

Génération d'instances pour un modèle d'optimisation de système de production électrique hybride

Martin Debouté



Tutrice : Anna Robert
Enseignants référents : François Clautiaux & Pierre Pesneau

Engagement de non plagiat

Moi, Martin Debouté, déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour produire et écrire ce rapport.

Fait à Paris-Saclay le 12 août 2022,

Signature

Martin Debouté,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martin Debouté', with a stylized flourish above the name.

Résumé

Les récentes politiques climatiques et l'évolution des marchés ont conduit le secteur industriel à investir dans de nouvelles technologies de production d'électricité dans le but de réduire l'empreinte carbone de l'homme. Dans les pays en développement, les installations industrielles dépendent encore de la production d'électricité grâce aux combustibles fossiles. De plus, la production d'électricité est soumise à des spécifications strictes en termes de fiabilité et de continuité d'approvisionnement. Dans ce contexte, l'intégration de parcs photovoltaïques dans les systèmes électriques industriels apporte de nouveaux défis liés à la gestion de leur intermittence. En effet, les générateurs fossiles et les systèmes de stockage d'énergie doivent permettre de compenser rapidement les baisses de production électrique des panneaux solaires liées à l'aléa afin de garantir la stabilité électrique. Dès lors, la planification des systèmes hybrides doit désormais intégrer les liens entre la variabilité de l'ensoleillement et la qualité d'approvisionnement, ce qui modifie le paradigme d'optimisation technico-économique. Le travail proposé ici est en fait une étape préliminaire à des travaux qui seront conduits dans l'avenir. De manière très simplifiée, et pour appréhender le problème, nous considérons une version déterministe dans laquelle la production des panneaux photovoltaïques est connue. La mission principale de ce stage était donc de créer une application web permettant à la R&D de TotalEnergies de générer des instances difficiles (inspirées de jeux de données issus de la littérature) afin de tester et visualiser les solutions d'un modèle d'optimisation déterministe. L'objectif du modèle d'optimisation est de satisfaire à tout moment les besoins énergétiques d'un site industriel tout en minimisant les émissions de CO_2 du système hybride qui produit l'énergie.

Mots clés : *systèmes hybrides, opérations, MILP, instances, test*

Abstract

Recent policies and markets evolutions have pushed the industry to invest in new electricity supply technologies with the aim of reducing its environmental footprint. In developing countries, industrial facilities still depend on on-site fossil fuel generation. For economic and safety reasons, the electricity supply follows strict reliability specifications in terms of power plant availability and power quality. The integration of solar power plants in industrial power systems brings new challenges related to the short-term variability. Indeed, if fossil generators cannot quickly compensate for the solar power drops, a fast-responding storage system must take over to guarantee electrical stability. Therefore, the planning of industrial microgrids¹ must now integrate the relationship between the short-term variability from renewable energies and the quality of supply, which alters the techno-economic optimization paradigm. The work proposed here is in fact a preliminary step to works that will be carried out in the future. In a very simplified way, and to understand the problem, we consider a deterministic version in which the production of the photovoltaic panels is known. The main mission of this internship was to create a web application allowing TotalEnergies R&D to generate difficult instances (inspired by benchmarks from the literature) in order to test and visualize the solutions of a deterministic optimization model. The objective of the optimization model is to satisfy the energy needs of an industrial site at all times while minimizing the CO_2 emissions of the hybrid system that produces the energy.

Keywords: *microgrids, operations, MILP, instances, test*

1. A microgrid is an intelligent electrical network powered by local renewable energy production to supply buildings with electricity. A microgrid can operate autonomously, without being connected to the general network (Polleux, 2022).

Remerciements

Je tiens à remercier ma tutrice Anna Robert de m'avoir si bien encadré, pour sa patience, sa bienveillance, sa disponibilité ainsi que pour ses conseils avisés.

Merci également à tous les membres de la plateforme numérique de Paris-Saclay pour leur accueil chaleureux, leur expertise et les connaissances qu'ils ont partagées avec moi.

Table des matières

Introduction	6
1 Présentation de TotalEnergies	7
1.1 Histoire de la compagnie	7
1.2 Activités et branches	7
1.2.1 Exploration-Production	7
1.2.2 Raffinage-Chimie	7
1.2.3 Gaz, Renouvelables et Electricité	7
1.2.4 Marketing et Services	8
1.2.5 OneTech	8
1.3 Un acteur majeur de la transition énergétique	9
2 Contenu du stage	10
2.1 Problème d'optimisation opérationnelle traité	10
2.1.1 Leviers de décision	11
2.1.2 Modélisation du problème d'optimisation déterministe	11
2.2 Recherches	15
2.2.1 Conception du site internet	15
2.2.2 Conception du générateur d'instance	16
2.2.3 Expérimentations et résultats	18
2.3 Expérience en entreprise	18
Conclusion	19
A Annexe	20
A.1 Exemple d'un type de <i>gas engine</i> disponible pour le site industriel ainsi que ses paramètres	20
A.2 Fichier comportant les informations du <i>microgrid</i>	21
A.3 Fichier comportant les séries temporelles de demande et production des PV du site industriel	22

Introduction

Avant toute chose, il est bon de rappeler que ce stage s'inscrit dans la continuité d'une étude bibliographique réalisée pour TotalEnergies, dans le cadre d'un TER² pour l'Université de Bordeaux. Ce rapport étant la suite logique de ce précédent travail, il est préférable de lire le TER au préalable. Cependant, nous ferons en sorte que la lecture du TER ne soit pas nécessaire à la bonne compréhension du présent document.

TotalEnergies est une compagnie mondiale de production et fourniture d'énergies, telles que le pétrole, l'essence, les biocarburants, le gaz, et l'électricité produite à partir des énergies renouvelables. Ses activités sont variées, allant de l'exploration, l'extraction et le raffinage du pétrole et du gaz naturel, à leur distribution aux particuliers et aux professionnels. TotalEnergies développe de plus en plus sa branche concernant la production d'énergie propre, notamment dans le solaire et l'éolien.

Son siège social se trouve à La Défense au sein de la tour Coupole, et un de ses centres d'innovations et de R&D se situe à Paris-Saclay dans le bâtiment *Playground*.

C'est dans cette entreprise que j'ai effectué mon stage de fin de première année de Master, du 18 mai au 12 août 2022 en Recherche et Développement. J'étais la plupart du temps dans les nouveaux bureaux de la R&D au *Playground*, me rendant parfois à la Défense ou à la *Digital Factory* dans le second arrondissement de Paris.

J'ai choisi de faire mon stage chez TotalEnergies car tout d'abord j'en ai eu l'opportunité. De plus, le sujet était très intéressant et s'inscrivait parfaitement dans la formation que j'avais reçue jusqu'ici, c'est-à-dire l'aide à la décision grâce l'optimisation et la Recherche Opérationnelle. Le domaine de l'énergie m'était inconnu et j'étais curieux de le découvrir. Enfin, ayant déjà effectué un stage en laboratoire de recherche il était important pour moi d'être introduit à la vie en entreprise. Durant ce stage j'ai été encadré par Anna Robert, chef de projet R&D Optimisation.

