UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE DES JUMEAUX NUMÉRIQUES D'UNE CENTRALE SOLAIRE INTERCONNECTÉE AU RÉSEAU D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR

SERGE LOUIJUSTE

JUIN 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Direction de recherche:

Prof. Adams W. Skorek, PhD, M. Sc. Eng., Fellow ICI., IEEE Life Fellow directeur de recherche

Jury d'évaluation

Prof. Adams W. Skorek, PhD, M. Sc. Eng., Fellow ICI., IEEE Life Fellow	Évaluateur interne
Dr Fidèle Moupfouma; PhD	Évaluateur externe
Prof. Miloud Bagaa, SMIEEE; PhD	Évaluateur interne

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à mon directeur de recherche, Prof. Adams W. Skorek, PhD, M. Sc. Eng., Fellow ICI, IEEE Life Fellow, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce travail. Son expertise et ses orientations ont été déterminantes pour l'aboutissement de ce projet.

Je remercie également les professeurs et le personnel du département de génie de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) pour la qualité de leur enseignement et pour l'environnement académique favorable qu'ils offrent aux étudiants.

J'adresse aussi mes remerciements à mes collègues et amis, Duckens Pertil, Nahomie Pertil,Antoine Yvon,Vivaldi, Bodian Abdoulaye,Anna d'Angela, Sante Chiarcosso, pour leurs échanges constructifs et leurs apports.

Toute ma gratitude à mon épouse, Melissa Lalanne Louijuste, ainsi qu'à mes deux enfants, Marc Allen et Marcelle Victoria, pour leur amour et leur soutien. Leur présence a été une source de motivation essentielle dans la poursuite de mes objectifs académiques.

Mes remerciements vont à mes frères et sœurs : Marie Pierrette, Jordany, Méthanie et Wilbert. Nathalie, sans toi, sans ton soutien, ton amour et tes conseils, il n'y aurait pas d'étude. Merci.

Enfin, je tiens à remercier mes deux parents défunts, Estany Louijuste et Marcelle Duvelson Louijuste, pour leur sacrifice dans la création de cet avenir en moi.

À toutes celles et ceux qui ont contribué à la réussite de ce projet, je leur témoigne ma plus sincère gratitude.

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, la transition énergétique impose une profonde transformation des systèmes de production et de gestion de l'énergie électrique. Dans ce contexte, le développement des technologies numériques et des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) joue un rôle central dans l'évolution vers des réseaux électriques intelligents, plus flexibles et plus résilients.

Ce mémoire porte sur l'étude et le développement d'un jumeau numérique d'une centrale solaire photovoltaïque interconnectée au réseau électrique. Un jumeau numérique est une réplique virtuelle dynamique d'un système physique, capable de reproduire son comportement en temps quasi-réel grâce à l'intégration de modèles mathématiques, de données mesurées et d'algorithmes de commande.

Le système étudié est une centrale photovoltaïque de 112,5 kW raccordée à un réseau de distribution de 25 kV. Le jumeau numérique, développé sous MATLAB/Simulink, modélise l'ensemble de la chaîne de conversion énergétique : générateur photovoltaïque, convertisseur DC/DC de type boost avec commande MPPT (Perturb and Observe), onduleur triphasé à source de tension (VSC), filtre, transformateur et interface réseau.

L'originalité du travail réside dans l'intégration de données météorologiques réelles issues d'API (irradiance et température), ce qui permet de simuler le comportement dynamique du système dans des conditions environnementales variables. Un tableau de bord de supervision et un bloc de contrôle intelligent ont été conçus afin de surveiller en temps réel les grandeurs critiques (V_{dc}, puissance active et réactive, facteur de puissance, fréquence réseau) et de déclencher des alarmes en cas de dérive.

Le modèle inclut également un module de prévision à 24 heures, basé sur des données météorologiques futures, permettant d'anticiper la production photovoltaïque et d'évaluer son impact sur le réseau. L'ensemble des résultats est automatiquement exporté vers une base de données structurée, ce qui assure la traçabilité et facilite les analyses ultérieures.

Les simulations réalisées démontrent la capacité du jumeau numérique à reproduire fidèlement les régimes transitoires et permanents du système photovoltaïque connecté au réseau. Ce travail constitue ainsi une contribution scientifique et technique au développement de plateformes numériques intelligentes capables non seulement de superviser, mais aussi d'anticiper et d'optimiser l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques modernes.

Mots-clés : Jumeau numérique, Énergie solaire, Réseau électrique, Réseau électrique intelligent, énergies renouvelables, Transition énergétique.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii

RÉSUMÉ iv

TABLE DES MATIÈRES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

LISTE D'ABRÉVIATIONS 1

Chapitre I – Introduction 3

1.1 Mise en contexte 3
1.2 Problématique de la recherche 4
1.3 Objectifs de la recherche 5
1.4 Méthodologie de la recherche 5

Chapitre 2 Étude bibliographique 8

2.1 Introduction 8
2.2 Méthodologie 8
2.3 Généralité sur l'industrie 4.0 9
2.3.1 Les technologies associées à l'industrie 4.0 11
2.3.2 Les jumeaux numériques, le dernier-né de l'industrie 4.0 13
2.4 Historicité et les approches sur les jumeaux numériques à travers le temps 13
2.4.1 Historique 13
2.4.2 Architecture de base(classique)/ Principales caractéristiques qui devraient être dans un jumeau numérique (JN) 18
2.4.3 Quelques domaines dans lesquels le jumeau numérique a été appliqué et développé par les scientifiques. 22
2.4.4 Degré de maturité d'un jumeau numérique 29
2.5 Conclusion 30

Chapitre 3 - Production, distribution et consommation électrique dans un contexte de transition énergétique. 31

3.1 Introduction 31
3.2 Énergies renouvelables 32
3.2.1 Énergie éolienne 34
3.2.2 Énergie Géothermique 35
3.2.3 Énergie de la biomasse 36
3.2.4 Énergie hydraulique 36
3.2.5 Énergie solaire photovoltaïque 37
3.3 Énergie solaire dans le monde et dans le contexte québécois 37
3.4 Transition énergétique : objectifs et visions pour les réseaux électriques futurs. 39
3.5 Les réseaux électriques et la transition énergétique. 42

Chapitre 4 - Modélisation du système solaire photovoltaïque 44

4.1 Introduction 44
4.2 Les composants essentiels du système solaire photovoltaïque. 44
4.3 Les paramètres définissant le comportement de la cellule photovoltaïque. 46
4.3.1 Calcul des paramètres de l'installation 49
4.3.2 Convertisseurs d'énergie DC/DC pour les systèmes photovoltaïques / hacheur élévateur (boost Converter) 52
4.3.3 Commande MPPT 55
4.4 Conclusion 56

Chapitre 5 - Gestion et simulation de la centrale solaire photovoltaïque 57

5.1 Variabilité des conditions météorologiques avec les données d'entrée comme l'irradiance et la température 58
5.1.1 Bloc de prévision 24 h 60
5.2 La tension de sortie des panneaux solaires et celle du hacheur élévateur 61
5.3 La tension de l'onduleur et du réseau électrique 62
5.4 La puissance générée par le système solaire 63
5.5 Présentation du tableau de bord 65
5.5.1 Composition du tableau de bord 66
5.5.2 Architecture de supervision 66

5.6 Simulation temporelle paramétrée avec génération automatique de résultats 68
5.7 Contribution scientifique et technique de ce travail 69
6.1 Conclusion 73
BIBLIOGRAPHIE 76

Annexe A: Fonction définissant le bloc de contrôle 88
Annexe B: Script principale 95
Annexe C Rapport du logiciel anti-plagiat Grammarly 121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4-1 : spécifications du panneau solaire utilisé 48

Tableau 4-2 : Le tableau résumant les paramètres de l'hacheur élévateur.....55

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Les révolutions industrielles à travers le temps source : [3] 10

Figure 2-2:Conception de base d'un jumeau numérique source :[72] 19

Figure 2-3:Un jumeau essentiel et ses composants principaux [59] 22

Figure 2-4:Le jumeau numérique, embranchement, racines et liens [53] 23

Figure 3-1:Accroissement des énergies par sources [60] 32

Figure 3-2: Mixte énergétique par sources [61] 33

Figure 4-1Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque. Source : Serge Louijuste 46

Figure 4-2Fiche signalétique du panneau solaire utilisé. Source :[73] 49

Figure 4-3Comportement du système avec température fixe de 25 °C et irradiance variable. Source : Serge Louijuste 51

Figure 4-4Comportement du système avec irradiance fixe de 1000 W/m² et température variable. Source :Serge Louijuste 52

Figure 4-5: Schéma de l'hacheur élévateur [62] 53

Figure 4-6: Schéma représentative du MPPT du système solaire photovoltaïque ..56

Figure 5-1: Présentation de notre système électrique Source : Serge Louijuste 58

Figure 5-2Courbe représentative des données d'irradiance du 18 février 2026 Source : Serge Louijuste 60

Figure 5-3 Représentation de la tension des panneaux solaires photovoltaïques et du hacheur élévateur. Source : Serge Louijuste 61

Figure 5-4Tension de l'onduleur. Source : Serge Louijuste 62

Figure 5-5Tension de sortie du réseau électrique. Source : Serge Louijuste.....63

Figure 5-6: Puissance du système solaire. Source : Serge Louijuste.....64

Figure 5-7 Tableau de bord. Source Serge Louijuste.....65

Figure 5-8Bloc de contrôle. Source : Serge Louijuste.....67

Figure:5-9 Capture de base de données Excel. Source : Serge Louijuste.....69

LISTE D'ABRÉVIATIONS

AC	Alternating Current (courant alternatif)
API	Application Programming Interface
CPS	Cyber-Physical Systems (systèmes cyber-physiques)
CSV	Comma-Separated Values
DC	Direct Current (courant continu)
DHI	Diffuse Horizontal Irradiance
DNI	Direct Normal Irradiance
DT	Digital Twin (jumeau numérique)
EMS	Energy Management System
ENR	Énergies renouvelables
ERBS	Modèle de séparation du rayonnement diffus et direct
FFT	Fast Fourier Transform
FP	Facteur de puissance
GES	Gaz à effet de serre
GHI	Global Horizontal Irradiance
HT	Haute tension
IA	Intelligence artificielle
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IOT	Internet of Things
ISC	Courant de court-circuit

JN	Jumeau numérique
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt-ampère
kW	Kilowatt
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
NTIC	Nouvelles technologies de l'information et de la communication
P&O	Perturb and Observe
PI	Proportionnel-intégral
POA	Plane Of Array (irradiance sur le plan du module)
Q	Puissance réactive
STC	Standard Test Conditions
Tcell	Température de cellule photovoltaïque
THD	Total Harmonic Distortion
VAC	Voltage Alternating Current
VDC	Voltage Direct Current
VOC	Tension en circuit ouvert
VSC	Voltage Source Converter

Chapitre I – Introduction

1.1 Mise en contexte

La transition énergétique et la société post-carbone sont des concepts généralement associés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, afin de limiter leurs impacts néfastes sur la planète.

En 1992, à Rio, des États se sont réunis pour discuter du réchauffement climatique.

L'objectif de la convention sur le climat, en 1992, a été la " stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre*"*

Du 6 novembre 2022 au 20 novembre 2022 a eu lieu la 27e réunion de ce genre et, plus que jamais, les États présents à ce sommet sont obstinés à sauver une planète fragilisée par les émissions de gaz à effet de serre, surtout avec cette conclusion de la Cop27 du numéro un de l'ONU : « We can and must win this battle for our lives **».** [1**Error! Reference source not found.**]

Malgré les 27 réunions de chefs d'État et de gouvernement consacrées à ce sujet majeur, les énergies renouvelables représentent une infime part de la matrice énergétique mondiale, soit 27,2 % en 2021 [66].

Cela dit, nous sommes dans un bourbier et nous sommes conscients que seules les connaissances scientifiques et techniques peuvent nous aider à surmonter les « faiblesses » des énergies renouvelables et à les adapter au futur système énergétique. Cette transition inattendue entre un lointain futur, où ces énergies domineraient, et aujourd'hui, où elles ne peuvent être que marginales, serait donc le temps de l'innovation technique. [69]

Dans cet ordre d'idées, les scientifiques ont déployé d'importants efforts pour pallier le déficit d'intermittence et d'autres barrières à l'énergie renouvelable ; plusieurs technologies sont déjà développées pour les surmonter et accélérer la transition énergétique.

Un modèle énergétique plus durable, moins carboné et reposant sur un mix énergétique diversifié et plus ouvert aux énergies renouvelables (EnR) reste la clé pour sauver la planète.

1.2 Problématique de la recherche

La proportion d'énergies renouvelables qui prend de l'envol, les réseaux intelligents, le déploiement d'une quantité importante de véhicules électriques auront tous une influence sur la dimension des futurs réseaux électriques décentralisés, pour la plupart exploitables à leur limite opérationnelle ; tous doivent être pris en compte dans les décisions d'investissement ou de maintenance. L'intégration des énergies renouvelables induit également un système plus dynamique et plus instable, qui exige des opérateurs de réagir bien plus rapidement pour le contrôler. [**Error! Reference source not found.**]

L'avancement de nouvelles technologies s'avère nécessaire dans une pareille conjoncture ; ainsi, de nombreux acteurs ont investi dans le big data et l'Internet des objets (Internet of Things, IoT). Les données des consommateurs sont disponibles grâce aux compteurs intelligents, et celles du réseau sont également plus accessibles.[70]

Les réalités augmentées sont aussi de la partie pour une meilleure réponse aux enjeux de taille que représente la transition énergétique, mais nous allons nous concentrer sur la technologie des jumeaux numériques, qui constitue un facteur clé pour la prédiction,

l'optimisation, la surveillance, le contrôle et l'amélioration de la prise de décision en temps réel, ainsi que pour la tarification dynamique intelligente.

1.3 Objectifs de la recherche

Depuis cette présentation à l'université du Michigan en 2002, intitulée "Product Lifecycle Management (PLM)" et considérée comme le début des jumeaux numériques avec Michael Grieves, on ne cesse de puiser dans les fonctionnalités de cette technologie pour faire progresser les industries dans divers domaines tels que la production, l'aéronautique, la médecine, la fabrication, etc.

Dans le cadre de la transition énergétique que nous vivons à l'heure actuelle, nous devons réduire la part importante qu'occupent les énergies fossiles.

Il est désormais plus qu'un impératif de pencher vers les énergies renouvelables, qui nécessitent des avancées technologiques pour pallier leur caractère intermittent et d'autres insuffisances que nous verrons dans les chapitres qui suivent.

Dans le cadre de ce projet, nous allons rechercher et explorer les possibilités offertes par les jumeaux numériques de la centrale d'énergie solaire interconnectée au réseau et les adapter aux conditions réelles d'un réseau électrique intelligent. Certains modules du réseau seront également développés et intégrés aux jumeaux numériques étudiés.

1.4 Méthodologie de la recherche

La méthodologie adoptée dans ce mémoire repose sur une approche progressive et structurée, combinant une étude théorique approfondie, une modélisation technique ainsi qu'une simulation et une analyse des résultats. Cette démarche vise à étudier l'intégration d'un système solaire photovoltaïque dans un contexte de transition énergétique, tout

en mettant en œuvre le concept de jumeau numérique à l'aide d'outils numériques avancés.

Dans un premier temps, une **étude bibliographique exhaustive** est menée afin de poser les bases théoriques de la recherche. Cette phase permet d'explorer les concepts fondamentaux liés à l'industrie 4.0, aux technologies numériques qui y sont associées et aux jumeaux numériques. L'évolution historique de ces concepts, leurs architectures de base, leurs caractéristiques principales et leurs domaines d'application sont analysés afin de dégager les approches les plus pertinentes et le degré de maturité des jumeaux numériques. Cette revue de littérature sert de fondement scientifique à l'ensemble du travail.

Dans un second temps, la recherche s'intéresse au **contexte énergétique actuel**, en particulier à la production, à la distribution et à la consommation d'électricité dans un contexte de transition énergétique. Une analyse des différentes sources d'énergies renouvelables est réalisée, avec un accent particulier sur l'énergie solaire photovoltaïque. L'étude prend également en compte la situation mondiale et le contexte québécois, afin de mieux comprendre les enjeux, les objectifs et les perspectives d'évolution des réseaux électriques.

La phase suivante est consacrée à la **modélisation du système solaire photovoltaïque**. Les composants essentiels du système sont identifiés et décrits, puis les paramètres influençant le comportement de la cellule photovoltaïque sont déterminés. Les modèles mathématiques associés sont développés pour décrire le fonctionnement du système. Les convertisseurs d'énergie DC/DC, notamment le hacheur élévateur, ainsi que les

stratégies de commande MPPT sont intégrés au modèle afin d'optimiser la production d'énergie. Tout réalisé à l'aide de Matlab/Simulink.

Par la suite, une **phase de gestion et de simulation** est mise en œuvre afin d'évaluer le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement. La variabilité des paramètres météorologiques, tels que l'irradiance solaire et la température, est prise en compte à travers des données d'entrée et des blocs de prévision. Les tensions aux différents niveaux du système (panneaux, convertisseur, onduleur et réseau) sont analysées afin d'évaluer sa stabilité et ses performances. Un tableau de bord de supervision est conçu pour assurer le suivi en temps réel des grandeurs électriques et faciliter l'interprétation des résultats.

Enfin, la modélisation et la simulation du **jumeau numérique du système solaire photovoltaïque** sont réalisées à l'aide de Matlab/Simulink. Cette étape permet de reproduire le comportement du système réel dans un environnement numérique, d'effectuer des simulations temporelles paramétrées et de générer automatiquement des résultats. Les données obtenues sont analysées afin d'évaluer les performances énergétiques du système, de valider les modèles développés et de tirer des conclusions pertinentes.

L'ensemble de cette méthodologie permet ainsi de relier les aspects théoriques, techniques et numériques, tout en fournissant une approche cohérente et rigoureuse pour l'étude, la simulation et l'analyse d'un système solaire photovoltaïque fondé sur le concept de jumeau numérique.

Chapitre 2 Étude bibliographique

2.1 Introduction

Une étude bibliographique, également appelée recherche bibliographique, consiste à rassembler et à analyser toutes les informations techniques et scientifiques, à savoir des articles scientifiques, des brevets et des travaux de recherche, utiles à la compréhension de la problématique en question. En ce qui nous concerne, les jumeaux numériques constituent notre sujet, et nous allons l'approfondir afin de favoriser la compréhension de tous et de toutes sur ce thème.

2.2 Méthodologie

Notre revue de littérature s'appuie sur les différents travaux présentés sur les thèmes « digital twin », « jumeau numérique », « transition énergétique » et « industry 4.0 ».

Les différentes recherches approfondies ont été menées en utilisant les ressources des sources mentionnées ci-dessous

- Bibliothèque de l'UQTR /SOFIA
- IEEE xplore
- Elsevier
- Google Scholar
- Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Nous sommes à l'ère du numérique et une multitude de connaisseurs envahit les plateformes de recherche pour donner leur avis sur tout ce qui est d'actualité.

Le terme « digital twin », à la mode avec le développement de l'industrie 4.0, pousse plus d'uns à opiner sur le sujet.

Qu'il s'agisse de journaux scientifiques ou d'autres, de blogs du quotidien ou tout simplement de plateformes numériques sur le net.

Les documents que nous avons pris en compte sont ceux qui se situent sur la période allant de 2002 à 2023, partant de la prémisse de Michael Grieves et John Vickers jusqu'à aujourd'hui où le jumeau numérique est devenu un sujet à la mode.

De ce fait, nous ne serions pas responsables si nous n'avions pas pris le temps de dresser un état des différentes sources d'information et de choisir les plus fiables, pour lesquelles nous avons la certitude qu'un regard scientifique a été porté sur les articles disponibles.

À la fin de cette étude bibliographique, nous pourrons répondre à ces questions clés et pertinentes sur le sujet, à savoir : les définitions de la technologie du jumeau numérique (Digital Twin) au fil du temps, les principales caractéristiques qu'un jumeau numérique devrait avoir, et les domaines dans lesquels les jumeaux numériques sont appliqués ou sont en cours de développement.

2.3 Généralité sur l'industrie 4.0

Le terme « industry 4.0 » désigne la quatrième révolution industrielle : la transformation cyber-physique de l'industrie manufacturière. On le voit le plus souvent comme un ensemble de technologies, souvent appelé « smart manufacturing ».

Dans la majorité des écrits sur le sujet, certains termes ou composantes technologiques clés apparaissent toujours ; ils peuvent être considérés comme les piliers de l'industrie 4.0 ; plus d'un des précédents est inclus ou provient de ces technologies ; nous pouvons citer : Big Data, Cloud Computing, Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS). [**Error! Reference source not found.**]

Ces terminologies ne sont pas les seuls mentionnées pour la quatrième révolution industrielle, à titre d'exemple nous pouvons citer, l'intelligence artificielle, l'impression 3D, la cybersécurité, où La protection de l'information et de la structure de calcul est vu ; L'intelligence artificielle pour le développement de modèles prédictifs; Analyse et gestion des données en termes massifs (Big data); la fabrication additive qui fait référence à l'impression 3D; l'Internet des objets(IoT) qui met l'accent sur l'interconnectivité du quotidien; Cloud Computing pour héberger des données dans le cloud, robotique qui voit la conception de robots et de prototypes. [**Error! Reference source not found.**]

L'image ci-dessous présente un résumé des différentes révolutions industrielles et de leurs périodes respectives.

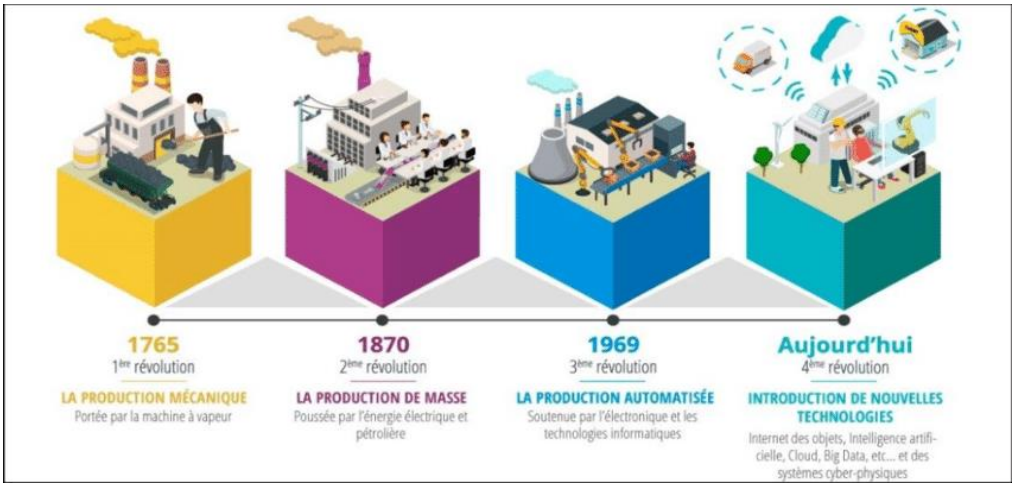


Figure 2-1: Les révolutions industrielles à travers le temps source : [3]

2.3.1 Les technologies associées à l'industrie 4.0

Synonyme de fabrication intelligente, l'industrie 4.0 est la réalisation de la transformation numérique, offrant une prise de décision en temps réel, une productivité, une flexibilité et une agilité accrues [58]

Pour être capable de tout cela, comme nous l'avons vu dans l'introduction, un ensemble de technologies est indispensable.

Mégadonnées (Big Data) : sont définies comme des ensembles de données massifs, à structure diversifiée et complexe, qui sont stockés, analysés et visualisés afin d'améliorer les processus. [3]

Dans les diverses activités quotidiennes, des millions de données, ou tout simplement de mégadonnées (Big data), sont créées à partir de : transactions en ligne, courriels, vidéos, audios, images, streaming, journaux, posts, recherches sur le net, interactions sur les médias sociaux, science data, capteurs et téléphones mobiles et leurs applications.

Ce sont des mégadonnées (big data) qui ne sauraient être analysées à l'aide d'outils conventionnels en raison de leur complexité et de leur volume. Par conséquent, de nouvelles méthodes et des algorithmes sont créés pour gérer ce type de données.

L'infonuagique (Cloud Computing), aussi appelé « cloud », est un catalyseur clé supplémentaire de l'industrie 4.0. Le NIST le définit comme « Un modèle d'accès réseau à la demande à un ensemble partagé de ressources informatiques configurables (telles que les réseaux, serveurs, stockage, applications et services) », qui peut être rapidement provisionné et publié avec un minimum d'effort de gestion ou d'interaction avec le fournisseur de services.

