linge, etc. Leurs habitudes de consommation sont en revanche toutes très différentes. Pour les particuliers le **Demand Response**¹ va généralement se limiter au pilotage de la résistance d'un ballon d'eau pour permettre fonctionner pendant une période d'heures creuses. L'eau chaude sanitaire (ECS) étant un besoin commun à la grande majorité des foyers². Le gain individuel est relativement limité, mais généraliser à un grand nombre de foyers permet de déplacer une partie de la consommation électrique nationale la nuit là où la consommation est habituellement faible et ainsi équilibrer par rapport à la journée.

Il peut être difficile de se rendre compte de l'impact énergétique d'un appareil en particulier puisque plusieurs critères rentrent en jeu et pas uniquement sa consommation nominale. Pour calculer l'impact, la consommation totale sur une grande période, d'un appareil il faut considérer non seulement sa consommation nominale, en fonctionnement normal, mais également sa puissance en veille et sa fréquence d'utilisation. De cette manière, nous pouvons estimer qu'en moyenne une machine à café

1. Ensemble de moyens permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un site, une définition plus complète est donnée au chapitre 4 section -section 2

2. L'ADEME fournit des données précises à ce sujet : <https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-l'action/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire>

consomme huit fois moins qu'une télévision LCD alors qu'elle consomme deux fois plus en fonctionnement.

Le tableau -table 2.1³ fondé sur [116, 97, 108], compare quelques appareils domestiques afin de montrer l'impact de la fréquence d'utilisation sur la consommation totale d'un appareil. Cela motive le besoin d'intégrer les activités de consommation en plus de la simple description de la consommation d'un appareil lorsque celui-ci est en fonctionnement.

TABLEAU 2.1 – Consommation électrique instantanée et annualisée de différents appareils domestiques

Appareil	Puissance fonctionnement (W)	Puissance veille (W)	Fréquence d'utilisation	Consommation annuelle (kWh)
TV LCD	150	6.4	2 heures/jour	161
Machine à cafés	360	0	1 heure/semaine	19
Aspirateur	818	0	1 heure/semaine	43
Four micro-ondes	1000	2.8	13 minutes/jour	103

La prédictibilité de la consommation dans le secteur résidentiel repose sur des modèles statistiques ou de l'*Intelligence Artificielle*. L'idée est d'inférer le comportement des utilisateurs. En effet, ces derniers n'ont pas d'habitudes fixes. C'est une grande différence avec le secteur industriel. Les entreprises ont une connaissance précise de leurs activités, en grande majorité planifiée. Nous souhaitons utiliser cette organisation pour accorder au mieux les consommations aux moments de production d'énergie afin d'éviter les pics de consommation trop importants.

1.2 La consommation des secteurs industriels et agricoles

En termes d'énergie, les secteurs industriels et agricoles représentent près d'un tiers de la consommation finale, voir la Figure -Figure 2.2. Bien que l'énergie au sens large regroupe le pétrole, le gaz et l'électricité, ces secteurs sont prépondérants et encore trop peu étudiés comme cible d'amélioration d'efficacité énergétique. C'est pourquoi nous nous y intéressons dans cette thèse.

Au sein du secteur agricole toutes les exploitations ne sont pas équivalentes, notamment les élevages sont très dépendants de leur facture d'énergie comme l'a démontré J.-P. Couvreur :

La consommation d'énergie directe de l'agriculture représente à peine 2% de la consommation énergétique finale française. Mais elle représente environ 15% des charges de mécanisation des exploitations d'élevage. — J.-P. Couvreur[29]

3. Source : <http://hes-documentation.lbl.gov/>

Les entreprises du secteur industriel sont toutes différentes, mais elles ont l'avantage d'être structurées autour de leur activité métier. Leur activité est connue à l'avance ou au moins un minimum organisée. De plus, l'optimisation d'une seule activité peut représenter des économies très conséquentes. De même, dans le secteur agricole, les dépenses en énergie représentent le second poste de dépenses.

En termes d'appareils consommateurs, une usine peut utiliser les mêmes appareils qu'un particulier, seulement en plus grand nombre, mais également des machines propres à son secteur d'activités. En métallurgie par exemple pour une usine d'assemblage de carrosserie, la consommation annuelle de la chaîne de laquage peut s'élever à 2.15TWh [80], soit la consommation annuelle de plus de 450 000 foyers français. À ces niveaux de puissance, chaque pause ou déplacement d'activité peut avoir un impact économique très important.

De nombreuses entreprises ont des activités récurrentes et maîtrisées. Cela rend la prédiction de consommation beaucoup plus précise, car elle peut s'appuyer sur les connaissances généralement bien meilleures des consommateurs. C'est d'ailleurs un des axes développés par cette thèse.

Si l'organisation interne des activités d'une entreprise est sujette au secret industriel, elle nécessite donc l'usage d'outils adaptés pour permettre une optimisation sans divulguer trop de détails sur sa structure. Connaître la consommation précise d'un site révèle beaucoup d'information, et ce même sans aller jusqu'au niveau de détail de chaque appareil.

De ce fait, la collecte de données de consommation, leur souveraineté et leur protection sont des enjeux à ne pas négliger. Pour les particuliers, ces enjeux sont de l'ordre de la vie privée [14], pour les entreprises ils peuvent représenter des enjeux de secret industriel. Cependant, ces thématiques sortent du cadre de cette thèse, mais justifient de pouvoir laisser un expert du domaine de l'entreprise modéliser les principaux processus industriels.

1.3 Transports : l'essor des véhicules électriques

Les transports représentent un tiers de la consommation énergétique finale en France, voir Figure -Figure 2.2. Pour le moment principalement thermique, l'essor des véhicules électriques représente un nouveau secteur à intégrer, de nouvelles consommations à optimiser.

Le développement rapide des nouveaux modes de déplacement tels que : les vélos électriques, les trottinettes électriques, mais surtout les voitures électriques font que la consommation électrique devrait rapidement augmenter. Ces nouveaux modes de déplacement ont pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Si la consommation annuelle ne pose pas de problème, l'appel de puissance si ce parc de voitures devait être mis à charger de manière simultanée risque en revanche de dépasser largement la production au même instant. [7]⁴.

Ce qui intéresse un particulier est la charge de son véhicule, il veut avoir un niveau d'autonomie suffisant pour son prochain déplacement. Ce simple besoin laisse une grande liberté de scénarios d'optimisation en chargeant ou déchargeant au moment opportun [142]. Ces cas, nommés : *vehicle-to-grid*,

4. Source : <https://www.automobile-propre.com/la-france-peut-elle-alimenter-15-millions-de-voitures-electriques/>

sont donc des configurations particulières d'utilisation de batterie avec des contraintes de disponibilités plus strictes. La section 2. revient plus en détail sur les notions de stockage de l'énergie.

Les véhicules apportent les mêmes problématiques que la consommation et le stockage, cependant la mobilité de manière générale est plus complexe, c'est pourquoi elle est hors du scope de cette thèse. Par exemple, les véhicules à **hydrogène** sont une autre forme de transport à bas carbone prometteuse. Cependant, le transport d'hydrogène n'est pas rentable d'un point de vue économique ou écologie de par la très faible densité de l'hydrogène stocké. Dans les conditions actuelles, la production locale d'hydrogène reste cependant difficilement rentable [121] ce qui devrait favoriser le développement des véhicules électriques.

Si chaque site consomme de l'électricité, chaque site est généralement relié au réseau électrique, c'est le moyen le plus simple d'alimenter l'ensemble de ses équipements sans contraintes de puissance ou de plage horaire, dans la limite de pannes sur le réseau de distribution. La section suivante décrit la structure de ce réseau de distribution, de l'origine de l'énergie qu'il transporte, des limites et des inconvénients à son utilisation.

Résumé & enjeux

La consommation industrielle est très différente du résidentiel, nous verrons notamment cela au travers des équipements, des volumes et de l'organisation. Alors que les études de consommation chez le particulier se focalisent sur des profils statistiques, les études industrielles vont s'attacher à la caractérisation du matériel et des processus. La modélisation de cette consommation industrielle sera d'ailleurs un des points majeurs de la thèse. Notre hypothèse est qu'une modélisation des activités est possible et qu'elle peut servir de base à l'amélioration de l'efficacité énergétique des sites industriels. L'arrivée de nouveaux acteurs, tels que les véhicules électriques, introduit de nouveaux moyens de consommation et de stockage. Ce sont des points que tout modèle doit prendre en compte.

SECTION 2

STRUCTURE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

La structure et la composition du réseau électrique impactent les actions possibles pour améliorer son efficacité, il est donc important de le détailler. La Figure -Figure 2.3 résume la structure du réseau grille et la relation entre les différents consommateurs. Il fait ressortir la grande distance ainsi que les étapes de transformation nécessaires à l'acheminement de l'énergie. Cette distance génère des **pertes** et des **coûts** pouvant être évités grâce à l'approche microgrille et production locale.

La Figure -Figure 2.3 présente un résumé de cette section :

1. Dans un premier temps nous présentons la grille d'énergie, car c'est historiquement la principale source dans de nombreux pays. La grille a pendant longtemps structuré les prix de l'énergie. Cette politique tarifaire a une influence directe sur les modélisations à effectuer et est donc importante à nos travaux. La grille n'est pas amenée à disparaître à brève échéance. La grille structure le transport d'énergie en très haute tension (1) et relie les consommateurs en basses et moyennes tensions (2),
2. Dans un second temps nous présentons la microgrille dont l'avantage principal est de diminuer les coûts énergétiques des industriels producteurs d'énergie en leur garantissant un tarif fixe durant plusieurs dizaines d'années. Ces *prosumers*, producteur et consommateur d'énergie, sont marqués du symbole (4).

2.1 La grille : concentration de la production

Au niveau national, un réseau électrique est composé d'un ensemble de producteurs d'énergie, généralement des centrales électriques, d'un réseau de transport et de distribution chargé d'acheminer cette électricité jusqu'aux consommateurs finaux. Ce dernier va assurer les différentes étapes de conversion du courant et de la stabilité de l'ensemble du réseau. La nature même de l'électricité fait que sur un réseau, la production et la consommation doivent s'équilibrer à tout instant. En cas de différence de production, que ce soit une sous-consommation ou une surconsommation, ou d'équilibrage du courant en tension, en intensité ou en fréquence, des incidents peuvent se produire. Ces incidents sont des coupures électriques et des détériorations du matériel de transport et de distribution.

Historiquement, la France a choisi la centralisation, car mutualiser les points de production permet de simplifier le déploiement de l'infrastructure. En particulier pour la **production nucléaire** nécessitant un haut niveau de sécurité ainsi qu'un accès à une rivière pour permettre le refroidissement continu des systèmes. Cette section détaille la structure du réseau électrique et les principales sources d'énergie injectant sur ce réseau.

Le réseau électrique utilise des niveaux de tension variables en fonction de la distance à parcourir. Augmenter la tension permet de réduire le courant et donc les pertes en ligne. De plus, le courant est

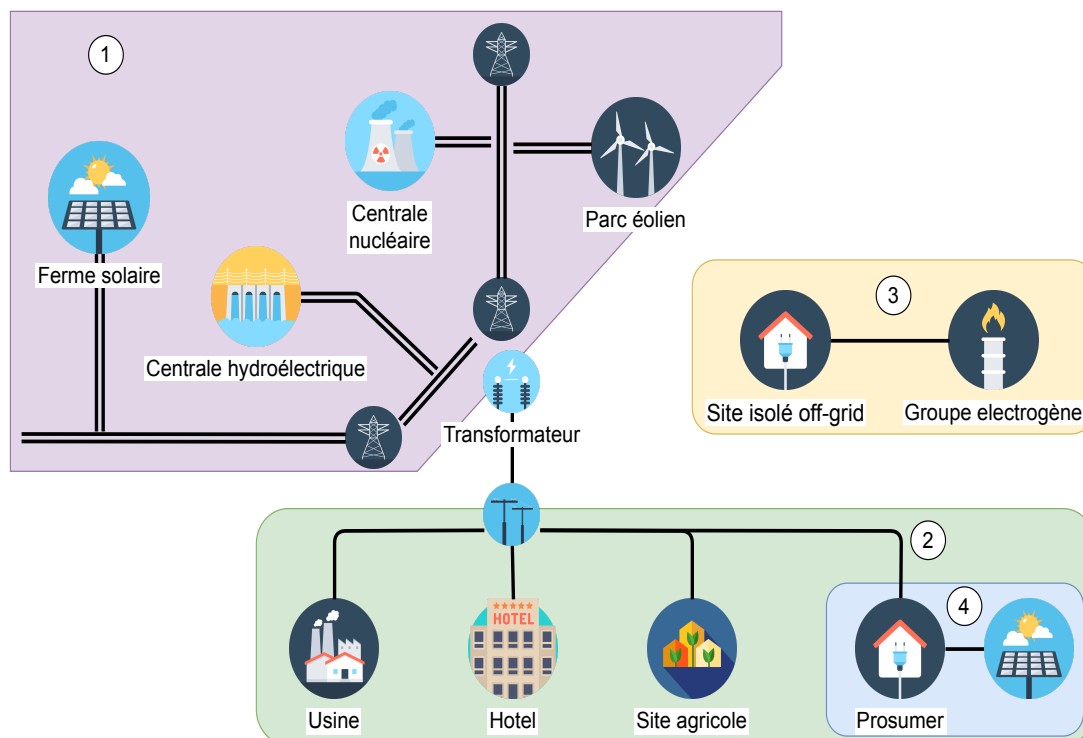


FIGURE 2.3 – Schéma simplifié de la structure d'un réseau électrique avec : le réseau de transport et distribution (1), le réseau basse et moyenne tension (2) ainsi qu'un îlot non connecté (3) et un consommateur-producteur (4)

alternatif et triphasé sur une majorité du réseau ce qui permet de minimiser la résistance des câbles et ainsi réduire à nouveau les pertes liées au transport de l'énergie. En France, le réseau est géré par différents acteurs en fonction de la tension électrique sur le réseau :

- RTE, la société gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité, assure le transport de l'électricité depuis les principales centrales sur des liaisons de centaines de kilomètres à 400 kV et vers les pays voisins. RTE assure également la répartition régionale de l'électricité avec des tensions allant de 63 kV à 225 kV.
- Enedis et les entreprises locales de distribution assurent la distribution de l'électricité pour les moyennes tensions, 20 kV et les basses tensions 230 V et 400 V triphasés jusqu'aux clients finaux.

L'architecture de la grille en France est développée autour des principales centrales électriques injectant directement dans le réseau 400kV et est prévue pour délivrer de l'électricité dans ce sens.

Cette production massive d'électricité par les centrales repose nécessairement sur une infrastructure conséquente pour acheminer l'électricité vers les consommateurs.

La Figure -Figure 2.4 montre la répartition de ce réseau sur le territoire français et pourquoi le maillage favorise les grosses centrales électriques à une production plus distribuée.

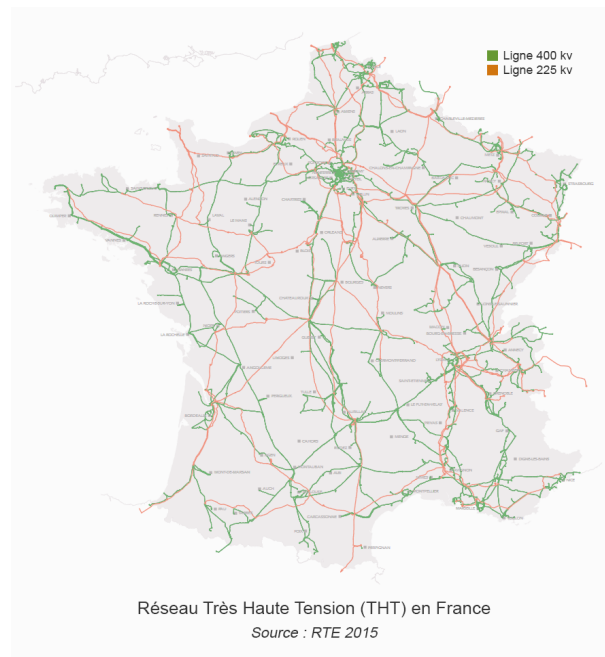


FIGURE 2.4 – Carte du réseau haute tension en France, il est intéressant de noter l'interconnexion avec les pays voisins

Il est également plus aisé pour les gestionnaires de réseau d'équilibrer la production sur la consommation si le nombre de producteurs est limité.

La taille du réseau fait qu'en termes de distance de câble électrique, ainsi que la succession des différentes étapes de conversion de tension font que des pertes en ligne sont à considérer, dû à l'effet Joule pour la distance et l'échauffement des câbles et au rendement des différents transformateurs et appareils de régulation en jeu. Réduire l'utilisation du réseau de transport permet donc de réduire les coûts d'infrastructure au niveau global, cela ne concerne pas directement les industriels, mais peut être une motivation supplémentaire pour mettre en œuvre des moyens de maîtrise de l'énergie.

2.1.1 Production injectant sur la grille

Un ensemble de centrales de différentes sortes produisent de l'énergie, l'injectent directement sur différents points du réseau pour fournir de l'électricité à tous les utilisateurs connectés à la grille. L'opérateur du réseau, RTE, doit s'assurer de maintenir un équilibre entre les sources de production et la consommation des particuliers et des entreprises. Tous les moyens de production n'ont pas les mêmes caractéristiques, ils ne produisent pas au même moment ni dans les mêmes ordres de grandeur de puissance. Les sections suivantes détaillent quelques-uns des moyens de production les plus répandus en précisant notamment leurs capacités en termes de **régulation** de l'énergie.

a) Centrales nucléaires

Dans le monde, 450 réacteurs nucléaires, répartis en 250 centrales dans 31 pays, produisent 10% de l'électricité mondiale. En France, les 58 réacteurs produisent même plus de 70% de l'énergie consommée. Les réacteurs ont une puissance allant de 900MW à 1450MW ce qui en fait une source d'énergie très centralisée sur le territoire.

Les contraintes de sécurité propres aux sites nucléaires et la nécessité d'être proche d'un fleuve pour refroidir expliquent l'intérêt de mutualiser plusieurs réacteurs au sein d'une même centrale.

La production des centrales peut être facilement régulée pour s'adapter à la consommation sur le réseau, en revanche leur coût de fonctionnement dépend peu de leur production. Les faire fonctionner à plein régime a un coût presque équivalent à celui de les faire fonctionner au ralenti. Ceci, en France, explique que le nucléaire soit responsable du coût très bas de l'électricité. En comparaison, en France un foyer paie en moyenne 0.180 € TTC/kWh contre 0.211€ TTC/kWh en moyenne en Europe, 0.3€ TTC/kWh en Allemagne et 0.248€ TTC/kWh en Espagne.

L'énergie nucléaire fournit donc une grande quantité d'énergie à "faible coût", utilisée en France pour couvrir une grande partie de la consommation nationale. Elle est capable de s'adapter en quelques heures aux variations de consommation, ce qui n'en fait pas un outil de régulation suffisamment dynamique pour couvrir les pics, parfois brutaux, d'appel sur le réseau.

Cette source d'énergie est contestée depuis des accidents tels que celui de Three Mile Island aux États-Unis en 1979, Tchernobyl en actuelle Ukraine en 1986 et Fukushima au Japon en 2011. En plus des risques d'accident, des revendications sont également exprimées pour que les coûts de maintenance et de démantèlement des réacteurs soient intégrés au prix de vente de l'électricité.

b) Centrales hydroélectriques

Les centrales hydroélectriques utilisent la force d'un courant ou d'une chute d'eau pour produire une énergie électrique qui sera ensuite injectée sur le réseau. En fonctionnement, il est donc possible de les considérer comme des sources d'énergies renouvelables ne rejetant que très peu de gaz à effet de serre. Pour obtenir le bilan complet de l'énergie hydraulique il faut donc considérer le coût de construction et d'entretien des installations, nous obtenons ainsi : $24\text{gCO}_2/\text{kWh}$ ce qui en fait une des énergies les plus propres en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

On peut distinguer 4 types différents de centrale hydroélectrique en fonction de l'implantation : sur une rivière ou un lac. Cet emplacement va directement impacter la disponibilité de la turbine, son niveau de réactivité en cas de besoin et sa puissance maximale. Les centrales "fil de l'eau" vont voir leur production directement impactée par le débit du cours d'eau tandis que les centrales installées sur des lacs ou dotées de réservoir vont pouvoir être régulées et produire au meilleur moment pour la grille, dans la limite de la capacité de leur réservoir. Ce réservoir d'eau fonctionne exactement comme une batterie en stockant de l'énergie potentielle plutôt qu'une énergie sous forme électrochimique. Un réservoir de 200 heures en amont d'une turbine de 150MW est capable de stocker $200 \times 150 = 30\text{GWh}$. Le Tableau

-table 2.2 résume les caractéristiques des différentes centrales hydroélectriques.

L'énergie hydraulique a donc l'avantage de pouvoir être très flexible grâce aux réservoirs d'eau, de pouvoir stocker sans perte sur la durée, mais est très limitée en termes d'emplacement d'installation. Cela en fait un bon moyen de production pour la grille, mais difficilement envisageable pour un industriel souhaitant autoconsommer son énergie. Bien qu'elle ne couvre que 11% [40] de l'électricité consommée en France, l'énergie hydraulique permet de s'adapter très rapidement aux variabilités du réseau tandis que la production nucléaire assure une production de base, ce qui en fait un moyen de production très adapté à une régulation efficace.

TABLEAU 2.2 – Types de centrales hydroélectriques ainsi que leurs caractéristiques principales

Type	Puissance moyenne (MW)	Disponibilité	Aménagement	Part du parc en France
Fil de l'eau	3.45 ⁵	dépend des conditions hydrologiques	sur un cours d'eau	26%
Éclusée	28.6 ⁶	remplissage de 2 à 400 heures	petit réservoir et faible chute d'eau	16%
Lac	100 ⁷	remplissage de >400 heures	grand réservoir et haute chute d'eau	40%
Pompage-turbinage ⁸	730 ⁹		système à deux réservoirs	18%

La construction de centrales hydroélectriques est cependant coûteuse et a un impact sur l'environnement local. Ceci limite fortement les possibilités d'implantation.

c) Énergie éolienne sur la grille

Une éolienne est un générateur capable de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Une seule éolienne peut produire de quelques kilowatt à plusieurs mégawatt pour de l'éolien terrestre. Cette large gamme en fait un générateur intéressant pour les particuliers comme pour les industriels.

Les éoliennes dites "offshore" installées en pleine mer et illustrées en Figure 2.5a¹⁰, sont à axe horizontal et les plus grandes du marché, afin d'amortir leurs coûts de chantier pour permettre leur ancrage. Une seule turbine peut produire jusqu'à 8MW, ce qui permet de concevoir un parc éolien

5. sur 2400 centrales en France, 90% sont installées au fil de l'eau pour une puissance totale de 7500MW

6. 140 centrales éclusées pour une puissance totale de 4 000MW

7. 100 centrales de lac pour 10 000MW de puissance installée

8. stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

9. 7 centrales step sont en fonction en France, pour des puissances allant de 50MW à 1800MW

10. https://www.thewindpower.net/turbine_en_14_repower_5m.php

en construisant au maximum quelques dizaines. Sur la terre ferme, les éoliennes à axe horizontal Figure 2.5b¹¹ sont les plus répandues, le modèle Enercon E-70 représente à lui seul 2100 éoliennes en avril 2008.

La production d'énergie éolienne est fortement liée à la météo et à la saisonnalité. Selon l'ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, la production est plus importante l'hiver, ce qui correspond à une période de forte demande électrique pour le réseau. Le facteur de charge de l'éolien en France se situe aux environs de 22% sur terre et d'environ 34% pour les éoliennes offshore. Ce qui veut dire que par exemple qu'une même éolienne de 5MW produirait sur une année en moyenne 15GWh, installée en mer, et 9.6GWh installée sur terre. 15GWh correspond à la consommation électrique annuelle de 3145 foyers moyens ou 1150 foyers tout électrique¹².



(a) Éolienne off-shore, le modèle RePower 5M a un rotor de 126m de diamètre pour une puissance de 5MW



(b) Éolienne à axe horizontal modèle E-70 ayant un rotor de 71m de diamètre et une puissance de 2.3MW

FIGURE 2.5 – 2 types d'éoliennes à axe horizontal

L'installation d'éoliennes nécessite des moyens importants avec beaucoup de contraintes d'implantation. Notamment vis-à-vis de la rugosité du terrain : l'exposition au vent et la présence d'obstacles naturels ou non. De plus, leur production reste très incertaine en cas d'aléas météorologiques.

d) Énergie photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont des générateurs électriques capables d'utiliser le rayonnement solaire, pour produire de l'électricité. Les panneaux sont principalement composés de cellules de silicium et ont une durée de vie garantie de 25 ans. Plusieurs types de cellules existent et ont des coûts de fabrication et des rendements différents, les plus répandus sont :

11. <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>

12. En considérant un foyer moyen et un appartement 3 pièces de 70m² avec chauffage et eau chaude électriques.

- silicium monocristallin ayant un rendement entre 16 et 24%,
- silicium polycristallin, moins cher à produire que le monocristallin, avec un rendement entre 14 à 18%,
- silicium amorphe ayant un rendement aux alentours de 5%,
- tellure de cadmium, un peu moins cher que les cellules en silicium et ayant un rendement de 10 à 12%.



(a) Centrale solaire à panneaux fixes posés au sol



(b) Toit de voiture intégrant des cellules photovoltaïques

FIGURE 2.6 – Différents types de cellules photovoltaïques et d'installation

Ce rendement va impacter le rapport entre la puissance maximale de production et la surface totale de panneaux solaires installés. Le type de support d'installation va également être impacté, les cellules de silicium amorphe peuvent être intégrées sous forme de panneaux souples à n'importe quelle surface, tandis qu'un panneau en silicium monocristallin sera rigide. Cela explique qu'un panneau solaire installé en toiture d'une maison, silicium monocristallin, aura un bien meilleur rendement qu'un toit de voiture électrique, silicium amorphe, telle que la Sion du constructeur Sono Motors¹³.

La puissance maximale d'un panneau solaire est exprimée en Wc pour Watt crête, ou Wp en anglais, et correspond à la puissance produite par le panneau dans les conditions standardisées de test.

En dehors des composants du panneau solaire, son installation : au sol, en toiture, ou encore sur un mat, va également impacter sa production et donc l'efficacité énergétique de l'ensemble du système. La section suivante décrit quelques exemples d'installation, notamment leurs différences concernant des scénarios d'autoconsommation.

Les installations photovoltaïques sont faciles à installer sur de nombreux types de surface, mais aucune production n'est possible de nuit. De plus, la couverture nuageuse peut perturber la production de toute une installation là où une rafale de vent peut stopper seulement la partie d'un parc éolien la plus exposée.

13. <https://sonomotors.com/en/sion/>

Types d'installation d'une surface photovoltaïque et impact sur la production

Le rayonnement solaire se décompose en plusieurs composantes impactant toutes en partie la production solaire, comme illustré sur la Figure 2.7. Le rayonnement direct va rapidement diminuer avec la couverture nuageuse tandis que le rayonnement diffus peut rester élevé dans de plus mauvaises conditions. Certains panneaux solaires ont la face arrière ajourée, permettant ainsi de récupérer le rayonnement diffus et réfléchi et ainsi produire un peu plus d'énergie dans les mêmes conditions d'ensoleillement.

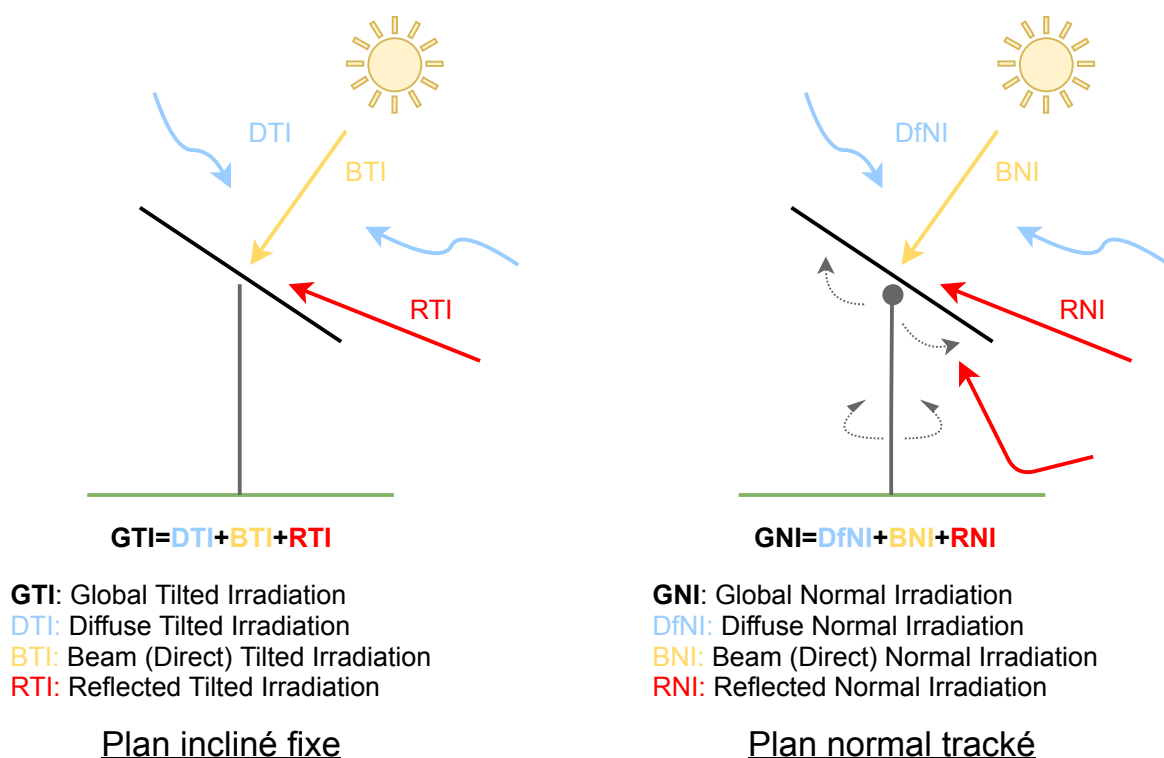


FIGURE 2.7 – Décomposition des 3 principales composantes de l'énergie solaire en fonction de l'installation

Plusieurs types d'installations photovoltaïques sont possibles : posé au sol incliné ou installé en toiture. Posé au sol avec un axe variable pour suivre la course du soleil en azimut ou tracking sur deux axes pour suivre complètement la course du soleil. Une installation en tracking, 1 axe ou 2 axes, coûte plus cher, principalement à cause des contraintes mécaniques, mais permet de produire davantage d'énergie pour une même puissance installée.

Ce calcul de différence de coût d'installation et de production est typique des questions qu'un expert en énergies renouvelables se pose pour chaque installation. Il devra prendre en compte les formules présentées en -Figure 2.7, par exemple les rayons réfléchis sont impactés par la surface au sol et les ombrages impactent différemment les autres rayons.

2.1.2 Stockage électrique au niveau grille

À l'échelle du réseau national, le stockage de l'énergie a un rôle de sécurité pour les gestionnaires de réseau, de transport et de distribution. Une soudaine hausse de la production, par exemple due à de soudaines conditions météorologiques favorables aux énergies renouvelables, ou à l'inverse une soudaine baisse de consommation va impacter la fréquence du signal électrique. Une variation de ± 0.05 Hz, autour des 50Hz du réseau pour la France, peut provoquer des perturbations chez les consommateurs voire provoquer des coupures.

Ces stockages peuvent prendre la forme :

- des bassins des centrales hydroélectriques de pompage turbinage détaillés en section - ?? b),
- de parc de batteries à large échelle pour faire tampon entre la production et la consommation.

Par exemple, le constructeur américain Tesla a fourni en 2018 à l'Australie un parc de batteries d'une puissance de 100MW et 300MWh de capacité. Ce parc de batteries est capable de garantir de l'électricité à 30 000 foyers d'une région généralement sujette à des coupures et *blackout*. Dans cette région, les énergies renouvelables telles que les fermes éoliennes de Hornsdale et les vieilles centrales à charbon déstabilisent le réseau. Le stockage de l'énergie permet de lisser artificiellement la production des énergies renouvelables pour être plus en phase avec la consommation des personnes résidentes dans la région.

La régulation de ces batteries à large échelle reste relativement simple, si la consommation électrique devient trop importante les batteries sont déchargées ou les turbines actionnées dans le cas des barrages hydroélectriques.

2.1.3 Comparaison des énergies renouvelables dans la grille

Nous venons de détailler plusieurs sources d'énergie renouvelables, les spécificités de leurs conditions de production et les contraintes de leur implantation. Historiquement, chaque pays a choisi ses moyens de production en fonction de son coût et de sa fiabilité à produire de l'énergie. Il apparaît que les moyens les plus fiables sont les générateurs thermiques qu'il suffit de mettre en marche, cependant ce sont également les plus polluants en termes de CO₂, d'où l'effort grandissant des gouvernements pour développer les filiales d'énergie renouvelable faisant ainsi baisser leur coût.

Le tableau -table 2.3 présente les taux d'émissions moyens par source d'énergie électrique ainsi que leur part dans le mix énergétique français. La France se place très bien dans le classement des pays ayant l'énergie la plus propre et ce grâce à la production nucléaire. Cette production représente moins de 50% de la puissance installée mais sa disponibilité fait qu'elle représente plus de 70% de la production réelle. Il est à noter que de nombreux pays utilisent très majoritairement des centrales au charbon. C'est pour ces cas que l'amélioration de l'utilisation des énergies d'origine renouvelable, telles que le photovoltaïque ou l'éolien, est importante.

TABLEAU 2.3 – Coût et rejet moyens de gaz à effet de serre par sources d'énergie en France pour les années 2018 et 2019 [112, 16]

Source	part du parc en puissance installée	part de la production effective	gramme de CO ₂ /kWh produit	Coût € /MWh produit ¹⁴
Nucléaire	47.5%	71.7%	12	49.50
Hydraulique	19.2%	12.5%	24	15–20
Éolien	11.5%	5.1%	12	82 – 180 ¹⁵
Gaz — Cycle combiné	9.2%	5.7%	490	70–100
Photovoltaïque	6.4%	1.9%	45	142.50
Charbon	2.3%	1.1%	986	70–100
Fioul	2.6%	0.4%	777	70–100
Bioénergie	1.5%	1.8%		

Nous avons vu le cas de figure le plus classique : un site consommateur est relié à la grille fournissant toute l'énergie. Plusieurs centrales sont reliées à la grille pour fournir en permanence la puissance nécessaire à l'ensemble des utilisateurs du réseau. Cette configuration montre ses limites :

- elle provoque des pertes en ligne,
- elle rend les consommateurs dépendant de la stabilité du réseau ainsi que de l'augmentation du prix de l'énergie.

Un moyen de limiter ces aspects est de rapprocher les moyens de production des consommateurs. C'est le principe de la microgrille.

Résumé & enjeux

La centralisation de la production, l'augmentation de la consommation et le vieillissement du parc nucléaire entraînent une hausse progressive du prix de l'électricité. L'autoconsommation permet une plus grande indépendance, mais nécessite une modélisation de la grille pour pouvoir calculer un coût et donc un niveau d'autonomie rentable économiquement. Cette autonomie vis-à-vis de la grille redonne une forme de liberté sur l'organisation des activités pour le consommateur. C'est cette liberté que nous souhaitons mettre au cœur de notre approche afin d'optimiser au mieux cette dépendance à la grille.

14. Source : <https://prix-elec.com/energie/production> fondé sur des informations de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), la Cour des Comptes et des appels d'offres du gouvernement français

15. 82€/MWh pour de l'éolien terrestre, 180€/MWh pour l'éolien offshore

2.2 Production décentralisée : la microgrille

Dépendre du réseau grille rend le consommateur dépendant des variations de prix : des abonnements et du kWh d'électricité consommé, ainsi que d'éventuelles pannes sur le réseau de transport ou de distribution (blackout). À l'échelle d'un site industriel ou d'une entreprise, l'ajout de générateurs locaux d'énergie renouvelable peut aider à pallier ces problèmes. La régulation électrique de ce genre de réseau reprend les mêmes préoccupations que la grille décrite plus haut excepté que dans cette situation le réseau peut servir à combler les besoins d'énergie non couverts par la production locale.

Dans ce type de réseau nous parlerons de microgrille puisque les puissances en jeu sont minimes comparées à celles à l'échelle nationale. Également, un réseau microgrille étant moins étendu géographiquement, les facteurs de perte dus aux distances sont négligeables, ce qui permet de considérer qu'un même générateur serait plus efficace au plus près du lieu de consommation de l'énergie qu'il produit.

Même si la volonté principale derrière le déploiement de moyens de production sur un site industriel est généralement économique, des aspects écologiques peuvent également intervenir. Ces préoccupations vont conditionner le choix des moyens de production en termes de rejet gaz à effet de serre par kWh produit, voir Tableau -table 2.3 pour un comparatif des énergies renouvelables.

Plus important encore, la géographie du site va conditionner les systèmes qu'il est possible d'installer. Un relief à trop forte rugosité, comprendre avec trop de grands arbres ou trop de collines, ou à l'inverse trop exposé aux vents violents peut ne pas être adapté à l'installation d'une éolienne. De même pour une installation photovoltaïque trop exposée aux vents forts ou installée sur une zone trop ombragée.

Au même titre que la grille à l'échelle nationale, la microgrille nécessite à tout instant un **équilibre** entre production et consommation. Maintenir cet équilibre peut être compliqué, surtout avec des énergies renouvelables dont la production va être difficile à prévoir et à contrôler. En cas de manque de production, un besoin d'énergie, le réseau grille peut être utilisé instantanément, en revanche, en cas de surplus d'énergie plusieurs scénarios se présentent :

- (1) **rejeter** sur le réseau,
- (2) **déconnecter** le moyen de production,
- (3) **Demand Response** : démarrer une consommation au moins équivalente.

La solution (1) de **rejeter** nécessite la signature d'un contrat avec son fournisseur d'énergie pour autoriser d'injecter de l'énergie sur le réseau, en plus d'avoir un compteur électrique capable de compter précisément la quantité rejetée. Si des contrats d'achat d'électricité existent, les tarifs pratiqués sont régulièrement revus à la baisse, comme illustrés par la Figure -Figure 2.8 concernant l'énergie photovoltaïque. Cette image illustre la succession d'arrêté encadrant le tarif d'achat continuellement à la baisse, tandis que le prix de l'électricité lui continue d'augmenter. Cette tendance rend de moins en moins intéressante la solution qui consiste à rejeter sur le réseau le surplus de production.

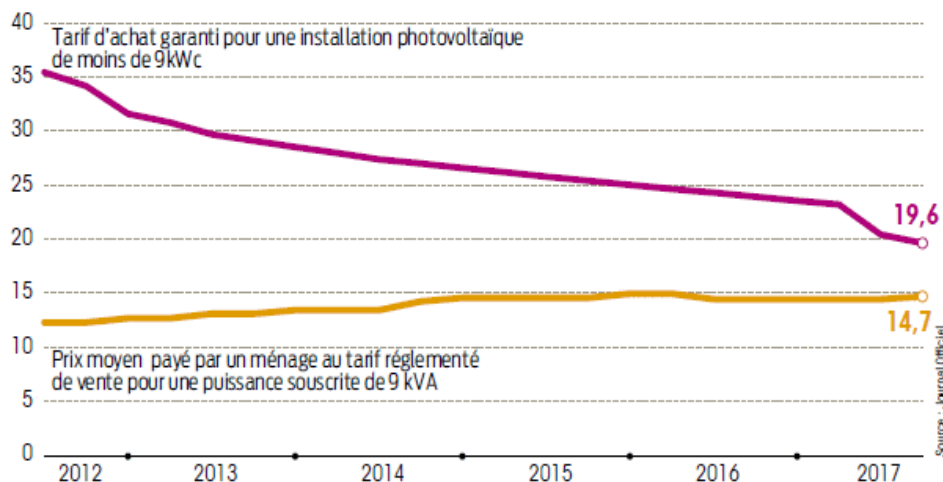


FIGURE 2.8 – Évolution du tarif d'achat en vente totale comparé au tarif réglementé pour un particulier en c€/kWh

La solution (2) de **déconnecter** est la méthode la plus simple, en cas de surplus le moyen de production est déconnecté électriquement du réseau microgrille. De ce fait, aucun surplus n'arrive sur la microgrille et le système est équilibré. L'inconvénient vient du fait que la production est réduite alors qu'en théorie elle devrait être plus élevée. Ceci correspond à un manque à gagner et peut donc avoir un impact sur l'économie globale du système. Un trop grand nombre de périodes de surplus peut également être un indicateur de surdimensionnement des moyens de production, ce qui a un impact économique négatif.

Pour finir, la solution (3) de **Demand Response** peut paraître contre-intuitive. Elle consiste à consommer volontairement de l'énergie pour effacer ce surplus de production. La subtilité consiste à trouver une activité qui était nécessaire et la faire avoir lieu *pendant* la période de surplus.

Dans certains cas, le contrat d'achat de surplus peut être plus intéressant que le prix de l'électricité venant de la grille. Dans ce cas, l'autoconsommation n'a aucun sens économique. Il est plus intéressant de rejeter l'électricité produite sur le réseau et de la racheter, plus tard, moins cher.

L'arrivée et le développement des énergies renouvelables et des modes d'autoconsommation viennent à l'encontre de l'architecture historiquement descendante de la grille. C'est une des raisons au lent développement de ces technologies en France.

2.2.1 Production injectant sur les microgrilles

Pour le développement de microgrilles toutes sources d'énergie peut être utilisée en microgrille, à savoir toutes celles utilisées pour la grille : voir section -section 2.1.1.

Les contraintes d'implantation et de production font cependant que certaines technologies sont plus plébiscitées, elles sont détaillées dans les sections suivantes :

- l'énergie éolienne en microgrille,
- et l'énergie photovoltaïque en microgrille.

a) Énergie éolienne en microgrille

En microgrille l'énergie éolienne peut se décliner en turbine à axe horizontal de plus petites puissances que celles présentées en section -section 2.1.1 ou en turbine à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical Figure 2.9¹⁶ ont l'avantage de ne pas avoir besoin de s'orienter dans le sens du vent dominant, cependant ce type d'éolienne reste très peu répandu à grande échelle et ont majoritairement des turbines de faible puissance, de l'ordre du kilowatt.



FIGURE 2.9 – Éolienne à axe vertical fabriquée par Noveol, de 3m de diamètre et produisant 6kW

b) Énergie photovoltaïque

Le choix d'une technologie de système photovoltaïque, comme celles présentées en section -section 2.1.1, est motivé par deux préoccupations de l'autoconsommation en microgrille :

- maximiser la production sur une surface d'installation,
- étendre la période de production pour plus facilement la faire correspondre à une consommation.

Le tracker 2 axes est le moyen de production photovoltaïque produisant le plus d'énergie pour une même puissance de panneau. En suivant la course du soleil, il évite la création d'un pic de production en milieu de journée et offre une plus grande période de production dans la journée pour un gain annuel d'environ 50%. Un diagramme illustrant cette différence est présenté en Figure 2.11. Cette plage de production plus importante est la plus propice aux scénarios d'autoconsommation puisqu'elles offrent plus de liberté à la consommation pour avoir lieu à différentes heures de la journée.

16. La société Noveol ayant cessé son activité en 2013, les données techniques sont disponibles sous la forme d'archives : <http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http%3A%2F%2Fwww.noveol.com%2Findex.php%3Fp%3DdonneesTechniques>

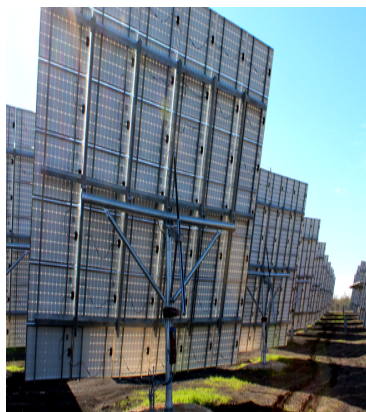


FIGURE 2.10 – Centrale de panneaux tracké sur deux axes

Le rayonnement réfléchi est déterminé par l'albédo du sol. Un albédo proche de 1, de la neige ou une surface claire va permettre de réfléchir une grande du rayonnement solaire du sol vers la surface photovoltaïque et ainsi augmenter la quantité d'énergie produite.

La Figure -Figure 2.11 présente cette différence de production et illustre pourquoi le tracking est plus adapté aux situations d'autoconsommation. Les courbes représentent la production d'une installation en panneaux fixes tandis que la courbe représente la production d'une installation équivalente en puissance, mais en tracking 2 axes. La différence en intensité, le maximum des deux séries, s'explique de deux manières. Premièrement par la meilleure ventilation des panneaux trackés comparés aux installations fixes généralement posées sur des toits. Deuxièmement par la récupération de plus de rayonnement indirect et réfléchi par la face arrière qui peut être ajourée pour permettre aux cellules de produire plus d'énergie. Une installation photovoltaïque trackée sur deux axes est donc très propice à l'autoconsommation de par sa production plus constante au cours de la journée.

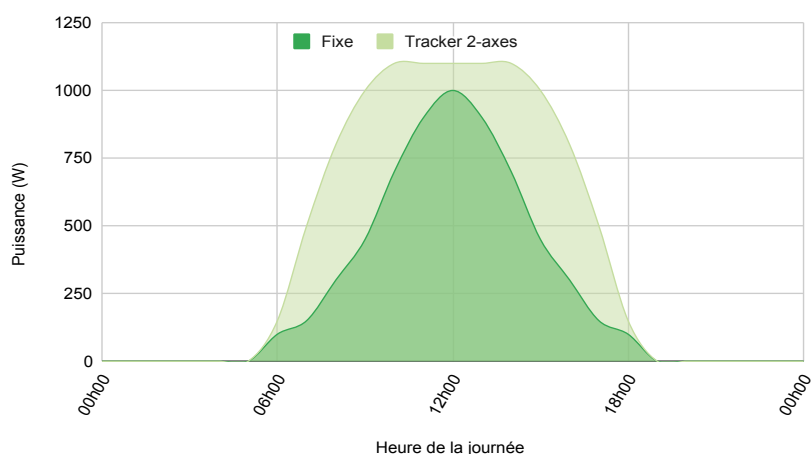


FIGURE 2.11 – Différence de production pour une même journée entre une installation solaire fixe et tracking sur 2 axes.

2.2.2 L'intégration des énergies renouvelables

Le besoin de faire baisser les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial favorise le développement des énergies dites renouvelables. Elles peuvent être installées en centrale et injecter directement sur le réseau électrique national comme une centrale classique ou être installées directement sur les lieux de consommations, réduisant ainsi la dépendance au réseau électrique. Dans cette situation, si ces sources d'énergie sont bien dimensionnées elles ne devraient pas rejeter directement de courant sur le réseau.

Le **facteur de charge** d'un moyen de production représente le rapport entre la production réelle sur une période et la quantité équivalente à la puissance nominale sur cette même période. Par exemple, un réacteur nucléaire de 500 MW, ayant un facteur de charge d'environ 75%, devrait produire en 100 jours $100 \times 24 \times 500 \times 0.75 = 900$ GWh. Pour les énergies renouvelables, la notion de facteur de charge n'est pas vraiment représentative du fait de l'importante variabilité du niveau de puissance en sortie de générateur.

L'**autoconsommation** est le fait d'utiliser un, ou plusieurs, générateurs locaux d'énergie et de directement consommer leur énergie plutôt que d'utiliser l'énergie venant du réseau électrique grille. Cette notion ne signifie pas que le site n'est plus relié au réseau grille, juste qu'il sera considéré comme une source d'énergie secondaire. Le taux d'autoconsommation représente la part d'énergie produite localement et consommée localement. Le taux d'autoconsommation peut être déterminé sur différentes échelles de temps, à chaque instant, à l'échelle d'une journée, d'un mois ou encore d'une année. C'est l'un des critères permettant de caractériser le bon dimensionnement d'une installation. S'il n'est pas de 100% pour un site donné, cela signifie que de l'énergie a été rejetée sur le réseau. Pour un site isolé, off-grid, suivant le principe d'équilibre consommation production le taux d'autoconsommation ne peut pas être différent de 100%. Production et consommation doivent s'équilibrer à tout instant : en passant par du stockage, en faisant varier la production, bridage dynamique d'onduleur, et en faisant varier le niveau de consommation, par du pilotage.

Taux d'autoconsommation

$$\frac{\sum \text{production utilisée localement}}{\sum \text{production locale}}$$

Le taux d'**autonomie**, aussi appelée taux d'autoproduction, représente l'indépendance d'un site par rapport à la grille. Il se calcule par le rapport de la consommation issue de sources d'énergie locales par rapport à la consommation totale. Pour un site off-grid ce taux sera automatiquement de 100% puisque la grille ne peut pas être utilisée.

Taux d'autonomie

$$\frac{\sum \text{production utilisée localement}}{\sum \text{consommation}}$$

La Figure -Figure 2.12 présente un bilan énergétique sur une journée pour un site équipé d'un tracker 2-axes. La consommation, en rouge, est d'environ 40kW la nuit et est plus importante pendant

les heures de travail : de 7h00 à 19h00. La production des panneaux solaires, en jaune-vert, est légèrement impactée par quelques nuages pendant la matinée, visible par les baisses de production vers 10h00. La surface en vert correspond à la consommation du site industriel couverte par la production locale d'énergie tandis que la surface en jaune représente un surplus de production solaire, n'étant pas consommé il sera rejeté sur le réseau grille. Visuellement, le **taux d'autoconsommation** correspond au rapport de la surface verte sur la surface jaune et verte, autrement dit la production totale. Le **taux d'autonomie** correspond lui au rapport de la surface verte, énergie venant de la production locale, sur la surface rouge et verte, énergie totale consommée sur 24h.

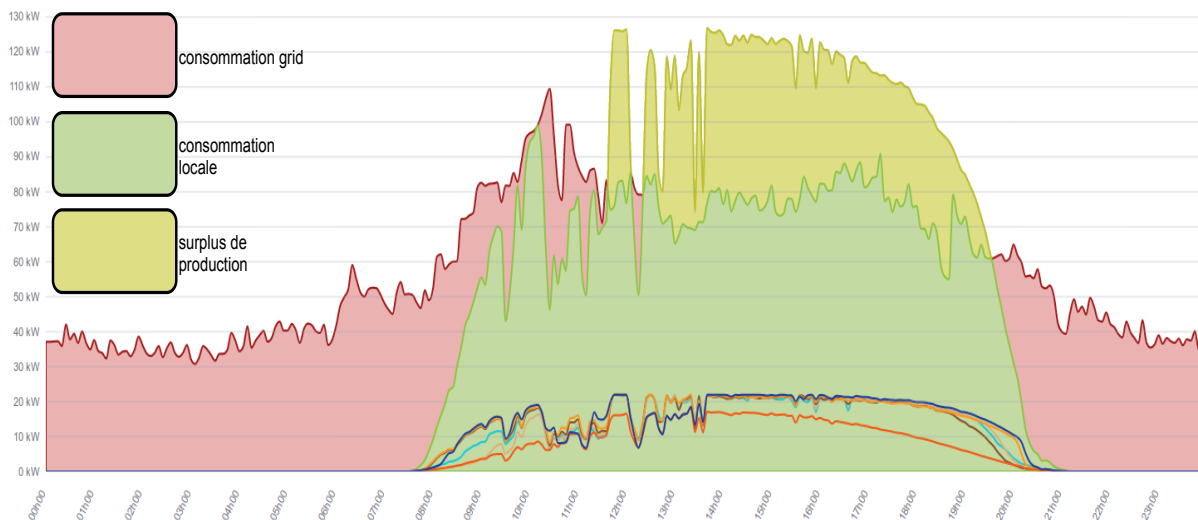


FIGURE 2.12 – Profil sur 24 heures d'un mix énergétique d'un site industriel

L'idée défendue dans cette thèse prend pour exemple de matériel les deux principales sources d'énergies renouvelables, mais s'applique également aux nombreuses autres sources d'énergie. Les énergies renouvelables détaillées dans cette section sont l'éolien et le photovoltaïque, parce qu'elles sont parmi les plus répandues en termes de taux de pénétration et donc de part de production. Cette popularité s'explique parce qu'elles sont adaptées à l'autoconsommation aussi bien pour les particuliers qu'à l'échelle d'un site industriel et même en centrales reliées au réseau de distribution.

2.2.3 Intégration et raccordement au réseau

Dans les sections précédentes, nous avons principalement abordé l'intégration de production décentralisée d'un point de vue électrique et de puissance. Dans le cadre d'une microgrille et de l'autoconsommation, le gestionnaire du site doit s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble. Cette section décrit brièvement l'**hétérogénéité** des aspects à prendre en compte et donc à modéliser.

Les énergies renouvelables sont généralement fortement dépendantes des conditions climatiques et météorologiques, le niveau de puissance en sortie de ces générateurs, et donc leur production, peut être directement impacté par un nuage ou une rafale de vent. Des organes d'électronique de puissance

se chargent de convertir le signal de sortie des générateurs pour s'adapter aux variations et permettre l'injection d'un signal stable sur le réseau électrique. La qualité et la performance de cette conversion de puissance, appelé MPPT pour *Maximum Power Point Tracker* est dépendante du matériel installé en plus du générateur électrique. Cette fonction est généralement assurée par un onduleur.

La fonction de l'onduleur est donc de fournir un courant et une tension stable à une fréquence fixe pour pouvoir être injectée dans un réseau électrique. Ces contraintes spécifiques liées aux caractéristiques du produit vont donc venir s'appliquer à la puissance générée par les sources renouvelables et donc possiblement réduire la puissance produite par un panneau photovoltaïque ou une éolienne. Puisque c'est le dernier point de la génération d'énergie, c'est au niveau de l'onduleur que la production est mesurée à chaque instant.

La communication avec un onduleur se fait généralement à l'aide d'une communication filaire série et du protocole Modbus. L'intérêt des liaisons RS-422 ou RS-485 sur lesquelles peut reposer Modbus est la simplicité de la communication et sa portée de plusieurs centaines de mètres, en fonction du débit de la connexion choisi par les appareils. Bien qu'une implémentation de Modbus sur protocole TCP et UDP existent, la majorité des onduleurs industriels ne supportent nativement que les implémentations séries et seuls les onduleurs pour particulier, ou micro-onduleurs, supportent une communication TCP ou UDP à l'aide d'un port Ethernet ou d'une carte WiFi.

Même si Modbus est le protocole le plus répandu, la façon dont sont exposées les données de l'onduleur varie d'un fabricant à l'autre voire même d'une référence de produit à une autre. Chaque onduleur nécessite donc un client spécifique pour s'adapter aux paramètres de l'onduleur pour la communication série : vitesse de transmission, taille des paquets, présence d'un bit de parité et pour la communication Modbus, adresse des registres pour chaque valeur souhaitée.

Parmi les valeurs généralement exposées par un onduleur, nous retrouvons :

- la puissance (W), tension (V), intensité (A) et fréquence (Hz) totale en sortie d'onduleur ou en sortie par phase pour un onduleur triphasé à l'instant de la mesure,
- le total d'énergie (kWh) produite depuis la mise en marche de l'onduleur,
- des informations plus relatives au fonctionnement interne de l'onduleur et à sa gestion des alarmes en cas de défaillance.

2.2.4 Les sites microgrilles isolés

Les sites qui ne sont pas reliés au réseau électrique global sont qualifiés d'**off-grid** ou isolés. Ils doivent donc produire eux-mêmes l'intégralité de l'énergie qu'ils souhaitent consommer et uniquement cette même quantité. En l'absence de grille aucun surplus ne peut être rejeté. Cette production peut se faire à l'aide de source d'énergies renouvelables ou de générateur à énergie fossile telle que les groupes électrogènes. Ces sites peuvent par exemple être des îles trop éloignées du continent pour être reliées par des câbles sous-marins ou des zones trop éloignées pour envisager l'installation de piliers.

Ces sites représentent les cas extrêmes de contrainte et ne sont finalement pas représentatifs des situations que nous souhaitons étudier.

2.2.5 Stockage en microgrille

En dehors du déplacement d'activité et des méthodes de **Demand Response** détaillées plus haut, un moyen d'aligner consommation et production est d'utiliser un moyen de stockage agissant comme moyen de tampon.

a) Type de stockage

Le stockage de l'énergie peut être réalisé de nombreuses manières différentes et est un domaine de recherche très actif. Parmi ces types de stockage, les plus démocratisés sont :

- le stockage **chimique** [115] qui est le plus répandu, sous la forme de batterie au plomb ou de batterie lithium. Il est présent dans la plupart des appareils à batterie de mobilité grâce à sa très forte densité,
- le stockage de **gaz comprimé** [18] par compression lors d'un surplus d'énergie récupéré à l'aide d'un processus réversible,
- le stockage **mécanique** [90] sous forme d'énergie cinétique et potentielle à l'aide d'un volant d'inertie sous vide par exemple ou par création d'un différentiel de gravité,
- le stockage **thermique** [26] généralement lié à un besoin en eau chaude ou en froid pour les activités d'une entreprise. Le stockage peut se faire en anticipant le besoin.

Quel que soit le moyen de stockage envisagé, quelques critères peuvent être étudiés pour déterminer la technologie la plus adaptée à une situation. La densité d'une batterie lithium fait d'elle une solution très adaptée à la consommation de petits appareils nécessitant de se déplacer, en revanche son prix et sa durée de vie limitée la rendent moins compétitive pour le stockage de grande capacité. À l'inverse, un bassin de rétention et une station de pompage offrent une durée de vie quasi illimitée, mais demandent un aménagement très important.

La **durée de vie** d'une batterie est exprimée en nombre de cycle, en dehors de potentielle mauvaise utilisation, c'est le principal facteur de vieillissement d'une batterie. Un cycle correspond à une décharge suivie d'une charge complète. La durée de vie est un facteur important du choix d'un système de stockage, il impacte grandement l'économie d'un système en cas de remplacement régulier. La possibilité de recyclage de la batterie peut également être un facteur de décision écologique dans le choix d'un moyen de stockage.

La technologie de batterie impacte également les cas d'usage des batteries, tant d'un point de vue des conditions extérieures, par exemple la capacité des batteries au plomb est impactée par les températures trop élevées ou trop faibles alors que les batteries au lithium le sont moins, que sur leur comportement à l'utilisation. En effet, pour favoriser la durée de vie d'une batterie il est recommandé de ne pas décharger une batterie en dessous de sa **profondeur de décharge**, *DoD*, recommandée.

Le tableau -table 2.4 compare quelques caractéristiques des batteries chimiques. Les batteries lithium sont populaires grâce à leur densité élevée malgré leur nombre relativement faible de cycle réduisant leur durée de vie.