Le réchauffement climatique prend de l'ampleur chaque année et a des conséquences désastreuses sur la planète, comme la disparition de la faune et de la flore, la montée des eaux provoquant des inondations, ou encore des grandes sécheresses. Nous vivons une période où il est impératif de réduire la pollution et notre empreinte carbone, responsable de ce dérèglement climatique. Dans cette crise écologique, il est donc primordial de trouver un équilibre entre l'exploitation des énergies fossiles, encore indispensables, et le développement des énergies renouvelables. L'objectif de mon stage était de qualifier un modèle mathématique de gestion opérationnelle d'un système hybride de production d'énergie composé de panneaux photovoltaïques, de turbines à gaz et de batteries, en le testant à grande échelle. L'objectif de l'optimisation est de satisfaire à chaque instant les besoins énergétiques d'un site industriel tout en minimisant les émissions en CO_2 du système hybride qui produit l'énergie.

Dans la suite du document je présenterai dans un premier temps l'histoire de TotalEnergies et comment mon stage s'y inscrit. J'expliquerai ensuite en détail les différentes missions que j'ai réalisées durant ces 3 mois.

2. Travail d'Études et de Recherches.

1.1 Histoire de la compagnie

TotalEnergies est fondée en 1924 sous le nom de « Compagnie française des pétroles » par Ernest Mercier, renommée Total en 1954, puis TotalEnergies en 2021. C'est une entreprise de production et de fourniture d'énergies, elle fait partie des « *supermajors* »^[1] et des cinq plus grandes entreprises françaises en 2020. Aujourd'hui, TotalEnergies est présente dans plus de 130 pays et emploie plus de 100 000 collaborateurs.

1.2 Activités et branches

Les activités de TotalEnergies couvrent l'ensemble de la chaîne logistique, de l'extraction des énergies fossiles à la distribution en passant par le raffinage. Le groupe est aussi un acteur important dans le domaine de la chimie, et de plus en plus dans les domaines des énergies renouvelables et de l'électricité. La compagnie est organisée en différentes activités que nous allons présenter succinctement.

1.2.1 Exploration-Production

Selon le scénario Développement Durable de l'Agence Internationale de l'Energie, les hydrocarbures représenteront près de la moitié des consommations d'énergie d'ici 2040. Il est donc nécessaire de continuer à produire cette énergie indispensable à notre quotidien. L'ambition de TotalEnergies est de devenir le major de l'énergie responsable en fournissant du pétrole et du gaz plus abordables, plus sûrs, plus propres et accessibles au plus grand nombre.

L'Exploration-Production est la branche qui mène les opérations d'exploration, de développement et de production de pétrole et de gaz naturel de TotalEnergies. Cette branche est un acteur majeur dans les domaines de *l'offshore*^[2], du *deep offshore* et du gaz naturel, avec des positions au Moyen-Orient, en Afrique et en Mer du Nord. Elle produit l'équivalent de près de 3 millions de barils de pétrole par jour.

1.2.2 Raffinage-Chimie

Le raffinage consiste à transformer le pétrole brut en produits finis ou intermédiaires pour la chimie. La pétrochimie vise à transformer le pétrole ou le gaz naturel pour produire les composés chimiques de base de l'industrie de la chimie. Ces composés servent ensuite à fabriquer des produits chimiques utilisés dans de nombreux usages : pharmacie, agriculture, cosmétique, électronique, automobile, aéronautique ou encore textile. La branche raffinage-chimie regroupe les activités de raffinage, de pétrochimie, de chimie de spécialités et de production de (bio)carburants.

1.2.3 Gaz, Renouvelables et Electricité

Cette nouvelle branche créée en 2016 s'inscrit dans la volonté de TotalEnergies de devenir *leader* de l'énergie responsable. Comme son nom l'indique, cette branche se concentre sur trois points majeurs : le gaz et notamment sa liquéfaction, son transport et sa commercialisation suite à sa production par

1. Les six plus grandes compagnies pétrolières privées mondiales.

2. Activité se déroulant en mer sans relever de la pêche ou du transport maritime.

la branche exploration-production ; les énergies renouvelables (majoritairement le solaire et l'éolien), avec le développement de la production électrique renouvelable et de la problématique du stockage de l'énergie ; et enfin l'innovation et l'efficacité énergétique afin de proposer des solutions opérationnelles dans l'efficacité énergétique, et des projets de capture du CO_2 .

1.2.4 Marketing et Services

Cette branche est chargée du développement des activités de distribution de produits pétroliers, et des services aux particuliers et aux professionnels dans les secteurs de la mobilité, de l'habitat et de l'industrie. La branche est présente dans plus de 150 pays et gère un réseau de plus de 16 000 stations-service.

1.2.5 OneTech

La *Holding* qui est en charge des fonctions transverses et régaliennes de la compagnie a mis en place le projet OneTech, qui regroupe l'ensemble des équipes R&D de TotalEnergies sous une seule direction, afin de faciliter les échanges entre experts et allouer les équipes selon les priorités. C'est dans cette branche que j'opérais (OT/R&D/POW/NUM/SC).