Ce modèle cloud est composé de cinq caractéristiques essentielles (On-demand self-service, Broad network access, Resource pooling, Rapid elasticity, Measured service) et de trois modèles de service (Software as a Service (SaaS), Platform as a Service (PaaS), Infrastructure as a Service (IaaS)). [5]

Internet des objets (IoT) :

L'idée de base de ce concept est la présence omniprésente autour de nous d'une variété de choses et d'objets, tels que les étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID), les capteurs, les actionneurs, les téléphones portables, etc. Grâce à des schémas d'adressage uniques, ces objets peuvent interagir entre eux et coopérer avec leurs voisins afin d'atteindre des objectifs communs et d'améliorer la prise de décision. [6] [3]

Systèmes cyber-physiques (CPS) :

Les systèmes cyber-physiques (CPS) sont définis comme des technologies transformatrices pour la gestion de systèmes interconnectés [9]. Entre ses actifs physiques et ses capacités de calcul, un CPS est un réseau de composants informatiques coopérants destiné à contrôler des objets physiques (mécaniques, électroniques). Les moyens de communication sont des infrastructures de communication telles qu'Internet. Les systèmes embarqués traditionnels restent un cas particulier d'un CPS indépendant [10]

Un CPS a généralement deux fonctions principales :

a) Amélioration de la connectivité, qui assure la collecte en temps réel de données issues du monde physique et le retour d'information depuis le cyberespace.

b) Gestion intelligente des données, de l'informatique et de l'analyse de la capacité, qui constituent le cyberespace. [58]

L'Internet des objets (IoT), les réseaux de capteurs sans fil et l'infonuagique, ou « cloud computing », sont des technologies étroitement liées au système CPS.

2.3.2 Les jumeaux numériques, le dernier-né de l'industrie 4.0

Nous sommes encore loin de la saturation de l'industrie 4.0 ; d'ailleurs, nous n'en sommes qu'au début. Malgré le vaste marketing autour de ce sujet, l'industrie 4.0 est encore dans le futur [9]. Un large éventail de technologies existantes est déjà utilisé pour son avancement, comme l'indique la définition même de l'industrie 4.0, souvent vue comme un regroupement de technologies au service de l'industrie, du manufacturing et d'autres services intelligents.

À cette liste de technologies de l'industrie 4.0 s'ajoute le jumeau numérique (Digital Twin), qui suit le même ordre d'idées ; son objectif est de changer l'approche traditionnelle de la conception et de la production de biens et de services. [10].

Dans une récente analyse, l'institut d'études de marché Markets and Markets évaluait le potentiel de la technologie à 48,2 milliards de dollars d'ici 2026. Le cabinet Gartner estime, quant à lui, que d'ici 2023, 1/3 des entreprises ayant une stratégie orientée vers Internet des objets (IoT) auront à déployer au moins un jumeau numérique, ce qui est motivé par la problématique liée au Covid-19.[74]

2.4 Historicité et les approches sur les jumeaux numériques à travers le temps

2.4.1 Historique

Dans les années 1970, la NASA a lancé une mission dans l'espace appelée Apollo 13, et, pour en prendre le contrôle, une réplique a été réalisée à partir des données afin de scruter les moindres mouvements de la navette depuis la Terre.

Lorsqu'une explosion inattendue a fait dévier la navette spatiale de sa trajectoire prévue, mettant en danger les astronautes à bord, les ingénieurs ont utilisé les simulateurs d'engins spatiaux disponibles et des données réelles, puis ont retenu le scénario le plus proche possible parmi ceux identifiés afin de ramener les astronautes sains et saufs sur Terre. [11]

Dans cette grande première, considérée comme le début des jumeaux numériques (digital twin), nous pouvons remarquer quelques éléments clés que nous retrouverons dans les différentes définitions qui feront partie de cette revue de littérature.

Nous notons :

- Le vaisseau spatial, son environnement considéré comme réel
- Un simulateur de réseau spatial (plateforme virtuelle/espace virtuel)
- Des données en temps réel assurent la communication avec les pilotes et font état du lien entre les deux espaces (virtuel et réel).

Jusque-là, le terme « jumeau numérique » (digital twin) n'était pas encore employé.

En 2002, dans une université du Michigan, la notion de jumeau numérique, ou « digital twin », a été présentée pour la première fois par Michael Grieves.

Le terme utilisé pour désigner le jumeau numérique est le « Mirrored Spaces Model ». [11]

Dans cette présentation, le « mirrored spaces model » se réfère à trois aspects clés, qui présentent une similitude accrue avec ce que la NASA avait fait 32 ans plus tôt : à savoir un objet réel dans un espace réel, un objet virtuel dans un espace(s) virtuel(s), et des mécanismes de liaison, en tant que données, informations et processus, qui établissent la connexion entre l'espace réel et l'espace(s) virtuel(s).

Depuis 2002, période souvent considérée comme le début de ce fameux concept de digital twin, les écrits sur le sujet ne cessent d'augmenter.

Dans les différentes revues de littérature déjà réalisées sur le concept de jumeau numérique ou digital twin, un ensemble d'auteurs(e)s a été analysé et a défini le jumeau numérique à sa manière, afin d'expliciter, bonifier et développer la technologie des jumeaux numériques.

Nous allons les voir par groupes, de la manière dont ils définissent et conçoivent le concept de jumeau numérique.

1) Michael W Grieves

Depuis cette première sortie sur les jumeaux numériques (Product Life Management, 2002), Michael Grieves, considéré comme le pionnier de cette technologie, à la NASA dès 1970, n'a cessé de publier des articles sur le sujet.

Dans [72], le jumeau numérique est défini comme un ensemble de constructions d'informations virtuelles qui décrit un produit futur ou existant, au niveau microatomique ou macrogéométrique.

Toutes les informations pouvant être obtenues lors de l'inspection d'un produit peuvent également être obtenues à partir de son jumeau numérique.

Le cycle de vie complet du produit dans le cadre d'un jumeau numérique (digital twin) est subdivisé en trois (3) phases : conception, préproduction et production, avec une optimisation en temps réel des performances du produit. L'idée de base d'un jumeau numérique est un modèle virtuel à haute-fidélité des entités physiques, visant à en paramétrer et à simuler les états et les comportements tout au long de leur vie. [17]

Après les premières avancées de la NASA et les travaux de Michael Grieves en 2002, une multitude de chercheurs ont contribué à la définition et au développement de cette technologie qu'est le jumeau numérique (JN).

Dans cet exercice, nous allons passer en revue le jumeau numérique au fil du temps, dans l'ordre chronologique.

Après les sorties de la NASA et de Michael Grieves sur le thème du digital twin, 10 ans plus tard, dans [17], Glaessgen et Stargel le voient comme « une simulation probabiliste multiphysique, multi-échelle intégrée d'un produit complexe et utilisant les meilleurs modèles physiques disponibles, capteur mis à jour, etc., pour refléter la vie de son jumeau correspondant »

En 2013, dans [15], Lee et al. décrivent le jumeau numérique comme suit : « Un modèle couplé permettant au jumeau numérique de la machine réelle de fonctionner sur la plateforme cloud, en parallèle du processus réel, et de simuler le fonctionnement avec une connaissance intégrée des deux analyses basées sur les données, des algorithmes ainsi que d'autres connaissances physiques disponibles. L'approche modélisée construit d'abord, dès le début de la conception, une image numérique d'une machine. »

En dehors de la communication entre l'objet réel et le virtuel, Lee et al. [15] ajoutent dès « l'étape de conception »

Stark et al., en 2017, le définissent comme « une instance unique de modèle numérique universel d'un bien actif, son hombre numérique individuel et une liaison intelligente (algorithme, simulation) entre les deux éléments mentionnés ci-dessus ». [14]

Z. Liu et al., en 2018, le présentent comme un modèle vivant qui s'adapte continuellement aux changements de l'environnement ou du fonctionnement à l'aide de données sensorielles en temps réel et peut prévoir l'avenir des actifs physiques correspondants pour la maintenance prédictive. [75]

Dans cette définition, nous pouvons noter l'aspect continu et en temps réel, ainsi que la maintenance prédictive, des aspects qui n'étaient pas clairement mentionnés dans les définitions précédentes.

Un peu plus loin, en 2019, Leng et al. voient le jumeau numérique sous cet angle : "Chaque appareil physique aura sa partie cyber en tant que représentation numérique de l'appareil réel, aboutissant aux modèles de jumeaux numériques. Ainsi, le jumeau numérique peut surveiller et contrôler l'entité physique, tandis que l'entité physique peut envoyer des données pour mettre à jour et synchroniser son modèle virtuel. [14]

Ces définitions nous exposent un point de vue général sur ce qu'est le jumeau numérique chez un ensemble de scientifiques qui s'y intéressent ; comme indiqué dans [19], chaque domaine déterminera la justification du déploiement d'un DT dans un environnement bâti en répondant aux questions d'analyse de rentabilité. Cependant, tous s'accordent sur l'existence d'un cadre général de l'architecture DT,qui se compose de trois éléments principaux : le monde physique, le monde virtuel et la connectivité entre les deux, comme nous l'avons vu dans les différentes définitions précédentes.

En résumé, nous dirions d'un jumeau numérique une réplique virtuelle dynamique dans un environnement virtuel d'un élément qui peut être un objet physique, un système dans

un environnement réel qui se reflète en temps réel par des moyens de communication (câbles, Wireless, Wi-Fi, etc.).

Nous sommes reconnaissants de l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et des mégadonnées (Big Data Analytics), qui ont motivé l'une des avancées les plus récentes et probablement les plus importantes dans le domaine de la technologie, à savoir le jumeau numérique (DT). [51] [20]

2.4.2 Architecture de base(classique)/ Principales caractéristiques qui devraient être dans un jumeau numérique (JN)

Dans les écrits qui vont suivre, nous reproduirons le jumeau numérique de notre système solaire modèle, qui constitue l'un des domaines dans lequel la technologie du jumeau numérique est utilisée.

Nous devons savoir d'une façon spécifique comment le réaliser. Mais, de manière plus globale, nous aborderons, dans ce sous-thème, les caractéristiques essentielles d'un jumeau numérique.

Pour trouver les caractéristiques, nous devons retourner à la définition générique de ce qu'est un jumeau numérique, à savoir :

a) Une entité réelle
b) Une entité virtuelle reflétant le réel
c) Système de communication reliant les deux (2) entités.

L'un des éléments les plus importants des caractéristiques fondamentales d'un jumeau numérique est la connexion entre les deux éléments, le réel et le virtuel, qui doivent être

équipés de périphériques réseau pour garantir une connexion transparente et fiable, ainsi qu'un échange continu de données.

Les communications dont nous parlons comprennent le lien entre le jumeau physique et le jumeau virtuel, entre le jumeau numérique et son environnement, et le jumeau numérique et ses interfaces.

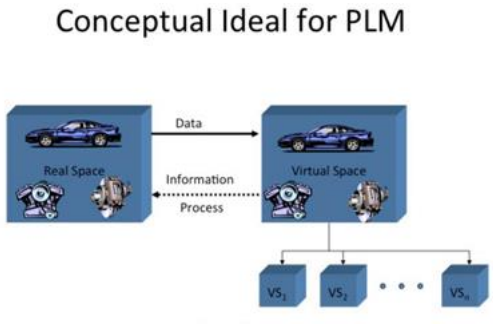


Figure 2-2:Conception de base d'un jumeau numérique source :[72]

Toutes les données échangées doivent être stockées et accessibles au jumeau numérique. Mis à part les données dynamiques qui auront à changer tout au long du cycle de vie du produit, le stockage des données contient également des données statiques historiques à savoir : dimensions géométriques, nomenclature, procédés, qui reflètent la mémoire du jumeau physique et l'historique des enregistrements, les informations fournies par l'expertise humaine ou par des actions passées.

Y a-t-il une différence entre un produit intelligent et un jumeau numérique ?

Un produit intelligent est capable de récupérer des informations sur lui-même et de participer à des décisions concernant son propre avenir. Plusieurs caractéristiques pour le produit intelligent, mais en résumé, un produit intelligent :

1. Nécessite une identification unique ;
2. Est capable de communiquer avec son environnement ;
3. Peut récupérer et stocker des données sur lui-même ; et
4. Est capable de participer à prendre des décisions pertinentes pour son propre destin

Il n'est pas nécessaire de disposer de toutes ces caractéristiques pour un jumeau numérique. Cependant, certaines de ces caractéristiques sont pertinentes pour la gestion du jumeau numérique. La création du jumeau numérique peut se résumer comme suit :

- **Identification :** Avoir le concept Internet des objets (Iot) en tête, le produit a besoin d'une identification globale pour relier chaque produit physique à ses représentations numériques. Quelques technologies pouvant être utilisées à cet effet : les étiquettes RFID et le code électronique du produit (CBE). Selon ces technologies, une identité unique pour chaque objet physique, n'importe où dans le monde, et tout au long de son cycle de vie.
- **Gestion des données :** Données et informations sur les produits sont créées et évoluent au cours des trois étapes du cycle de vie du produit : BOL, MOL et EOL. Le big data est d'une très grande importance dans ce cas, vu la taille importante des données stockées et échangées tout au long du cycle de vie du produit.
- **Modèles de jumeaux numériques :** différents types de modèles de produits sont créés au cours des différentes phases du cycle de vie du produit. Certains de ces modèles sont : modèles de système, modèles fonctionnels, modèles géométriques 3D, modèles multiphysiques, modèles de fabrication et modèles d'utilisation. De tels modèles sont parfois interopérables entre eux, ce qui constitue un problème critique.

- **Informations sur le jumeau numérique :** Gestion efficace des résultats issus de grandes quantités de données (Big Data) générées tout au long de la vie du produit réel. Par exemple, l'entretien et les informations d'utilisation sont pertinents pour appliquer des techniques de prédiction des comportements des produits dans des scénarios futurs.
- **Interface homme-machine :** Comment les informations générées dans les différents référentiels de données seront-elles affichées ? Le problème pour récupérer et afficher les informations nécessaires au bon utilisateur est clair. Le jumeau numérique peut fournir des informations à tous les types d'utilisateurs et à tous les acteurs impliqués dans sa vie. Les interfaces homme-machine (HCI) sont un moyen de faciliter la communication entre l'homme et le jumeau numérique.
- **Communication :** Le jumeau numérique peut stocker ses informations dans différentes bases de données. Cependant, avec les nouvelles technologies de l'Internet des objets, il est nécessaire d'avoir un moyen de récupérer ces informations depuis ces bases de données, n'importe où et à n'importe quel moment. [18]

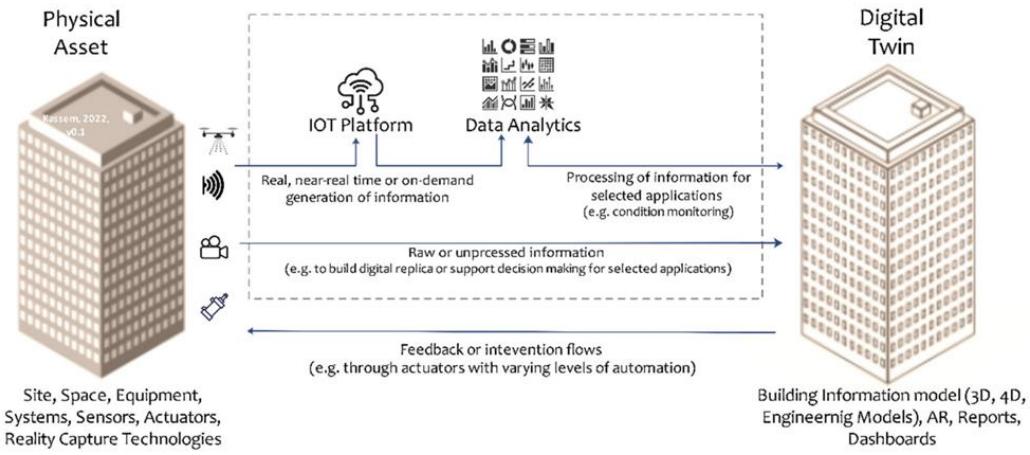


Figure 2-3:Un jumeau essentiel et ses composants principaux [59]

2.4.3 Quelques domaines dans lesquels le jumeau numérique a été appliqué et développé par les scientifiques.

Nous ne cessons de rappeler que la technologie du jumeau numérique est nouvelle, mais cela n'empêche pas qu'un ensemble de domaines et de champs d'étude se soit déjà approprié cette technologie et ait fait pas mal d'avancées dans de nombreuses réalisations.

Stephan Mihai et al., dans leur article intitulé « Digital Twins : A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects » [53], ont illustré le développement de la technologie des jumeaux numériques par le schéma ci-dessous, que je trouve assez explicite dans sa représentation des origines des jumeaux numériques et de leur évolution vers les domaines de leur utilisation.

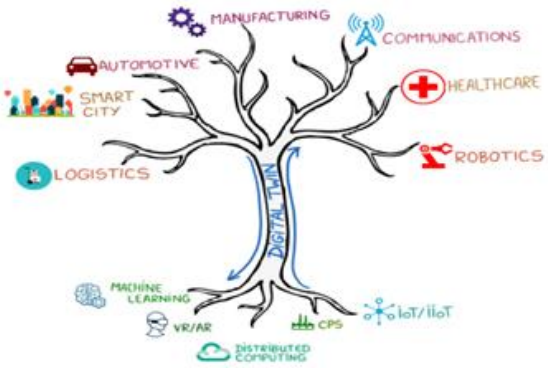


Figure 2-4:Le jumeau numérique, embranchement, racines et liens [53]

C'est l'une des avancées extrêmement importantes de l'ère de l'industrie 4.0

Dans les lignes qui suivent, nous présenterons les avancées de cette technologie dans quelques domaines.

2.4.3.1 La logistique et le Manufacturing

De nos jours, les chaînes logistiques sont de plus en plus complexes et dynamiques ; elles s'exposent à une multitude de perturbations et de risques. À l'ère de l'industrie 4.0, les technologies émergentes, également appelées technologies de rupture, entraînent un nouveau paradigme dans la gestion des chaînes logistiques. Ces technologies s'imposent comme une solution majeure pour surmonter les défis [21].

La fabrication intelligente, en tant que nouveau concept, présente de vastes perspectives d'application et une grande valeur, mais elle est également confrontée à de nombreux défis.

Les fabricants sont toujours à la recherche d'un moyen de suivre et de surveiller leurs produits afin de gagner du temps et de l'argent. Ce facteur clé constitue une source de

motivation pour tout fabricant. C'est pourquoi les jumeaux numériques semblent avoir l'impact le plus significatif dans ce contexte [20]

En utilisant des jumeaux numériques et des algorithmes intelligents, les organisations peuvent contrôler leurs données et optimiser leurs opérations.

Le jumeau numérique crée un environnement de test ainsi qu'un système qui agit sur des données en temps réel au sein d'un environnement de fabrication, afin d'apporter de la valeur ajoutée. Il doit être développé en intégrant les connaissances fournies par des experts humains et des données réelles (historiques) collectées par des systèmes actuels et passés ; des données qui évoluent avec le système réel tout au long de son cycle de vie.

Le jumeau numérique peut permettre une planification rationnelle de la fabrication et un contrôle plus précis de la production en reliant, dans les deux sens, les mondes virtuels et physiques de l'industrie manufacturière. En outre, la fabrication collaborative est de plus en plus adoptée par les entreprises, qui répondent à un marché de plus en plus concurrentiel en tirant parti de leurs ressources supérieures [18][17] [20].

2.4.3.2 Soins de santé

La croissance et le développement des technologies liées aux soins de santé sont sans précédent, car ce qui était autrefois impossible devient possible. Dans le cadre de l'internet des objets (IoT), les appareils sont de moins en moins chers et plus faciles à mettre en œuvre, ce qui accroît la connectivité. La connectivité accrue ne fait qu'accroître le potentiel d'application du jumeau numérique dans le secteur de la santé, lequel s'avère indispensable.

L’une des applications futures est le jumeau numérique d’un humain, fournissant une analyse en temps réel du corps ; une autre application actuelle, plus réaliste, est un jumeau utilisé pour simuler les effets de certains médicaments. D’autres envisagent d’utiliser un jumeau numérique pour la planification et la réalisation d’interventions chirurgicales.

Le jumeau numérique d’un établissement de santé peut avoir plusieurs intérêts : la simulation optimale de l’implantation, de l’équipement et de l’organisation.

Récemment, des jumeaux numériques des poumons humains ont été créés à partir de données de patients atteints de Covid-19 (projet BreathEasy), permettant d’adapter avec précision les constantes ventilatoires et de réduire les besoins en oxygène. Chaque JN pulmonaire est spécifique à un patient et les réglages ventilatoires sont réalisés à partir de milliers de scénarios de simulation associant les images radiologiques et scanographiques.

Le projet Visible Patient (développé par l’IRCAD de Strasbourg) est capable de générer un modèle 3D d’un organe à partir de l’imagerie médicale et de proposer aux équipes chirurgicales une vision 3D spécifique du patient et de la zone opératoire. [22]

2.4.3.3 Ville intelligente (Smart city)

L’information city serait apparue pour la première fois au milieu des années 1990, lorsque les villes se sont promues après avoir introduit de nouvelles infrastructures de technologies de l'information et de la communication (TIC) ou des services de gouvernance électronique, ou lorsqu'elles ont attiré des entreprises technologiques pour stimuler une nouvelle croissance économique.

L'idée centrale de la ville intelligente est d'introduire l'intelligence au sein de chaque entité de l'écosystème. Dans l'étude des villes intelligentes, le jumeau numérique est devenu la nouvelle prise de la transformation numérique dans les grands pays. [23]

Avec un nombre croissant de villes intelligentes développées, les communautés sont de plus en plus connectées. Nous recueillons des données à partir de capteurs IoT intégrés à nos services de base au sein d'une ville.

L'avancement de la ville intelligente a le potentiel d'utiliser la technologie du Digital Twin. Il peut faciliter la croissance en permettant de créer un banc d'essai vivant au sein d'un jumeau virtuel. Cela peut servir à deux choses : d'une part, tester des scénarios, et d'autre part, permettre aux jumeaux numériques d'apprendre de l'environnement en analysant les changements observés dans les données collectées. [23]

2.4.3.4 Aviation

L'avion a une structure très complexe et sa conception structurelle a évolué, passant de la résistance statique à la durée de vie sûre, puis à la tolérance aux dommages et à l'autonomie. [25]

Dans le domaine de l'aviation, le jumeau numérique est principalement utilisé pour la maintenance prédictive, pour détecter les anomalies de la structure de l'avion et déclencher des mécanismes d'autoréparation, ainsi que pour l'aide à la décision, l'optimisation et le diagnostic. [26]

Cette maintenance basée sur l'état de l'appareil pourrait permettre de détecter plus tôt les fissures de fatigue tout en réduisant la nécessité de recourir aux méthodes d'inspection traditionnelles [**Error! Reference source not found.**]. En outre, cette méthode pourrait

être utilisée par le jumeau numérique d'un aéronef d'un avion pour surveiller la progression des fissures de fatigue et prédire leurs formations pendant le vol. Si une fissure de fatigue est détectée et que sa position et sa taille sont transférées au Digital Twin, les simulations pourraient prédire si les conditions de vol actuelles ou les objectifs de la mission risquent de compromettre la sécurité de l'avion ou si les objectifs de la mission compromettraient l'intégrité structurelle de l'avion [24]

Rolls-Royce, qui produit des moteurs pour l'aviation, utilise actuellement des jumeaux numériques pour affiner le réglage de ses moteurs et simuler diverses conditions. [24]

En 2017, Airbus a présenté la stratégie visant à créer un modèle de fatigue des aéronefs et des DT, qui a fait passer l'analyse de la fatigue des aéronefs à l'ère numérique. Bien que le jumeau numérique ait atteint d'excellentes performances dans l'industrie aéronautique, il reste un vaste potentiel d'amélioration et d'optimisation, notamment pour les applications pratiques.

2.4.3.5 Énergie électrique/Énergie renouvelable

Le système d'alimentation électrique est extrêmement complexe. En raison de son importance dans la matrice du développement, il est considéré comme le fondement du développement de l'économie mondiale et le cœur des activités humaines.

Une panne d'électricité, communément appelée black-out, est la perte totale d'électricité dans une zone et constitue la forme la plus grave de panne susceptible de survenir.

Le 9 novembre 1965, vers 17 h 27, l'électricité a été coupée de l'Ontario jusqu'à la frontière orientale du New Hampshire, en passant par New York et Buffalo. Tout s'est arrêté dans le nord-est. La panne, qui a duré environ 14 heures, a été due à un relais défectueux à la

station Adam Beck, en Ontario, au Canada. Les feux de circulation ont cessé de fonctionner, rendant les déplacements en voiture et en bus extrêmement difficiles. Les trains transportant des passagers sont restés bloqués dans les tunnels et de nombreux passagers sont restés bloqués dans les ascenseurs.