TABLEAU 2.4 – Comparaison de différentes technologies de batterie chimique en termes de coût, durée de vie et encombrement.

Technologie	Durée de vie en cycle	Densité (Wh/kg)	Coût € /Wh
Lithium	1200	100 - 250	4
Plomb	500 - 1200	20 - 40	1.4
Nickel-Cadmium	1500	40 - 60	1.7
Redox Vanadium	10 000	10 - 20	

b) Hétérogénéité de l'intégration

De la même manière que l'onduleur sert à raccorder un générateur d'énergies renouvelables à un réseau électrique une batterie utilise un BMS, *Battery Management System*, pour gérer les cycles de charge, décharge et les appels de puissance. C'est le BMS qui va adapter la tension et le courant pour prendre en compte les spécificités des cellules et maximiser leur durée de vie. Il va généralement communiquer avec l'appareil de charge pour régler au mieux la puissance appelée et peut également communiquer sur l'état actuel de la batterie.

Aucun protocole standard de communication n'existe pour les BMS, parmi cette hétérogénéité plusieurs approches se dégagent :

- un **bus CAN**, Controller Area Network, dans le milieu automobile,
- une **communication série** filaire reliant directement les appareils,
- **communication sans-fil** à l'aide d'une technologie WiFi pour une batterie domestique ou industrielle.

En plus de gérer un éventuel dialogue avec un chargeur ou une station de charge, un BMS peut communiquer avec n'importe quel appareil en utilisant un des moyens cités plus haut. Les fonctionnalités attendues d'un BMS pour un outil de régulation sont :

- connaître une estimation de l'état de charge au moment de la demande,
- demander à charger la batterie à une puissance donnée,
- demander à décharger la batterie à une puissance donnée.

Un des intérêts des BMS est que si un appareil demande par exemple une charge d'une puissance de 500W alors que la batterie est un état ne pouvant accepter une telle puissance alors le BMS diminuera cette puissance ou refusera de charger les cellules pour préserver leur état et éviter une usure prématurée.

Le BMS est suffisamment intégré au matériel pour simplifier la gestion de presque tous les aspects physiques propre à la batterie et permet donc une régulation de l'énergie bien plus simplifiée pour le reste du réseau.

c) Stockage temporaire

En dehors du stockage *fixe*, l'essor des véhicules électriques permet le développement d'un potentiel parc de batteries. D'après [44] en moyenne les véhicules restent garés 90% de leur temps ce qui peut fournir un **stockage temporaire** à un outil de régulation [67]. Cette pratique en développement est désignée par l'appellation **vehicle to grid** ou V2G dans la littérature.

2.2.6 Un réseau communiquant : la Smartgrid

Le terme SmartGrid désigne un réseau d'électricité rendu intelligent par une communication permanente entre ses différents acteurs. Cette communication sert à échanger en permanence des informations de **production** et de **consommation** et d'**état** afin d'ajuster l'équilibre du réseau. L'objectif étant :

- d'améliorer l'efficacité énergétique de chaque producteur d'énergie en ajustant au mieux leur rendement,
- de permettre aux différents consommateurs de mieux mesurer leur impact sur le réseau pour pouvoir le réduire.

Cet aspect de mesure et de suivi du réseau mène à l'aspect de son contrôle et donc à son automatisation, domaine d'étude de l'autonomique. Frey *et al.* [48] identifient 3 clés au développement d'une **gestion autonome** des smartgrids :

1. les équipements doivent prendre des décisions et gérer les aspects imprévisibles de leur contexte local,
2. la supervision doit être globale, de haut niveau,
3. intégrer l'humain à la gestion et leur niveau de connaissance.

Une smartgrid est un réseau électrique équipé pour permettre le pilotage d'appareils et le suivi des consommations et production. C'est une brique nécessaire à la construction d'un système d'optimisation et de recommandation tel que les Jumeaux Numériques. Ces 3 préoccupations de l'approche autonome se retrouvent dans celles défendues dans cette thèse.

La section suivante décrit les moyens mis en œuvre, au niveau politique et législatif, pour permettre le développement et l'intégration des énergies renouvelables et donc le développement de réseaux microgrilles.

Résumé & enjeux

Les entreprises ayant installé des moyens de production renouvelables forment des microgrilles. C'est à cette échelle que nous nous intéressons à l'optimisation des échanges d'énergie, pour des raisons économiques et écologiques. Sur une installation industrielle, tous les échanges sont importants et impactent l'économie du système. En plus de ces échanges, leur coût à chaque instant doit être considéré puisqu'il peut être variable, par exemple pour les contrats de fourniture d'électricité. Nous verrons plus loin que nous utiliserons ce coût pour dimensionner et choisir du matériel de production et que donc ces aspects doivent être pris en compte dans notre modélisation.

SECTION 3

POLITIQUES INCITATIVES À L'UTILISATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Le développement des énergies renouvelables et leur intégration au réseau électrique compliquent la tâche d'équilibrage à cause de leurs conditions imprévisibles et leur forte dépendance aux conditions météorologiques extérieures.

De plus, en Europe, un des grands points de la stratégie politique Europe 2020 concerne l'environnement et peut se résumer à :

- la réduction de 20% l'émission des gaz à effet de serre ;
- passer à 20% la part des énergies renouvelables consommées ;
- améliorer de 20% l'efficacité énergétique.

Au niveau mondial, cette décision va dans le même sens que de nombreuses autres, notamment le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat **GIEC** et la présentation de leur rapport à l'intention des dirigeants de l'ONU le 8 octobre 2018.

Dans cette section nous verrons les moyens mis en place pour aider ce développement sous différents angles :

- **Législatif** : comment le cadre légal évolue pour autoriser l'intégration des énergies renouvelables,
- **Économique** : comment les gouvernements peuvent aider financièrement à leur installation,
- **Pratique** : quelles sont les contraintes pratiques à l'utilisation de moyens de production locaux ?

3.1 Aspects législatifs

Il est difficile de dimensionner des moyens de production pour le milieu résidentiel : les habitudes des usagers sont très différentes d'un foyer à l'autre, de plus l'investissement peut être important. **L'autoconsommation collective** cherche à pallier ces contraintes en mutualisant des moyens de production, généralement des panneaux photovoltaïques pour leur praticité, entre un ensemble de consommateurs géographiquement proche afin d'éviter le transport sur de longues distances et d'engendrer des pertes en ligne. L'énergie produite est ainsi répartie et facturée à un ensemble de consommateurs et ainsi minimise leur surplus.

D'un point de vue pratique, le générateur d'énergie est équipé d'un compteur de production pour qu'un opérateur puisse déterminer la quantité disponible à l'achat pour chaque tranche horaire. Il est possible qu'un des consommateurs soit également un producteur d'énergie, dans ce cas il peut être qualifié de *prosumer*, pour *producer-consumer*. Techniquement, il faut que son compteur soit capable de compter dans les deux sens, l'énergie consommée depuis la grille ainsi que l'énergie rejetée sur le réseau puisqu'elle sera revendue aux consommateurs proches. La Figure -Figure 2.13 présente schématiquement ces deux façons de faire de l'autoconsommation collective. Puisque les participants à ces

projets consomment de l'énergie provenant du réseau ou du producteur proche il est possible de trouver la notion de grille virtuelle, virtual grid, dans la littérature.

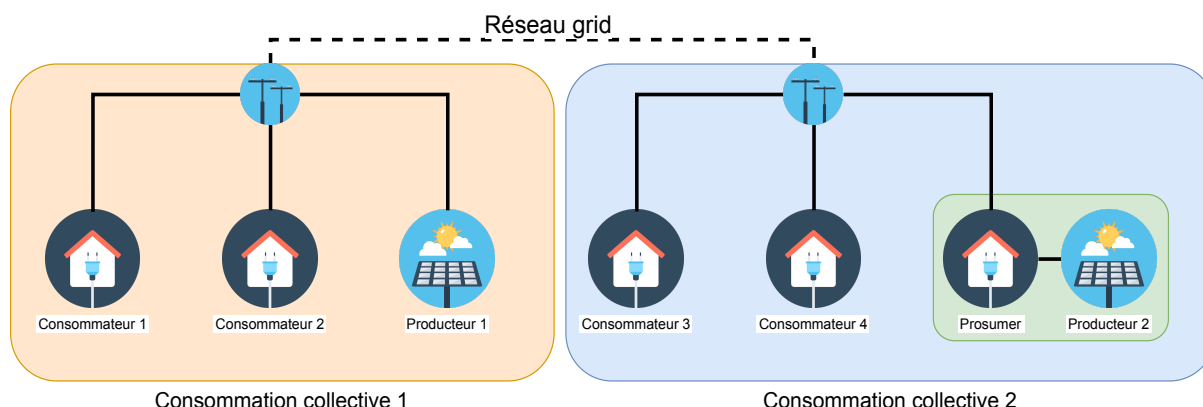


FIGURE 2.13 – Illustration de deux façons possibles de faire de l'autoconsommation collective. Le cas 1 partage un moyen de production entre plusieurs consommateurs rachetant sa production. Le cas 2 illustre un consommateur produisant son énergie, un prosumer, et revendant son surplus à des consommateurs proches géographiquement.

Une grille virtuelle va donc compter la consommation et la production de chacun des participants pour être en mesure de facturer la somme correcte. Cet aspect facturation en moins, l'architecture d'une grille virtuelle est la même qu'un site industriel où chaque bâtiment serait équipé d'un compteur. C'est pourquoi dans la suite de ce document il est question de site industriel, mais les scénarios et approches présentées peuvent s'appliquer à des cas d'autoconsommation collective.

Historiquement, le développement de ces scénarios était limité par le cadre législatif qui interdisait ce genre de pratique. Actuellement, les freins à l'adoption de ces pratiques se situent plus sur l'évaluation de la rentabilité. Dans tous les cas, des compteurs électriques plus précis, capables de compter dans les deux sens seront nécessaires, tels que le compteur Linky de Enedis¹⁷ par exemple. La section suivante développe cet aspect de rentabilité et comment les aspects économiques peuvent impacter la conduite de la régulation.

L'ADEME¹⁸, l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, a pour mission la mise en œuvre des politiques publiques en matière d'énergie et de protection de l'environnement depuis sa fondation en 1991. Depuis une dizaine d'années, l'ADEME propose des ateliers et des formations *réfèrent énergie*. Le rôle du réfèrent énergie dans une entreprise est de mettre en place et coordonner des missions d'amélioration de la performance énergétique.

Le réfèrent représente un utilisateur idéal des outils d'optimisation pour plusieurs raisons :

- il connaît bien l'organisation de l'activité de son entreprise,
- il est chargé par sa hiérarchie de proposer des changements de matériel consommateur d'énergie,

17. Site web détaillant le compteur Linky : <https://www.enedis.fr/linky-compteur-communicant>

18. <https://www.ademe.fr>

- il peut proposer l'installation de moyens de production locaux tels que des énergies renouvelables.

3.2 Aspects économiques

Le développement des énergies renouvelables est devenu au fil des années une priorité du gouvernement et plusieurs aides financières ont été proposées pour faciliter leur intégration. Le rapport de Philippe Quirion "Quel mode de soutien pour les énergies renouvelables électriques" [102] en dresse un état des lieux complet en comparant leur efficacité, [140] fait de même en prenant pour cadre d'étude la Roumanie. Deux types de subventions existent : tout d'abord les primes à l'installation pour faciliter l'achat initial et les primes sur l'achat de l'électricité produite. Les contrats d'achat d'électricité par le réseau, regroupés sous le terme anglais de **Feed-in Tariff**, fixent un prix au kWh pour une durée fixe afin de réduire l'incertitude des prix du marché et fournir à l'acheteur une garantie, en revanche ce prix au kWh va varier d'une année sur l'autre et d'un contrat à l'autre.

La vente totale consiste à considérer que toute la production locale est injectée et vendue au réseau à un tarif fixe, il en découle que le taux d'autoconsommation de ce genre d'installation est de 0% puisque si l'électricité est vendue au réseau elle ne peut pas être consommée localement. Dans les faits, physiquement l'électricité sera consommée au point de consommation le plus proche.

Depuis quelques années, la législation a évolué en France pour autoriser l'autoconsommation avec vente de surplus. Cela signifie qu'un site en autoconsommation pourra s'autoriser à surproduire, taux d'autoconsommation inférieur à 100%, et être rémunéré pour ça.

En plus du prix variable d'achat de l'électricité depuis la grille l'autoconsommation ajoute un nouvel aspect économique sur la gestion du surplus de production. Ce surplus est directement impacté par la taille de l'installation renouvelable, mais également impacté par la consommation de l'utilisateur final et par les types d'action possibles à mettre en œuvre pour effacer des pics de consommation.

3.3 Aspects pratiques

Pour faciliter l'équilibre du réseau, plusieurs stratégies ont été mises en place par les fournisseurs d'énergie. L'ensemble des stratégies ayant pour but d'aligner la consommation électrique avec la production, par quelque moyen que ce soit s'appelle le **Demand Response**. D'un point de vue grille, si la demande augmente trop brutalement, des générateurs auxiliaires, généralement au fioul ou au charbon, sont mis en marche. Ces générateurs sont considérés comme très peu écologiques parce que fonctionnant à l'aide d'énergies fossiles.

Les techniques de Demand Response vont donc servir à influencer le comportement des utilisateurs finaux pour consommer à un meilleur moment pour le réseau global.

Le **Demand Response** consiste à effectuer des actions en rapports sur des appareils contrôlés ou non de manière automatique afin de réduire leur impact sur le réseau électrique. Ces actions peuvent être les suivantes :

- l'arrêt total d'un appareil pendant la période concernée,
- la réduction de la consommation en changeant le mode de fonctionnement, par exemple en changeant le réglage d'une climatisation ou d'une ventilation voire de l'éclairage,
- le déplacement de l'utilisation d'un appareil à un moment plus propice (**Load Shifting**), par exemple reporter de plusieurs heures ou utiliser la nuit plutôt que la journée.

Si le **Demand Response** correspond à un ensemble d'actions ponctuelles pour favoriser l'équilibre et l'efficacité d'un réseau électrique, l'ensemble des politiques visant à améliorer cette efficacité se nomme **Demand Side Management**. En plus des actions de pilotage de matériel, cela concerne des actions de remplacement d'équipement, pour des appareils récents ou plus efficaces d'un point de vue énergétique. Le **Demand Side Management** peut donc inclure une politique de remplacement d'ampoules par des ampoules de type LED moins consommatrices d'énergie ou par l'amélioration de l'isolation thermique d'un bâtiment pour réduire la consommation de chauffage.

Ces actions peuvent être déclenchées directement par l'utilisateur final s'il est prévenu par un opérateur du réseau électrique par exemple ou alors déclenchées de manière automatique si les périodes de forte demande d'électricité sont connues à l'avance. Dans tous les cas l'utilisateur final est "récompensé" pour avoir changé son comportement et ainsi bénéficié au réseau global. Ces récompenses peuvent être directement une somme d'argent proportionnelle à la quantité d'énergie effacée pendant le pic ou alors un tarif préférentiel, plus faible, du kWh électrique pendant cette période.

En France, la grande majorité de la production électrique provient de centrales nucléaires pouvant produire de manière constante une importante quantité d'énergie. La majorité des activités consommatrices d'électricité ont lieu pendant la journée. C'est pourquoi de nombreux clients, particuliers ou professionnels, peuvent souscrire à un contrat proposant un coût de l'électricité plus faible pendant la nuit (heures creuses), période où la demande est normalement plus basse, que la journée (heures pleines) afin d'influencer le comportement des utilisateurs et ainsi aider à l'équilibre du réseau. Puisque la production et la consommation ne sont pas homogènes sur tout le territoire, les heures précises correspondant à ces périodes de prix ne sont pas les mêmes partout en France.

En France, en plus du système Heures Pleines/Heures Creuses deux autres options de **Demand Response** sont proposées sous la forme d'option au contrat par les fournisseurs d'électricité :

- Effacement des Jours de Pointe (EJP) et
- Tempo.

L'option EJP consiste en 22 jours très chers par an et 343 autres jours moins chers qu'un tarif de base. Les jours de pointes, les jours les plus chers, correspondent aux jours de pointe pour l'opérateur de réseau et sont notifiés aux utilisateurs la veille pour leur laisser le temps de réorganiser leurs activités et moins consommer. Cette option n'est plus commercialisée mais existe encore pour les clients l'ayant souscrite. L'option Tempo reprend le même principe en ajoutant trois catégories de jours plus ou moins chers. Rouges, la catégorie la plus chère contient 22 jours par an, blancs : 43 jours par an et bleus, la moins chère : 300 jours par an.

Ces deux options portent donc à 4 et 6 périodes possibles ayant chacune un prix au kWh électrique différent que l'utilisateur doit prendre en compte. Nous voyons que les opérateurs de réseau reprennent l'incertitude des pics de consommation et de la production du réseau pour fournir un outil de flexibilité à l'utilisateur final en lui offrant la possibilité de réduire sa facture d'électricité s'il arrive à s'adapter.

Le développement des Smartgrids a pour objectif de simplifier la notification des jours de pics aux utilisateurs, voire même, manière automatique : prendre contrôle sur du matériel spécifié à l'avance pour venir l'éteindre ou le mettre dans un mode moins consommateur. Avec une communication et des moyens d'action appropriés, la fréquence de changement de période de prix pourrait être augmentée pour correspondre à l'état réel du réseau, et ce en temps réel avec des actions appropriées effectuées de manière automatisée et sans impact direct sur le confort des utilisateurs finaux.

Résumé & enjeux

L'évolution de la législation sur les usages des énergies renouvelables pour l'autoconsommation change régulièrement les scénarios possibles d'intégration de ces solutions. Les prix d'achat de matériel ainsi que les surplus de production peuvent être subventionnés, mais leur prix varie. Ainsi un Expert souhaite utiliser ces coûts pour calculer des durées d'amortissement et donc estimer la rentabilité de ses investissements. C'est pourquoi dans cette thèse nous modélisons plus que les caractéristiques techniques du matériel considéré. D'autres configurations, telles que l'autoconsommation collective, viennent complexifier des scénarios pris en compte par les experts et donc en groupant la modélisation de plusieurs exploitants partageant des moyens de production.

SECTION 4

SYNTHÈSE

Dans ce chapitre nous avons vu la structure et l'architecture d'un réseau électrique et comment sont connectés les usagers. Nous avons vu la diversité des moyens de production d'énergie au niveau grille et installable par des particuliers ou des entreprises ainsi que les moyens de stockage.

Le **Demand Response** est le fait de déplacer une activité consommatrice d'énergie pour faire la faire coïncider avec une production. Il est rendu possible de manière automatique par le développement des smartgrids. Ce *Demand Response* permet de maintenir l'équilibre du réseau, mais peut également être une source de revenu ou de financement pour les personnes produisant leur propre énergie. Toutes les activités ne peuvent pas être déplacées librement, principalement à cause des contraintes liées à la présence humaine. Les activités doivent donc être qualifiées afin de différencier celles qu'une optimisation peut déplacer ou modifier.

Optimiser l'organisation des activités d'une entreprise consiste à réduire le **coût** global d'opération. Nous avons vu que le calcul de ce coût dépend de nombreux facteurs : contrat de fourniture d'électricité, gestion des surplus d'énergie, politique d'achat de la production.

Le développement des méthodes de *Demand Response* est non seulement une condition nécessaire à l'évolution du réseau électrique pour permettre le bon développement des énergies renouvelables, mais primordiales au bon développement des nouveaux modes de transport tel que la voiture électrique. En plus d'être nécessaire à l'évolution de la société, le Demand Response généralisé au secteur industriel peut permettre une baisse significative des consommations et donc permettrait une meilleure efficacité énergétique.

EXEMPLES ET CAS D'APPLICATION

Résumé

Le secteur industriel est différent du résidentiel par ses fortes consommations et sa plus grande régularité. C'est un secteur encore peu étudié et nous décrivons ici ses principales constituantes et les effets d'amélioration naïves et leurs manques ainsi que le déroulement d'une analyse industrielle actuelle.

Ce chapitre présente les cas usages et d'application des outils d'optimisation de l'énergie. Cette présentation est faite au travers de deux axes :

1. la présentation de deux cas d'usages et de leur site industriel associé afin d'illustrer le matériel présent ainsi que les pistes d'amélioration naïves.
2. le détail d'une analyse industrielle telle qu'elle peut être réalisée actuellement afin de mettre en avant ses limites.

SECTION 1

DESCRIPTION DE CAS APPLICATIFS

Tous les sites sans distinctions peuvent être équipés de moyens de production et peuvent participer à une microgrille. Plusieurs caractéristiques impactent cependant la stratégie à adopter. Nous détaillons ici deux sites consommateurs types différents dans leurs habitudes. Cette liste ne se veut pas exhaustive, mais illustre deux situations aux impacts énergétiques et économiques différents.

1. un **site d'élevage** géré par Monsieur A,
2. un **site industriel** géré par Madame B.

1.1 Site d'élevage type

Description

Le site géré par Monsieur A est une exploitation moyenne, composée de trois bâtiments d'élevage d'un peu plus de 1000m² chacun. Chaque bâtiment abrite ses nombreuses volailles dont le bien-être est primordial. Comme la majorité des exploitations agricoles, Monsieur A emploie peu de personnel et réalise la majorité des activités de son exploitation lui-même.

L'exploitation de Monsieur A est de taille moyenne, mais suffisante pour que l'électricité représente un poste de dépense important tout en ayant la capacité financière, ainsi que la volonté, d'investir dans des énergies renouvelables.

La Figure -Figure 3.1 présente la consommation électrique d'une semaine type mesurée pour l'ensemble des bâtiments. Même la nuit la consommation reste élevée et cela s'explique par la forte automatisation des bâtiments et à la gestion complète de l'environnement des animaux : température, luminosité, alimentation. En particulier la journée l'ouverture des portes extérieures, des chaînes d'alimentation et la ventilation vont provoquer des pics de consommation, très visible sur le graphique.

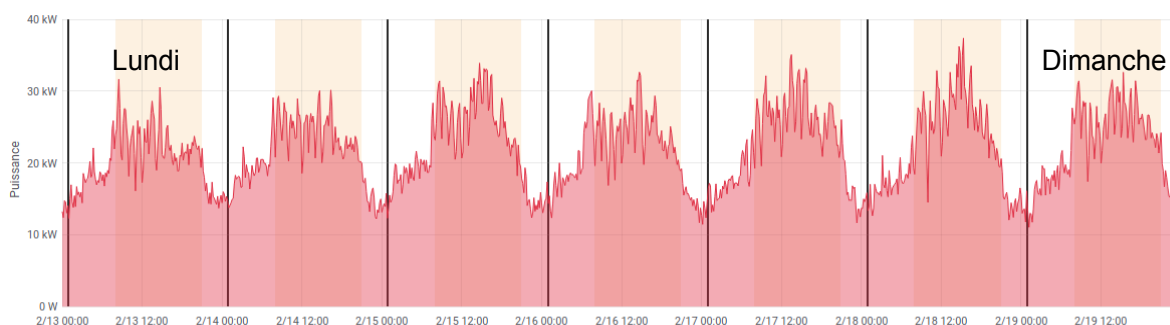


FIGURE 3.1 – Profil de consommation d'une semaine type, les journées sont plutôt semblables. Les lignes noires montrent les changements de jour à minuit et les zones jaunes indiquent les périodes de 7h00 à 20h00.

Les points de consommation principaux liés à l'élevage sont les suivants :

- le chauffage des bâtiments en hiver,
- la ventilation en été pour maintenir une température constante,
- l'éclairage pour simulation des cycles du soleil dans les bâtiments sans ouverture et pour finir,
- les mécanismes pour apporter la nourriture et nettoyer les bâtiments,

Toutes ces activités liées au bien-être animal sont **très contraintes**, gérées par différents automates ayant chacun leur logique et objectif, comme la gestion de la température. Ces contraintes doivent donc être prises en compte dans un modèle pour ne pas rentrer en conflit et permettre soit une automatisation soit des recommandations pertinentes.

En dehors de l'élevage, plusieurs activités annexes consomment de l'énergie et sont généralement présentes sur les exploitations agricoles, nous pouvons citer :

- le compostage des éléments organiques tels que les déjections qui doit être chauffé pour maximiser son rendement,
- le traitement et le puisage de l'eau,
- les activités manuelles outillées, réalisées dans un atelier sur l'exploitation, par exemple pour réparer des structures ou nettoyer des engins agricoles.

Ces dernières activités ne sont pas en lien avec le vivant il serait donc possible, **en collaboration avec l'exploitant**, de proposer les meilleurs moments de la journée pour les réaliser et ainsi éviter les pics de consommation provoqués par les activités indispensables. Cette collaboration permet de garder un contrôle sur les recommandations proposées et nécessite donc d'intégrer l'utilisateur aux outils à mettre en place.

La majorité des consommations sont pilotées par des automates et sont indispensables au maintien du bien-être et à la santé des animaux. La consommation annuelle se situe autour de 190MWh, la consommation est en moyenne de 20kW avec quelques pics pouvant aller jusqu'à 50kW. Pour comparaison, cela représente la consommation d'environ 40 foyers français, étant généralement dans des zones très rurales, ce nombre explique les problématiques d'acheminement de l'électricité et les coûts d'infrastructure supplémentaire là où les énergies renouvelables peuvent justement permettre d'alléger cette infrastructure.

Étant donné la consommation élevée, le contrat de fourniture d'électricité propose un prix beaucoup plus bas que pour un particulier. Le prix moyen d'achat se situe aux environs de 3.5c€/kWh, contre 12 à 15c€/kWh pour un particulier, ce qui fait une consommation moyenne facturée 500€ HT par mois. La facture d'électricité est le deuxième ou troisième poste de dépenses pour un éleveur, chaque réduction est donc intéressante à étudier. Une installation photovoltaïque permet de garantir un prix fixe de l'électricité aux environs de 3c€/kWh sur plus de 20 ans, là où le prix d'achat sur la grille est en constante augmentation, comme nous l'avons vu.

Il faut également garder à l'esprit que la consommation hors taxes ne représente qu'une partie de la facture cliente, mais elle en est le point d'entrée. Une partie des taxes est fixe, les autres sont indexées sur la consommation. Ces taxes inclues : Contribution Tarifaire d'Acheminement *CTA*, Contribution de Service Public de l'Électricité *CSPE*, Taxe sur Consommation Finale d'Électricité *TCFE* ainsi que la *TVA*. Réduire la consommation venant de la grille à l'aide d'énergies renouvelables est donc un moyen de réduire cette facture.

Les énergies renouvelables

En se basant uniquement sur ce profil, un expert peut déduire deux pistes d'amélioration :

- la consommation électrique est plus élevée la journée, et ce tous les jours, ce qui en fait un bon site candidat pour de l'utilisation d'énergie solaire.
- la consommation reste importante la nuit ce qui peut en faire un site candidat à l'installation de batterie si leur utilisation est rentable.

Freins pour les exploitations agricoles

Cependant l'utilisation d'énergies renouvelables ne peut se faire mécaniquement sans réflexion. Une particularité des exploitations d'élevage est le **vide sanitaire**. Un vide sanitaire est une période pendant laquelle un bâtiment est laissé vide pour des raisons d'hygiène après avoir accueilli des animaux et avant l'arrivée de nouveaux animaux. Cette période réduit fortement la consommation d'un bâtiment impacté puisque la ventilation et le chauffage entre autres ne sont pas nécessaires.

Sans analyse ou discussion avec l'exploitant, il est possible de passer à côté des périodes de vides sanitaires si elles n'ont pas lieu au même moment dans les différents bâtiments. La Figure - Figure 3.2 représente la consommation hebdomadaire du site entier avec notamment la consommation électrique qui augmente avec l'âge des animaux d'élevage. Le vide sanitaire implique un décrochage sur le profil de consommation.

Cette baisse de consommation régulière est à prendre en compte pour le dimensionnement de moyen de production d'énergie. Dimensionner en prenant uniquement en compte le fonctionnement normal risque d'entraîner beaucoup de surplus pendant les périodes de vide sanitaire et donc nuire à la rentabilité du projet.

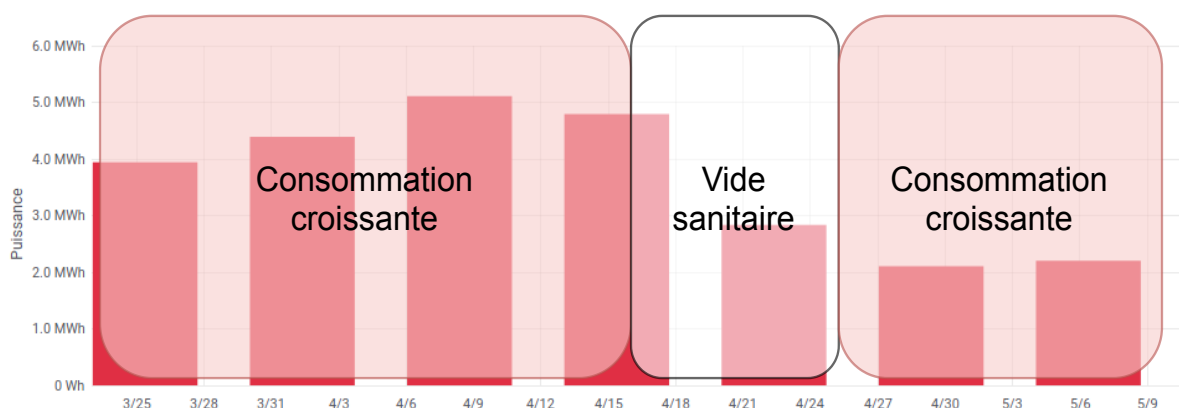


FIGURE 3.2 – Consommation totale hebdomadaire par jour. La consommation est croissante en phase d'élevage puis fortement réduite pendant le vide sanitaire avant de reprendre une phase croissante.

Bilan

L'entreprise OKWind a installé 220m² panneaux solaires, soit 36kWc, en première approche en se basant sur cette consommation et ces habitudes. La procédure utilisée pour dimensionner est détaillée dans le chapitre suivant à la section -section 2.

Avec cette installation, Monsieur A va produire pour l'année 54MWh dont 50MWh consommés directement soit 92.6% d'autoconsommation ce qui est une bonne utilisation de son nouveau matériel. Sur cette année, Monsieur A peut espérer une réduction de sa facture de 23.4% ce qui lui permet de rentabiliser assez vite ses panneaux solaires.

Dans cette situation Monsieur A est autonome vis-à-vis de la grille à hauteur de 26% et il sou-

haïterait l'améliorer pour réduire l'impact de l'augmentation du prix de l'électricité. Cependant en l'état il est difficile de faire mieux, augmenter la production améliore assez peu l'autonomie et l'autoconsommation chute très vite, à cause du profil de la consommation trop important la nuit et des phases de vide sanitaire.

TABLEAU 3.1 – Récapitulatif de la situation du site type d'élevage. La situation idéale est celle recherchée dans cette thèse.

	Initiale	Actuelle	Idéale
Production locale (MWh)	0	54	?
Consommation depuis la grille (MWh)	191	141	~ 95
Autoconsommation (%)	-	92.6	> 80
Autonomie (%)	0	26.2	~ 50
Facture d'électricité (relative)	1	0.76	< 0.5

Nous verrons dans le chapitre suivant l'état de l'art des solutions qu'il est possible de mettre en œuvre ainsi que les limites de leur application puis dans le Chapitre 8 la mise en application de notre approche et ses résultats.

1.2 Site industriel type

Le site géré par Madame B est composé de plusieurs bâtiments où plusieurs équipes travaillent la journée sur différentes machines industrielles telles que des découpeuses ou des machines d'assemblage. La Figure -Figure 3.3 illustre la répartition de la consommation pour une semaine type. La consommation est directement impactée par les équipes exploitant le site, les jours de congés, la nuit et même durant la pause du midi la consommation est réduite.

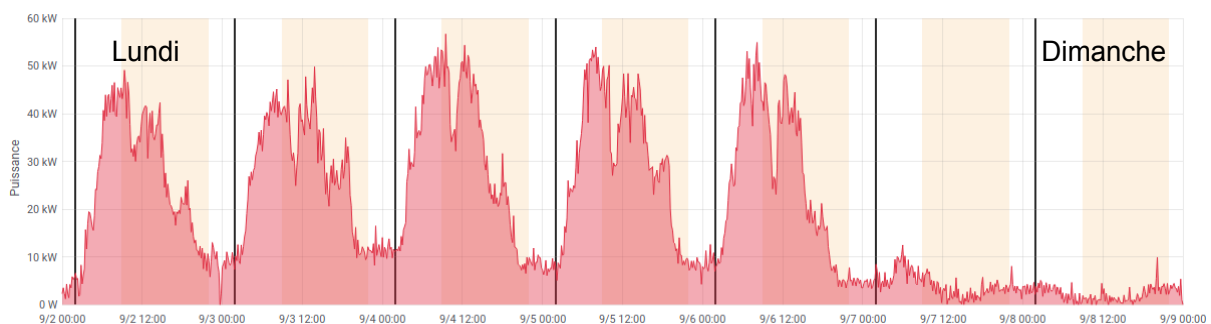


FIGURE 3.3 – Profil de consommation d'une semaine type, les jours de semaines sont semblables tandis que la consommation est très faible durant le weekend. Les lignes noires montrent les changements de jour à minuit et les zones jaunes indiquent les périodes de 7h00 à 20h00.

Les consommations importantes du site font que le tarif d'achat est également relativement bas, aux alentours de 3 à 4c€/kWh.

La grosse différence entre la semaine et le weekend complique la phase de dimensionnement du matériel de production, si la production correspond par exemple à 60% du pic de consommation de la journée, beaucoup de surplus seront produits le weekend ce qui va nuire à la rentabilité de l'ensemble.

Pour un site comme celui-là, une entreprise spécialisée telle qu'OKWind préfère dimensionner les moyens de production afin de minimiser les surplus. Deux situations se présentent donc :

- utiliser **le talon de consommation de la semaine**, réduire l'apport de la grille d'au moins 30%, mais avoir beaucoup de surplus le weekend qui sera perdu ou revendu à faible coût,
- utiliser **le talon de consommation du weekend**, pour ne jamais avoir de surplus, mais réduire l'apport de la grille de seulement 15%.

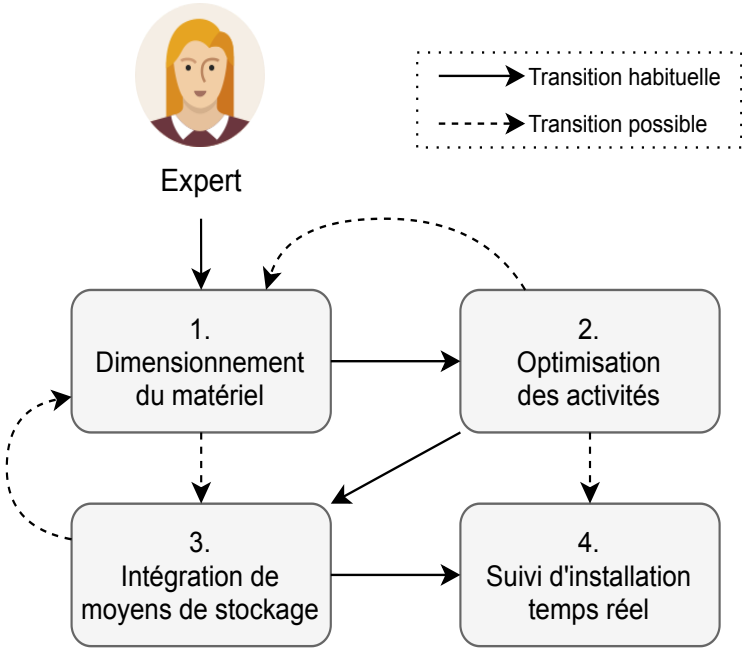
La différence avec le milieu agricole présenté précédemment est qu'ici les activités sont plus prévisibles et donc plus faciles à modéliser. Les seules contraintes viennent des horaires de travail des employés.

Le choix de la meilleure solution demande une analyse économique prenant en compte notamment les différents prix d'achat et de vente de l'électricité. Nous verrons plus loin dans cette thèse que ce seul aspect est un problème dans les outils actuels.

Les analyses économiques présentées pour le cas précédent restent valables pour le milieu industriel, certaines industries peuvent même fonctionner intégralement sur de l'énergie électrique, les rendant encore plus dépendantes du prix d'achat sur la grille.

Résumé & enjeux

L'instrumentation d'un site ne peut se faire sans réflexion et méthodologie. Elle nécessite une bonne compréhension du domaine et des contraintes. Nous discuterons dans l'état de l'art des techniques actuellement en cours. Nous verrons dans le cadre de la thèse comment nous intégrons ces contraintes à notre modèle pour établir des préconisations cohérentes.



d'utilisation des batteries et leur prix très élevé les rend difficilement rentables.

Dans la situation actuelle, les experts manquent d'outils pour apprécier les bénéfices de l'installation batterie et évaluer leur rentabilité.

L'installation de batteries électriques est un moyen de rééquilibrer les moments de production avec la consommation, ainsi les surplus de la journée peuvent compenser la consommation nocturne ou les éventuels pics de consommation.

Pour aller plus loin dans l'efficacité et atteindre par exemple 50 ou 60% d'autonomie énergétique, d'autres stratégies sont à mettre en place. Ces stratégies consistent par exemple à proposer des déplacements d'activité fondés sur la production journalière ou pour optimiser des cycles de charge de batteries. Pour mettre en œuvre ces stratégies, nous avons besoin d'intégrer la **connaissance des experts**.

L'objectif de cette thèse est de proposer une modélisation utilisant les concepts ainsi que les bons niveaux d'abstractions. C'est pourquoi nous avons :

- étudiés les outils déjà développés et que,
- nous avons rencontré plusieurs exploitants de sites pour comprendre l'organisation de leurs activités.

Les aspects relatifs aux connaissances techniques des experts, à la modélisation et aux stratégies d'optimisation sont détaillés dans le chapitre suivant.

2.2 Dimensionnement pour un site type

L'approche **existante** repose sur l'utilisation de plusieurs tableurs pour retravailler des fichiers bruts. La décomposition des étapes est la suivante :

1. utilisation de services tiers pour l'export de fichiers bruts de production estimée, ou récupération de données collectées sur le terrain,
2. mise en forme des données dans deux colonnes distinctes d'un tableur,
3. ajout d'une colonne de soustraction, production – consommation, pour estimer les échanges énergétiques sur la période, t par rapport à $t - 1$, et séparer surplus de production et quantité prise sur la grille,
4. calcul des métriques d'autoconsommation, consommation locale par rapport la production locale totale, et d'autonomie, consommation locale par rapport à la consommation depuis la grille,
5. calcul économique en prenant en compte l'installation du matériel de génération, la réduction de la facture d'énergie en considérant la production locale ainsi que la revente de surplus.

Limites techniques

L'approche actuelle est fonctionnelle pour la plupart des cas simples et pour une estimation très approchée de la réalité, mais n'est pas satisfaisante pour les raisons suivantes :

Granularité : pour une granularité fine des fichiers d'entrée, 1 valeur par pas de 5 minutes par exemple, le tableur **passer difficilement à l'échelle** pour des estimations de plus d'une année. Pour prendre en compte les variations saisonnières, il peut être intéressant de considérer 2 ou 3 années consécutives.

Coût : le coût économique dépend des contrats de fourniture d'électricité, EDF par exemple, leur prix peut varier en fonction de l'heure de la journée, heures pleines et heures creuses, ou en fonction du jour, par exemple l'*Option Tempo* et les jours bleus, blancs et rouges. Ces différents prix, variant d'une simulation à l'autre, demandent une maîtrise poussée des tableurs et donc sont difficiles d'accès pour un Expert.

Qualité des données : les fichiers bruts contiennent des données à une fréquence d'acquisition constante, toutes les minutes, 5 minutes, 10 minutes ou plus. Pour être exploitables dans un tableur de la manière décrite plus haut les données doivent être **alignées**. Cela implique que les fichiers aient la même date de début et contiennent le même nombre de points de mesure. Une absence de mesure, côté production ou consommation, entraîne un décalage des données et donc des erreurs de calcul. Manuellement détecter ces absences de données demande quelques minutes pour chaque fichier si elles sont peu nombreuses, mais peut vite s'avérer très long et fastidieux pour des coupures de plusieurs heures.

Ces manques ne sont pas uniquement liés à la qualité des capteurs utilisés pour réaliser l'acquisition des données sur le terrain. Dans le cadre des dizaines de campagnes de mesures réalisées pendant cette thèse : au moins 1 coupure a lieu par mois d'acquisition, allant de 1 mesure manquante (5 minutes de données) à plusieurs dizaines (1 à 2 heures de données). Ces coupures ont été constatées sur plusieurs appareils dont :

- un appareil commercial fabriqué par un industriel spécialisé dans le suivi et la gestion de fermes solaires. Cet appareil sert à mesurer la production des installations,
- un second appareil réalisé spécialement pour cette thèse pour mesurer la consommation d'un compteur électrique ajouté sur l'installation de l'utilisateur final.

Ces campagnes de mesures nous ont permis d'identifier plusieurs sources d'erreur :

- l'instabilité de la communication avec le compteur,
- l'instabilité de la connexion internet et donc du besoin de conserver des données locales au capteur,
- l'intégration au site client, dans le milieu agricole les installations électriques peuvent être anciennes et donc risquer de coupures, ou difficile d'accès et l'utilisateur peut vouloir déplacer du matériel et donc provoquer une coupure sans penser à mal,
- les perturbations électromagnétiques dues aux appels de puissance trop importants, d'appareils présents sur l'installation de l'utilisateur.

Ces sources d'erreur sont nombreuses et peuvent être difficiles à éviter, il vaut mieux donc que les outils soient en mesure de les gérer.

2.3 Optimisation des activités

La méthode actuelle ne permet qu'une *estimation* très approximative du résultat attendu, elle est fondée sur le calcul du surplus global à partir d'un tableur identique à celui utilisé pour le Cas d'Usage 1. Ce surplus total sur la période est divisé par le nombre de jours simulés. Le surplus moyen journalier permet d'estimer un volume d'énergie utilisable par un déplacement d'une autre activité et donc un gain potentiel.

En choisissant plusieurs journées en fonction de la saison ou de la production du générateur solaire, il est possible d'affiner le gain possible pour plusieurs journées types.

Limite : La limite de cette approche vient du biais créé lors du choix des journées choisies pour baser l'analyse. Si quelques journées d'été semblent très profitables, il est très difficile d'estimer le gain sur une année entière de cette manière.

Cette limite vient principalement de la difficulté d'exprimer facilement la fréquence et les heures de répétition des activités au sein d'un tableur

2.4 Intégration des moyens de stockage

Un Expert utilisant l'approche actuelle fondée tableur ajoute des colonnes supplémentaires pour simuler l'état de charge de la batterie. Un exemple des colonnes nécessaires est illustré en Figure - Figure 3.5. À chaque pas de simulation, les échanges sont calculés pour déterminer si la batterie peut être chargée s'il est préférable de la décharger. Les surplus d'énergie sont chargés en batterie si elle le permet et la batterie est déchargée en priorité par rapport aux utilisations de la grille. Le nouveau bilan de l'usage de la grille peut à nouveau être calculé en retirant l'énergie chargée du premier usage calculé.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	datetime	Production (W)	Consommation (W)	Prod-conso (kWh)	Grille (kWh)	Production (kWh)	Consommation (kWh)	Batterie	Réduction Grille (kWh)	Grille - Batte
2								30		
3	2017-06-01T00:00	0	20018	-1,66816666666667	1,668166667	0	1,66816666666667	28,33183333	-1,66816666666667	(
4	2017-06-01T00:05	0	20867	-1,73891666666667	1,738916667	0	1,73891666666667	26,59291667	-1,73891666666667	(
5	2017-06-01T00:10	0	25080	-2,090000000	2,090000000	0	2,090000000	24,502916667	-2,090000000	(

FIGURE 3.5 – Extrait d'un tableur permettant de simuler un fonctionnement de batterie

Limites : La représentation des batteries, et plus généralement des moyens de stockage, est très limitée aux cas les plus simples sans recourir à une programmation plus poussée du tableur. Notamment, les éléments caractéristiques suivants sont très difficiles, voire impossibles à intégrer :

- les **contraintes sur les cycles** de charge et de décharge, en effet réduire le nombre de cycles ainsi que leur amplitude permet de préserver la durée de vie des batteries électrochimiques,

- le suivi d'une batterie n'est pas compatible avec les déplacements d'activité, les autres formes de *Demand Response* et difficilement avec d'autres batteries ayant des priorités différentes, par exemple privilégier une batterie plomb avant une batterie lithium,
- les éléments temporels, tels que l'usure liée à l'utilisation des batteries, sont également difficiles à prendre en compte dans un tableur. L'utilisation et le maintien en charge de presque toutes les formes de batterie impactent leur capacité au fil du temps. Après une certaine durée d'utilisation quotidienne, généralement à compter en années, la batterie ne peut stocker qu'une partie minime de sa capacité initiale et est généralement à considérer comme étant à remplacer.

2.5 Suivi d'installation temps réel

La collecte de données de consommation réelles issues du terrain est généralement la première étape d'une étude énergétique tandis que le pilotage automatique d'un appareil la dernière. Ces préoccupations sont liées aux appareils de mesure et à leur manière de communiquer.

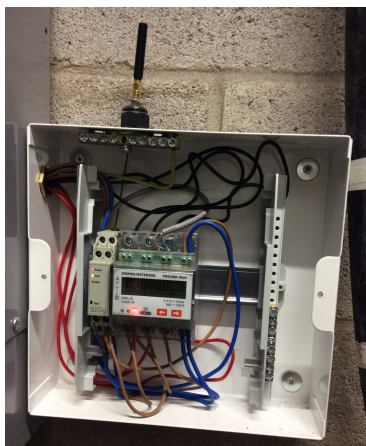
Une consommation globale, par exemple à l'échelle d'un bâtiment, permet de détecter des périodes de pics de consommation, mais rend plus difficile la mise en place de mesures préventives ou d'actions ciblées. Les appareils les plus consommateurs se retrouvent masqués par le bruit des autres appareils du bâtiment. Pour avoir des données exploitables, il faut donc pouvoir suivre la consommation de chaque appareil indépendamment. Deux alternatives sont possibles :

1. équiper chaque appareil d'un compteur énergétique,
2. installer un seul compteur et désagréger les consommations.

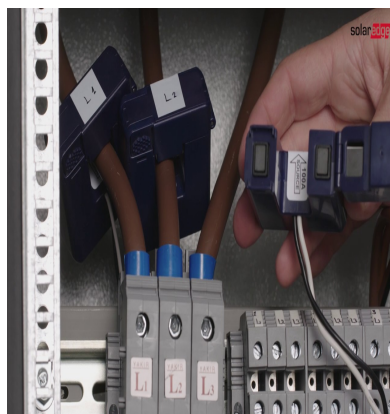
La première solution est la plus simple, mais la plus coûteuse en termes de matériel et également la plus contraignante puisqu'elle nécessite d'intervenir physiquement sur chaque appareil. C'est pour ces raisons qu'elle est jugée **intrusive**. Puisque s'intégrer à chaque appareil signifie être au contact d'humains, des solutions esthétiques et rapides à installer ont été développées, par exemple la Figure -Figure 3.6c du constructeur Fibaro¹. Ces appareils intègrent généralement un appareil de mesure de puissance ainsi qu'un moyen, généralement sans-fil, de la transmettre à un concentrateur chargé de collecter les données mesurées pour les transmettre à une plateforme de visualisation. Certaines machines industrielles peuvent avoir leur propre départ sur un tableau électrique, auquel cas il sera possible de mesurer leurs consommations à l'aide de pinces ampèremétriques, exemple en Figure -Figure 3.6b, ainsi que d'un compteur relié à ces pinces comme montrées en -Figure 3.6a.

La seconde solution est un domaine de recherche très actif ces dernières années [69, 141, 22, 10, 60] se regroupant sur le thème du **suivi de consommation non intrusif**, *Non Intrusive Load Monitoring* abrégé *NILM*. Le principe est de construire une base de connaissance de signature de consommation d'un certain nombre d'appareils pour être en mesure de les reconnaître même au travers d'un compteur unique qui ne verra que la somme des appareils branchés à son aval.

1. <https://www.fibaro.com/fr/products/wall-plug/>



(a) Coffret d'acquisition équipé d'un appareil de comptage, à droite sur le rail, et d'un appareil de relevé, à gauche, avec une antenne GPRS, certifié MID



(b) Pincettes ampèremétriques non intrusives dans un tableau électrique, le compteur n'est pas visible



(c) Prise murale tout intégrée de marque Fibaro, peut également servir d'interrupteur, sans certification MID

FIGURE 3.6 – Exemples d'installation de deux types de compteurs électriques

Les limites de ces approches sont multiples :

1. des appareils ayant trop de similitudes vont être dur à distinguer [39],
2. elles nécessitent un temps d'apprentissage pouvant durer plusieurs semaines.

Ces capteurs peuvent communiquer directement par le réseau, mais ils envoient généralement leurs données régulièrement sur une plateforme gérée par le fabricant. L'utilisateur peut dans un second accéder à ses données et les télécharger.

SECTION 3

CONCLUSION

Ces cas d'usage ont en commun leur application à un site réel et leur besoin double d'analyse des échanges énergétiques et de mise en œuvre. Cette mise en œuvre concerne l'intégration à des capteurs de consommation et la communication avec une interface de commande, pour des batteries par exemple. Il apparaît illusoire de souhaiter intégrer ce double objectif dans un tableur, l'approche la plus répandue d'analyse de consommation.

Le chapitre suivant présente l'état de l'art des méthodes de Demand Response et de leur mise en œuvre ainsi que les différentes méthodes de dimensionnement de générateur d'énergie renouvelable.

ÉTAT DE L'ART

Résumé

Pour être efficace énergétiquement, tous les aspects d'un site doivent être pris en compte : les appareils consommateurs, les moyens de production, l'organisation des activités de l'entreprise, ainsi que les moyens de stockage. Ces aspects doivent être correctement intégrés avant de pouvoir appliquer une politique de déplacement d'activités ou d'effacement des pics de consommation. Aucune approche existante ne propose une vision d'ensemble satisfaisante.

Dans cet état de l'art, nous nous intéressons aux techniques visant à l'amélioration de l'utilisation de moyens de productions d'énergie renouvelables tout en maintenant la qualité des activités consommatrices d'énergie. Les motivations sous-jacentes peuvent être multiples : économie d'énergie, réduction d'émissions de gaz à effet de serre, autonomie énergétique. Cette optimisation de la production locale passe par plusieurs moyens d'action regroupés sous le terme **Demand Response** [120, 129] : déplacement d'activités, stockage de l'énergie, intégration du coût de l'énergie. Les approches d'optimisation existantes ne considèrent pas l'ensemble des parties prenantes lors de l'optimisation ou alors sont trop spécifiques à une situation donnée et difficilement transposable à grande échelle ou pour du matériel différent. Cette optimisation va se fonder sur la consommation d'énergie, sa production et les moyens de faire tampon si les deux n'arrivent pas au même moment, à savoir le stockage de l'énergie sous toutes ses formes.

Chercher à modéliser la production des énergies renouvelables n'est pas un domaine nouveau [41], à l'échelle d'une ou plusieurs années cela s'appelle le *productible* et c'est une étape indispensable au dimensionnement de n'importe quel système de production. De la même manière, modéliser la consommation d'un site afin d'en réduire la consommation globale ou d'éviter les pics, facturés plus cher, n'est pas une tendance récente. En revanche, les différentes politiques incitatives au développement des

énergies renouvelables, telles que décrites dans la section -section 3 du chapitre 2, ainsi que le développement des *smartgrids* ont permis le développement de méthodes de régulation plus poussées ces dernières années.

L'intégration du suivi et du pilotage de site industriel est une volonté profonde de l'Industrie 4.0 et du concept de **Jumeau Numérique**. Nous rappelons ici une définition rappelant qu'un Jumeau Numérique consiste en l'utilisation d'une modélisation numérique et temps réel liée au monde physique par un ensemble de capteurs.

Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems. — [118]

De manière générale, l'exploration des solutions lors du cas calcul d'optimisation peut se faire selon deux manières :

- **exacte** : par la résolution des contraintes définies dans le problème, c'est l'approche défendue par le *Constraint Logic Programming* [66]. L'avantage est que la ou les solutions calculées sont optimales, l'inconvénient est que la complexité peut vite devenir insupportable dans des cas d'application réels,
- **approchée** : par l'utilisation de *meta-heuristiques* [98, 53]. Cette approche a l'avantage de réduire fortement la complexité de calcul de solutions en guidant l'exploration, mais est susceptible de trouver un minima local et donc une solution sous optimale.

La différence entre ces grandes familles d'approche tient donc dans la qualité des résultats et de la complexité de les calculer. Par exemple, lors d'un dimensionnement de matériel, plus de temps peut être accordé à la simulation et donc une solution exacte peut être envisagée. En revanche, le déplacement d'activités est généralement avec des contraintes temporelles fortes, c'est pourquoi une solution approchée sera plus adaptée. Plusieurs méthodes d'exploration sont utilisables au sein d'un Jumeau Numérique, et ce en fonction du contexte de la simulation et de la composante à optimiser.

Ce chapitre décrit chaque partie composant les caractéristiques d'un Jumeau Numérique adapté au domaine de l'énergie :

1. le **dimensionnement des installations** productrices d'énergie de manière adaptée,
2. les méthodes **d'optimisation de l'énergie** : par utilisation de moyens de stockage et déplacement de consommation et plus généralement par *Demand Response*,
3. les préoccupations **de prédiction et de simulation** des systèmes,
4. pour terminer par un **récapitulatif** des solutions existantes et un résumé du chapitre.

Ces parties fournissent des critères permettant de comparer les solutions existantes entre elles, notamment : quels sources d'énergie et moyens de stockage sont supportés, quel paramètre guide l'optimisation, quel type de calcul est réalisé, temps réel ou simulation et quels cas d'usage sont supportés.

SECTION 1

DIMENSIONNEMENT

Dimensionner un système de génération d'énergie ou de stockage répond à une problématique économique [105]. La première étape est de proprement dimensionner les moyens de production. Une recherche bibliographique basée sur les méthodes actuelles de dimensionnement nous a permis de caractériser en particulier trois besoins :

1. **Contrainte géographique** : optimiser la production par rapport un espace géographique donné,
2. **Contrainte d'autonomie** : dimensionner pour que la production puisse subvenir totalement à une consommation donnée, en prenant en compte les incertitudes de production,
3. **Contrainte d'autoconsommation** : dimensionner par rapport à une consommation afin de limiter les surplus.

Le **dimensionnement en fonction de contraintes géographiques** est principalement observé au niveau de la grille, lorsque l'objectif d'une installation d'énergie renouvelable est de produire le plus possible pour un budget donné. Ces approches [95, 12] vont prendre en compte les caractéristiques physiques du lieu d'implantation afin d'optimiser le placement et la taille de chaque générateur pour maximiser la production et donc minimiser les gênes mutuelles des générateurs. Par exemple, deux petites éoliennes trop proches peuvent gêner le passage du vent et donc impacter la production attendue pour cette installation. Pour ce calcul de dimensionnement, ces approches utilisent généralement des algorithmes génétiques pour approcher rapidement d'une solution optimale.

Ces problématiques restent pertinentes pour de la microgrille, le relief et la géographie des lieux ont un impact direct la production de la plupart des énergies renouvelables, les puissances restent suffisamment faibles pour considérer qu'il est facile de les placer. Nous allons donc considérer ces méthodes comme secondaires ou à utiliser de façon ad hoc et donc hors du périmètre de ce que nous souhaitons étudier.

Le **dimensionnement pour l'autonomie** est plus adéquate à l'analyse de sites isolés, les approches [126, 139] qu'il regroupe ont pour objectif de maintenir une qualité de service en l'absence de grille. Les sources de production locales doivent subvenir à l'intégralité de la consommation électrique. Même si les sites isolés sont hors de notre cas d'étude, deux aspects importants sont à remarquer :

- la prise en compte des **variations saisonnières** pour considérer les cas extrêmes,
- la **qualité** de service à assurer.

Typiquement, le dimensionnement d'un site isolé donné va chercher à calculer un productible pour une installation donnée et comparer le résultat à la consommation moyenne pour la même période. La qualité de service intervient en mesurant la durée totale estimée de période pour lesquelles la production va être inférieure à la consommation, signifiant que potentiellement des pannes de courant vont survenir.

La limite de ces calculs tient dans la qualité des données utilisées ainsi que leur quantité. Estimer un coût de fonctionnement sur 10 ou 20 ans va nécessiter de rejouer de nombreuses fois les mêmes journées et donc d'extrapoler les résultats, il serait intéressant de considérer un mécanisme faisant évoluer les profils de consommation en utilisant des tendances générales ou apporter des modifications pour représenter le **degré d'incertitude** des comportements considérés. En dehors de cette limite, la méthode de calcul de [126] par exemple, présentée en Figure 4.1, considère la combinaison des moyens de production et de stockage lors de son calcul d'optimisation. Elle cherche la configuration : taille de panneau solaire, capacité de batterie, puissance d'onduleur optimale pour réduire le coût de fonctionnement de l'installation. Si la configuration sélectionnée n'atteint pas les critères souhaités, une nouvelle est calculée, selon n'importe quelle technique d'algorithme génétique. Un des intérêts est que si le calcul d'une solution optimale prend trop de temps, une solution approchante peut être obtenue en arrêtant la recherche avant de stabiliser le calcul.