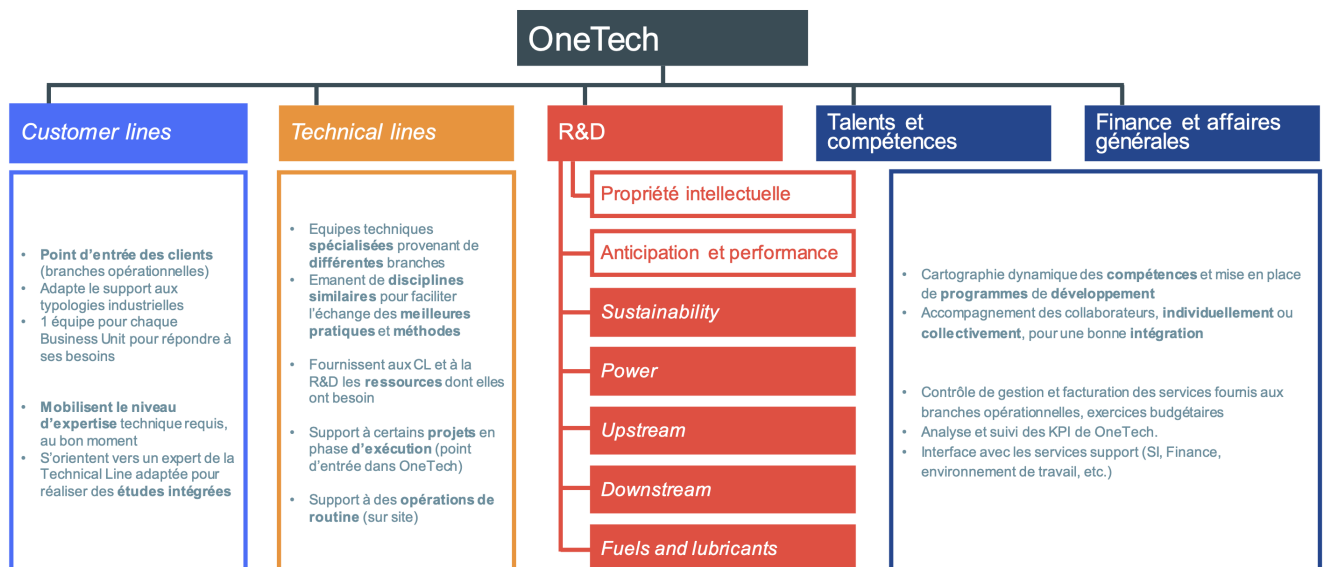


FIGURE 1.1 – Organisation de la branche OneTech

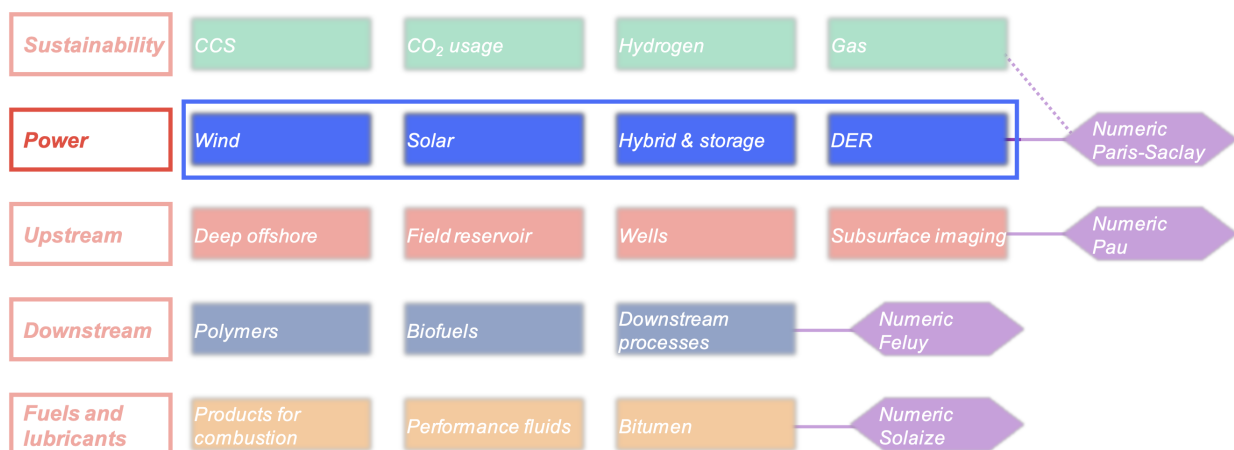


FIGURE 1.2 – Organisation de la ligne R&D Power

1.3 Un acteur majeur de la transition énergétique

Bien qu'étant présente dans de nombreux domaines énergétiques, TotalEnergies a encore aujourd'hui l'image d'une compagnie uniquement pétrolière. Pourtant ces dernières années TotalEnergies s'engage de plus en plus dans les énergies renouvelables, en investissant massivement dans le solaire et l'éolien notamment. Elle a pour objectif d'être dans le top 5 des producteurs d'énergies renouvelables en 2030. Elle investit également dans le stockage d'électricité, et prévoit que l'électricité représentera 40% de ses ventes d'ici 2050.

Le changement de nom de l'entreprise de Total à TotalEnergies en 2021 s'inscrit dans cette volonté de mettre en adéquation son image et ses activités, et de montrer que TotalEnergies n'est pas qu'une compagnie pétrolière mais une compagnie qui produit toute sorte d'énergies. TotalEnergies s'est également engagée à atteindre le « *net zero emission* »³ de CO_2 en 2050. C'est dans ce contexte que s'inscrit mon stage. En effet, l'objectif est de satisfaire les besoins en énergie d'un site industriel, à l'aide de panneaux photovoltaïques et de turbines à gaz, en minimisant les émissions en CO_2 de celles-ci.



FIGURE 1.3 – Atteindre le « *net zero emission* » de CO_2 d'ici 2050

Répartition des investissements consacrés à la R&D depuis 5 ans

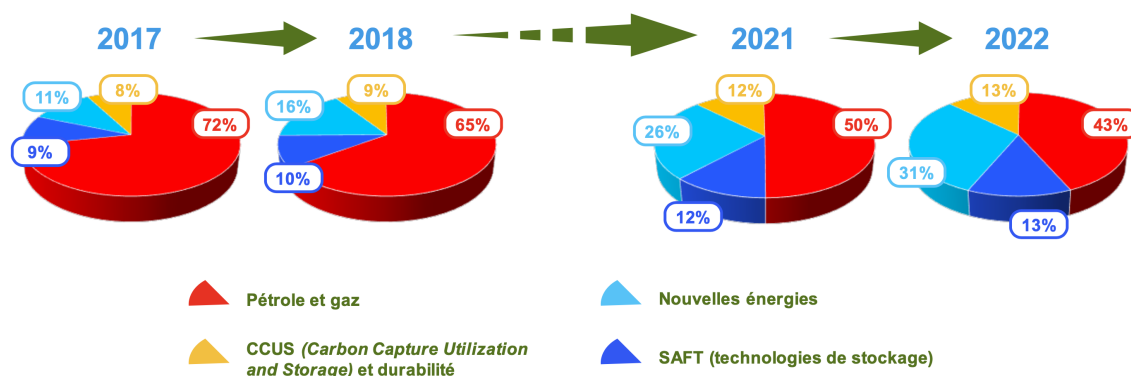


FIGURE 1.4 – Une nouvelle stratégie pour servir cette ambition

3. La neutralité carbone à l'intérieur d'un périmètre donné est un état d'équilibre à atteindre entre les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et leur retrait de l'atmosphère par l'homme ou de son fait. La différence entre les gaz émis et extraits étant alors égale à zéro (Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ? 2019).

2.1 Problème d'optimisation opérationnelle traité

Ici nous considérons un système hybride composé de générateurs électriques à combustible fossile (*gas turbines* et *gas engines*)¹ mais dans la suite du rapport nous rassemblerons ces deux technologies sous le nom de turbines à gaz pour plus de simplicité car ils se contrôlent de la même façon. Le système est aussi composé de panneaux photovoltaïques (PV), et d'éléments de stockage comme des batteries. Le dimensionnement du *microgrid* est fixé et l'on cherche à opérer de manière optimale ses éléments, selon un critère d'émission de CO_2 liée à l'utilisation des turbines à gaz. La demande ainsi que la production des PV sont également supposées données. De ce fait on ne peut agir que sur les opérations relatives aux turbines et aux batteries. Le système peut être représenté de la façon suivante :

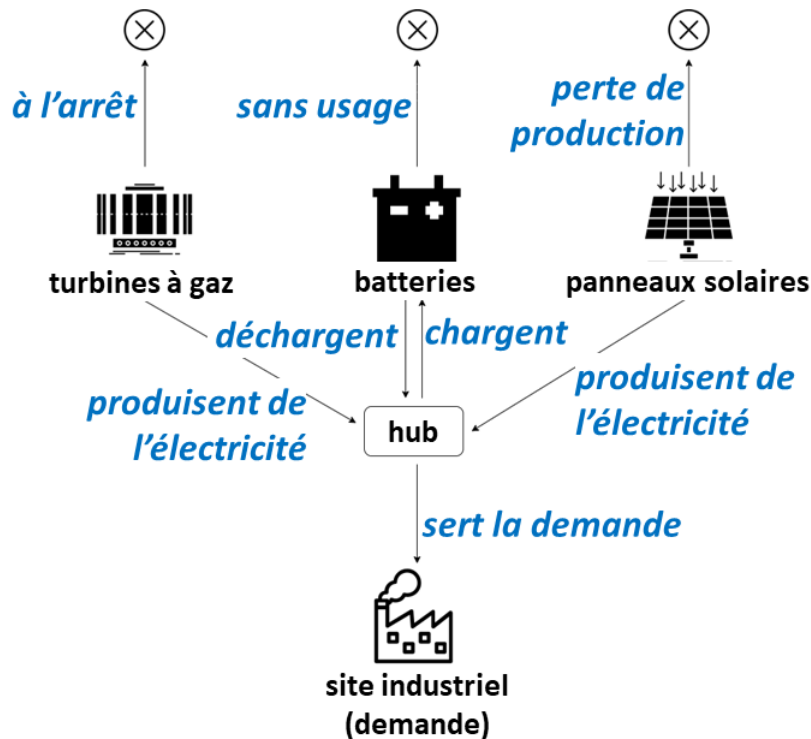


FIGURE 2.1 – Système hybride considéré et relations entre ses éléments (Abergel, Robert, Ghazouani et Monerrat, 2022)

Dans cette étude nous considérons un horizon temporel allant de 1 à 7 jours, divisé en pas de temps allant de 10 minutes à 60 minutes.