Le 28 septembre 2003, le réseau électrique italien a connu une panne d'électricité. La panne a touché une zone estimée à 60 millions d'habitants et la variation de charge dans le réseau continental est passée d'environ 24 000 MW aux premières heures de la journée à 5 000 MW au cours de la partie centrale de la journée. L'événement à l'origine de la panne a commencé à 3h01 et s'est poursuivi jusqu'à 3h28. Le courant a été rétabli au bout de trois heures dans la zone nord et au cours de la journée dans la majeure partie de l'Italie. L'énergie non livrée s'élève à 180 GWh. Le document explique les principaux événements survenus lors du déclenchement et de l'évolution de la panne, et identifie les causes techniques qui caractérisent les différentes phases du processus ayant conduit à la panne générale.[28][29]

Nous avons pris deux exemples, mais nous pourrions en trouver des milliers qui ont tous eu des conséquences graves sur le fonctionnement général d’une ville.

Une solution qui permettrait d’éviter toutes ces catastrophes nous serait d’une grande utilité.

Le jumeau numérique en est-il capable ?

Dans le cas qui nous concerne le plus, à savoir le réseau électrique, la technologie de jumeau numérique est combinée au système d’alimentation et peut être appliquée à la conception et à la simulation du réseau électrique, ainsi qu’à des services tels que la

gestion des pannes, les centrales virtuelles, la surveillance intelligente des équipements et d'autres services [27].

Le jumeau numérique est un moyen efficace, qui est prévu pour réaliser la transformation numérique, intelligence, tendances en matière de développement vert et durable [28]

2.4.4 Degré de maturité d'un jumeau numérique

De manière générale, la notion de maturité numérique renvoie à un état de plein développement, voire au degré d'atteinte d'une certaine maîtrise d'un système ou d'une technologie après une période d'apprentissage et de croissance. [29].

Au cours des dernières années qui ont suivi l'ère du numérique, les entreprises à succès sont celles qui parviennent à mieux cerner ce concept et à le maîtriser.

C'est ce qu'affirme la Banque de développement du Canada dans cette déclaration : « Saviez-vous que les entreprises qui ont un niveau plus élevé de maturité numérique profitent d'une croissance des ventes supérieure à celle de leurs entreprises paires ? Elles sont aussi plus résilientes » [30].

Dans le cadre de notre étude sur les jumeaux numériques, eux aussi ont leur niveau de maîtrise et développement de cette technologie

Dans le livre « Le jumeau numérique : De l'intelligence artificielle à l'industrie agile », on parle du niveau de maturité d'un jumeau numérique, depuis sa genèse jusqu'à son appellation. [31]

Selon [53], la maturité, notée $M \in [0, 1]$, représente l'état de préparation technique du jumeau numérique analysé.

2.5 Conclusion

La capacité de simulation tout au long du cycle de vie du produit, la synchronisation du système virtuel avec les actifs physiques, l'intégration des données en temps réel, la modélisation comportementale de l'espace physique et les services rendus par le système virtuel constituent les principaux aspects qui caractérisent le jumeau numérique. Au vu de ce qui précède, ce qu'est un jumeau numérique peut être résumé comme suit :

"Un ensemble de modèles adaptatifs qui simulent le comportement d'un système dans un environnement virtuel et produisent des données en temps réel, afin de se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le jumeau numérique reproduit le système physique, prévoit les échecs et les opportunités de changement, prescrit de véritables actions temporelles pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus observer et évaluer le système de profil d'exploitation » [17]

C'est un système auto-adaptatif, auto-régulé, auto-surveillé et auto-diagnostiqué.

Chapitre 3 - Production, distribution et consommation électrique dans un contexte de transition énergétique.

3.1 Introduction

Depuis cette première réunion de chefs d'État et de gouvernements sur le changement climatique, communément appelée COP 1996 [1], tenue à Rio, au Brésil, la décision de combattre le changement climatique a marqué un tournant important, notamment dans le secteur énergétique.

« Les pressions sur le système énergétique ne vont pas fléchir dans les décennies à venir », tel est le constat de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans son rapport Energy Outlook (2021).

Cette projection n'est pas sans conséquence sur l'épuisement des ressources énergétiques, qui, en grande majorité, restent non renouvelables, ainsi que sur l'empreinte environnementale liée aux émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est d'ailleurs ce constat qui oblige les gouvernements (mais également les grandes multinationales) à repenser les modes de production et de consommation afin de se mettre en conformité avec la feuille de route des Nations Unies, notamment les Objectifs du Développement Durable (ODD) [33]

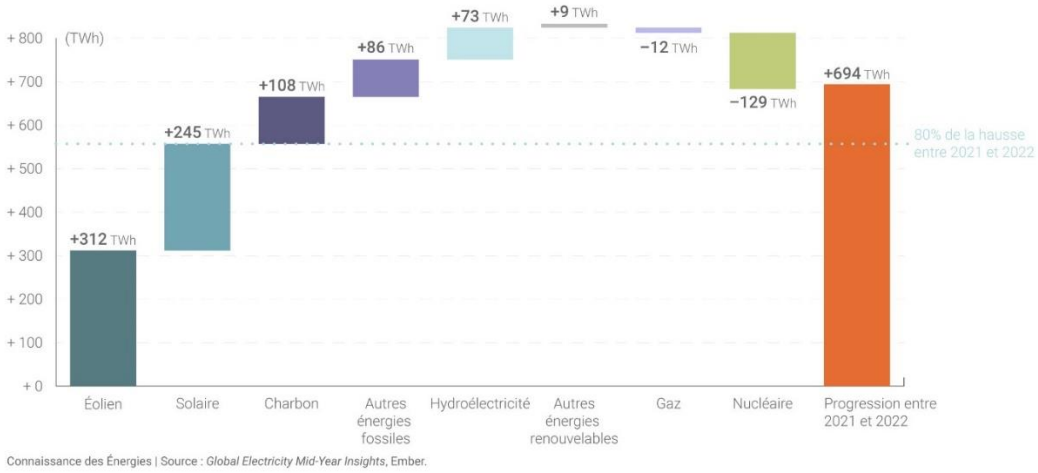


Figure 3-1:Accroissement des énergies par sources [60]

La figure ci-dessous, tirée du rapport d'Ember [60], nous donne une idée de ce que nous pouvons espérer de notre objectif de zéro carbone d'ici 2030.

Ember souligne toutefois que les autres filières bas-carbone (hors éolien et solaire) ont, en cumul, vu leur production décliner en 2022, une première depuis 2011 : la production hydroélectrique a certes augmenté l'an dernier (+ 73 TWh), mais la production nucléaire a fortement reculé dans le même temps (- 129 TWh).

La production des centrales à charbon dans le monde a par ailleurs augmenté de 1,1% en 2022 (+ 108 TWh par rapport à 2021) mais « la crise énergétique n'a pas non plus conduit à une augmentation majeure de la combustion de charbon, comme beaucoup le craignaient », note Ember. [68] [**Error! Reference source not found.**]

3.2 Énergies renouvelables

Le monde actuel, avec la croissance de la population et le développement économique, est très énergivore. Selon le rapport de World Energy, le mix énergétique de 2021 est composé selon le schéma présenté dans la figure 3-2 ci-dessous. Qu'importe ce qu'est

notre réalité aujourd'hui, la transition énergétique nous impose les énergies renouvelables pour sauver la planète.

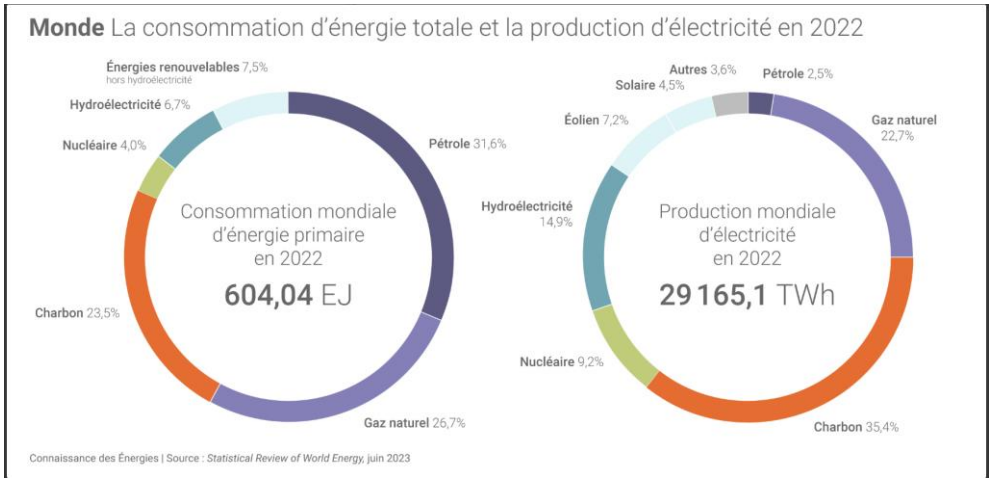


***Figure 3-2*: Mixte énergétique par sources [61]**

Une énergie dite renouvelable est constituée d'éléments qui ne peuvent pas s'épuiser de façon permanente. La lumière du soleil, le vent, l'eau et la géothermie comptent parmi ces sources. Elles ne s'épuisent pas et constituent une source d'énergie peu coûteuse.

Les énergies renouvelables nous guideront vers le développement durable, un développement qui s'engage à satisfaire les besoins du présent sans compromettre l'avenir des générations futures.

C'est une équation qui assure des relations viables, équitables et vivables entre l'économie, l'environnement et la société, telles que décrites dans le schéma ci-dessous.

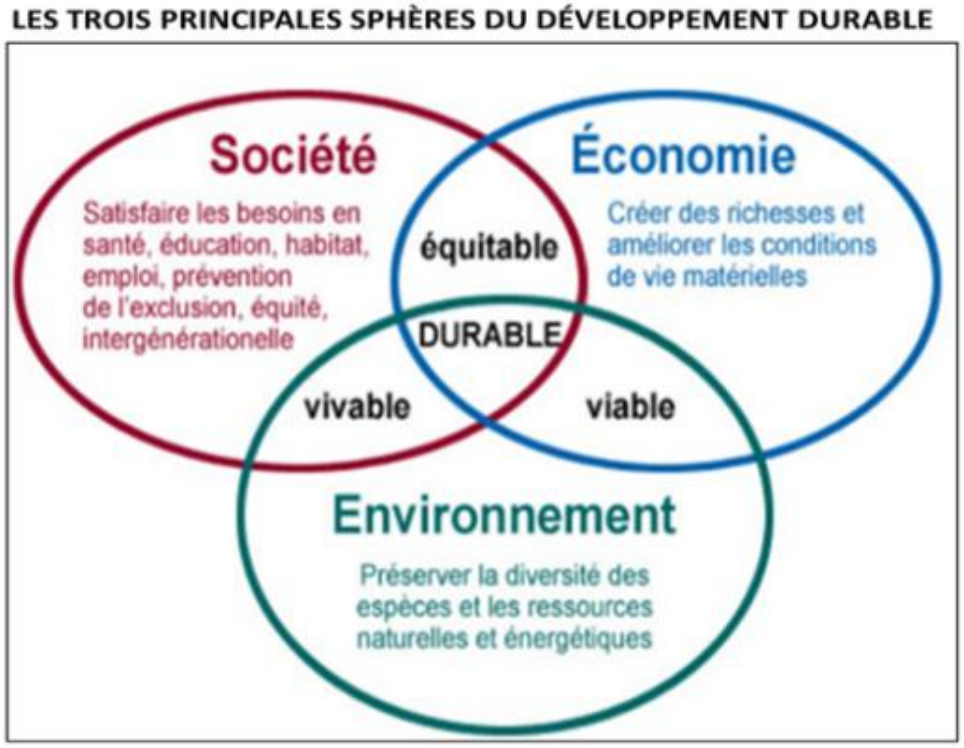


Figure 3-3:Relation développement durable, croissance et économie [62]

La répartition des sources d'énergies renouvelables dans le monde et leur utilisation montrent qu'il existe un grand potentiel pour que les pays adoptent cette forme d'énergie.

Ils peuvent s'assurer que cette forme d'énergie favorise la préservation de l'environnement et la réduction des coûts énergétiques. [61]

3.2.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une éolienne, ce qui les fait tourner entre 10 et 20 tours par minute. Ces pales sont reliées à un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. [36]

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaissent la croissance la plus rapide dans le monde. L'énergie cinétique de l'air en

mouvement est convertie en électricité par des éoliennes installées là où les conditions météorologiques sont les plus propices. Les éoliennes peuvent être utilisées individuellement, mais elles sont souvent regroupées en « parcs éoliens » ou en « centrales éoliennes ».

L'énergie éolienne connaît une croissance fulgurante au cours des dernières années dans le monde. [37] [38].



Figure 3-4: Capacité d'énergie éolienne installée dans le monde de 1980 à 2019[63]

3.2.2 Énergie Géothermique

L'énergie géothermique est l'énergie contenue sous forme de chaleur à l'intérieur de la Terre. L'origine de cette chaleur est liée à la structure interne de notre planète et aux processus physiques qui s'y déroulent. [39]

La température du sol souterrain augmente avec la profondeur, ce que l'on appelle le « gradient géothermique ». En moyenne, nous obtenons 3 °C de plus à chaque 100 m.

Grâce à un forage dans le sous-sol, l'eau chaude est pompée à la surface. Pendant sa remontée, elle perd de sa pression et se transforme en vapeur.

La pression de cette vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. [40].

3.2.3 Énergie de la biomasse

Le potentiel de la biomasse comprend le bois ainsi que les déchets animaux et végétaux. La biomasse est le seul substitut organique au pétrole qui est renouvelable. [41]

L'énergie de la biomasse est la seule à posséder à la fois les propriétés d'un combustible fossile et les caractéristiques qui lui permettent d'être stockée, renouvelée et transférée. Au Bangladesh, la biomasse est la principale source d'énergie renouvelable, utilisée surtout pour la cuisine et le chauffage en milieu rural. En Inde, la consommation de combustibles issus de la biomasse dans les zones rurales représente environ 80 % de la consommation totale d'énergie. [42]

Cela se pratique beaucoup dans les pays du Sud, dits « pays pauvres ».

3.2.4 Énergie hydraulique

On ne saurait être au Québec et parler d'hydroélectricité sans mentionner le Québec. L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité en utilisant un barrage ou un ouvrage de dérivation pour modifier le débit naturel d'une rivière ou d'une autre masse d'eau.

L'hydroélectricité, ou énergie hydroélectrique, exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du

courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

3.2.5 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire, c'est la lumière du soleil récupérée et transformée directement en électricité ou en chaleur à l'aide de panneaux ou de capteurs solaires. Le soleil est l'une des différentes formes d'énergie renouvelable disponibles sur Terre.

La production d'énergie solaire étant intermittente, l'autoproduisant doit utiliser des dispositifs de stockage ou être relié au réseau électrique existant, comme Hydro-Québec dans le cas de Québec, en bénéficiant de l'option de mesurage net, afin d'être alimenté en électricité de façon continue. [43]

Dans la production solaire, nous distinguons actuellement deux formes principales : l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire concentrée. [44]

3.3 Énergie solaire dans le monde et dans le contexte québécois

Seuls quelques cent-millionièmes du gisement d'énergie solaire renouvelable sont consommés chaque année dans le monde. Telles sont les affirmations de la revue des mines du scientifique, docteur Sylvain CROS, ingénieur de recherche en traitement d'images satellitaires pour la modélisation du climat. [44]

Le rayonnement solaire apporte à la Terre un total d'énergie annuelle de 1,5 zettawattheure (1,5 × 10^21). La quantité d'énergie radiative atteignant le sol sur l'ensemble des surfaces continentales émergées est estimée à 200 millions de térawattheures par an , soit 1 200 fois la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015. Cette énergie radiative est celle qui illumine nos paysages et réchauffe notre peau les jours de beau temps

Néanmoins, en 2011, “seulement” 720 TWh, soit quelques cent-millionièmes de ce gisement, ont été consommés comme énergie.

Nous devons noter que nous n’aurions pas besoin d’autres énergies si nous pouvions capter toute l’énergie émise par le système solaire car la consommation totale d’énergie représente environ 1/6000e de l’énergie rayonnée au sol par le Soleil [44], [43]

En matière d’heures équivalentes d’ensoleillement, le potentiel solaire dans le sud du Québec est intéressant par rapport à celui d’autres régions du monde. Cependant, l’accumulation de neige nuit au rendement réel des panneaux solaires photovoltaïques au Québec.

Dans le sud du Québec, chaque kilowatt de puissance installée peut produire jusqu’à 1 200 kWh par année. Par conséquent, des panneaux solaires d’une puissance de 4 kW peuvent produire jusqu’à 4 800 kWh par an. [44]

L’énergie solaire sur les toits n'a pas connu un grand essor au Canada par rapport à d'autres pays, compte tenu de l'accès existant à une électricité abordable pour les contribuables, surtout dans les régions à forte couverture en eau de la province.

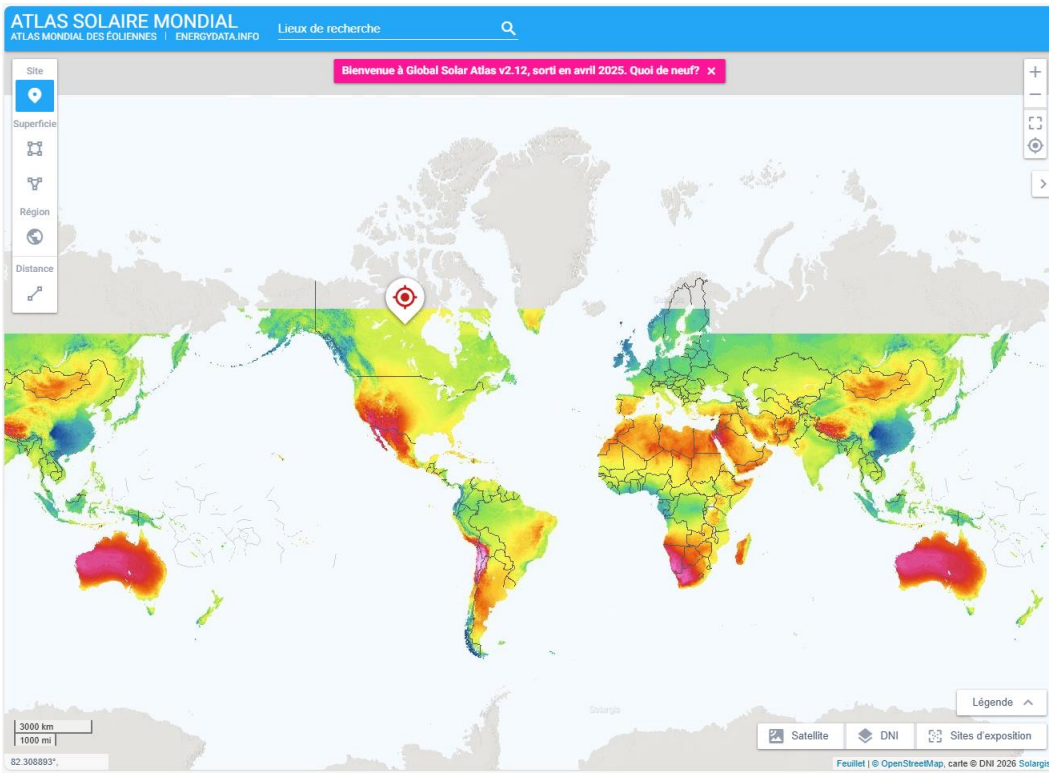


Figure 3-5: Carte mondiale de l'irradiation solaire [64]

3.4 Transition énergétique : objectifs et visions pour les réseaux électriques futurs.

La transition énergétique s'impose comme une exigence dans le monde : une nécessité pour sauver une planète en agonie.

La nécessité d'agir sur notre environnement pour créer un bien-être commun ne date pas d'aujourd'hui. Êtes-vous conscients du poids du changement climatique, des dégâts environnementaux, du déclin de l'empire romain au 4 septembre 476? C'est ce qu'a expliqué Kyle Harper, professeur d'histoire ancienne à l'université de l'Oklahoma, dans son livre « Comment l'Empire romain s'est effondré », paru aux Éditions « La Découverte » en 2019. [46]

Plus d'un essaie de conscientiser la majorité de la population, des dirigeants politiques et des entreprises, jusque-là réticents à œuvrer en faveur de la sauvegarde de cette planète.

Nous avons tous entendu parler des Objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU, qui constituent un appel à l'action de tous les pays (pauvres, riches et à revenu intermédiaire), afin de favoriser la prospérité sans porter préjudice à la planète.

Ils sont au nombre de dix-sept (17) et sur ce total, le numéro 13 incite à prendre des mesures d'urgence pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions. Et c'est pareil pour tous les objectifs axés sur le changement climatique. Nous ne ferons guère de progrès en matière d'actions pour le climat si nous n'accélérons pas la réalisation de l'objectif 7 relatif à l'énergie propre à un coût abordable. [47]

Depuis la réunion sur le climat à Rio en 1992 où tous les états présents s'étaient engager à coopérer à la tâche essentielle que constitue l'éradication de la pauvreté, condition indispensable du développement durable, afin de réduire les disparités de niveau de vie et de mieux répondre aux besoins de la majorité de la population mondiale, nous n'avons pas vraiment réaliser grande chose dans les objectifs fixés, les avancés sont moyennes et les états ne sont pas souvent sur la même longueur d'onde.

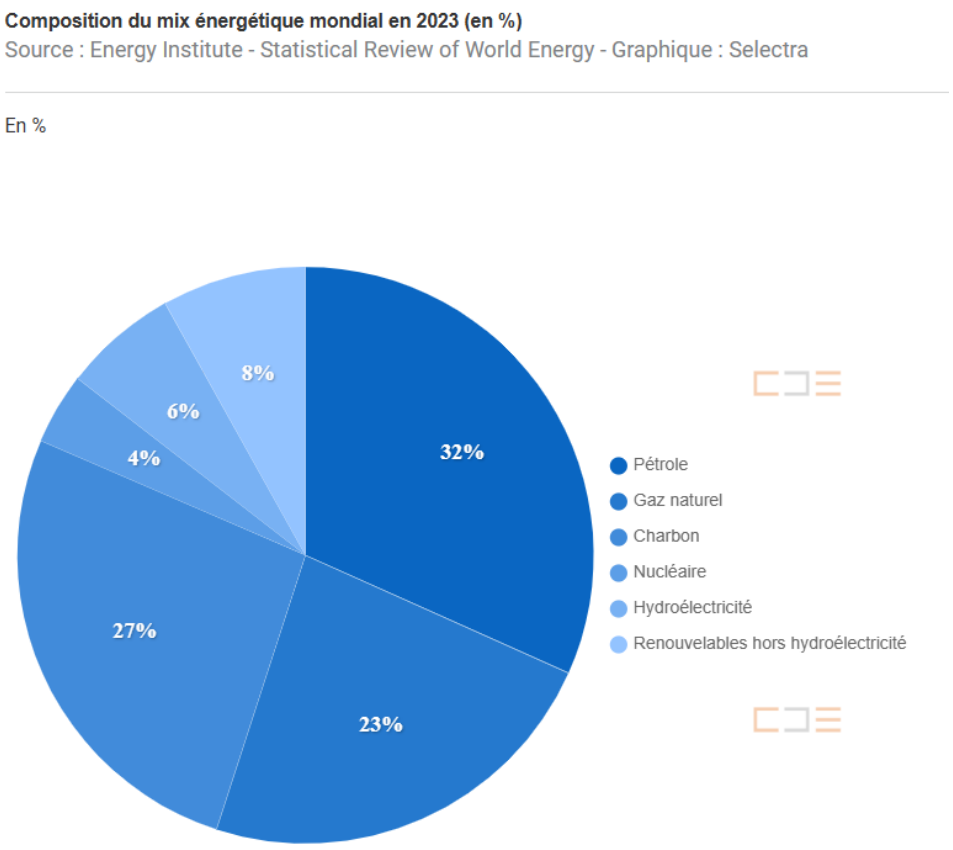


Figure 3-6: Les sources d'énergie disponibles dans le monde [67]

Comme nous le voyons dans la figure[10] ci-dessus, quand nous avançons avec l'augmentation des intégrations des énergies renouvelables sur la mixte énergétique (l'éolien et le solaire), nous perdons une quantité non négligeables de nucléaire peu carboné trouvée dangereux par certains états, ce qui rend encore fragile l'équilibre consommation et production à énergie propre dans la réunion de la cop 27, plusieurs constats sont du faits que nous n'avons pas vraiment bougés dans les objectifs de limiter l'élévation de la température à 1.5 degré et même respecter les engagements des grands de soutenir les pays en

voie de développement dans la course pour le combat contre la détérioration du climat global. Le constat est clair : nous devons agir ensemble.