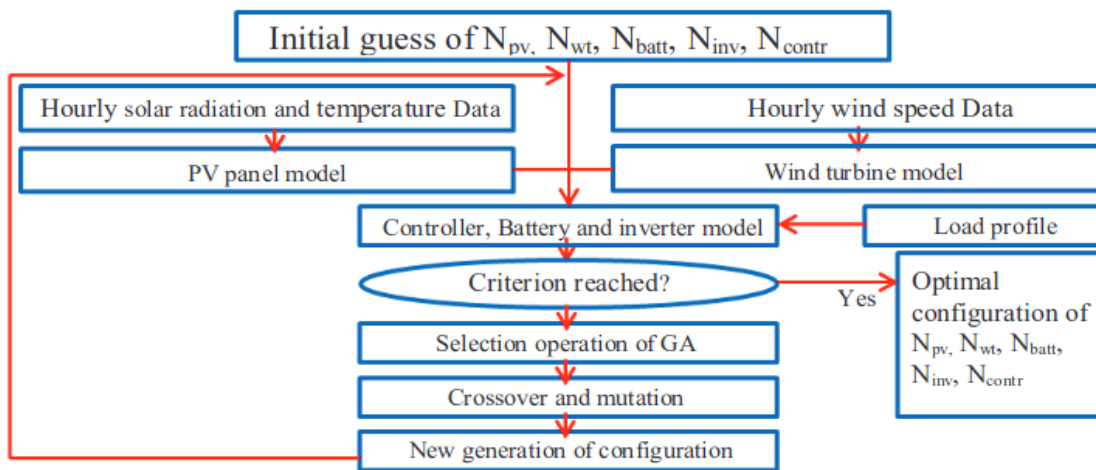


FIGURE 4.1 – Dimensionnement de moyen de production et stockage par algorithme génétique proposé par [126]

Finalement, le **dimensionnement pour l'autoconsommation** correspond à une configuration du point 2 pour laquelle la contrainte de **rentabilité** est plus forte que l'autonomie puisque le réseau grille sera toujours là pour maintenir une qualité de service et assurer le fonctionnement de toutes les activités consommatrices. Les travaux de Kaplanis *et al.* [68] intègrent notamment l'aspect stochastique de la production solaire pour fournir un calcul de dimensionnement plus fiable ainsi qu'un taux de succès indiquant si l'autonomie fixée en début de simulation est atteinte. Pour rappel, un taux d'autonomie élevé sera normalement plus écologique, mais peut engendrer des investissements et des coûts d'opération plus importants, c'est ce compromis entre écologie et économie qu'il est difficile d'équilibrer.

Toutes les approches considèrent une consommation **statique** : sur laquelle aucune action n'est possible. Pourtant, la mise de place de scénario de Demand Response va impacter le dimensionnement et son rendement. La limite actuelle de la littérature est de pouvoir dimensionner des moyens de production en considérant les aspects de Demand Response ou de stockage comme faisant part entière

du système.

____ Résumé & enjeux ____

Dimensionner du matériel revient à intégrer l'incertitude de l'environnement afin de permettre la production d'énergie la plus rentable. Cela passe par l'évaluation du coût et de l'impact du manque de production et du surplus par rapport à la consommation du site étudié. Pour laisser le choix à un Expert dans l'atteinte de cet objectif, notre approche dans cette thèse est de le laisser en mesure d'adapter ce coût en fonction de ses décisions. Ainsi, la fréquence des périodes de manque et de surplus aura un impact plus ou moins fort en fonction des situations étudiées.

SECTION 2

OPTIMISATION PAR DÉPLACEMENT

L'objectif d'optimisation de l'énergie pour réduire les pertes énergétiques et maximiser les profits économiques est souvent traité dans la littérature. Les moyens pour y parvenir sont variés et les façons de nommer les actions à mener encore plus. Ce constat est d'autant plus gênant qu'il rend la recherche d'articles et de projets similaires plus compliqués si le mauvais vocabulaire est utilisé. Cette section dresse une liste du vocabulaire qu'il est possible de trouver et tente de le définir.

Le terme le plus global est le **Demand Side Management** [99], abrégé *DSM*, il représente toute action menée pour améliorer l'efficacité énergétique d'une installation. Allant du changement de matériel pour des appareils plus récents, par exemple des ampoules LED, au déploiement d'outils de suivi de la consommation sur chaque prise électrique. Ces modifications permanentes participent à l'efficacité générale et sont généralement nommées *Energy Efficiency* par la communauté.

DemandSide Management (DSM) is a portfolio of measures to improve the energy system at the side of consumption. It ranges from improving energy efficiency by using better materials, over smart energy tariffs with incentives for certain consumption patterns, up to sophisticated real-time control of distributed energy resources. — Palensky et al. [99]

a) **Demand Side Management**

Le *DSM* constitue donc un ensemble d'actions qu'il est possible de mener sur la consommation pour un effet bénéfique global. Les actions peuvent être séparées en 4 catégories en fonction de leur effet sur le profil de la consommation. Ces actions sont illustrées en Figure -Figure 4.2 :

- (a) **Peak shaving** ou clipping [19, 124, 135] : consiste à écrêter un pic de consommation,
- (b) **Valley filling** : à l'opposé du peak shaving, cherche à augmenter les creux de consommation pour lisser le niveau global,
- (c) **Efficacité globale** : optimisation générale de la consommation, par exemple en remplaçant du matériel par du matériel plus efficace,
- (d) **Load shifting** [101, 86, 14] : déplacement des consommations à une meilleure période.

Au niveau de la grille, des actions de *strategic load growth* sont étudiées, elles consistent en une augmentation volontaire de la demande en électricité pour maintenir la stabilité ou la sécurité d'un réseau électrique. Dans cette thèse nous étudions les actions côté microgrille et donc des actions sur des activités existantes chez les industriels. De telles actions correspondent au *load shifting* décrit plus haut, en prenant en compte les contraintes liées au métier et aux personnes.

Les actions (a) et (b) visent à lisser la consommation pour faire correspondre le profil à une production ou à une grille tarifaire de l'électricité. L'action (c) de réduction due à une **efficacité globale**

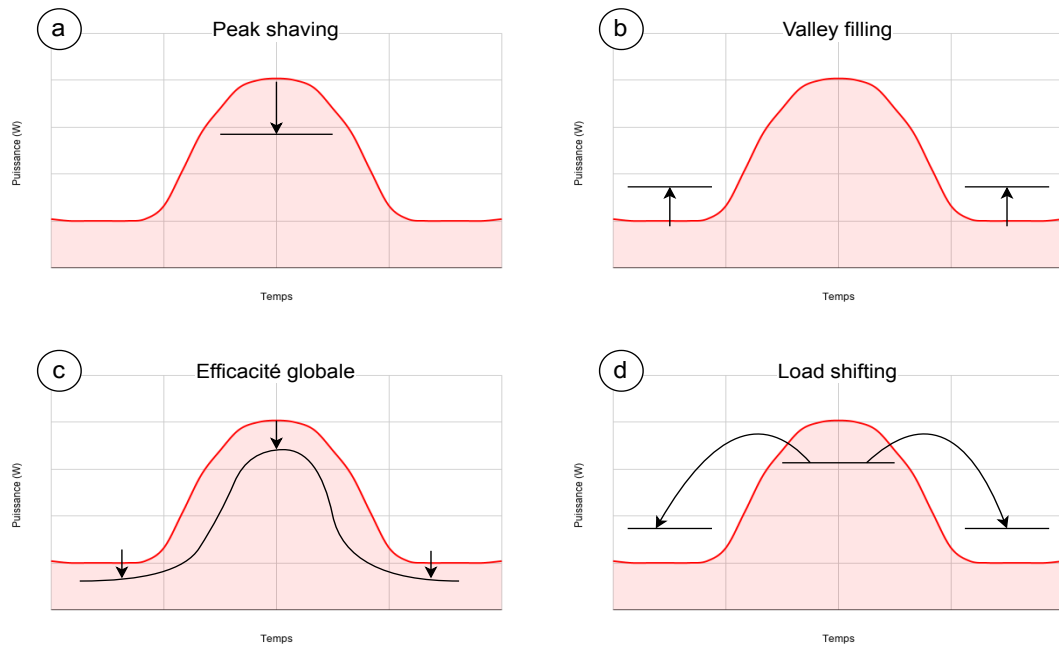


FIGURE 4.2 – Résumé des moyens d'action sur la consommation inspirée de [82]

correspond à des changements et à des optimisations matériels et non à des moyens automatisés. L'action (d) de **load shifting** se base sur une modélisation des appareils présents pour faire correspondre le profil de consommation à un profil optimal.

Une cartographie des actions englobées par le Demand Side Management est proposée en Figure -Figure 4.3.

La différence entre *demand side management* et *demand response* est assez ténue : [111] décrit la différence par la durée de leur mise en œuvre. Selon eux, le *DR* correspond à une succession d'actions à court terme, voire immédiates, tandis que le *DSM* est un effort continu dans le temps. Une pratique de DSM est le remplacement de l'éclairage ou de la ventilation par du matériel plus récent et plus rentable d'un point de vue énergétique pour améliorer l'**efficacité globale**, point (1) de la Figure -Figure 4.3.

Parce que ces termes sont très proches sémantiquement, ils ont tous été la base de la recherche bibliographique.

b) Demand Response

Le **Demand Response**, *DR*, quant à lui concerne l'ensemble des techniques cherchant à changer les habitudes ou usages d'une personne afin de modifier sa façon de consommer l'énergie. Il existe deux types de Demand Response :

- **fondé horaire** [138] : par exemple fixer un prix de l'électricité moins cher pendant une période,

la nuit par exemple, pour inciter les personnes à déplacer eux-mêmes leurs heures d'utilisation d'appareil électrique. La littérature s'accorde sur le terme de **Time of Use**. Les informations de prix sont généralement communiquées quelques minutes ou quelques heures à l'avance. Illustré par le point (2).

- **fondé appareil** [74] : consiste à prendre le contrôle direct d'une machine pour changer son fonctionnement. Il peut s'agir d'un **déplacement** à un nouvel horaire plus propice ou à un changement du mode de fonctionnement plus économe en énergie. Ces **actions** sont généralement à court terme pour répondre à un besoin ou à un manque d'énergie sur la grille ou la microgrille. Illustré en (3).

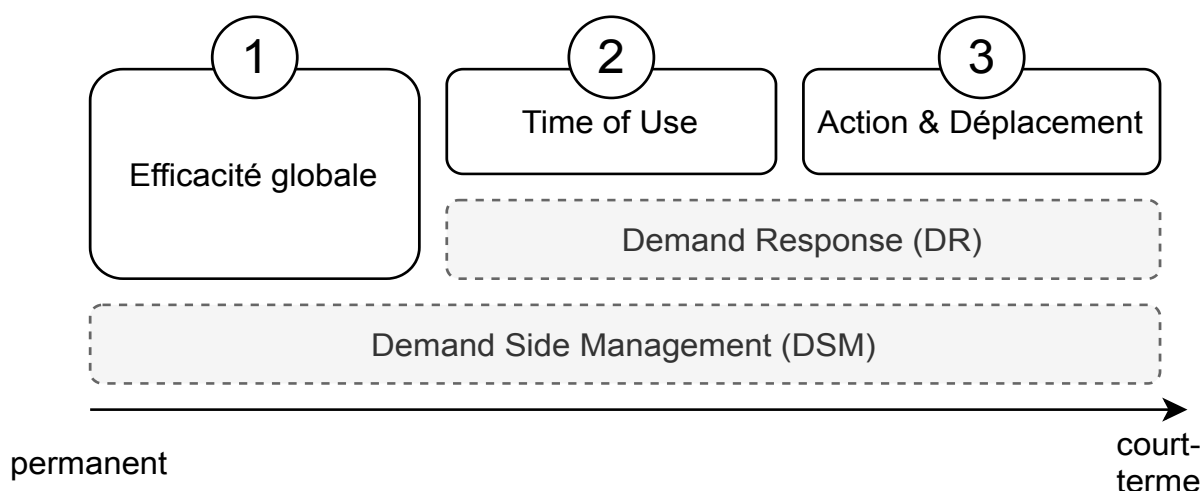


FIGURE 4.3 – Cartographie du Demand Side Management fondé sur [99, 111, 11]

Dans cette section, nous décrivons trois approches d'optimisation de l'énergie pour appliquer des modifications de **peak shaving**, **valley filling** ou **load shifting**. Nous présentons ces approches par matériel considéré :

1. par utilisation de **moyens de stockage**,
2. par **déplacements orientés machines**,
3. par **déplacements activités**.

Après avoir décrit ces moyens d'action, nous proposons la définition d'un **Energy Management System** suivante fondée en partie sur la littérature :

Un gestionnaire d'énergie (EMS), également appelé Home Energy Management System (HEMS) lorsqu'il s'applique uniquement au milieu résidentiel, est un outil chargé de suivre et piloter un site afin d'optimiser des critères de plus hauts niveaux spécifiés par l'utilisateur. Ces critères sont généralement d'ordre économique ou écologique. — [79, 21, 59, 4]

2.1 Déplacement par stockage

Un des moyens les plus simples de faire correspondre une production issue de sources d'énergie renouvelable avec une consommation en impactant le moins possible les usages est d'utiliser des moyens de stockage, tels que des batteries.

Cette section décrit :

- les différentes méthodes d'optimisation soutenues par des moyens de stockage,
- l'intégration générale des solutions de stockage à un outil d'optimisation.

2.1.1 Types d'optimisation utilisant des moyens de stockage

Les moyens de stockage peuvent être utilisés pour différents objectifs :

- **peak shaving** tel qu'illustré en Figure -Figure 4.3. C'est l'utilisation la plus simple de batteries. Cette méthode cherche à réduire les pics de consommation [43, 124, 83] qui peuvent être facturés plus cher que le reste de la consommation ou tout simplement réduire la consommation en valorisant plus de consommation locale en chargeant les batteries à partir de surplus de production,
- **optimisation économique** par arbitrage [62, 134] qui consiste à utiliser les variations de prix de la grille pour acheter, et charger, à un moment précis puis vendre, et décharger, lorsque le prix augmente. Ces optimisations nécessitent donc un prix de l'électricité variable et font donc partie des méthodes **fondées horaires** et notamment **Time of Use**.
- **optimisation des cycles** pour maximiser la durée de vie d'une batterie [61, 110], en priorité par rapport à la réduction des pics de consommation.

Le stockage de l'énergie est un moyen simple de réguler un système électrique. L'énergie est stockée pendant les périodes de trop forte production, et déchargée lorsque la consommation dépasse la production ou alors, afin d'éviter des pics de consommation trop importante. Dans la vie quotidienne, le stockage de l'énergie électrique se fait principalement sous la forme de batterie.

Des applications critiques, telles que les véhicules électriques, *EV*, ont fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années. Pour des raisons de simplification, le terme de véhicule électrique ou EV sera utilisé pour désigner la batterie du véhicule. Les véhicules électriques sont des sujets d'étude doubles :

1. leur état de charge va impacter l'utilisateur et ses prochains déplacements, la vitesse de charge, et donc sa durée, va donc être un critère important,
2. branchés à une borne ils peuvent être utilisés pour réguler la grille, ou la microgrille, à laquelle ils sont connectés.

Une architecture de communication à l'échelle nationale a été proposée [58, 57] pour la mise en œuvre d'un moyen d'équilibre du réseau par la réduction des pics de consommation. SEAS (Smart Energy Aware Systems) a pour but de permettre des interactions entre les différents acteurs du marché

énergétique. Un opérateur anticipant un pic de consommation peut notifier les consommateurs d'une quantité d'énergie à effacer pour les heures à venir. Les consommateurs ayant réellement réduit leur consommation sont récompensés par le réseau.

Un cas appliqué à la charge de véhicules électriques [81] a été déployé pour valider cette architecture. Il implémente un service de calcul de plan de charge, totalement intégré et interopérable avec le réseau SEAS.

La limite de cette approche tient dans sa vision nationale, elle intègre les problématiques d'équilibre de la grille en donnant la possibilité aux consommateurs d'améliorer la stabilité de l'ensemble sans les guider. Les moyens d'interconnexions, telles que l'ontologie proposée, sont prometteurs pour interconnecter des solutions locales à chaque microgrille.

2.1.2 Intégration et représentation du stockage

Une batterie est un appareil capable de se comporter comme un consommateur pendant la charge et comme un moyen de production pendant la décharge.

L'approche la plus simple et utilisée dans la majorité des travaux de régulation énergétique est de considérer une batterie comme étant un stock. Ce stock représente l'état de charge de la batterie, noté **SoC** pour *state of charge*. Une batterie particulière va donc avoir un seuil SoC_{max} correspondant à sa capacité maximale pour son état chargé et à chaque instant son état va être SoC_{t_0} . La représentation de l'état de charge minimal SoC_{min} va correspondre à l'état de charge à ne pas dépasser et pourra être différente de 0% de la capacité. En particulier, les batteries chimiques peuvent être fortement dégradées en cas de décharges trop profondes. La valeur de SoC_{min} va donc correspondre à la valeur de profondeur de décharge notée **DoD** pour *depth of discharge*. Pour une batterie au plomb, cette sera aux alentours de 70% tandis que pour une batterie lithium elle se situera plutôt aux alentours de 15%. En termes pratiques : cela signifie que pour une même capacité la quantité d'énergie utilisable en une seule décharge est différente.

a) Exemple de cycle

Les modélisations présentées peuvent ainsi être utilisées dans différents contextes tels que : intégrées à des moyens de production pour optimiser le stockage et la revente de l'énergie issue d'un parc éolien [127].

La modélisation des moyens de stockage peut se résumer à quelques aspects présentés en Figure -Figure 4.4 :

- la prise en compte d'un état de charge et d'un niveau de capacité : $SoC_{début}$ et SoC_{fin} ,
- des rendements $\frac{Q_A}{Q_{chargée}}$ pour la charge et $\frac{Q_B}{Q_{récupérée}}$ pour la décharge et pertes en charge et en décharge,
- de l'usure à l'utilisation et des pertes d'autodécharge $Q_{auto-décharge}$.

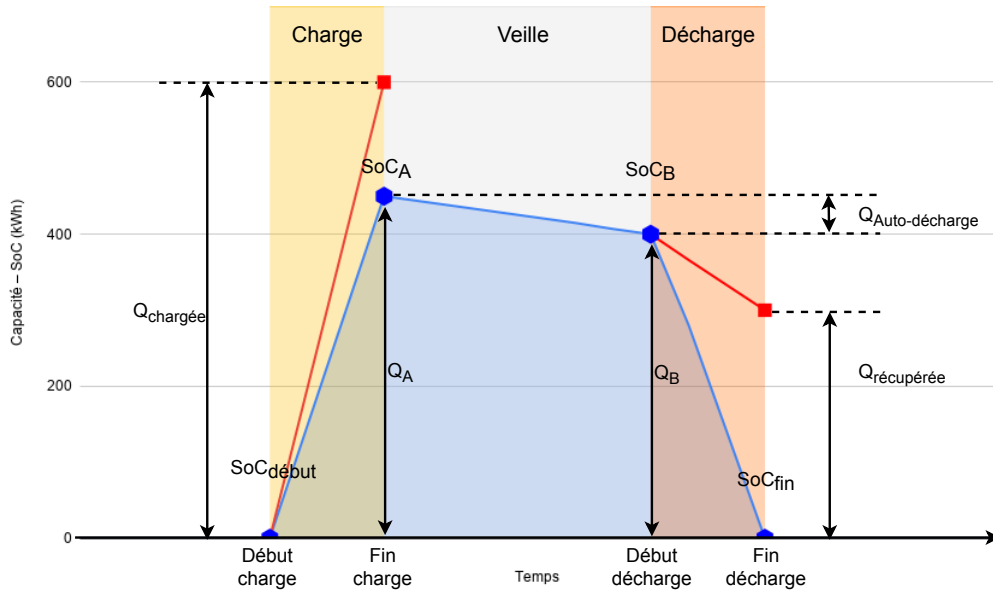


FIGURE 4.4 – Cycle de charge d'une batterie d'un état $SoC_{début}$ à un état SoC_{fin} fondé sur [3]. La ligne bleue représente l'état de charge de la batterie en prenant en compte les pertes de charge et décharge.

Quantité d'énergie maximale utilisable en une seule décharge :

$$SoC_{max} - SoC_{min} \leq SoC_{max}$$

La charge et décharge peuvent donc se résumer à des additions et soustractions tout en prenant en compte un facteur d'efficacité propre à la technologie de batterie et à sa qualité de fabrication.

b) Charge et décharge

Lors de la charge et la décharge la quantité d'énergie effectivement chargée dans la batterie dépend de l'efficacité du mécanisme de stockage, noté φ . Pour des raisons de simplification et parce que les modélisations s'intéressent principalement aux batteries dans un contexte de régulation et non comme un système réellement étudié pour son système, le même rapport d'efficacité est appliqué à la charge et à la décharge. Pour une quantité $Q_{chargée}$, en kWh, chargée depuis une source externe : grille ou moyen de production renouvelable, seule une quantité Q_A sera réellement stockée dans la batterie. La différence correspondant aux pertes en charge calculées par la moitié de l'efficacité de stockage. Le même phénomène est modélisé pour la décharge, pour récupérer une quantité $Q_{récupérée}$ de la batterie son état de charge doit être réduit d'une quantité $Q_B - Q_{récupérée}$ pour représenter ces pertes en décharges.

Évolution de l'état d'une batterie pendant une charge :

$$\text{SoC}_{t'} = \text{SoC}_t + Q_{\text{chargée}} \times \frac{\varphi}{2}$$

Rapport de l'énergie pendant un cycle complet :

$$Q_{\text{récupérée}} = Q_{\text{chargée}} \times \varphi$$

Le choix d'un profil de charge et de décharge permet notamment d'optimiser l'état de charge dans le temps [73]. C'est un paramètre critique que l'expert va obtenir auprès du constructeur de la batterie et chercher à intégrer.

c) Puissance d'utilisation

La quantité maximale qu'il est possible de charger ou décharger dans un intervalle de temps est physiquement déterminée par l'onduleur et le *BMS*¹, le Battery Management System. Un onduleur de 2kW permettra de charger ou décharger à une puissance de 2kW au maximum, soit 2kWh en une heure en excluant les pertes. Connecté à une batterie de 8kWh il faudra donc au minimum 4 heures pour la charger complètement et la même durée pour la décharger (en considérant son niveau $\text{SoC}_{\min}$ comme pouvant être 0%. Cette quantité d'énergie impacte donc la vitesse à laquelle il est possible de charger et décharger une batterie et est appelée *C-rating* dans la littérature. Une charge à 1C signifie qu'il est possible de charger intégralement la batterie en 1 heure, 2C en 30 minutes, 0.5C en 2 heures. Pour notre exemple, la valeur est 0.25C puisqu'il faut en théorie 4 heures pour effectuer une charge pleine.

Pour pouvoir effectuer des charges 1C il faut donc que le matériel autorise une puissance égale à la valeur de la capacité de la batterie, pour 8kWh il faut un onduleur ou un BMS autorisant 8kW de puissance en charger et en décharge.

À ce niveau de la modélisation, il est possible de manipuler une batterie relativement proche de la réalité et c'est ce que font la plupart des méthodes de régulation intégrant des moyens de stockage. Il faut cependant garder à l'esprit que si pour des courtes périodes le résultat peut-être satisfaisant pour de plus longues simulations, plusieurs mois ou années par exemple, d'autres phénomènes sont à considérer, en particulier l'usure.

d) Usure du stockage

En plus des comportements déjà présentés, d'autres phénomènes sont à prendre en compte pour obtenir une modélisation fidèle sur le long terme. L'utilisation régulière d'une batterie chimique, par exemple, use progressivement la qualité des charges et décharges ainsi que la capacité maximale qu'elle est capable de stocker. Il est facile d'expérimenter cela dans la vie de tous les jours, après quelques années, un téléphone durera de moins en moins longtemps en autonomie, avec les mêmes applications installées. La Table -table 2.4, au chapitre précédent, présentes différentes durées de vie

1. Voir section -section 2.2.5 pour plus de détail sur les composants des batteries qui rentrent en jeu pour la régulation

pour des batteries, seulement une batterie lithium ne meurt pas soudainement après 1200 cycles. C'est en partie ce phénomène qui est décrit dans cette section.

Tout d'abord, deux types d'usures sont à distinguer :

1. l'usure à l'usage, impactée par les cycles de charges et décharges,
2. la perte de charge dans le temps même si la batterie n'est pas utilisée.

Ce second point peut correspondre à un courant de fuite déchargeant progressivement la batterie ou à une réaction chimique ayant lieu même si la batterie est déconnectée de tout réseau électrique et se nomme **autodécharge**. Dans tous les cas, dans des conditions données l'état de charge de la batterie va diminuer d'un certain pourcentage tous les mois. Là où des modélisations dédiées aux batteries [71, 115] intègrent les caractéristiques internes comme la tension aux bornes de la batterie et externes telle que la température de l'air. Ces aspects physiques du courant électrique sont des préoccupations trop précises pour des approches globales et peuvent être ignorés si elles sont intégrées aux coefficients d'efficacité utilisés. En réalité, la puissance, le *C-rating* de chaque cycle va impacter différemment la durée de vie de la batterie, mais la prise en compte de cette puissance demande une connaissance très poussée des mécanismes internes à la batterie et n'est pas envisageable dans le cadre d'une modélisation globale où la batterie n'est pas le centre de l'attention. L'on préférera utiliser une approximation pour la durée de vie de la batterie plutôt que chercher la précision à chaque cycle.

Quant à l'usure due à l'utilisation, il est également commun d'utiliser un modèle linéaire issu de données expérimentales. Ainsi, à chaque utilisation de la batterie, le nombre de cycles effectué est compté pour en déduire l'impact sur la *nouvelle* capacité. La capacité de stockage utilisable va donc diminuer progressivement jusqu'à finalement rendre la batterie inutilisable. L'optimisation de ces cycles peut être un objectif global en tant que tel [61] étant donné le coût d'investissement que peut représenter un système de batteries.

Cette section clôt la présentation des aspects importants des batteries pour permettre leur intégration à un système de régulation. La section suivante présente la modélisation des appareils électriques, et comment il est possible de représenter leur usage et leur consommation.

2.2 Déplacement orienté machines

La consommation est la partie la plus importante de la régulation puisqu'elle est directement responsable des coûts énergétiques [143]. Bien qu'il puisse sembler facile de la caractériser, les aspects humains et environnementaux peuvent rendre une même activité très différente d'un point de vue énergétique en fonction de ses conditions de réalisation. Par exemple, la chaleur extérieure va impacter la durée d'utilisation d'une climatisation et le retard d'un employé sur son lieu de travail peut décaler toute une succession de tâches réalisées sur une machine-outil industrielle.

L'objectif est d'être en mesure de séparer les appareils consommateurs en plusieurs catégories [28, 23, 51, 72] en fonction de leur impact sur la consommation globale d'un site. Ces catégories se décomposent comme suit :

- **Charge de base**, ou *baseline load* : C'est le courant pris en compte lors des calculs de charge, mais sur lequel aucune action n'est possible parce que les appareils associés sont jugés trop importants. Il peut s'agir : d'éclairage, d'appareils de réseaux informatiques. Ils ne sont pas contrôlables directement, mais doivent être en mesure de communiquer leur consommation en temps réel puisqu'ils participent à la consommation globale.
- **Charge périodique** ou *burst load* : Cela concerne les appareils qui ont une durée d'utilisation fixe pour atteindre un objectif métier donné, nécessaire à l'utilisateur final. Par exemple : un sèche-linge, une machine industrielle de production ou un chargeur de véhicule électrique. Ils sont responsables de la création de pics de consommation : *peak load*.
- **Charge classique** ou *regular load* : ils s'agit de cas particuliers des *burst loads*, ces charges sont toujours actives ou actives pour une période de temps plus grande. Seulement dans ce cas les appareils associés peuvent être interrompus puis redémarrés plus tard, avec ou sans pénalité.

À partir de cette distinction, deux caractéristiques principales de charge se dégagent : la **répétition** et si l'action **déplaçable** ou non.

2.2.1 Décomposition d'une machine en états

Dans leurs travaux, Dietmair *et al.* [37, 36, 38] montrent que près de 20% de la consommation d'une machine est perdue en temps d'attente, parce que la machine est utilisée à un mauvais moment qu'importe la raison : attente d'une action humaine ou de pièces issues d'une autre machine. La Figure 4.5 montre ces 20% de pertes d'attente ainsi que d'autres pertes dues au rendement et à l'efficacité des différents constituants de la machine, ces valeurs sont intéressantes, car elles peuvent permettre de déceler un rendement trop faible à une certaine étape du fonctionnement de cette machine.

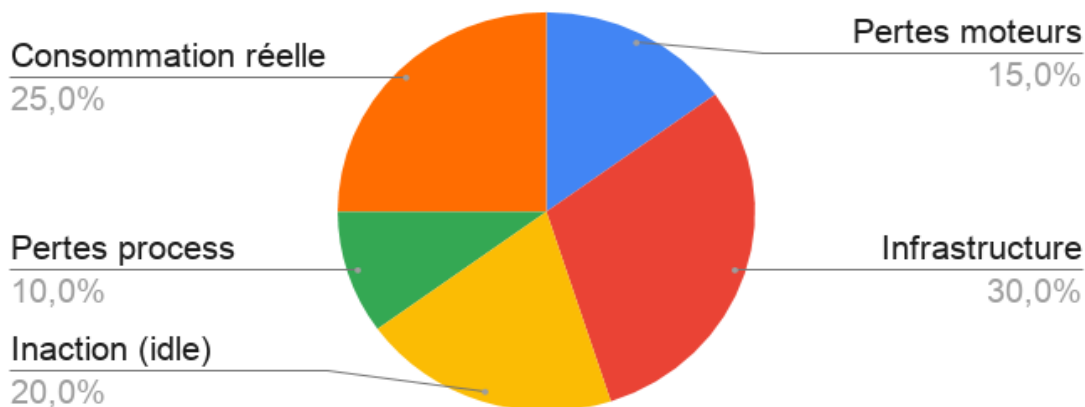


FIGURE 4.5 – Répartition de la consommation d'une machine-outil industrielle

Cette perte de 20% due à une attente et montre qu'il est possible de gagner en efficacité en plaçant cette machine au cœur de son environnement. En particulier ce gain en efficacité justifie l'attrait de la décomposition des états d'un appareil en plusieurs sous-états. Cette étape nécessite une connais-

sance de la machine considérée, mais est nécessaire puisqu'elle va permettre de construire les blocs de base de sa consommation. Un exemple pour une perceuse industrielle par Dietmair *et al* est présenté en Figure -Figure 4.6.

Chaque état du digramme d'état transition est un mode de fonctionnement associé à un niveau de consommation, voir Figure -Figure 4.6b. En sachant quels états sont des états *transitoires* consommant de l'énergie sans rien apporter au process machine, il est ensuite possible d'optimiser cette représentation comme un process semi-Markovien [38].

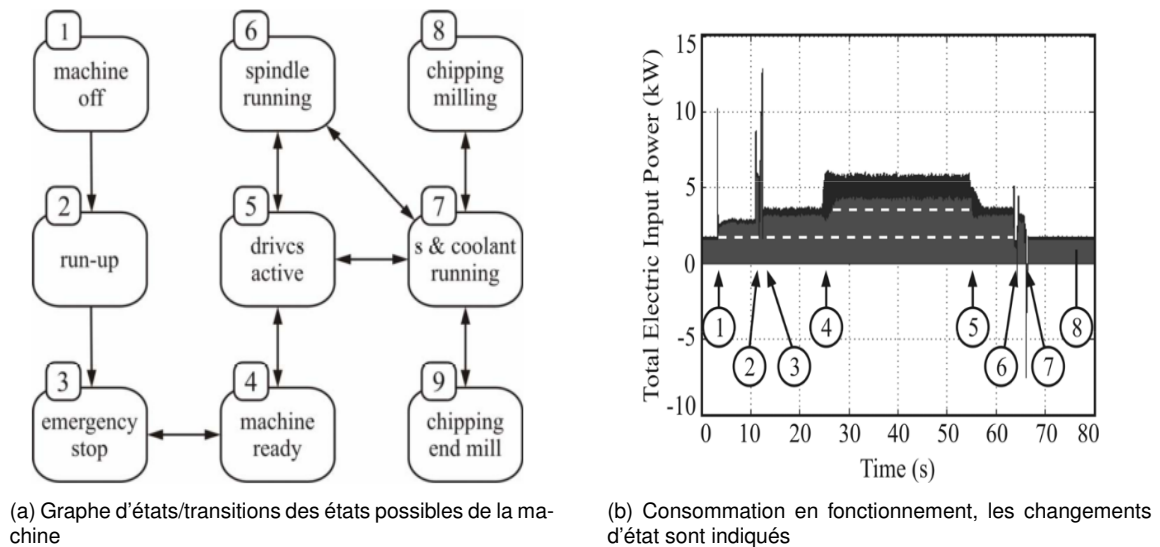


FIGURE 4.6 – Modélisation d'une fraiseuse sous la forme d'une machine à états par [37]

2.2.2 Modélisation d'un système physique dynamique

Pour prendre en compte l'imprécision des mesures de consommation et les aspects physiques non modélisés par l'approche précédente, [42] proposent une représentation en *système physique temps réel*, **RTPS**.

Un RTPS est une modélisation d'un appareil décomposé en états de fonctionnement. Chaque état est associé à sa consommation électrique, additionnée d'un bruit blanc Gaussien servant à représenter les aléas du système physique réel. La valeur des coefficients du bruit blanc est laissée au choix de la personne en charge de la modélisation.

La modélisation d'un RTPS comporte quatre composantes :

1. **les aspects dynamiques du système** : la consommation dans chaque état et l'ajout du bruit,
2. **les contraintes utilisateurs** : les périodes autorisées, les durées, les transitions entre états autorisées,

3. **les paramètres temps réel** : la durée d'une tâche, le temps minimum entre deux tâches identiques,
4. **un algorithme de placement** : il doit être capable d'optimiser les heures de début de tâches en respectant les contraintes.

Une application à l'optimisation des cycles de création de froid d'un réfrigérateur a été réalisée par [135]. Leur cas appliqué ajoute un capteur de température pour contrôler au mieux le thermostat. La valeur de température est utilisée comme indicateur du besoin de fonctionnement et permet de vérifier si la qualité de service est bien atteinte.

Le contrôle d'un système physique peut se faire de deux manières, dépendant de l'intégration des capteurs :

- **boucle ouverte** : la régulation se fait uniquement à partir de la modélisation,
- **boucle fermée** : la régulation prend en compte les retours du système pour adapter les changements réels sur la modélisation.

Le contrôle en **boucle fermée** fournit de meilleurs résultats à courts et moyens termes. À chaque action, les imprécisions du modèle vont être corrigées par le retour des capteurs fournissant la réalité des valeurs de consommation. Sur le long terme, cela permet d'éviter que le modèle dérive de la partie physique et calcule des optimisations en se basant sur un état que le système réel n'a pas.

L'utilisation de machines à états pour représenter l'intégralité du système montre ses limites pour l'intégration de dépendances entre des machines.

2.2.3 Utilisation de réseaux de Pétri

La représentation en diagramme d'état transition permet d'identifier les modes de fonctionnement d'une machine les plus consommateurs, et le cas échéant, réduire les temps de veille trop longs. Pour optimiser à l'échelle d'un atelier ou d'une entreprise, les représentations doivent être synchronisées. Dans la représentation d'un diagramme de transition/états, cela implique de construire un diagramme représentant toutes les combinaisons d'états possibles. Cette combinatoire provoque une explosion du nombre d'états et est difficilement supportable en pratique.

Dans le formalisme des réseaux de Pétri, l'état actif d'un système est celui avec un jeton noir. Les gardes, barres noires, forcent le système à avoir des jetons dans les états précédents. Avec cette représentation, il est donc possible de représenter plusieurs systèmes tels que décrits précédemment en même temps et sans changement majeur. Une représentation de plusieurs machines interdépendantes est présentée en Figure -Figure 4.7 [36, 38].

Le réseau de Pétri permet d'optimiser les changements d'état de plusieurs machines pour réduire les temps de pause par exemple. En revanche il permet uniquement d'exprimer deux actions possibles : rester dans un état ou changer d'état et capture une consommation constante ou un motif constant de consommation pour chaque état. Les sections suivantes présentent d'autres approches cherchant à intégrer ces limites.

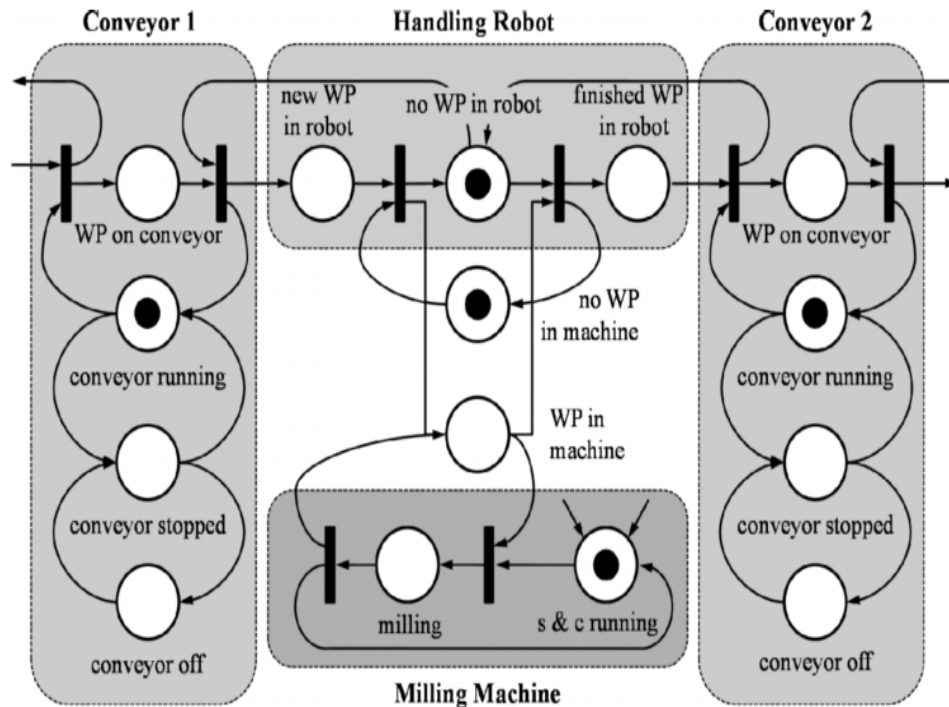


FIGURE 4.7 – Réseau de Pétri modélisant une fraiseuse, deux convoyeurs et un robot [36]

2.2.4 Annotations des machines

Le milieu résidentiel a la caractéristique d'être très difficile à prévoir et donc à optimiser. Cela est du principalement à cause de la grande diversité des appareils présents dans les foyers et des habitudes très variables des personnes, tel que détaillé dans la section -section 1.1 du chapitre 2.

Bourgeois [14] explore le déplacement d'appareils ménagers en milieu résidentiel en se concentrant principalement sur le cas pratique des machines à laver le linge au Royaume-Uni. Dans leurs travaux, ils se focalisent principalement sur l'interaction avec l'utilisateur, comment lui présenter le bénéfice et les modalités d'un déplacement pour l'inciter à l'effectuer parce que, à la fin, c'est à l'utilisateur d'accepter ce changement. Ses travaux ont été validés sur 18 foyers participants.

Dans leur méthodologie de construction des contraintes auprès des différents foyers d'étude plusieurs caractéristiques sont utilisées pour annoter les appareils présents dans les foyers :

- **relatives au contrôle** : aucun contrôle, contrôle automatique ou contrôle avec collaboration de l'utilisateur,
- **relatives au déplacement** : Déplaçable, non déplaçable, ne sait pas.

La première catégorie permet d'identifier si, et comment, un appareil pourra être piloté : de manière automatique ou si une confirmation est nécessaire de la part de l'utilisateur final. La seconde catégorie permet de qualifier quelles actions sont possibles. Les actions de réduction de la consomma-

tion, par exemple la réduction de l'intensité de l'éclairage, du sèche-linge ou de la bouilloire ne sont pas envisagées dans leur approche.

En revanche, les déplacements ne peuvent être appliqués ou proposés que pour des périodes précisées par l'utilisateur final. Les contraintes horaires sont collectées durant des entretiens individuels pour ne proposer que des déplacements que l'utilisateur peut vouloir accepter.

Toujours dans le milieu résidentiel, [125] propose un moyen de communication pour une population partageant des moyens de production d'énergie. Dans leur cas d'étude, plusieurs foyers vivant sur une île dépendent fortement de la production de leur éolienne, leur application nommée *Tiree* permet de visualiser la production courante et à venir de l'éolienne afin d'adapter eux-mêmes leurs activités et donc leur consommation électrique. Ces deux travaux se heurtent à la principale problématique du milieu résidentiel : il n'existe pas de foyer type, chaque foyer a une consommation propre, différente d'un jour à l'autre et impossible à prédire, c'est pourquoi nos travaux s'intéressent plus particulièrement au milieu industriel.

2.2.5 Calcul de l'optimisation de placement

Les représentations énergétiques des machines telles que présentées dans les sections précédentes permettent d'avoir une modélisation très proche de celles utilisées pour l'allocation des tâches dans les systèmes informatiques temps réel [32]. L'utilisation d'un appareil est une tâche, avec une durée, une *deadline* et un besoin de ressource. Une représentation d'un ensemble de tâches $\{a, \dots, l\}$ est présentée en Figure -Figure 4.8. La hauteur d'une tâche indique sa consommation, sa longueur sa durée et sa couleur les contraintes de placement qui lui sont associées : précédences entre tâches, durée maximale de déplacement. Les algorithmes de placement des systèmes temps réel peuvent donc y être appliqués.

Traditionnellement, ces méthodes [32, 103] ont été appliquées pour réaliser du **peak shaving** en considérant un algorithme de placement qui cherche à minimiser l'utilisation de ressource, ici de l'électricité. Dans les smartgrids l'énergie est plus volatile puisque provenant de sources d'énergie renouvelables. Ces algorithmes doivent donc être adaptés [119] pour ne plus optimiser l'utilisation d'énergie et donc **lisser** la consommation, mais plutôt considérer une ressource variable dans le temps, la production, et y **faire correspondre** la consommation.

2.3 Déplacement d'activités

Les modélisations se concentrant uniquement sur la représentation des machines sont majoritaires dans la communauté des systèmes électriques. Cependant elles ne sont pas en mesure de capturer des notions de saisonnalité ou de contexte d'utilisation différents sans démultiplier les représentations de cette même machine. Dans l'optique de fournir une méthodologie à une personne non experte, il nous paraît plus accessible de partir de ses contraintes et de sa vision de son activité puis de les lier aux appareils.

Les revues des méthodologies réalisées par [1, 130] de représentation des activités utilisées dans

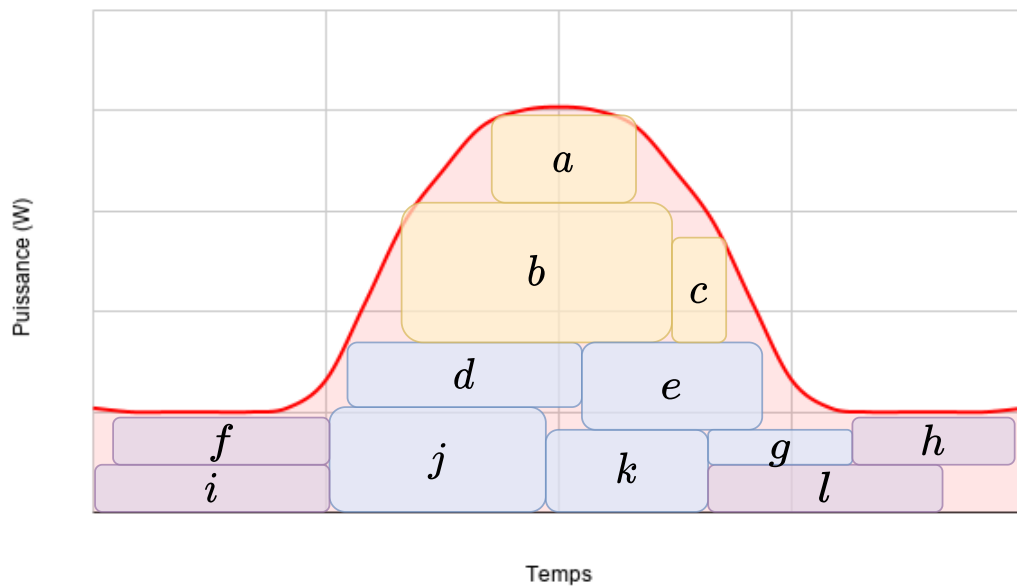


FIGURE 4.8 – Représentation des consommations facilitant le **load shifting**, les couleurs représentent des contraintes de placement similaires.

les milieux agricoles et industriels insistent sur ces points. D'un point de vue organisationnel, une vue des activités est toujours présentée à l'utilisateur final et sert de représentation centrale pour y intégrer les contraintes liées aux saisonnalités et aux enchainements d'activités.

En particulier pour représenter un site agricole sur de longues périodes, la prise en compte des machines seules ne suffit pas tant les organisations sont différentes entre l'été et l'hiver par exemple. L'impact des saisons sur la consommation de base est illustré en Figure -Figure 4.9. Dans le milieu de l'élevage cette contrainte arrive bien plus vite tant les cycles de croissance de certains animaux peuvent être courts. Une période d'élevage va voir la consommation électrique croître régulièrement avec la croissance des animaux puis devenir nulle pour la période de vide sanitaire qui suit. Le vide sanitaire est le moment où les bâtiments sont vidés et nettoyés par mesure d'hygiène. La durée de chaque période va varier d'un animal à l'autre et d'un éleveur à l'autre tandis que les machines liées aux activités vont elles rester similaires pour un secteur donné.

L'impact du contexte environnemental représente un nouveau niveau de contraintes à intégrer à la représentation. L'ensemble de ces contraintes se décompose comme suit, du plus bas niveau au plus haut niveau :

1. contraintes de **niveau machine** : pour la prise en compte des caractéristiques des appareils, leur fonctionnement, leur sécurité,
2. contraintes de **niveau activité** : pour intégrer l'utilisation des machines dans un enchainement plus complexe. Pour prendre en compte les contraintes des utilisateurs [137] et du domaine

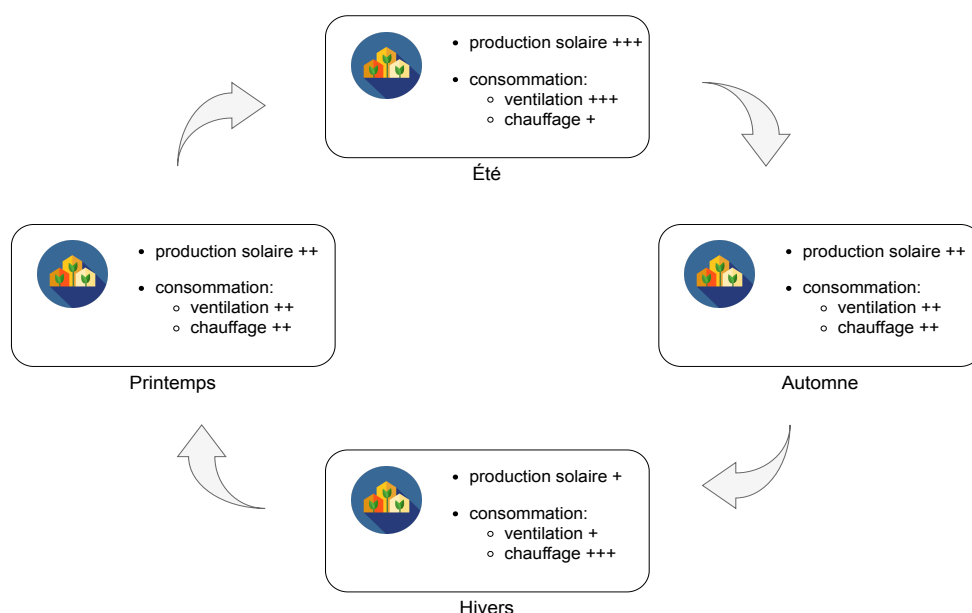


FIGURE 4.9 – Illustration de la saisonnalité pour une exploitation agricole et des quantités relatives d'énergie, inspiré de [1]

métier.

3. contraintes **entre activités** : pour considérer un site dans son ensemble et sur de longues périodes, et également pour prendre en compte des événements exceptionnels.

La vision orientée activités est primordiale pour considérer tous les aspects d'un site et être au plus proche du fonctionnement réel des machines physiques. Cependant, ces méthodes sont utilisées dans les milieux organisationnels et logistiques, mais absentes des approches énergétiques. Nous pensons qu'utiliser ces représentations est un point important d'une vision globale capable de prendre en compte toutes les parties prenantes : experts du secteur d'activité et utilisateurs finaux.

Résumé & enjeux

Le déplacement d'activités est le moyen le plus efficace d'améliorer l'utilisation d'une source renouvelable et donc de faire des économies. Pour être efficaces, ces déplacements doivent être faits pour un certain contexte énergétique et non de manière globale et répétée. Pour proposer ces déplacements optimisant, notre approche doit prendre en compte non seulement les machines capables de consommer ou stocker de l'énergie, mais également les activités réalisées au sein du site étudié.

SECTION 3**PRÉDICTION ET SIMULATION**

La troisième préoccupation de la modélisation d'un système énergétique est de pouvoir s'en servir comme moyen de prédiction et de simulation. Prévoir l'évolution :

- de l'environnement et son impact sur la **production** pour les énergies renouvelables,
- des usages en termes de **consommation**.

La prédiction de données permet de considérer différentes évolutions possibles du système, de les comparer et d'influer sur des décisions pour choisir l'évolution la plus favorable, d'un point de vue économique, écologique ou toute autre préoccupation de l'utilisateur final.

Le besoin **prédiction** est commun à de nombreux domaines, industriels ou non. Deux grandes familles d'approches existent, et sont utilisées en fonction du besoin de précision et du temps d'étude disponible :

1. la prédiction par modélisation d'un système physique ou mathématique, permettant une précision dans la représentation du comportement mais pouvant être très complexe à intégrer,
2. la prédiction par apprentissage sur des données de fonctionnement. Cette approche nécessite une phase de collecte de données et également de savoir quels paramètres de l'environnement sont importants et impactent le système à représenter.

Ces deux approches sont utilisées dans le domaine de l'énergie, la première particulièrement dans l'analyse précise de matériel et la seconde lors de la prise en compte d'un système global.

La **simulation** se décompose également en deux grandes familles d'approches, qui ne sont pas spécifiques au domaine de l'énergie :

1. la simulation en temps continu, nécessitant une modélisation continue des composants à simuler,
2. la simulation en temps discret, qui va approcher le réel par un découpage des événements en intervalles.

Cette seconde approche est privilégiée dans la majorité des simulateurs, la difficulté venant du calcul du pas de temps idéal permettant une approximation suffisamment fidèle des paramètres d'entrée. Elle permet d'intégrer plus facilement des sources d'événements déjà discrétisés, et est donc plus facilement utilisable à des cas d'application réels.

3.1 Prédiction de production

Les modélisations mathématiques présentées précédemment permettent de calculer une puissance de production à partir de paramètres. Leur objectif est de retrouver une approximation de données

qu'il aurait fallu mesurer sur le terrain dans des conditions similaires. Étant donné le nombre de paramètres différents et leur explosion combinatoire, il est impossible d'observer toutes les situations possibles. Les approches PPF [122], Past-Prediction-Future, utilisent des valeurs passées pour prédire un futur proche. PPF a pour principales limites les changements trop brutaux de tendance générale et l'horizon très proche de vision. Ces approches ont tendance à être remplacées par des méthodes de régression fondées sur le calcul de coefficients tentant de lier les paramètres environnementaux entre eux [8, 85]. Par exemple, Sharma *et al.* [123] proposent une méthode à base de *Support Vector Machine*, SVM, pour lier : humidité, couverture nuageuse, moment de l'année, température à la production d'une cellule photovoltaïque.

```
SolarIntensity = 1.18*Day + 77.9*Temp + 33.11*DewPoint + 22.8*WindSpeed
               - 96.9*SkyCover - 49.15*Precipitation - 43.4*Humidity
```

Listing 4.1 – Exemple de formule obtenue par régression pour lier les valeurs environnementales à une irradiance nécessaire au calcul de production d'énergie.

De manière générale, la prédiction de production, qu'importe le moyen de production, peut être vue comme un *service* ayant une première phase d'apprentissage permettant d'obtenir une méthode de calcul pour une valeur brute de production. Cette valeur brute va dépendre des conditions externes et doit être multipliée par un coefficient propre à un générateur d'énergie donné et faisant intervenir au moins sa taille et son efficacité. Une illustration d'un service de prédiction est donnée en Figure -Figure 4.10 afin d'illustrer l'échange d'information avec le système à optimiser.

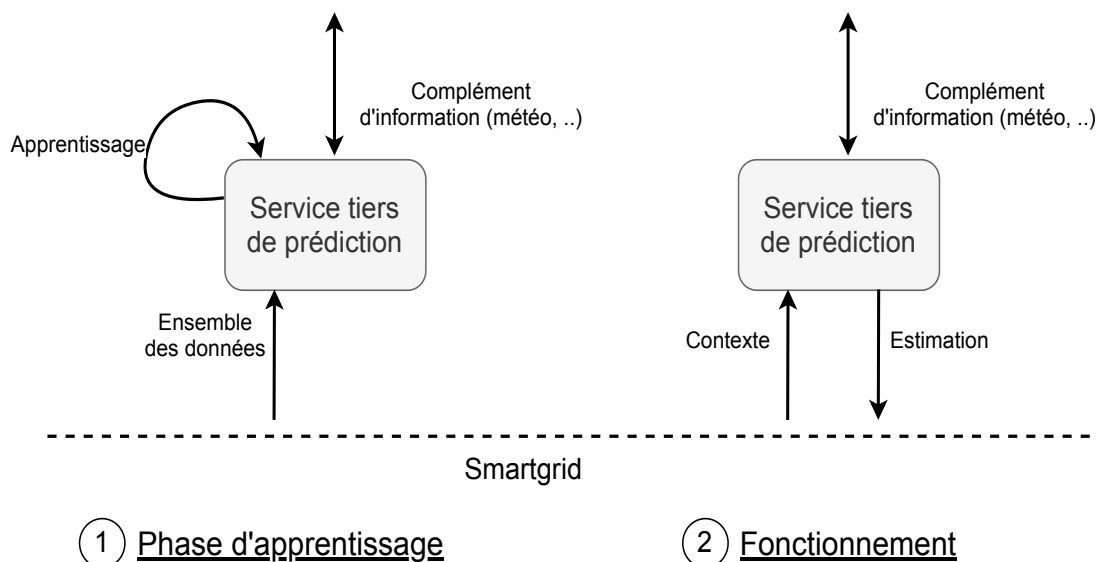


FIGURE 4.10 – Illustration d'utilisation d'un service d'apprentissage du point de vue d'un outil de gestion de l'énergie

Dans cette section, l'importance de la modélisation des moyens de production a été détaillée ainsi que différentes approches. Il en ressort que des méthodes linéaires permettent, par apprentissage, de calculer des valeurs approchées de production à partir de paramètres environnementaux. Ces

méthodes peuvent se substituer à des représentations plus physiques des choses si les enjeux électriques peuvent être négligés. De plus, ces méthodes ont l'avantage de demander moins de paramètres pour les représenter et sont donc plus facilement intégrables à une architecture d'optimisation globale.

3.2 Prédiction de consommation

Les méthodes de prévision de consommation des systèmes peuvent être séparées en deux catégories selon leur modèle :

- **construction d'un modèle par un expert** : la première possibilité est l'utilisation d'une représentation, mathématique, réalisée au préalable, telle que décrite dans les sections -section 2.2.1 et suivantes, et lui associer des données de consommation d'énergie,
- **utilisation d'apprentissage machine** : les méthodes d'apprentissage similaires à celles présentées dans la section précédente pour la production, mais cette fois spécialisées la prévision de consommation d'énergie.

La difficulté de construire des modèles dans des secteurs non prévisibles, tels que le résidentiel, a nécessité le développement de méthodes capables d'extraire elles-mêmes ces modèles. Ces méthodes [114, 87, 88] fonctionnent à l'opposée de celles présentées et reposent sur le principe de **l'apprentissage non supervisé**. En observant suffisamment de fois un phénomène, ces méthodes sont en mesure de déduire les contraintes et les habitudes d'usage et donc d'en réaliser la prédiction.

Deux limites se dégagent de l'apprentissage non supervisé :

- un phénomène doit être observé de multiples fois avant d'être reconnu et appris, ce qui impose une phase d'apprentissage de plusieurs jours à semaines avant d'avoir un système opérationnel.
- un phénomène jamais observé ne sera jamais prédit, ce qui peut provoquer de graves approximations sur de longues échelles de temps.

La durée initiale peut être réduite dans le cadre d'une collaboration avec l'utilisateur final qui peut effectuer toutes ses tâches habituelles et ainsi faciliter leur identification. Cela revient donc à une supervision de l'apprentissage.

3.3 Simulation et temps réel

Une des volontés de la construction d'un modèle représentant tous les aspects énergétiques d'une installation physique est qu'elle serve de support à de la **simulation**. Cette dernière bénéficie le système réel fonctionnant, et doit donc vivre aussi longtemps qu'existe le système réel.

Les intérêts d'un système persistant se résument à :

- réduire la limite entre monde physique et système simulé pour intégrer plus rapidement les retours du terrain en cas de dérive des modèles ou d'approximation,
- pouvoir appliquer directement et réellement les optimisations calculées sur le matériel concerné,

- considérer une période de temps continue et ainsi bénéficier d'une inertie sur les décisions prises en n'isolant pas les optimisations entre elles.

Cette vision s'oppose à l'approche purement calculatoire du **dimensionnement**, par exemple, qui est en amont de la phase d'optimisation. Ici, si un résultat est calculé pour le système simulé, il doit être exploité pour être appliqué au système réel.

Un moyen simple de passer de la simulation au suivi d'un système temps réel est de répéter régulièrement le calcul d'optimisation pour chaque nouvelle fenêtre de temps [100]. Une approche intermédiaire, appelée **day ahead** consiste à calculer un fonctionnement optimisé la veille pour le lendemain, itéré à chaque fin de journée. Ces méthodes [50, 54, 89] sont particulièrement communes dans le secteur de l'optimisation fondée sur le prix d'achat de l'électricité, qui est généralement communiqué la veille par les opérateurs. Le *day ahead* s'accorde également aux services de prédiction de production reposant sur la prévision météo fournie la veille [70].

Le critère de temps réel est donc déterminant pour la préoccupation de mise en œuvre réelle des résultats obtenus lors des optimisations et la prise en compte des modifications sur le matériel physique par des capteurs.

Résumé & enjeux

La prédiction et l'apprentissage sont des méthodes complexes, variées et en constante évolution. Seulement, leurs bénéfices sont indéniables sur des outils de simulation et de prise de décision. Ils sont très largement étudiés dans la littérature et hors du cœur principal de notre approche, c'est pourquoi nous souhaitons considérer l'intégration de ces services comme une partie externe capable d'évoluer indépendamment pour permettre leur évolution.

SECTION 4

RÉCAPITULATIF DE L'EXISTANT

Dans ce chapitre, nous avons étudié un large éventail d'approches de gestion et d'optimisation de l'énergie, de la simulation expérimentale au gestionnaire industriel propriétaire. Si plusieurs de leurs aspects sont justifiés, d'autres en revanche ne s'appliquent pas à notre approche. Ce sont ces aspects et ces manques que nous détaillons ici.