1. Par rapport aux moteurs à gaz, les turbines à gaz ont une concentration significativement plus faible de polluants atmosphériques dans leurs émissions. Les moteurs consomment moins de carburant et émettent moins de gaz, mais produisent une concentration plus élevée de polluants (Gas Turbines or Gas Engines? 2022).

2.1.1 Leviers de décision

Les turbines à gaz. Elles peuvent être dans un état en opération (allumées et opérationnelles), en phase de chauffe (allumées mais non-encore opérationnelles), ou éteintes. Les décisions de contrôle sont donc d’allumer une turbine, de l’éteindre, ou de ne rien faire, sachant qu’au pas de temps considéré, prendre la décision d’allumer une turbine à l’instant t ne permet pas d’utiliser sa production instantanément, l’ordre de grandeur de la durée de la phase de chauffe est de 30 minutes. Une fois la turbine dans l’état d’opérabilité, on pilote son facteur de charge dans un intervalle de puissance fixé (typiquement entre 50% et 100% de sa puissance nominale). De ce facteur de charge dépendront les émissions de CO_2 à minimiser. En outre, la variation du facteur de charge entre 2 pas de temps est contrainte à la hausse comme à la baisse.

Les batteries. Leur état correspond à leur niveau de charge à chaque instant. Les décisions de contrôle sont de charger ou décharger une batterie, sachant que ces 2 opérations ne peuvent être prises simultanément, ou encore de ne rien faire. Une batterie a une capacité maximale de charge. L’énergie que l’on peut charger (resp. décharger) à chaque instant est bornée.

2.1.2 Modélisation du problème d’optimisation déterministe

Il s’agit d’une variante déterministe d’un problème très clairement stochastique, notamment compte tenu de l’intermittence de la production photovoltaïque. De manière simplifiée, et pour appréhender le problème, M. Abergel (2021) propose une formulation linéaire en variables mixtes du problème, intégrant les contraintes du *unit commitment problem* (Pan, Guan, Watson et Wang, 2015) pour les turbines et des contraintes d’équilibre et de bornes classiques pour la satisfaction de la demande, et l’usage des turbines et des batteries. La fonction objectif est considérée linéaire pour les émissions de CO_2 sur l’intervalle d’opération des turbines autorisé.

Paramètres :

Notation	Définition	Unité	Domaine
D_t	Demande en puissance du site industriel à l’instant t	MW	\mathbb{R}_+
pp_t	Puissance produite par les panneaux à l’instant t	MW	\mathbb{R}_+
N_b	Nombre de batteries	Pas d’unité	\mathbb{N}
P^{in}/P^{out}	Charge/Décharge maximale d’une batterie par pas de temps	MW	\mathbb{R}_+
K	Capacité énergétique maximale d’une batterie	MWh	\mathbb{R}_+
λ	Rendement des batteries	Pas d’unité	$[0, 1[$

TABLE 2.1 – Paramètres du modèle déterministe relatifs aux batteries

Notation	Définition	Unité	Domaine
N_g	Nombre de turbines	Pas d'unité	\mathbb{N}^*
P^{max}	Puissance nominale d'une turbine	MW	\mathbb{R}_+
P^{min}	Puissance minimale en dessous de laquelle la turbine ne peut opérer	MW	\mathbb{R}_+
V^+/V^-	Augmentation/diminution maximale de production de puissance d'une turbine entre deux pas de temps (ramp up/down)	MW	\mathbb{R}_+
CO_{2ef}	Facteur d'émission de CO_2	t_{CO_2}/t_{fuel}	\mathbb{R}_+
PCI	Pouvoir calorifique inférieur, <i>i.e</i> énergie dégagée par tonne de fuel utilisée	MJ/t_{fuel}	\mathbb{R}_+
a, b	Paramètres de la fonction affine reliant la consommation de fuel à la puissance produite	$kJ/kWh, kJ$	\mathbb{R}_+
MU/MD	Durées minimales pendant lesquelles une turbine ne peut changer d'état (allumée/éteinte)	Heure (h)	\mathbb{N}^*

TABLE 2.2 – Paramètres du modèle déterministe relatifs aux turbines à gaz

Variables de décisions :

Notation	Définition	Unité	Domaine
$eb_{t,i}$	Stock d'énergie de la $i^{ème}$ batterie au pas de temps t	MWh	\mathbb{R}_+
$pb_{t,i}^{in}/pb_{t,i}^{out}$	Puissance chargée/déchargée dans la $i^{ème}$ batterie au pas de temps t	MW	\mathbb{R}_+
$pg_{t,i}$	Puissance produite par la $i^{ème}$ turbine au pas de temps t	MW	\mathbb{R}_+
$y_{t,i}$	Vaut 1 si la $i^{ème}$ turbine produit à l'instant t , 0 sinon	Pas d'unité	$\{0, 1\}$
$u_{t,i}$	Vaut 1 si la $i^{ème}$ turbine commence à produire à l'instant t , 0 sinon	Pas d'unité	$\{0, 1\}$

TABLE 2.3 – Variables de décision du modèle déterministe

Contraintes

- Satisfaction de la demande :

$$pp_t + \sum_{i=1}^{N_g} pg_{t,i} + \sum_{i=1}^{N_b} (\lambda pb_{t,i}^{out} - pb_{t,i}^{in}) \geq D_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.1)$$

- Batteries :

$$eb_{t,i} \leq K \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_b \quad (2.2)$$

$$pb_{t,i}^{in} \leq P^{in} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_b \quad (2.3)$$

$$pb_{t,i}^{out} \leq P^{out} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_b \quad (2.4)$$

$$eb_{t+1,i} = eb_{t,i} + (pb_{t,i}^{in} - pb_{t,i}^{out}) \times \phi_t \quad \forall t = 1, \dots, T-1 \quad \forall i = 1, \dots, N_b \quad (2.5)$$

- Turbines à gaz :

$$\sum_{t'=t-MU+1}^t u_{t',i} \leq y_{t,i} \quad \forall t = MU+1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.6)$$

$$\sum_{t'=t-MD+1}^t u_{t',i} \leq 1 - y_{t-MD,i} \quad \forall t = MD+1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.7)$$

$$-y_{t-1,i} + y_{t,i} \leq u_{t,i} \quad \forall t = 2, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.8)$$

$$P^{min} \times y_{t,i} \leq pg_{t,i} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.9)$$

$$pg_{t,i} \leq P^{max} \times y_{t,i} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.10)$$

$$-V^- \leq pg_{t,i} - pg_{t-1,i} \quad \forall t = 2, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.11)$$

$$pg_{t,i} - pg_{t-1,i} \leq V^+ \quad \forall t = 2, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.12)$$

- Domaines de définition :

$$eb_{t,i}, pb_{t,i}^{in}, pb_{t,i}^{out}, pg_{t,i} \in \mathbb{R}_+ \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.13)$$

$$y_{t,i}, u_{t,i} \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall i = 1, \dots, N_g \quad (2.14)$$

La contrainte (2.1) assure la satisfaction de la demande. L'énergie produite par les turbines et les panneaux photovoltaïques, ajoutée à l'énergie déchargée de la batterie doit être supérieure à la demande à chaque instant.