3.5 Les réseaux électriques et la transition énergétique.

Aujourd'hui, la production de l'énergie électrique est responsable en grande partie des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces émissions, en particulier, proviennent de grands pays comme la Chine, les États-Unis, le Canada et d'autres.

L'électricité est la principale source d'énergie utilisée dans le monde pour cuire les aliments, le chauffage, la climatisation et bien d'autres usages ; rendre cette énergie propre donnerait donc un coup de pouce énorme à la transition énergétique.

Aujourd'hui, les alternatives recherchées pour décarboner le monde sont nombreuses, et nous ne pouvons que remercier les chercheurs et les dirigeants qui se sont voués à prendre cette direction. On entend par réseau électrique l'ensemble constitué de la production, du transport, de la distribution et de la consommation d'électricité.

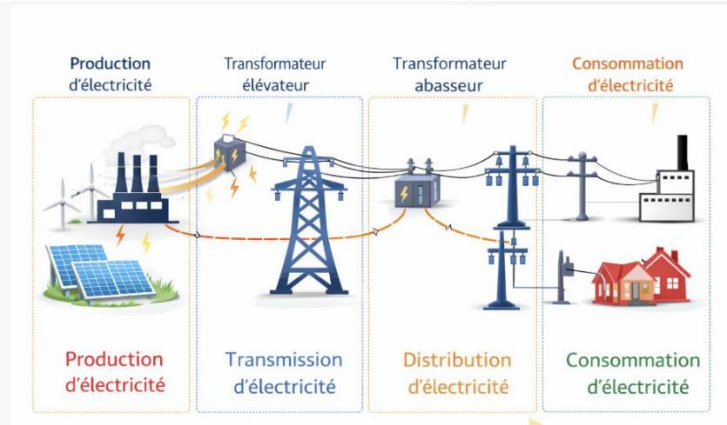


Figure 3-7: Infrastructure d'un réseau électrique. Source : Serge Louijuste

Sur la figure ci-dessus, nous pouvons voir que le réseau est constitué de plusieurs sources, renouvelables ou non.

Pour l’intégration d’une source de production sur le réseau, un ensemble de critères de qualité, en adéquation avec le réseau existant, doit être respecté, notamment la tension et la fréquence du réseau.

En ce qui concerne les énergies renouvelables, l'intégration de cette production d'électricité implique divers défis à relever en raison de ses caractéristiques. Parmi ces défis, nous citerons la localisation et la dispersion des installations, la difficulté des prévisions, due à la nature variable des ressources primaires, leur comportement en cas d'éventuelles perturbations, ainsi que la diminution du nombre de prestataires de services. Le fait que les sources d'énergie renouvelable remplacent celles traditionnelles entraîne une baisse de la capacité de contrôle de la tension du réseau.[48]

Pour se défaire de toutes les contraintes existantes à ce jour, un ensemble de technologies disponibles et susceptibles d’être développées est à développer.

De nos jours, nous parlons de réseau électrique intelligent, d’intelligence artificielle, et, dans ce sujet, nous parlons du jumeau numérique.

Chapitre 4 - Modélisation du système solaire photovoltaïque

4.1 Introduction

La modélisation constitue une étape fondamentale dans le développement d'un jumeau numérique d'un système solaire photovoltaïque. Elle permet de modéliser, de manière mathématique et fonctionnelle, les différents composants du système réel, afin de simuler son comportement dynamique dans diverses conditions d'exploitation. Ce chapitre présente la structure globale du système modélisé, incluant les panneaux solaires, le hacheur (convertisseur Boost), le contrôleur MPPT, l'onduleur ainsi que les éléments de couplage au réseau électrique.

L'objectif est de fournir une base précise pour l'analyse, le contrôle et l'optimisation du système, en tenant compte des variations de l'irradiance, de la température ambiante et de celle des cellules photovoltaïques.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents composants de la centrale solaire photovoltaïque (PV) ainsi que les composants télémétriques destinés à l'acquisition des données.

4.2 Les composants essentiels du système solaire photovoltaïque.

Le système que nous présentons est composé de 300 panneaux solaires photovoltaïques de 375 watts (112.5 kW) du fabricant Canadian Solar, présentant les caractéristiques mentionnées dans la figure 4-2.

Le système présente la configuration suivante : trente (30) panneaux de dix (10) connectés en série.

$$P_{tot} = V_{tot} \times I_{tot} \qquad (1)$$

Notre parc photovoltaïque (PV) de 112.5 kW est connecté à un réseau de distribution électrique de 25 kV ligne-ligne via un hacheur élévateur DC-DC et un convertisseur à source de tension triphasé à trois niveaux (VSC). Un Maximum Power Point Tracking (MPPT) est implémenté dans le hacheur (convertisseur boost) grâce à un modèle Simulink utilisant la technique perturb & observe(P&O)

Les détails généraux de notre modèle sont présentés ci-dessous :

- ✓ Parc photovoltaïque délivrant jusqu'à 112,5 kW, avec une irradiance solaire dynamique provenant d'OpenMeteo et une température issue d'une API d'OpenWeatherMap pour la ville de Trois-Rivières. Les données d'irradiance injectées dans le modèle vont de 0 à 1000 W/m².
- ✓ Hacheur élévateur (convertisseur boost) de 10 kHz, augmentant la tension nominale du PV (398 VDC) jusqu'à 500 VDC. Le cycle de commutation est optimisé par le contrôleur MPPT basé sur l'algorithme perturb and observe.
- ✓ Convertisseur triphasé à source de tension à trois niveaux (VSC) à 1980 Hz (33 × 60). Le VSC convertit 500 VDC en 600 VAC.
- ✓ Batterie de condensateurs de 10 kVAR pour filtrer les harmoniques générées par le VSC.
- ✓ Transformateur triphasé 100 kVA 600 V/25 kV.
- ✓ Réseau et charges

  Éléments : ligne de transmission (PI, section de 14 km), transformateur 25 kV/120 kV, avec des charges réparties.
- ✓ Mesure et Analyse (Scopes, Puissances, FP, Q, etc.)

Ça permet le suivi en temps réel des performances (puissance PV, puissance injectée, tension, courant, PF) et l'optimisation des algorithmes de régulation.

4.3 Les paramètres définissant le comportement de la cellule photovoltaïque.

Le circuit présenté dans la figure 4-1 décrit le fonctionnement électrique d'une cellule photovoltaïque.

Il est composé d'une source de courant photoélectrique I_{ph}, d'une diode, d'une résistance communément appelée résistance shunt R_{Sh} et d'une autre résistance R_s en série servant de résistance interne au passage du courant.

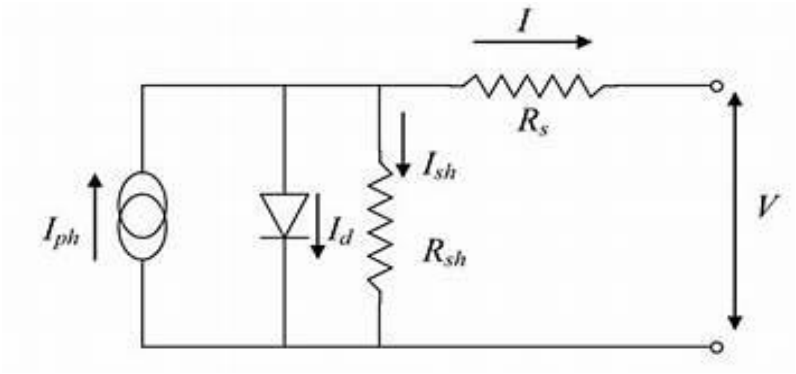


Figure 4-1Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque. Source : Serge Louijuste

En considérant le schéma présenté ci-dessus, nous pouvons tirer les équations suivantes :

$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$ *(2)*

En remplaçant I_d et I_{sh} par leurs valeurs nous avons :

$I = I_{ph} - I_s \left(exp\left(\frac{q(V+R_sI)x^2}{NAkT}\right) - 1 \right) - \frac{V-R_sI}{R_{Sh}}$ (3)

Avec I_{ph} et I_s qui sont défini ci-dessous

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}}(I_{sc} + a_i(T - T_{ref})) \quad (4)$$

$$I_s = \frac{I_{sc} + a_v(T - T_{ref})}{exp\left(\frac{V_{oc} + a_v(T - T_{ref})}{AkT}\right) - 1} \quad (5)$$

Les paramètres dans les équations ci-dessus sont définis comme suit :

I : courant de sortie de la cellule photovoltaïque dépendant de l'irradiation, du courant d'entrée et de la température ambiante.

I_{ph} : courant photogénéré dans la cellule, qui dépend de l'irradiance lumineuse

I_s: courant de saturation inverse, souvent lié aux pertes de recombinaison dans la cellule

q : charge élémentaire (1.602 x 10^{-19} C)

V : tension aux bornes de la cellule photovoltaïque

R_s : résistance série de la cellule photovoltaïque

x : facteur de concentration ou un autre paramètre spécifique

N : facteur d'idéalité de la diode (1 pour une diode parfaite, souvent légèrement supérieur à 1 pour les cellules réelles)

A : aire de la cellule photovoltaïque

k : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T : Température absolue (en kelvin)

R_{Sh} : résistance de dérivation ou résistance en parallèle de la cellule photovoltaïque

G : irradiance solaire en W/m²

Les constantes des équations peuvent être trouvées dans les notes du fabricant du module PV choisi.

Tableau 4-1 : spécifications du panneau solaire utilisé

Type de module PV	CS3U-375MS
Puissance maximale (P_{max})	375 W
Tension pour puissance maximale (V_{mp})	39.8V
Courant pour puissance maximale (I_{mp})	9.43A
Tension à l'ouverture (V_{OC})	47.6V
Courant de court-circuit (I_{SC})	9.93A
Technologie de cellule	Monocristalline
Coefficient de température de (V_{OC})	-0.293 % / °C
Coefficient de température de (I_{SC})	0.05 % / °C
Coefficient de température de (P_{max})	-0.37 % / °C
Dimensions	78.7x39.1x1.38 Po
Poids	49.6 lbs

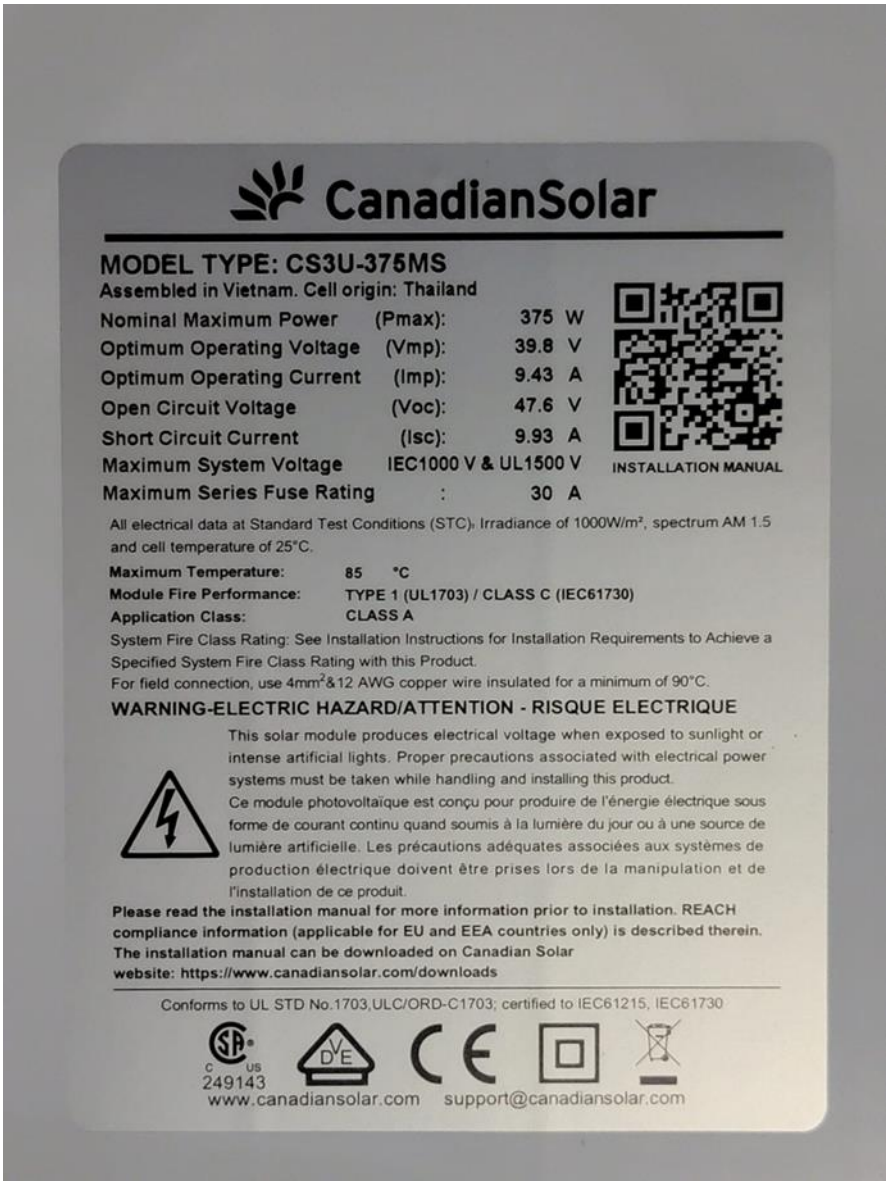


Figure 4-2Fiche signalétique du panneau solaire utilisé. Source :[73]

4.3.1 Calcul des paramètres de l'installation

De manière générale, le système présente un courant I et une tension V. Selon la disposition des modules photovoltaïques décrite un peu plus haut, la tension totale vaut dix (10)

fois la tension d'un module et le courant total vaut trente (30) fois le courant d'un module.

V_{Tot} = 10V et I_{Tot} = 30I

La puissance totale générée par le panneau photovoltaïque est :

$P_{Tot} = V_{Tot} \times I_{Tot}$ *(6)*

En considérant les données présentées dans la figure…

P_{Tot} = *300*375 =112500 W (7)*

V_{Tot} = *10*39.8 = 398 Volts (8)*

I_{Tot} = *30I (9)*

I_{Tot} = *30*9.43 (10)*

I_{Tot} = *282.9A (11)*

Dans la simulation que nous avons effectuée avec la cellule photovoltaïque choisie, nous pouvons observer son comportement et analyser les relations entre l'irradiation solaire, la température, la tension, le courant et la puissance. Les résultats obtenus sont expliqués ci-dessous.

La relation entre la tension et le courant de sortie de la cellule solaire est représentée sur les figures 15 et 16.

Mise en situation 1 : On maintient la température à 25 °C et on fait varier l'irradiation solaire.

Dans un second temps, on maintient l'irradiation à 1000 W/m² et on fait varier la température

Constat : Si l'irradiation augmente, le courant et la tension à la sortie de la cellule augmentent aussi et, dans le deuxième cas, si la température augmente, la tension et l'intensité diminuent.

Mise en situation 2 : Dans le cadre de la puissance de sortie du système solaire, nous faisons varier l'irradiance et maintenons la température à 25 °C.

Dans un second temps, on maintient l'irradiation à 1 W/m² et on fait varier la température

Constat : La puissance augmente avec l'augmentation de l'irradiance et diminue avec l'augmentation de la température, faits vérifiés dans les schémas ci-dessous.

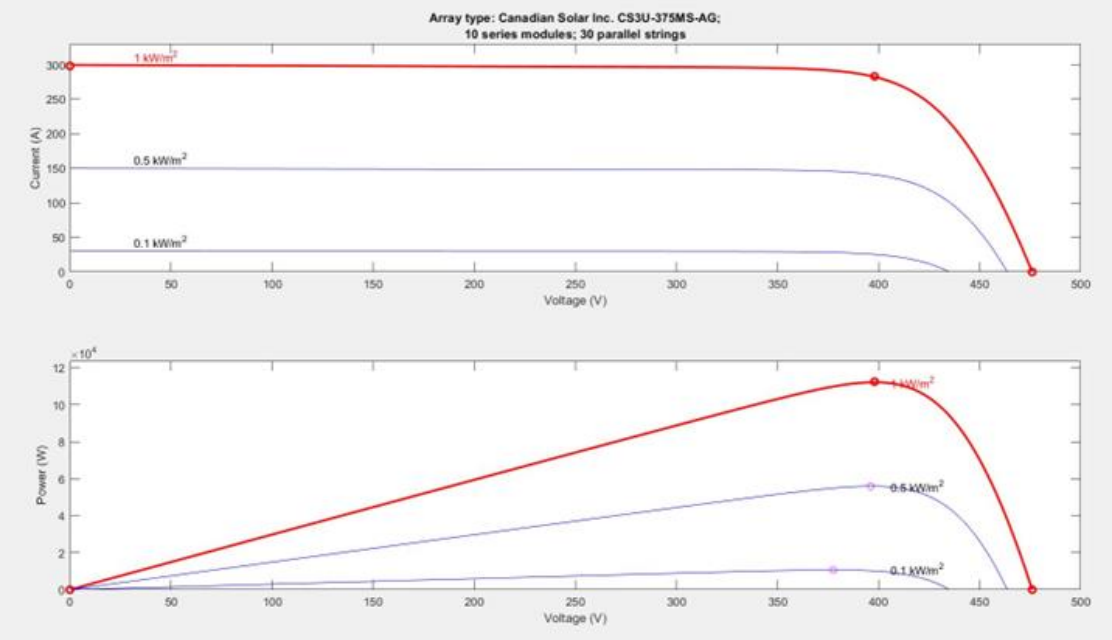


Figure 4-3Comportement du système avec température fixe de 25 °C et irradiance variable. Source : Serge Louijuste

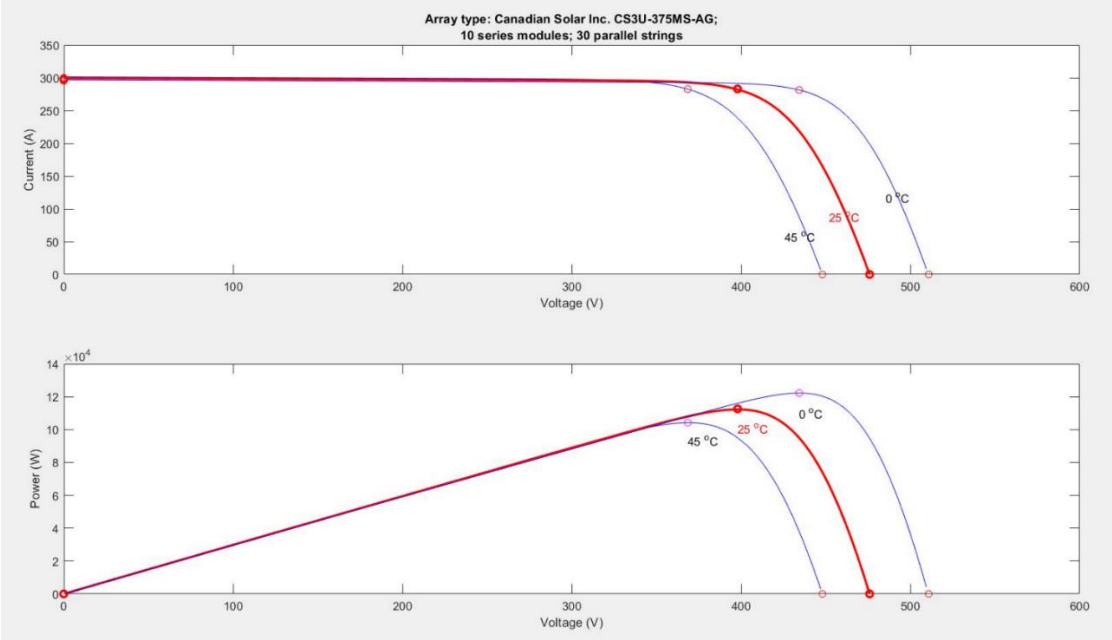


Figure 4-4Comportement du système avec irradiance fixe de 1000 W/m² et température variable. Source :Serge Louijuste

4.3.2 Convertisseurs d'énergie DC/DC pour les systèmes photovoltaïques / hacheur élévateur (boost Converter)

Dans le cadre du courant alternatif, pour passer d'un niveau de tension à un autre, l'utilisation d'un transformateur abaisseur ou élévateur effectuera le travail, ce qui est différent dans le cadre du courant continu, qui nécessite des convertisseurs de type DC-DC. Les convertisseurs DC-DC sont couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour atteindre une puissance maximale. Le commutateur à semi-conducteurs, tel que BJT, MOSFET ou IGBT, est utilisé comme interrupteur dans le convertisseur de puissance en fonction de l'exigence. Le circuit du convertisseur élévateur DC-DC comprend l'inductance (L), une résistance de charge (R), un interrupteur de commande (S) et

condensateur (C). Ces composants sont connectés de telle sorte que la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

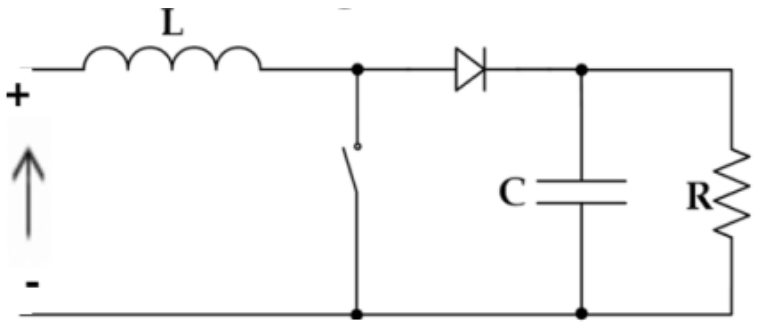


Figure 4-5: Schéma de l'hacheur élévateur [62]

Les convertisseurs DC-DC peuvent être de différents types ; abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur-élévateur (Buck-Boost)

La variabilité de la source d'énergie photovoltaïque nécessite un composant capable de stabiliser la tension de sortie du générateur photovoltaïque, dépendant de l'irradiance solaire.La charge des systèmes électriques requiert généralement une tension DC constante et l'assurance d'un fonctionnement à puissance maximale.

$$V_L = V_e - V_s \quad (12)$$

$$V_L = dI_L / dt \quad (13)$$

4.3.2.1 Les composants du hacheur

Dimensionnons le hacheur à partir du calcul et le choix des différents composants constituant le circuit de notre hacheur qui est utilisé pour augmenter la tension d'entrée des 300 panneaux solaires PV

Le système PV adapté par le hacheur doit satisfaire aux exigences du cahier des charges.

La fréquence de hachage est fixée à 10 kHz,nous avons choisi de travailler à cette fréquence pour diminuer les dimensions des composants réactifs (capacités et inductance). Le convertisseur fournit une tension continue (dans notre cas, dans les environs de 398 V) et un courant de sortie nominal de 282.9. [63]

4.3.2.1.1 Calcul des composants

a) Calcul de l'inductance

$L_f = \frac{DV_{in}}{\Delta iL * f}$ *(14)*

b) La capacité du condensateur de sortie

$C_f = \frac{IDT}{\Delta V_{out}}$ *(15)*

$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$ *(16)*

C_f: Condensateur à la sortie du hacheur élévateur

L_f : Valeur de l'inductance du hacheur élévateur

f : Fréquence du hacheur abaisseur

V_{in} : Tension d'entrée du hacheur élévateur

T :la période qui est égale à 1/f

D **:** Rapport cyclique (Duty cycle)

ΔIL : Ondulation du courant dans l'inductance du hacheur, généralement comprise entre 20 % et 40 % du courant de charge.

ΔV_{Out} Correspond à l'ondulation de la tension de sortie.

Tableau 4-2 : Le tableau résumant les paramètres de l'hacheur élévateur

F(kHz)	Ie(A)	Is(V)	Vs(V)	Ve(V)	ΔIl%	ΔVs%	D
10	282.9	225	500	398	20	15	0.204

Selon les formules ci-dessous, nous avons obtenu les paramètres suivants.

L_f = 0.144 mH

C_f = 61.2 μF

4.3.3 Commande MPPT

En général, une commande MPPT est un dispositif permettant de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de manière à atteindre le maximum de sa production solaire en permanence, indépendamment des perturbations météorologiques, telles que l'irradiance ou la température.

Concernant notre projet, la méthode P&O sera utilisée. Et c'est quoi, directement?

La méthode P&O (Perturb and Observe) consiste à augmenter ou à diminuer périodiquement la tension de sortie des bornes du panneau photovoltaïque (PV), puis à comparer la puissance obtenue au cours du cycle en cours à celle du cycle précédent.

Si la tension varie et que la puissance augmente, le système de contrôle ajuste le point de fonctionnement en conséquence. Sinon, il change la direction du point de fonctionnement.