Complexité d'utilisation

Les approches actuelles proposées dans la littérature sont majoritairement destinées à des physiciens et à des développeurs. Les solutions sont sous la forme d'un programme exécutable dans un environnement de calcul, tels que *Matlab* ou *R*. Ces méthodes exécutent un programme dans des conditions précises et chaque paramétrage nécessite une modification du code source.

Ces simulations ont principalement pour but d'étudier un appareil précis, c'est pourquoi elles nécessitent un grand nombre de paramètres, pour représenter finement tous les changements. Cette précision demande une connaissance fine du matériel à modéliser et beaucoup de temps dédié à un seul appareil. Ce temps passé rend difficile l'étude de site complet comprenant plusieurs dizaines d'appareils. Cette complexité rend également difficile, voire impossible, l'étude de nouvelle machine dont le constructeur ne fournirait pas l'ensemble de ses caractéristiques.

Les méthodes actuelles visent des représentations très précises incompatibles avec des stratégies d'exploration de solution.

Précision des calculs

Dans la littérature, beaucoup d'efforts sont portés sur la réaction à apporter vis-à-vis d'une consommation globale. Cette approche peut se justifier pour plusieurs raisons :

- il peut être difficile d'obtenir des données suffisamment précises pour isoler les différents appareils,
- si la consommation n'est pas modifiable, il n'est pas intéressant d'avoir une vision des sous postes consommateurs.

Si les particuliers ont des habitudes très différentes les uns des autres, ils sont généralement étudiés de manière statistique afin de créer des profils représentatifs [31]. Les entreprises elles sont moins étudiées dans la littérature et pourtant elles connaissent mieux leurs activités. Il leur est donc possible de qualifier chaque consommation plus finement qu'une représentation statistique.

Aucune des approches actuelles ne permet cette prise en compte des activités humaines dans sa représentation des consommations. Les optimisations ne peuvent donc pas recommander des déplacements réalistes et réalisables. Ignorer les activités revient à recommander uniquement une quantité d'énergie à déplacer ; or ces quantités n'ont que peu de réalités pour l'utilisateur final. Notre approche

est de calculer un déplacement d'activité optimal et de le recommander à l'utilisateur.

Approches existantes

Nous avons vu dans ce chapitre que la gestion de l'énergie est un domaine de recherche très actif, la majorité des moyens de production est finement modélisée dans des outils mathématiques généralistes et plusieurs scénarios spécifiques de microgrilles sont implémentés et simulés, et quelques-uns ont faits l'objet de démonstrateur, dans des quartiers résidentiels par exemple.

Comportement des machines

Plusieurs modélisations ont été proposées pour capturer les variations de la consommation électrique, notamment plusieurs modèles physiques très précis. Deux problèmes majeurs découlent de ces modèles pour être utilisés. Ces modèles nécessitent :

- de bonnes connaissances en mathématique et en informatique pour être manipulés dans les outils adaptés,
- les caractéristiques exactes du matériel à modéliser, lesquelles ne sont pas nécessairement disponibles pour l'Expert à ce moment de l'étude.

À l'inverse de ces solutions continues, d'autres approches proposent un découpage des moments de consommation sous la forme de machine à états. Chaque état représente alors un mode de fonctionnement de l'appareil, *en pause*, *en phase de démarrage*, *en fonctionnement* par exemple. Ainsi il est possible de représenter l'ensemble des comportements possibles en répétant des états si nécessaire.

Cet aspect est intéressant, car il reprend des mécaniques très peu étudiées encore dans la littérature, à savoir l'intégration du comportement des utilisateurs de manière générale. S'il est unique pour chaque particulier, il est bien plus prévisible dans les entreprises et l'industrie en général où les activités sont connues et planifiées.

De plus, ces modélisations d'activités sont déjà présentes et acceptées en entreprise [1], mais ne sont pas en lien avec la maîtrise de l'énergie.

Prédiction et apprentissage

Dans la conception d'un outil de prise de décisions, la qualité des données collectées, mesurées, est primordiale. Avoir un aperçu des tendances à venir permet d'estimer les fluctuations : de prix, de production d'énergie due aux aléas météorologiques ou encore de comportements humains influençant la consommation. Ces prédictions permettent d'affiner les optimisations et donc de prendre la meilleure décision dans une fenêtre de temps imparti.

Les méthodes utilisées en prédiction de données sont variées et en constante évolution. Certaines travaillent à partir d'un historique de mesures en phase d'apprentissage, d'autres uniquement à partir de données arrivant en temps réel.

Il en ressort donc un fort besoin d'intégration tout en ayant le plus faible couplage possible entre

cette prédiction et le reste de l'approche d'optimisation et de calcul. Ces services d'apprentissage peuvent avoir besoin d'information contextualisant la donnée étudiée. Par exemple, pour prédire une consommation de ventilation de bâtiment il apparaît évident que l'heure et la date ne sont pas des informations suffisantes, à cela il faut ajouter à minima la température puisque les deux sont fortement corrélées.

Selon nous, il est très important de pouvoir communiquer le plus facilement possible avec ces services, de la manière la plus transparente qu'il soit pour l'utilisateur, et sans favoriser un algorithme ou une méthode de prévision plus qu'une autre.

Composition des environnements

Le matériel évolue en permanence, les rendements s'améliorent, notamment dans le secteur du stockage de l'énergie où chaque constructeur cherche à être le plus compétitif possible. Les algorithmes d'optimisation sont également en évolution, d'abord très inspirés par la communauté du *Système* et sa gestion des ressources qui dans notre cas représente l'énergie disponible. Ces algorithmes évoluent pour se spécialiser dans la gestion de l'énergie et en particulier en prenant en compte les énergies renouvelables et leur production liée aux conditions environnementales.

Pour tirer le meilleur parti de l'hétérogénéité des situations, il faut pouvoir éditer et remplacer facilement des parties des sites physiques simulés. Un constructeur peut proposer plusieurs dizaines de variantes d'un modèle de batterie, chacune se comportant différemment vis-à-vis de la production, de la consommation et de la stratégie d'optimisation de l'ensemble.

Résumé de l'état de l'art

Fondé sur l'identification des caractéristiques importantes identifiées en début de chapitre nous proposons ici dans le Tableau -table 4.1 un résumé choisi de la littérature.

En particulier, nous reprenons la définition d'une microgrille définie par leur gestion et leur optimisation de l'énergie locale et venant de la grille.

Les critères discriminants pour comparer les solutions existantes reprennent donc les composantes d'une microgrille :

- le **critère** pris en compte lors de l'optimisation,
- la prise en compte d'une ou plusieurs **sources** d'énergie de production locale,
- la modélisation possible pour la consommation et le matériel **cible**,
- la possibilité d'intégrer des moyens de **stockage** de l'énergie électrique ou non,
- si le **calcul** est effectué en lien à un système physique ou en totale simulation.

De cette analyse, il ressort qu'aucune solution n'adresse toutes ces problématiques de manière satisfaisante. Au mieux, l'optimisation est capable de prendre en compte plusieurs appareils consommateurs, quelques moyens de stockage spécifique et une unique source de production.

En ce qui concerne les implémentations, toutes très orientées énergies, aucune n'intègre de dimension **modulaire** et ne se concentre sur un critère d'optimisation précis, généralement la consommation globale. Pourtant, un décideur s'intéressant à l'optimisation de l'énergie pour son entreprise peut avoir d'autres critères de choix que la consommation globale et pourra préférer un point de vue économique ou écologique pour l'image de son entreprise.

Ces critères ne sont pas juste des indicateurs calculés sur des résultats globaux, mais sont des points clés qu'une optimisation doit utiliser.

TABLEAU 4.1 – Extrait de l'état de l'art en matière de modélisation et d'optimisation de la régulation de l'énergie

Critère	Source	Stockage	Calcul	Cible	Ref.
équilibre	solaire	multiple ^a	simulation	modélisé	[128]
pics	solaire	non	simulation	smart-meter	[9]
tariff	grille	non	temps réel	smart-meter	[91]
consommation	non	non	simulation, temps réel	smart-meter	[27]
consommation	non	non	simulation	tout, modélisé	[35]
consommation	non	non	simulation	modélisé	[20]
consommation	éolien, solaire	non	simulation	HVAC	[5]
consommation	non	non	temps réel	modélisé	[19]
prix	grille	non	temps réel	smart-meter	[131]
consommation	éolien, solaire	chimique, thermique	simulation	consommation globale	[26]
tariff	non	non	temps réel, day ahead	smart-meter	[50]
consommation	solaire	non	simulation	modélisé	[119]
pics	solaire, grille	chimique, véhicule	simulation	smart-meter	[83]
pics	non	non	temps réel	système thermique	[135]

— *modélisé* : nécessite une modélisation des profils de consommation préalable

— *smart-meter* : un nombre arbitraire d'appareils connectés à un compteur intelligent

— *prix* : prix variable en temps réel

— *tariff* : plages horaires pendant lesquelles l'électricité est moins chère

^a. hydrogène, ultra-capacité, pile à combustible

Deuxième partie

Proposition : Un jumeau numérique pour
le pilotage des microgrilles

OUTILS CONCEPTUELS POUR LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

Résumé

L'utilisation de Jumeau Numérique est un sujet d'étude depuis plusieurs années pour subvenir à des problèmes de pilotage, simulation et optimisation. Nous voyons ici les propriétés et les contraintes liées au milieu industriel, l'utilisation d'outils dédiés aux experts ainsi que des approches de gestion de systèmes dynamiques et hétérogènes.

Une partie des problématiques adressées dans cette thèse sont des préoccupations d'autres domaines de recherche, notamment les Jumeaux Numériques et leur utilisation pour le suivi et le diagnostic de sites industriels. Également le domaine des `models@run.time` propose de lier des abstractions à des systèmes exécutant, approche que nous proposons d'utiliser pour piloter du matériel industriel. Rendre accessible des outils de simulation et d'optimisation est une problématique importante de cette thèse, c'est pourquoi nous proposons ici un aperçu des solutions apportées par le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles.

Ce chapitre présente des approches actuelles au regard :

- de l'utilisation de **Jumeaux Numériques** dans des contextes industriels et
- des avantages des **Models@Run.time** pour capturer l'hétérogénéité de systèmes dynamiques et complexes,
- de l'accessibilité des outils d'**ingénierie dirigée par les modèles** pour une utilisation par des experts d'autres domaines.

SECTION 1

JUMEAU NUMÉRIQUE ACTUEL DANS L'INDUSTRIE

Les termes de Jumeau Numérique ou Digital Twin [55], sont des termes issus de la communauté de l'Industrie 4.0 et ont faits l'objet de plusieurs définitions plus ou moins proches. Negri *et al.* [96] proposent une revue de l'utilisation de ce terme dans différents domaines de l'industrie. Également, Schroeder *et al.* [118] rappellent l'importance des capteurs et du lien au site physique dans leur définition :

Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems. — [118]

Edward M. Kraft [77] y ajoute les objectifs de simulation et de prédiction des comportements :

An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available models, sensor information, and input data to mirror and predict activities/performance over the life of its corresponding physical twin. — [77]

Le *Jumeau Numérique* décrit une **vue globale** et simplifiée d'un site industriel pour permettre l'analyse en temps réel de son fonctionnement. Les objectifs sont multiples et recouvrent généralement :

- suivi et maintenance préventive des machines,
- gestion des flux de produits dans l'optique de réduire les matières premières,
- simulation du fonctionnement pour tester des procédures ainsi qu'à des fins de formation.

La Figure -Figure 5.1 illustre le comportement du Jumeau Numérique vis-à-vis de son pendant physique. Les machines y sont représentées et leurs données collectées.

Les machines peuvent être équipées de capteurs pour permettre la remontée d'information et d'actionneurs pour permettre leur contrôle. Ces deux composants permettent un lien physique du Jumeau Numérique sur les appareils. Ces appareils forment un système cyber-physique, *CPS*.

La représentation virtuelle du site physique sert ensuite de base à des calculs et à des simulations, possiblement aidée de **services tiers**, par exemple les outils de gestion déjà mis en place au sein de l'entreprise représentée.

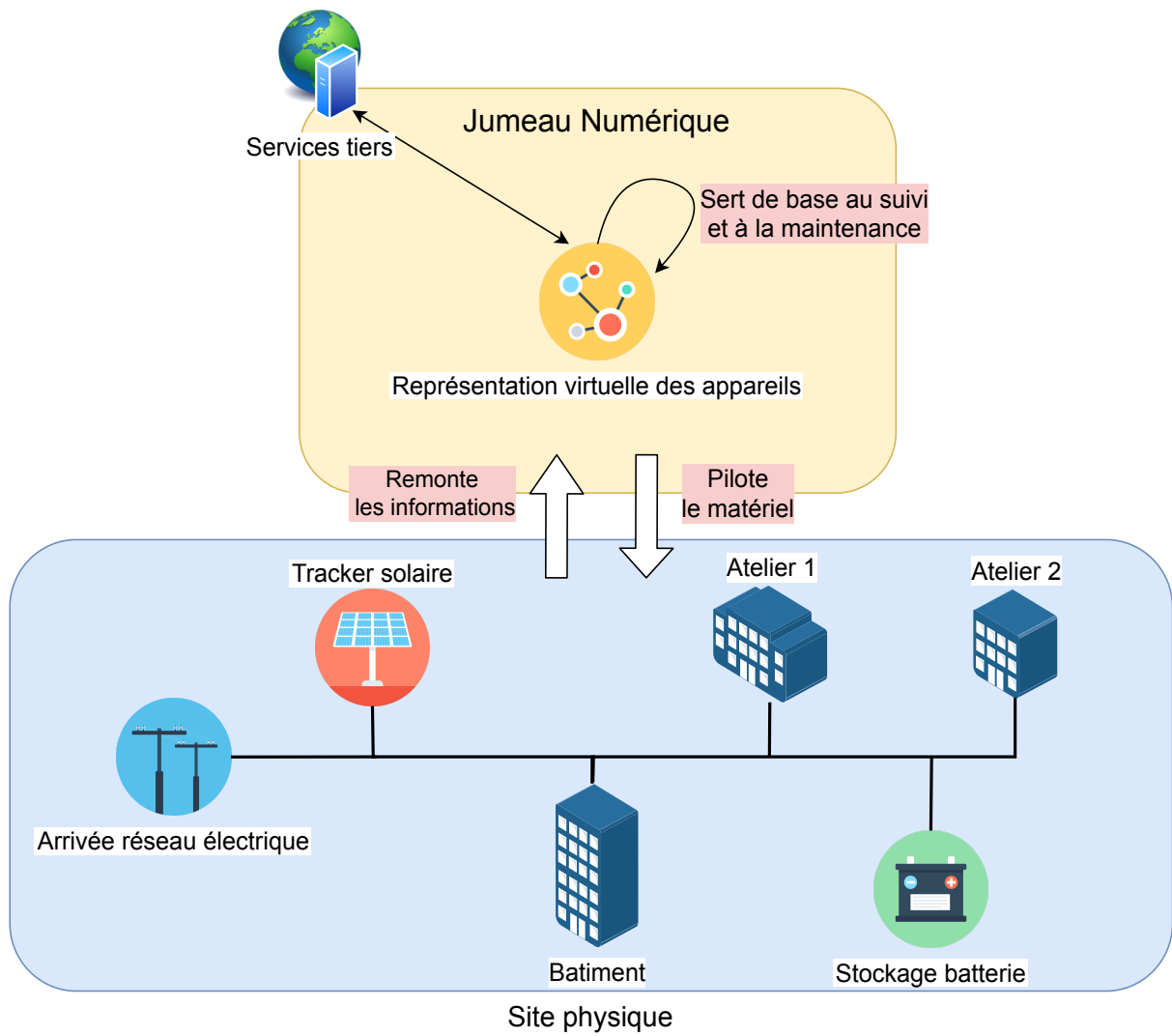


FIGURE 5.1 – Illustration du Jumeau Numérique tel que défini dans la littérature

SECTION 2

SOLUTIONS EXISTANTES : INTÉGRATION D'UNE INFRASTRUCTURE DE TYPE MODELS@RUN.TIME POUR LE PILOTAGE

Dans des secteurs autres que l'énergie, ces préoccupations ont été des sujets d'étude et ont fait l'objet de plusieurs propositions efficaces. Il convient donc de comprendre en quoi ces solutions sont intéressantes et comment en tirer parti.

L'ingénierie dirigée par les modèles *IDM* et les langages dédiés *DSL* sont de plus en plus utilisés dans l'industrie [65, 63] pour construire des outils experts. Nous avons vu également que ces méthodes peuvent être utilisées dans l'industrie pour proposer des outils flexibles et performants à des experts non informaticiens. Les interfaces ainsi créées permettent une réelle **simplicité** dans l'utilisation de modèles mathématiques en fournissant un langage fondé sur le vocabulaire du domaine et spécialisé dans la résolution de tâches liées à leur secteur.

Afin de gérer l'hétérogénéité des machines et la diversité de leurs usages, une approche souvent proposée et valide est d'ajouter une couche logicielle intermédiaire, *middleware*, dédiée à la gestion des appels vers les parties variables. D'un côté, le middleware propose une vue homogène à l'application et de l'autre il s'adapte à l'**hétérogénéité**. Des architectures permettent une forme de dynamisme en chargeant les modules nécessaires à la communication avec les parties extérieures au moment du besoin et si nécessaire à l'apparition et la disparition d'un appareil.

L'intégration de capteurs et d'actionneurs est un problème touchant tous les secteurs reposant sur de l'automatisation et sur des systèmes ouverts utilisant du matériel tiers.

En particulier, le milieu de la domotique est porteur de solutions, grâce à l'arrivée continue de nouveau matériel toujours moins cher [34]. C'est pourquoi il s'agit d'une communauté que nous allons étudier de plus près.

Dans cette section, nous explorons les différents moyens de gérer l'intégration de matériel hétérogène dans l'optique d'une solution de gestion de l'énergie.

Middleware d'intégration

La grande diversité du matériel rencontré lors de la réalisation d'un logiciel de suivi et de pilotage pose des problèmes de mis à jour et d'extensibilité. Un couplage trop fort entre cette intégration et la partie métier rend difficile l'évolution de l'application puisqu'à chaque nouveau support de matériel, l'application entière est impactée.

La communauté du génie logiciel a proposé de séparer l'application cœur de toutes parties en charge du réseau et de l'intégration de services tiers par une couche intermédiaire nommée **middleware**.

Le rôle du middleware est de gérer deux formes de complexité [64, 2, 6] :

- tout d'abord l'hétérogénéité des objets et plus généralement des **informations échangées** et également,
- des **protocoles réseau** utilisés pour réaliser ces échanges.

La Figure -Figure 5.2 présente cette séparation, toutes les communications faites par l'application vers un capteur ou un service tiers passent par la couche middleware.

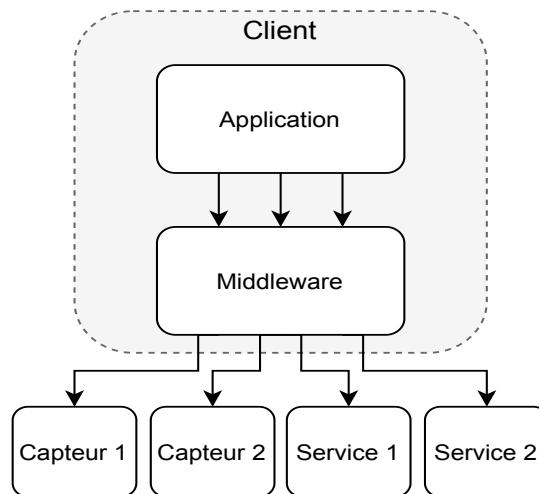


FIGURE 5.2 – Architecture simplifiée d'un middleware d'intégration de capteurs et de services

Les middlewares caractérisent une forme de **modularité** permettant l'ajout de nouveaux services de manière aisée. Idéalement, étendre le support de l'application à un nouveau capteur consiste à la définition de ce qui le caractérise. Par exemple, faire correspondre les noms des grandeurs utilisées par ce capteur avec ceux de l'application et s'assurer de l'interopérabilité ou par exemple un nouveau module peut définir l'implémentation d'un nouveau protocole réseau.

Application dynamique

Dans certains cas appliqués, tels que les services fortement distribués ou les applications très modulaires, la place de ce middleware est centrale dans l'architecture logicielle. La motivation principale est la gestion de **l'hétérogénéité**, chaque aspect susceptible d'évoluer de manière trop rapide ou nécessitant trop d'implémentations différentes peut être abstrait par un service. Les services sont proposés et stockés dans un registre et seront ensuite liés à l'application sur demande à partir d'une spécification.

Plus formellement : un **service** est un élément logiciel capable de fournir des données. Nous pouvons également citer le livre *SOA, le guide de l'architecte* :

Les services offrent une vue logique des traitements ou données existant déjà ou à développer. Chaque service encapsule ces traitements et données et masque ainsi l'hétérogénéité du système d'information.

— [46]

Du point de vue de l'application, seule la définition du service est visible, les détails de l'implémentation sont masqués, ce qui participe à la séparation des préoccupations et réduit ainsi la complexité de cette application.

Les SOA proposent un découplage tellement fort que la découverte de nouveaux services et le chargement et déchargement de ceux-ci peut se faire à n'importe quel moment de la vie de l'application. Ce **dynamisme** permet aux applications de s'adapter à des perturbations ou à des indisponibilités d'un service en basculant sur un autre par exemple.

Les architectures à services sont utilisées pour les **services web**, la gestion dynamique du lien permet de facilement changer d'implémentation pour un même service, pour des contraintes de performance ou de qualité de service par exemple.

Dans le cadre de cette thèse, un service peut être un fournisseur de données, à l'image d'un capteur physique ou d'un site tiers fournissant une prédiction météorologique. Chaque implémentation de chaque capteur peut ainsi être séparée et s'enrichir indépendamment de l'application.

Framework d'intégration

Dans cette section nous détaillons brièvement la plateforme orientée service OSGi, afin d'illustrer plus techniquement la mise en place d'un tel middleware.

Tout d'abord, OSGi est une spécification définie par l'OSGi Alliance¹, plusieurs implémentations existent telles que Equinox et Felix² de la fondation Apache.

OSGi repose sur le langage Java et son environnement d'exécution pour permettre le chargement et le déchargement des services. Être limité au langage est cependant l'une de ces principales problématiques, empêchant l'interopérabilité entre différents environnements d'exécution. La contrainte est donc que chaque implémentation de nouveau service doit se faire dans le langage Java, ce qui n'est pas un problème dans le cadre de cette thèse.

Dans le vocabulaire OSGi un *bundle* est un ensemble de services pouvant dépendre les uns des autres. Il contient l'implémentation réelle du service ainsi que toutes les informations nécessaires à leurs chargements : nom exact, numéro de version ainsi que la liste de leurs dépendances. La Figure -Figure 5.3 présente l'architecture de ces bundles une fois chargés par OSGi et ceux présents dans le registre.

Nous venons de présenter une architecture logicielle capable de mettre en œuvre une gestion des plugins au sein d'une application afin de proposer une structure **modulaire**. Dans la section suivante, nous décrivons un secteur proche de celui de l'énergie qui nous intéresse et ayant également à faire face à une très forte **hétérogénéité** des appareils.

1. <https://www.osgi.org/>

2. <https://felix.apache.org/>

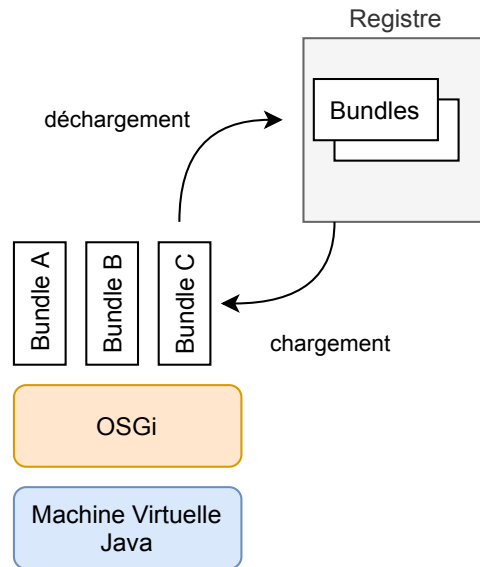


FIGURE 5.3 – Architecture OSGi, 3 bundles sont chargés

Domotique

Ce qui nous intéresse dans cette thèse inclut les compteurs électriques et les actionneurs capables de démarrer des machines. Par exemple afin de commencer une activité à une heure précise ou pour piloter la gestion d'une batterie.

La **domotique** fait face à un catalogue de produit encore plus varié et toujours grandissant. Les technologies d'intégration de capteurs et de matériels de pilotage, notamment sans-fil, sont nombreuses, mais aucun consensus ne semble émerger [49].

Des solutions propriétaires d'intégration sont développées par des fabricants de matériel dédié tel que Somfy³. L'inconvénient est que ces fabricants vont privilégier le support de leur protocole et peu ou pas supporter d'autres protocoles. Ici la SomfyBox ne gère qu'assez peu de protocoles, pas de Zigbee ni de KNX, ni la plupart des protocoles sans-fils 433MHz [84].

Le problème de ne pas mettre l'intégration au cœur d'une solution tient en deux parties :

- il est plus **difficile d'étendre les fonctionnalités**, car le choix de nouveau matériel est limité à ce que le fabricant décide de supporter,
- il peut ne pas être possible de **construire un écosystème fondé sur de l'optimisation d'énergie** si les données importantes ne sont pas laissées accessibles.

À l'inverse, des solutions domotiques telles que Jeedom⁴ ou Home Assistant⁵ ont fait le choix de laisser leur communauté étendre l'intégration.

3. <https://somfy.fr>

4. <https://www.jeedom.com/>

5. <https://www.home-assistant.io/>

Dirigé par la communauté, n'importe qui peut construire et ajouter un nouveau connecteur pour du matériel ou un service qu'il connaît. Ce connecteur peut ensuite être utilisé au sein de l'application pour construire des scénarios plus complexes ou juste servir de source de données à afficher.

C'est une démarche similaire que nous souhaitons construire, à plus petite échelle, dans la réalisation d'une méthodologie d'efficacité énergétique. C'est pourquoi nous avons étudié une communauté se focalisant sur ces problématiques d'intégration dans le milieu du logiciel : **l'ingénierie dirigée par les modèles**.

SECTION 3

INGÉNIERIE DIRIGÉE PAR LES MODÈLES

À partir de cette section, nous nous intéressons aux solutions existantes de gestion de l'énergie, EMS, et en particulier leur intégration aux bâtiments sur le terrain.

Chouhan *et al.* [24] montre qu'une majorité des modélisations et des méthodes actuelles sont des simulations, réalisées à l'aide d'outils tels que : Matlab et Simulink. Ces approches permettent des calculs rapides grâce à leur solveur et à la modélisation très précise qui est généralement faite. Leur limite est de justement être spécifique au cas formalisé et que toute modification trop importante des données d'entrées nécessite d'importants moyens d'ingénierie. De plus, ces outils sont utilisés pour calculer une situation optimisée, un planning de fonctionnement optimisé pour la période considérée en simulation.

Avec ces approches, modifier les conditions de simulation telles que les périodes de fonctionnement ou les paramètres de puissance, va nécessiter une modification du code source de Matlab, R, etc, et donc l'intervention d'un développeur. Une de nos motivations est de laisser à n'importe quel expert la possibilité de manipuler lui-même ces paramètres.

Pour ce faire, nous proposons de regarder le domaine de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles [117, 78], IDM qui est utilisée pour répondre à ces préoccupations dans d'autres domaines d'étude.

a) Motivations et définitions

Un des objectifs de l'ingénierie dirigée par les modèles est la volonté de **capturer l'évolution des systèmes complexes et dynamiques**. En particulier, la manière utilisée de gérer la complexité est par l'abstraction des concepts récurrents.

Un des avantages de cette méthode d'ingénierie est la réduction des coûts de développement et de maintenance des logiciels en séparant *le domaine* et *l'application*. La **qualité** du logiciel produit est améliorée par l'utilisation de génération de code et d'un ensemble d'outils au centre des méthodes d'IDM. Également, cette approche permet une meilleure :

- **modularité** : les tâches sont isolées et facilement identifiables,
- **efficacité** : chaque partie est chargée d'une tâche simple et s'intègre bien entre elles,
- **maintenabilité** : un code plus court et simple est plus facile à modifier,

- **réutilisabilité** : en construisant un domaine d'abstractions, les algorithmes peuvent plus facilement être réutilisés pour travailler sur des structures proches.

Les outils d'analyse et de prise de décision manipulent des systèmes complexes. Le domaine des sciences, de manière générale, est donc un cas typique de besoin d'outils pour gérer cette complexité [25].

Les approches de développement dirigé par les modèles sont notamment adaptées à la gestion de système hétérogène évoluant de manière indépendante [94].

Le cycle de développement d'outils IDM peut se décrire en 2 étapes, illustrées en Figure - Figure 5.4 :

1. en collaboration avec un expert du domaine, le domaine est analysé et abstrait pour construire le **méta modèle** : l'ensemble des notions récurrentes et propres au domaine métier étudié. De ce méta modèle des outils d'aide à la modélisation sont dérivés et générés, ils peuvent être adaptés et personnalisés pour mieux correspondre aux pratiques des experts.
2. l'expert **utilise les outils** de modélisation mis à sa disposition pour représenter des modèles représentant des instances de son problème métier. La résolution de ces problèmes peut être assistée par des outils développés pour travailler au niveau méta modèle : sur l'ensemble des problèmes utilisant ces mêmes abstractions.

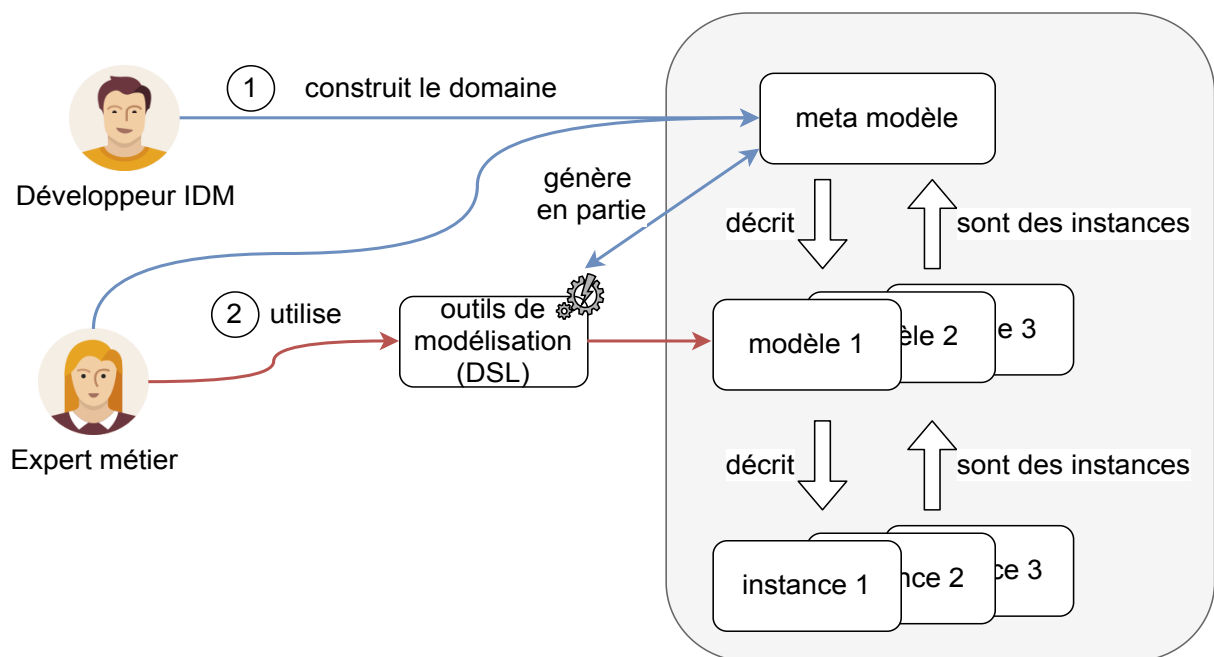


FIGURE 5.4 – Étapes de création d'un domaine d'abstraction et d'outils de modélisation

In the context of Model-Driven Software Development, it is absolutely mandatory to be clear about the structure of a domain(that is, its onto-

logy), so that one can formalize this structure or its relevant part. This is the basis for every automation. Formalization takes place in the form of a metamodel. — [133]

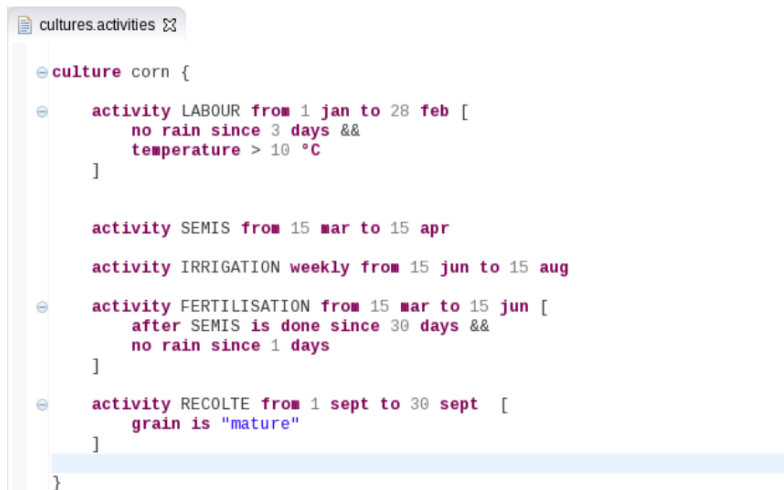
L'étape ① de définition du domaine fait intervenir un **language workbench** [47] : un ensemble d'outils permettant d'assister la création du méta modèle et générant une base de **langage dédié** pour manipuler des modèles, mis en avant dans l'étape ② d'utilisation.

b) Les langages dédiés aux experts

L'objectif des approches d'Ingénierie Dirigée par les Modèles, *IDM*, est de fournir aux experts un outil de modélisation le plus facile à utiliser pour lui et les gens de son domaine, et ce en utilisant les mots et le vocabulaire de son secteur d'expertise. Le tout formant un ensemble d'outils adaptés aux tâches qu'ils souhaitent réaliser [76, 75].

Un langage dédié, ou **DSL**, peut être :

- **graphique** : généralement fondé sur outil de dessin de diagrammes, par exemple comme les outils de création d'Interface Homme-Machine pour Android,
- **textuel** : sous la forme d'un fichier lisible par un humain, mais dédié à un domaine précis voir illustration en Figure -Figure 5.5, à la différence des langages de programmation généraux (General Purpose Language ou *GPL*) tels que C, C++ ou Java. SQL est un exemple de DSL textuel très largement utilisé,
- voire même graphique en plus d'être textuel, en maintenant une cohérence entre les deux éditeurs.



```

cultures.activities
@culture corn {
  activity LABOUR from 1 jan to 28 feb [
    no rain since 3 days &&
    temperature > 10 °C
  ]

  activity SEMIS from 15 mar to 15 apr

  activity IRRIGATION weekly from 15 jun to 15 aug

  activity FERTILISATION from 15 mar to 15 jun [
    after SEMIS is done since 30 days &&
    no rain since 1 days
  ]

  activity RECOLTE from 1 sept to 30 sept [
    grain is "mature"
  ]
}

```

FIGURE 5.5 – Exemple de DSL textuel dédié à l'agriculture proposé par [17]

Un DSL vise une problématique précise, comme l'interrogation d'une base de données. Le choix des opérateurs et des moyens fournis à leurs utilisateurs doit donc être adapté à cette problématique. Lors de sa conception, une très bonne connaissance du domaine ciblé et de ses problématiques est

donc nécessaire, c'est une des raisons pour lesquelles nous avons été sur le terrain à la rencontre des exploitants des sites équipés, ce point est détaillé plus largement dans le chapitre 7.

Un langage graphique et textuel a été proposé par [17] pour assister des chercheurs de l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique, dans l'utilisation de leurs modèles physiques et mathématiques. Cette expérimentation avait pour but de montrer la maturité des méthodes IDM et en particulier à destination d'experts d'un domaine autre qu'informatique et ayant déjà des modèles et formules mathématiques déjà existants à prendre en compte. Les outils graphiques et textuels développés sont présentés en Figure -Figure 5.6.

À partir d'une description initiale, Bruel *et al.* ont été en mesure de proposer une version fonctionnelle en moins de 12 heures, ce qui montre que ces méthodes ont un réel intérêt dans l'industrie.

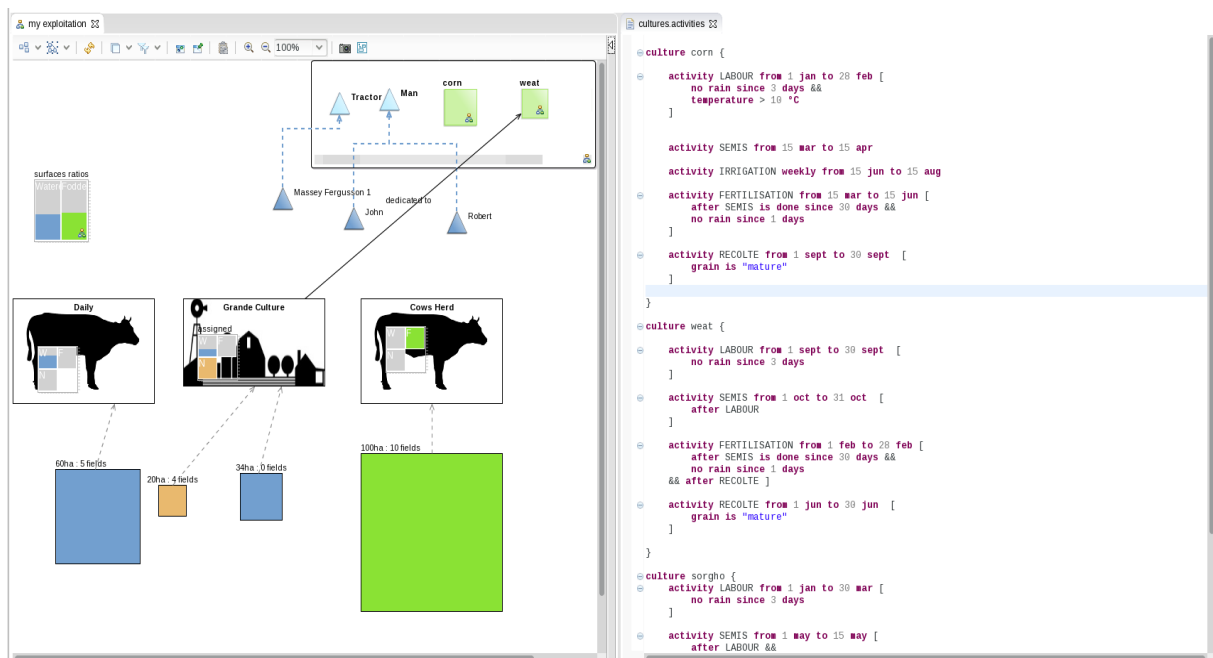


FIGURE 5.6 – Un langage graphique et textuel dédié à l'agriculture et à l'optimisation des ressources pour l'irrigation des cultures par [17]

[1] montre que les méthodologies de représentation des activités sont déjà acceptées et très fortement utilisées en entreprise. Notamment, la majorité des approches reprennent les mêmes idées :

- la **décomposition** de l'organisation des activités en systèmes et sous-systèmes,
- la **représentation temporelle** des activités.

Nous avons d'ailleurs pu valider l'importance de ce second point lors des interviews réalisés sur le terrain. Si l'aspect temporel est primordial pour la représentation des activités, il est surtout plus compliqué qu'une simple succession d'étapes indépendantes.

Ces étapes ont besoin d'être placées dans leur contexte, par exemple : "en fonctionnement nor-

mal, pendant 6 semaines tous les jours les activités A, B puis C vont s'enchaîner puis pendant le vide sanitaire de 15 jours il y aura uniquement les activités D et E à des heures différentes”.

c) Le model@run.time pour le pilotage d'un système à l'exécution

Les approches d'IDM ont été appliquées aux systèmes physiques dynamiques [45, 93] notamment pour abstraire l'hétérogénéité des capteurs, du matériel et des moyens de communication entre les différents nœuds du réseau. Dans ces cas, le modèle construit pour représenter le système physique sous-jacent est conservé pendant l'exécution, d'où l'appellation : **model@run.time**.

Résumé & enjeux

L'hétérogénéité des capteurs, services tiers et des algorithmes d'optimisation nécessite la mise en place d'un environnement dédié. Une telle architecture peut passer par un middleware en mesure de proposer une modularité afin de séparer le cœur de l'application de cette hétérogénéité.

PROPOSITION : UN JUMEAU NUMÉRIQUE POUR LES MICROGRILLES DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES

Résumé

Dans cette thèse, nous proposons une méthode outillée d'aide à la décision pour les experts des domaines liés à l'énergie, telles que les énergies renouvelables. Les objectifs sont les suivants : a) fournir aux experts une plateforme d'analyse de scénarios capable de mesurer l'impact de l'ajout de matériel et de politiques d'optimisation énergétique, b) facilement être en mesure de déployer sur le terrain des scénarios étudiés en simulation, c) intégrer l'utilisateur final dans la boucle en lui fournissant des recommandations de déplacement d'activité en temps réel allant dans le sens de l'optimisation globale.

Les sources d'énergie renouvelables représentent un investissement conséquent et doivent donc s'inscrire dans un contexte viable et donc rentable économiquement pour pouvoir se démocratiser. Ce point met le **coût** économique au centre des décisions.

Le choix d'un type d'énergie renouvelable tel que solaire ou éolien, son dimensionnement, l'ajout de moyen de stockage comme des batteries, sont autant de problèmes complexes qu'un industriel ne peut pas résoudre. Des entreprises spécialisées sont là pour conseiller, accompagner et installer les solutions les plus adaptées à chaque situation. Ce sont ces **Experts** que nous souhaitons aider au travers de cette contribution.

La production des énergies renouvelables est par nature changeante. L'énergie qui n'est pas

directement consommée est soit perdue, soit revendue à faible coût sur la grille. L'objectif est donc de faire correspondre la consommation des sites avec la production qui elle ne peut pas être modifiée. Nous pensons que cet objectif peut être atteint à l'aide de l'organisation des entreprises et la connaissance qu'elles ont de la planification de leurs activités.

Dans ce contexte, nous proposons la construction d'un jumeau numérique qui guidera les étapes de dimensionnement, simulation, préconisation de déplacement d'activités.

Ce chapitre est donc structuré comme suit :

- Détail de notre **proposition** de Jumeau Numérique dédié à la gestion et l'optimisation de l'énergie
- Présentation de notre **cadre de validation** expérimentale

SECTION 1

PROPOSITION : UN JUMEAU NUMÉRIQUE POUR L'ÉNERGIE

Notre proposition s'articule autour de l'utilisation d'un **jumeau numérique**, une représentation virtuelle d'un site physique existant ou entièrement simulé. Ce jumeau est le point central des calculs, de l'optimisation, du lien entre les acteurs et le monde physique pour permettre le contrôle et le suivi de matériel. Notre proposition est résumée dans la Figure -Figure 6.1 et détaillée point par point à partir de la section suivante.

Cette section se décompose comme suit :

1. **Caractéristiques et fonctionnalités attendues** d'un Jumeau Numérique dédié à l'énergie, dans un contexte de génération locale en microgrille,
2. **Architecture** de notre proposition.

1.1 Caractéristiques attendues pour la gestion d'énergie

De la liste des exigences identifiées dans la section précédente nous proposons une liste de fonctionnalités que nous jugeons nécessaire à la mise en place d'un Jumeau Numérique performant. Ces fonctionnalités doivent intégrer tous les aspects importants d'une installation pour être en mesure d'avoir une vision complète et la prise précise possible du monde physique.

Fonctionnalités attendues

La fonction de simulation, permettant de calculer l'impact énergétique à chaque instant d'un appareil électrique sur réseau, est importante, mais elle ne représente qu'une partie d'une conduite efficace de l'énergie. La simulation doit s'ancrer dans le réel, être en mesure de prendre en compte d'une part des données mesurées quand le matériel existe et est disponible ainsi que des modèles mathématiques pour du matériel à installer par exemple.

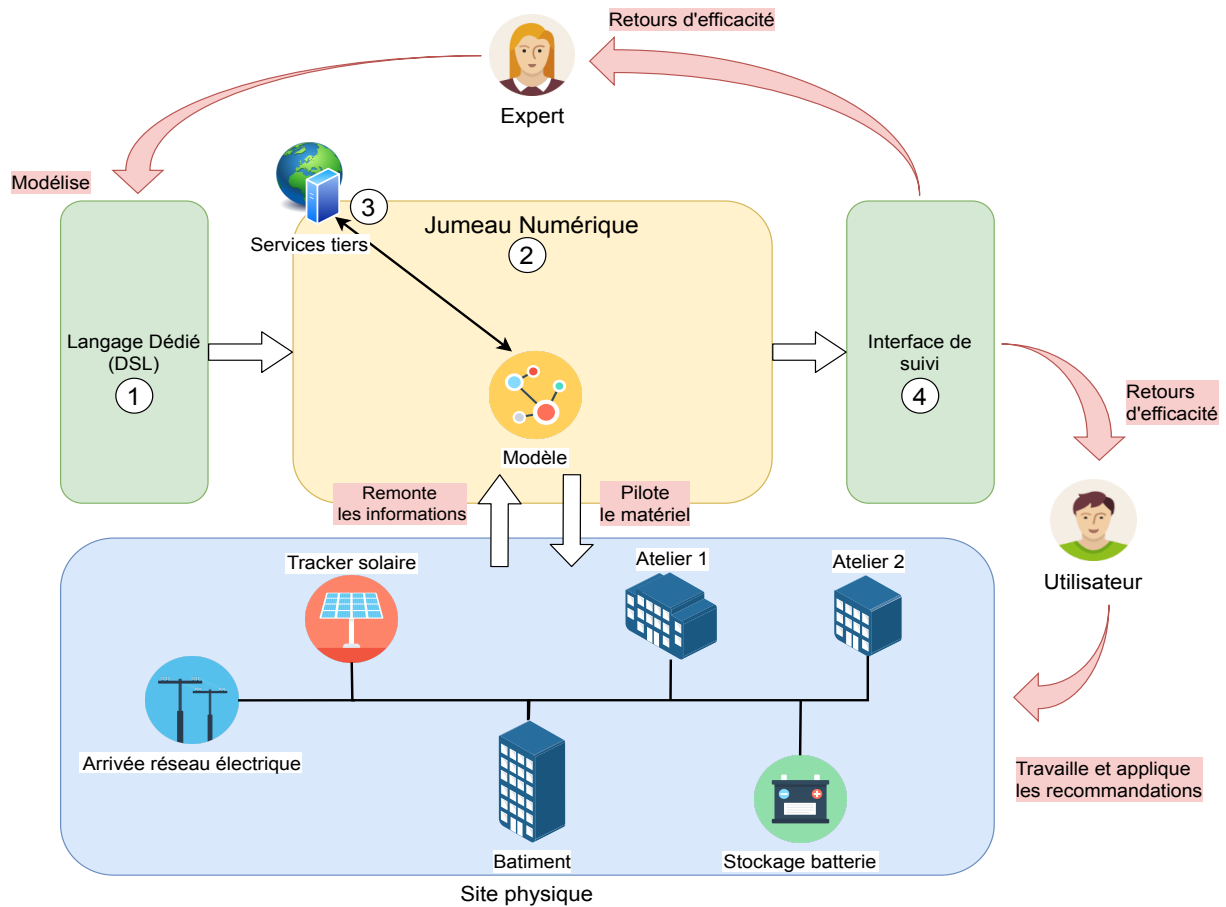


FIGURE 6.1 – Schéma global simplifié de notre proposition de Jumeau Numérique enrichi pour la gestion de l'énergie et ses interactions avec les différents acteurs et le site physique instrumenté

L'objectif des simulations et de l'optimisation est de faire émerger de nouvelles organisations de travail et des nouveaux modes de fonctionnement pour le matériel. Cela se traduit par des déplacements d'activités et donc de nouveaux horaires pour les activités humaines, mais également par des temps de veille et de fonctionnement en accord avec la production d'énergie pour les machines. L'application des optimisations se traduit donc par une communication *humaine* et *matérielle*.

L'ensemble de ces fonctionnalités se résume comme suit :

1. **Simuler** les échanges d'énergie entre chaque appareil sur une période définie,
2. **Recommander** des déplacements d'activité bénéfiques au système global en effectuant un retour à l'utilisateur final ou à l'Expert,
3. **Suivre** et **piloter** du matériel communicant existant en temps réel.

Propriétés attendues

La mise en place d'une solution technique capable de répondre à ces fonctionnalités est difficile compte tenu de l'hétérogénéité dans les situations possibles. Il n'existe pas de solution magique pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. Chaque industriel doit être analysé pour déterminer quelle combinaison lui va le mieux.

Les propriétés nécessaires sont donc les suivantes :

1. Prise en compte des **activités humaines** dans la représentation de la consommation, en particulier leur variabilité et leur saisonnalité,
2. Intégration de **services d'apprentissage** capables de fournir une estimation des valeurs à venir pour une source de données,
3. Rendre possible le **paramétrage de l'optimisation** d'objectif global par l'utilisateur. Pouvoir optimiser selon différents critères et ainsi permettre de favoriser le coût économique ou écologique ou encore impacter le moins possible les activités humaines,
4. Permettre une **modularité** afin de suivre l'évolution du matériel en facilitant les modifications des représentations existantes,
5. Être **accessible** à un expert avec une connaissance générale du métier ciblé et de l'énergie plutôt qu'un développeur ou qu'une personne maîtrisant tous les aspects physiques du matériel. Avoir simplicité dans la configuration et dans le déploiement,
6. Avoir une architecture **flexible** capable de gérer un nombre quelconque de consommateur, de producteur et de moyen de stockage pour représenter tous les cas possibles.

1.2 Architecture proposée

Notre proposition, illustrée en Figure -Figure 6.1, est fondée autour de la notion de jumeau numérique étendue pour la gestion de l'énergie et rendue accessible à des experts.

Interface Expert

Un Expert en énergie est en charge de la construction du jumeau numérique. Pour ce faire, il utilise un langage dédié, ① sur la Figure -Figure 6.1, lui facilitant la manipulation des concepts liés à l'énergie. L'Expert compose un modèle dynamique servant de base aux calculs d'optimisation, de lien avec le monde physique ainsi qu'avec d'éventuels services tiers fournissant des données complémentaires ou des services améliorants la qualité de l'optimisation proposée.

Dans le modèle l'expert définit les conditions d'exécution, la date de début et de fin pour une **simulation** ou si le modèle doit représenter un site en **temps réel**.

Jumeau Numérique

Dans le Jumeau Numérique, ② sur la Figure -Figure 6.1, chaque appareil est modélisé à partir d'une source de données. Ainsi indifféremment un modèle mathématique paramétré par les caractéris-

tiques d'une machine physique, des données collectées sur le terrain ou un capteur communiquant en temps réel des valeurs mesurées peuvent être utilisés. Par simplicité, un appareil peut en réalité correspondre à plusieurs machines physiques ou à un bâtiment complet. Cette granularité dépend de l'objectif de l'Expert ainsi que des données auxquelles il a accès, s'il cherche à étudier la variabilité des activités humaines il modélisera le plus de machines possible, si aucune action n'est possible une vision globale des bâtiments peut être suffisante.

À chaque source de données représentant une machine, un Expert peut associer un **coût**, une valeur numérique. Ce coût peut être relatif pour simplement privilégier un moyen de production par rapport à un autre, par exemple en utilisant les valeurs décrites dans le Listing 6.1 :

Listing 6.1 – Coûts associés aux sources d'énergie pour permettre de favoriser l'autoconsommation

panneau solaire : 0
groupe électrogène : 0.5
grille : 1

De cette manière si la production solaire est suffisante le groupe électrogène ne sera pas allumé et la consommation viendra uniquement de la production locale. Dans le monde physique, ce basculement d'une source à l'autre est mécanique, un sectionneur vient basculer pour qu'il n'y ait aucune coupure.

Le coût peut également être absolu pour représenter un coût économique associé à l'utilisation d'un appareil par exemple. Tel que présenté dans le Listing 6.2, le coût favorisera les activités en période de coût le plus faible. De plus, utiliser ce coût fournira un détail exact de la facture de consommation électrique et peut donc fournir des pistes de remplacement de matériel pour du matériel plus récent ou plus efficace.

Listing 6.2 – Exemple de coût associé à la grille pour représenter un tarif variable dans le temps et favoriser certaines périodes de fonctionnement.

grille : 0.15 entre 9h et 18h, 0.12 le reste du temps

Les machines et leur coût ne sont qu'une partie *figée* d'un site industriel, à cela il faut ajouter une représentation des activités, humaines ou automatisées. Les activités reposent sur les modèles virtuels précédents pour définir leur variabilité, leur flexibilité et leurs contraintes. Chaque représentation d'un appareil doit être liée à une représentation d'activité afin de définir son fonctionnement dans le temps.

Les activités définissent :

- les horaires et les fréquences habituelles,
- les actions possibles à effectuer telles que le changement d'horaire, dans quelle amplitude ces changements sont autorisés. De même pour des modifications d'intensité.

Lien à des services tiers

Les fonctionnalités d'un Jumeau Numérique peuvent être améliorées par des informations issues de différentes sources externes, ③ sur la Figure -Figure 6.1. Notamment pour les énergies renouvelables fortement corrélées aux conditions météorologiques l'intégration d'un service de prédiction peut permettre de fiabiliser les résultats d'optimisation, en particulier pour du suivi en temps réel.

Dans notre proposition, chaque source de données, appareils consommateurs, mais surtout producteurs, peut être étendue par un service tiers capable de fournir des données aidant à la prise de décision pour une fenêtre de temps à venir. La durée de cette fenêtre de temps et la fiabilité sont laissées libres à l'Expert composant le Jumeau Numérique.

Interface de suivi

L'interface de suivi, ④ sur la Figure -Figure 6.1, sert à l'utilisateur et à l'expert de suivre l'évolution des métriques d'autoconsommation permettant de connaître à quel point les sources d'énergie locales ont été utilisées.

En plus du suivi, l'interface fournit les éventuelles recommandations de déplacement à présenter à l'utilisateur, afin qu'il puisse décider, ou non, de les appliquer.

Ces recommandations sont fondées sur la variabilité et la flexibilité exprimées dans les activités et sur le coût afin de déterminer quels changements sont les plus rentables et intéressants en considérant l'ensemble des modélisations présentes dans le Jumeau Numérique. Ainsi les déplacements recommandés peuvent varier suivant les conditions météorologiques ou encore l'état de charge des batteries.

Le choix de présenter un déplacement à partir de sa pertinence ainsi que la forme et le média plus adapté à cette recommandation sortent du cadre de cette thèse. Plusieurs pistes [125, 14] ont été proposées pour le milieu résidentiel, elles serviront de base de réflexion à de futurs travaux.

SECTION 2

CADRE DE VALIDATION EXPÉRIMENTALE

L'intérêt de la proposition d'une nouvelle méthodologie d'aide aux problématiques liées à l'énergie est qu'elle soit utile et puisse être utilisée dans le milieu industriel. Nous avons donc mis en place une démarche permettant d'identifier des **critères** pertinents permettant une validation empirique de la proposition.

- détail de notre **démarche**, des personnes rencontrées,
- à partir de ces rencontres, nous avons établi une liste de cas d'usage et liste des **exigences** à la réalisation d'un Jumeau Numérique dédié à la gestion de l'énergie dans le cadre d'entreprise de taille moyenne du domaine industriel ou agricole.

2.1 Démarche

Nous avons mené une démarche itérative entre le **terrain** en allant voir quelques exploitants et éleveur et le **bureau d'étude** de l'entreprise OKWind spécialisée dans l'installation et le suivi de solutions photovoltaïques. Démarche nous ayant permis de construire notre méthodologie :

1. **Aller sur le terrain** afin de mieux comprendre les aspects de la variabilité des activités à prendre en compte ainsi que le type de matériel auquel nous attendre. Également, les pratiques déjà mises en œuvre dans des entreprises fournissant déjà un service de conseil en énergie.
2. **extraire une liste d'exigences** fondée sur cette analyse de terrain ainsi que sur les retours d'une utilisation industrielle. Ces exigences servent de critère auxquels une proposition doit répondre.

À partir de cette phase d'analyse, notre démarche inclut :

3. **proposer une architecture** capable de gérer l'hétérogénéité identifiée ainsi qu'une **méthodologie** dédiée aux experts,
4. **implémenter un prototype** fonctionnel pour le **valider** sur différents cas réels fondés sur des problématiques industrielles.

Entretiens réalisés

Pour permettre de définir le cadre de validation, nous avons mené plusieurs entretiens en nous déplaçant sur le terrain pour rencontrer des utilisateurs de sources d'énergie renouvelable

L'**objectif** fixé est de mieux comprendre les activités réalisées dans chaque exploitation, les mesures déjà mises en œuvre par les exploitants pour mieux consommer.

Notre proposition s'adresse à deux types de *personas*, que nous avons cherché à rencontrer :

1. l'**expert** en efficacité énergétique chargé de l'étude d'un site agricole ou industriel, Figure -Figure 6.2a,
2. l'**utilisateur final**, travaille sur le site étudié. Il connaît son activité et ses contraintes et est en mesure d'opérer des changements dans ses habitudes, Figure -Figure 6.2b.



(a) **Expert** : connaît le secteur visé et le milieu de l'énergie



(b) **Utilisateur** : exploitant d'un site industriel ou agricole, il souhaite améliorer sa performance énergétique

FIGURE 6.2 – Pictogrammes utilisés pour représenter les différents personas d'acteurs

Experts rencontrés

L'expert est la personne utilisant les outils l'assistant dans ses démarches. Pour des raisons de facilités et de confidentialités, nous avons choisis deux experts chez OKWind et leur profil est le suivant :

- un technicien en énergies renouvelables depuis 4 ans, en charge de réaliser des études de dimensionnement de parc photovoltaïque,
- une experte ingénieure agricole connaissant bien les activités du secteur de l'élevage ainsi que le matériel généralement présent dans les exploitations, leur planification habituelle et leurs contraintes.

Les experts nous ont accompagné tout au long des évolutions des propositions et ont fourni d'importants retours sur les fonctionnalités disponibles et leur accessibilité.

Dans un premier temps, ils nous ont décrit leurs pratiques actuelles.

Existant industriel

Pour réaliser leurs études, les experts utilisent une multitude de services et d'outils : des tableurs qu'ils ont constitués pour simuler les échanges d'énergie, divers sites web tiers pour fournir des estimations de gisement solaire.

Ces outils ne sont pas intégrés, il en ressort un *effet silo*, où chaque étape est manuelle, incluant beaucoup de manipulation de colonnes de tableur afin d'adapter chaque situation, en particulier pour gérer les dates et les heures correspondant aux productions et aux consommations d'énergie.