La contrainte (2.2) borne le stockage des batteries à chaque instant.

Les contraintes (2.3) et (2.4) sont des contraintes de borne sur la puissance chargée et déchargée des batteries.

La contrainte (2.5) exprime la dynamique des batteries au cours du temps.

Les contraintes (2.6) et (2.7) assurent un temps minimum pendant lequel une turbine ne peut pas changer d'état après avoir été démarrée ou éteinte.

La contrainte (2.8) relie la variable d'état des turbines à la variable de démarrage.

Les contraintes (2.9) et (2.10) sont des contraintes de borne sur la production des turbines.

Les contraintes (2.11) et (2.12) empêchent les turbines d'augmenter ou diminuer leur production plus qu'un certain plafond entre deux pas de temps.

Les contraintes (2.13) et (2.14) donnent les domaines de définition des variables de décision.

Fonction objectif

On cherche à minimiser les émissions en CO_2 du système, données par la fonction suivante :

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (a \times pg_{t,i} \times \phi_t + b \times y_{t,i}) \times \frac{CO_{2ef}}{PCI} \quad (2.15)$$

Où ϕ_t est la granularité temporelle (*i.e* le pas de temps) des séries temporelles de la demande du site et de la production électrique de son parc de PV.

Une représentation de la fonction reliant la consommation de fuel à la puissance produite ainsi qu'une approximation de sa linéarisation se trouve ci-dessous :

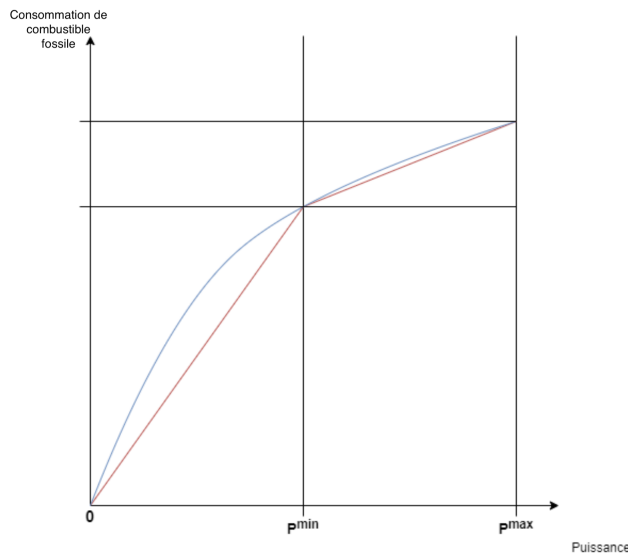


FIGURE 2.2 – Fonction d'efficacité de la production des turbines (en bleu) et son approximation linéaire (en rouge)

2.2 Recherches

2.2.1 Conception du site internet

Durant ce stage je fus assez autonome dans ma façon de travailler et mon organisation. La seule contrainte qui m'était imposée était de travailler avec le langage de programmation Python puisque le modèle avait été implémenté dans ce langage à l'aide de la bibliothèque d'optimisation Pyomo (Bynum, Hackebeil, Hart, Laird, Nicholson, Sirola, Watson et Woodruff, 2021; Hart, Watson et Woodruff, 2011). Malheureusement lors du premier mois de mon stage, à cause de retards administratifs, je n'avais pas accès aux différents dépôts me permettant de m'approprier le code déjà existant. J'ai donc choisi de commencer la conception du site internet sans plus tarder. Je décidai de développer le site avec un *framework*² web Python bien connu, Django. J'ai choisi ce dernier car il est très utilisé (notamment par Instagram, Pinterest ou encore la NASA) et il prend en charge une grande partie des tracas du développement web, on peut donc se concentrer sur l'écriture de l'application sans avoir à réinventer la roue. De plus, Django est gratuit et *open source*. Bien entendu Python ne suffisant pas, je codai la partie *frontend* du site avec HTML, CSS et un peu de Javascript.

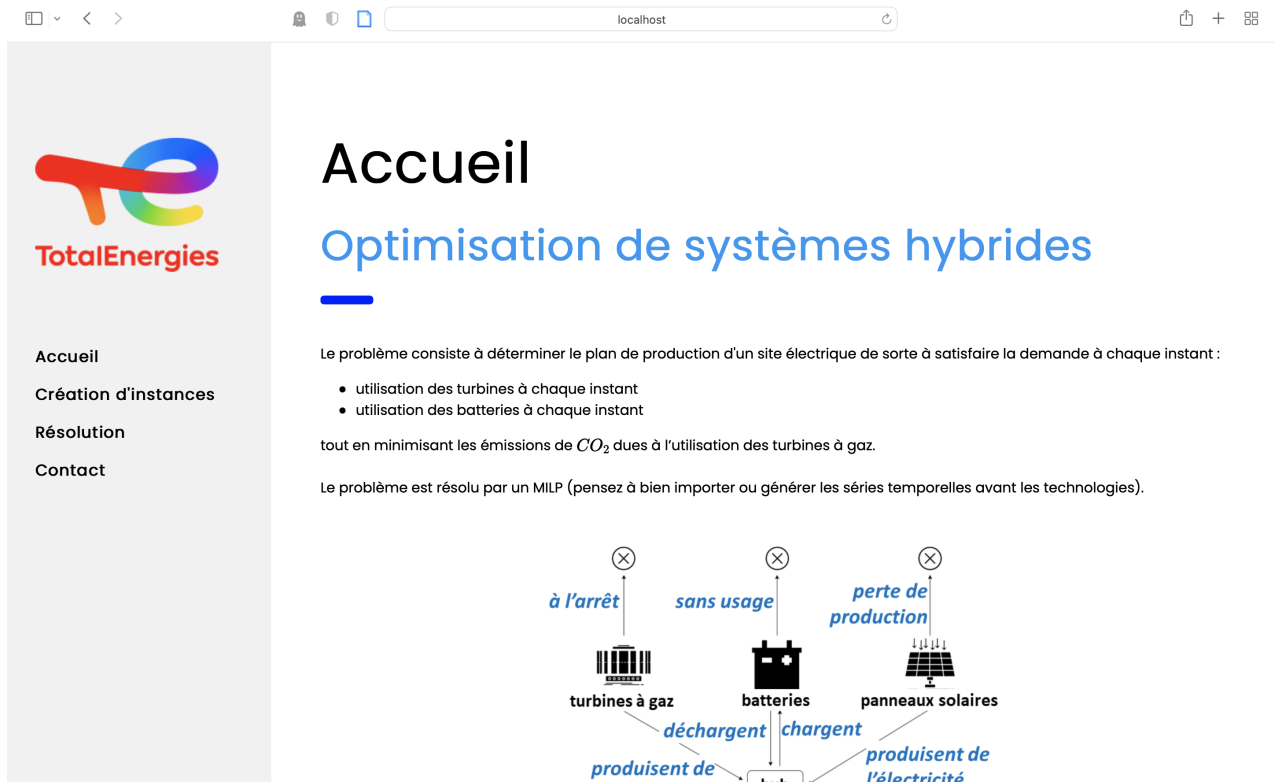


FIGURE 2.3 – Rendu du site web

Le code est organisé en différents dossiers :

- **src** : contient le code du projet
- **media/data** : contient des données utiles pour l'application web (plus précisément, les données qui sont utilisées pour générer des séries temporelles)
- **media/instances** : contient l'instance du problème d'optimisation produite par l'application web

2. Un *framework* désigne en programmation informatique un ensemble d'outils et de composants logiciels à la base d'un logiciel ou d'une application.