[64]

L'organigramme de cette méthode est détaillé dans le schéma ci-dessous

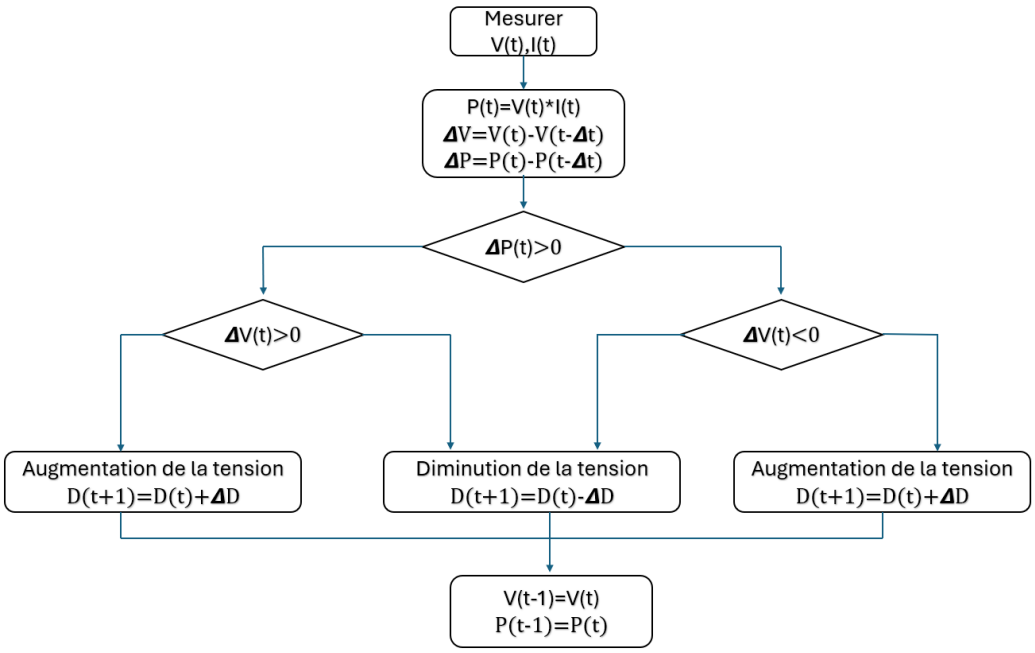


Figure 4-6: Schéma représentative du MPPT du système solaire photovoltaïque Source Serge Louijuste

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la conception d'un convertisseur BOOST et un exemple d'application de ce convertisseur, qui constitue un élément clé de la chaîne de conversion d'une application PV. Nous avons également décrit les différentes étapes du dimensionnement et du choix des composants actifs constituant ce BOOST, puis avons sélectionné les composants les plus adaptés à notre application. Le chapitre suivant abordera la simulation de notre système sous MATLAB/Simulink.

Chapitre 5 - Gestion et simulation de la centrale solaire photovoltaïque

La gestion et la simulation de la centrale solaire photovoltaïque raccordée au réseau constituent une étape essentielle pour garantir un fonctionnement fiable, performant et conforme aux exigences du réseau électrique. Cette gestion repose sur le suivi en temps réel de la production, l'optimisation de l'extraction de la puissance maximale à l'aide d'un algorithme MPPT, ainsi que la régulation des tensions et des courants afin d'assurer une injection d'énergie stable et de qualité. La simulation numérique, réalisée sous MATLAB/Simulink, permet de modéliser l'ensemble des composants du système, notamment le champ photovoltaïque d'une puissance totale de 112,5 kW, le convertisseur DC-DC de type boost, l'onduleur, le transformateur et le dispositif de couplage au réseau. Différents scénarios de fonctionnement sont étudiés, incluant la variation de l'irradiance solaire et de la température ambiante, afin d'analyser leur impact sur la puissance produite, le rendement global et la stabilité du système. Cette approche permet non seulement de valider le comportement dynamique de la centrale photovoltaïque en conditions réelles, mais également d'identifier les paramètres d'optimisation qui améliorent

l'efficacité énergétique et la fiabilité de l'injection d'énergie électrique dans le réseau.

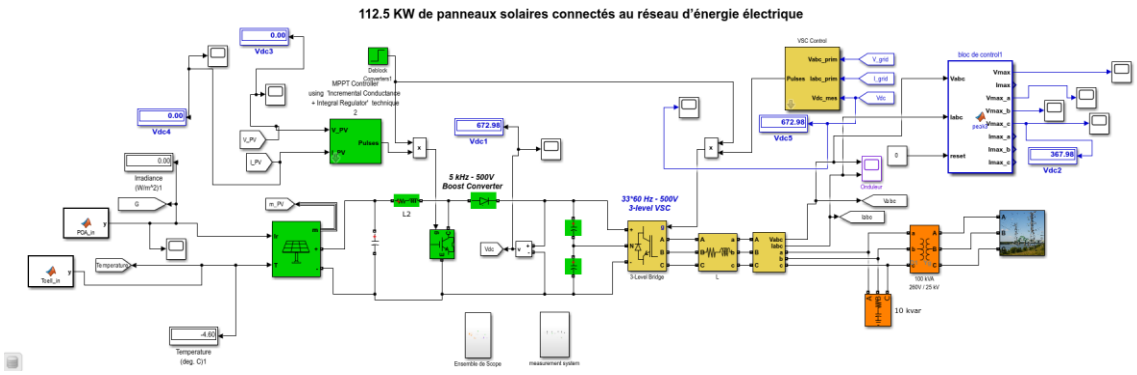


Figure 5-1: Présentation de notre système électrique Source : Serge Louijuste

5.1 Variabilité des conditions météorologiques avec les données d'entrée comme l'irradiance et la température

Dans le cadre de cette simulation, les données d'irradiance proviennent de l'API *Open-Météo* de la ville de Trois-Rivières (lat = 46.34757; lon = -72.57799). Les données brutes sont interpolées en MATLAB de manière à correspondre exactement aux instants de simulation. À partir du GHI, la géométrie solaire (azimut, angle zénithal) est calculée puis l'angle d'incidence du rayonnement sur le plan des modules photovoltaïques est déterminé.

Le modèle ERBS (Earth Radiation Budget Satellite) est utilisé pour séparer les composantes diffuses (DHI) et directes (DNI). L'irradiance sur le plan des modules (POA) est ensuite calculée en combinant la composante directe projetée, la composante diffuse du ciel et la réflectance du sol. Lorsque le soleil est sous l'horizon, la valeur de POA est automatiquement annulée.

La température ambiante instantanée est récupérée via l'API OpenWeatherMap. En cas d'indisponibilité de la requête, une valeur nominale de 25 °C est utilisée afin d'assurer la continuité du modèle.

La température de cellule est estimée à partir de la température ambiante au moyen du modèle thermique NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) :

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT-20}{800}\right).POA \qquad (17)$$

T_{cell}: Température de cellule photovoltaïque (en °C)

T_{amb}: Température ambiante (en °C)

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature (en °C).

POA : Irradiance sur le plan du module (Plane of Array) en W/m²

Cette formulation rend compte de l'élévation thermique du module induite par l'irradiance reçue sur son plan, un paramètre déterminant pour le calcul du rendement et des performances électriques du champ photovoltaïque. Toutes ces données sont ensuite stockées dans l'espace de travail MATLAB pour utilisation dans les blocs de simulation.

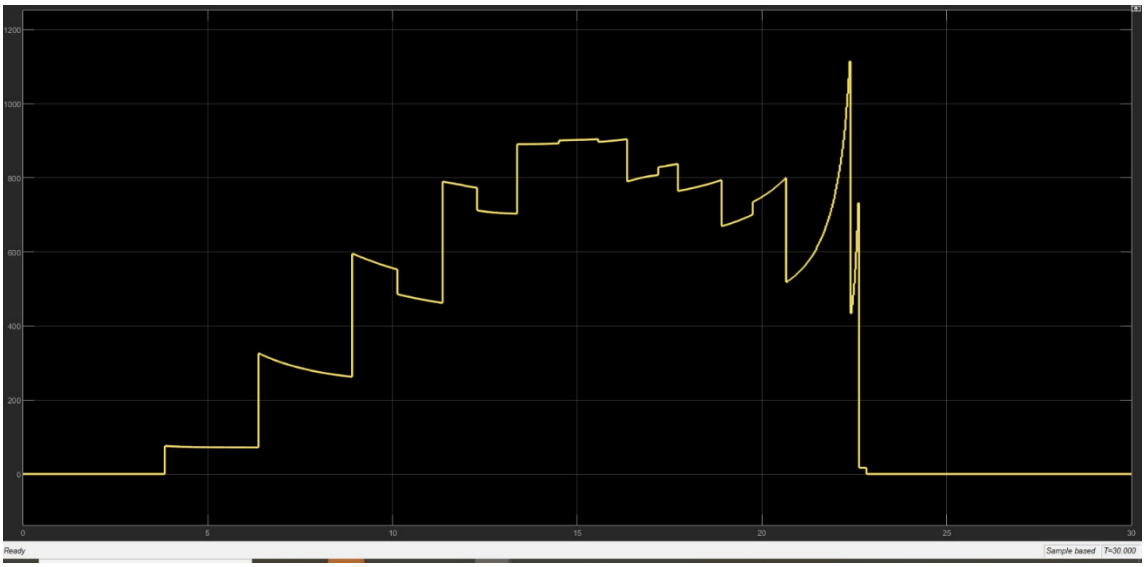


Figure 5-2Courbe représentative des données d'irradiance du 18 février 2026 Source : Serge Louijuste

La récupération en temps réel de l'irradiance et de la température était d'une importance capitale pour notre jumeau numérique afin de satisfaire l'une de ses caractéristiques essentielles.

5.1.1 Bloc de prévision 24 h

Le bloc de prévision 24 h utilise comme conditions initiales le dernier état issu de la simulation courte, incluant la puissance injectée, la fréquence du réseau, le facteur de puissance et le niveau de tension. Ces grandeurs servent à calibrer un modèle PV–réseau simplifié.

L'API *Open-Meteo* est ensuite interrogée afin d'obtenir les profils futurs de GHI et de température ambiante pour les 24 heures suivantes. À partir de ces grandeurs, les variables PV futures (Vpv, Ipv, Ppv) sont estimés en tenant compte des coefficients de température.

Le modèle calcule ensuite, pour chaque heure, la tension DC future, le duty-cycle du boost, la puissance AC injectée après le rendement du convertisseur–onduleur, ainsi que les grandeurs du réseau associées (V, I, P, Q, FP) déterminées à partir du modèle équivalent de ligne.

L'ensemble des résultats (Date, Heure, POA, Tcell, Ppv, Pgrid, Qgrid, FP, fréquence et variables électriques AC/DC) est rassemblé dans un tableau unique et exporté dans la feuille Excel utilisée comme base de données, assurant la continuité temporelle entre la simulation courte et la prévision de 24 h basée sur la météo réelle.

5.2 La tension de sortie des panneaux solaires et celle du hacheur élévateur

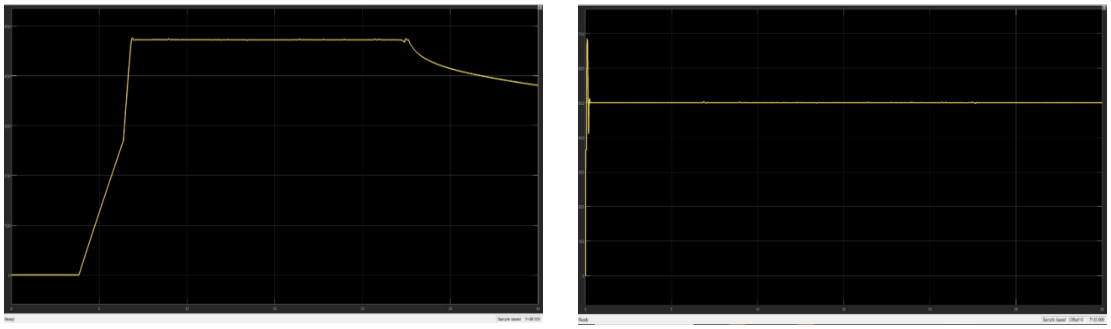


Figure 5-3 ***Représentation de la tension des panneaux solaires photovoltaïques et du hacheur élévateur. Source : Serge Louijuste***

Les courbes montrent l'évolution des tensions lors du démarrage du système (fig.18). La tension VDC (deuxième image) présente un pic initial, suivi de quelques oscillations amorties. Ce comportement traduit la réponse naturelle du système face à l'application soudaine d'énergie. Après quoi, la tension se stabilise, indiquant que le régime permanent est atteint.

La tension V_{PV} (première image) augmente progressivement et sans oscillations significatives. Elle atteint rapidement une valeur stable autour de 450 V, ce qui indique une dynamique plus contrôlée et moins sensible aux effets transitoires.

Dans l'ensemble, les résultats montrent un système qui, malgré un transitoire initial remarquable, converge rapidement vers un fonctionnement stable, avec des tensions bien établies en régime permanent.

5.3 La tension de l'onduleur et du réseau électrique

La tension de sortie de l'onduleur est triphasée, sinusoïdale et équilibrée, avec un déphasage de 120°, ce qui indique une synchronisation correcte avec le réseau après un court régime transitoire. Le courant de sortie présente un pic transitoire au démarrage, rapidement amorti, puis devient quasi sinusoïdal en régime permanent, traduisant une injection de puissance contrôlée et un fonctionnement stable de l'onduleur dans le jumeau numérique.

Les résultats obtenus démontrent la capacité du modèle numérique développé à reproduire de manière cohérente le comportement attendu d'une centrale photovoltaïque accordée au réseau dans différentes conditions d'exploitation.

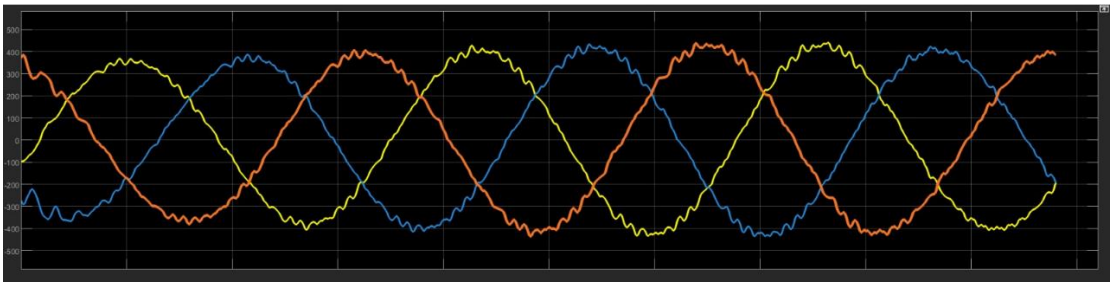


Figure 5-4Tension de l'onduleur. Source : Serge Louijuste

La tension du réseau électrique est triphasée, sinusoïdale et équilibrée, avec un déphasage de 120° entre les phases. Elle présente une amplitude et une fréquence stables, garantissant une référence fiable pour la synchronisation et l'injection de puissance du système photovoltaïque connecté au réseau.

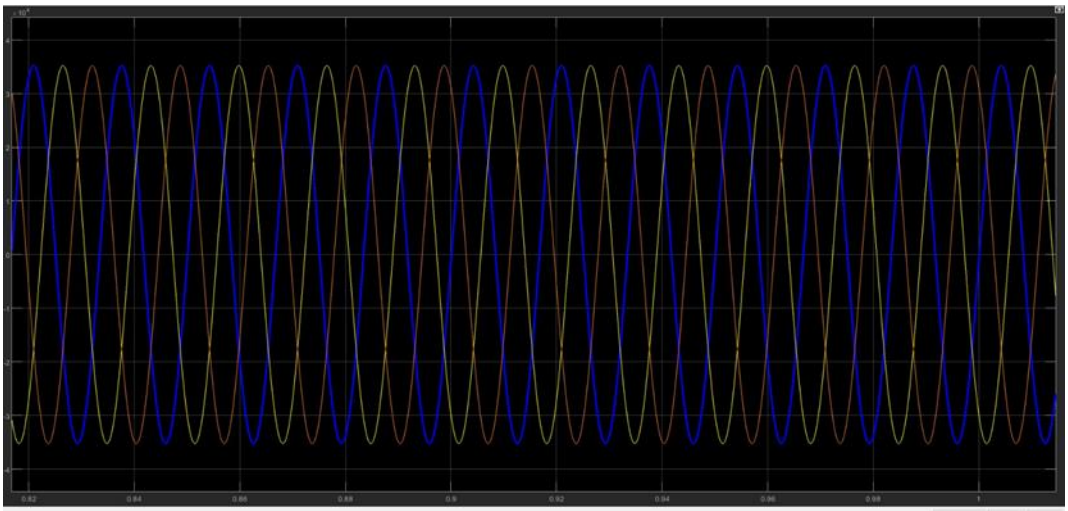


Figure 5-5Tension de sortie du réseau électrique. Source : Serge Louijuste

5.4 La puissance générée par le système solaire

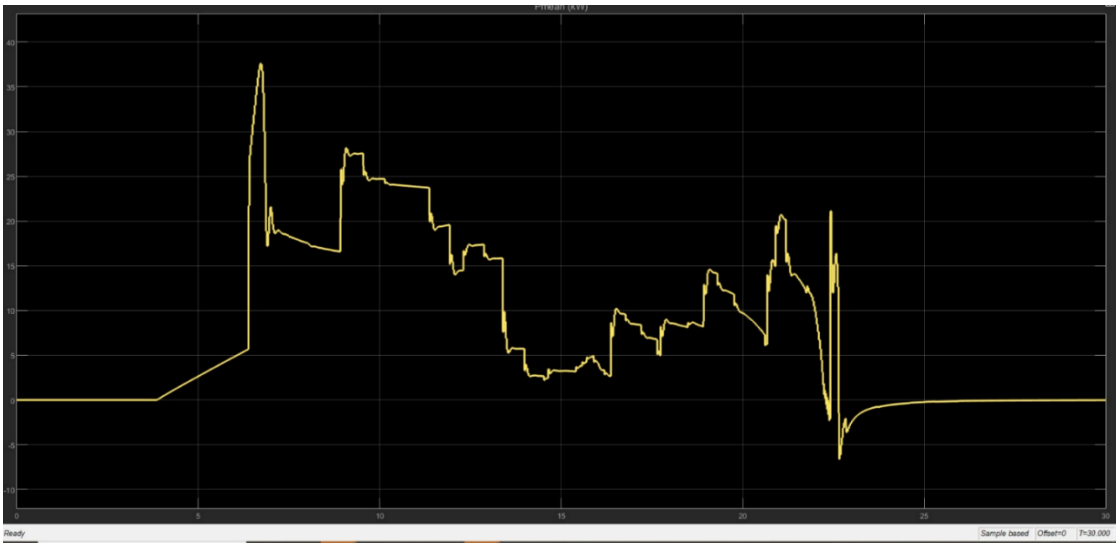


***Figure 5-6: Puissance du système solaire*.** **Source : Serge Louijuste**

La figure 5-6 présente l'évolution temporelle de la puissance moyenne générée par le système photovoltaïque (Pmean en kW). Au début de la simulation, la puissance reste nulle, ce qui correspond à l'absence d'irradiation solaire ou à une phase d'initialisation du système (mise en régime du convertisseur et du contrôleur MPPT).

À partir d'environ 5 secondes, une augmentation progressive de la puissance est observée, ce qui traduit l'élévation de l'irradiance et l'activation effective du système de conversion photovoltaïque. La puissance atteint ensuite un premier pic avoisinant 35–38 kW, correspondant à une condition d'ensoleillement favorable et à un fonctionnement optimal du suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette puissance correspond à l'irradiance présentée dans la figure 5-2.

Il convient de préciser que cette valeur correspond à la puissance moyenne calculée sur l'intervalle d'observation et ne doit pas être assimilée à la puissance nominale instantanée du champ photovoltaïque.

Notons que la puissance moyenne est définie par :

$$\mathrm{P_{moy}} = \frac{1}{\mathrm{T}} \int_0^T p(t)dt$$

P(t) : puissance instantanée en (W ou kW)

T : intervalle de temps considéré

$\mathrm{P_{moy}}$: puissance moyenne sur cet intervalle

[71]

5.5 Présentation du tableau de bord

Le tableau de bord constitue l'interface centrale du jumeau numérique. L'un des éléments importants développés sous MATLAB/Simulink permet de visualiser en temps réel les paramètres électriques critiques du système solaire connecté au réseau. Il offre une interface qui sera utile pour :

- ✓ Suivre les performances du panneau photovoltaïque.
- ✓ Vérifier les conditions du réseau.
- ✓ Activer les alarmes de sécurité (tension DC, fréquence et facteur de puissance).
- ✓ Diagnostiquer les écarts de puissance active et réactive injectées dans le réseau.

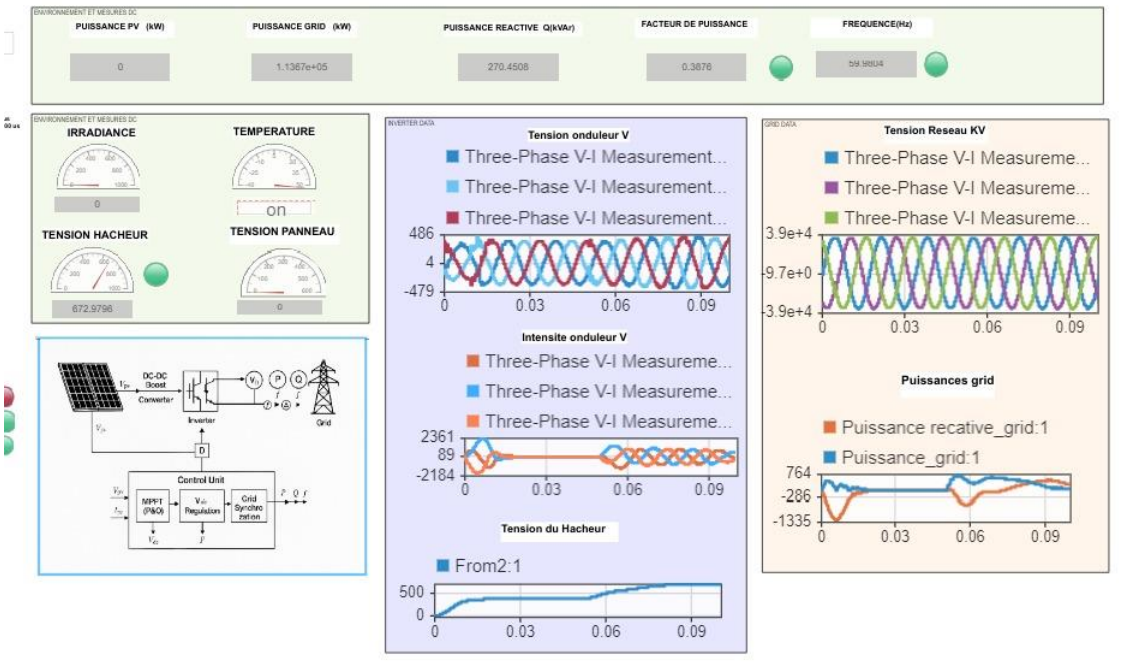


Figure 5-7 Tableau de bord. Source Serge Louijuste

5.5.1 Composition du tableau de bord

Le tableau de bord est divisé en trois parties et est présenté ici avec les données qui y sont présentées au fil de la simulation

a) **Zone panneau solaire**

- ✓ Irradiance
- ✓ Tension Hacheur
- ✓ Puissance Panneau
- ✓ Tension panneau (V_{PV})
- ✓ Température

b) **Zone onduleur**

- ✓ Tensions de sortie (V1, V2, V3)
- ✓ Courants de sortie (I1, I2, I3)

C) **Données réseau**

- ✓ Puissance active injectée
- ✓ Puissance réactive injectée
- ✓ Facteur de puissance mesuré
- ✓ Fréquence réseau
- ✓ Tensions réseau.

5.5.2 Architecture de supervision

Le bloc de contrôle constitue le cœur décisionnel du jumeau numérique du système photovoltaïque. Il assure la supervision intelligente et la régulation des performances en traitant en temps réel les grandeurs électriques mesurées au niveau du générateur PV, de l'onduleur et du réseau électrique.