Il en ressort également que les tableurs ne sont pas adaptés pour représenter des systèmes complexes, par exemple les batteries, et sont vite limités pour représenter des systèmes précis, à l'échelle de la minute, des durées de plusieurs mois.

Notre validation dans le chapitre 8 se compare à cet existant.

Cet objectif idéal fait intervenir plusieurs étapes telles que le choix du matériel de production ou de stockage ou l'analyse des consommations. Des entreprises comme OKWind ont développé une expertise autour de ces étapes. Cette expertise est fondée sur une connaissance **implicite** des experts suite à de nombreuses études et **explicite** au travers des outils utilisés ou développés pour leurs tâches. Cette mixité des connaissances rend approximatifs les analyses et résultats obtenus.

Une meilleure solution telle que le langage dédié doit donc permettre de capturer cette connaissance implicite tout en correspondant au langage des experts du domaine. Le tout en étant lié aux réalités du terrain.

Un modèle ne peut fonctionner sur de l'implicite et les simulations de fonctionnement d'installation doivent être le moins approximatives possible puisque des décisions économiques peuvent en découler.

Pour construire ce modèle, il faut donc enquêter sur le terrain pour bien comprendre les aspects à modéliser et rencontrer les personnes en charge des sites.

Utilisateurs gestionnaires rencontrés

Les utilisateurs ont été rencontrés principalement en début de thèse, pendant le courant de l'année 2017 avec comme objectif identifié de se rendre compte des diversités de leurs activités et des gestions déjà mises en place.

Nous avons rencontrés trois responsables, tous situés dans la région grand ouest en France, et déjà clients de la société OKWind, possesseurs de moyens de production photovoltaïques et satisfaits depuis au moins 1 et jusque 2 ans et demi.

Parmi ces trois personnes, deux sont agriculteurs en charge de leur propre exploitation de moins de 10 employés et une travaille sur un site industriel métallurgique et a été chargée par sa hiérarchie d'explorer des solutions d'amélioration de leur gestion de l'énergie.

Ces trois personnes sont donc déjà équipées de panneaux solaires, et suivent leur production au jour le jour tout en essayant d'adapter leurs habitudes à leur production. En définitive, ils font intuitivement un des cas d'usage que nous souhaitons intégrer.

Ces utilisateurs ne sont donc pas représentatifs de futurs utilisateurs de nouveaux sites ciblés par des experts du secteur. Ils sont déjà convaincus des bénéfices que ces solutions peuvent leur apporter et sont prêts à accorder du temps pour réfléchir à des changements à apporter à leur quotidien.

Ce biais dans la sélection des utilisateurs justifie également que nous n'avons pas cherché à identifier des critères pertinents pour la mise en place d'une interface de suivi ergonomique. Une analyse rigoureuse dans ce domaine nécessiterait un panel plus représentatif.

Les entretiens ont duré en moyenne 1 heure durant laquelle l'exploitant décrit :

- ses activités quotidiennes, leurs heures et durées moyennes,
- quelles machines sont utilisées.

Pendant ces entretiens, nous avons posé des questions sur les facteurs pouvant amener des changements dans ces organisations et également sur les liens existants entre les activités. L'idée était de se rendre compte si ces ordres étaient importants ou non afin d'identifier les plages de **flexibilités**.

En résumé, nous avons rencontré trois utilisateurs d'énergies renouvelables afin de mieux comprendre leurs usages actuels. Ces informations nous ont permis d'extraire des activités qualifiées de *type* pour des milieux agricoles ainsi la composition de *sites types* décrits dans la section suivante. Ces activités sont celles qui ont été utilisées dans la validation expérimentale détaillée dans le chapitre 8.

Analyse des besoins industriels

Le besoin d'une entreprise pour pouvoir mener à terme ce genre d'amélioration de l'efficacité énergétique est d'avoir une vision énergétique d'ensemble du site analysé. Cette vision se décompose en deux parties :

1. la connaissance profonde du matériel et des activités du site cible,
2. la connaissance dans les solutions possibles comme les moyens de production d'énergie ou encore de stockage capables d'améliorer la situation du site.

Ce premier point passe dans un premier temps par une instrumentation des appareils ou des bâtiments pour avoir une vision *horaire* de la consommation sur plusieurs jours ou semaines. Les volumes consommés comme indiqué par les factures par exemple ne permettent pas de se calculer l'impact de moyens de production locaux. Dans un second temps par un ou plusieurs entretiens avec les utilisateurs finaux ou gestionnaires du site afin de savoir comment se déroulent leurs activités. En particulier, quelles sont les activités exactes réalisées et si elles diffèrent des pratiques courantes du secteur. Les experts réalisant les études ont plusieurs secteurs en expertise et sont en mesure de reporter des résultats similaires déjà étudiés.

2.2 Analyse de terrain et cas d'application

La société OKWind est dans le secteur des énergies renouvelables depuis plus d'une dizaine d'années. Au fil des années, elle s'est constitué une clientèle dans les secteurs les plus dépendants des variations du prix de l'électricité et les plus intéressés par l'adoption de solution d'indépendance. Dans notre situation, ces secteurs sont majoritairement les **milieux d'agriculture et d'élevage**, mais également les milieux **industriels**.

Nous proposons ici une analyse des méthodes et des besoins d'une entreprise de conseil en efficacité énergétique, telle que OKWind, en termes d'outils et de fonctionnalité. Également, nous proposons une analyse des exigences [30] et des besoins des secteurs étudiés. Nous basons ces analyses sur des discussions avec quelques-uns de ces clients ainsi que l'étude des données mesurées sur site de plusieurs dizaines d'entre eux. Ces données ont été comparées avec des rapports nationaux de l'ADEME pour s'assurer de leur cohérence au sein de leur milieu d'activité.

Les exigences sont séparées en deux catégories : **Exigences Fonctionnelles** désignent les propriétés liées à une fonction ou à un état résultant de la réalisation d'une tâche et **Exigences Non Fonctionnelles** désignent des propriétés globales, par exemple de performance ou d'accessibilité.

Les analyses actuelles suivent 4 étapes principales et successives comme présentées en Figure -Figure 6.3 :

1. **Dimensionnement** de moyen de production pour atteindre de 20 à 30% d'autonomie,
2. **Optimisation** de l'organisation des activités pour mieux correspondre aux moments de production,
3. Intégration de moyens de **stockage** pour permettre de valoriser plus d'énergie,
4. **Suivi** d'une installation pour permettre un pilotage fin du matériel.

L'ordre des étapes donné ici est le cheminement typique qu'une entreprise peut avoir, d'autres choix sont possibles et sont indiqués en traits pointillés sur la Figure -Figure 6.3, par exemple le stockage peut être totalement ignoré. Les résultats issus de l'ajout de stockage, étape 3, peuvent également mettre en avant un manque de production locale et donc amener un nouveau dimensionnement, étape 1.

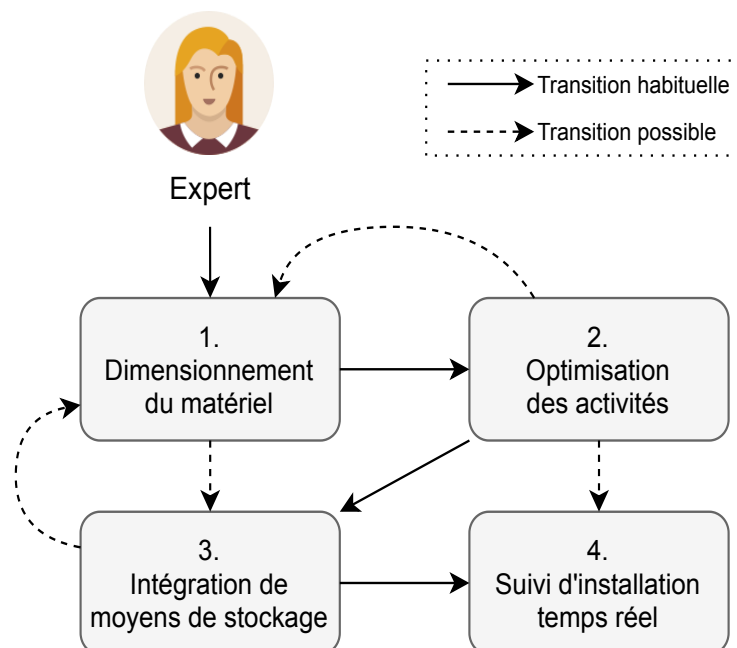


FIGURE 6.3 – Logigramme des différents cas d'usage possibles lors d'une étude d'amélioration des performances énergétiques

Ces scénarios seront utilisés pour valider plusieurs aspects de notre proposition :

1. la capacité du modèle à représenter les cas d'usage,

2. la précision et la qualité des résultats obtenus comparativement à la méthode originale,
3. la rapidité et la facilité d'obtention des résultats.

Pour chaque scénario, des exigences lui sont associées pour permettre une **évaluation**.

Nous séparons notre analyse en deux parties correspondant à chaque type d'usage : l'**analyse des méthodes existantes** : en décrivant quelques cas d'usage par les experts et l'**analyse du terrain** : détaillant l'organisation du travail des utilisateurs finaux.

2.3 Exigences issues du terrain

Ces exigences sont fondées sur des rencontres avec plusieurs exploitants et sur l'analyse de plusieurs dizaines d'installations équipées et suivies à distance par l'entreprise OKWind. Ces rencontres et entretiens ont été réalisés avant tous travaux en début de thèse puis pendant les premiers essais de modélisation.

Méthodologie : Notre méthodologie s'est constituée d'une série de questionnaires chez les exploitants afin de connaître ce que les capteurs de consommation ne peuvent pas nous dire, à savoir :

- ce que les exploitants étaient prêts à changer dans leurs habitudes,
- identifier les facteurs importants dans leur métier, leurs impacts externes possibles.

Les exploitants rencontrés sont dans une démarche de réduction de leur consommation et d'amélioration de leur autonomie.

Dans le milieu de l'élevage, pour des raisons sanitaires les bâtiments doivent être vidés régulièrement. Cette périodicité impacte la consommation sur l'année et la description qu'une personne peut faire de cette activité. Ces changements doivent pouvoir être pris en compte lors de la phase de description pour ne pas fausser les données produites par le modèle et pour interpréter les données de consommations mesurées par les capteurs.

Exigence Fonctionnelle 1 : *Les simulations doivent pouvoir fonctionner avec des fichiers contenant des séries temporelles issues des capteurs.*

Exigence Fonctionnelle 2 : *Prendre en compte la variabilité des activités et les spécificités de certains secteurs.*

2.4 Définition des cas d'usage industriels

OKWind utilise actuellement différents outils pour réaliser ses études pour assister ses experts. De ces outils, nous analysons les usages pour en extraire une grille d'évaluation pour notre proposition. Des pratiques actuelles, nous avons choisi 4 cas d'usage fondés intégrant également des usages souhaités et manquants ou difficiles dans les conditions actuelles.

a) Cas d'usage n° 1 : Évaluation du matériel et aide au dimensionnement

De manière exploratoire, un expert veut pouvoir **estimer l'efficacité énergétique** d'une installation sur une ou plusieurs années, afin d'intégrer les variations saisonnières. Un expert va donc chercher à :

- estimer la production du matériel dont il a la maîtrise pour un nouvel emplacement géographique,
- qualifier l'impact énergétique d'un appareil consommateur.

Cette étape est la première d'une étude possiblement plus longue, elle est réalisée avec peu d'information de terrain et généralement uniquement des données fournies par le constructeur.

L'efficacité énergétique se mesure à l'aide de métriques de taux d'autoconsommation et d'autonomie afin de quantifier les différents échanges d'énergie et leur provenance : depuis la grille ou depuis la production locale. À partir de ces métriques énergétiques, des indicateurs économiques peuvent être dégagés, mais sortent du cadre des résultats attendus d'un outil de simulation.

De ce cas d'usage, nous proposons donc les exigences suivantes :

Exigence Fonctionnelle 3 : *Une simulation doit pouvoir être exécutée pour calculer les échanges énergétiques d'un site modélisé.*

L'exécution doit pouvoir se passer dans un temps relativement court, pour permettre à l'expert de modifier sa définition et de renouveler la simulation. Nous faisons ici le choix de prendre 10 minutes de manière arbitraire, car cela permet de réaliser suffisamment de simulation selon les experts.

Exigence Non Fonctionnelle 1 : *Une simulation représentant une année ne doit pas prendre plus de 10 minutes à s'exécuter.*

Exigence Non Fonctionnelle 2 : *Un expert doit être capable d'utiliser les outils de modélisation et de simulation après une courte formation. Nous choisissons ici 2 heures de manière arbitraire dans notre évaluation.*

Exigence Non Fonctionnelle 3 : *Changer des caractéristiques de matériel simulé ne doit pas demander plus de cinq minutes à un expert formé.*

b) Cas d'usage n° 2 : Impact des changements et optimisation de planning

L'organisation des activités en entreprise est rarement réalisée en prenant en compte l'impact énergétique, et ce puisque la fourniture d'électricité à prix fixe en efface tout intérêt économique.

Dans le cadre d'une production locale, ou d'un contrat de fourniture d'électricité à prix variable, l'ordre de réalisation des activités a un impact direct sur l'économie du système et présente un réel intérêt.

Ces changements dans les habitudes des utilisateurs vont être listés et leurs contraintes exprimées pour être exploitables par un outil d'optimisation. Toutes ces pratiques sont regroupées par l'expression Demand Response. Un expert souhaite évaluer **dans quelle mesure ces changements génèrent un impact bénéfique** sur le système global. L'objectif pour l'expert est de savoir si le changement d'habitude est suffisamment rentable pour justifier un changement des pratiques de l'utilisateur.

À cette étape, l'expert ne s'intéresse pas à *comment* ces changements de planning sont transmis à l'utilisateur final.

Exigence Fonctionnelle 4 : *La simulation doit pouvoir prendre en compte les contraintes horaires des activités pour proposer des déplacements améliorant l'efficacité énergétique.*

Les experts ont besoin de faire varier leur critère d'optimisation pour explorer toutes les situations possibles, et notamment pondérer l'utilisation d'appareils par rapport à d'autres. En particulier pour des choix de sources de production d'énergie, que l'expert puisse choisir de favoriser la source la plus écologique ou la plus économique.

Exigence Fonctionnelle 5 : *Les experts doivent pouvoir influencer l'usage d'une source d'énergie par rapport à une autre à l'aide d'un paramètre.*

L'intégration de services d'apprentissage externes permet de donner une estimation des comportements des producteurs d'énergie. Cette vision sur les données à venir permet d'améliorer les optimisations possibles.

Exigence Fonctionnelle 6 : *Les simulations doivent pouvoir intégrer des services tiers de prédiction de production ou de consommation pour améliorer la fiabilité de leurs résultats ainsi que la prise de décision en temps réel.*

c) Cas d'usage n° 3 : Intégration de moyens de stockage

Le stockage électrique est le moyen le plus répandu d'équilibrer la production et la consommation d'énergie. Les récentes avancées dans le secteur de la mobilité : voiture électrique, vélo électrique, ont

permis de nombreuses avancées :

- réduction du prix d'achat,
- amélioration de la densité de stockage,
- simplification de l'intégration électrique et de la communication.

Ces avancées et changements réguliers créent un besoin de suivre les nouveautés des produits sur le marché et leur comportement dans un système complexe : production locale d'énergie et prix variable de l'énergie venant de la grille.

Les prix encore élevés de certaines batteries, en particulier les technologies lithium, font que leur rentabilité est déterminée par leur utilisation. Seule une conduite optimisée des cycles de charge et décharge peut rendre une installation rentable économiquement.

Exigence Fonctionnelle 7 : *La modélisation doit pouvoir représenter des moyens de stockage électrique et s'en servir au travers de simulations.*

Produire de l'eau chaude au bon moment est déjà l'approche la plus répandue de Demand Response. Presque tous les particuliers et industriels ont un besoin en eau chaude quotidien. Produire cette eau chaude en avance et la conserver dans un ballon permet de déplacer facilement cette consommation à un moment plus opportun pour le système global.

Exigence Fonctionnelle 8 : *La modélisation doit pouvoir représenter des moyens de stockage non électrique, tel que thermiques, et s'en servir au travers de simulations.*

d) Cas d'usage n° 4 : Suivi énergétique d'un site en fonctionnement

Des appareils électriques peuvent être simplifiés à l'extrême sans impact négatif notable sur le résultat, par exemple une consommation constante pour le fonctionnement et une consommation nulle le reste du temps. De cette manière, un expert va chercher à décrire une installation de manière *hybride* :

- une partie fondée sur un modèle simplifié pour avoir un aperçu de la consommation globale,
- quelques appareils jugés importants instrumentés pour **connaître leur consommation en temps réel**.

La distinction entre les appareils importants et les autres est à la discrétion de l'expert, mais par exemple, pour réguler très finement un appareil électrique connaître la production réelle, et non une estimation, est nécessaire pour ne pas prendre de mauvaises décisions et donc impacter l'efficacité globale.

Les appareils de mesure de consommation sont très variés, tant sur leur installation physique : au niveau des prises ou dans le tableau électrique, qu'au niveau de leur moyen de communiquer leur mesure. Il est important de simplifier ce lien entre *brique logicielle* de suivi et communication réelle avec

l'appareil afin de pouvoir remplacer le matériel utilisé en impactant un minimum le reste de l'écosystème. De manière générale, cette **hétérogénéité** est source de conflits, par exemple sur le format des valeurs lues et sur leurs unités.

En particulier à propos de la confusion entre énergie, quantité depuis une date fixe et puissance, valeur instantanée au moment de la mesure.

Exigence Fonctionnelle 9 : *Une simulation doit pouvoir intégrer des sources de données issues de capteurs de consommation temps réel.*

Résumé des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles

TABLEAU 6.1 – Résumé des exigences identifiées pour un Jumeau Numérique dédié à l'énergie

Exigence	Résumé
Exigence Fonctionnelle 1	Orienté séries temporelles
Exigence Fonctionnelle 2	Inclure la variabilité des activités
Exigence Fonctionnelle 3	Exécutable pour calculer les échanges d'énergie
Exigence Fonctionnelle 4	Propose des déplacements d'activité optimisant
Exigence Fonctionnelle 5	Permettre la pondération du choix des appareils
Exigence Fonctionnelle 6	Peut intégrer des services tiers de prédiction
Exigence Fonctionnelle 7	Capable de modéliser des moyens de stockage électrique
Exigence Fonctionnelle 8	Capable de modéliser des moyens de stockage non électrique
Exigence Fonctionnelle 9	Intègre le suivi de capteur physique en temps réel
Exigence Non Fonctionnelle 1	Temps d'exécution <10 minutes pour 2 appareils et pour 1 an
Exigence Non Fonctionnelle 2	Accessible à un expert
Exigence Non Fonctionnelle 3	Simplicité de modélisation de site

SECTION 3

SYNTHÈSE ET LIENS AUX POINTS DURS

Notre proposition, et en particulier la modularité de son architecture, permet d'adresser plus facilement plusieurs des points durs évoqués plus tôt.

L'interface dédiée aux experts permet une gestion des demandes d'évolution et une accessibilité pour la construction des moyens de pilotage, de simulation et d'optimisation du site industriel visé et de la microgrille associée. Cette interface doit être en mesure de fournir un moyen simplifié le cycle de vie d'un Jumeau Numérique, du dimensionnement de ses composants, à sa simulation et à la configuration de son intégration au matériel réel.

La partie Jumeau Numérique est en charge de faire abstraction du matériel, par exemple par l'usage de concepts issus du *models@runtime*. Les abstractions gérées par le Jumeau Numérique doivent être en mesure de gérer la diversité et l'hétérogénéité des appareils consommateurs et producteurs d'énergie, ainsi que les moyens de stockage. L'évolution et l'enrichissement des données recueillis par le Jumeau Numérique se font par l'usage de services tiers. Ces services peuvent par exemple aider à la prise de décision des algorithmes d'optimisation par l'apprentissage et la prédiction de l'évolution des données de consommation et de production dans le temps.

Nous verrons dans la partie suivante notre implémentation de cette vision et sa validation sur différents cas réels aux vues des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles décrites plus haut.

Troisième partie

Réalisation et validation

REGULDSL : UNE ABSTRACTION ET UN LANGAGE DÉDIÉ AU CŒUR D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE

Résumé

Ce chapitre décrit notre approche et ses abstractions capables de gérer l'optimisation, la simulation et le suivi énergétique de sites industriels. Ce chapitre continue en détaillant la syntaxe concrète du langage dédié proposé pour construire des instances conformes à un méta modèle issu de ces abstractions. Ce langage dédié permet aux experts métiers de construire facilement des représentations valides de leurs installations et de s'en servir avec des outils développés pour manipuler les concepts du méta modèle.

Le choix des abstractions est pour nous plus important que la syntaxe concrète, c'est pourquoi nous avons choisi une orientation *model first* : la syntaxe concrète repose sur les concepts introduits dans le méta modèle et non l'inverse.

La Figure -Figure 7.1 rappelle la place de notre proposition d'abstractions et d'utilisation d'un langage dédié dans notre démarche globale de Jumeau Numérique dédié au dimensionnement, au suivi et au pilotage d'une micro-grille.

Ce chapitre est donc composé comme suit :

1. détail de la **construction de l'abstraction** et apport de l'ingénierie dirigée par les modèles,

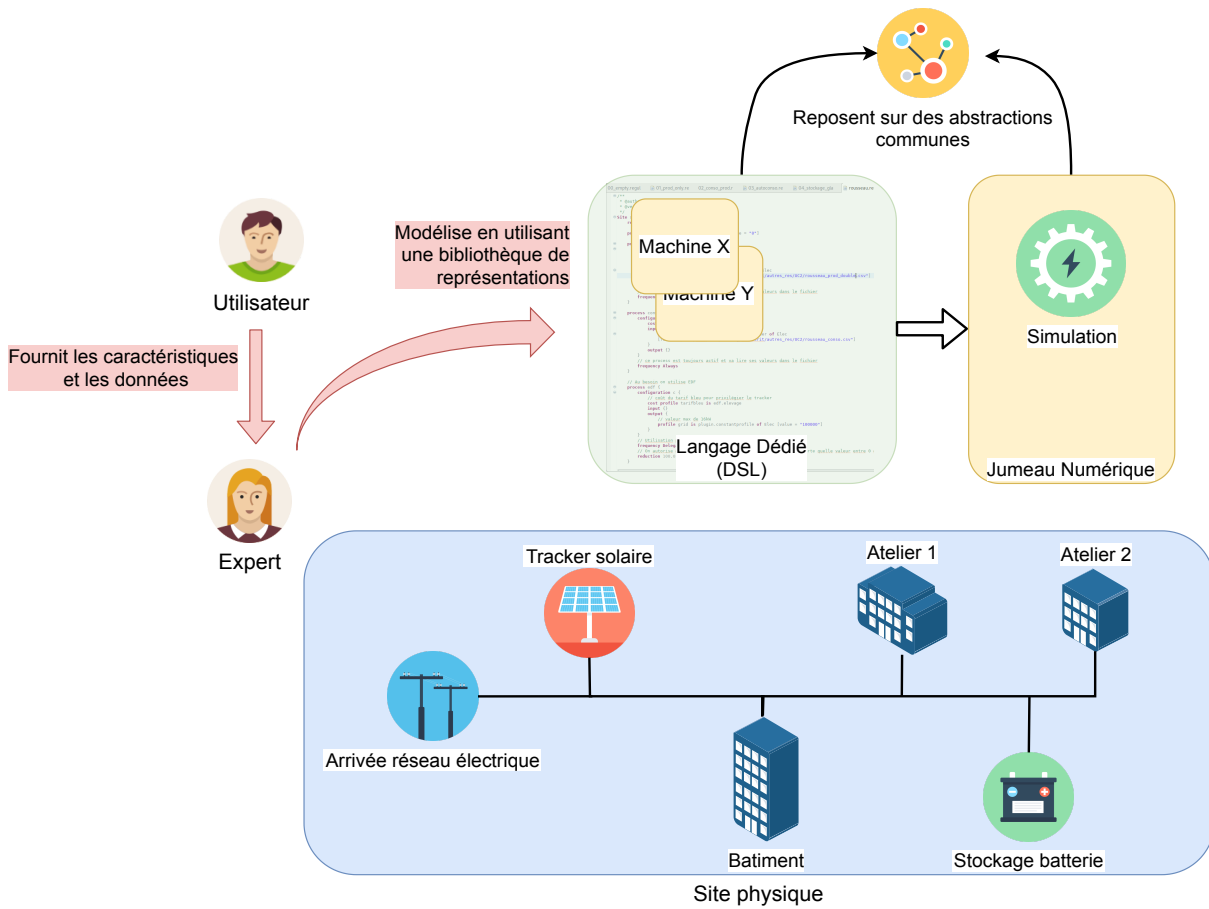


FIGURE 7.1 – Place du langage dédié dans l'approche globale

2. rappel de notre **méthodologie** suivie pour la construction de notre abstraction et description brève des différentes itérations proposées,
3. organisation et **description des abstractions** choisies, correspondant à la dernière itération,
4. **structure de ReguIDSL**, le langage proposé, et détail de sa syntaxe,
5. **utilisation de ReguIDSL** pour le dimensionnement et l'optimisation d'installation,
6. critique des **limites et choix** de notre approche.

SECTION 1

CONSTRUCTION DE L'ABSTRACTION, DÉFINITION ET APPORT DE L'INGÉNIERIE DIRIGÉE PAR LES MODÈLES

Plusieurs points durs limitent l'usage et l'adoption des Jumeaux Numériques, cette section décrit notre approche pour résoudre chacun de ces points.

Simplifier l'usage des Gestionnaires d'Énergie

Pour nous, un usage simplifié à l'usage des systèmes de gestion d'énergie, *EMS*, signifie une accessibilité à des personnes n'ayant pas de connaissance poussée en outils et plateforme de simulation. Cette accessibilité passe par des outils simples d'utilisation et une certaine rapidité de mise en œuvre et d'obtention de résultats. Pour un Expert cela se résume à deux étapes successives :

1. Analyse du site à représenter ainsi qu'un éventuel dialogue avec l'Utilisateur de ce site afin de déterminer les spécificités de ses installations,
2. Modélisation, exécution et étude des résultats.

La Figure -Figure 7.2 présente cette première étape d'identification des spécificités par l'Expert et de la description orale fournie par l'utilisateur. Elle permet de collecter les données accessibles pour réaliser l'étude, telles que des relevés de consommation et d'identifier les postes consommateurs importants.

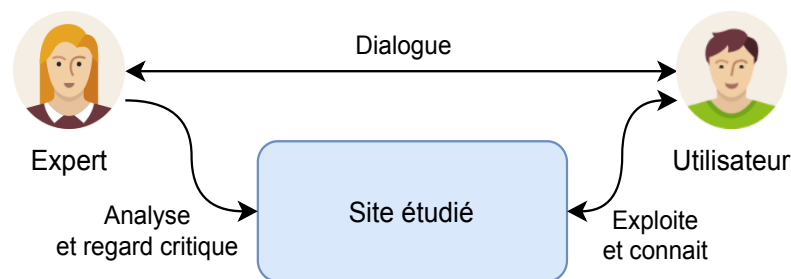


FIGURE 7.2 – Étape amont de dialogue entre l'Expert et l'Utilisateur exploitant le site industriel ou agricole.

Cette étape de prise d'information permet à l'expert de guider sa modélisation. Il analyse les machines et les activités présentes au sein de l'entreprise et les compare à celles déjà étudiées et modélisées dans d'autres études. Il peut prendre connaissance des efforts déjà réalisés dans l'entreprise tels que des historiques de consommation issus de compteurs communicants.

Pour réaliser sa modélisation, l'Expert peut composer des blocs génériques dans un outil d'édition adapté. Les avantages sont multiples, l'Expert peut ainsi :

- partir d'une modélisation proche, adapter quelques paramètres tels que les puissances des appareils ou les capacités de batterie, éditer les dates de simulation pour correspondre à la durée voulue ou au fichier fourni,
- utiliser cette même description en simulation, pour explorer des situations puis dans un second temps pour suivre en temps réel un site.

La Figure -Figure 7.3 illustre l'Expert construisant une représentation d'un Jumeau Numérique en manipulant des blocs décrivant des appareils et autres machines du monde physique. Dans sa description, l'ensemble de ces blocs réutilisables utilisent les mêmes abstractions pour être utilisables par les outils de simulation du Jumeau Numérique.

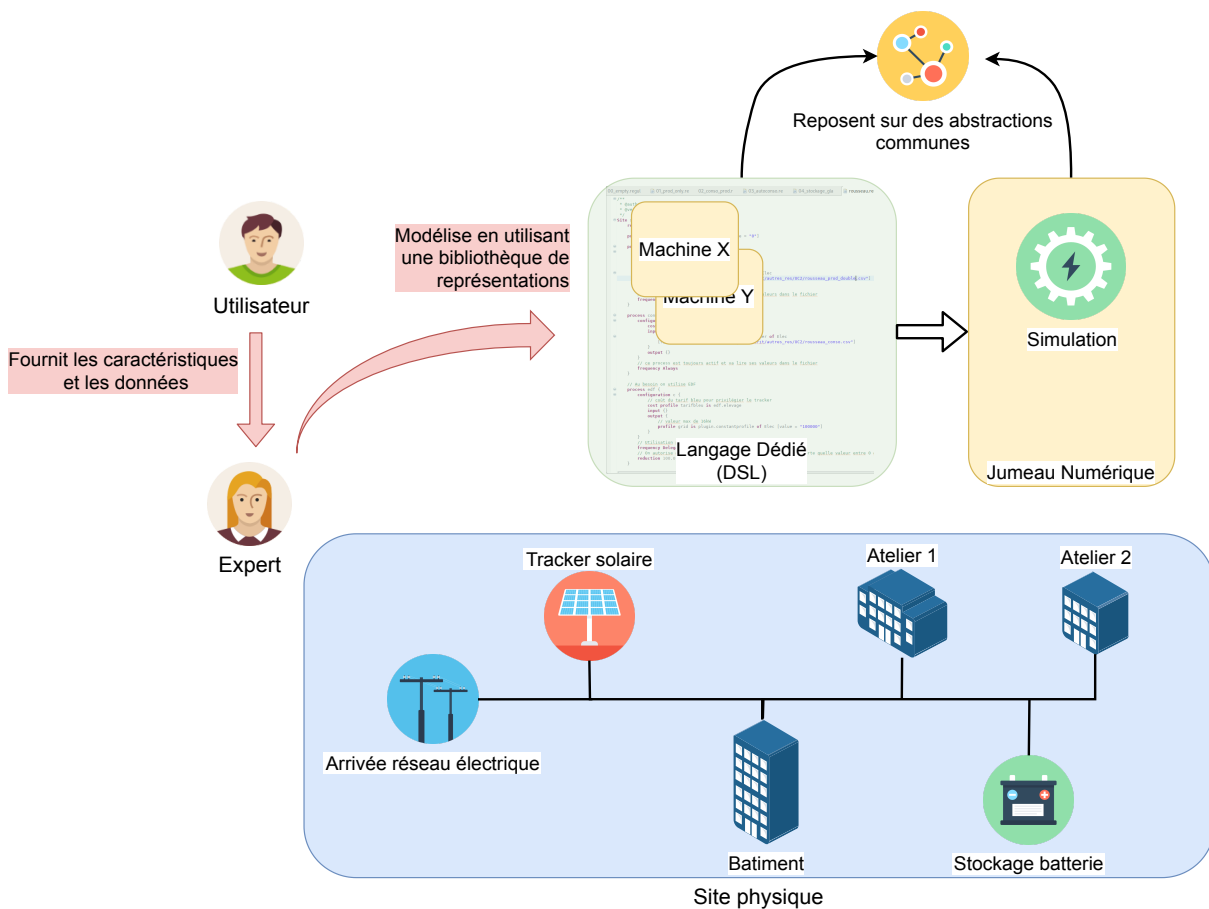


FIGURE 7.3 – L'Expert configure des blocs réutilisables issus d'un registre de composants

À partir de cette description, les différents outils de simulation et d'optimisation sont capables de calculer et d'estimer le comportement du site réel sous-jacent et ainsi répondre aux interrogations de l'Expert.

Simulation et optimisation

Les calculs dans notre approche sont fondés sur une simulation discrète où chaque bloc fonctionnel fournit ses données : consommation et production de chaque appareil pour ensuite pouvoir calculer le total des échanges.

De cette manière, le calcul d'énergie est délégué à chaque "bloc", sans tenir compte de la réelle implémentation derrière, par exemple utiliser une intégrale de Riemann sur une fonction continue ou juste une approximation à partir de 2 points. Chaque bloc est également chargé de calculer son **coût** associé, tel qu'il est défini par l'expert, qu'il importe ce qu'il représente.

La représentation interne des contraintes et de la variabilité définies pendant la modélisation est utilisée pour construire un ensemble de scénarios exposés aux implémentations du patron de conception *stratégie*.

Les situations de cet ensemble de scénarios sont comparées à l'aide de la fonction de **coût**, par exemple les choix réduisant le plus le coût économique de l'ensemble, afin de favoriser la meilleure prise de décision pour le système global. L'objectif est de proposer des déplacements bénéfiques comme illustrés en Figure -Figure 7.4. Dans cet exemple, une activité initialement placée le matin est déplacée après 10 heures pour bénéficier de la production solaire locale. Le coût de cette activité est le même dans les deux situations, mais la production solaire est à un coût nul tandis que le placement initial utilise l'énergie venant de la grille à un coût positif et différent de zéro.

Dans ce cas simple, l'utilisation d'un paramètre de coût différent pour les sources d'énergie permet de favoriser l'énergie locale.

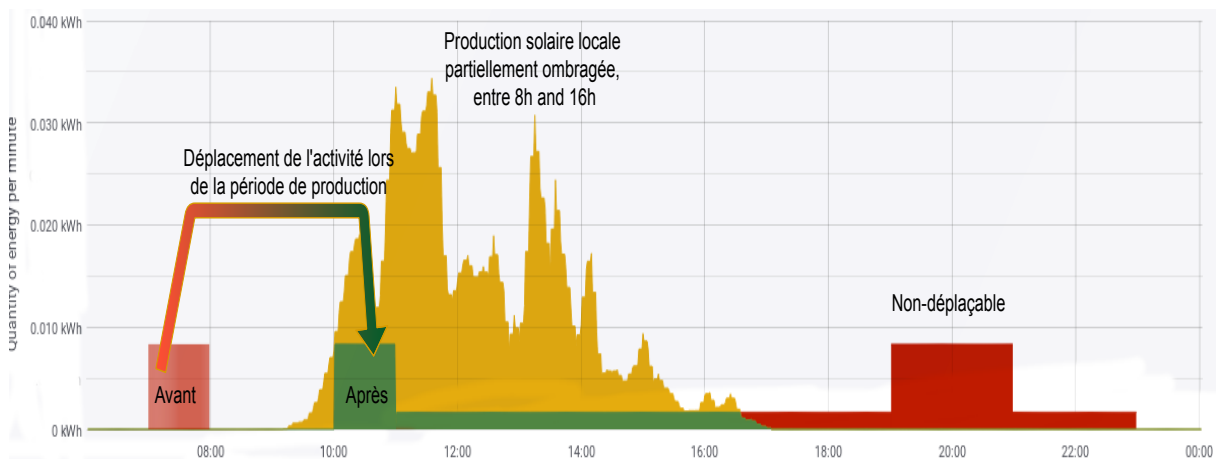


FIGURE 7.4 – Illustration d'un déplacement d'activité favorisant la production locale d'énergie

Graphiquement, l'espace de recherche des solutions des déplacements possibles est un graphe directionnel tel qu'illustré en Figure -Figure 7.5. L'application d'une **stratégie** revient à naviguer dans ce graphe, en utilisant un coût pondérant chaque branche, et à chercher un chemin minimisant le coût par exemple.

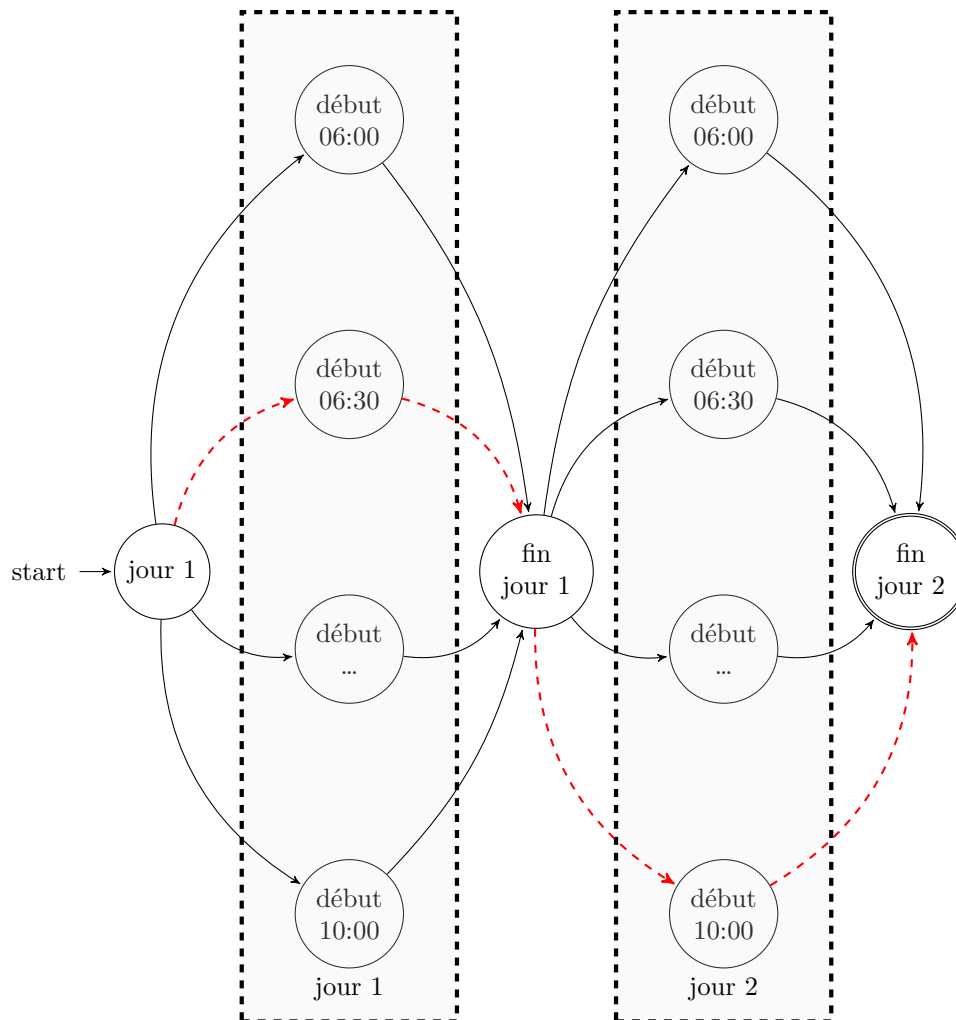


FIGURE 7.5 – Représentation du problème d'optimisation décrit, un chemin optimisé est représenté en pointillés rouges

De cette manière, il est possible d'implémenter des stratégies de *binpacking*, de *earliest deadline first*, d'algorithme de Dijkstra ou A^* [92, 119, 32] en fonction de l'objectif cherché par l'Expert ou pour comparer l'efficacité de plusieurs approches sur une même situation par exemple.

L'espace de recherche est également impacté par la présence de services tiers de prédiction dans la représentation. Si ces services fournissent une vision à 24 heures, ou sur 7 jours par exemple. Cela représente de nouvelles données accessibles à l'algorithme implémentant une stratégie lors de la recherche des solutions. La qualité et la fiabilité des ces services est importante, si les services ne sont pas déterministes, alors l'optimisation issue de leurs intégrations le sera pas non plus.

Extensibilité et réutilisabilité

D'un point de vue conceptuel, l'Expert manipule des blocs qu'il peut paramétrer à chaque utilisation. Une fois paramétré, un bloc peut être réutilisé dans une description, mais également, et surtout, entre les descriptions.

L'Expert peut ainsi se constituer une *bibliothèque* de blocs pour venir configurer des consommateurs ou producteurs en fonction de son besoin. Par exemple sur la Figure -Figure 7.6 présentant une configuration de deux appareils et 4 sources de données, une source de données *lecture d'un fichier de données brut* peut être configurée par l'Expert par le chemin vers ce fichier et ainsi être utilisé à plusieurs reprises dans une description. Des cas particuliers, telles que des sources de valeurs constantes à 0 peuvent être réutilisées dans une même description pour faciliter le travail de modélisation de l'Expert.

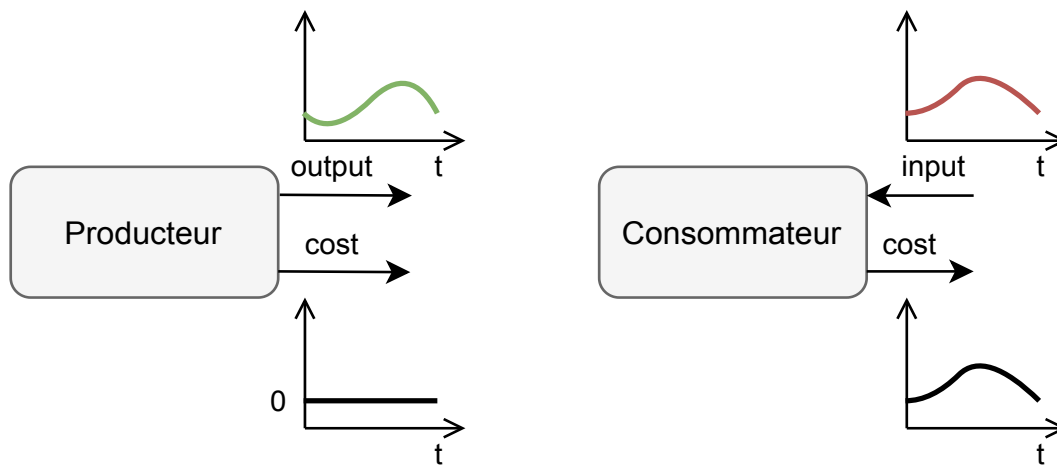


FIGURE 7.6 – Illustration des abstractions, le producteur associe un coût nul à sa production tandis que le consommateur associe un coût identique.

Comme la modélisation du stockage s'exprime par sa relation de charge et de décharge, ces données peuvent également profiter de cette réutilisabilité. De la même manière, des batteries entièrement configurées peuvent être enregistrées dans le registre pour être facilement réutilisées dans les modélisations futures.

Un développeur peut ajouter de nouveaux types de bloc pour de nouvelles situations, de nouveaux protocoles de communication d'accès à des ressources, de nouveaux algorithmes d'optimisation et ainsi enrichir le registre de blocs paramétrables pour les Experts.

Gestion de l'hétérogénéité

L'hétérogénéité des appareils à décrire rend difficile leur intégration à un ensemble commun d'outils. Par les mêmes mécanismes que ceux proposés pour la gestion de l'extensibilité. Nous proposons une approche à **services** pour permettre la découverte et le chargement dynamique des éléments variables tels que les abstractions de **producteurs** et **consommateurs** d'énergie ainsi que le **stockage**,

mais également les **algorithmes d'optimisation**.

Évolution de l'architecture

L'Expert peut faire référence aux nouveaux services dans le langage dédié et les outils de modélisation pour les utiliser dans ses descriptions de sites industriels. Ces services sont stockés dans des registres et peuvent être mis à jour individuellement pour suivre l'évolution des moyens de communication. Une mise à jour va nécessiter un rechargement du service, réalisé de manière transparente pour l'Expert.

L'approche par services permet à un développeur d'étendre un service et de l'ajouter au registre sous un numéro de version différent et ainsi permettre de faire cohabiter plusieurs d'une implémentation et laisser aux Experts le loisir d'adapter leur modélisation si nécessaire.

La Figure -Figure 7.7 présente cette modélisation utilisant les blocs génériques issus du registre et paramétrés par l'Expert.

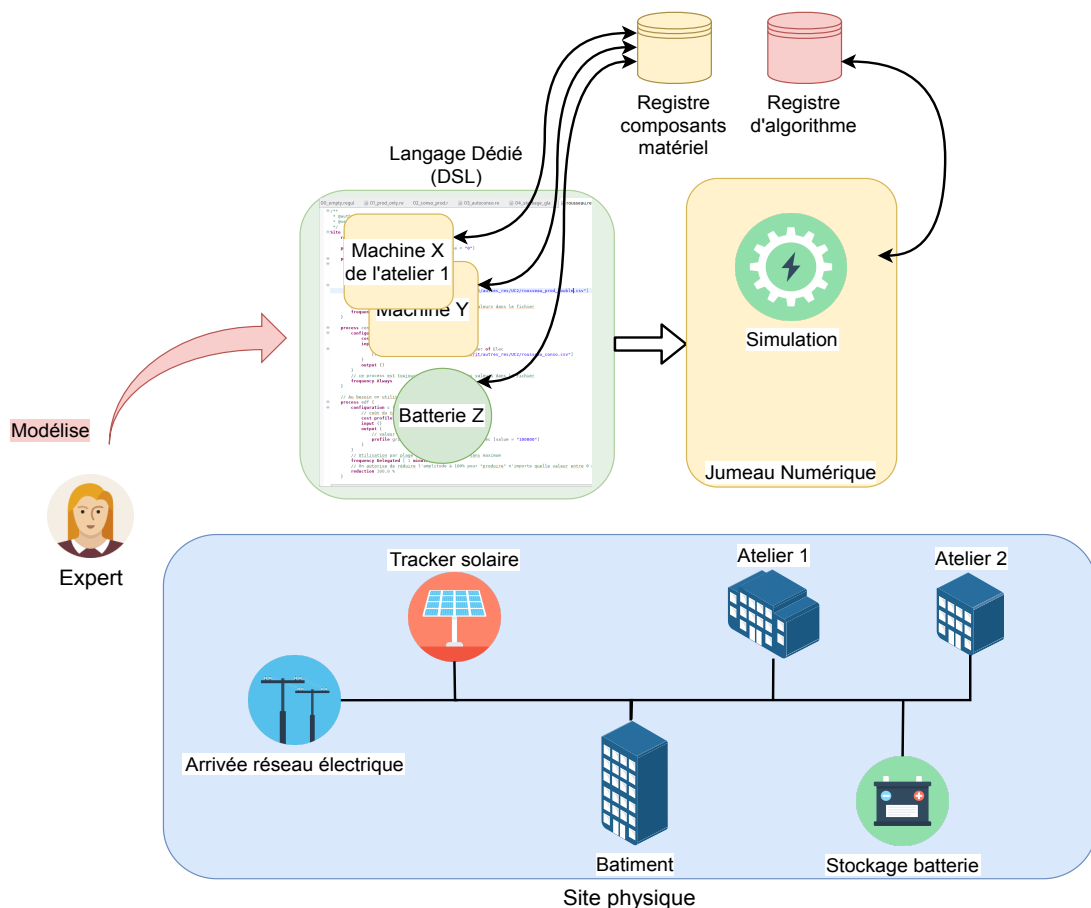


FIGURE 7.7 – L'Expert configure des blocs réutilisables issus d'un registre de composants

Détail du site physique et instrumentation

De cette manière, un modèle peut faire référence à des éléments physiques et *virtuels* entièrement simulés sans distinction, voir Figure -Figure 7.8. Dans cette Figure, la *machine X* utilise des données issues d'un service tiers tandis que la *machine Y* ainsi que la *batterie Z* sont liées à des capteurs physiques. Pour une batterie, cela signifie que les actions réalisées sur le Jumeau Numérique, charge, décharge et interrogation de l'état de charge sont effectuées également sur le monde physique.

Les valeurs récupérées depuis les éléments réels du site physique sont considérés comme évoluant de manière linéaire entre deux acquisitions.

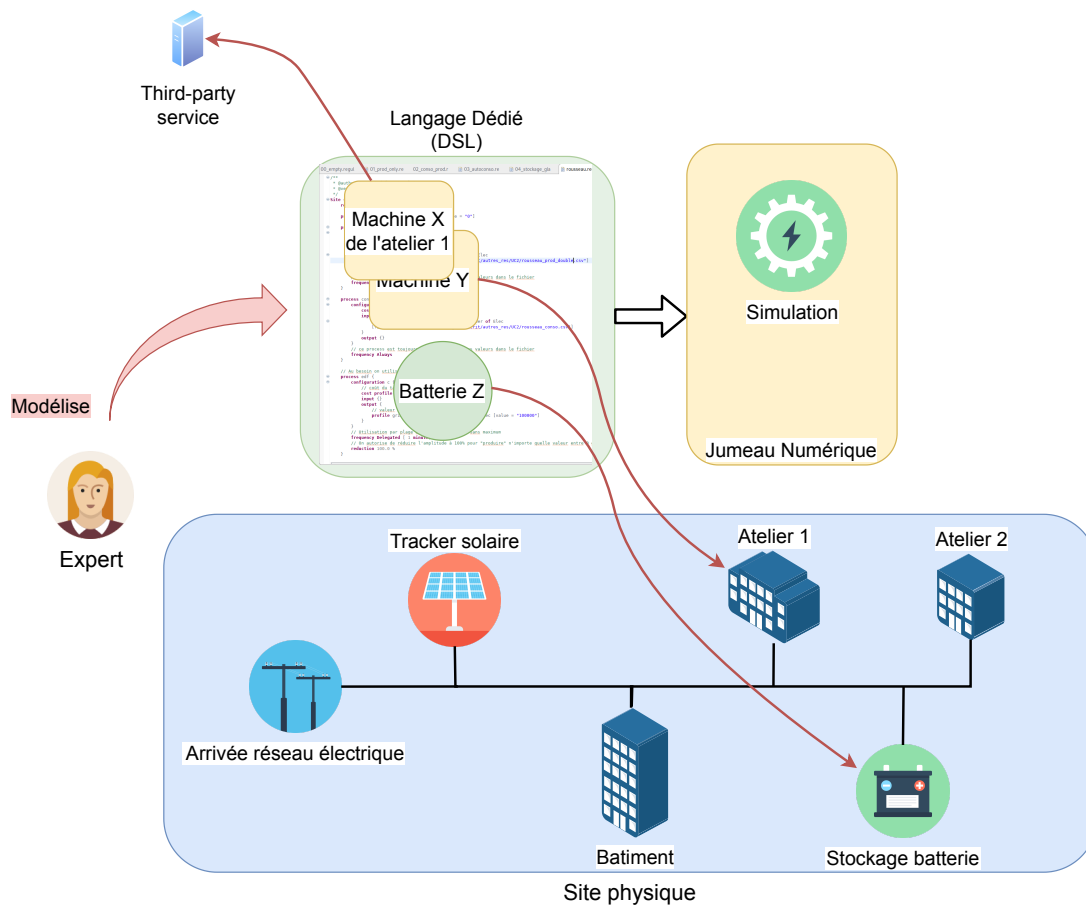


FIGURE 7.8 – Illustration de l'hétérogénéité capturée au sein du modèle, une machine peut pointer vers un service tiers ou un capteur d'une machine physique.

Pour une machine, il peut s'agir d'une source de données pour lire les valeurs d'une consommation réelle ou d'un actionneur pour répercuter des déplacements entièrement contrôlés par le Jumeau Numérique et ainsi décider des meilleurs moments d'allumage et d'extinction.

Automatisation et pilotage

Un des principaux intérêts d'un Jumeau Numérique est que les résultats et optimisations obtenus sur la partie numérique soient répercutés sur le pendant physique pour un bénéfice réel.

Les résultats d'optimisation permettent le *Demand Response*, une modification de la consommation pour améliorer une situation globale. Ces actions prennent deux formes principales :

- le pilotage direct de l'appareil physique, soit au travers d'une commande intégrée ou externe comme une prise connectée,
- une recommandation, ou *feedback*, à l'utilisateur en charge du site en lui communiquant les nouveaux horaires et paramètres éventuels de fonctionnement de l'appareil.

Le pilotage direct est très intrusif, nous recommandons de le limiter à des appareils non critiques et pas en lien direct avec les activités métiers des entreprises. Nos expérimentations se sont concentrées sur du pilotage de moyen de stockage de l'énergie, ayant un impact uniquement économique. Comme décrit au chapitre 2 Contexte section -section 1, les activités d'une entreprise et leur organisation peuvent avoir des enjeux très importants, notamment dans l'élevage où la moindre erreur peut engendrer la mort d'êtres vivants. C'est pourquoi notre approche préconise de conserver l'humain dans une boucle de contrôle. Plus de recherches sont en cours pour une meilleure ouverture sur un **système autonome**.

La Figure -Figure 7.9 résume l'état actuel de notre proposition

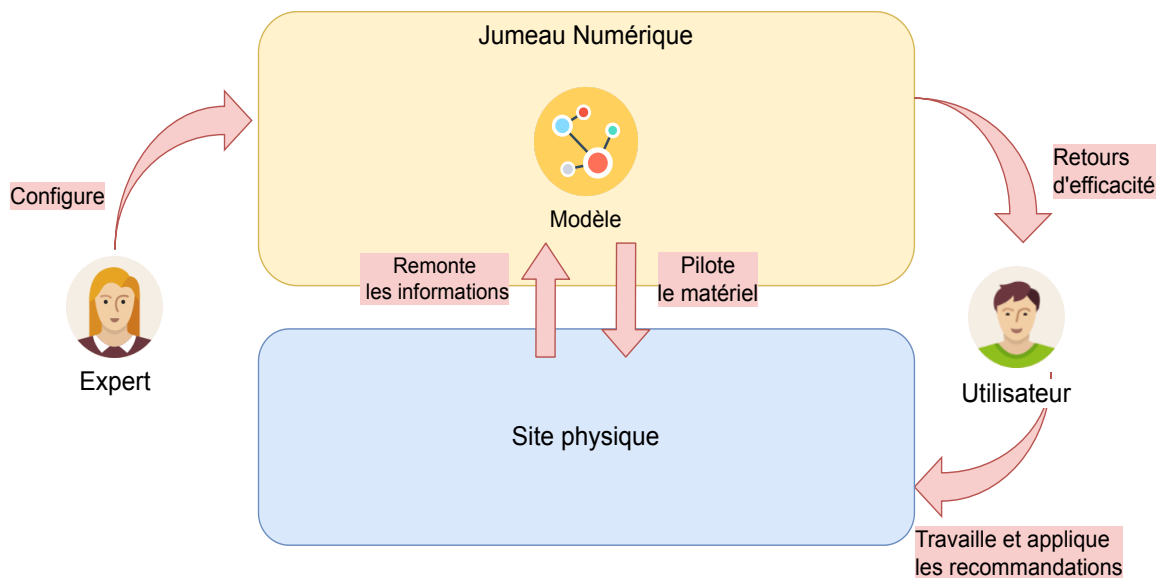


FIGURE 7.9 – Détail de la boucle de rétroaction proposée

SECTION 2

MÉTHODOLOGIE SUIVIE POUR LA CONSTRUCTION DE CETTE ABSTRACTION

Notre méthodologie pour construire cette approche a été itérative, faisant suite aux retours des experts l'utilisant. Elle s'est construite autour des fonctionnalités importantes identifiées en phase d'analyse et selon les propriétés identifiées comme absentes de la littérature.

Trois itérations principales ont été proposées aux Experts, évoluant au fil des discussions et de leurs retours. Nous les décrivons ici brièvement.

Première itération

La priorité a été la gestion des aspects consommateurs et producteurs que nous avons d'abord intégrés dans une approche très orientée *électricité*. Dans cette approche les unités sont implicites en *kilowatt-heure* (kWh) afin de faciliter les calculs et l'interprétation des résultats.

Les consommateurs et producteurs d'énergie sont séparés dans la syntaxe concrète en deux blocs différents, l'expert utilisant le langage peut spécifier un fichier texte, par exemple .csv, contenant des données issues de collectes de terrain.

Des activités peuvent être décrites pour exprimer la répétition éventuelle des fichiers bruts de données.

Bénéfices : les Experts peuvent reproduire plus facilement les calculs et les opérations qu'ils faisaient dans un tableur et obtenir les mêmes résultats plus rapidement.

Retours : seules quelques fonctionnalités sont présentes, la simulation complète à partir de fichiers, et très spécifiques à un cas d'étude. L'usage d'un langage dédié permet juste de spécifier des chemins vers des fichiers et un nombre de producteur ou consommateur.

Deuxième itération

Pour la deuxième itération, nous avons voulu intégrer plusieurs fonctionnalités importantes et étudiées par différentes parties de la communauté : la gestion des batteries et l'optimisation et de la gestion de l'énergie par *Demand Response* et en particulier la recommandation de déplacement d'activité.

La syntaxe concrète a été étendue en conséquence pour permettre la création de batteries à partir de leurs caractéristiques telles que leur capacité et puissance en charge et décharge.

L'idée d'utiliser un *coût* pour guider l'optimisation des simulations était déjà présente dans l'itération précédente puisqu'il s'agit d'un principe de base de l'utilisation d'heuristiques pour améliorer l'efficacité d'algorithme de recherches.

Suite aux entretiens avec les utilisateurs gestionnaires de site industriel des cas plus complexes de **variabilité** afin d'exprimer des répétitions de motifs séparés d'une pause par exemple. À partir de

cette itération, nous avons donc proposé une composition complète des activités.

Également, les aspects relatifs à la **flexibilité** des activités ont été pris compte, fondés sur les entretiens réalisés et en vue d'être utilisés pour déterminer les meilleurs horaires bénéficiant au système dans sa globalité.

Bénéfices : cette nouvelle itération permet d'estimer l'utilisation de moyens de stockage à partir de leur description, c'est un aspect déterminant pour un Expert.

Cette étape a également servi de démonstrateur en suivant en temps réel l'évolution d'un site expérimental industriel et en proposant des déplacements permettant d'optimiser les cycles de charge d'un moyen de stockage. Ce démonstrateur est détaillé dans le chapitre de Validation à la section - section 2.3.

Retours : à cette étape du prototype et de notre réflexion sur notre approche, la modélisation, au travers du langage dédié, permet aux experts de représenter de nombreuses situations pour lesquelles ils aimeraient simuler des changements et mesurer leurs impacts. Cette étape met avant le décalage qui peut exister lors du développement d'outils de modélisation dédiés aux experts.

Troisième itération : approche actuelle

De l'étape précédente, les retours des experts mettaient en avant le besoin d'intégrer plus d'outils d'optimisation et d'avoir plus de contrôle sur les actions possibles.

Pour faciliter la réutilisabilité et la modularité, des changements ont été apportés aux abstractions déjà en place. Notamment la fusion des abstractions correspondant aux producteurs et aux consommateurs en une notion plus générique de *Profil* de données. L'intérêt ici est de pouvoir réutiliser des *connecteurs* comme des lecteurs de fichiers bruts ou des API externes comme source de données et ainsi les réutiliser pour abstraire des appareils.