Voici un schéma explicatif de la structure du projet :

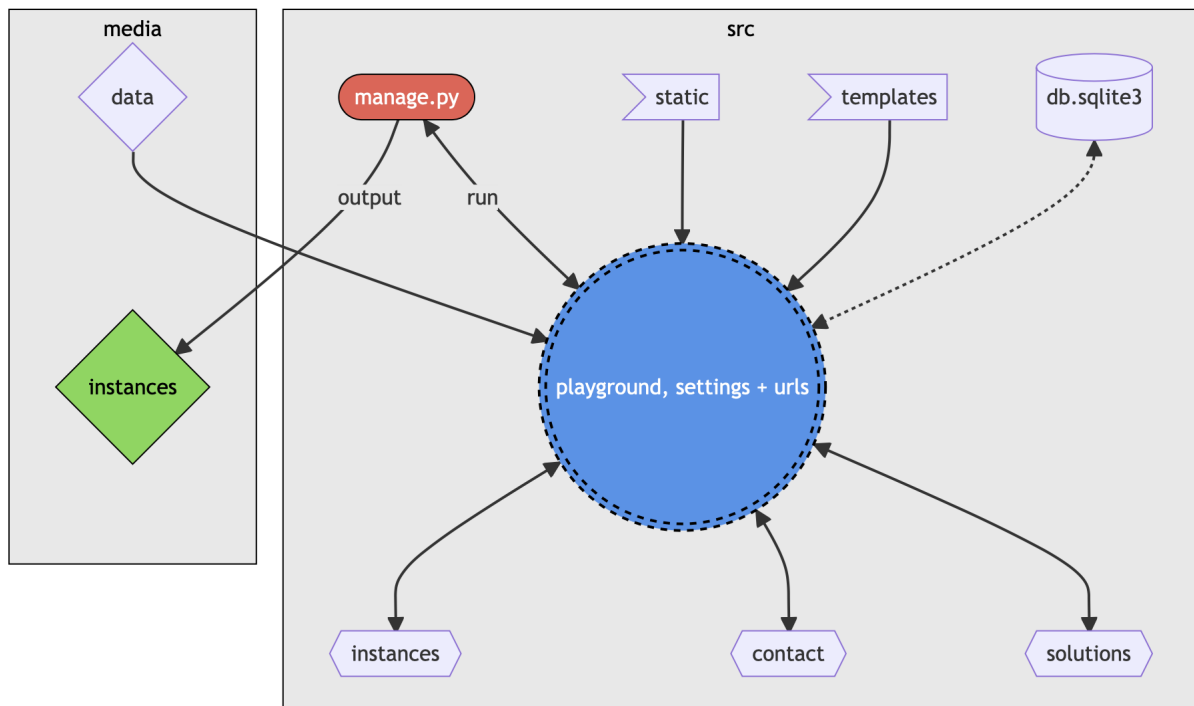


FIGURE 2.4 – Organisation du code du projet

Où `manage.py` est le *script* qui nous permet d'exécuter le serveur Web. **Playground** représente le cœur du projet, où l'on peut changer différents paramètres ainsi que la page d'accueil. Chaque dossier : **folder** est une « application Django » et représente un onglet du site web. Ils ont tous la même structure de fichiers et suivent le *design pattern*³ MVC (modèle Vue-Contrôleur). Notez que **Playground** est également un dossier comme celui-ci, il est juste un peu différent des trois autres dans la mesure où il contrôle plus de choses. Il y a aussi un fichier `db.sqlite3` qui contient la base de données du site. Enfin, `static` et `templates`⁴ sont des dossiers globaux contenant certains fichiers utiles à la mise en forme du site ainsi que son interaction avec l'utilisateur.

2.2.2 Conception du générateur d'instance

Une fois la coquille du site terminée je me suis mis à la conception d'un programme qui génère des instances. Une instance est composée de deux types d'éléments, des séries temporelles (la demande et la production électrique des PV du site à chaque pas de temps) ainsi que les paramètres des différentes briques technologiques (turbines à gaz et batteries). Ces informations sont organisées dans trois fichiers différents :

1. un fichier au format Excel (XSLX) contenant les deux séries temporelles dans deux feuilles différentes
2. un fichier au format JSON contenant les paramètres des différentes turbines à gaz disponibles pour la création du *microgrid*
3. un fichier au format JSON contenant certains paramètres importants pour le modèle (horizon temporel + pas de temps des séries temporelles) ainsi que le type de turbines à gaz et de batteries utilisées et leurs nombres

3. Arrangement caractéristique de modules, reconnu comme bonne pratique en réponse à un problème de conception logiciel.

4. Concept de programmation générique.

Nous avons mis en annexe (A) un exemple d’une petite instance pour le problème.

Pour la conception d’instances je me suis concentré dans un premier temps sur les séries temporelles. La demande du site ainsi que la production électrique de son parc de PV étant supposées connues, initialement je n’avais pas besoin de générer de fichiers Excel. Cependant, j’avais quand même besoin de ce type de fichier afin de constituer une instance pour notre problème et tester notre solveur. J’ai donc utilisé les données libres de droits du *microgrid* de Liège disponibles gratuitement sur Kaggle⁵ (Dumas, 2019) afin de me constituer une base de données. J’ai dû créer un code qui reformate les données puisque nous avons 39 jours de séries temporelles au pas de temps 5 secondes et nous voulions des pas de temps multiples de 10 minutes, sans parler de la découpe des données pour avoir différents horizons temporels. Quant à l’ordre de grandeur des unités, les valeurs des séries temporelles avaient été normalisées et puisque ce qui nous intéressait c’était le profil de production et de demande il nous suffisait donc de multiplier les valeurs par un coefficient pour obtenir ce que nous voulions.

La suite logique fut de concevoir un moyen de générer des paramètres de turbines à gaz (*i.e gas turbines* et *gas engines*) et de batteries cohérents et réalistes. Pour ceci, je me suis inspiré de différents travaux. Ceux de Knueven, Ostrowski et Watson (2018) m’ont permis de comprendre que la source principale de difficulté à résoudre une instance du *unit commitment problem* résidait dans son nombre élevé de générateurs identiques (la grande taille de l’espace de recherche est induite par la symétrie des variables de décisions). En effet, leurs tests démontrent que la présence de générateurs identiques dans une même instance peuvent affecter négativement les performances des solveurs industriels. Une autre source de difficulté vient de la forme des profils de demande et de production des PV. Ainsi en toute logique une demande moyenne équivalant à 70% de la puissance maximale du site sera plus compliquée à satisfaire qu’une demande moins élevée.