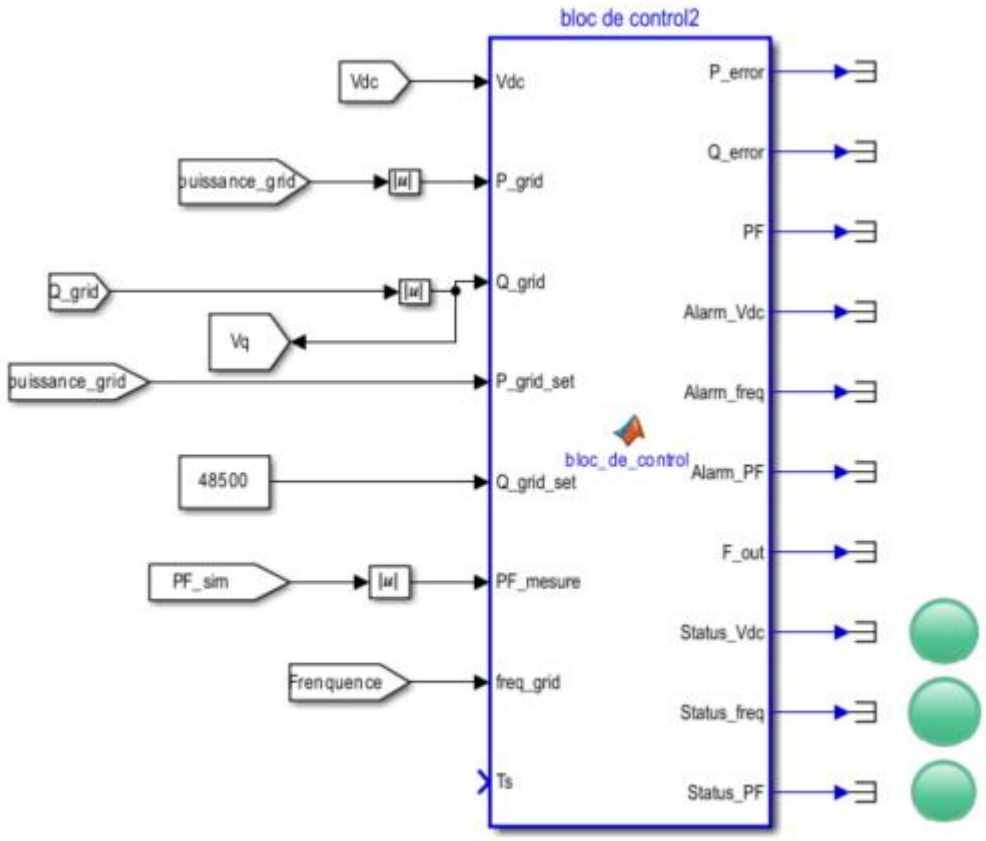


Figure 5-8Bloc de contrôle. Source : Serge Louijuste

Ce bloc traite les signaux mesurés et détermine :

- Les erreurs de puissance active et de puissance réactive.
- Le facteur de puissance.
- Les alarmes affichent des signaux verts en bon fonctionnement et rouges en cas de problème.

En résumé, notre tableau de bord permet un suivi instantané des paramètres clés et un diagnostic rapide en cas de déviation par rapport au fonctionnement attendu. Le système d'alarme intégré améliore la fiabilité du jumeau numérique.

5.6 Simulation temporelle paramétrée avec génération automatique de résultats

Le script MATLAB que nous avons en Annexe I permet de réaliser une simulation dynamique de notre système photovoltaïque connecté au réseau à partir de données d'irradiance, avec l'exportation automatique des résultats dans un fichier Excel qui sert de base de données. Il est conçu pour fonctionner en boucle pas à pas et gérer dynamiquement les conditions environnementales ainsi que les paramètres du système.

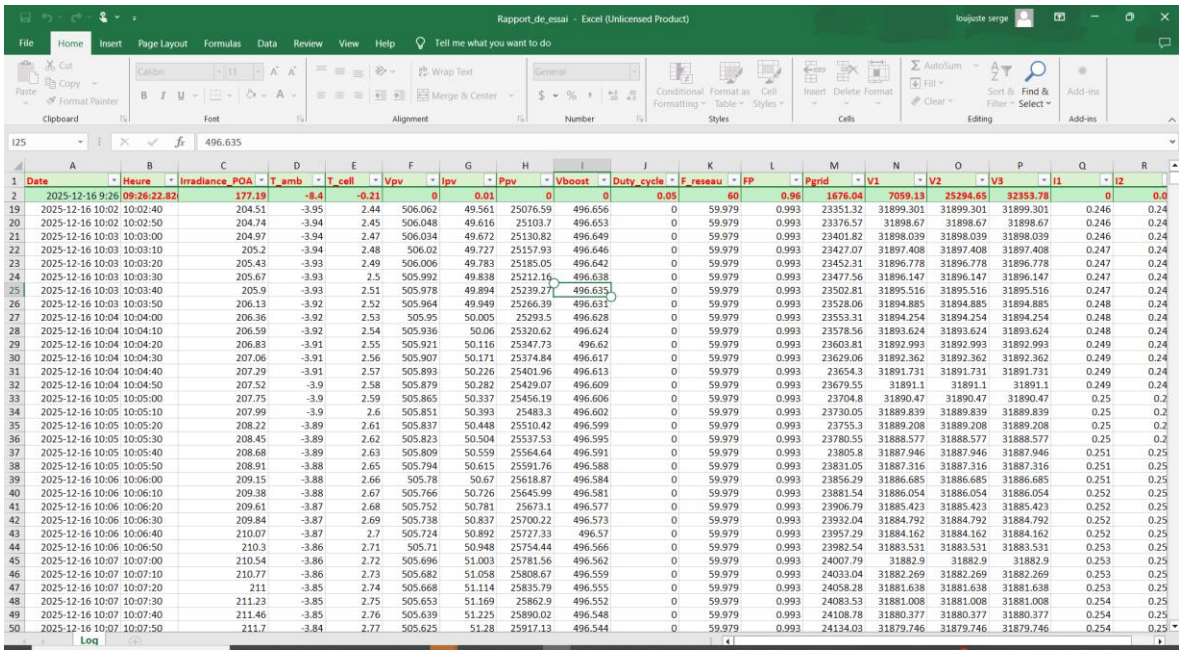
Le modèle Simulink principal « solarproject.m » s'ouvre automatiquement. Modèle présenté un peu plus haut.

Les données d'irradiance et de température sont obtenues en temps réel via les API OpenMeteo et OpenWeatherMap.

Pour créer la base de données, nous introduisons l'en-tête d'un fichier Excel afin de créer le tableau qui structurera les données enregistrées.

Les résultats sont exportés à un pas régulier de simulation. Le fichier Excel « Rapport_de_essai.xlsx » est créé ou mis à jour en fonction de l'existence du fichier.

Ce script permet une simulation réaliste et adaptative du jumeau numérique photovoltaïque, en tenant compte de données environnementales dynamiques et en automatisant l'enregistrement des résultats pour l'analyse et la traçabilité.



Date	Heure	Irradiance_POA	T_amb	T_cell	Vpv	Ipv	Ppv	Vboost	Duty_cycle	F_reseau	FP	Pgrid	V1	V2	V3	I1	I2
2025-12-16 9:26	09:26:22.82	177.19	-8.4	-0.21	0	0.01	0	0	0.05	60	0.96	1676.04	7059.13	25294.65	32353.78	0	0.0
2025-12-16 10:02	10:02:40	204.51	-3.95	2.44	506.062	49.561	25076.59	496.656	0	59.979	0.993	23351.32	31899.301	31899.301	31899.301	0.246	0.24
2025-12-16 10:02	10:02:50	204.74	-3.94	2.45	506.048	49.616	25103.7	496.653	0	59.979	0.993	23376.57	31898.67	31898.67	31898.67	0.246	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:00	204.97	-3.94	2.47	506.034	49.672	25130.82	496.649	0	59.979	0.993	23401.82	31898.039	31898.039	31898.039	0.246	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:10	205.2	-3.94	2.48	506.02	49.727	25157.93	496.646	0	59.979	0.993	23427.07	31897.408	31897.408	31897.408	0.247	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:20	205.43	-3.93	2.49	506.006	49.783	25185.05	496.642	0	59.979	0.993	23452.31	31896.778	31896.778	31896.778	0.247	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:30	205.67	-3.93	2.5	505.992	49.838	25212.16	496.638	0	59.979	0.993	23477.56	31896.147	31896.147	31896.147	0.247	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:40	205.9	-3.93	2.51	505.978	49.894	25239.27	496.635	0	59.979	0.993	23502.81	31895.516	31895.516	31895.516	0.247	0.24
2025-12-16 10:03	10:03:50	206.13	-3.92	2.52	505.964	49.949	25266.39	496.631	0	59.979	0.993	23528.06	31894.885	31894.885	31894.885	0.248	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:00	206.36	-3.92	2.53	505.95	50.005	25293.5	496.628	0	59.979	0.993	23553.31	31894.254	31894.254	31894.254	0.248	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:10	206.59	-3.92	2.54	505.936	50.06	25320.62	496.624	0	59.979	0.993	23578.56	31893.624	31893.624	31893.624	0.248	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:20	206.83	-3.91	2.55	505.921	50.116	25347.73	496.62	0	59.979	0.993	23603.81	31892.993	31892.993	31892.993	0.249	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:30	207.06	-3.91	2.56	505.907	50.171	25374.84	496.617	0	59.979	0.993	23629.06	31892.362	31892.362	31892.362	0.249	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:40	207.29	-3.91	2.57	505.893	50.226	25401.96	496.613	0	59.979	0.993	23654.3	31891.731	31891.731	31891.731	0.249	0.24
2025-12-16 10:04	10:04:50	207.52	-3.9	2.58	505.879	50.282	25429.07	496.609	0	59.979	0.993	23679.55	31891.1	31891.1	31891.1	0.249	0.24
2025-12-16 10:05	10:05:00	207.75	-3.9	2.59	505.865	50.337	25456.19	496.606	0	59.979	0.993	23704.8	31890.47	31890.47	31890.47	0.25	0.2
2025-12-16 10:05	10:05:10	207.99	-3.9	2.6	505.851	50.393	25483.3	496.602	0	59.979	0.993	23730.05	31889.839	31889.839	31889.839	0.25	0.2
2025-12-16 10:05	10:05:20	208.22	-3.89	2.61	505.837	50.448	25510.42	496.599	0	59.979	0.993	23755.3	31889.208	31889.208	31889.208	0.25	0.2
2025-12-16 10:05	10:05:30	208.45	-3.89	2.62	505.823	50.504	25537.53	496.595	0	59.979	0.993	23780.55	31888.577	31888.577	31888.577	0.25	0.2
2025-12-16 10:05	10:05:40	208.68	-3.89	2.63	505.809	50.559	25564.64	496.591	0	59.979	0.993	23805.8	31887.946	31887.946	31887.946	0.251	0.25
2025-12-16 10:05	10:05:50	208.91	-3.88	2.65	505.794	50.615	25591.76	496.588	0	59.979	0.993	23831.05	31887.316	31887.316	31887.316	0.251	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:00	209.15	-3.88	2.66	505.78	50.67	25618.87	496.584	0	59.979	0.993	23856.29	31886.685	31886.685	31886.685	0.251	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:10	209.38	-3.88	2.67	505.766	50.726	25645.99	496.581	0	59.979	0.993	23881.54	31886.054	31886.054	31886.054	0.252	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:20	209.61	-3.87	2.68	505.752	50.781	25673.1	496.577	0	59.979	0.993	23906.79	31885.423	31885.423	31885.423	0.252	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:30	209.84	-3.87	2.69	505.738	50.837	25700.22	496.573	0	59.979	0.993	23932.04	31884.792	31884.792	31884.792	0.252	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:40	210.07	-3.87	2.7	505.724	50.892	25727.33	496.57	0	59.979	0.993	23957.29	31884.162	31884.162	31884.162	0.252	0.25
2025-12-16 10:06	10:06:50	210.3	-3.86	2.71	505.71	50.948	25754.44	496.566	0	59.979	0.993	23982.54	31883.531	31883.531	31883.531	0.253	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:00	210.54	-3.86	2.72	505.696	51.003	25781.56	496.562	0	59.979	0.993	24007.79	31882.9	31882.9	31882.9	0.253	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:10	210.77	-3.86	2.73	505.682	51.058	25808.67	496.559	0	59.979	0.993	24033.04	31882.269	31882.269	31882.269	0.253	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:20	211	-3.85	2.74	505.668	51.114	25835.79	496.555	0	59.979	0.993	24058.28	31881.638	31881.638	31881.638	0.253	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:30	211.23	-3.85	2.75	505.653	51.169	25862.9	496.552	0	59.979	0.993	24083.53	31881.008	31881.008	31881.008	0.254	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:40	211.46	-3.85	2.76	505.639	51.225	25890.02	496.548	0	59.979	0.993	24108.78	31880.377	31880.377	31880.377	0.254	0.25
2025-12-16 10:07	10:07:50	211.7	-3.84	2.77	505.625	51.28	25917.13	496.544	0	59.979	0.993	24134.03	31879.746	31879.746	31879.746	0.254	0.25

Figure:5-9 Capture de base de données Excel. Source : Serge Louijuste

5.7 Contribution scientifique et technique de ce travail

Ce mémoire propose la conception et la réalisation d'un jumeau numérique opérationnel d'une centrale solaire photovoltaïque interconnectée au réseau électrique, avec une approche qui dépasse la simple simulation hors ligne. La contribution majeure réside dans l'intégration cohérente, au sein d'un même environnement, de la modélisation multi composants, de la météo réelle, de la commande, de la supervision, de la traçabilité des données et d'une capacité de prévision.

L'originalité de ce travail ne repose pas uniquement sur la modélisation d'un système photovoltaïque, mais sur la transformation de cette modélisation en **jumeau numérique exploitable**, capable de :

- **Se synchroniser** avec des données météo réelles,

- **Simuler** le comportement dynamique PV–réseau,
- **Superviser** les performances en temps réel,
- **Archiver** les résultats automatiquement,
- Et **anticiper** la production grâce à une prévision à 24 h.

Ainsi, ce projet propose une architecture applicable aux réseaux électriques intelligents, où la production solaire doit être pilotée et intégrée de manière fiable au sein d'un système électrique de plus en plus décentralisé.

Chapitre 6 -Perspectives

Le projet a permis de répondre à un enjeu central de l'intégration du photovoltaïque au réseau : observer, simuler et superviser un système PV interconnecté soumis à la variabilité météorologique, tout en assurant une chaîne de conversion cohérente (PV–Boost–MPPT–VSC–réseau) et une traçabilité des grandeurs critiques au moyen d'une base de données. Autrement dit, le jumeau numérique développé constitue une première réponse au besoin de comprendre et de contrôler, en temps quasi-réel, les interactions entre la production intermittente et les contraintes du réseau (tension DC, puissance injectée, facteur de puissance, fréquence). Toutefois, la transition vers un jumeau numérique de nouvelle génération exige d'élargir le périmètre du modèle afin qu'il passe d'un outil de supervision et d'analyse à un outil de décision et d'optimisation.

Une première perspective consiste à améliorer la fidélité opérationnelle en ajoutant une couche de validation et d'étalonnage (calibration) basée sur des données réelles. Le projet produit déjà des séries temporelles structurées (V_{dc}, V_{pv}, D, P/Q, FP, fréquence) ; des travaux futurs peuvent exploiter cette base pour identifier automatiquement les paramètres sensibles (pertes de conversion, paramètres du filtre, impédance équivalente du réseau, dérives des capteurs).

Une seconde perspective porte sur la commande : le projet met en œuvre une structure MPPT et une supervision par alarmes, mais des études futures peuvent ajouter une stratégie de contrôle multi-objectifs explicitement liée au problème de réseau. En pratique, il s'agit d'intégrer des modes de fonctionnement adaptatifs : limitation contrôlée ou gestion des consignes lorsque des contraintes surviennent (V_{dc} hors plage, PF minimal,

limites de courant, variations rapides). Dans la même logique, l'onduleur peut évoluer vers une gestion dynamique de P/Q (droop Q–V et P–f, ou lois PF(P)) afin de fournir des services réseau (support de tension, gestion du réactif, amortissement des oscillations), ce qui répond directement aux exigences des futurs réseaux électriques fortement décentralisés.

Enfin, la perspective la plus structurante consiste à faire évoluer le jumeau numérique vers une plateforme proactive : prévision, diagnostic et décision. Puisque le projet intègre déjà des données météo et une base d'export, des travaux futurs peuvent ajouter (i) une prévision à courte échéance par IA/ML (irradiance, température, puissance PV), (ii) une détection de défauts et de dégradations (ombrage partiel, hot spots, vieillissement, dérive des capteurs) par des méthodes à résidus ou d'apprentissage, et (iii) une couche d'optimisation/EMS, notamment si l'on ajoute un stockage (batterie/supercondensateur). L'apport attendu est une amélioration mesurable de la stabilité, de la qualité de l'énergie et de la résilience : le jumeau ne se limite plus à constater les écarts ; il anticipe les conditions critiques, propose des actions correctives et évalue leurs impacts avant leur mise en œuvre. Enfin on peut faire le résumé des perspectives d'améliorations comme :

- L'identification automatique des paramètres sensibles du système (pertes, impédances, dérives capteurs) ;
- La mise en place d'une stratégie de commande multi-objectifs intégrant les contraintes réseau ;
- L'évolution vers une gestion dynamique de la puissance active et réactive (P/Q, PF, support tension) ;

- L’ajout de modules de prévision à court terme basés sur les données météorologiques et l’IA ;
- L’intégration d’une couche d’optimisation énergétique et de gestion de l’énergie (EMS), notamment avec stockage ;
- La transformation du jumeau numérique en outil d’aide à la décision en temps réel.

6.1 Conclusion

Ce travail s’inscrit dans le contexte de la transition énergétique, où l’intégration massive des énergies renouvelables, en particulier du solaire photovoltaïque, impose de nouveaux défis aux réseaux électriques : variabilité de la production, diminution de l’inertie du système, exigences accrues en matière de qualité de l’énergie et besoin de supervision rapide et efficace. Dans ce contexte, l’objectif principal de ce mémoire était d’explorer les possibilités d’application des jumeaux numériques à une centrale photovoltaïque interconnectée au réseau et de les adapter aux exigences d’un réseau électrique intelligent.

Afin d’atteindre cet objectif, une étude approfondie du concept de jumeau numérique et de ses principales applications a été menée. Cette analyse a permis d’identifier les caractéristiques essentielles de cette technologie ainsi que son potentiel dans le domaine énergétique. Sur cette base, un jumeau numérique d’une centrale photovoltaïque interconnectée au réseau a été développé sous MATLAB/Simulink afin de représenter le comportement du système dans un environnement de simulation dynamique, tenant compte

des conditions météorologiques, notamment de l'irradiance et de la température, ainsi que des grandeurs électriques du réseau.

Sur le plan scientifique et technique, la contribution principale réside dans le développement d'une architecture intégrée de la chaîne PV-réseau comprenant la modélisation du générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC de type boost, l'algorithme MPPT de poursuite du point de puissance maximale, l'onduleur triphasé à source de tension (VSC), le système de filtrage et l'interface de raccordement au réseau électrique. Les simulations réalisées ont permis d'observer des comportements cohérents des tensions, des courants et des puissances, d'analyser les régimes transitoires et permanents du système et d'évaluer sa capacité à injecter une puissance contrôlée sous différentes conditions d'exploitation.

Conformément aux objectifs du mémoire, plusieurs modules complémentaires ont également été développés et intégrés au jumeau numérique. Parmi ceux-ci figurent un tableau de bord de supervision, un système de surveillance des grandeurs critiques du réseau, ainsi qu'un bloc de contrôle permettant le suivi des puissances actives et réactives, du facteur de puissance, de la tension du bus continu et de la fréquence. Ces fonctionnalités rapprochent le modèle développé d'un outil de supervision utilisable dans le contexte des réseaux électriques intelligents.

Un apport complémentaire important de cette recherche réside dans l'automatisation de la production et de la gestion des données. Le script MATLAB développé orchestre les

simulations et exporte automatiquement les résultats vers une base de données structurée. Cette approche favorise la traçabilité, facilite l'analyse des performances et constitue une base solide pour de futurs travaux portant sur la calibration du modèle, l'évaluation de nouvelles stratégies de commande et l'exploitation des données au moyen de techniques d'intelligence artificielle.

En conclusion, les objectifs fixés au début de cette recherche ont été atteints. Le travail réalisé a permis d'explorer concrètement les possibilités des jumeaux numériques appliqués aux centrales photovoltaïques interconnectées au réseau, de développer un environnement numérique cohérent intégrant plusieurs modules de supervision et d'analyse, et de démontrer leur intérêt pour les réseaux électriques intelligents.

Les perspectives identifiées telles que la validation à partir de données réelles, commande adaptative orientée contraintes réseau, intégration de fonctions de prévision, de diagnostic et d'optimisation, ainsi que l'ajout de systèmes de stockage d'énergie ouvrent la voie à des travaux futurs visant un jumeau numérique plus autonome et plus robuste, capable non seulement de représenter le comportement du système réel, mais également de servir d'outil d'aide à la décision pour la supervision, l'exploitation et l'optimisation des réseaux électriques intelligents.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Nations Unies, "Au service des personnes et de la planète.", COP 27. [En ligne]. Disponible : https://www.un.org/en/climatechange/cop27. (accessed 20 janvier 2023).

[2] M. Morvan, "Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques." [En ligne]. Disponible : https://www.annales.org/enjeux-numeriques/2021/en-15-09-21.pdf. (accessed 23 janvier 2023).

[3] A. T. Hassan, L. A. H. Al-Kindi and A. B. Abdulghafour, "Industry 4.0 and Smart Manufacturing: A State-of-the-Art Review," in Proc. 15th Int. Conf. Developments in eSystems Engineering (DeSE), Baghdad & Anbar, Iraq, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/DeSE58274.2023.10100115.

[4] D. Huamanchahua, R. G. de la Cruz-Chavez, A. G. Trinidad-Palacios, Y. A. Salinas-Bolaños, L. G. Rosa-Rodríguez, and R. A. Arancibia-de la Sota, "The Use of Immersive Technologies in Industry 4.0: A State-of-Art Review," in Proc. IEEE ANDESCON, Barranquilla, Colombia, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ANDESCON56260.2022.9989739.

[5] P. Mell and T. Grance, The NIST Definition of Cloud Computing. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology (NIST), 2011.

[6] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The Internet of Things: A Survey," Computer Networks, vol. 54, pp. 2787-2805, 2010.

[7] J. Lee, B. Bagheri and H.-A. Kao, "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems," Manufacturing Letters, vol. 3, pp. 18-23, 2015.

[8] F. Schoenthaler, D. Augenstein, T. Karle, A. Draghici, A. D. Popescu, and L. M. Gogan, "Design and Governance of Collaborative Business Processes in Industry 4.0," in Proc. Workshop on Cross-Organizational and Cross-Company BPM (XOCBPM), 2015, p. 7.

[9] R. Drath and A. Horch, "Industrie 4.0: Hit or Hype?" IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 2, pp. 56-58, 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2312079.

[10] Observatoire Industrie 4.0, "Jumeaux numériques : moteur de l'industrie 4.0." [En ligne]. Disponible : https://fr.sindup.com/blog/publications-observatoires/jumeaux-numeriques-moteur-de-lindustrie-4-0/(consulté le 2 février 2023).

[11] M. Grieves, "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication," White paper, vol. 1, no. 2014, pp. 1-7, 2014.

[12] M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Rossmann, "Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 4, pp. 1722-1731, Apr. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2804917.

[13] E. Glaessgen and D. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," in Proc. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012, p. 1818.

[14] R. Stark, C. Fresemann and K. Lindow, "Development and Operation of Digital Twins for Technical Systems and Services," CIRP Annals, vol. 68, no. 1, pp. 129-132, 2019.

[15] J. Lee, E. Lapira, S. Yang, and A. Kao, "Predictive Manufacturing System: Trends of Next-Generation Production Systems," IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, no. 7, pp. 150-156, 2013.

[16] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, "Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review," Computers in Industry, vol. 130, Art. no. 103469, 2021.

[17] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, and D. Fogli, "A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications," IEEE Access, vol. 7, pp. 167653-167671, 2019.

[18] G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola, "Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange," IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 30, pp. 12-17, 2016.

[19] H. Abbad, O. Bentahar et S. Benzidia, "Transformation digitale de la supply chain: caractéristiques, enjeux et voies de recherche futures," vol. 30, éd.: Taylor & Francis, 2022, pp. 119-124.

[20] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," IEEE Access, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

[21] Q. Tang, B. Wu, W. Chen and J. Yue, "A Digital Twin-Assisted Collaborative Capability Optimization Model for Smart Manufacturing System Based on Elman-IVIF-TOPSIS," IEEE Access, vol. 11, pp. 40540-40564, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3269577.

[22] J.-C. Granry, "Les jumeaux numériques : un avenir majeur de la simulation en santé," Rev'Sims, vol. 3, pp. 20-23, 2021, doi: 10.48562/revsims3-2021-0007.

[23] A. Shamsuzzoha, J. Nieminen, S. Piya and K. Rutledge, "Smart City for Sustainable Environment: A Comparison of Participatory Strategies from Helsinki, Singapore and London," Cities, vol. 114, Art. no. 103194, 2021.

[24] M. Xiong and H. Wang, "Digital Twin Applications in Aviation Industry: A Review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 121, no. 9-10, pp. 5677-5692, 2022.