Faciliter l'utilisation de données externes est un cas d'utilisation très demandé par les Experts car très demandeur en temps dans les autres approches existantes. Proposer des mécanismes presque transparents au travers les outils est donc un aspect très important pour l'accessibilité.

À cette itération les efforts ont été concentrés sur l'optimisation au travers la modularité et l'application du patron de conception **stratégie** afin de refléter le besoin de comparaison des algorithmes. Nous avons par exemple implémenté un algorithme d'optimisation de type *bin packing* avant de proposer une adaptation d'un algorithme A^* .

Bénéfices : les simulations sont plus précises et peuvent permettre d'évaluer de nombreuses situations explorant la flexibilité des activités

Retours : contrairement à la deuxième itération cette fois des abstractions disponibles ne sont pas facilement utilisables depuis la syntaxe concrète et nécessiteraient d'avantages d'investigation et retours des Experts pour déterminer l'intégration la plus pertinente à leur présenter et quels paramètres ils souhaitent utiliser.

De plus amples retours sont décrits plus loin dans la section -section 6.

SECTION 3

DESCRIPTION DES ABSTRACTIONS

Le but du méta modèle est de fournir suffisamment d'abstractions pour représenter le plus de problèmes possible tout en étant assez expressif pour servir de base à des outils d'optimisation, de calcul ou encore de représentation et de configuration graphique.

Les choix pris pour cette conception sont motivés par l'analyse des besoins et des exigences réalisées dans le chapitre précédent.

Les sections suivantes décrivent notre proposition organisée par préoccupation, un code couleur a été utilisé pour améliorer la lisibilité des diagrammes et apporter une cohérence aux différents zooms faits sur certaines parties de modèle global. Le Tableau -table 7.1 résume ce code couleur et le groupement des préoccupations détaillées. Les textes écrits en police `machine à écrire` sont des références à des éléments du méta modèle.

TABLEAU 7.1 – Résumé du contenu et du code couleur utilisé dans le méta modèle

3.1 racine du méta modèle	3.1 méta classes centrales
3.2 exécution des modèles	3.3 et 3.4 données temporelles
3.5 a) variabilité et répétition des activités	3.5 b) flexibilité et modification des activités
3.6 et 3.7 extensibilité au niveau du méta modèle	3.8 services tiers intégration des et externes

3.1 Niveau global

Tout d'abord, la méta classe `RegulDSLModel` sert de nœud racine. Après lui, la classe `Site` est le point central d'une représentation d'une installation, elle relie les principales préoccupations : produire et consommer d'une part, stocker de l'autre, le tout spécifié par un type de ressource pour permettre des échanges et des transformations. Un diagramme illustre cette structure en Figure -Figure 7.10.

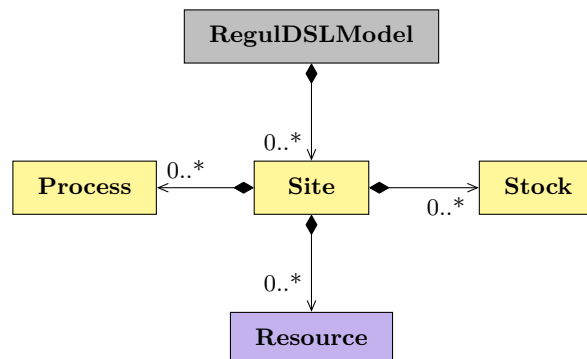


FIGURE 7.10 – Vue globale simplifiée du méta modèle et de sa racine

3.2 Description et exécution

L'**Exigence Non Fonctionnelle 1** spécifie une exécution de la représentation d'une installation complète pour simuler son comportement.

La notion de **Simulation** englobe un ensemble de **Run** servants à paramétrer le contexte d'exécution d'un **Site** : sa date et son début et sa durée s'il s'agit d'une exécution en temps réel. Une exécution définie par une durée et une date de début correspondent à une **simulation** à réaliser en accéléré, les décisions et les comportements sont simulés pour obtenir un résultat le plus vite possible. En revanche, une exécution en **temps réel** le modèle évolue à la même vitesse que sa représentation physique, sur le principe du `model@runtime`. Voir Figure -Figure 7.11.

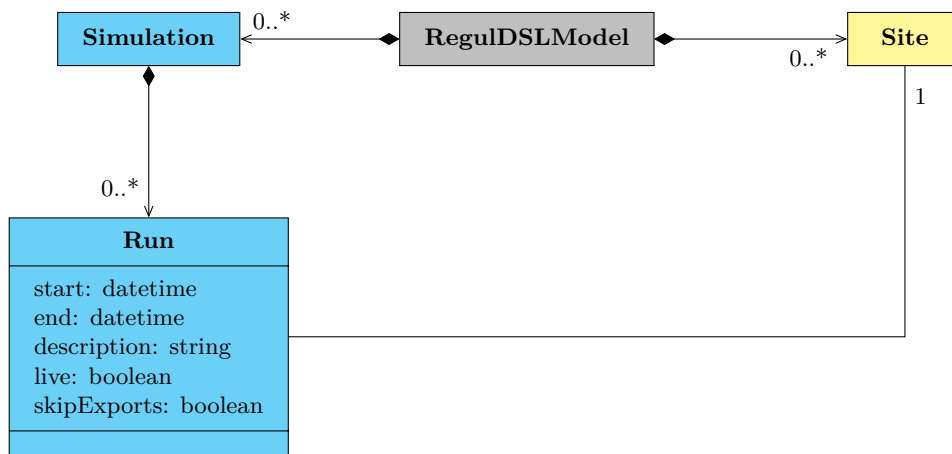


FIGURE 7.11 – Méta classes responsables de l'exécution des modèles

3.3 Représentation des machines et des données

Une modélisation système de régulation doit être en mesure de représenter les comportements énergétiques d'un vaste catalogue d'appareils.

Cette liberté d'implémentation est un point primordial pour permettre d'intégrer la diversité des machines et des appareils. Cette diversité inclut leur façon de consommer ou produire de l'énergie, tel que défini dans l'**Exigence Non Fonctionnelle 3**. Un profil de consommation de quelques minutes peut suffire à caractériser un appareil simple tandis que suivre en temps réel la production d'une source d'énergie va nécessiter un flux continu de valeurs.

Ces données sont capturées par la méta classe **Profile** ayant pour seules primitives de donner accès à des données à partir d'une date ou à un ensemble de données pour une date et un intervalle. De cette manière, le méta modèle force chaque **Profile** à se comporter comme une **série temporelle** ; demande principale de l'**Exigence Fonctionnelle 1**, libre à elle de choisir sa méthode de représentation. La section -section 3.6 détaille comment des implémentations différentes peuvent être utilisées.

Plutôt que de différencier *producteur* et *consommateur* d'énergie, qui sont les deux grandes

catégories d'appareil à représenter, la différence se fait au niveau de leur **Configuration** à l'aide des attributs **input** et **output**. Un **input** représente un besoin ou une consommation tandis qu'une **output** représente une production.

Chaque série temporelle est typée par une **Resource** pour représenter la grandeur manipulée, généralement de l'électricité, exprimée par sa quantité en kWh.

Au niveau méta modèle, aucune manière n'est fournie pour récupérer les données à exposer, mais l'extensibilité, décrite en section -section 3.6, permet d'implémenter n'importe quel connecteur souhaité : formule mathématique, fichier de données sur le disque dur, service réseau.

Pour finir, une **Configuration** définit un **coût** inhérent au fonctionnement de l'appareil qu'elle représente. Ce coût sert à représenter l'effort nécessaire à réaliser une action et peut être utilisé pour comparer des situations entre elles. Par exemple, un générateur d'énergie renouvelable aura un coût nul tandis qu'un appareil pourra utiliser sa consommation électrique comme coût. Dans la plupart des simulations énergétiques, le coût électrique est le paramètre à optimiser, mais il peut être différent, tel que mis en avant dans l'-**Exigence Fonctionnelle 5**.

L'arrivée électrique de la **grille** peut être représentée par ces mêmes abstractions, dans le cas le **coût** représentera la tarification en vigueur sur le site et la production sera l'énergie prise sur le réseau.

Toutes ces classes sont présentées dans la Figure -Figure 7.12.

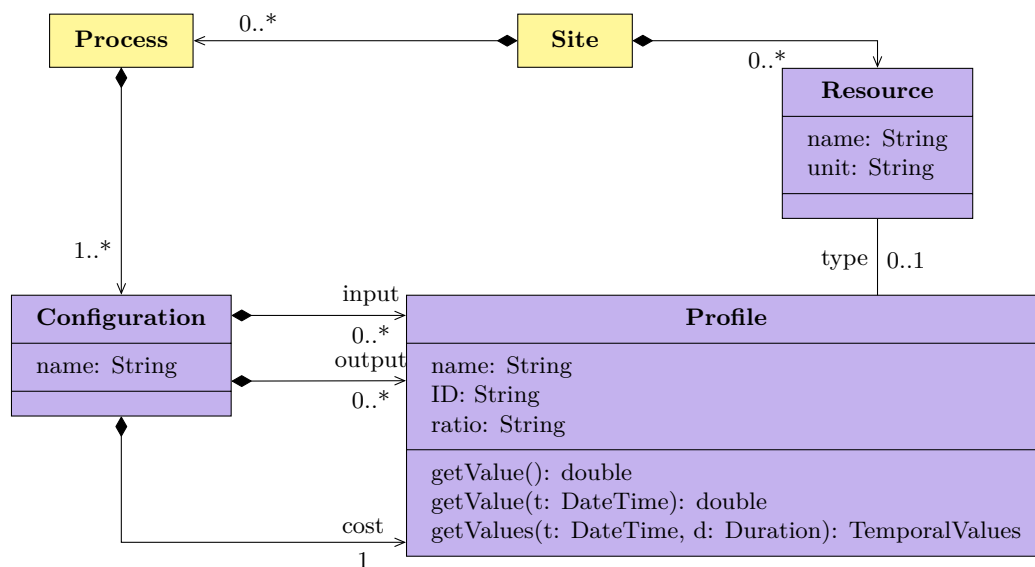


FIGURE 7.12 – Méta classes chargées de modéliser les données de consommation et production

Quelques exemples de modèles possibles correspondant à ce méta modèle :

- **output uniquement** : un générateur d'énergie renouvelable telle qu'une éolienne ou une installation photovoltaïque,

- **input uniquement** : un appareil électrique, telle qu'une machine industrielle, de l'éclairage ou de la ventilation,
- **hybride** : pour les cas plus complexes, tout appareil effectuant une transformation d'une **Resource** à une autre, par exemple une chaudière pour un ballon d'eau chaude consomme de l'électricité pour produire de l'eau chaude. La gestion de plusieurs ressources sort du périmètre initial de cette thèse, mais permet de gérer l'**Exigence Fonctionnelle 8**.

La Figure -Figure 7.13 illustre quelques usages de ces abstractions, associer un coût nul pour favoriser un producteur d'énergie et associer les mêmes valeurs de coût et de consommation pour une machine afin de favoriser lier les pics aux efforts d'optimisation.

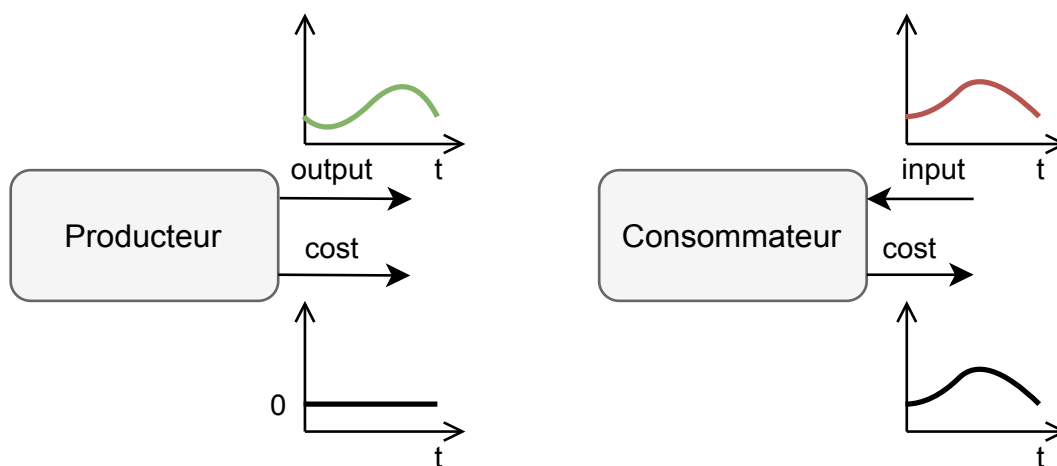


FIGURE 7.13 – Illustration des abstractions, le producteur associe un coût nul à sa production tandis que le consommateur associe un coût identique.

Notre approche initiale a été de séparer les producteurs d'énergie des consommateurs [106] pour simplifier l'usage de notre proposition. Après différents prototypes, il s'est avéré qu'unifier ces deux usages au sens d'une même activité, et ce pour deux raisons principales :

1. les experts sont habitués à exprimer des relations entre des grandeurs, principalement en thermique,
2. cela simplifie le traitement de l'optimisation lors du calcul du coût d'une activité.

Même si ce choix de configuration apparaît plus complexe qu'une simple gestion producteur/consommateur, c'est en réalité pour représenter plus facilement les manipulations de moyen de stockage.

3.4 Gestion du stockage

Le stockage de l'énergie est la deuxième préoccupation après la gestion des appareils électriques.

Les exigences **Exigence Fonctionnelle 7** et **Exigence Fonctionnelle 8** décrivent deux façons de stocker l'énergie différentes :

1. le **stockage direct** : stockage d'électricité capable de restituer également de l'électricité et
2. le **stockage indirect** : stockage d'énergie sous une autre forme comme cinétique, thermique, potentielle.

Le **Stock** est vu comme une généralisation des batteries largement détaillées dans littérature. C'est pourquoi un stock est défini par sa capacité et sa profondeur de décharge, niveau minimal de charge sans dégât ou usure prématurée pour le matériel. De plus, un paramètre est ajouté pour représenter l'usure, *wear* en anglais, engendré par l'utilisation et réduisant la capacité totale.

En dehors de ces trois caractéristiques, une batterie est définie par les propriétés suivantes, illustrées en -Figure 7.14 :

- son **type** de **Resource** stockée, par exemple la même ressource d'électricité que celle attachée aux appareils électriques et aux générateurs pour définir une batterie lithium connectée au réseau,
- ses **profils de charge et de décharge** spécifiant les puissances autorisées. Le profil **input** définit la charge et **output** la décharge.

Un moyen est donné à l'aide de la méthode **checkUp** de notifier le moyen de stockage du temps qui passe. Ainsi les aspects **temporels** tels que l'usure et l'autodécharge peuvent être modélisés si nécessaire.

3.5 Gestion des activités et de la variabilité

Les activités réalisées sur le terrain peuvent prendre beaucoup de formes différentes et vont dépendre des informations fournies à l'expert modélisant les comportements, **Exigence Fonctionnelle 2**.

Le choix de séparer la variabilité de l'expression des données, section -section 3.3, est motivé par le besoin de simplifier au maximum l'évaluation de situations différentes, **Exigence Non Fonctionnelle 3**. Pour cela, il est aisé de changer la fréquence d'une activité que modifier les données réellement utilisées pour sa modélisation.

Toute la gestion des activités est organisée autour de la méta classe **Process**.

Pour capturer un maximum d'information nécessaire à la mise en œuvre de technique de **Demande Response** deux aspects doivent être considérés :

- la **variabilité** a pour but de représenter les activités dans toutes leurs différences, en termes de *fréquence*,
- la **flexibilité** a pour but d'annoter une activité par ses contraintes d'utilisation : à quel point une activité peut être déplacée dans le temps ou altérer en termes d'intensité d'utilisation.

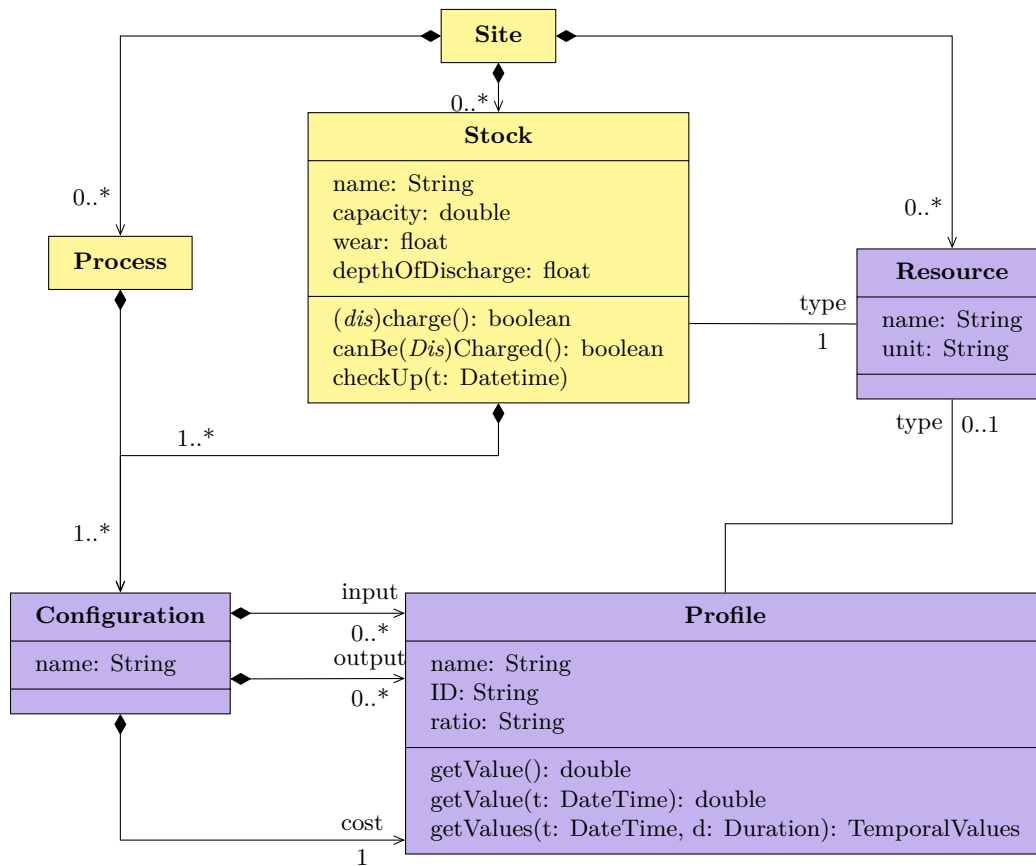


FIGURE 7.14 – La gestion du stockage est proche de celle des activités d'un point de vue méta modèle

a) Variabilité des activités

La variabilité doit être en mesure de représenter toutes les formes de représentation d'activités déjà présentes en entreprise ou dans les milieux industriels, ou du moins posséder un niveau d'expressivité équivalent. Le chapitre 4 détaille ces représentations en s'appuyant principalement sur [1]. Il en ressort que les conventions les plus répandues sont construites autour de calendriers et de définition de séquences entre les activités.

C'est pourquoi les mécaniques principales fournies sont la composition d'activités et la gestion de dépendances pour pouvoir imposer une séquentialité. La composition à l'aide de l'attribut `composed` permet la création de *méta activités* servant à englober plusieurs activités partageant des contraintes communes. Ces propriétés sont résumées dans la Figure -Figure 7.15.

La gestion de la répétition de se fait autour de la méta classe `Frequency` qui permet de distinguer deux évènements différents à capturer :

1. les tâches liées à une **action humaine** et
2. les tâches liées à un automate ou une **action automatique**.

Les tâches nécessitant une action **humaine** peuvent se résumer à une date `Unique` spécifiée par une date de début et de fin. En entreprise les activités sont généralement organisées autour des jours de la semaine. La périodicité, à l'aide de la classe `Periodic`, fournit un moyen plus facile de gérer des tâches ayant lieu tous les lundis par exemple.

Les tâches **automatiques** servent à représenter des effets sans réelles importances directes pour l'utilisateur, mais importants au regard de leur impact énergétique. Par exemple, une activité agissant sur un stock tel que décrit précédemment n'a pas pour vocation d'être décrite par l'utilisateur en termes de variabilité. Seul le résultat de son action à de l'importance : "le stock a-t-il bien été chargé dans les temps ?". Cette liberté laissée au système dans la variabilité apparaît sous l'appellation `Delegated` puisqu'il devient responsable de son placement sans contraintes utilisateurs. Le second type d'activité sans action qu'un expert peut vouloir capturer correspond à tout évènement physique externe continu. Par exemple, la production d'un générateur d'énergie renouvelable est un phénomène continu, bien que produisant de manière discontinue. Au niveau méta modèle, la méta classe `Always` permet de capturer ces évènements particuliers.

Ce choix de modélisation offre beaucoup de liberté aux utilisateurs et a donc le défaut d'autoriser beaucoup de constructions ambiguës. Par exemple la construction d'une méta activité regroupant des activités avec des contraintes contradictoires. La levée de ces ambiguïtés est laissée à la charge du développeur.

b) Flexibilité des activités

La flexibilité sert à capturer les paramètres nécessaires aux méthodes classiques de **Demand Response** : la modification de la façon de consommer l'énergie pour améliorer l'efficacité globale d'un

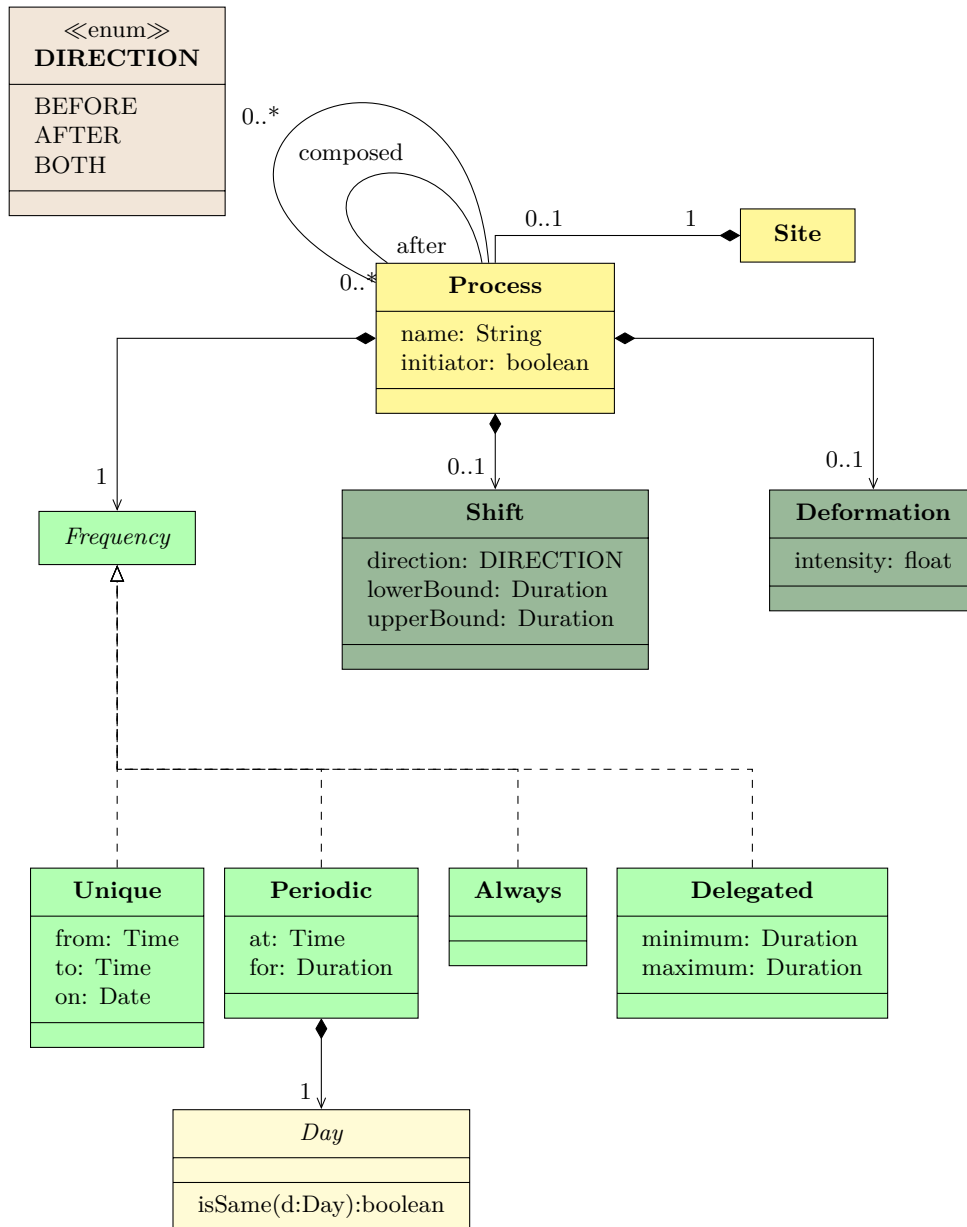


FIGURE 7.15 – Méta classes permettant de capturer la variabilité et la flexibilité des activités

système. Ces méthodes sont appliquées à travers deux axes :

1. le **déplacement d'activité**, représenté dans le méta modèle par la classe : `Shift`,
2. les modifications impactant la consommation ou toute autre forme de **déformation**, par la classe : `Deformation`.

Le **déplacement**, le calcul d'une meilleure heure de début d'une activité, est le moyen le plus répandu de faire du *Demand Response*. Qu'importe le moyen utilisé pour le calcul, ce nouvel horaire modifiera l'heure initiale pour la remplacer par une nouvelle heure plus tôt ou plus tard. Un expert doit pouvoir contraindre ce nouvel horaire pour qu'il soit :

- plus tôt uniquement, plus tard uniquement ou les deux : définit par `direction`,
- dans un intervalle d'une durée minimale et maximale : `lowerBound` et `upperBound`.

La **déformation** elle a plus une dimension exploratoire. Elle indique le degré de liberté laissé à l'optimisation pour remettre en forme la façon de consommer. L'attribut `intensity` définit le pourcentage d'énergie que l'optimisation peut déplacer sans contrainte. Ainsi une activité avec une intensité de déformation de 30% et consommant, ou produisant, 12kWh pourra voir 4kWh réaffectés sur la même plage de fonctionnement, mais à des instants différents.

3.6 Extensibilité au niveau méta modèle

Le rôle du méta modèle est de définir le domaine d'application pour des outils de simulation ou d'optimisation. Cependant, les cas d'utilisation étant très variés il est important de laisser des moyens techniques à des développeurs d'ajouter eux-mêmes des fonctionnalités sans avoir à modifier le méta modèle.

Pour être accessibles, **Exigence Non Fonctionnelle 2**, les descriptions doivent pouvoir être réutilisées, raffinées. La réalité du terrain fait qu'un expert veut pouvoir estimer rapidement la consommation d'un appareil sans avoir beaucoup d'informations techniques sur celui-ci, **Exigence Non Fonctionnelle 3**.

Avec des résultats préliminaires, il pourra estimer si des simulations plus poussées sont nécessaires. Par exemple :

- affiner la granularité de consommation d'un appareil en effectuant une mesure plus précise,
- intégrer des effets d'usure à une batterie.

Pour ces raisons, les méta classes cœurs : `Process`, `Profile` et `Stock` sont annotées comme étendant des interfaces permettant de les identifier. De cette manière, des comportements personnalisés peuvent être développés et sont à la liberté des utilisateurs et dépendent un développement limité puisque contraint par les signatures de méthodes imposées par le méta modèle.

De cette manière, un `Profile` peut être spécifié par différentes implémentations telles que :

- fournir des données fondées sur un modèle physique,

- depuis un fichier texte,
- depuis un service externe, au travers d'une API.

Les méta classes principales peuvent également être annotés d'`Attribute`, pour donner un moyen aux développeurs de passer des paramètres libres aux implémentations redéfinissant les interfaces spécifiées par le méta modèle.

Le diagramme en Figure -Figure 7.16 présente une simplification des méta classes servant à permettre cette extensibilité. D'autres méta classes sont utilisées pour faciliter la mise en œuvre du langage dédié présenté en section -section 4. Notamment, une méta classe `ProcessRef` pointant vers une instance `Process` et héritant de `AbstractProcess` permettant de cumuler la composition responsable de la création d'une instance et l'association vers des instances déjà définies ailleurs dans le modèle.

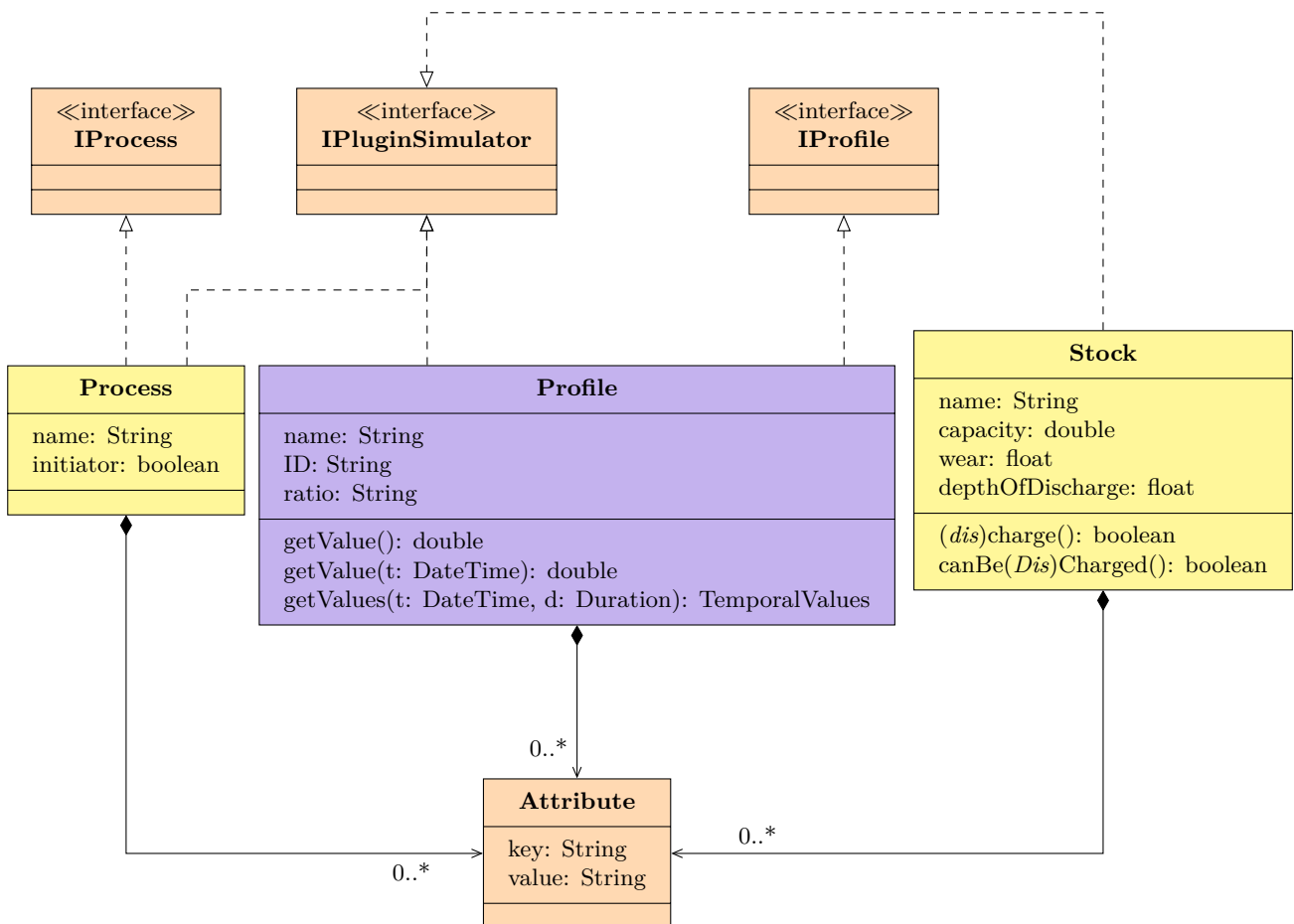


FIGURE 7.16 – Méta classes permettant de laisser à l'utilisateur la liberté d'étendre

3.7 Réutilisabilité

En partie pour les mêmes raisons que l'extensibilité, section -section 3.6, faciliter la réutilisation de "blocs" : par exemple un produit fréquemment utilisé comme une batterie ou un générateur solaire.

Un langage dédié textuel est écrit dans fichier, pour faciliter son utilisation et sa modularité une pratique classique des langages de programmation est la possibilité de définir un comportement dans un fichier et d'y faire référence à plusieurs reprises dans plusieurs fichiers. La méta classe `Include` permet de faire référence à des fichiers externes définissant des modèles, elle est présentée en Figure -Figure 7.17.

C'est une manière de masquer la complexité et d'exposer le moins de paramètres possible à l'expert.

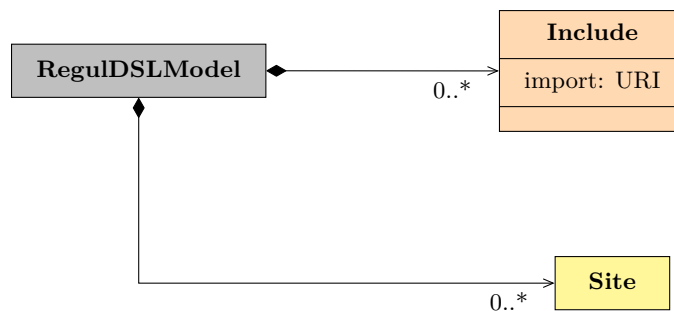


FIGURE 7.17 – Un modèle peut inclure des références externes à d'autres modèles

3.8 Prédiction et services tiers

Les services de prédiction de données permettent un apprentissage des événements et peuvent guider les outils travaillant sur le modèle, **Exigence Fonctionnelle 6**. Les méthodes d'apprentissage sont très diverses et en constantes évolutions c'est pourquoi seule une interface existe et aucune implémentation *par défaut* n'est fournie.

Par exemple, un service de prédiction météorologique sera paramétré de manière externe au modèle et implémentera l'interface `IPredictor` et sera lié à l'activité décrivant le générateur d'énergie renouvelable. Ce lien est illustré en Figure -Figure 7.18.

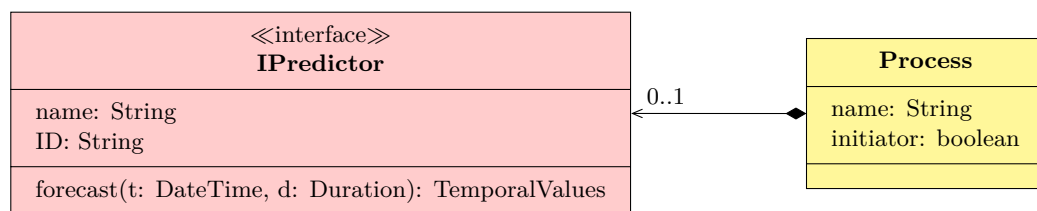


FIGURE 7.18 – Intégration de service de prédiction au niveau méta modèle

3.9 Contrôle du monde physique

Le lien entre monde physique et `model@runtime` est l'aspect qui permet de faire plus que de la simulation, mais également appliquer les méthodes de **Demand Response** de manière fiable, **Exigence Fonctionnelle 9**. En particulier, deux types d'actions sont nécessaires à cette intégration au système physique :

- un moyen d'**agir** sur les appareils physiques afin de répercuter les décisions d'optimisation telles que des déplacements d'activités,
- une **synchronisation** du model@runtime sur les valeurs du monde réel pour éventuellement corriger les imprécisions des modèles et des calculs réalisés.

L'action pour démarrer ou arrêter un appareil à une heure précise peut se faire à l'aide de l'interface `IProcessActuator`. De même, les moyens de stockage doivent être notifiés des cycles de charge et décharge à l'aide de l'interface `IStockActuator`.

La synchronisation de l'état de charge réel d'une batterie se fait à l'aide de l'interface `ISensor` afin de corriger au besoin les estimations des modèles mathématiques. Ces abstractions sont résumées en Figure -Figure 7.19.

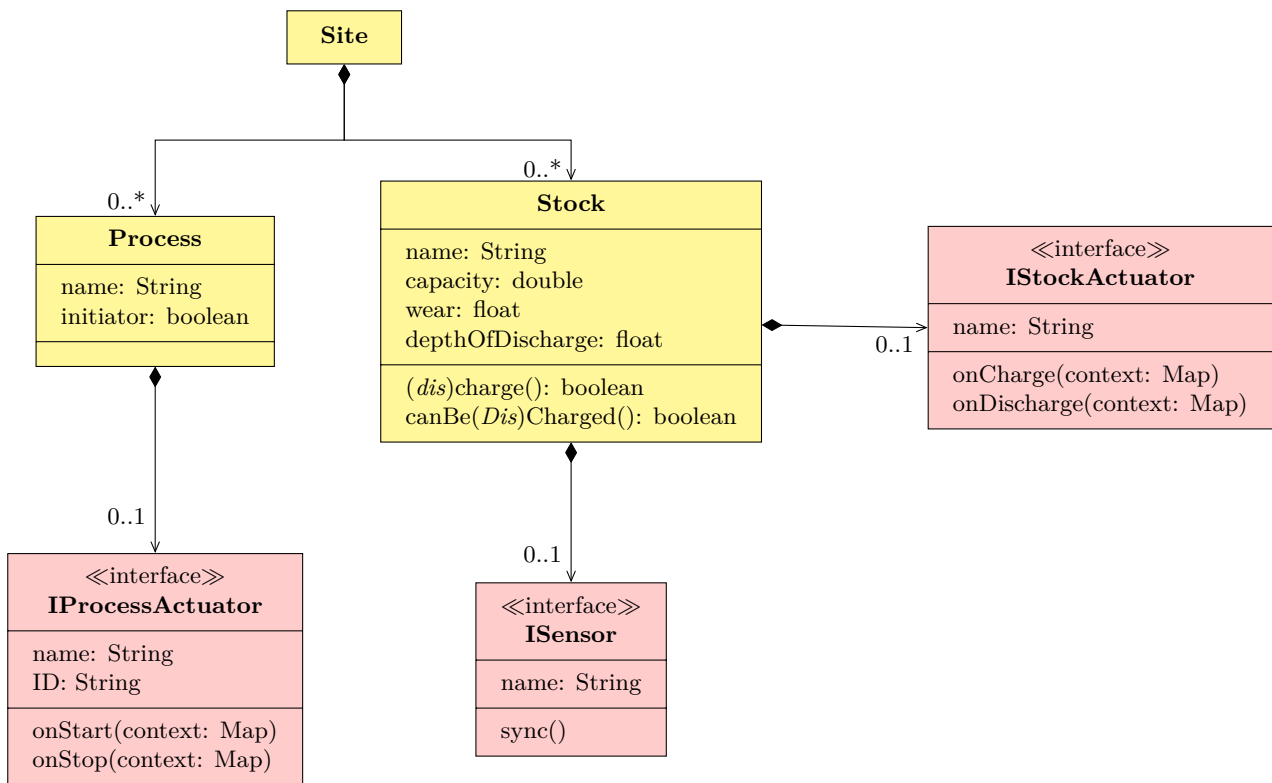


FIGURE 7.19 – Branchement du modèle au système réel physique

Dans cette section nous avons décrit en détail la majorité du méta modèle proposé afin d'illustrer les caractéristiques principales de notre proposition.

SECTION 4

REGULDSL : UN LANGAGE DÉDIÉ À LA RÉGULATION DE L'ÉNERGIE

La syntaxe concrète du langage dédié est manipulée par les Experts pour permettre la création d'instances du modèle, dans notre approche nous souhaitons pouvoir la faire évoluer sans modification du méta modèle ni de l'outillage d'optimisation pour mieux correspondre aux attentes des experts sans impacter les outils liés.

La contrainte **Exigence Non Fonctionnelle 2** décrit que les représentations et la personnalisation des simulations doivent être accessibles à une personne non informaticienne. Dans cette thèse, nous proposons un langage dédié textuel nommé RegulDSL mais un des intérêts de l'approche IDM défendue est de pouvoir le compléter d'un langage graphique ou de tout autre moyen possiblement plus adapté à des utilisateurs finaux dans certains domaines.

Dans cette section, les références à des éléments des codes sources écrits dans notre utiliseront une `police entourée`.

Cette section se décompose comme suit :

- **Philosophie** et choix de construction de la syntaxe concrète,
- **Tour d'horizon** de sa syntaxe concrète,
- **Sémantique opérationnelle**,
- **Intégration** de RegulDSL à une infrastructure de pilotage,
- **Exemples** simples d'utilisation.

4.1 Philosophie du langage

RegulDSL est un langage dédié défini par son méta modèle, *model first*, à l'inverse des langages dédiés décrits par leur grammaire et produisant un méta modèle : *grammar first*. Ce choix permet de favoriser le méta modèle et de s'en servir comme moyen central de discussion avec les différentes parties prenantes : développeurs du langage, experts utilisant les outils de modélisation pour simulation et utilisateur final des sites modélisés connaissant le mieux la représentation physique des ces modèles. Par cette approche, la syntaxe peut évoluer au fil des discussions pour mieux correspondre au vocabulaire utilisé par les experts sans impacter les abstractions choisies pour représenter les aspects métiers.

Le langage dédié est orienté :

- **description** de systèmes physiques,
- **réutilisabilité** par la définition de blocs fonctionnels correspondant à des appareils ou des générateurs,
- **paramétrage** de ces blocs pour par exemple facilement recréer une notion de gamme de produits.

4.2 Tour d'horizon de la syntaxe concrète

RegulDSL est construit autour de la notion de **Site** et de **Simulation**, un fichier écrit dans ce langage contient :

- une ou plusieurs déclarations de **Site**,
- une ou plusieurs **exécutions** : en simulation ou en temps réel pour suivre et optimiser un système réel.

Chaque **Site** définit un ensemble de sources de données, de moyens de stockage et de définition d'activités. Chaque élément est nommé de manière unique dans chaque Site et chaque Site porte également un nom unique. De cette manière, une Site A peut référencer des sources de données ou des moyens de stockage définis dans un autre Site ou dans un autre fichier RegulDSL, la structure générale d'un site est décrite en Listing - ?? 7.1 .

```

1 Site UsineA {
2   // la déclaration des éléments propre à un site industriel
3   // se fait ici
4 }
```

Listing 7.1 – Déclaration d'un site industriel nommé UsineA

La partie **Simulation** permet de spécifier des dates de début et de fin, au format imposé, ainsi que diverses options décrivant le contexte d'exécution. Ces possibilités sont illustrées dans le listing - ?? 7.2 .

```

1 Simulation {
2   run UsineA from 2019-01-01 to 2019-02-01,
3   run UsineA from 2019-01-01 to 2019-02-01 SKIP_EXPORT,
4   run UsineA LIVE
5 }
```

Listing 7.2 – Déclaration de plusieurs contexte d'exécution pour le site UsineA

Les sources de données sont abstraites par la notion de profil de données, signifiant qu'ils sont dépendant du temps qui passe. Leur déclaration se fait au travers d'un **profile** et sont assemblés dans des **configuration** pour les qualifiés : de coût, de consommation ou de production. Le listing - ?? 7.3 présente comment les profils sont assemblés en configuration pouvant être utilisé plus tard.

Pour permettre l'extension du langage, des paramètres peuvent être ajoutés entre crochets après la définition d'une source de données. Ici *externalProfile* définit un type par le mot-clé **is** nommé *plugin.externalSource* et décrit 3 paramètres : ip, user et passwd. Le fonctionnement de ces extensions est détaillé dans la section suivante.

```

1 profile profilZero
2 profile externalProfile is plugin.externalSource [ip = "0.0.0.0", user = "a", passwd = "b"]
3
4 configuration normalConfig {
5   cost profilZero
6   input {
7     profilConsommation
8   }
9   output {}
10 }
```

Listing 7.3 – Déclaration d'une configuration d'activité ayant un coût et uniquement un profil de consommation

Les activités décrivent la variabilité et la flexibilité. Au travers un `process`, il est donc possible d'exprimer une récurrence d'évènement et de lier la configuration fournissant la consommation ou la production associée. Dans le listing - ?? 7.4, l'activitéA est décrite comme fonctionnant en permanence et l'activitéC ayant lieu après la B, tous les mardis à partir de 8h et pour 130 minutes.

```

1 process activitéA {
2   configuration normalConfig
3   frequency Always
4 }
5 process activitéC {
6   after activitéB
7   configuration autreConfig
8   frequency Periodic at 08:00 for 130 minutes on Tuesday
9 }
```

Listing 7.4 – Déclaration de plusieurs activités réutilisant des configurations et définissant des récurrences d'évènements

De la même manière que les activités, les moyens de stockage manipulent une consommation lors de la charge et une production lors de la décharge. En revanche, leur variabilité n'a pas à être décrite puisque c'est le simulateur qui choisit les meilleurs moments, favorisant les critères d'optimisation. Une batterie est caractérisée par sa capacité, sa profondeur de décharge et par ses cycles de charge et décharge autorisés, le listing - ?? 7.5 présente la syntaxe minimale associée à une batterie.

```

1 Stock battery {
2   capacity 1000uh
3   depth 30%
4   configuration cycleBatterie
5 }
```

Listing 7.5 – Déclaration d'une batterie de 1000unité-heures, pouvant être des wattheures et d'une profondeur de décharge 30%, les puissances maximales de charges et décharges sont spécifiées par la configuration cycleBatterie qui n'est pas décrite

La section -section 4.4 construit plusieurs exemples et commente la syntaxe du langage. En Annexes à la section -section 1, page 209, la syntaxe concrète complète de RegulDSL est fournie dans le langage de grammaire de Xtext¹.

4.3 Sémantique opérationnelle

La structure définie par la hiérarchie d'objets `Site` permet la construction du jumeau numérique, les liens logiques entre les instances correspondent aux liens réels entre les systèmes et leurs capteurs. Les données fournies par la structure `Simulation` fournissent le contexte nécessaire à l'exécution de la simulation. Tel que présenté dans le listing - ?? 7.3, des paramètres peuvent être passés au plugin dans le cas où le plugin doit être configuré. Par exemple pour préciser un emplacement à une API externe, ou des identifiants et une adresse IP pour un capteur de consommation présent sur le réseau.

1. https://www.eclipse.org/Xtext/documentation/301_grammarlanguage.html

Exécution des simulations

Chaque source de données est décrite comme étant *productrice*, `input`, ou *consommatrice*, `output` d'énergie.

La présence de dates de début et de fin permet de borner la simulation discrète des événements, tandis que le mot-clé `LIVE` permet d'exécuter les calculs d'énergie en *temps réel*, à savoir une exécution discrète des événements puis une pause afin de faire correspondre les temps réels et simulés.

Dans les deux cas, à chaque intervalle des événements, chaque source de données en fonctionnement fournit ses valeurs. Le fonctionnement des sources de données est décrit par les activités et leur définition des horaires de fonctionnement. Une fois les données collectées un calcul d'énergie est effectué pour connaître l'équilibre du système. En cas de surplus d'énergie, les `Stock` définis peuvent être sollicités pour stocker ce surplus, à l'inverse en cas déficit ils pourront être déchargés.

Les valeurs de coûts associés à chaque source de données permettent à l'utilisateur de spécifier une priorité aux sources lors de cet équilibrage. En cas de manque d'énergie à un instant de la simulation, la source de données non utilisées au coût le plus faible sera utilisée en priorité. Ainsi, il est possible de prioriser l'usage de la grille, de batteries électriques ou de générateur diesel.

Typage et extension du langage

Chaque `profile` a un type associé. Si aucun type n'est associé, le type par défaut est `generic.profile`. En revanche, spécifier un type tel que `plugin.externalSource` permet d'étendre le comportement du simulateur en utilisant une implémentation externe. Dans cette situation, un plugin ayant cet identifiant sera interrogé à chaque étape de la simulation.

4.4 Exemples simples d'utilisation de RegulDSL

Afin d'illustrer la syntaxe du langage dédié, nous présentons ici quelques exemples de son utilisation. Les exemples choisis sont volontairement simples, des cas plus intéressants sont présentés dans le chapitre suivant.

a) Représentation et simulation d'un générateur électrique

Une des volontés défendues sur l'usage d'un langage dédié pour des experts est de pouvoir réutiliser des modèles existants. Dans cet exemple nous supposons qu'il existe un plugin avec l'identifiant `plugin.solarpanel` capable de fournir une valeur de production à partir des informations du modèle et des paramètres de `puissance` de panneau et de `surface` d'installation fournis en paramètres. Un tel plugin peut facilement être écrit à partir de formule simplifiée de modèle physique, tel qu'illustré dans le chapitre 2 Contexte.

Le Listing - ?? 7.6 illustre cet exemple, les lignes 1 à 24 décrivent le site et les lignes 25 à 27 les conditions d'exécution. Ce site d'exemple définit une ressource : l'électricité, ainsi qu'une activité de

production d'énergie. La production d'énergie est évaluée pour l'année 2019 dans la partie `Simulation` du fichier.

```

1  /**
2   * Évaluation de la production de 1 source d'énergie
3   */
4  Site sizing_site {
5      // manipule de l'électricité
6      resource Elec in Wh
7
8      // nouveau profil zéro constant sur la valeur 0
9      profile zero is plugin.constantprofile [value = "0"]
10
11     // construit un générateur en utilisant un bloc externe
12     process solarGenerator {
13         configuration nominal {
14             cost zero // ici le coût est inutile pour un générateur renouvelable
15             input {} // pas de consommation
16             output {
17                 // produit de l'électricité
18                 profile prodOutput is plugin.solarpanel of Elec [surface="100", power="300"]
19             }
20         }
21         frequency Always
22     }
23 }
24 // 1 an de simulation
25 Simulation {
26     run sizing_site from 2019-01-01 to 2020-01-01
27 }

```

Listing 7.6 – Modèle d'exécution d'un site contenant un générateur sur une année.

b) Suivi de production d'une installation simple

En dehors de la simulation de site physique, la volonté des experts est de conserver le modèle en fonctionnement pour pouvoir suivre finement l'évolution du système. Dans cette situation, le modèle est alimenté par des données extérieures à chaque étape de la discrétisation puis se mettra en pause jusqu'à la suivante. Le Listing - ?? 7.7 présente comment le paramètre de temps réel `LIVE` vient remplacer la définition de la période de simulation.

D'un point de vue langage, l'utilisation de données issues d'un capteur physique comme à l'aide du plugin `plugin.liverestsensor` n'est pas différente de celle d'un modèle physique présentée dans l'exemple précédent. Cette similarité permet aux experts de facilement changer la source d'une donnée sans impacter le reste du modèle, tel que les définitions de variabilités ou les possibles nombreuses autres activités.

Cet exemple illustre également comment la notion de plugin, implémentation choisie pour la réutilisabilité, permet de gérer une partie de l'hétérogénéité des protocoles existants. Dans cet exemple le capteur utilisé est supposé communiquer au travers d'une API REST. Les lignes 10 et 21 montrent le passage de l'unique paramètre `url` nécessaire pour configurer le plugin.

```

1  Site suivi_site {
2
3      ...
4
5      process production {
6          configuration n {
7              cost zero
8              input {}
9              output {

```

```

10         profile prod is plugin.liverestsensor of Elec [url = "http://192.168.1.2:4000/
11             api/production"]
12     }
13 }
14 frequency Always
15 }
16
17 process consommation {
18     configuration n {
19         cost zero
20         input {
21             profile prod is plugin.liverestsensor of Elec [url = "http://192.168.1.3:4000/
22                 api/consommation"]
23         }
24         output { }
25     }
26     frequency Always
27 }
28 }
29 // suivi en temps réel à l'exécution
30 Simulation {
31     run sizing_site LIVE
32 }

```

Listing 7.7 – Suivi temps réel d'un point de production et de consommation en vue d'une étude d'optimisation

c) Description de la variabilité d'une activité

L'intérêt d'un outil de simulation est de pouvoir évaluer des situations semblant similaires et des situations qui semblent optimales par exemple après une discussion entre un expert et un exploitant de site industriel.

L'expression de la variabilité permet par exemple d'évaluer l'impact des consommations d'appareil tel qu'illustré dans le tableau -table 2.1 du chapitre 2. Des activités se répétant à des fréquences différentes peuvent ainsi être exécutées dans un même contexte, face à une même production d'énergie.

Le Listing - ?? 7.8 représente un appareil à consommation constante de 500W fonctionnant de 2 heures du matin à 8 heures du matin tous les jours. Ce comportement est précisé comme **flexible** à la ligne 12. Le déplacement de cette activité est autorisé tant que la nouvelle date de début de l'activité est comprise entre et 0 et 10 heures dans le futur de la date de début initiale. Le langage permet de capturer une flexibilité autorisée pour chaque instance de cette activité. Les outils d'optimisation et de suivi de fonctionnement en temps réel sont chargés de décider si un déplacement est utile ou non, et ce pour chaque répétition.

```

1 // appareil à consommation constante
2 process technical conso_fixe {
3     configuration nominal {
4         cost zero
5         input {
6             profile consInput is plugin.constantprofile of Elec [value = "500"]
7         }
8         output {}
9     }
10 // Ici l'expert peut changer l'heure de debut et voir l'impact sur d'autoconso
11 frequency Periodic at 02:00 for 6 hour on everyday
12 shift direction AFTER between 0hour and 10hour
13 }

```


Listing 7.8 – Définition d'une activité de consommation constante avec une variabilité et une flexibilité.

d) Intégration du stockage

Le stockage est un aspect crucial pour les sites visant à améliorer leur autonomie. Les batteries sont des systèmes physiques et chimiques pouvant être très compliqués à modéliser. Dans une simulation un expert doit pouvoir avoir un aperçu de l'impact d'une batterie en fournissant seulement une description **simple** des caractéristiques d'une batterie.

Le Listing -?? 7.9 décrit une batterie autorisant des charges et des décharges de 1000W maximum pour une capacité de 6000 *unités-heure*, donc 6000 Wh. La profondeur de décharge est fixée à 20%, ce qui fait que la batterie ne devra pas descendre en dessous d'un état de charge correspondant à 1200Wh.

```
stock batterie of Elec {
  capacity 6000.0 uh
  depth 20.0 %
  configuration batterieConfig {
    cost profile zero
    input {
      profile batterieInput is plugin.constantprofile of Elec [value = "1000"]
    }
    output {
      profile batterieOutput is plugin.constantprofile of Elec [value = "1000"]
    }
  }
}
```

Listing 7.9 – Définition d'une batterie électrique à partir de quelques caractéristiques.

D'autres cas d'usage sont présentés dans le chapitre 8 : Validation.

SECTION 5

UTILISATION DE REGULDSL POUR EXPLORER L'ESPACE DE DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION ET OPTIMISER LE PILOTAGE D'UNE INSTALLATION

À l'exécution, le fichier écrit dans le langage RegulDSL est chargé et un modèle est instancié. S'il peut être chargé, ce modèle est nécessairement valide vis-à-vis des contraintes du méta modèle ce qui permet la définition d'un ensemble d'outils travaillant sur ce méta modèle.

La méthodologie que nous proposons vise principalement l'optimisation et le suivi d'installations, mais pour des questions d'accessibilité et d'évolution l'ajout d'outils doit être simplifié au maximum.

Optimisation et Demand Response

La volonté principale en termes d'optimisation est de ne pas fournir d'implémentation par défaut, mais d'être en mesure d'utiliser différentes issues de la littérature et laisser aux utilisateurs des outils de modélisation la liberté d'en implémenter un correspondant le mieux à leur situation.

Par exemple, [119] compare deux méthodes d'optimisation nommées *bin packing* : First Fit Decreasing et Best Fit. Leur conclusion est la suivante :

- **First Fit Decreasing** : montre de meilleurs temps d'exécution,
- **Best Fit** : atteint de meilleurs objectifs d'efficacité.

Notre approche est fondée sur le **patron de conception stratégie** pour permettre d'implémenter différents algorithmes de la littérature et de comparer leurs performances sur un même scénario et composition de site.

Le patron stratégie est construit autour de la classe `IPathFindingStrategy` dans la Figure - Figure 7.20. Il permet d'exposer :

- les prédictions issues des éléments du modèle : `IPredictor` servant à exposer un service tiers d'apprentissage lié à une activité et
- les prédictions internes au modèle : les estimations de l'impact des activités sur l'état de charge des différents moyens de stockage,
- les coûts associés à chaque tâche dans chaque situation.

Le résultat de ce calcul est un ensemble de décision de placement des activités, de choix de date de début, de mesures de réduction de consommation. Plus ce calcul d'optimisation est réalisé régulièrement, plus la politique de Demand Response peut être appliquée à temps.