Les travaux de M. Polleux (2022) quant à eux, m’ont servi à mieux comprendre la conception et le fonctionnement des *microgrids* ainsi que la difficulté à établir certains paramètres. Par exemple, les paramètres (a, b) (2.2) de la fonction affine (2.2) reliant la consommation de fuel à la puissance produite des turbines à gaz ainsi que les paramètres $CO2_{ef}$ et PCI relatifs au fuel utilisé (2.2), résultent d’un long travail de simulation. Une fois renseigné sur les technologies actuelles (*Siemens Gas Turbines Portfolio* 2022; *Overview of Siemens small power generating units* 2022; *ESS Market brochure* 2022), je me suis mis à créer un « catalogue » de technologies dont je pourrais me servir pour créer mes instances. J’ai ensuite créé une structure de données et des fonctions afin de générer du bruit uniforme pour générer de nouvelles technologies qui dérivent de ce catalogue.

Concernant le dimensionnement de mes instances de *microgrid* je me suis là aussi inspiré, en partie, du cas classique présent dans la thèse de M. Polleux (2022), à savoir :

- un nombre de *gas turbines* variant entre 0 et 5 (d’une puissance nominale allant de 40 à 80 *MW*)
- un nombre de *gas engines* variant entre 0 et 15 (d’une puissance nominale d’environ 10 *MW* pour chaque moteur)
- une capacité photovoltaïque installée d’environ 70 *MW* en pic
- une capacité de batteries (nous préférons le terme d’*Energy Storage System* ou ESS en industrie) d’environ 20 *MWh*
- une demande maximale avoisinant 80% de la puissance maximale délivrable par le système hybride (sans compter l’énergie potentiellement stockée dans les ESS)

On trouve un exemple de paramètres de *gas engine* (A.1) et d’ESS (A.2) en annexe.

5. Kaggle est une plateforme web organisant des compétitions en science des données appartenant à Google.

2.2.3 Expérimentations et résultats

La difficulté était de générer des instances réalistes, difficiles et réalisables dans tous les cas. Nous y sommes parvenus grâce à la méthode présentée ci-dessus. Nous avons obtenu des résultats encourageants et générés des instances difficiles à résoudre pour un solveur commercial (Gurobi 9.5.1 dans notre cas). Par exemple, sur une grosse instance d'environ 7 jours au pas de temps 20 minutes, la durée de résolution jusqu'à l'optimum est de 6 minutes (pour 382 152 itérations de l'algorithme simplexe) contre environ 5 secondes pour une instance facile du même type. Ou encore 2 minutes et 30 secondes (pour 171 904 itérations de l'algorithme simplexe) pour une instance de petite taille, ici un horizon temporel de deux jours au pas de temps 20 minutes, contre une résolution quasiment instantanée pour une instance facile de même taille.

Malheureusement nous n'avons pas eu le temps de connecter le solveur à l'application web car nous avons passé une partie du stage à « débiter » le code du solveur qui n'était pas documenté. De plus le code n'avait pas été factorisé. J'ai donc appris à l'équipe à transformer le code de leurs bibliothèques Python en *package*⁶ afin de pouvoir facilement les importer et donc les utiliser dans d'autres projets sans avoir toutes les sources sur la même machine. En effet, le modèle d'optimisation avait été implémenté dans un dépôt Git⁷ du nom d'*Hypoia_sim* et faisait appel à deux autres dépôts utiles, *Techno_lib* et *Utility_lib* qui eux non plus n'avaient pas été « packagés ». Pour faire fonctionner le solveur il fallait donc avoir les trois projets en simultané sur sa machine car les importations de codes avaient été écrites en dur (*i.e* avec des chemins d'accès relatifs). Sans parler du fait qu'il fallait installer les dépendances⁸ de chaque projet pour qu'ils puissent fonctionner. J'ai donc réalisé ce travail pour ces deux dernières bibliothèques dans le cadre d'un tutoriel que j'ai donné, et il restera à l'équipe d'*Hybrid & Storage* un travail de *refactoring*⁹ et de *packaging* pour le dépôt d'*Hypoia_sim*.

2.3 Expérience en entreprise

Durant ce stage j'ai eu la chance d'approfondir mes connaissances dans divers domaines notamment grâce à différents événements auxquels j'ai pu assister ou participer. En plus des réunions qui ont rythmé mon stage, j'ai eu la chance d'assister à un séminaire donné par M. Ignacio Grossmann de la *Carnegie Mellon University*, membre de la *National Academy of Engineering* des États-Unis et membre de l'*Institute for Operations Research and the Management Sciences* (INFORMS), connu en partie pour ses contributions dans le domaine de la programmation non linéaire en variables mixtes.

J'ai aussi rencontré quelques de grands noms du domaine de l'optimisation en France lors de la soirée de remise du prix Indus'RO 2022 organisée par la société savante de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision en France (ROADEF) au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) dans le troisième arrondissement de Paris. Ma tutrice de stage Anna Robert était membre du jury.

J'ai réalisé une brève présentation de différentes métaheuristiques¹⁰ utilisées dans le cadre d'un projet scolaire réalisé cette année portant sur l'optimisation multi-objectif de partitionnement de graphes. Cette présentation s'est déroulée dans le cadre du premier séminaire de la communauté d'Optimisation pour l'Aide à la Décision de TotalEnergies à la *Digital Factory*, dans le second arrondissement de Paris. Lors de cette réunion j'ai appris beaucoup de choses concernant l'état de l'art sur certaines métaheuristiques comme les *Hybrid Genetic Algorithms*¹¹ ou encore les algorithmes quantiques pour résoudre des problèmes d'optimisations combinatoires NP-Complets comme le *Knapsack Problem*.

6. Ou module, c.à.d un ensemble de fichiers contenant du code.

7. Logiciel de gestion de versions de code décentralisé.

8. Composants logiciels.

9. Restructurer le code source d'une application ou d'un logiciel afin d'en améliorer le fonctionnement sans en altérer les fonctionnalités.

10. Algorithmes de recherches qui progressent vers un optimum global.

11. Algorithmes évolutionnistes couplés à des méthodes de recherches locales.

Conclusion

J'ai eu l'occasion durant mon stage chez TotalEnergies de travailler sur la génération d'instances difficiles pour un problème d'optimisation déterministe d'un système de production électrique hybride. Après avoir dressé l'état de l'art des *benchmarks* de référence pour le problème de *unit commitment* et réfléchi à une méthode de génération de jeux de données dans un précédent travail, nous avons développé une application en vue de tester un modèle d'optimisation déjà implémenté au préalable.

Malheureusement, à cause d'obstacles techniques, nous n'avons pas eu le temps de connecter l'application produite au solveur mais cela ne nous a pas empêché de lancer le modèle sur nos instances afin de vérifier leurs cohérences, leurs réalisabilités ainsi que leurs difficultés. Les résultats se sont avérés probants, ce qui est encourageant pour la suite. Une fois un travail de « refactorisation » de code fait par l'équipe, le site web pourra aisément être connecté au solveur comme initialement prévu afin d'afficher les solutions d'une manière plus graphique, et de pouvoir tout faire d'un seul et même endroit.

Les axes d'amélioration et perspectives pour l'avenir sont multiples. Dans un premier temps il pourrait être intéressant d'agrandir le catalogue des technologies disponibles pour l'élaboration de l'instance d'un *microgrid*. On pourrait essayer de pousser un peu plus la difficulté des instances en augmentant leurs tailles ainsi que les demandes des sites industriels mais le risque est de perdre la réalisabilité des instances produites, ce que l'on ne veut évidemment pas dans le cadre de notre application web. Une perspective intéressante serait d'ajouter au site web un autre solveur fonctionnant sur d'autres techniques comme le *Reinforcement Learning*¹², afin de comparer la performance des différentes techniques et la qualité des solutions obtenues en résolvant une instance du problème de plusieurs façons.