[25] B. Bielefeldt, J. Hochhalter, and D. Hartl, "Computationally efficient analysis of SMA sensory particles embedded in complex aerostructures using a substructure approach," in *Smart materials, adaptive structures and intelligent systems*, 2015, vol. 57298: American Society of Mechanical Engineers, p. V001T02A007.

[26] J. Brownlow, "The Uses of Digital Twin Technology in Aviation Airlines," World Aviation Festival, Sep. 30, 2022. [En ligne]. Disponible : https://worldaviationfestival.com/blog/airlines/the-uses-of-digital-twin-technology-in-aviation/.(accessed 2 mars , 2023).

[27] S. Corsi and C. Sabelli, "General Blackout in Italy Sunday, September 28, 2003, h. 03:28:00," in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2004, pp. 1691-1702, doi: 10.1109/PES.2004.1373162.

[28] H. Pan, Z. Dou, Y. Cai, W. Li, X. Lei, and D. Han, "Digital Twin and Its Application in Power System," in Proc. 5th Int. Conf. Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2020, pp. 21-26, doi: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233278.

[29] F. Tao, X. Ma, T. Hu, Z. Huang, J. Cheng, Q. Qi et al., "Digital Twin Standard System," Computer Integrated Manufacturing System, vol. 25, no. 10, pp. 2405-2418, 2019, doi: 10.13196/j.cims.2019.10.001.

[30] C. Grange and S. Ricoul, "Organisations : quel est votre degré de maturité numérique ?," Gestion, vol. 42, pp. 86-89, 2017, doi: 10.3917/riges.421.0086.

[31] Banque de développement du Canada, "Maturité numérique." [En ligne]. Disponible : https://www.bdc.ca/fr/articles-outils/boite-outils-entrepreneur/evaluation-entreprise/maturite-numerique.

[32] N. Julien and É. Martin, Le jumeau numérique : De l'intelligence artificielle à l'industrie agile. Paris, France: Dunod, 2020.

[33] B. Laville, "Cinquante années de tentatives de gouvernance pour un développement plus durable," Revue française d'administration publique, vol. 182, pp. 565-576, 2022, doi: 10.3917/rfap.182.0220.

[34] C. Bessalem, A. Diemer, C. Batisse and M. Benamara, "Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective," Revue francophone du développement durable, 2022.

[35] [Energy Institute, "Statistical Review of World Energy," 72nd ed., 2023. [En ligne]. Disponible : https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Statistical%20Review%20of%20World%20Energy.pdf. (accessed 22 Avril , 2023).

[36] M. Rahman, S. Tanzil, R. H. Ritu and D. M. Kamunya, "Geographical Distribution of Renewable Energy Production for Maximum Efficiency and Environmental Sustainability," in Proc. 9th Int. Conf. Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MPS52805.2021.9492681.

[37] Hydro-Québec, "Énergie éolienne : comment ça fonctionne ?" [En ligne]. Disponible : http://www.hydroquebec.com/comprendre/eolienne/.

[38] Gouvernement du Canada, "Énergie éolienne." [En ligne]. Disponible : https://ressources-naturelles.canada.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/energies-renouvelables/energie-eolienne/7300.

[39] Z. Zhang, X. Liu, D. Zhao, S. Post and J. Chen, "Overview of the Development and Application of Wind Energy in New Zealand," Energy and Built Environment, vol. 4, no. 6, pp. 725-742, 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2022.06.009.

[40] E. Barbier, "Geothermal Energy Technology and Current Status: An Overview," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 6, no. 1-2, pp. 3-65, 2002.

[41] Électricité de France, "Le fonctionnement d'une centrale géothermique." [En ligne]. Disponible : https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-geothermique. (accessed 3 mai 2023).

[42] M. Balat and G. Ayar, "Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends," Energy Sources, vol. 27, no. 10, pp. 931-940, 2005.

[43] P. K. Halder, N. Paul and M. R. A. Beg, "Assessment of Biomass Energy Resources and Related Technologies Practice in Bangladesh," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, pp. 444-460, 2014.

[44] X. Wang, Y. Duan, B. Xiao, Z. Zhou, H. Peng, and Y. Wang, "Hybrid Solar Power System Optimization Based on Multi-Objective PSO Algorithm," in Proc. Chinese Automation Congress (CAC), 2019, pp. 4176-4180.

[45] Intermines, "L'énergie solaire : un gigantesque potentiel à valoriser," 2019. [En ligne]. Disponible : https://www.inter-mines.org/fr/revue/article/l-energie-solaire-un-gigantesque-potentiel-a-valoriser/1529. (accessed 3 juillet 2023).

[46] B. Multon, "L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique", La Revue 3 E.I, pp. 29-38, 1998. [En ligne]. Disponible : https://hal.science/hal-00674076. (accessed 2 octobre 2023).

[47] É. Reclus, « Kyle Harper, Comment l'empire romain s'est effondré ». Le climat, les maladies et la chute de Rome," Revue Projet, vol. 370, no. 3, pp. 96-96, 2019.

[48] Nations Unies, « 17 objectifs pour transformer notre monde », 2020. [En ligne]. Disponible: https://www.un.org/fr/climatechange/17-goals-to-transform-our-world. (accessed 2 avril 2023).

[49] M. R. Duvison García and A. Rivas Cuenca, "L'intégration des énergies renouvelables au système électrique espagnol," Annales des Mines - Responsabilité et Environnement, vol. 69, no. 1, pp. 75-75, 2013, doi: 10.3917/re.069.0075.

[50] L. Wang and G. Wang, "Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0," International Journal of Engineering and Manufacturing, vol. 6, no. 4, pp. 1-8, 2016.

[51] Connaissance des Énergies, "BP Statistical Review of World Energy 2021 : les chiffres clés de l'énergie dans le monde." [En ligne]. Disponible : https://www.connaissancedesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2022-les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-220629. (accessed 2 déc embre, 2023).

[52] IBM, "What is Industry 4.0 and How Does It Work?" [En ligne]. Disponible : https://www.ibm.com/topics/industry-4-0. (accessed 2 janvier , 2024).

[53] S. Mihai et al., "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 4, pp. 2255-2291, Fourth Quarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3208773.

[54] J. F. Uhlenkamp, J. B. Hauge, E. Broda, M. Lütjen, M. Freitag and K. D. Thoben, "Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluation," IEEE Access, vol. 10, pp. 69605-69635, 2022.

[55] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook and Other EIA Documents," U.S. Department of Energy, 2006-2007. [En ligne]. Disponible : http://www.eia.doe.gov/.(accessed 6 Mars, 2024).

[56] M. Kumar and G. Panda, "Analysis of Conventional and Interleaved Boost Converter with Solar Photovoltaic System," in Proc. Int. Conf. Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP), 2022, pp. 1-6.

[57] M. Q. Duong, H. Tran and C. A. Hossain, "Influence of Elemental Parameter in the Boost and the Buck Converter," in Proc. IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conf. (R10-HTC), 2017, pp. 528-531.

[58] M. A. De Brito, L. P. Sampaio, G. Luigi, G. A. e Melo and C. A. Canesin, "Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV Applications," in Proc. Int. Conf. Clean Electrical Power (ICCEP), 2011, pp. 99-104.

[59] H. Channi, "Planning and Building Digital Twins for Smart Cities," in Digital Twins for Smart Cities and Villages, pp. 205-225, 2025, doi: 10.1016/B978-0-443-28884-5.00010-5.

[60] Connaissance des Énergies, "Les filières renouvelables progressent en 2022 dans un mix électrique mondial encore très carboné," 2022. [En ligne]. Disponible : https://www.connaissancedesenergies.org/les-filieres-renouvelables-progressent-

dans-un-mix-electrique-mondial-encore-tres-carbone-240426. (accessed 23 avril , 2024).

[61] Connaissance des Énergies, "L'énergie : définition, ses sources, ses formes, ses mesures," 2024. [En ligne]. Disponible : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie. (accessed 2 mai 2024).

[62] Université du Québec à Trois-Rivières, "Les trois principales sphères du développement durable." [En ligne]. Disponible : https://oraprdnt.uqtr.uquebec.ca/portail/gscw031?owa_no_site=1200&owa_no_fiche=99. (accessed 2 Juillet , 2024).

[63] International Renewable Energy Agency, "Installed Wind Energy Capacity," 2024. [En ligne]. Disponible : https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-installed-wind-energy-capacity-gigawatts. (accessed 2 Juillet , 2024).

[64] Banque mondiale, "Atlas solaire mondial." [En ligne]. Disponible : https://globalsolaratlas.info/map?c=38.272689,-47.285156,2&s=61.773123,-101.601563&m=site. (accessed 2 decembre , 2024).

[65] Connaissance des Énergies, "Production d'énergie dans le monde : chiffres clés par sources," 2024. [En ligne]. Disponible : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-denergie-dans-le-monde. (accessed 2 Fevrier , 2025).

[66] Connaissance des Énergies, "L'évolution du mix électrique mondial en 2022 en infographies," 2024. [En ligne]. Disponible :

https://www.connaissancedesenergies.org/levolution-du-mix-electrique-mondial-en-2022-en-2-infographies-241104. (accessed 2 janvier , 2025).

[67] R. Stark, C. Fresemann, and K. Lindow, "Development and operation of Digital Twins for technical systems and services," *CIRP Annals,* vol. 68, no. 1, pp. 129-132, 2019.

[68] Ember, "Global Electricity Review 2023," 2023. [En ligne]. Disponible : https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/.(accessed 2 mars , 2025).

[69] Cairn.info, "Vers une transition énergétique ?" [En ligne]. Disponible : https://stm.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2011-2-page-133?lang=fr. https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/.(accessed 23 mars, 2025).

[70] Cairn.info, "Les enjeux technologiques et industriels du numérique dans les réseaux électriques," 2024. [En ligne]. Disponible : https://stm.cairn.info/revue-en-jeux-numeriques-2021-3-page-19?lang=fr, doi: 10.3917/ennu.015.0019. https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/.(accessed 15 avril , 2025).

[71] D. Duan and L. L. Scharf, "A Signal Theory of Instantaneous and Average Power," IEEE Access, vol. 12, pp. 153618-153627, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3483178.

[72] M.Grieves and J. Vickers, "Origins of the digital twin concept: working paper," *Florida Institute of Technology: Melbourne, FL, USA,2016.*

[73] Solar Panel - Canadian Solar - CS3L-375MS HiKu 375Wp - 375Wp - Mono - Secondsol;access: le 20 janvier 2023.

[74] MarketsandMarkets, *Digital Twin Market by Technology, Type, Application, End User and Region – Global Forecast to 2026*, Pune, India: MarketsandMarkets, 2021.

[75] Z. Liu, N. Meyendorf and N. Mrad, "Digital Twin for Predictive Maintenance," in *Aerospace*, vol. 5, no. 3, Art. no. 58, 2018.

Annexe A: Fonction définissant le bloc de contrôle

```
function [P_error, Q_error, PF, Alarm_Vdc, Alarm_freq, Alarm_PF, ...
F_out, Status_Vdc, Status_freq, Status_PF] = ...
bloc_de_control( ...
Vdc, P_grid, Q_grid, ... % mesures essentielles
P_grid_set, Q_grid_set, ... % consignes réseau
PF_mesure, freq_grid, Ts) % PF/freq mesurés + pas
%#codegen
% Bloc "Supervision & Alarmes" – hystérésis + debounce + garde-fous
% (aucune action de commande : monitoring pur)
% ------------------------------------------------------------------------
% PARAMÈTRES
% ------------------------------------------------------------------------
% Vdc (V)
VDC_LO_RED = 470; % seuil bas critique
VDC_HI_RED = 540; % seuil haut critique
VDC_LO_REL = 480; % relâchement (hystérésis)
VDC_HI_REL = 530;
VDC_DEBOUNCE_S = 0.050; % 50 ms
% Fréquence (Hz) – conformité 60 Hz ±
F_LO_RED = 56.0;
F_HI_RED = 64.0;
```

```
F_LO_REL = 57.0;

F_HI_REL = 63.0;

F_DEBOUNCE_S = 0.150; % 150 ms

TAU_FILT_F = 0.05; % filtre 1er ordre (~50 ms)

% Facteur de puissance

PF_MIN_RED = 0.90; % rouge < 0.90

PF_MIN_REL = 0.93; % relâchement

PF_DEBOUNCE_S = 0.200; % 200 ms

TAU_FILT_PF = 0.20; % lissage PF (~200 ms)

% Anti-alarme PF à très faible puissance apparente

S_MIN_IGNORE = 0.02; % ignore si S < 2 % de S_rated

S_rated = 112500/0.90; % ~Snom (ex: 112.5 kW @ PF=0.9)

% Garde-fous généraux

EPS_NAN_HOLD_S = 0.100; % tenir dernière valeur valide (100 ms)

% ------------------------------------------------------------------------

% ÉTATS PERSISTANTS

% ------------------------------------------------------------------------

persistent tLowV tHighV tLowF tHighF tLowPF f_filt pf_filt lastF tHoldF

if isempty(tLowV), tLowV=0; tHighV=0; end

if isempty(tLowF), tLowF=0; tHighF=0; end

if isempty(tLowPF), tLowPF=0; end

if isempty(f_filt), f_filt=60; end
```

```
if isempty(pf_filt), pf_filt=1.0; end
if isempty(lastF), lastF=60; end
if isempty(tHoldF), tHoldF=0; end
% ------------------------------------------------------------------------
% ERREURS P/Q
% ------------------------------------------------------------------------
% Convention: erreurs = consigne - mesure (réseau)
P_error = P_grid_set - P_grid;
Q_error = Q_grid_set - Q_grid;
% ------------------------------------------------------------------------
% FRÉQUENCE (conversion & filtrage)
% ------------------------------------------------------------------------
F_in = freq_grid;
if ~isfinite(F_in)
% maintien dernière valeur quelques pas pour éviter les NaN
tHoldF = tHoldF + Ts;
if tHoldF <= EPS_NAN_HOLD_S
F_in = lastF;
else
F_in = 60; % secours
end
else
```

```
tHoldF = 0;
end
% Heuristique: si on reçoit une pulsation rad/s (>> 500), convertir en Hz
if F_in > 500
F_in = F_in/(2*pi);
end
% Filtrage 1er ordre
alphaF = min(1, Ts/max(TAU_FILT_F,Ts));
f_filt = f_filt + alphaF*(F_in - f_filt);
F_out = f_filt;
lastF = F_out;
% ------------------------------------------------------------------------
% PF ROBUSTE (valeur absolue + fallback depuis P,Q)
% ------------------------------------------------------------------------
pf_meas = PF_mesure;
% si PF capteur NaN/Inf -> fallback au calcul depuis P,Q
if ~isfinite(pf_meas)
S_calc = hypot(P_grid, Q_grid); % S = sqrt(P^2 + Q^2)
if S_calc > 1e-6
pf_meas = abs(P_grid) / S_calc; % magnitude du PF
else
pf_meas = 1.0; % à vide → considérer OK
```

```
end

end

% si capteur fournit PF signé (leading négatif), prendre la magnitude

pf_meas = abs(pf_meas);

pf_meas = min(1, max(0, pf_meas)); % clamp 0..1

% Filtrage 1er ordre

alphaPF = min(1, Ts/max(TAU_FILT_PF,Ts));

pf_filt = pf_filt + alphaPF*(pf_meas - pf_filt);

PF = pf_filt;

% ------------------------------------------------------------------------

% ALARMES (hystérésis + temporisation/debounce) : Vdc, F, PF

% ------------------------------------------------------------------------

% ---- Vdc

if Vdc < VDC_LO_RED

tLowV = tLowV + Ts; tHighV = 0;

elseif Vdc > VDC_HI_RED

tHighV = tHighV + Ts; tLowV = 0;

elseif (Vdc >= VDC_LO_REL) && (Vdc <= VDC_HI_REL)

% zone OK -> décrémenter progressivement

tLowV = max(tLowV - Ts,0);

tHighV = max(tHighV - Ts,0);

else
```

```
% bande d’hystérésis: maintien
end
Alarm_Vdc = (tLowV >= VDC_DEBOUNCE_S) || (tHighV >= VDC_DEBOUNCE_S);
Status_Vdc = uint8( Alarm_Vdc*2 + (~Alarm_Vdc && (Vdc < VDC_LO_REL || Vdc >
VDC_HI_REL)) );
% ---- Fréquence
if F_out < F_LO_RED
tLowF = tLowF + Ts; tHighF = 0;
elseif F_out > F_HI_RED
tHighF = tHighF + Ts; tLowF = 0;
elseif (F_out >= F_LO_REL) && (F_out <= F_HI_REL)
tLowF = max(tLowF - Ts,0);
tHighF = max(tHighF - Ts,0);
else
% bande d’hystérésis: maintien
end
Alarm_freq = (tLowF >= F_DEBOUNCE_S) || (tHighF >= F_DEBOUNCE_S);
Status_freq = uint8( Alarm_freq*2 + (~Alarm_freq && (F_out < F_LO_REL || F_out >
F_HI_REL)) );
% ---- PF (avec neutralisation à faible puissance apparente)
S_inst = hypot(P_grid, Q_grid);
ignore_pf_alarm = (S_rated > 0) && (S_inst < S_MIN_IGNORE * S_rated);
```

```
if ignore_pf_alarm
% À très faible S : PF non significatif → pas d'alarme
tLowPF = max(tLowPF - Ts, 0); % relâche doucement
Alarm_PF = false;
Status_PF = uint8(0); % vert
else
if PF < PF_MIN_RED
tLowPF = tLowPF + Ts;
elseif PF >= PF_MIN_REL
tLowPF = max(tLowPF - Ts, 0);
else
% bande d'hystérésis
end
Alarm_PF = (tLowPF >= PF_DEBOUNCE_S);
Status_PF = uint8( Alarm_PF*2 + (~Alarm_PF && (PF < PF_MIN_REL)) );
end
end
```