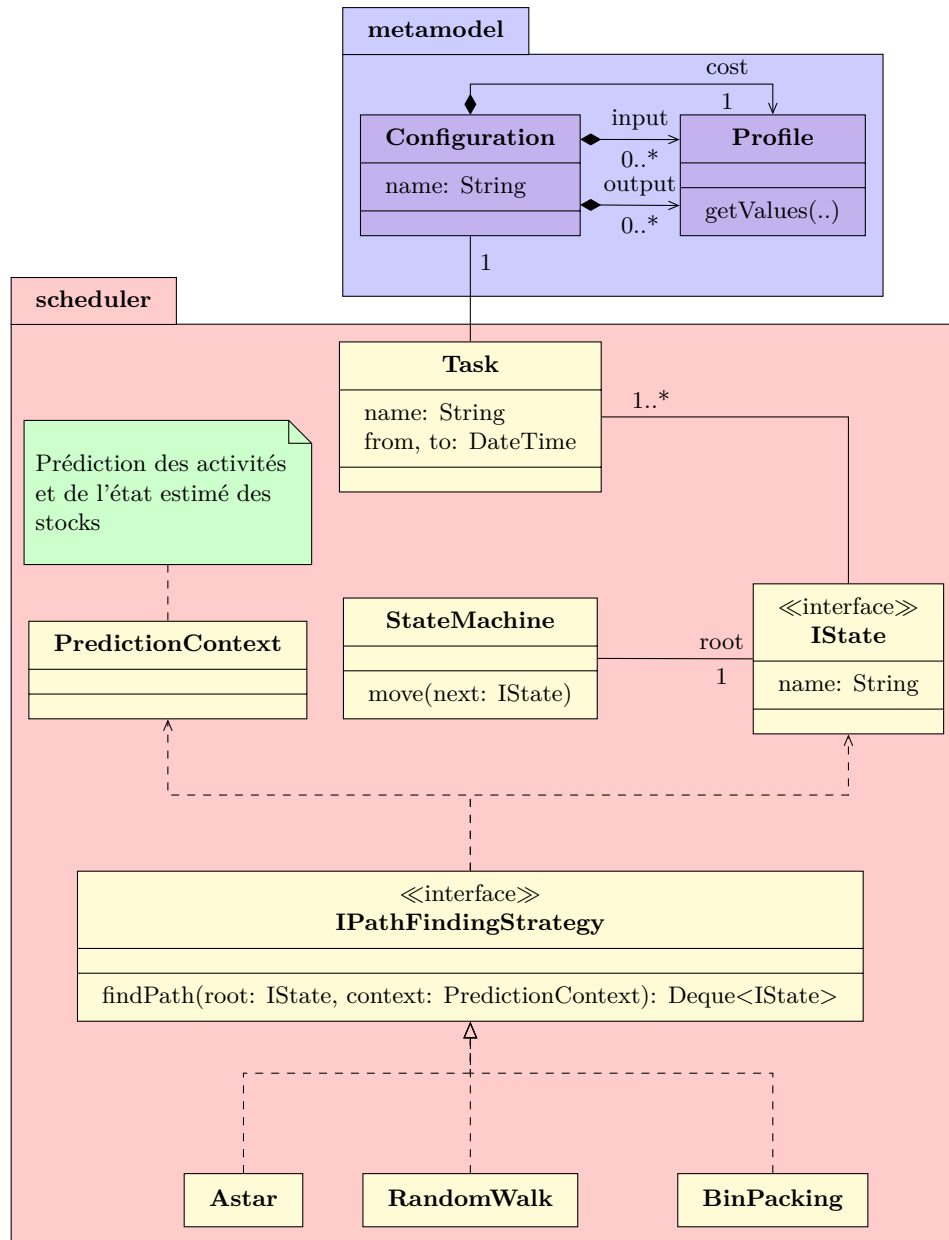


FIGURE 7.20 – Structure de l'optimisation proposée suivant le patron de conception Stratégie

SECTION 6

LIMITES ET CRITIQUES DE L'APPROCHE PROPOSÉE

Une des contributions de cette thèse est de fournir un cadre extensible pour représenter un système microgrille. Ce cadre a été défini puis validé au travers d'une implémentation décrite dans le chapitre suivant. Des choix de modélisation ont été faits pour permettre de représenter le plus de cas possible tout en restant facilement déployable sur des cas concrets. Dans cette section nous décrivons les décisions pouvant impacter l'utilisation de la méthodologie que nous proposons.

Des pistes d'amélioration sont également discutées dans le chapitre 9 à la section -section 2.

Choix de la stratégie d'optimisation

La stratégie à adopter pour guider l'optimisation ne fait pas partie du méta modèle parce qu'il ne fait pas partie du domaine à modéliser, cependant cela porte sa configuration dans les outils externes au méta modèle. Cela peut rendre opaque le changement de stratégie puisque le langage dédié est le point d'accès privilégié pour un expert.

Ajouter la notion de stratégie d'optimisation au langage, et donc au méta modèle, permettrait de plus facilement simuler un même site avec deux stratégies différentes.

Simulation discrète

La simulation repose sur une discrétisation du temps lors du calcul des échanges d'énergie. Cela permet une simplification des calculs et donc des performances théoriques plus élevées pour évaluer des scénarios longs. Le choix de nos abstractions reposant sur la séparation et l'isolation des sources de données se prête particulièrement bien à cette discrétisation puisque n'importe quel format de données peut être utilisé.

Cette simplicité et cette modularité se paient au prix d'une approximation réalisée par une somme de Riemann à pas constant. La valeur de ce pas est estimée dans notre prototype à partir des différentes sources de données. Par exemple si des données discrètes échantillonnées à un pas de 5 et 10 minutes sont utilisées, un pas constant de 5 minutes sera utilisé. Si des équations continues sont utilisées un pas de 1 minute sera utilisé. Ce choix est arbitraire, mais est en adéquation avec les travaux de [57] sur l'impact des fréquences d'acquisition dans les réseaux smartgrids. Leurs résultats montrent qu'une acquisition à la seconde, toutes les minutes, 5 minutes voire même 15 minutes ne dégrade pas la qualité des résultats.

Si cette valeur de pas n'impacte pas la précision des données, elle impacte les performances et donc la durée des simulations et le temps qu'un Expert doit attendre. Il pourrait être utile d'affiner ce choix, ou de passer à un pas variable, si les durées de simulation ne deviennent plus soutenables. Des cas d'études avec plusieurs appareils et beaucoup de flexibilité seraient à établir, car celles-là sont les situations demandant le plus de calcul.

Méthodes de Demand Response

Plusieurs techniques de Demand Response ont été explorées dans cette thèse et notre approche modulaire nous permet d'envisager de facilement ajouter de nouvelles techniques afin d'évaluer leur efficacité. Une approche peu étudiée dans la littérature est la modification d'une activité en intensité. En effet, une réduction d'intensité implique une modification de la durée initiale de l'activité prévue. La modélisation de la manière dont les activités doivent se déformer, ou non en fonction d'une éventuelle déformation fait l'objet de futurs travaux. Dans notre proposition, notre abstraction permet une augmentation linéaire de sa durée proportionnelle à sa réduction. Autrement dit, réduire de 10% la consommation d'une tâche consommant 100W et devant durer 60 minutes permet à l'optimisation de la remplacer par une tâche consommant 90W et durant 66 minutes si cela bénéficie l'objectif global.

Ces pistes sont proposées ici et ont fait l'objet de plusieurs simulations et retours de la part des Experts mais aucune validation à proprement parler par manque de cas d'étude concrets et réalistes.

Encapsulation et accessibilité des plugins

Toute notre approche est voulue pour être modulaire, chaque source de données a été définie de manière externe puis intégrée et référencée dans la syntaxe concrète.

Cette séparation complète alourdit l'accès à des fonctionnalités simples, comme la primitive pour un `ConstantProfile` est laborieuse à utiliser. Elle permet notamment la création d'un appareil consommant une valeur constante au cours du temps.

Il pourrait être nécessaire de définir un certain nombre de ces plugins indispensables et de les intégrer plus profondément à la syntaxe concrète. Techniquement, cela revient à choisir des définitions d'implémentation par défaut correspondant à des abstractions internes au modèle et donc directement utilisable par des primitives du langage.

Également, nous avons observé un impact important sur la performance globale de par cette séparation en plugins, notamment sur des accès réseau. Les choix d'implémentation, de cache et de parallélisme sont donc déterminants pour éviter une répétition des calculs pouvant être très lourds et ralentir les simulations complexes voire même empêcher le contrôle de matériel en temps réel à une granularité trop fine. Cependant, avec notre prototype et les cas d'études présentés dans cette thèse aucune situation n'était trop complexe pour être optimisée et pilotée par un RaspberryPi 3 Modèle B+.

Facilité d'évolution et traitement des erreurs

La modularité est au cœur de notre proposition comme nous avons pu le voir. Cette architecture est prévue pour voir évoluer l'ensemble de ses parties le plus facilement possible.

La contrepartie de cette évolutivité simplifiée est une grande liberté, en particulier dans la syntaxe concrète. Pour faciliter l'apprentissage et l'accessibilité à un public plus large l'accent doit être mis sur la gestion des erreurs, en particulier comment elles sont présentées à l'expert utilisant ces outils.

Dans notre prototype, un maximum d'erreurs était remonté directement dans l'éditeur afin que les experts puissent comprendre et interpréter où se situait le problème.

Le développement d'un Jumeau Numérique plus industriel nécessiterait plus de réflexion sur la gestion de ces erreurs et de l'accompagnement des Experts dans leur usage du langage dédié, par exemple au travers l'usage de fichiers d'exemple.

IMPLÉMENTATION ET VALIDATION

Résumé

Afin de valider notre approche nous avons implémenté un prototype de Jumeau Numérique outillé pour de l'optimisation d'énergie et l'aide à l'éditition de modèle. Ce prototype a été validé sur les 4 différents cas d'usage identifiés : dimensionnement d'installation, Demand Response par l'optimisation d'activités, gestion de stockage de l'énergie et suivi temps réel de site. L'éditeur dédié a été développé pour permettre aux experts d'effectuer des simulations en autonomie, les critères d'évaluation inclus l'accessibilité aux paramètres d'optimisation et la qualité des résultats obtenus.

Afin de valider notre démarche, nous proposons d'implémenter un prototype fonctionnel afin de valider chaque aspect caractéristique du Jumeau Numérique sur les cas d'études identifiés et avec la collaboration des Experts. Cette implémentation est conforme à notre approche décrite dans les chapitres 6 et 7.

Ce chapitre est structuré comme suit :

1. détail de l'**implémentation** des outils et moyens mis en œuvre,
2. **validation expérimentale** sur les 4 cas d'études retenus

SECTION 1

IMPLÉMENTATION DE NOTRE JUMEAU NUMÉRIQUE GESTIONNAIRE D'ÉNERGIE

Afin de valider l'approche proposée dans cette thèse, un prototype a été développé, composé de plusieurs implémentations :

1. un méta modèle regroupant les **abstractions**,
2. une syntaxe concrète reposant sur ces abstractions, baptisée **RegulDSL** permettant à un expert de modéliser un problème à simuler ou à exécuter,
3. un **algorithme d'optimisation** permettant de mettre en œuvre des mécanismes de Demand Response.

1.1 Méta modèle et structures de données

Les algorithmes d'optimisation et la syntaxe concrète du langage proposé reposent sur l'implémentation du méta modèle présenté dans le chapitre 7, réalisé sur la plateforme Eclipse Modeling Framework *EMF*.

Les avantages de ce choix d'implémentation sont les suivants :

- un outil de modélisation graphique facilitant la collaboration entre le développeur des outils et les Experts qui l'utiliseront,
- une génération de code pour toute la structure du méta modèle

Pour illustrer ce second point, la génération issue des abstractions présentées représente environ 25k ligne de code Java qui permet de réduire fortement la probabilité d'erreur dans la gestion des cardinalités et la cohésion des liens entre abstractions issues du modèle ou lors de son évolution pendant sa phase d'élaboration.

1.2 RegulDSL : langage et outils dédiés à l'énergie

Les outils propres au développement de langage, tels que les parser et lexer sont eux fondés sur Xtext [136], les avantages à ce choix d'implémentation sont :

- la grammaire peut évoluer indépendamment du méta modèle, dans la limite des classes définies dans celui-ci,
- la génération automatique de code à partir de la grammaire : réduction des erreurs de lexers/parser,
- beaucoup d'outils pour l'éditeur, cela permet de rapidement personnaliser un éditeur graphique avec coloration syntaxique, complétion automatique, gestion des références, outline.

Une capture d'écran de cet éditeur est présentée en Figure -Figure 8.1 et les fonctions de chaque vue sont illustrées en Figure -Figure 8.2.

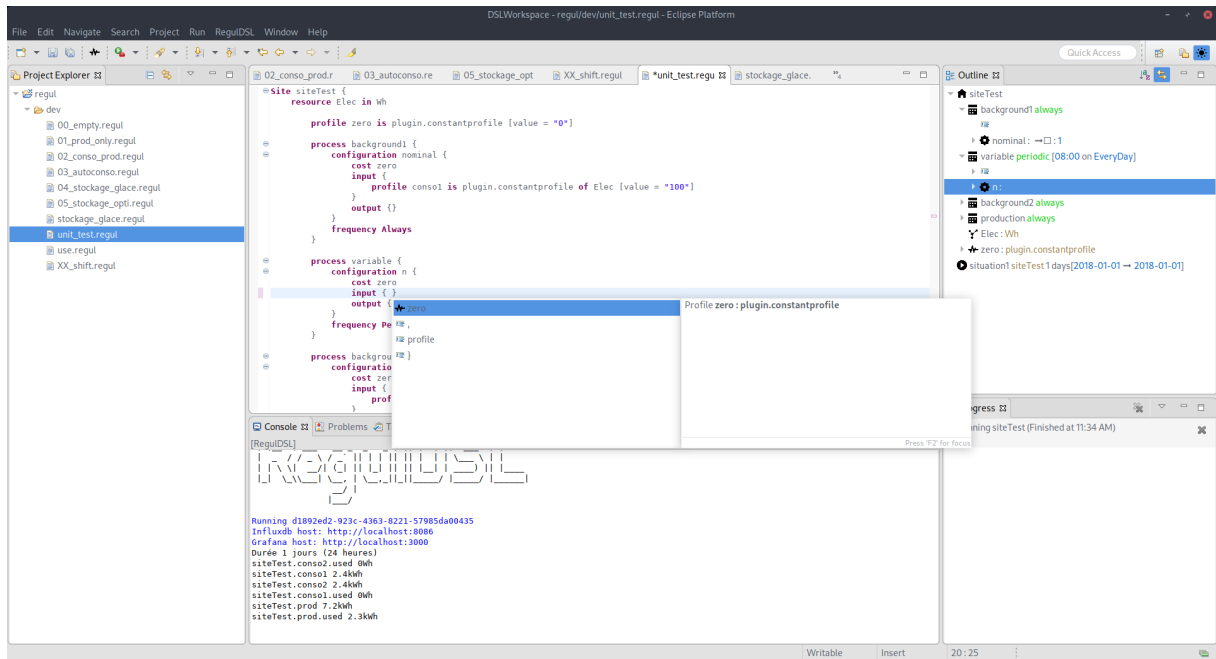


FIGURE 8.1 – Illustration de l'éditeur dédié au langage ReguDSL développé dans cette thèse

Pour améliorer encore l'accessibilité, ces outils permettent d'intégrer un outil de modélisation graphique tel que Sirius [132], ce qui permettrait de fournir un outil encore plus personnalisé, et ainsi faciliter la création d'activités et de leur séquentialité par exemple.

1.2.1 Modularité logicielle

La fondation Eclipse a fait le choix d'utiliser l'environnement OSGi [56] pour permettre le chargement dynamique de ses plugins. Pour Eclipse, l'intégralité de ses fonctionnalités est fournie sous la forme de plugin, responsable de l'ajout de fonctionnalités spécifiques.

Le chargement des plugins est simplifié par la référence à un identifiant unique au travers de l'éditeur par l'Expert. Cette référence permet de chargement implicite du plugin et permet donc un comportement spécifique de l'abstraction.

Le Listing - ?? 8.1 présente une fonction de coût variable en fonction du temps. En France, les contrats de fourniture d'électricité proposent généralement un coût plus élevé le jour, les heures pleines, que la nuit, les heures creuses. Cette distinction s'implémente en moins de 20 lignes de Java et modélise ici 12c€ par kWh en heures creuses et 15.2c€ en heures pleines. Cette tarification est représentative d'un cas réel et illustre un besoin typique de comparaison à l'usage de grille comme source d'énergie.

L'utilisation des outils au travers de l'éditeur est le cas d'usage typique, cependant il est possible de vouloir exécuter de nombreuses simulations sans avoir besoin d'un outil d'aide à l'édition. Dans cette situation, le mécanisme de chargement dynamique de classes `ServiceLoader` est utilisé et n'impacte en rien le reste des fonctionnalités.

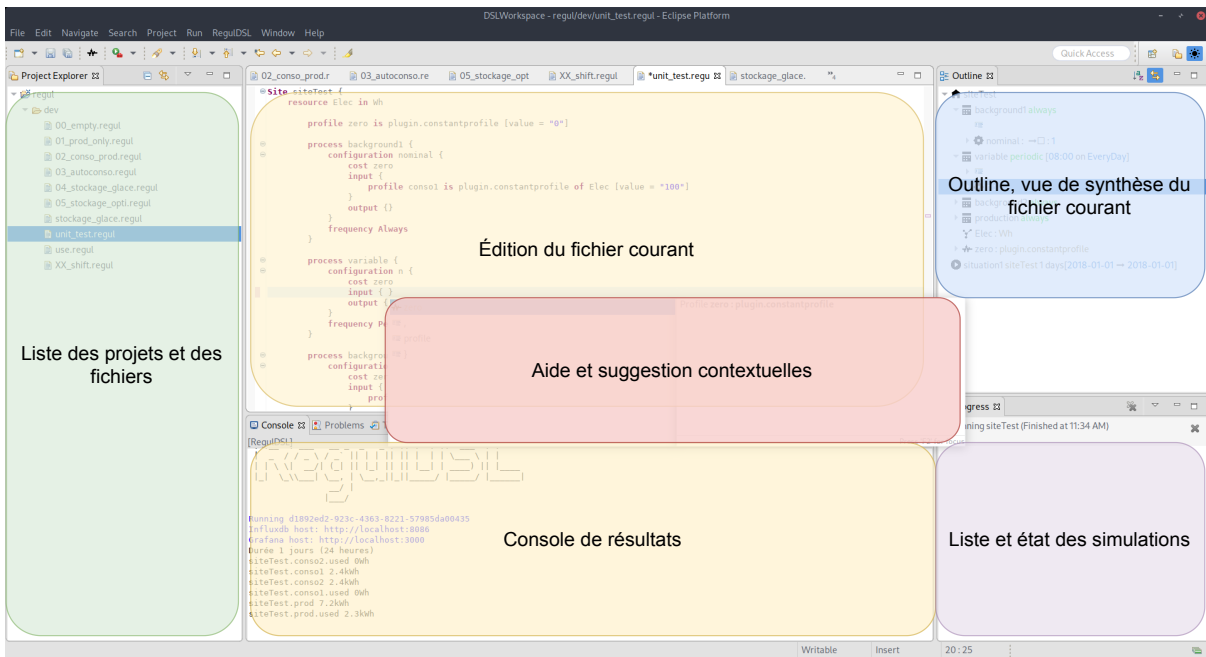


FIGURE 8.2 – Détail des vues de l'éditeur dédié au langage ReguDSL en Figure -Figure 8.1

```

1 public class EDFBleu extends ProfileImpl {
2
3     public EDFBleu() {
4         this.setID("edf.bleu");
5     }
6
7     @Override
8     public double getValue(ZonedDateTime t) {
9         LocalTime morning = LocalTime.of(6, 0);
10        LocalTime evening = LocalTime.of(22, 0);
11        LocalTime tTime = t.toLocalTime();
12
13        if (morning.isBefore(tTime) && evening.isAfter(tTime)) {
14            return 0.12010f;
15        } else {
16            return 0.15250f;
17        }
18    }
19 }

```

Listing 8.1 – Implémentation d'un plugin pour représenter le coût variable d'un contrat de fourniture d'électricité

Optimisation

L'implémentation d'un nouvel algorithme d'optimisation est facilitée par l'architecture logicielle. Nous présentons ici une implémentation d'optimisation minimale, dans le Listing - ?? 8.2. En particulier, les lignes 10 et 23 sont chargées de choisir la prochaine décision au coût le plus faible.

Cette implémentation a l'avantage de calculer rapidement une solution, mais elle ne sera pas garantie optimale parce qu'elle ne considère que le meilleur déplacement d'activité séquentiellement, sans chercher à optimiser la situation globale.

```

1 public class ShortestPathFirst implements IPathFindingStrategy {
2
3     @Override
4     public Deque<IState> findPath(IState root, PredictionContext context) {
5         Deque<IState> ret = new LinkedList<>();
6         if (!root.getPossibleNext().isEmpty()) {
7
8             Optional<IState> ois = root.getPossibleNext().stream()
9                 .filter(istate -> istate.getStart().isAfter(context.getDateOfPrediction()))
10                .reduce((a, b) -> a.getCost(context) < b.getCost(context) ? a : b);
11
12             IState next = null;
13             if (ois.isPresent()) {
14                 next = ois.get();
15                 ret.add(next);
16             }
17
18             while (next != null) {
19                 ret.addLast(next);
20                 if (!next.getPossibleNext().isEmpty()) {
21                     next = next.getPossibleNext().stream()
22                         .filter(istate -> istate.getStart().isAfter(context.getDateOfPrediction()))
23                         .reduce((a,b) -> a.getCost(context) < b.getCost(context) ? a : b).get();
24                 } else {
25                     next = null;
26                 }
27             }
28         }
29         return ret;
30     }
31 }

```

Listing 8.2 – Implémentation d'une stratégie minimisant le coût de la prochaine décision à court terme

1.2.2 Visualisation et stockage des résultats

Les données calculées pendant les simulations ou le suivi d'installation sont stockées en RAM pour pouvoir fournir les indicateurs importants aux experts en fin d'exécution : taux d'autonomie, autoconsommation et coût total. Dans certaines situations, le résultat final n'est pas la seule information importante, le comportement de chaque sous-système pendant la simulation l'est tout autant.

Nous avons fait le choix de stocker les données produites par les mesures et la simulation dans une base de données orientée séries temporelles : Influxdb¹. Influxdb permet de facilement déployer une base de données et une API simple d'utilisation pour y insérer des données. Pour la visualisation, le besoin de **manipuler** les données stockées pour explorer en détail le comportement du système simulé a motivé le choix de Grafana². Grafana permet la visualisation des données au travers de *tableaux de bord* constitués : de graphes, tableaux, jauges d'indication. La Figure -Figure 8.5 du cas d'usage n° 4 est issue de l'outil Grafana.

L'exigence d'accessibilité et de facilité d'utilisation pour l'expert -**Exigence Non Fonctionnelle 2** a également motivé le choix de Grafana. La liberté de nommage des producteurs et consommateurs d'énergie ainsi que de contenu des simulations fait que les données à visualiser sont très différentes d'une simulation à l'autre.

Les tableaux de bord peuvent être générés au début de la simulation pour être configurés exac-

1. <https://www.influxdata.com/products/influxdb-overview/>

2. <https://grafana.com>

tement pour le contenu choisi par l'expert. De cette manière, les tableaux de bord sont générés puis alimentés en données pendant le fonctionnement des outils. Pour permettre pleinement cette automatisation, des contributions au projet open source d'intégration de Grafana³ ont été réalisées.

Les raisons de ce choix de technologie sont :

- performance et facilité d'utilisation dans des projets manipulant des séries temporelles,
- la possibilité de configurer en amont les tableaux de bord pour que l'expert n'ait pas ou très peu de configuration.

3. <https://github.com/appnexus/grafana-api-java-client>

SECTION 2

VALIDATION

Notre **méthodologie** de validation pour les cas d'études est présentée dans le chapitre 6. Cette section détaille le matériel utilisé lors de la validation puis le détail des 4 cas d'usage choisis et leurs évaluations.

Matériel utilisé

Pour permettre la construction et la validation du prototype de notre approche, du matériel a été utilisé :

- le matériel utilisé par les experts pour réaliser les simulations et les modélisations,
- le matériel déployé pour réaliser le pilotage des sites industriels et la collecte de données.

Matériel utilisé en simulation et modélisation

Les Experts utilisent des ordinateurs de bureau *classiques*, voici brièvement leur configuration : processeur Intel Core i5-6600 cadencé à 3.30GHz, équipé de 8Go de RAM et le tout utilisant une version de Windows 10 à jour au moment de l'utilisation.

Les mêmes ordinateurs ont été utilisés pour réaliser les méthodes actuelles et la proposition de notre méthode.

Matériel déployé sur le terrain

Différents **compteurs énergétiques**, mono ou triphasés en fonction des situations, ont été installés. Ils sont tous certifiés MID, *Measuring Instruments Directive*, ce qui signifie qu'ils sont reconnus suffisamment fiables et précis pour facturer et sont reliés à des passerelles communicantes.

Pour appliquer les actions d'optimisation, des **actionneurs** ont été installés là où cela était nécessaire, sous la forme d'une passerelle communicante et d'une liaison série pour l'appareil considéré.

Les passerelles de communication ainsi que le nœud réalisant l'optimisation utilisent la même référence d'*ordinateur* : un RaspberryPi 3 modèle B+⁴. Cette décision est un choix pratique, car les passerelles sont surdimensionnées, elles se contentent de traduire une consigne reçue sur IP en une consigne sur un protocole série, différente pour chaque appareil piloté.

Dans l'absolu, d'un point de vue architectural rien n'empêche de déporter les calculs d'optimisation dans un serveur, par exemple, et de garder un nœud passerelle pour transmettre les consignes prises aux différentes passerelles contrôlant les appareils et relevant les consommations. Cela permettrait d'envisager un partage d'information entre des simulations de site et moins de contraintes matérielles en termes de performance disponible.

4. Site du constructeur : <https://www.raspberrypi.org/>

2.1 Cas d'usage n° 1 : Dimensionnement de générateur solaire

Plus de détails sur ce cas d'usage et ses exigences métiers au chapitre 6, section -section 2.4 -?? a) en page 125.

Résumé : Dimensionner un appareil producteur d'énergie nécessite d'analyser les échanges d'énergie sur un site en fonctionnement, incluant production et consommation. Pour être efficace, l'énergie produite doit être consommée localement au même instant puisque la revente d'énergie est moins avantageuse que l'effacement de la consommation. Le prix de revente de surplus peut être deux fois plus faible que le prix d'achat depuis la grille.

Ici nous allons choisir un contrat classique de fourniture d'énergie, à savoir : 0.12010€ /kWh en heures creuses, entre 22 heures et 6 heures toute l'année et 0.15250€ /kWh en heures pleines le reste du temps. De plus, nous pouvons considérer un contrat de rachat du surplus non autoconsommé au tarif réglementé en vigueur de 0.06€ /kWh.

a) Détail de la procédure

Pour savoir si un dimensionnement est valide, un expert regarde plusieurs indicateurs de performance énergétique. L'autonomie et l'autoconsommation vont représenter l'utilisation faite des ressources. Maximiser ces deux indicateurs n'est pas suffisant dans notre cas puisque le système retenu doit être viable **économiquement**.

Le paramètre économique prend en compte des facteurs externes : le coût du matériel installé, la consommation électrique issue de la grille, dépendant d'un contrat d'achat, les éventuelles reventes de surplus, eux aussi soumis à un contrat, de rachat cette fois.

La méthode de recherche la plus simple et retenue ici est la suivante :

- sélectionner un ensemble de matériel possible : une puissance de générateur solaire,
- évaluer sa production et son impact sur l'autonomie et l'autoconsommation,
- en déduire la performance économique du site.

L'expert veut pouvoir choisir l'équilibre entre rentabilité et performance.

b) Autres approches existantes

En dehors de l'approche actuelle d'une entreprise spécialisée, présentée dans le chapitre 4 à la section -section 2, d'autres approches industrielles existent. Les installateurs de solutions d'énergie renouvelable proposent généralement des simulateurs énergétiques en lignes.

Exemple des résultats obtenus après une recherche pour "*simulateur installation panneaux solaires*" :

- <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaïques/simulateur-panneau-solaire>,
- <http://www.simulationphotovoltaïque.fr/> et

— <https://www.solaris-store.com/80-simulateur-solaire>.

Leur objectif est également d'estimer une rentabilité économique à l'installation de moyens de production. Le point commun de ces simulateurs est qu'ils sont orientés pour les particuliers. Puisque chaque particulier à des usages différents leur méthode de calcul est uniquement fondée sur des profils types de consommation journalière. Ils fonctionnent en calculant une production représentative pour quelques journées dans l'année et construisent un profil de consommation à partir d'une liste d'appareils présents dans le foyer pour les plus précis. Les moins précis demandent uniquement le type de chauffage, gaz ou électrique, et le nombre de personnes habitant dans le foyer.

Ces méthodes sont donc très approximatives sur l'estimation de la consommation. Elles sont d'ailleurs généralement une première étape avant une estimation fondée sur la consommation mensuelle facturée à l'utilisateur. Là encore, il s'agit d'une très forte estimation puisque les variations journalières ne sont pas visibles sur ce type d'enregistrement.

Aucune solution n'est satisfaisante d'un point de vue technique, mais cela reste très accessible.

c) Notre méthode

Approche : Nous proposons ici l'utilisation de notre langage dédié ReguDSL et des outils de calcul développés pour l'exécuter. Nous représentons Listing - ?? 8.3 les paramètres d'entrées et illustrer un cas à simuler et évaluer ses performances. L'expert décrit sa situation initiale dans l'éditeur ReguDSL, il peut être guidé par l'aide contextuelle et l'auto complétion en cas d'erreur de syntaxe.

Pour contrer le problème d'alignement des fichiers bruts, l'expert choisit les dates de début et de fin de simulation dans la partie exécution du modèle, à la ligne 58 `run`. Les fichiers peuvent contenir plus de valeurs avant et après sans impacter les résultats.

Le calcul d'intégration réalisé à chaque pas de la simulation discrète utilise la même méthode que celle du tableur. Pour de petits intervalles, de l'ordre de la minute, cette méthode de calcul est acceptable puisque l'approximation produite reste très faible et de plus certains compteurs effectuent préalablement une moyenne des valeurs physiques réelles et actualisent cette valeur de manière régulière.

En particulier, la ligne 33 montre l'usage de l'`Attribut alter` utilisé par le plugin `timedcsvreader` pour modifier la valeur de chaque ligne du fichier fourni à l'aide de l'`Attribut file`. Ici $x \times 1.20$ signifie que pour chaque valeur lue x , $x \times 1.20$ est utilisé à la place. L'implémentation est fondée sur l'outil Groovy⁵ pour permettre une exécution de formule arbitraire. C'est un moyen simple de fournir à l'expert une liberté pour créer des scénarios différents fondés sur ses données. Il peut facilement appliquer des coefficients pour représenter des changements de matériel. Par exemple $x \times 2$ pour représenter une installation deux fois plus grande ou $x \times 1.20$ pour un gain de 20%, quel que soit l'origine de ce gain.

```

1  /**
2   * Simulation de 1 consommateur, 1 tracker et du réseau grid
3   * L'objectif est d'évaluer l'autoconsommation de l'ensemble
4   *
5   * @author Alexandre
6   * @version 0.14.3

```

5. <https://groovy-lang.org/>

```

7  */
8
9  Site siteCasUsage1 {
10     resource Elec in Wh
11
12     profile zero is plugin.constantprofile [value = "0"]
13
14     process technical consommationGlobale {
15         configuration c1 {
16             cost zero
17             input {
18                 profile consInput is plugin.timedcsvreader of Elec
19                 [file = "./consommation.csv"]
20             }
21             output {}
22         }
23         frequency Always
24     }
25
26     // la production du tracker est stockées dans le fichier production.csv
27     process generateurSolaire {
28         configuration nominal {
29             cost zero
30             input {}
31             output {
32                 profile prod is plugin.timedcsvreader of Elec
33                 [ file = "./production.csv", alter = "x*1.20" ]
34             }
35         }
36         frequency Always
37     }
38
39     // Au besoin on utilise EDF
40     process edf {
41         configuration c {
42             // coût du tarif bleu pour privilégier le tracker
43             cost profile tarifbleu is edf.bleu
44             input {}
45             output {
46                 // valeur max de 16kW
47                 profile grid is plugin.constantprofile of Elec [value = "16000"]
48             }
49         }
50         // Utilisation par plage de 1 minute minimum, sans maximum
51         frequency Delegated [ 1 minute; ]
52         // On autorise de réduire l'amplitude à 100% pour "produire" n'importe quelle valeur
53         // entre 0 et 16kW
54         reduction 100.0 %
55     }
56 }
57 Simulation {
58     run siteCasUsage1 from 2019-01-01 to 2019-01-07 SKIP_GRAPH_EXPORT scenario1
59 }

```

Listing 8.3 – Modélisation d'un scénario à évaluer fondé sur des fichiers de production et consommation obtenus sur le terrain ou à l'aide de services tiers.

Limites et évolutions possibles : Chaque fichier, ou plus précisément bloc `Site`, représente un scénario, une configuration du système global. Pour balayer toutes les situations souhaitées, plusieurs exécutions sont nécessaires. Cette situation pourrait être améliorée en générant ces fichiers depuis des paramètres de plus haut niveau fournis par l'expert par exemple.

L'intégration à un outil d'optimisation linéaire pourrait être facilement implémentable et faciliterait cette recherche de paramètre de dimensions optimales. Pour le moment, les efforts de développement se sont concentrés sur la réalisation d'un outil plus flexible, performant et évolutif que *l'approche actuelle*.

L'utilisation de fichier brut utilise le connecteur `plugin.timedcsvreader` pour lire les lignes d'un

fichier présent sur le disque. Une évolution possible pouvant améliorer l'accessibilité de cet outil est de développer un connecteur pour utiliser directement une base de données météorologique et ainsi simplifier la collecte et mise en commun des mesures effectuées par les Experts.

Le profil de coût utilisé pour gérer la grille, ligne 43 du -?? 8.3, est défini de façon externe par un développeur puis ajouté au registre et référencé tel quel par l'Expert. De cette manière la complexité des plages horaires et des tarifs est masquée. La syntaxe concrète et les abstractions sont prévues pour permettre le passage d'information, une solution hybride pourrait être imaginée pour donner plus de facilité aux Experts en cas de modification mineure.

Une telle adaptation pourrait se faire par l'ajout de l'`Attribut` pour définir le tarif "heure pleine, heure creuse" à l'aide de la syntaxe suivante : `[hp=0.15 hc=0.12]`.

d) Évaluation

Nous basons ici nos **critères d'évaluation** sur les exigences définies auprès des experts et nous allons donc chercher à mesurer le bénéfice de notre approche en termes de performance et d'accessibilité.

Performance : Les résultats de production et consommation sont similaires puisque la méthode de calcul est la même et les fichiers également, les différences viennent uniquement dans les arrondis lors de l'intégration de la puissance en énergie. Là où la solution fondée tableurs était instantanée, notre approche prend quelques minutes en tout pour charger les fichiers et appliquer les éventuelles modifications demandées par l'expert. Cette durée reste inférieure à la limite estimée selon l'**Exigence Non Fonctionnelle 1**.

Situation initiale : Il n'est pas toujours possible d'avoir l'oracle de la facture du fournisseur d'énergie pour plusieurs raisons :

- les factures émises sont au mieux mensuelles et peuvent être fondées sur des estimations de consommation et non sur des relevées du compteur,
- le compteur mesure la consommation globale de l'installation, donc ce n'est pas applicable à une étude ciblée sur quelques bâtiments par exemple.

Nous nous intéressons à 1 simulation particulière, celle pour une installation de 15kWc de panneau solaire. Dans les deux situations, la production totale calculée est de 27.2MWh, la consommation totale elle reste toujours 191MWh. L'énergie solaire directement consommée sur place s'élève à 26.9MWh soit 98.87% d'autoconsommation et 14.09% d'autonomie.

En revanche, la difficulté d'intégrer directement le calcul du coût au tableur, **Exigence Non Fonctionnelle 2**, ne permet de calculer de manière fiable la facture de consommation pour la grille. De plus, l'absence de coût d'achat de l'électricité dans le tableur permet uniquement une estimation du bénéfice à espérer en cas de vente de surplus. Ici le choix d'un générateur solaire permet d'estimer que les 27MWh consommés localement l'ont été pendant les périodes d'*heures pleines*.

Compte tenu de la consommation, un tarif adapté a été choisi⁶, il se situe aux alentours de 3.113c€/kWh en heures creuses et 4.474c€/kWh en heures pleines, environ 4 fois moins cher qu'un tarif pour particulier.

En intégrant les variations de coût, il est possible de calculer que les 300kWh du surplus peuvent être achetés au tarif réglementaire, soit 180€. La prise en compte complète des tarifs d'heures pleines et creuses permet de calculer 6614.11€ de consommation totale, que la production locale réduit à 5774.24€. Le Tableau 8.1 résume les chiffres obtenus par les deux approches.

La différence principale de performance tient donc dans la difficulté pour un tableur de facilement effectuer des opérations concernant des plages horaires particulières.

TABLEAU 8.1 – Comparatifs des résultats de simulation, les estimations sont marquées d'un astérisque *

	Approche actuelle	Approche ReguDSL
Production (MWh)	27.2	27.2
Consommation (MWh)	191	191
Consommation locale (MWh)	27	27
Valorisation surplus (€)	180	180
Facture grille (€)	6470.86* $\delta = 10.77\%$	5774.24

Accessibilité : Le développement d'un outil spécifique permet de capturer les calculs répétitifs de la précédente approche et de les intégrer à la chaîne de traitement des données. Cela facilite réellement l'accessibilité et la prise en main d'un outil de simulation, définie dans l'**Exigence Non Fonctionnelle 2** et l'**Exigence Non Fonctionnelle 3**. Par exemple si des valeurs sont manquantes dans les fichiers bruts, notre approche calcule une valeur approchée fondée sur la moyenne des valeurs $t - 1$ et $t + 1$, si la période manquante est courte. Si la période manquante est trop longue, cette approximation ne suffit et une autre méthode serait à utiliser. Ces cas étant très rares, retirer entièrement les moments où trop de données sont manquantes n'est pas impactant pour l'expert.

Le Tableau 8.2 reprend tous ces critères comparatifs de l'approche actuelle utilisée en entreprise et notre proposition appliquée à ce cas d'usage.

6. Détail du tarification adapté à la consommation choisie : <https://www.fournisseurs-electricite.com/edf/pro/tarifs-reglementes/jaune>

TABLEAU 8.2 – Résumé de l'évaluation du cas d'étude n° 1 de dimensionnement

Critère	Approche actuelle	Approche ReguIDSL
Pré-traitement des fichiers	recherche manuelle d'erreur, possiblement plusieurs minutes	automatique, transparent pour l'expert
Simulation de 1 scénario	instantané mais la partie économique est limitée	quelques minutes, tous les coûts d'échange sont considérés
Modification pour 1 nouveau scénario	rapide par l'ajout d'une colonne	rapide et facilité par le DSL
Recherche de l'optimal	manuelle après n simulations et analyses, difficile à optimiser	manuelle après n simulations et analyses, facilement automatisable

2.2 Cas d'usage n° 2 : Optimisation de l'organisation des activités

Plus de détails sur ce cas d'usage et ses exigences métiers au chapitre 6, section -section 2.4 -?? b) en page 126.

Résumé : Partant d'une organisation des activités d'une entreprise, un Expert souhaite proposer des modifications de planning rentable économiquement respectant les contraintes de l'Utilisateur. Les modifications peuvent dépendre de l'environnement de l'entreprise ou des conditions météorologiques.

L'Utilisateur communique ses contraintes ainsi que la liberté qu'il a dans certaines de ses activités à l'Expert. L'expert connaît le métier, il peut également ajouter ou modifier ces contraintes, principalement pour des modifications ne demandent d'actions humaines.

a) Détail de la procédure

Pour ce cas d'usage, nous considérons l'installation suivante sur un site industriel :

- un tracker solaire dont la production a été mesurée pendant au moins 1 an,
- une consommation constante d'une machine : 2000W, utilisée matin et soir et pouvant être déplacée de quelques heures,
- le reste de la consommation du site industriel considérée comme ne pouvant être modifiée mesurée également pendant au moins 1 an,
- un contrat de fourniture d'électricité à 0.12€/kWh entre 22 heures et 7 heures et 0.15€/kWh le reste du temps.

L'optimisation économique va consister à réduire au maximum le surplus de production en déplaçant lorsque cela est possible l'activité du matin ou du soir pendant la journée. Un faux positif : déplacer par exemple l'activité du matin de 6 heures à 10 heures alors qu'il n'y a pas de surplus est pénalisant puisque l'énergie viendra de la grille au prix élevé de 0.15€/kWh alors que ne rien faire aurait permis d'utiliser en partie le tarif d'heures creuses à 0.12€/kWh.

b) Autres approches existantes

En dehors de l'approche actuelle d'une entreprise spécialisée, présentée dans le chapitre 4 à la section -section 2, d'autres approches existent.

La littérature propose différents algorithmes d'optimisation issus principalement de l'optimisation système tels que le Bin Packing ou l'Earliest Deadline First. Ces approches cherchent à modifier les dates de débuts des activités pour permettre une meilleure efficacité globale, mais sont spécifiques à un cas d'étude précis et à un sous-ensemble du matériel possible d'installer.

c) Notre méthode

Modélisation : Nous proposons d'étendre la modélisation du cas d'usage 1 pour y ajouter la nouvelle activité à optimiser et ses contraintes laissant apparaître la variabilité possible. Le Listing -

?? 8.4 présente donc la modélisation qu'un Expert pourrait proposer. Elle diffère du cas précédent par l'ajout de deux `process` définissant les activités du matin et du soir et pouvant être déplacées pour être réalisées indifféremment plus tôt ou plus tard dans la limite de 4 heures de déplacement.

```

1  /**
2  * Simulation de 1 consommation variable , 1 consommation de "bruit",
3  * 1 tracker et du réseau grille
4  *
5  * L'objectif est de connaître la rentabilité maximale en effectuant
6  * les meilleurs déplacements de l'activité variable
7  *
8  * @author Alexandre
9  * @version 0.14.3
10 */
11
12 Site siteCasUsage2 {
13     resource Elec in Wh
14
15     profile zero is plugin.constantprofile [value = "0"]
16
17     process technical conso_matin {
18         configuration c1 {
19             cost zero
20             input {
21                 profile consolInput_matin is plugin.constantprofile of Elec [value = "2000"]
22             }
23             output {}
24         }
25         // fréquence
26         frequency Periodic at 06:00 for 6 hour on everyday
27         // variabilité
28         shift direction BOTH between 0hour and 4hour
29     }
30
31     process technical conso_soir {
32         configuration c1 {
33             cost zero
34             input {
35                 profile consolInput_soir is plugin.constantprofile of Elec [value = "2000"]
36             }
37             output {}
38         }
39         frequency Periodic at 18:00 for 6 hour on everyday
40         shift direction BOTH between 0hour and 4hour
41     }
42
43     // -----
44     // ----- le reste est identique au Cas 1 -----
45     // -----
46
47     process technical consommateur {
48         configuration c1 {
49             cost zero
50             input {
51                 profile consolInput is plugin.timedcsvreader of Elec
52                 [file = "./consommation.csv"]
53             }
54             output {}
55         }
56         frequency Always
57     }
58
59     process generateur {
60         configuration nominal {
61             cost zero
62             input {}
63             output {
64                 profile prod is plugin.timedcsvreader of Elec
65                 [file = "./production.csv"]
66             }
67         }
68         frequency Always
69     }
70
71     // Au besoin on utilise EDF

```

```

72 | process edf {
73 |     configuration c {
74 |         // coût du tarif bleu pour privilégier le tracker
75 |         cost profile tarifbleu is edf.bleu
76 |         input {}
77 |         output {
78 |             // valeur max de 16kW
79 |             profile grid is plugin.constantprofile of Elec [value = "16000"]
80 |         }
81 |     }
82 |     // Utilisation par plage de 1 minute minimum, sans maximum
83 |     frequency Delegated [ 1 minute; ]
84 |     // On autorise de réduire l'amplitude à 100% pour "produire" n'importe quelle valeur
85 |     // entre 0 et 16kW
86 |     reduction 100.0 %
87 | }
88 |
89 | Simulation {
90 |     run siteCasUsage2 from 2018-01-01 to 2019-01-01 SKIP_GRAPH_EXPORT example
91 | }

```

Listing 8.4 – Modélisation de la variabilité d'une activité à consommation constante dans une installation ayant un tracker solaire et d'autres consommations.

Limites de la modélisation : L'expression de la variabilité crée un ensemble de scénarios possibles considérant chaque déplacement respectant les contraintes. Cet ensemble peut vite devenir trop grand et rendre impossible la recherche de chemin optimal si plusieurs événements se produisent : si chaque scénario est trop similaire aux autres ou si beaucoup de variabilité est exprimée dans la représentation.

Pour mitiger ce problème, plusieurs pistes sont envisagées :

- choisir un pas minimum d'intervalle entre les scénarios proposés par exemple si l'heure initiale est à 08:00 dans une fourchette de 1 heure autour, conserver uniquement les éventualités de 07:00, 07:30, 08:00, 08:30 et 09:00 permet de limiter l'espace de recherche tout en évaluant des scénarios pertinents à proposer à l'Utilisateur, comparativement à choisir un pas inférieur à 30 minutes,
- la combinaison d'activités flexibles ayant lieu au même moment augmente le nombre de scénarios à évaluer par le produit de ces scénarios. Même en limitant la complexité produite par chaque activité le résultat peut produire un ensemble trop complexe à étudier. Pour ces situations, des approches de parcours approximatives peuvent être envisagées. La solution est donc de choisir un compromis de temps de calcul au lieu d'une solution optimale.

Proposition d'optimisation

La structure définie par les abstractions du DSL contient la variabilité et la flexibilité. De cette structure est dérivé l'ensemble de choix possibles sous la forme d'une machine à états comme déjà proposée dans la littérature. Chaque état représente une décision différente de placement de la réalisation d'une activité. De cette manière, chaque scénario peut être facilement évalué.

Aucun algorithme n'est en mesure de prendre en compte la diversité et l'hétérogénéité du matériel présent dans les entreprises et les industries.

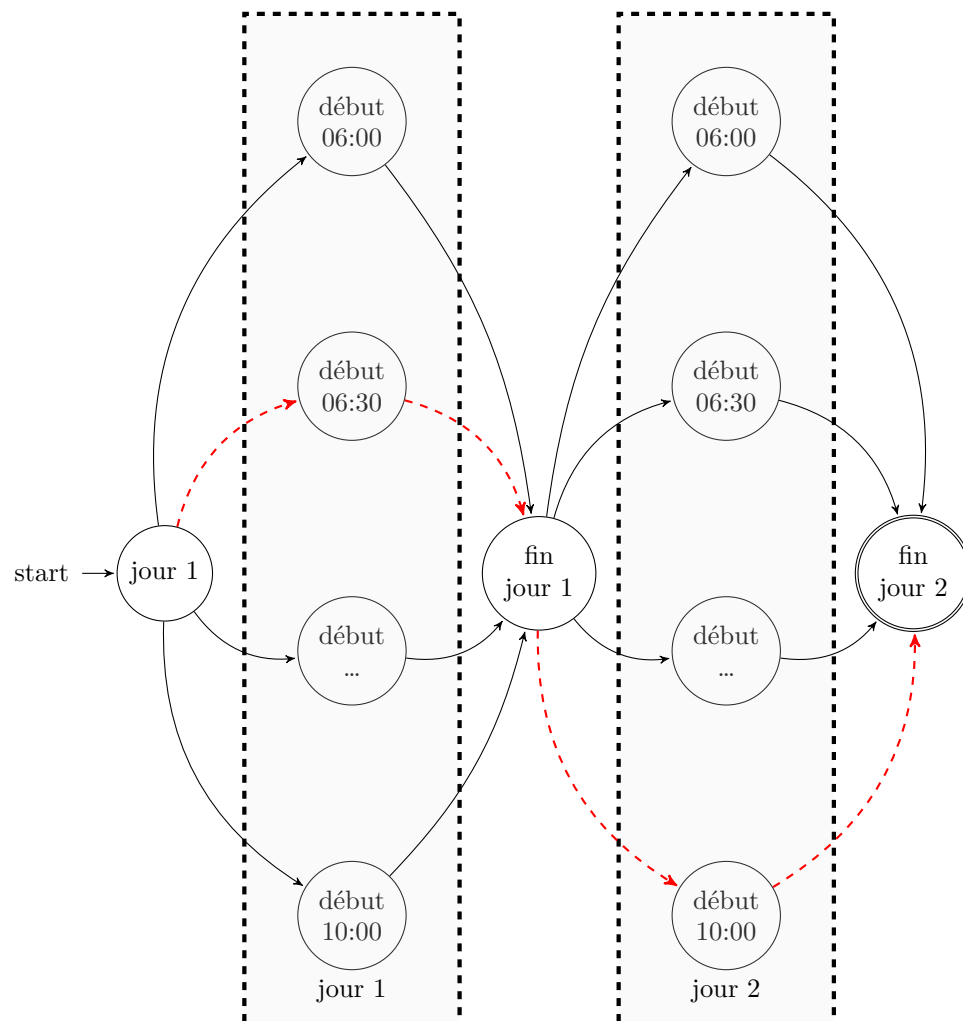


FIGURE 8.3 – Représentation d'une partie du problème d'optimisation décrit dans le DSL en Listing - ?? 7.8. Les différents cas possibles de début de l'activité du matin sont autant de choix possibles pour la phase d'optimisation. Un chemin optimisé est représenté en pointillés rouges

d) Évaluation

Les différences d'approches, tant sur la modélisation que sur la prise en compte des contraintes des activités rendent difficiles la comparaison des performances d'optimisation. Le manque de données ouvertes et de structure commune d'activités à optimiser limite les points de comparaison pertinents.

Dans l'approche actuelle, un surplus moyen journalier peut être calculé et donne une indication à l'Expert de l'effort de *Demand Response* à mettre en œuvre. Cela lui fournit une indication sur les appareils à cibler pour maximiser ses efforts.

Dans notre approche, à partir des contraintes fournies, l'optimisation évalue un ensemble de scénarios et détermine si les déplacements sont pertinents ou non pour chaque période indépendamment les uns des autres. Les déplacements et les gains engendrés sont donc calculés en prenant en compte les variations environnementales de chaque journée et la mise en œuvre est fournie en communiquant l'appareil exact à modifier ainsi que la nouvelle période de fonctionnement optimale.

2.3 Cas d'usage n° 3 : Gestion du stockage

Plus de détails sur ce cas d'usage et ses exigences métiers au chapitre 6, section -section 2.4 -?? c) en page 126.

Résumé : L'ajout de moyen de stockage est un moyen techniquement simple pour aligner la production d'énergie avec la consommation. Seulement, le prix d'achat et les contraintes d'utilisation permettant de maintenir une certaine longévité rendent leur intégration difficile au sein d'un Jumeau Numérique.

L'utilisation de batterie comme tampon d'énergie peut entrer en conflit avec d'autres méthodes de *Demand Response* quant à leur priorité. Une mauvaise gestion des priorités nuit à la rentabilité économique de l'ensemble.

a) Détail de la procédure

L'Expert considère un site dont la consommation est connue et fournie cumulant 200MWh. Ce site va être équipé de 90kWc de panneaux solaires.

La batterie choisie à évaluer a une capacité de 30kWh et est de type lithium, pour suivre les recommandations de cette technologie le seuil de profondeur de décharge est fixé à 10% de la capacité maximale. Un onduleur d'une puissance maximale de 20kW est utilisé pour connecter la batterie au réseau électrique.

L'objectif ici est de simuler le comportement de cette batterie afin d'estimer, plus tard par l'Expert, son impact sur l'économie du site.

b) Notre méthode

Nous proposons de reprendre la modélisation présentée dans le cas d'usage numéro 1 et de lui ajouter une abstraction de stockage, paramétré pour se comporter comme la batterie présentée ici.

La modélisation présentée dans le Listing -?? 8.5 reprend donc la modélisation du premier cas étendu des lignes 44 à 57 pour décrire la batterie. Cette dernière repose sur l'abstraction du stock, définit par sa capacité maximale et minimale au travers la profondeur de décharge. La limite de puissance imposée par l'onduleur est reprise deux fois pour contraindre la charge ainsi que la décharge.

```

1 Site siteCasUsage3 {
2   resource Elec in Wh
3
4   profile zero is plugin.constantprofile [value = "0"]
5
6
7   process technical consommationGlobale {
8     configuration c1 {
9       cost zero
10      input {
11        profile consInput is plugin.timedcsvreader of Elec
12        [file = "../consommation.csv"]
13      }
14      output {}
15    }
16  }

```

```

17     frequency Always
18 }
19
20 process generateurSolaire {
21     configuration nominal {
22         cost zero
23         input {}
24         output {
25             profile prod is plugin.timedcsvreader of Elec
26             [ file = "../production.csv" ]
27         }
28     }
29     frequency Always
30 }
31
32 process edf {
33     configuration c {
34         cost profile tarifbleu is edf.bleu
35         input {}
36         output {
37             profile grid is plugin.constantprofile of Elec [value = "16000"]
38         }
39     }
40     frequency Delegated [ 1 minute ; ]
41     reduction 100.0 %
42 }
43
44 stock batterie of Elec {
45     capacity 30000.0 uh
46     wear 2.0 %/year
47     depth 10.0 %
48     configuration batterieConfig {
49         cost zero
50         input {
51             profile batterieInput is plugin.constantprofile of Elec [value = "20000"]
52         }
53         output {
54             profile batterieOutput is plugin.constantprofile of Elec [value = "20000"]
55         }
56     }
57 }
58
59
60 }
61 Simulation {
62     run siteCasUsage3 from 2017-01-01 to 2018-01-01 SKIP_GRAPH_EXPORT casusage3
63 }

```

Listing 8.5 – Modélisation d'un scénario à évaluer contenant 1 producteur et 1 consommateur fondés sur des fichiers issus de relevés, ainsi qu'une batterie définie par ses caractéristiques.

Limites de la modélisation : De par la généralité des abstractions de stockage, l'application à des batteries électrochimiques rend redondant certains paramètres, tels que les puissances de charge et de décharge, en lignes 50 à 55 du Listing - ?? 8.5, symétriques pour ce type de batterie. Une simplification utilisant uniquement la valeur du paramètre permettrait de gagner en lisibilité pour l'Expert.

Les scénarios d'usure ne sont pas les mêmes pour toutes batteries et d'autres paramètres viennent complexifier encore cette représentation tel que l'auto décharge. La diminution progressive de l'état de charge d'une batterie avec le temps et ce même sans utilisation. Ces comportements sont implémentés en interne des abstractions et ne sont pas exposés pour le moment aux Experts, faute de représentation simple à leur présenter. Ces aspects seront le sujet de futurs travaux.

c) Évaluation

La même situation a été simulée par les deux approches et les résultats sont synthétisés dans le Tableau 8.3. Les approximations de calcul expliquent la différence du taux d'autonomie de la situation initiale, c'est pourquoi les taux suivants sont annotés de leur différence par rapport à ce cas initial. L'ajout d'une batterie donne des résultats globalement similaires dans les deux approches, excepté que l'approche actuelle ne considère qu'une partie des paramètres et que notamment les limites imposées par l'onduleur sont ignorées. Ces absences ne sont pas visibles au regard d'un taux d'autonomie global, mais vont impacter des simulations plus longues, de plusieurs années par exemple, et finissent par fausser des études de rentabilité.

TABLEAU 8.3 – Comparatifs de l'impact de l'installation d'une batterie sur une installation équipée de panneaux solaires dans 2 approches différentes

	Approche actuelle	Approche ReguDSL
Autonomie initiale	31.7	34
Autonomie avec batterie	$36.2\delta + 14.2\%$	$38.6\delta + 13.5\%$
Nombre de cycle	300	307.7
Autonomie avec batterie et déplacement	$42.9\delta + 35.3\%$	$41.7\delta + 22.7\%$

Afin d'illustrer la limite de l'approche actuelle, une simulation a été réalisée en considérant la mise en œuvre de déplacements d'activités en plus de l'ajout de la batterie. Dans cette situation, une activité représentant environ 5% de la consommation électrique quotidienne est autorisée à être déplacée au sein de cette même journée si ce déplacement améliore l'efficacité énergétique globale. Ces contraintes supplémentaires montrent les limites de la simulation dans un tableur en donnant des résultats qu'un Expert juge beaucoup trop optimistes, et donc pas réaliste de ce que donnerait la mise en œuvre réelle de ces pratiques.

2.4 Cas d'usage n° 4 : Suivi temps réel

Plus de détails sur ce cas d'usage et ses exigences métiers au chapitre 6, section -section 2.4 -?? d) en page 127.

Résumé : La collecte de données de consommation réelles issue du terrain est généralement la première étape d'une étude énergétique tandis que le pilotage automatique d'un appareil la dernière. Ces préoccupations sont liées aux appareils de mesure et à leur manière de communiquer.

a) Détail de la procédure

Pour ce dernier cas d'usage, nous avons choisi l'optimisation d'un moyen de stockage particulier se comportant comme une batterie. Une activité fixe pendant la journée utilise ce stockage et l'Expert souhaite utiliser la flexibilité dans les périodes de charge du stockage pour optimiser sa consommation d'électricité.

L'objectif est d'optimiser une activité et de pouvoir en voir les effets directement en instrumentant les équipements pour permettre leur pilotage.

b) Notre méthode

Chaque activité est liée au matériel physique qu'elle représente. Notamment, la ligne 29 du Listing -?? 8.6 permet d'intégrer un capteur communicant en Rest directement comme étant une source de données du Jumeau Numérique. À l'inverse, la ligne 21 définit un actionneur permettant de transmettre les consignes d'utilisation au matériel réel, sur une communication série dans notre cas. La gestion des protocoles et leur hétérogénéité sont capturées par les plugins et seuls les paramètres pertinents, les adresses IP des nœuds, sont spécifiés par l'Expert.

L'abstraction du générateur d'énergie est annotée des informations nécessaires à l'usage d'un service externe de prédiction de données. Les lignes 33 à 38 fournissent les informations nécessaires au plugin spécifique `plugin.weatherforecastpredictor` pour interroger un service tiers capable d'estimer la production d'énergie. Le service externe est déjà entraîné et possède un minimum d'information relative à l'installation ayant pour identifiant 313, notamment sa coordonnée GPS. Le paramètre `power` permet ici de calibrer la prédiction en fonction de la taille du générateur solaire présent et d'estimer sa production à partir des données météorologiques à sa disposition.

Il est à noter qu'à la différence des autres modélisations, celle que nous proposons ici est en temps réel, comme l'indique le paramètre `live` à la ligne 50. Cela signifie que la simulation est utilisée pour évaluer les changements des prochaines heures de manière proactive pour estimer les meilleures prises de décision.

```

1 Site siteCasUsage4 {
2   resource Element in kg
3   resource ElementStocké in kg
4   resource Elec in kWh
5
6   // Seules parties pertinentes à ce cas d'usage sont montrées dans ce fichier
7   // le réel des éléments manipulés ont été remplacés pour ne pas divulguer
8   // d'information confidentielle

```

```

9
10 process creation {
11     configuration nominal {
12         cost empty
13         input {
14             profile creaConso is plugin.constantprofile of Elec [value = "3500"]
15         }
16         output {
17             profile crea is plugin.constantprofile of Element [value = "43.3"]
18         }
19     }
20     frequency Delegated [ 5 minute ; ]
21     actuator { stockactuator is plugin.stockactuator [target = "http://localhost:5000/"] }
22 }
23
24 process tracker {
25     configuration nominal {
26         cost empty
27         input { }
28         output {
29             profile prod is plugin.liverestsensor of Elec [url = "http://localhost:4000/
30                 api/production"]]
31         }
32     frequency Always
33     predictor {
34         meteo is plugin.weatherforecastpredictor
35         [
36             plant_id = "313",
37             power = "22000",
38         ]
39     }
40 }
41
42 stock tank of ElementStocké {
43     capacity 640.0 uh
44     depth 30 %
45     configuration tankConfig {
46         cost profile n
47         input {
48             profile tankInput is plugin.constantprofile of Element [value = "250"]
49         }
50         output {
51             profile tankOutput is plugin.constantprofile of ElementStocké [value = "250"]
52         }
53     }
54 }
55
56 }
57 Simulation {
58     run siteCasUsage4 live liveSimulation
59 }

```

Listing 8.6 – Extrait de la modélisation permettant le suivi et le pilotage d'un site industriel expérimental

Limite : Dans l'état actuel de notre prototype, aucun lien n'est établi entre l'abstraction du stock et l'élément physique lui-même, bien que l'abstraction `ISensor` existe pour cela. Les approximations peuvent provoquer un décalage entre l'état simulé et l'état réel qu'il faudrait corriger par un capteur permettant d'actualiser la valeur estimée par la valeur réelle mesurée de manière régulière. L'ajout de cet élément permettrait ainsi de fermer la **boucle de rétroaction**.