Grâce à ce stage j'ai beaucoup appris, non seulement sur le plan technique avec l'apprentissage de certaines technologies comme Django, mais aussi sur le plan humain avec de très belles rencontres. De plus, j'aurais l'honneur de présenter en octobre prochain les travaux de mon prédécesseur M. Abergel (2021) ainsi que les miens (les deux étant connectés et interdépendants) aux *MATHIAS Days*, une conférence interne à TotalEnergies portant sur les innovations en mathématiques et en intelligence artificielle.

12. Technique d'Intelligence Artificielle, plus précisément d'apprentissage automatique.

A.1 Exemple d'un type de *gas engine* disponible pour le site industriel ainsi que ses paramètres

```
1  {}
2  "WAR-20v34SG_x69": {
3    "p_max": 9,
4    "p_min": 2,
5    "min_up_time": 1,
6    "min_down_time": 1,
7    "ramp_up_limit": 7,
8    "ramp_down_limit": 6,
9    "fuel_linear": {
10     "a": 6972.698524220868,
11     "b": 8559.671565339693
12   }
13 }
14 {}
```

FIGURE A.1 – techno.json

A.2 Fichier comportant les informations du *microgrid*

```
1  {
2    "gas_turbines": [{
3      "name": "gt_1",
4      "tech_id": 1,
5      "tech_features": {
6        "model": "WAR-20v34SG_x69",
7        "number": 20,
8        "fuel_GED": 11.8611, -> PCI
9        "fuel_CO2_factor": 2.7 -> CO2ef
10     },
11     "eco_features": {},
12     "history": {
13       "1": {
14         "time_until_start": 0,
15         "time_until_shut": 0,
16         "starting_p": 0
17       }
18     }
19   }],
20   "PV": {
21     "tech_id": 2,
22     "name": "pv",
23     "tech_features": {},
24     "eco_features": {}
25   },
26   "elec_storages": [{
27     "name": "bess_1",
28     "tech_id": 3,
29     "tech_features": {
30       "model": "SAFT battery IHE+ 2.5 (1500V, 1C)",
31       "number": 10,
32       "stor_size": 3,
33       "p_max_charge": 1,
34       "p_max_discharge": 1,
35       "bat_yield": 0.9,
36       "use": {
37         "energy": "true",
38         "power_n1": "false",
39         "power_cloud": "false"
40       }
41     },
42     "eco_features": {},
43     "history": {
44       "1": {
45         "starting_soc": 0
46       }
47     }
48   }],
49   "settings": {
50     "time_horizon": 144,
51     "time_interval": 1
52   }
53 }
```

Résultat
d'un travail
de
simulation

FIGURE A.2 – meta.json

A.3 Fichier comportant les séries temporelles de demande et production des PV du site industriel

	A ▼	B ▼
1	Date	PV prod
2	12:00:00 AM	0
3	12:10:00 AM	0
4	12:20:00 AM	0
5	12:30:00 AM	0
6	12:40:00 AM	0
7	12:50:00 AM	0
8	01:00:00 AM	0
9	01:10:00 AM	0
10	01:20:00 AM	0
11	01:30:00 AM	0
12	01:40:00 AM	0
13	01:50:00 AM	0
14	02:00:00 AM	0
15	02:10:00 AM	0
16	02:20:00 AM	0
17	02:30:00 AM	0
18	02:40:00 AM	0
19	02:50:00 AM	0
20	03:00:00 AM	0
21	03:10:00 AM	0
22	03:20:00 AM	0
23	03:30:00 AM	0
24	03:40:00 AM	0.00
25	03:50:00 AM	0.13
26	04:00:00 AM	0.42
27	04:10:00 AM	1.21
28	04:20:00 AM	2.32
29	04:30:00 AM	3.33
30	04:40:00 AM	4.36
31	04:50:00 AM	4.66
32	05:00:00 AM	4.77
33	05:10:00 AM	5.77
34	05:20:00 AM	6.50
35	05:30:00 AM	8.03
36	05:40:00 AM	11.55
37	05:50:00 AM	19.03
38	06:00:00 AM	23.41
39	06:10:00 AM	22.54
40	06:20:00 AM	27.65
41	06:30:00 AM	37.38
42	06:40:00 AM	40.46
43	06:50:00 AM	42.12
44	07:00:00 AM	35.39
45	07:10:00 AM	39.94
46	07:20:00 AM	34.17
47	07:30:00 AM	28.67
48	07:40:00 AM	40.92
49	07:50:00 AM	42.05
50	08:00:00 AM	54.69
51	08:10:00 AM	58.39
52	08:20:00 AM	58.18
53	08:30:00 AM	58.46
54	08:40:00 AM	60.58
55	08:50:00 AM	70.96
56	09:00:00 AM	71.73
57	09:10:00 AM	58.53

FIGURE A.3 – time_series.xlsx

Bibliographie

- Abergel, N. (2021). « Optimisation d'un système hybride sous incertitude ». Mém. de mast. Université Paris-Dauphine - PSL.
- Abergel, N., Robert, A., Ghazouani, S. et Monerrat, A. (2022). « Gestion opérationnelle optimale d'un système hybride de production d'électricité déconnecté du réseau central ». In : 23ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision.
- Bynum, M. L., Hackebeil, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Sirola, J. D., Watson, J.-P. et Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo-optimization modeling in python*. Third. T. 67. Springer Science & Business Media. URL : <http://www.pyomo.org>.
- Dumas, J. (2019). *Liege Microgrid Open Data*. <https://www.kaggle.com/datasets/jonathandumas/liege-microgrid-open-data>. Liege university, MiRIS microgrid.
- ESS Market brochure (2022). URL : https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=20220502_ESS_Market_brochure_EN_protected.pdf&ie=UTF-8&oe=UTF-8.
- Gas Turbines or Gas Engines ? (2022). siemens-energy.com Global Website. URL : <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/rice.html>.
- Hart, W. E., Watson, J.-P. et Woodruff, D. L. (2011). « Pyomo : modeling and solving mathematical programs in Python ». In : *Mathematical Programming Computation* 3.3, p. 219-260. URL : <http://www.pyomo.org>.
- Knueven, B., Ostrowski, J. et Watson, J.-P. (2018). « Exploiting Identical Generators in Unit Commitment ». In : *EEE Transactions on Power Systems*.
- Overview of Siemens small power generating units (2022). URL : https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=overview_of_siemens_small_power_generating_units.pdf&ie=UTF-8&oe=UTF-8.
- Pan, K., Guan, Y., Watson, J.-P. et Wang, J. (2015). « Strengthened MILP Formulation for Certain Gas Turbine Unit Commitment Problems ». In : *IEEE*.
- Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ? (3 oct. 2019). Parlement européen. URL : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20190926ST062270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050>.
- Polleux, L. (2022). « Integration of short-term solar variability in the sizing and simulation of industrial microgrids ». Thèse de doct. Université PSL - MINES ParisTech.
- Siemens Gas Turbines Portfolio (2022). URL : <https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=siemens-gas-turbine-portfolio.pdf&ie=UTF-8&oe=UTF-8>.