Annexe B: Script principale

```
% ================== Simulation Matlab systeme solaire
==================

model = 'boost115';

open_system(model);

% ------------------ Réglages généraux ------------------

interval = 10; % pas d'export (s)

simulation_duree = 3; % durée de RUN (s)

interval_excel = 900; % === 15 minutes pour l'export Excel (900 s) ===

t_warmup = 1; % réservé

n_points = max(2, floor(simulation_duree/interval)+1);

% Coordonnées du site (Trois-Rivières)

lat = 46.34757; lon = -72.57799; tz = 'America/Toronto';

% Orientation champ PV

tilt_deg = 30; az_deg = 180; albedo = 0.20; NOCT = 45;

% ------------------ Logging côté modèle ------------------

set_param(model, 'SignalLogging','on', 'SignalLoggingName','logsout', ...

'SaveFormat','Dataset','SaveOutput','on');

% === Irradiance temps reel à partir de (Open-Meteo) ===

[ghi_now, ~] = live_ghi_openmeteo(lat, lon, tz); % W/m² (GHI live)

assert(isfinite(ghi_now), 'GHI live indisponible ou invalide.');

GHI_now = min(max(ghi_now, 0), 1200);
```

```
% --- GHI -> POA (géométrie solaire) ---
tnow = datetime('now','TimeZone',tz);
[theta_z_deg, solar_az_deg] = solar_zenith_az(tnow, lat, lon);
theta_i_deg = incidence_angle_deg(tilt_deg, az_deg, theta_z_deg, solar_az_deg);
I0 = extraterrestrial_irradiance_Wpm2(tnow, lat, lon);
Kt = min(max(GHI_now / max(I0,1e-6), 0), 1.2);
[~, DHI_now] = erbs_diffuse_fraction_and_DHI(Kt, GHI_now);
cs = cosd(theta_z_deg);
DNI_now = (cs>0 && theta_z_deg<89) * max((GHI_now - DHI_now)/max(cs,1e-3),
0);
F_sky = (1 + cosd(tilt_deg))/2;
F_grd = (1 - cosd(tilt_deg))/2;
POA_now = max(DNI_now * max(cosd(theta_i_deg),0) + DHI_now*F_sky + al-
bedo*GHI_now*F_grd, 0);
POA_now = POA_now * (theta_z_deg < 90); % nuit -> 0
irradiance_list = repmat(POA_now, n_points, 1);
time_vector = (0:n_points-1)'*interval;
irradiance_ts = timeseries(irradiance_list, time_vector);
assignin('base','irradiance_ts',irradiance_ts);
% === Température ambiante via API ===
try
apiKey = '8caf0aeddc73eb77dc1c2d7577c416af';
```

```
url = ['https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat=' num2str(lat) ...
'&lon=' num2str(lon) '&appid=' apiKey '&units=metric'];
options = weboptions('Timeout',20);
response = webread(url, options);
Temperature = response.main.temp; % °C
catch
Temperature = 25;
end
assignin('base','Temperature',Temperature);
fprintf("Température ambiante = %.2f °C\n", Temperature);
% 3) Forcer Simulink à mettre à jour le modèle (Ctrl+D)
set_param(model,'SimulationCommand','update');
% Température cellule (NOCT)
Tcell_now = Temperature + (NOCT - 20)/800 * POA_now; % °C
assignin('base','Tcell', Tcell_now);
%% ================== SIMULATION ==================
disp('Simulation en cours...');
simOut = sim(model, 'StopTime', num2str(simulation_duree), 'ReturnWorkspaceOut-
puts','on');
disp('Simulation terminee.');
%% ================== LECTURE DES SIGNAUX (auto-detection)
==================
```

```
tpv = get_ts_first(simOut, {'Tension_panneau','Vpv','V_pv','V_PV','Vpv_mes','V_pan-
neau'}, interval);
ipv = get_ts_first(simOut, {'Intensite_panneau','Ipv','I_pv','I_PV','Ipv_mes','I_panneau'},
interval);
vdc = get_ts_first(simOut, {'Tension_boost','Vboost','V_dc','Vdc'}, interval);
duty = get_ts_first(simOut, {'Duty_cycle','D','Duty'}, interval);
freq = get_ts_first(simOut, {'freq','FR','f','frequency','f_reseau','freq_grid','F_grid', ...
'pll_f','grid_freq','w','omega','w_grid','omega_grid'}, interval);
freq = ensure_freq_hz(freq);
pf = get_ts_first(simOut, {'FP','PF','power_factor'}, interval);
pgrid = get_ts_first(simOut, {'Puissance_grid','P_grid','Pgrid'}, interval);
V1 = get_ts_first(simOut, {'Vmax_a','Va','Vac_a','V_a'}, interval);
V2 = get_ts_first(simOut, {'Vmax_b','Vb','Vac_b','V_b'}, interval);
V3 = get_ts_first(simOut, {'Vmax_c','Vc','Vac_c','V_c'}, interval);
I1 = get_ts_first(simOut, {'Imax_a','Ia','Iac_a','I_a'}, interval);
I2 = get_ts_first(simOut, {'Imax_b','Ib','Iac_b','I_b'}, interval);
I3_ = get_ts_first(simOut, {'Imax_c','Ic','Iac_c','I_c'}, interval);
%% ================== TEMPS & GRILLE D'EXPORT
==================
t_export = (0:interval_excel:simulation_duree)'; % 0, 900, 1800, ...
dt_real = tnow + seconds(t_export - t_export(1));
Date_dt = datetime(dt_real,'TimeZone',''); Date_dt.Format = 'yyyy-MM-dd';
```

```
Heure_dur= timeofday(dt_real); Heure_dur.Format= 'hh:mm:ss.SSS';
%% ================== INTERPOLATION ==================
Vpv_e = interp_safe(tpv.Time, tpv.Data, t_export);
Ipv_e = interp_safe(ipv.Time, ipv.Data, t_export);
Vboost_e = interp_safe(vdc.Time, vdc.Data, t_export);
D_e = interp_safe(duty.Time, duty.Data, t_export);
f_e = interp_safe(freq.Time, freq.Data, t_export);
FP_e = interp_safe(pf.Time, pf.Data, t_export);
Pgrid_e = interp_safe(pgrid.Time, pgrid.Data, t_export);
V1_e = interp_safe(V1.Time, V1.Data, t_export);
V2_e = interp_safe(V2.Time, V2.Data, t_export);
V3_e = interp_safe(V3.Time, V3.Data, t_export);
I1_e = interp_safe(I1.Time, I1.Data, t_export);
I2_e = interp_safe(I2.Time, I2.Data, t_export);
I3_e = interp_safe(I3_.Time, I3_.Data, t_export);
Ppv_e = Vpv_e .* Ipv_e;
%% ================== TABLE (RUN : même format que ton rapport)
==================
T = table( ...
Date_dt, Heure_dur, ...
round(repmat(POA_now,size(t_export)),2), ...
round(repmat(temperature,size(t_export)),2), ...
```

```
round(repmat(Tcell_now,size(t_export)),2), ...
round(Vpv_e,2), round(Ipv_e,2), round(Ppv_e,2), ...
round(Vboost_e,2), round(D_e,3), round(f_e,2), ...
round(FP_e,2), round(Pgrid_e,2), ...
round(V1_e,2), round(V2_e,2), round(V3_e,2), ...
round(I1_e,2), round(I2_e,2), round(I3_e,2), ...
'VariableNames', {'Date','Heure','Irradiance_POA','T_amb','T_cell', ...
'Vpv','Ipv','Ppv','Vboost','Duty_cycle','F_reseau', ...
'FP','Pgrid','V1','V2','V3','I1','I2','I3'});
desktop = fullfile(getenv('USERPROFILE'),'Desktop');
excel_name = fullfile(desktop,'Rapport_de_essai.xlsx');
% --- Écriture RUN en APPEND uniquement ---
if ~isfile(excel_name)
% Fichier absent : on crée le fichier et la feuille
writetable(T, excel_name, 'Sheet','Log', 'WriteMode','replacefile', 'AutoFitWidth',false);
else
% Fichier présent : on append toujours
writetable(T, excel_name, 'Sheet','Log', 'WriteMode','append', 'AutoFitWidth',false);
end
disp(['Excel mis a jour (Run, append-only) : ', excel_name]);
%% ================== PRÉVISION 24 h -> APPEND DANS LA MÊME
FEUILLE ==================
```

```
try
% ===== 0) Références issues de la simulation courte (RUN 0.1 s) =====
take_last = @(x) x(max(1,numel(x))); % dernier échantillon robuste
% Puissance et réseau à l'instant "maintenant"
Pgrid_ref = take_last(Pgrid_e); % W
f_ref = take_last(f_e); % Hz
PF_ref = take_last(FP_e); % facteur de puissance
% Tensions réseau : on prend le niveau vu dans la simu
V1_ref = max(V1_e(~isnan(V1_e)));
V2_ref = max(V2_e(~isnan(V2_e)));
V3_ref = max(V3_e(~isnan(V3_e)));
Vph_nom = max([V1_ref, V2_ref, V3_ref]); % ce que tu loggues (phase ou ligne)
VLL_nom = Vph_nom * sqrt(3); % sert pour le calcul du courant
% ===== 1) Paramètres physiques CALIBRÉS par la simu =====
Gref = 1000; % W/m²
eta_boost = 0.97;
eta_inverter = 0.96;
% Puissance STC calée sur la puissance mesurée (au moins 112.5 kW)
P_stc_total = max(112.5e3, abs(Pgrid_ref)/(eta_boost*eta_inverter));
% Boucle DC (droop Vdc–P)
Vdc_nom = 500; % V
Vpv_nom_25C = 476; % V @25°C
```

```
beta_V = -0.0028; % /°C

gamma_P = -0.004; % /°C

k_vdc_pu = 0.03; % Vdc vs Pdc (pu)

% Réseau AC : même niveau de tension que la simu + droop

Rpu_line = 0.05;

Xpu_line = 0.15;

f_nom = f_ref; % fréquence nominale = celle de la simu

Kf_pu = 0.10; % Hz/pu

% Loi PF(P) calée sur PF de la simu

PF_min_full = min(0.95, PF_ref); % ne descend pas sous PF_ref

pf_knee = 0.10;

pf_slope = (1 - PF_min_full) / (1 - pf_knee);

% ===== 2) GHI & T FUTURS (Open-Meteo) =====

[t24, ghi24, tamb24] = openmeteo_ghi_temp_24h(lat, lon, tz, tnow);

% ===== 3) GHI -> POA FUTUR =====

[theta_z24, az24] = solar_zenith_az(t24, lat, lon);

theta_i24 = incidence_angle_deg(tilt_deg, az_deg, theta_z24, az24);

I0_24 = extraterrestrial_irradiance_Wpm2(t24, lat, lon);

Kt24 = min(max(ghi24 ./ max(I0_24,1e-6), 0), 1.2);

[~, DHI24] = erbs_diffuse_fraction_and_DHI(Kt24, ghi24);

cs24 = cosd(theta_z24);

DNI24 = zeros(size(ghi24));
```

```
jour_m = (cs24 > 0) & (theta_z24 < 89);
DNI24(jour_m) = max((ghi24(jour_m) - DHI24(jour_m)) ./ max(cs24(jour_m),1e-3), 0);
F_sky = (1 + cosd(tilt_deg))/2;
F_grd = (1 - cosd(tilt_deg))/2;
POA24 = max(DNI24 .* max(cosd(theta_i24),0) + DHI24.*F_sky + al-
bedo.*ghi24.*F_grd, 0);
POA24 = POA24 .* (theta_z24 < 90); % nuit -> 0
% ===== 4) Modèle PV futur + Vdc, Duty =====
n = numel(t24);
Tcell24 = tamb24 + (NOCT - 20)/800 .* POA24;
Vpv24 = zeros(n,1); Ipv24 = zeros(n,1); Ppv24 = zeros(n,1);
Vdc24 = Vdc_nom * ones(n,1); Duty24 = zeros(n,1);
dm = (POA24 > 1) & (theta_z24 < 90);
Vpv_dm = Vpv_nom_25C .* (1 + beta_V .* (Tcell24(dm) - 25)); Vpv_dm =
max(Vpv_dm, 50);
Ppv_d = P_stc_total .* (POA24(dm)/Gref) .* (1 + gamma_P.*(Tcell24(dm)-25));
Ppv_d = max(Ppv_d, 0);
Ipv_d = Ppv_d ./ max(Vpv_dm, 1);
Ppu_dc = zeros(n,1);
Ppu_dc(dm) = Ppv_d / P_stc_total;
Vdc24(dm) = Vdc_nom * (1 - k_vdc_pu * Ppu_dc(dm));
Vdc24 = min(max(Vdc24, 480), 520);
```

```
Duty24(dm) = 1 - Vpv_dm ./ Vdc24(dm);

Duty24 = min(max(Duty24, 0), 0.95);

Vpv24(dm) = Vpv_dm;

Ipv24(dm) = Ipv_d;

Ppv24(dm) = Ppv_d;

% Rendement DC->AC

Pgrid24 = zeros(n,1);

Pgrid24(dm) = Ppv_d .* eta_boost .* eta_inverter;

% ===== 5) PF & Q FUTURS =====

PF24 = ones(n,1);

PF24(dm) = 1 - pf_slope * max(Ppu_dc(dm) - pf_knee, 0);

PF24 = min(max(PF24, PF_min_full), 1.00);

Qgrid24 = zeros(n,1);

nz = dm & (PF24 > 0);

Qgrid24(nz) = Pgrid24(nz) .* sqrt( max(1./PF24(nz).^2 - 1, 0) );

% ===== 6) Tension réseau FUTURE (utilise VLL_nom issu de la simu) =====

Sbase = P_stc_total;

Ppu_ac = Pgrid24 / Sbase;

Qpu_ac = Qgrid24 / Sbase;

Vpu = 1 - (Rpu_line .* Ppu_ac + Xpu_line .* Qpu_ac);

Vpu = min(max(Vpu, 0.90), 1.03);

VLL24 = VLL_nom .* Vpu; % même niveau que la simu à P≈0
```

```
Vph24 = VLL24 ./ sqrt(3);

V1 = Vph24; V2 = Vph24; V3 = Vph24;

% Courants prévus

S_app = sqrt(Pgrid24.^2 + Qgrid24.^2);

Iline = zeros(n,1);

okI = (VLL24 > 0) & (PF24 > 0);

Iline(okI) = S_app(okI) ./ (sqrt(3).*VLL24(okI));

I1 = Iline; I2 = Iline; I3 = Iline;

% ===== 7) Fréquence FUTURE (droop autour de f_ref) =====

f24 = f_nom - Kf_pu * Ppu_ac;

f24 = min(max(f24, f_ref-0.3), f_ref+0.3);

% ===== 8) Re-échantillonnage 24 h sur le même pas que la simu =====

interval_24 = interval; % même pas que ton RUN (en s)

t0_24 = t24(1); % première heure de prévision

t_end_24 = t0_24 + hours(24); % 24 h plus tard

% Grille temporelle fine pour la prévision (0–24 h, pas = interval)

t24_grid = (t0_24 : seconds(interval_24) : t_end_24)';

% Helper pour interpoler sur la nouvelle grille

to_s = @(tt) posixtime(tt);

t_src = to_s(t24);

t_grid = to_s(t24_grid);

interpcol = @(x) interp1(t_src, x(:), t_grid, 'linear', 'extrap');
```

```
% Interpolation de toutes les grandeurs 24 h
POA24g = interpcol(POA24);
tamb24g = interpcol(tamb24);
Tcell24g = interpcol(Tcell24);
Vpv24g = interpcol(Vpv24);
Ipv24g = interpcol(Ipv24);
Ppv24g = interpcol(Ppv24);
Vdc24g = interpcol(Vdc24);
Duty24g = interpcol(Duty24);
f24g = interpcol(f24);
PF24g = interpcol(PF24);
Pgrid24g = interpcol(Pgrid24);
V1g = interpcol(V1);
V2g = interpcol(V2);
V3g = interpcol(V3);
I1g = interpcol(I1);
I2g = interpcol(I2);
I3g = interpcol(I3);
% Nouvelles colonnes Date/Heure cohérentes avec t24_grid
dt_local = datetime(t24_grid,'TimeZone',tz);
Date24 = dt_local; Date24.TimeZone = ''; Date24.Format = 'yyyy-MM-dd';
Heure24 = timeofday(dt_local); Heure24.Format = 'hh:mm:ss';
```

```
% ===== 9) Construction du tableau 24 h avec le pas "interval" =====
T24_full = table( ...
Date24, Heure24, ...
round(POA24g(:),2), round(tamb24g(:),2), round(Tcell24g(:),2), ...
round(Vpv24g(:),3), round(Ipv24g(:),3), round(Ppv24g(:),2), ...
round(Vdc24g(:),3), round(Duty24g(:),3), ...
round(f24g(:),3), round(PF24g(:),3), round(Pgrid24g(:),2), ...
round(V1g(:),3), round(V2g(:),3), round(V3g(:),3), ...
round(I1g(:),3), round(I2g(:),3), round(I3g(:),3), ...
'VariableNames', {'Date','Heure','Irradiance_POA','T_amb','T_cell', ...
'Vpv','Ipv','Ppv','Vboost','Duty_cycle','F_reseau', ...
'FP','Pgrid','V1','V2','V3','I1','I2','I3'});
T24_aligned = local_align_to_schema(T24_full, T.Properties.VariableNames, 0);
writetable(T24_aligned, excel_name, 'Sheet','Log', ...
'WriteMode','append', 'AutoFitWidth',false);
disp('Prévision 24 h ajoutée (calée sur les valeurs réseau de la simulation).');
catch ME
warning('Echec de la prevision 24 h : %s', getReport(ME,'basic','hyperlinks','off'));
end
%% ================== FONCTIONS LOCALES ==================
t_run_end = tnow + seconds(simulation_duree);
function [ghi_now, ghi_series] = live_ghi_openmeteo(lat, lon, tz)
```

```
tz_enc = local_urlencode(tz);
url = sprintf(['https://api.open-meteo.com/v1/forecast?', ...
'latitude=%.5f&longitude=%.5f&hourly=shortwave_radiation&timezone=%s'], ...
lat, lon, tz_enc);
opts = weboptions('Timeout', 20);
payload = webread(url, opts);
t_iso = string(payload.hourly.time);
ghi = double(payload.hourly.shortwave_radiation); % W/m²
t_dt = datetime(t_iso, 'InputFormat','yyyy-MM-dd"T"HH:mm', 'TimeZone', tz);
tn = datetime('now','TimeZone',tz);
ghi_now = interp1(posixtime(t_dt), ghi, posixtime(tn), 'linear', 'extrap');
ghi_now = max(0, ghi_now);
ghi_series = struct('time',t_dt,'ghi',ghi);
end
function [t24, ghi24, tamb24] = openmeteo_ghi_temp_24h(lat, lon, tz, t_start)
tz_enc = local_urlencode(tz);
url = sprintf(['https://api.open-meteo.com/v1/forecast?', ...
'latitude=%.5f&longitude=%.5f&hourly=shortwave_radiation,temperature_2m&time-
zone=%s'], ...
lat, lon, tz_enc);
opts = weboptions('Timeout',20);
p = webread(url, opts);
```

```
t_all = datetime(string(p.hourly.time),'InputFormat','yyyy-MM-dd"T"HH:mm','Time-
Zone',tz);
ghi_all = double(p.hourly.shortwave_radiation);
tmp_all = double(p.hourly.temperature_2m);
if nargin < 4 || isempty(t_start), t_start = datetime('now','TimeZone',tz); end
if isempty(t_start.TimeZone), t_start.TimeZone = tz; end
t0 = dateshift(t_start, 'start', 'hour') + hours(1);
mask = (t_all >= t0) & (t_all < t0 + hours(24));
if any(mask)
t24 = t_all(mask); ghi24 = ghi_all(mask); tamb24 = tmp_all(mask);
else
[~, i0] = min(abs(t_all - t0)); i1 = min(i0 + 23, numel(t_all));
t24 = t_all(i0:i1); ghi24 = ghi_all(i0:i1); tamb24 = tmp_all(i0:i1);
end
keep = (t24 > t_start);
t24 = t24(keep); ghi24 = ghi24(keep); tamb24 = tamb24(keep);
end
function [theta_z_deg, az_deg] = solar_zenith_az(t, lat, lon)
tUTC = datetime(t,'TimeZone','UTC');
n = day(tUTC,'dayofyear');
frac_day = (hour(tUTC)*3600 + minute(tUTC)*60 + second(tUTC)) / 86400;
gamma = 2*pi*(n - 1 + frac_day)/365;
```

```
decl = (0.006918 - 0.399912*cos(gamma) + 0.070257*sin(gamma) ...
- 0.006758*cos(2*gamma) + 0.000907*sin(2*gamma) ...
- 0.002697*cos(3*gamma) + 0.00148*sin(3*gamma));
eqt = 229.18*(0.000075 + 0.001868*cos(gamma) - 0.032077*sin(gamma) ...
- 0.014615*cos(2*gamma) - 0.040849*sin(2*gamma));
offset_hours = hours(tzoffset(t));
LSTM = 15 * offset_hours;
TC = eqt + 4*(lon - LSTM);
LST = hour(t) + minute(t)/60 + second(t)/3600 + TC/60;
HRA = deg2rad(15*(LST - 12));
phi = deg2rad(lat);
cos_zen = sin(phi).*sin(decl) + cos(phi).*cos(decl).*cos(HRA);
cos_zen = min(max(cos_zen, -1), 1);
theta_z_deg = real(acosd(cos_zen));
sin_az = -cos(decl).*sin(HRA)./sqrt(max(1 - cos_zen.^2, eps));
cos_az = (sin(decl) - sin(phi).*cos_zen) ./ (cos(phi).*sqrt(max(1 - cos_zen.^2, eps)) +
eps);
az = atan2d(sin_az, cos_az); az(az < 0) = az(az < 0) + 360;
az_deg = az;
end
function theta_i_deg = incidence_angle_deg(tilt_deg, az_panel_deg, theta_z_deg,
az_sun_deg)
```

```
beta = deg2rad(tilt_deg); theta_z = deg2rad(theta_z_deg);
azp = deg2rad(az_panel_deg); azs = deg2rad(az_sun_deg);
cos_ti = cos(theta_z).*cos(beta) + sin(theta_z).*sin(beta).*cos(azs - azp);
cos_ti = max(cos_ti, 0);
theta_i_deg = real(acosd(cos_ti));
end
function I0 = extraterrestrial_irradiance_Wpm2(t, lat, lon)
[theta_z_deg, ~] = solar_zenith_az(t, lat, lon);
Gsc = 1367; n = day(datetime(t,'TimeZone','UTC'),'dayofyear');
E0 = 1 + 0.033*cosd(360*n/365);
I0b = Gsc * E0;
I0 = I0b .* max(cosd(theta_z_deg),0);
end
function [Df, DHI] = erbs_diffuse_fraction_and_DHI(Kt, GHI)
Df = zeros(size(Kt));
i1 = Kt <= 0.22;
i2 = Kt > 0.22 & Kt <= 0.80;
i3 = Kt > 0.80;
Df(i1) = 1 - 0.09.*Kt(i1);
Df(i2) = 0.9511 - 0.1604.*Kt(i2) + 4.388.*Kt(i2).^2 - 16.638.*Kt(i2).^3 +
12.336.*Kt(i2).^4;
Df(i3) = 0.165;
```

```
Df = min(max(Df, 0), 1);

DHI = Df .* GHI;

end

function S = get_ts_first(simOut, candidates, interval)

S = struct('Time',[],'Data',[]);

for i=1:numel(candidates)

S = get_ts(simOut, candidates{i}, interval);

if ~isempty(S.Time)

fprintf('signal "%s" trouve\n', candidates{i});

return

end

end

fprintf('Aucun trouve parmi: %s\n', strjoin(candidates,', '));

end

function S = get_ts(simOut, name, interval)

S = struct('Time',[],'Data',[]);

try, names = simOut.who; catch, names = {}; end

if any(strcmp(names,name))

X = simOut.get(name);

[S.Time,S.Data] = coerce_ts(X, interval);

if ~isempty(S.Time), return; end

end
```

```
try
el = simOut.logsout.getElement(name);
S.Time = el.Values.Time(:);
S.Data = ensure_cols(el.Values.Data);
return
catch, end
try
el = simOut.yout.getElement(name);
S.Time = el.Values.Time(:);
S.Data = ensure_cols(el.Values.Data);
return
catch, end
try
X = evalin('base', name);
[S.Time,S.Data] = coerce_ts(X, interval);
if ~isempty(S.Time), return; end
catch, end
end
function [t,d] = coerce_ts(X, interval)
t = []; d = [];
if isa(X,'timeseries')
t = X.Time(:); d = ensure_cols(X.Data);
```

```
elseif isstruct(X) && isfield(X,'Time') && isfield(X,'Data')
t = X.Time(:); d = ensure_cols(X.Data);
elseif isnumeric(X)
d = ensure_cols(X);
t = (0:size(d,1)-1)' * interval;
end
end
function y = interp_safe(t, x, te)
te = te(:);
if isempty(t) || isempty(x), y = nan(numel(te), max(1, size(x,2))); return, end
t = t(:); if isvector(x), x = x(:); end
n = min(numel(t), size(x,1)); t = t(1:n); x = x(1:n,:);
good = ~(isnan(t) | any(isnan(x),2)); t = t(good); x = x(good,:);
if isempty(t), y = nan(numel(te), size(x,2)); return, end
[t, ia] = unique(t,'stable'); x = x(ia,:);
if numel(t)==1, y = repmat(x(1,:), numel(te), 1); return, end
y = interp1(t, x, te, 'previous', 'extrap');
end
function X = ensure_cols(X); if isvector(X), X = X(:); end, end
function S = ensure_freq_hz(S)
if isempty(S.Time) || isempty(S.Data), return; end
v = S.Data(:); v = v(isfinite(v)); if isempty(v), return; end
```

```
if median(abs(v)) > 500, S.Data = S.Data / (2*pi); end
end
function s = local_urlencode(str)
s = char(str); s = strrep(s, ' ', '%20'); s = strrep(s, '/', '%2F');
end
%% ====================== Excel Logger (5 lignes) — VERSION ROBUSTE
======================
function excel_logger_init(excel_name, T_schema)
% INIT EN MODE "APPEND-ONLY" (ne supprime jamais l'existant)
S.file = excel_name;
S.sheet = 'Log';
S.buf = table();
S.hasSchema = false;
S.varNames = {};
% 1) Essayer de récupérer le schéma depuis le fichier existant (si présent)
if isfile(S.file)
try
T_exist = readtable(S.file, 'Sheet', S.sheet);
if istable(T_exist) && ~isempty(T_exist.Properties.VariableNames)
S.varNames = T_exist.Properties.VariableNames;
S.hasSchema = true;
end
```

```
catch
% Pas de feuille "Log" ou fichier verrouillé -> on ignore, on tombera sur le schéma
passé
end
end
% 2) Sinon, prendre le schéma passé par l'appelant (T_schema)
if ~S.hasSchema && nargin >= 2 && istable(T_schema) ...
&& ~isempty(T_schema.Properties.VariableNames)
S.varNames = T_schema.Properties.VariableNames;
S.hasSchema = true;
end
% 3) Si toujours pas de schéma, on l'apprendra à la 1ère push
assignin('base','excel_logger_state', S);
end
function excel_logger_push(Trows)
if evalin('base','exist("excel_logger_state","var")')
S = evalin('base','excel_logger_state');
else
S.file = fullfile(getenv('USERPROFILE'),'Desktop','Rapport_de_essai.xlsx');
S.sheet = 'Log'; S.buf = table(); S.hasSchema = false; S.varNames = {};
end
if ~isfield(S,'varNames'), S.varNames = {}; end
```

```
if ~isfield(S,'hasSchema'), S.hasSchema = false; end
if ~isfield(S,'buf'), S.buf = table(); end
if ~isfield(S,'file'), error('excel_logger_state.file manquant'); end
if ~isfield(S,'sheet'), S.sheet = 'Log'; end
if ~S.hasSchema || isempty(S.varNames)
S.varNames = Trows.Properties.VariableNames; S.hasSchema = true;
end
Trows = local_align_to_schema(Trows, S.varNames);
S.buf = [S.buf; Trows]; %#ok<AGROW>
while height(S.buf) >= 5
T5 = S.buf(1:5,:); S = local_excel_write_5(S, T5); S.buf(1:5,:) = [];
end
assignin('base','excel_logger_state', S);
end
function excel_logger_close()
if ~evalin('base','exist("excel_logger_state","var")'), return; end
S = evalin('base','excel_logger_state');
if ~isfield(S,'buf'), S.buf = table(); end
if ~isempty(S.buf), S = local_excel_write_varsize(S, S.buf); S.buf = table(); end
assignin('base','excel_logger_state', S);
end
function S = local_excel_write_5(S, T5)
```

```
file=S.file; sheetName=sanitize_sheet(S.sheet);
try, ex=actxGetRunningServer('Excel.Application'); ex.DisplayAlerts=false; ex.Quit; de-
lete(ex); catch, end
folder=fileparts(file); if ~exist(folder,'dir'), mkdir(folder); end
if isfile(file), try, fileattrib(file,'+w'); catch, end, end
for k=1:6
try
if isfile(file)
writetable(T5, file, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','append', 'AutoFitWidth',false);
else
writetable(T5, file, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','replacefile', 'AutoFitWidth',false);
end
return
catch ME
if contains(ME.message,'another application') || contains(ME.message,'permissions'),
pause(1); else, rethrow(ME);
end
end
end
[p,n,e]=fileparts(file); file2=fullfile(p,
sprintf('%s_%s%s',n,datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS'),e));
writetable(T5, file2, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','replacefile', 'AutoFitWidth',false);
```

```
S.file=file2; warning('Fichier verrouille. Ecrit dans %s.', file2);
end
function S = local_excel_write_varsize(S, Tn)
file=S.file; sheetName=sanitize_sheet(S.sheet);
try, ex=actxGetRunningServer('Excel.Application'); ex.DisplayAlerts=false; ex.Quit; de-
lete(ex); catch, end
folder=fileparts(file); if ~exist(folder,'dir'), mkdir(folder); end
if isfile(file), try, fileattrib(file,'+w'); catch, end, end
for k=1:6
try
if isfile(file)
writetable(Tn, file, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','append', 'AutoFitWidth',false);
else
writetable(Tn, file, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','replacefile', 'AutoFitWidth',false);
end
return
catch ME
if contains(ME.message,'another application') || contains(ME.message,'permissions'),
pause(1); else, rethrow(ME);
end
end
end
```

```
[p,n,e]=fileparts(file); file2=fullfile(p,
sprintf('%s_%s%s',n,datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS'),e));
writetable(Tn, file2, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode','replacefile',false);
S.file=file2; warning('Fichier verrouille. Ecrit dans %s.', file2);
end
function sheetName = sanitize_sheet(x)
if isnumeric(x) && isscalar(x), sheetName = x; return, end
sheetName = char(string(x)); if numel(sheetName) > 31, sheetName = sheetName(1:31);
end
sheetName = regexprep(sheetName, '[:\\/\?\*\[\]]', '_');
end
function T = local_align_to_schema(T, varNames, defaultVal)
if nargin < 3, defaultVal = NaN; end
T.Properties.VariableNames = matlab.lang.makeValidName(T.Properties.Variable-
Names,'ReplacementStyle','delete');
varNames = string(varNames); have = string(T.Properties.VariableNames);
miss = setdiff(varNames, have, 'stable');
for vn = miss, T.(vn) = repmat(defaultVal, height(T), 1); end
T = T(:, cellstr(varNames));
End
```

Annexe C Rapport du logiciel anti-plagiat Grammarly