De manière générale, dans notre approche un minimum d'information est échangé entre le Jumeau Numérique et les différents nœuds composant les liens avec le monde physique. En cas de défaillance, aucune information n'est remontée pour permettre une quelconque réparation, comme prévu dans les **systèmes autonomiques**, ou à minima prise en compte afin d'adapter les comportements futurs.



FIGURE 8.5 – Suivi dans la plateforme dédiée, le graphique en haut représente les flux d'énergie électrique et celui du bas l'état de charge du moyen de stockage au cours du temps. La production d'énergie est en vert, la consommation teinte de rouge. La ligne verte correspond à un seuil de sécurité que le système essaie de maintenir.

2.5 Bilan des évaluations

Le Tableau -table 8.4 ci-dessous reprend les exigences identifiées à partir des entretiens réalisés et des pratiques actuelles des Experts.

En plus de ces gains issus de critères vérifiables précédemment identifiés, d'autres bénéfices plus difficilement mesurables sont à noter. Ils sont principalement issus de l'utilisation d'un langage dédié et d'un outil spécialisé à son usage :

- les simulations sont généralisables à un grand nombre de sites d'étude grâce à la séparation des dates de simulation et des données d'entrées,
- l'expert réalise moins d'erreur métier grâce au typage et à la connaissance du domaine de l'outil, il est impossible de se tromper de valeurs et d'inverser puissance et énergie, par exemple, contrairement aux tableurs. La gestion des unités physiques permet d'éviter de manipuler des watts et des kilowatts en précisant l'unité à chaque source de données
- les fichiers du DSL offrent une meilleure traçabilité des scénarios évalués en séparant données et paramètres, là où un tableur mélange les deux dans son utilisation classique, bien qu'il soit possible de faire référence à des tableurs externes.

TABLEAU 8.4 – Rappel des exigences identifiées pour un Jumeau Numérique dédié à l'énergie et cas d'usage dans lequel ils sont étudiés

Exigence	Validation
Exigence Fonctionnelle 1 relative aux séries temporelles	Les cas 1, 2 et 3 se basent sur des données collectées sur le terrain
Exigence Fonctionnelle 2 relative à la variabilité des activités	Les cas 2 et 4 représentent la répétition et la variabilité
Exigence Fonctionnelle 3 relative à l'exécution et à la simulation	Les cas 1, 2 et 3 sont entièrement simulés à partir des descriptions fournies
Exigence Fonctionnelle 4 relative au Demand Response	Les cas 2, 3 et 4 optimisent la consommation du site modélisé
Exigence Fonctionnelle 5 relative à la pondération des appareils	Le cas 3 favorise l'utilisation de l'énergie solaire au travers la batterie
Exigence Fonctionnelle 6 relative à la prédiction	Illustré dans le cas 4
Exigence Fonctionnelle 7 relative au stockage électrique	Le cas 3 utilise une batterie électrochimique
Exigence Fonctionnelle 8 relative au stockage non électrique	Le cas 4 optimise une activité de charge d'un stockage non électrique
Exigence Fonctionnelle 9 relative au suivi temps réel	Le cas 4 suit et optimise le fonctionnement du site en se basant sur données temps réel
Exigence Non Fonctionnelle 1 relative au temps d'exécution	Les cas 1, 2 et 3 simulés ont pris moins de 10 secondes à fournir des résultats
Exigence Non Fonctionnelle 2 relative à l'accessibilité	Une fois une description faite, des blocs peuvent être réutilisés entre les simulations
Exigence Non Fonctionnelle 3 relative à la simplicité de description	La modification des paramètres clés peut se faire uniquement à l'aide du langage dédié

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Résumé

Dans ce chapitre nous revenons sur le contexte énergétique et économique des smartgrids ainsi que notre proposition de Jumeau Numérique simplifiant les problématiques de dimensionnement et de pilotage. Nous décrivons également les futures perspectives et challenges restant à répondre dans de futurs travaux.

SECTION 1

SYNTHÈSE

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux problématiques liées à la gestion de l'énergie dans des secteurs où celle-ci représente un impact important sur l'économie. Nous avons ensuite détaillé les différents moyens matériels accessibles à un industriel afin de reprendre une certaine maîtrise dans sa consommation. Ces moyens peuvent passer par de l'installation de moyens de production d'énergie renouvelable directement sur site ou par du stockage de l'énergie. Ces installations devenant des smartgrids produisant partiellement l'énergie qu'elles consomment.

Au fil des années des méthodes se sont développées afin d'évaluer la pertinence de l'installation de certaines sources d'énergie en effectuant des simulations. Ces outils sont généralement spécifiques à un type d'énergie et accessibles uniquement à des personnes habituées aux simulations numériques.

Le choix du matériel et son dimensionnement sont primordiaux pour créer un environnement économique viable pour l'entreprise. Cet environnement va également permettre des moments de production d'énergie propices à la réorganisation des activités, regroupée sous le terme de *Demand Response*. Le *Demand Response* est un moyen efficace d'améliorer les performances énergétiques et économiques d'un site, mais nécessite un accompagnement technique et des connaissances profondes du

secteur d'activité à remanier.

Dans notre approche, nous défendons une méthodologie destinée aux Experts de sociétés spécialisées en énergies renouvelables, plus proche des utilisateurs finaux et en mesure de proposer les choix les plus pertinents adaptés à chaque secteur d'activité.

Notre contribution

Dans cet environnement, notre contribution consiste en une méthodologie outillée construite autour d'un Jumeau Numérique dédié aux enjeux énergétiques. Ce Jumeau Numérique permet une vue globale synthétique d'un site industriel pour la gestion de l'énergie au sein d'une microgrille.

Cette vue globale permet aux experts d'effectuer différentes tâches exploratoires telles que :

- **simuler** le comportement de chaque appareil électrique afin de guider des choix stratégiques d'installation de matériel, les plus rentables économiquement ou d'un point de vue écologique,
- **évaluer** l'impact de changements dans les **habitudes** de consommation des utilisateurs afin de déterminer quelles méthodes de *Demand Response* sont les plus pertinentes à mettre en œuvre,
- **piloter** réellement des sites physiques équipés de matériel connecté afin de faciliter la mise œuvre réelle des optimisations simulées.

Ces fonctionnalités étaient partiellement existantes dans des outils dédiés, notre contribution principale est de proposer une architecture capable de s'adapter dynamiquement aux objectifs cherchés par les experts. Permettre ces fonctionnalités nécessite plusieurs propriétés :

- **modularité** : être capable de gérer l'hétérogénéité du matériel,
- **évolutivité** : suivre les évolutions matérielles et des algorithmes d'optimisation sans impacter la structure des outils en place,
- **extensibilité** : intégrer des services tiers externes, être capables d'améliorer la fiabilité des calculs, tels que des services d'apprentissage automatisés, et
- **accessibilité** : laisser des experts utiliser des abstractions auxquelles ils sont habitués au travers un langage dédié et masquer les problématiques liées à l'hétérogénéité en ne laissant que le minimum de paramétrage nécessaire.

Nous avons mis en pratique notre prototype sur 3 cas de simulation d'exploitation agricole et site industriel et sur 1 cas de pilotage de matériel expérimental industriel. Ces applications nous ont permis d'explorer des situations d'optimisation qui n'étaient pas atteignables avec les approches dédiées existantes.

SECTION 2

PERSPECTIVES

2.1 Au-delà de l'électricité

Dans le détail, une activité industrielle regroupe en réalité plusieurs types d'activités. Par exemple, des activités de nettoyage, afin de préparer un poste de travail, préfigurent beaucoup d'activités et cela nécessite de produire de l'eau chaude ou de mettre sous pression un réservoir. Ces activités sont nécessaires à la réalisation d'activité *métiers*, elles peuvent ne pas réellement produire de richesse, mais leur réalisation peut tout de même être quantifiable. Ainsi, plutôt que voir deux activités comme dépendant directement l'une de l'autre, il est possible de voir une activité comme produisant une quantité de *ressource* A et une autre activité comme nécessitant cette même ressource A.

La consommation électrique peut donc rester le critère déterminant, cependant l'optimisation peut se baser sur plusieurs ressources. Ne pas uniquement considérer la production et la consommation d'électricité, mais inclure la production, consommation et stockage de tout type de *ressource* pouvant exister sur un site, tant de manières continues : des litres d'eau, que de manières discrètes : une quantité de produits manufacturés.

Ce genre d'optimisation est plus globale que juste concentrée sur la consommation électrique, elle permet d'intégrer plus d'aspects de la réalité du terrain dans le problème d'optimisation. Elle permet également d'aider à chiffrer l'efficacité énergétique d'une activité ou d'une machine, cela renforce la dimension d'outil de réflexion pour les personnes dirigeantes en entreprise.

Ces pistes de généralisation des ressources au-delà de l'électricité ont été en partie explorées au travers notre 4ème cas d'étude notamment. Cependant leurs implications sont plus grandes que ce que nous avons pu étudier, notamment pour intégrer des systèmes logistiques ou d'autres formes d'énergie comme les gaz.

2.2 Systèmes autonomiques

Le lien entre un Jumeau Numérique et le monde physique est ce qui permet d'assurer la qualité des données collectées et la bonne mise en œuvre des optimisations. C'est un aspect capital qui peut être amélioré en bénéficiant des recherches du domaine des systèmes autonomiques.

Notamment, en complétant notre approche par les 4 propriétés des systèmes autonomiques : auto-configuration, auto-protection, auto-réparation et auto-adaptation. Cela permettrait d'améliorer la stabilité et la robustesse de l'architecture communicante.

Une telle extension peut passer par les deux points suivants :

- proposer une **boucle autonome fermée** par l'intégration des retours du physique : détection des anomalies de mesure dans les capteurs ou encore par la correction des approximations des modèles simulés par les valeurs réelles lorsque celles-ci sont disponibles,

- intégrer l'**humain dans la boucle** : quelle interface est la plus appropriée entre une plateforme web, un équipement avec écran installé sur site ou à l'aide d'une application pour smartphone, quelle fréquence de notification est la adaptée pour ne pas agacer, quel est le seuil de rentabilité minimal à atteindre avant de communiquer à l'utilisateur, en prenant en compte le risque qu'il effectue son action en retard ou en avance par rapport au moment optimal calculé.

Ces extensions peuvent par exemple passer l'utilisation d'une fonction de satisfaction exposée au travers du DSL pour représenter la volonté de l'utilisateur final à changer ses habitudes. Cette fonction peut par la suite être utilisée par l'algorithme d'optimisation pour privilégier des déplacements impactant le moins possible l'utilisateur. L'optimisation peut également laisser les outils de Jumeau Numérique notifier l'utilisateur de proposition de déplacement changeant ses habitudes et dans quelle mesure. Il pourrait donc choisir de les accepter ou de les refuser. En cas de refus de nouvelles contraintes viennent s'ajouter à l'optimisation qui doit avoir un nouveau planning de fonctionnement, sous optimal mais favorisant la ou les fonctions de satisfaction.

Appendice et bibliographie

ANNEXES

SECTION 1

GRAMMAIRE COMPLÈTE DU LANGAGE REGULDSL

```
grammar fr.okwind.reguldsl.RegulDSL with org.eclipse.xtext.common.Terminals

//import "http://www.okwind.fr/metamodel"
import "platform:/resource/fr.okwind.reguldsl.metamodel/model/reguldsl.ecore"
import "http://www.eclipse.org/emf/2002/Ecore" as ecore

RegulDSLModel returns RegulDSLModel :
{RegulDSLModel}
(
    (includes+=Include)* &
    (sites+=Site)* &
    (simulations+=Simulation)?
);

// -----

Include returns Include :
'import' importURI=QualifiedName ;

QualifiedName : ID ( '.' ID)* ;

Simulation returns Simulation :
{Simulation}
'Simulation' '{'
    runs+=Run ( ',' runs+=Run)*
'}'
;

Run returns Run :
{Run}
'run' site=[ Site | QualifiedName ]
( ( 'from' start=LocalDate 'to' end=LocalDate ) | live ?= 'live ' )
( skipExport ?= 'SKIP_EXPORT' ) ?
( skipDBExport ?= 'SKIP_DB_EXPORT' ) ?
( skipGraphExport ?= 'SKIP_GRAPH_EXPORT' ) ?
description=EString
;

// -----

Site returns Site :
'Site'
name=EString
'{'
    ( 'coordinates' coordinates=GSPCoordinate ) ?
    ( resource+=Resource )*
    ( profile+=Profile ) *
```

```

        (process+=Process)*
        (stock+=AbstractStock)*
        //( 'transform' '{' transform+=AbstractProcess ( "," transform+=AbstractProcess)*
        '}' )?
    '}' ;

GPSCoordinate returns GPSCoordinate :
    EFloat ( 'N' | 'S' ) EFloat ( 'E' | 'W' );

enum Quantifier returns Quantifier :
    NONE = 'NONE' | LOW = 'LOW' | MEDIUM = 'MEDIUM' | HIGH = 'HIGH' | UNKNOWN = 'UNKNOWN';

enum DIRECTION returns DIRECTION :
    BEFORE = 'BEFORE' | AFTER = 'AFTER' | BOTH = 'BOTH';

Attribute returns Attribute :
    {Attribute}
    (key=QualifiedName '=' value=EString) ?;

// -----
// STOCK
// -----

AbstractStock returns AbstractStock :
    (StockRef | Stock);

StockRef returns StockRef :
    {StockRef}
    ref=[Stock|QualifiedName];

Stock returns Stock :
    'stock' name=EString 'of' type=[Resource|QualifiedName] '{'
        'capacity' capacity=EDouble 'uh'
        'depth' depthOfDischarge=EFloat '%'
        (configuration+=Configuration)+
    '}' ;

// -----
// PROCESS
// -----

AbstractProcess returns AbstractProcess :
    (ProcessRef | Process);

ProcessRef returns ProcessRef :
    ref=[Process|QualifiedName];

Process returns Process :
    'process' (initiator?='initiator')? (technical?='technical')? name=EString
    '{'
        (configuration+=Configuration)+
        ('after' '(' after+=[Process|QualifiedName] ( "," after+=[Process|QualifiedName])* ')' )?
        ('composed' '(' composed+=[Process|QualifiedName] ( "," composed+=[Process|
            QualifiedName])* ')' )?
        ('consumption' powerUsage=Quantifier)?
        ('frequency' frequency=Frequency)?
        // variability
        ('shift' shift=Shift )?
        ('reduction' reduction=Reduction)?
        ('deformation' deformation=Deformation)?
        ('window' window=Window )?
        ('predictor' '{' predictor=SimplePredictor '}' )?
        ('actuator' '{' actuator=SimpleProcessActuator '}' )?
        ('[' attribute+=Attribute ( "," attribute+=Attribute)* ']' )?
    '}' ;

SimplePredictor :
    name=EString ( 'is' ID=QualifiedName)?
    ('[' attribute+=Attribute ( "," attribute+=Attribute)* ']' )?
;

SimpleProcessActuator :

```

```

    name=EString ( 'is' ID=QualifiedName)?
    ( '[' attribute+=Attribute ( "," attribute+=Attribute)* ']' )?
;

// -----
// CONFIGURATION
// -----
Configuration returns Configuration :
    'configuration' name=EString '{'
    'cost' cost=AbstractProfile
    'input' '{' (input+=AbstractProfile)? ( ',' input+=AbstractProfile)* '}'
    'output' '{' (output+=AbstractProfile)? ( ',' output+=AbstractProfile)* '}'
    '}'
;

// -----
// PROFILE
// -----
AbstractProfile returns AbstractProfile :
    ( ProfileRef | Profile );

ProfileRef returns ProfileRef :
    { ProfileRef }
    ref=[ Profile | QualifiedName ];

Profile returns Profile :
    'profile' name=EString ( 'is' ID=QualifiedName)? ( 'of' type=[ Resource ] )?
    ( '[' attribute+=Attribute ( "," attribute+=Attribute)* ']' )?
;

// -----
// RESOURCE
// -----
Resource returns Resource :
    { Resource }
    'resource' name=EString 'in' unit=EString ;

// -----
// VARIABILITY
// -----
Frequency returns Frequency :
    Always | Periodic | Unique | Delegated ;

Shift returns Shift :
    { Shift }
    ( 'direction' direction=DIRECTION )?
    'between' lowerBound=Duration
    'and' upperBound=Duration
;

Deformation returns Deformation :
    { Deformation }
    intensity=EFloat '%'
;

Reduction returns Reduction :
    { Reduction }
    powerModifier=EFloat '%'
    ( '->' durationModifier=Duration )?
;

Window returns Window :
    DurationWindow | PeriodWindow ;

Day returns Day :
    EveryDay | SpecificDay ;

// -----
// VARIABILITY
// -----
Delegated returns Delegated :
    'Delegated' '[' min=Duration ';' (max=Duration)? ']' ;

```

```

Always returns Always :
    {Always}
    Always ;

Periodic returns Periodic :
    'Periodic' 'at' at=LocalTime 'for' for=Duration 'on' on=Day
;

Unique returns Unique :
    {Unique}
    Unique
    '{'
        ('on' on=LocalDate)?
        ('from' from=LocalTime)?
        ('to' to=LocalTime)?
    '}' ;

// -----
// TIME
// -----

SpecificDay returns SpecificDay :
    {SpecificDay} ('days' '{' days+=Days ( "," days+=Days)* '}' )?
;

DurationWindow returns DurationWindow :
    {DurationWindow}
    DurationWindow
    '{'
        ('duration' duration=Duration)?
        ('durationMin' durationMin=Duration)?
        ('durationMax' durationMax=Duration)?
    '}' ;

PeriodWindow returns PeriodWindow :
    {PeriodWindow}
    PeriodWindow
    '{'
        ('period' period=Period)?
        ('periodMin' periodMin=Period)?
        ('periodMax' periodMax=Period)?
    '}' ;

// -----
// RULES
// -----

LocalTime returns LocalTime :
    INT ':' INT ( ':' INT)?
;

// directly used with LocaleDate.parse()
// expected format yyyy-mm-dd
LocalDate returns LocalDate :
    INT '-' INT ( '-' INT)?
;

Duration returns Duration :
    // INT ('h'|'m'|'s')?;
    INT ('hour'|'minute'|'second')?;

Days returns Days :
    EString;

Period returns Period :
    // INT ('d'|'w'|'m'|'y')?;
    INT ('day'|'week'|'month'|'year')?;

EveryDay returns EveryDay :
    {EveryDay}
    everyday ;

EFloat returns ecore::EFloat :
    '-'? INT? '.' INT (('E'|'e') '-'? INT)?;
EDouble returns ecore::EDouble :
    '-'? INT? '.' INT (('E'|'e') '-'? INT)?;

```



```
EString returns ecore::EString :  
  STRING | ID ;
```

Listing IX.1 – Grammaire Xtext du langage RegulDSL

LICENCES

Certaines licences particulières s'appliquent à des ressources utilisées dans ce manuscrit. Elles sont précisées ci-dessous.

PHOTOGRAPHIES

- Figure 2.5a ©Hans Hillewaert via Wikimedia Commons
- Figure 2.5b Placé dans le domaine public par son auteur : Hadhuey
- Figure 2.6a Fringe2013 — CC-BY-SA 3.0 ¹
- Figure 2.6b Movilidad Sostenible — CC-BY-SA 2.0 ²
- Figure 2.9 Grostim — CC-BY-SA 3.0 ³
- Figure 2.10 Parucom — CC-BY-SA 4.0 ⁴
- Figure 3.6a <https://empowerenergy.co.uk/>
- Figure 3.6b chaîne Youtube SolarEdgePV

ICÔNES

- Les icônes utilisées dans les schémas -Figure 1.2 et -Figure 2.4 sont sous licence libre réalisées par Vectors Market et sont disponibles sur : <https://www.flaticon.com>.

1. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>
2. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>
3. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>
4. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

- [106] Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Olivier BARAIS et Yoran BUGNI, « Efficient use of local energy : An activity oriented modeling to guide Demand Side Management », in : *MODELS 2018 - 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, Copenhagen, Denmark : ACM Press, oct. 2018, p. 458-468, DOI : 10.1145/3239372.3239391, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01913169>.
- [107] Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Yoran BUGNI et Olivier BARAIS, « Benefits of Energy Management Systems on local energy efficiency, an agricultural case study », in : *SmartGridComm 2019 - IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*, Beijing, China : IEEE, oct. 2019, p. 1-7, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02315327>.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Vincent ABT, « Une approche méthodologique et de modélisation des exploitations agricoles dans une perspective d'ingénierie d'entreprise et de système d'information », thèse de doct., Paris 9, 2010.
- [2] Francisco Javier ACOSTA PADILLA, Frederic WEIS et Johann BOURCIER, « Towards a model@ runtime middleware for cyber physical systems », in : *Proceedings of the 9th Workshop on Middleware for Next Generation Internet Computing*, 2014, p. 1-6.
- [3] Hisham ALHARBI et Kankar BHATTACHARYA, « Stochastic Optimal Planning of Battery Energy Storage Systems for Isolated Microgrids », in : *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9.1 (jan. 2018), p. 211-227, ISSN : 1949-3029, DOI : 10.1109/TSTE.2017.2724514.
- [4] Abdul-Rahman AL-ALI, Imran A ZUALKERNAN, Mohammed RASHID, Ragini GUPTA et Mazin ALIKARAR, « A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach », in : *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 63.4 (2017), p. 426-434.
- [5] Amirsaman ARABALI, Mahmoud GHOFrani, Mehdi ETEZADI-AMOLI, Mohammed Sami FADALI et Yahia BAGHZOUZ, « Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management », in : *IEEE Transactions on Power delivery* 28.1 (2013), p. 162-170, URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Da11.jsp?arnumber=6341870.
- [6] Paulo Régis C ARAÚJO, Raimir Holanda FILHO, Joel JPC RODRIGUES, João PCM OLIVEIRA et Stephanie A BRAGA, « Middleware for integration of legacy electrical equipment into smart grid infrastructure using wireless sensor networks », in : *International Journal of Communication Systems* 31.1 (2018), e3380.
- [7] Association nationale pour le développement de la mobilité électrique AVERE, *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, Principaux résultats*, sous la dir. de RTE et AVERE-FRANCE, 2019, URL : <http://www.aver-france.org/Uploads/Documents/155799663972bc5a6800f70eda145990331ef5f2dc-RTE.pdf> (visité le 15/11/2019).
- [8] Kuk Yeol BAE, Han Seung JANG et Dan Keun SUNG, « Hourly Solar Irradiance Prediction Based on Support Vector Machine and Its Error Analysis », in : *IEEE Transactions on Power Systems* (2016), DOI : 10.1109/tpwrs.2016.2569608.

- [9] Ruben BAETENS, Roel DE CONINCK, Lieve HELSEN et Dirk SAELENS, « The impact of domestic load profiles on the grid-interaction of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in extremely low-energy dwellings », in : *Zero Emission Buildings* (2010), p. 121-131.
- [10] Kaibin BAO, Kanan IBRAHIMOV, Martin WAGNER et Hartmut SCHMECK, « Enhancing neural non-intrusive load monitoring with generative adversarial networks », in : *Energy Informatics 1.1* (10 oct. 2018), p. 18, ISSN : 2520-8942, DOI : 10.1186/s42162-018-0038-y.
- [11] Mehrad BASTANI, « Simulation-Optimization Approaches for Demand Side Management in Smart Grids », thèse de doct., University of Miami, 4 août 2017.
- [12] BISWAS, P. N. SUGANTHAN et G. A. J. AMARATUNGA, « Optimal placement of wind turbines in a windfarm using L-SHADE algorithm », in : *Proc. IEEE Congress Evolutionary Computation (CEC)*, juin 2017, p. 83-88, DOI : 10.1109/CEC.2017.7969299.
- [13] Valeria BORODIN, Jean BOURTEMBOURG, Faicel HNAIEN et Nacima LABADIE, « Simulation et analyse des performances d'une chaîne logistique agricole », in : *ROADEF-14ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et aide à la décision* (2013), p. 1-2.
- [14] Jacky BOURGEOIS, « Interactive Demand-Shifting in the Context of Domestic Micro-Generation », thèse de doct., IRISA, 30 juin 2016.
- [15] Frederick P BROOKS JR, *The Mythical Man-Month : Essays on Software Engineering, Anniversary Edition, 2/E*, Pearson Education India, 1995.
- [16] Thomas BRUCKNER, Lew FULTON, Edgar HERTWICH, Alan MCKINNON, Daniel PERCZYK, Joyashree ROY, Roberto SCHAEFFER, Steffen SCHLÖMER, Ralph SIMS, Pete SMITH et Ryan WISER, *Annex III : Technology-specific cost and performance parameters. In : Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, sous la dir. de CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 15 nov. 2019, URL : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf (visité le 15/11/2019).
- [17] Jean-Michel BRUEL, Benoît COMBEMALE, Ileana OBER et Hélène RAYNAL, « MDE in Practice for Computational Science », in : *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE*, Reykjavík, Iceland, juin 2015, URL : <https://hal.inria.fr/hal-01141393>.
- [18] I. CALERO, C. A. CAÑIZARES et K. BHATTACHARYA, « Compressed Air Energy Storage System Modeling for Power System Studies », in : *IEEE Transactions on Power Systems* 34.5 (sept. 2019), p. 3359-3371, DOI : 10.1109/TPWRS.2019.2901705.
- [19] Davide CAPRINO, Marco L. DELLA VEDOVA et Tullio FACCHINETTI, « Peak shaving through real-time scheduling of household appliances », in : *Energy and Buildings* 75 (2014), p. 133-148, ISSN : 0378-7788, DOI : 10.1016/j.enbuild.2014.02.013.
- [20] Tsung Hui CHANG, Mahnoosh ALIZADEH et Anna SCAGLIONE, « Real-time power balancing via decentralized coordinated home energy scheduling », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.3 (2013), p. 1490-1504, ISSN : 1949-3053, DOI : 10.1109/TSG.2013.2250532, arXiv : arXiv : 1302.3932v1.

-
- [21] Changsong CHEN, Shanxu DUAN, Tong CAI, Bangyin LIU et Gangwei HU, « Smart energy management system for optimal microgrid economic operation », in : *IET renewable power generation* 5.3 (2011), p. 258-267.
- [22] Kunjin CHEN, Qin WANG, Ziyu HE, Kunlong CHEN, Jun HU et Jinliang HE, « Convolutional Sequence to Sequence Non-intrusive Load Monitoring », in : *arXiv preprint arXiv :1806.02078* (2018).
- [23] Lijun CHEN, Na LI, Libin JIANG et Steven H LOW, « Optimal demand response : problem formulation and deterministic case », in : *Control and optimization methods for electric smart grids*, Springer, 2012, p. 63-85.
- [24] Sridhar CHOUHAN, Deepak TIWARI, Hakan INAN, Sarika KHUSHALANI-SOLANKI et Ali FELIACHI, « DER optimization to determine optimum BESS charge/discharge schedule using linear programming », in : *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, 2016, p. 1-5.
- [25] Benoit COMBEMALE, Betty HC CHENG, Ana MOREIRA, Jean-Michel BRUEL et Jeff GRAY, « Modeling for sustainability », in : *Proceedings of the 8th International Workshop on Modeling in Software Engineering*, ACM, 2016, p. 62-66.
- [26] Gabriele COMODI, Andrea GIANTOMASSI, Marco SEVERINI, Stefano SQUARTINI, Francesco FERRACUTI, Alessandro FONTI, Davide NARDI CESARINI, Matteo MORODO et Fabio POLONARA, « Multi-apartment residential microgrid with electrical and thermal storage devices : Experimental analysis and simulation of energy management strategies », in : *Applied Energy* 137 (2015), p. 854-866, ISSN : 0306-2619, DOI : 10.1016/j.apenergy.2014.07.068.
- [27] Giuseppe Tommaso COSTANZO, « Demand Side Management In The Smart Grid », mém. de mast., École Polytechnique De Montréal, 2011.
- [28] Giuseppe Tommaso COSTANZO, Guchuan ZHU, Miguel F ANJOS et Gilles SAVARD, « A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 3.4 (2012), p. 2157-2165.
- [29] JP COUVREUR, « Quelques leviers pour maîtriser la consommation d'énergie et optimiser la mécanisation de l'exploitation », in : *Fourrages* 187 (2006), p. 301-310.
- [30] Alan M DAVIS, *Software requirements : objects, functions, and states*, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [31] Anbal DE ALMEIDA, Paula FONSECA, Barbara SCHLOMANN, Nicolai FEILBERG et Carlos FERREIRA, « Residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in Europe », in : *International Energy Efficiency in Domestic Appliances & Lighting Conference*, Citeseer, 2006.
- [32] Daniele DE MARTINI, Guido BENETTI, Filippo CIPOLLA, Davide CAPRINO, Marco L Delia VEDOVA et Tullio FACCHINETTI, « Peak load optimization through 2-dimensional packing and multi-processor real-time scheduling », in : *Proceedings of the Computing Frontiers Conference*, ACM, 2017, p. 275-278.

- [33] Joris DEHLER, Dogan KELES, Thomas TELSNIIG, Benjamin FLEISCHER, Manuel BAUMANN, David FRABOULET, Aurélie FAURE et Wolf FICHTNER, *Self-consumption of electricity from renewable sources*, rapp. scient., Insight Energy, 1^{er} juin 2015, URL : http://www.insightenergy.org/system/publications/files/000/000/016/original/RREB6_self-consumption_renewable_electricity_final.pdf (visité le 04/01/2017).
- [34] B DELINCHANT, H A DANG, H T T VU et D Q NGUYEN, « Massive arrival of low-cost and low-consuming sensors in buildings : towards new building energy services », in : *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science* 307 (août 2019), p. 012006, DOI : 10.1088/1755-1315/307/1/012006, URL : <https://doi.org/10.1088%2F1755-1315%2F307%2F1%2F012006>.
- [35] Marco L. DELLA VEDOVA, « Real-Time Physical Systems and Electric Load Scheduling », thèse de doct., Pavia, 2012, p. 205, URL : http://mldv.it/rtps/docs/dellavedova+2013+Real-Time%7B%5C_%7DPhysical%7B%5C_%7Dsystems%7B%5C_%7Dand%7B%5C_%7DElectric%7B%5C_%7DLoad%7B%5C_%7DScheduling.pdf.
- [36] Anton DIETMAIR et Alexander VERL, « A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing », in : *International Journal of Sustainable Engineering 2.2* (juin 2009), p. 123-133, ISSN : 1939-7038, DOI : 10.1080/19397030902947041.
- [37] Anton DIETMAIR et Alexander VERL, « Energy consumption modeling and optimization for production machines », in : *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies* (2008), p. 574-579, DOI : 10.1109/ICSET.2008.4747073, URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Dall.jsp?arnumber=4747073.
- [38] Anton DIETMAIR, Alexander VERL et Philipp EBERSPAECHER, « Model-based energy consumption optimisation in manufacturing system and machine control », in : *International Journal of Manufacturing Research* (2011), DOI : 10.1504/IJMR.2011.043238.
- [39] Michele DINCECCO, Stefano SQUARTINI et Mingjun ZHONG, « Transfer Learning for Non-Intrusive Load Monitoring », in : *arXiv preprint arXiv :1902.08835* (2019).
- [40] ENEDIS, *PANORAMA DE L'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE AU 30 JUIN 2019*, 2019, URL : <https://www.enedis.fr/sites/default/files/field/documents/Panorama-electricite-renouvelable-T2-2019.pdf> (visité le 15/11/2019).
- [41] DL EVANS, « Simplified method for predicting photovoltaic array output », in : *Solar energy* 27.6 (1981), p. 555-560.
- [42] Tullio FACCHINETTI et Marco L. DELLA VEDOVA, « Real-Time Modeling for Direct Load Control in Cyber-Physical Power Systems », in : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7.4 (nov. 2011), p. 689-698, ISSN : 1551-3203, DOI : 10.1109/TII.2011.2166787, URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6009189/>.
- [43] Tullio FACCHINETTI et Marco L. Della VEDOVA, « Real-time modeling and control of a cyber-physical energy system », in : *First International Workshop on Energy Aware Design and Analysis of Cyber Physical Systems* (2010), URL : <https://publicatt.unicatt.it/handle/10807/60650>.

- [44] Jonas FLUHR, Klaus-Henning AHLERT et Christof WEINHARDT, « A stochastic model for simulating the availability of electric vehicles for services to the power grid », in : *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE, 2010, p. 1-10.
- [45] Francois FOUQUET, Brice MORIN, Franck FLEUREY, Olivier BARAIS, Noel PLOUZEAU et Jean-Marc JEZEQUEL, « A dynamic component model for cyber physical systems », in : *Proceedings of the 15th ACM SIGSOFT symposium on Component Based Software Engineering*, ACM, 2012, p. 135-144.
- [46] Xavier FOURNIER-MORELF, *SOA, Le guide de l'architecte*, 2007.
- [47] Martin FOWLER, *Language workbenches : the killer-app for domain specific languages ?*, juin 2005, URL : <https://martinfowler.com/bliki/LanguageWorkbench.html>.
- [48] Sylvain FREY, François HUGUET, Isabelle DEMEURE, Ada DIACONESCU, David MENGA et Cédric MIVIELLE, « Scénarios pour un Micro Smart Grid Autonome. », in : 2011.
- [49] Iván FROIZ-MGUEZ, Tiago M FERNÁNDEZ-CARAMÉS, Paula FRAGA-LAMAS et Luis CASTEDO, « Design, implementation and practical evaluation of an IoT home automation system for fog computing applications based on MQTT and ZigBee-WiFi sensor nodes », in : *Sensors* 18.8 (2018), p. 2660.
- [50] Vito FUSCO, Ganesh K VENAYAGAMOORTHY, Stefano SQUARTINI et Francesco PIAZZA, « Smart AMI based demand-response management in a micro-grid environment », in : *2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, IEEE, 2016, p. 1-8.
- [51] Nikolaos GATSIS et Georgios B GIANNAKIS, « Cooperative multi-residence demand response scheduling », in : *Information Sciences and Systems (CISS), 2011 45th Annual Conference on*, IEEE, 2011, p. 1-6.
- [52] ES GAVANIDIOUS et AG BAKIRTZIS, « Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods », in : *IEEE Transactions on Energy Conversion* 7.1 (1992), p. 42-48.
- [53] Fred W GLOVER et Gary A KOCHENBERGER, *Handbook of metaheuristics*, t. 57, Springer Science & Business Media, 2006.
- [54] Sajjad GOLSHANNAVAZ, Saeed AFSHARNIA et Farrokh AMINIFAR, « Smart distribution grid : optimal day-ahead scheduling with reconfigurable topology », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.5 (2014), p. 2402-2411.
- [55] Michael GRIEVES et John VICKERS, « Digital twin : Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems », in : *Transdisciplinary perspectives on complex systems*, Springer, 2017, p. 85-113.
- [56] Olivier GRUBER, BJ HARGRAVE, Jeff MCAFFER, Pascal RAPICAULT et Thomas WATSON, « The Eclipse 3.0 platform : adopting OSGi technology », in : *IBM Systems Journal* 44.2 (2005), p. 289-299.

- [57] G. HABAUT, M. LEFRANÇOIS, F. LEMERCIER, N. MONTAVONT, P. CHATZIMISIOS et G. Z. PAPADOPOULOS, « Monitoring Traffic Optimization in Smart Grid », in : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* PP.99 (2017), p. 1, ISSN : 1551-3203, DOI : 10.1109/TII.2017.2742584.
- [58] Guillaume HABAUT, Jani HURSTI et Jean-Marie BONNIN, « Defining a Distributed Architecture for Smart Energy Aware Systems », in : *Complex Systems Design & Management*, Springer, 2017, p. 83-94.
- [59] Dae-Man HAN et Jae-Hyun LIM, « Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee », in : *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 56.3 (2010), p. 1403-1410.
- [60] A. HARELL, S. MAKONIN et I.V. BAJIC, « WaveNILM : A Causal Neural Network for Power Disaggregation from the Complex Power Signal », in : *2018 the 44th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2019.
- [61] Md Umar HASHMI et Ana BUSIC, « Limiting energy storage cycles of operation », in : *2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, IEEE, 2018, p. 71-74.
- [62] Md Umar HASHMI, Arpan MUKHOPADHYAY, Ana BUI et Jocelyne ELIAS, « Optimal Storage Arbitrage under Net Metering using Linear Programming », in : *arXiv preprint arXiv :1905.00418* (2019).
- [63] John HUTCHINSON, Jon WHITTLE et M. ROUNCEFIELD, « Empirical assessment of MDE in industry », in : jan. 2011, p. 471-480, DOI : 10.1145/1985793.1985858.
- [64] Valerie ISSARNY, Mauro CAPORUSCIO et Nikolaos GEORGANTAS, « A perspective on the future of middleware-based software engineering », in : *Future of Software Engineering (FOSE'07)*, IEEE, 2007, p. 244-258.
- [65] Santiago P JÁCOME-GUERRERO, Marcelo FERREIRA et Alexandra CORRAL, « Software Development Tools in Model-Driven Engineering », in : *2017 5th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT)*, IEEE, 2017, p. 140-148.
- [66] Joxan JAFFAR et J-L LASSEZ, « Constraint logic programming », in : *Proceedings of the 14th ACM SIGACT-SIGPLAN symposium on Principles of programming languages*, 1987, p. 111-119.
- [67] Joo Sung KANG, « A Simulation Framework for Evaluation of Real-time Electric Vehicle (EV) Charging Control Strategy and Investigation of Its Interaction with V2G-based Frequency Regulation », thèse de doct., Georgia Institute of Technology, 2017.
- [68] Eleni KAPLANI et Socrates KAPLANIS, « A stochastic simulation model for reliable PV system sizing providing for solar radiation fluctuations », in : *Applied Energy* 97 (2012), p. 970-981.
- [69] Jack KELLY et William KNOTTENBELT, « Neural NILM : Deep neural networks applied to energy disaggregation », in : *ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments*, ACM, 2015, p. 55-64.
- [70] Kashif Hesham KHAN, Caspar RYAN et Ermyas ABEBE, « Optimizing HVAC energy usage in industrial processes by scheduling based on weather data », in : *IEEE Access* 5 (2017), p. 11228-11235.

- [71] Jun-Hyeok KIM, Soon-Jeong LEE, Eung-Sang KIM, Seul-Ki KIM, Chul-Hwan KIM et László PRIKLER, « Modeling of Battery for EV using EMTP/ATPDraw », in : *Journal of Electrical Engineering and Technology* 9.1 (2014), p. 98-105.
- [72] Jan KLEISSL et Yuvraj AGARWAL, « Cyber-physical energy systems : focus on smart buildings », in : *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, ACM, 2010, p. 749-754.
- [73] S. K. KOLLIMALLA, A. UKIL, H. B. GOOI, U. MANANDHAR et N. R. TUMMURU, « Optimization of Charge/Discharge Rates of a Battery Using a Two-Stage Rate-Limit Control », in : *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 8.2 (avr. 2017), p. 516-529, ISSN : 1949-3029, DOI : 10.1109/TSTE.2016.2608968.
- [74] De-Yin KONG, Yu-Qing BAO, Ying-Yi HONG, Bei-Bei WANG, Hong-Bin HUANG, Ling LIU et Huan-Huan JIANG, « Distributed Control Strategy for Smart Home Appliances Considering the Discrete Response Characteristics of the On/Off Loads », in : *Applied Sciences* 9.3 (2019), p. 457.
- [75] Toma KOSAR, Sudev BOHRA et Marjan MERNIK, « Domain-specific languages : A systematic mapping study », in : *Information and Software Technology* 71 (2016), p. 77-91.
- [76] Toma KOSAR, Pablo E MART, Pablo A BARRIENTOS et Marjan MERNIK, « A preliminary study on various implementation approaches of domain-specific language », in : *Information and software technology* 50.5 (2008), p. 390-405.
- [77] Edward M KRAFT, « The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge », in : *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2016, p. 0897.
- [78] Ivan KURTEV, Jean BÉZIVIN, Frédéric JOUAULT et Patrick VALDURIEZ, « Model-based DSL frameworks », in : *Companion to the 21st ACM SIGPLAN symposium on Object-oriented programming systems, languages, and applications*, ACM, 2006, p. 602-616.
- [79] Murat KUZLU, Manisa PIPATTANASOMPORN et Saifur RAHMAN, « Hardware demonstration of a home energy management system for demand response applications », in : *IEEE Transactions on Smart grid* 3.4 (2012), p. 1704-1711.
- [80] Tino LANGER, Andreas SCHLEGEL, Johannes STOLDT et Matthias PUTZ, « A model-based approach to energy-saving manufacturing control strategies », in : *Procedia CIRP* 15 (2014), p. 123-128.
- [81] Maxime LEFRANÇOIS, Guillaume HABAUT, Caroline RAMONDOU et Eric FRANÇON, « Outsourcing Electric Vehicle Smart Charging on the Web of Data », in : *The First International Conference on Green Communications* (2016).
- [82] MNQ MACEDO, JJM GALO, LAL DE ALMEIDA et AC de C LIMA, « Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment », in : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015), p. 128-133.
- [83] Khizir MAHMUD, Sayidul MORSALIN, Jahangir HOSSAIN et Graham TOWN, « Domestic peak-load management including vehicle-to-grid and battery storage unit using an artificial neural network », in : *Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on*, IEEE, 2017, p. 586-591.

- [84] MAISON ET DOMOTIQUE, éd., *Comparatif des Solutions Domotiques*, 12 juin 2017, URL : <https://www.maison-et-domotique.com/comparatif-des-solutions-domotiques/> (visité le 15/11/2019).
- [85] Maria MALVONI, Maria Grazia DE GIORGI et Paolo Maria CONGEDO, « Data on Support Vector Machines (SVM) model to forecast photovoltaic power », in : *Data in brief* 9 (2016), p. 13-16.
- [86] Deindl MATTHIAS, Vahidov RUSTAM, Carsten BLOCK et Dirk NEUMANN, « Load shifting agents for automated demand side management in micro energy grids », in : *7th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems* (2008), URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Dall.jsp?arnumber=4663463.
- [87] Sébastien MAZAC, « Approche décentralisée de l'apprentissage constructiviste et modélisation multi-agent du problème d'amarçage de l'apprentissage sensorimoteur en environnement continu : application à l'intelligence ambiante », thèse de doct., Université Claude Bernard-Lyon I, 2015.
- [88] Sébastien MAZAC, Frédéric ARMETTA et Salima HASSAS, « Approche décentralisée pour un apprentissage constructiviste en environnement continu : application à l'intelligence ambiante. », in : *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*, CÉPADUÈS ÉDITIONS, 2015.
- [89] Mohammadreza MAZIDI, Hassan MONSEF et Pierluigi SIANO, « Robust day-ahead scheduling of smart distribution networks considering demand response programs », in : *Applied energy* 178 (2016), p. 929-942.
- [90] JP MODAK et AR BAPAT, « Formulation of a generalized experimental model for a manually driven flywheel motor and its optimization », in : *Applied ergonomics* 25.2 (1994), p. 119-122.
- [91] Amir-Hamed MOHSENIAN-RAD, Vincent W. S. WONG et Juri JATSKEVICH, « Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 1.3 (2010), p. 320-331, URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Dall.jsp?arnumber=5628271.
- [92] Joon-Yung MOON, Kitae SHIN et Jinwoo PARK, « Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency », in : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68.1-4 (sept. 2013), p. 523-535, ISSN : 0268-3768, DOI : 10.1007/s00170-013-4749-8.
- [93] Brice MORIN, Olivier BARAIS, Jean-Marc JÉZÉQUEL, Franck FLEUREY et Arnor SOLBERG, « Models@ run. time to support dynamic adaptation », in : *Computer* 42.10 (2009), p. 44-51.
- [94] Brice MORIN, Franck FLEUREY, Nelly BENCOMO, Jean-Marc JÉZÉQUEL, Arnor SOLBERG, Vegard DEHLEN et Gordon BLAIR, « An aspect-oriented and model-driven approach for managing dynamic variability », in : *international conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, Springer, 2008, p. 782-796.
- [95] H. NAZARIPOUYA, Y. WANG, P. CHU, H. R. POTA et R. GADH, « Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation », in : *Proc. IEEE Power Energy Society General Meeting*, juill. 2015, p. 1-5, DOI : 10.1109/PESGM.2015.7286059.

- [96] Elisa NEGRI, Luca FUMAGALLI et Marco MACCHI, « A review of the roles of digital twin in cps-based production systems », in : *Procedia Manufacturing* 11 (2017), p. 939-948.
- [97] Bruce NORDMAN et Alan MEIER, « Energy consumption of home information technology », in : *Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-5350. July* (2004).
- [98] Ibrahim H OSMAN et Gilbert LAPORTE, *Metaheuristics : A bibliography*, 1996.
- [99] Peter PALENSKY et Dietmar DIETRICH, « Demand side management : Demand response, intelligent energy systems, and smart loads », in : *IEEE transactions on industrial informatics* 7.3 (2011), p. 381-388.
- [100] R. PALMA-BEHNKE, C. BENAVIDES, F. LANAS, B. SEVERINO, L. REYES, J. LLANOS et D. SÁEZ, « A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.2 (juin 2013), p. 996-1006, ISSN : 1949-3053, DOI : 10.1109/TSG.2012.2231440.
- [101] Cristian PERFUMO, Julio H. BRASLAVSKY et John K. WARD, « Model-based estimation of energy savings in load control events for thermostatically controlled loads », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.3 (2014), p. 1410-1420, ISSN : 1949-3053, DOI : 10.1109/TSG.2014.2298840.
- [102] Philippe QUIRION, « Quels soutiens aux énergies renouvelables électriques ? », in : *Revue française d'économie* 30.4 (2015), p. 105-140.
- [103] Anshu RANJAN, Pramod KHARGONEKAR et Sartaj SAHNI, « Smart grid power scheduling via bottom left decreasing height packing », in : *Computers and Communication (ISCC), 2016 IEEE Symposium on*, IEEE, 2016, p. 1128-1133.
- [104] Josef REINHARD NEIBER et Stefan NESER, « Energy Consumption and Improvement of the Energy Efficiency in the Agricultural Animal Husbandry », in : *Modern Environmental Science and Engineering* 1.5 (déc. 2015), p. 207-217, ISSN : 2333-2581, DOI : 10.15341/mese(2333-2581)/05.01.2015/001, URL : <http://www.academicstar.us/issueshow.asp?daid=1384>.
- [105] Remy RIGO-MARIANI, Bruno SARENI et Xavier ROBOAM, « Integrated optimal design of a smart microgrid with storage », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* (2017).
- [106] Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Olivier BARAIS et Yoran BUGNI, « Efficient use of local energy : An activity oriented modeling to guide Demand Side Management », in : *MODELS 2018 - 21th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, Copenhagen, Denmark : ACM Press, oct. 2018, p. 458-468, DOI : 10.1145/3239372.3239391, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01913169>.
- [107] Alexandre RIO, Yoann MAUREL, Yoran BUGNI et Olivier BARAIS, « Benefits of Energy Management Systems on local energy efficiency, an agricultural case study », in : *SmartGridComm 2019 - IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*, Beijing, China : IEEE, oct. 2019, p. 1-7, URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02315327>.
- [108] JP ROSS et Alan MEIER, « Whole-house measurements of standby power consumption », in : *Energy efficiency in household appliances and lighting*, Springer, 2001, p. 278-285.

- [109] Bruno ROSSI et Stanislav CHREN, « Smart Grids Data Analysis : A Systematic Mapping Study », in : *arXiv preprint arXiv :1808.00156* (2018).
- [110] Maurizio ROSSI, Alessandro TOPPANO et Davide BRUNELLI, « Real-time optimization of the battery banks lifetime in Hybrid Residential Electrical Systems », in : *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2014*, New Jersey : IEEE Conference Publications, 2014, p. 1-6, ISBN : 9783981537024, DOI : 10.7873/DATE.2014.152, URL : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6800353>.
- [111] Peter ROWLES, *Demand Response and Demand Side Management Whats the Difference ?*, sous la dir. d'Ian WILMS, 10 fév. 2010, URL : <http://www.energyadvantage.com/blog/2010/02/demand-response-demand-side-management-what%E2%80%99s-difference/>.
- [112] RTE, *Bilan Électrique 2018*, sous la dir. de DIRECTION INNOVATION ET DONNÉES, 2018, URL : <https://bilan-electrique-2018.rte-france.com/wp-content/uploads/2019/02/BE-PDF-2018v3.pdf> (visité le 15/11/2019).
- [113] Günther RUHE, Armin EBERLEIN et Dietmar PFAHL, « Trade-off analysis for requirements selection », in : *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering* 13.04 (2003), p. 345-366.
- [114] Mansour SABER, Wiest NICOLAS, Lefevre OLIVIER et Mazac SEBASTIEN, « Hemis : Hybrid Multi-agent architecture for energy management and home automation », in : *Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO), 2012 IEEE Sixth International Conference on*, IEEE, 2012, p. 229-230.
- [115] Ziyad SALAMEH, Margaret CASACCA et William LYNCH, « A mathematical model for lead-acid batteries », in : *IEEE Transactions on Energy Conversion* 7.1 (mars 1992), p. 93-98, DOI : 10.1109/60.124547.
- [116] Marla C SANCHEZ, Jonathan G KOOMEY, Mithra M MOEZZI, Alan MEIER et Wolfgang HUBER, « Miscellaneous electricity in US homes : historical decomposition and future trends », in : *Energy Policy* 26.8 (1998), p. 585-593.
- [117] Douglas C SCHMIDT, « Model-driven engineering », in : (2006).
- [118] Greyce N SCHROEDER, Charles STEINMETZ, Carlos E PEREIRA et Danubia B ESPINDOLA, « Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange », in : *IFAC-PapersOnLine* 49.30 (2016), p. 12-17.
- [119] Ntwali Benjamin SENDAMA, Mehdi LARAKI, Aawatif HAYAR et Yassine RIFI, « New Renewable Energy Allocation Algorithms based on Bin Packing in a Smart Home », in : *SMARTGREENS*, 2016, p. 309-315.
- [120] Miadreza SHAFIE-KHAH, Pierluigi SIANO, Jamshid AGHAEI, Mohammad AS MASOUM, Fangxing Fran LI et Joao PS CATALAO, « Comprehensive Review of the Recent Advances in Industrial and Commercial DR », in : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (2019).
- [121] Matthew R SHANER, Harry A ATWATER, Nathan S LEWIS et Eric W MCFARLAND, « A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy », in : *Energy & Environmental Science* 9.7 (2016), p. 2354-2371.

- [122] Navim SHARMA, Jeremy GUMMESON, David IRWIN et Prashant SHENOY, « Cloudy Computing : Leveraging Weather Forecasts in Energy Harvesting Sensor Systems », in : *Proc. Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conf. Sensor*, juin 2010, p. 1-9, DOI : 10.1109/SECON.2010.5508260.
- [123] Navin SHARMA, Pranshu SHARMA, David IRWIN et Prashant SHENOY, « Predicting solar generation from weather forecasts using machine learning », in : *Smart Grid Communications (Smart-GridComm), 2011 IEEE International Conference on*, IEEE, 2011, p. 528-533.
- [124] Yuanyuan SHI, Bolun XU, Di WANG et Baosen ZHANG, « Using Battery Storage for Peak Shaving and Frequency Regulation : Joint Optimization for Superlinear Gains », in : *arXiv preprint arXiv :1702.08065* (2017).
- [125] Will SIMM, Maria Angela FERRARIO, Adrian FRIDAY, Peter NEWMAN, Stephen FORSHAW, Mike HAZAS et Alan DIX, « Tيرة energy pulse : exploring renewable energy forecasts on the edge of the grid », in : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, 2015, p. 1965-1974.
- [126] Ilyes TÉGANI, Abdennacer ABOUBOU, Mohamed Yacine AYAD, Mohamed BECHERIF, Ramzi SAADI et Okba KRAA, « Optimal sizing design and energy management of stand-alone photovoltaic/wind generator systems », in : *Energy Procedia* 50 (2014), p. 163-170.
- [127] Anupam A THATTE, Le XIE, Daniel E VIASSOLO et Sunita SINGH, « Risk measure based robust bidding strategy for arbitrage using a wind farm and energy storage », in : *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.4 (2013), p. 2191-2199.
- [128] Mehmet UZUNOGLU, Omer C. ONAR et Mohammad S. ALAM, « Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications », in : *Renewable Energy* 34.3 (2009), p. 509-520, ISSN : 0960-1481, DOI : 10.1016/j.renene.2008.06.009.
- [129] John S VARDAKAS, Nizar ZORBA et Christos V VERIKOUKIS, « A survey on demand response programs in smart grids : Pricing methods and optimization algorithms », in : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17.1 (2014), p. 152-178.
- [130] Cédric VITTOZ, *Utilisation des méthodes de modélisation du secteur industriel pour représenter la conduite d'un système de production végétale*, mém. de mast., IFMA, Cemagref, 2005.
- [131] Cynthujah VIVEKANANTHAN, Yateendra MISHRA et Fangxing LI, « Real-Time Price Based Home Energy Management Scheduler », in : *IEEE Transactions on Power Systems* (2014), ISSN : 0885-8950, DOI : 10.1109/TPWRS.2014.2358684.
- [132] Vladimir VIYOVI, Mirjam MAKSIMOVI et Branko PERISI, « Sirius : A rapid development of DSM graphical editor », in : *IEEE 18th International Conference on Intelligent Engineering Systems INES 2014*, IEEE, 2014, p. 233-238.
- [133] Markus VÖLTER, Thomas STAHL, Jorn BETTIN, Arno HAASE et Simon HELSEN, *Model-driven software development : technology, engineering, management*, John Wiley & Sons, 2013.
- [134] Rahul WALAWALKAR, Jay APT et Rick MANCINI, « Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York », in : *Energy Policy* 35.4 (2007), p. 2558-2568.

- [135] Szymon WERMINSKI, Marcin JARNUT, Grzegorz BENYSEK et Jacek BOJARSKI, *Demand side management using DADR automation in the peak load reduction*, 2017, DOI : 10.1016/j.rser.2016.09.049.
- [136] XTEXT, éd., *Xtext - Language Engineering Made Easy!*, URL : <https://www.eclipse.org/xtext/> (visité le 23/01/2020).
- [137] Z YAHIA et A PRADHAN, « Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences : an experimental analysis », in : *Energy* (2018).
- [138] Jiahong YAN, « Development and Implementation of a Time-of-Use Based Home Energy Management System. », in : (2018).
- [139] Hongxing YANG, Wei ZHOU, Lin LU et Zhaohong FANG, « Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm », in : *Solar energy* 82.4 (2008), p. 354-367.
- [140] Andreea ZAMFIR, Sofia Elena COLESCA et Razvan-Andrei CORBOS, « Public policies to support the development of renewable energy in Romania : A review », in : 58 (2016), p. 87-106, ISSN : 1364-0321, DOI : 10.1016/j.rser.2015.12.235.
- [141] Chaoyun ZHANG, Mingjun ZHONG, Zongzuo WANG, Nigel GODDARD et Charles SUTTON, « Sequence-to-point learning with neural networks for nonintrusive load monitoring », in : *The Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-18)*, 2018.
- [142] Chengke ZHOU, Kejun QIAN, Malcolm ALLAN et Wenjun ZHOU, « Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems », in : *IEEE Transactions on Energy Conversion* 26.4 (déc. 2011), p. 1041-1050, DOI : 10.1109/TEC.2011.2159977.
- [143] Lirong ZHOU, Jianfeng Jing LI, Fangyi LI, Qiang MENG, Jianfeng Jing LI et Xingshuo XU, « Energy consumption model and energy efficiency of machine tools : a comprehensive literature review », in : *Journal of Cleaner Production* (2015), ISSN : 0959-6526, DOI : 10.1016/j.jclepro.2015.05.093, URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615006617>.

TITRE : Optimisation de l'utilisation des énergies renouvelables :
Un Jumeau Numérique pour les microgrilles

Mot clés : modélisation, simulation, smartgrid, langage dédié

Résumé :

La gestion de l'énergie représente un impact important sur l'économie des industriels et des microgrilles de manière générale. Plusieurs moyens matériels sont accessibles à un industriel afin de reprendre une certaine maîtrise sur sa consommation. Il peut s'agir de l'installation de moyens de production d'énergie renouvelable directement sur site, de stockage d'énergie, ou de réorganisations des activités, regroupées sous le terme de Demand Response. Au fil des années des méthodes se sont développées afin d'évaluer la pertinence de l'installation de certaines sources d'énergie en effectuant des simulations. Ces outils sont généralement spécifiques à un type d'énergie et acces-

sibles uniquement à des personnes habituées aux simulations numériques.

Dans cette thèse, nous défendons une méthodologie destinée aux experts de sociétés spécialisées en énergies renouvelables. Nous proposons un Jumeau Numérique comme point central afin de simuler le comportement d'une microgrille, évaluer la pertinence de changements et piloter du matériel. Notre approche possède plusieurs propriétés telles que la modularité, nécessaire à l'hétérogénéité du matériel, l'extensibilité nécessaire à l'évolution des outils et l'accessibilité, au travers un langage dédié utilisant le vocabulaire des experts. Nous validons notre proposition sur 4 cas d'études issus de collaboration avec des acteurs industriels.

TITLE: Local energy usage optimisation:
A Digital Twin for microgrid case study

Keywords: modeling, simulation, smartgrid, domain specific language

Abstract:

Energy management is a major economic concern for industrials and microgrids in general. These actors have multiple choices to act on that; they can install local renewable energy sources, energy storage or they can act on their consumption to better match the production, i.e. Demand Response. Multiple methods have emerged to evaluate the interest of various configurations through simulation. These tools are mostly specific to a particular type of energy source and require knowledge in numerical computing. In this thesis, we defend a method-

ology for experts in the energy sector based on Digital Twin. We propose a Digital Twin to simulate the behavior of a microgrid, evaluate the impact of changes on pieces of hardware or user habits. This digital twin is also connected to the running system to continuously monitor and act on real devices. Our approach aims to be modular to address the heterogeneity of the real world, extensible to follow the industrial sites evolution and accessible to experts thanks to a Domain Specific Language. We validate our proposal through 4 case studies in collaboration with an industrial player.