

**Master Recherche**  
**Automatique, Robotique et Traitement de l'Information**  
**ARTI**

**Proposition de sujet**

**Année Universitaire : 2024/2025**

**Intitulé du sujet de Mastère**

Conception et implémentation d'un jumeau numérique pour l'optimisation énergétique en temps réel d'un atelier de production industriel 4.0.

**Etudiante :** [NERMINE MRABET](#)

**Durée de stage :** 3 mois

**Entreprise d'accueil :** INNOVA POWER CONCEPT

**Encadrant Professionnel :** Abderraouf BOUYAHI

**Encadrant académique de l'ENICarthage:** Lotfi BOUSLIMI

**Structure de Recherche et Établissement :** Laboratoire de Recherche Électricité Intelligente & TIC, EI&TIC Lab, ENICarthage.

**Sujet de Master :**

**I- Description du sujet et cahier des charges détaillé**

**1- Description du sujet :**

Ce travail de recherche explore la conception d'un jumeau numérique dédié à la gestion de l'énergie électrique. L'objectif est de créer une réplique virtuelle et dynamique d'un système de production (ou d'un atelier pilote) qui intègre les flux de données énergétiques en temps réel via l'IoT, et qui utilise des algorithmes d'IA pour simuler, prédire et optimiser la consommation. Le jumeau numérique servira de laboratoire virtuel pour tester des scénarios d'optimisation (planification de production, arrêts machines, tarifs variables) sans perturber l'opération réelle, visant ainsi une réduction significative de la facture énergétique et de l'empreinte carbone CO<sub>2</sub>.

**2-Problématique :**

Comment la modélisation et l'implémentation d'un jumeau numérique, alimenté par des capteurs IoT et des algorithmes d'IA, peuvent-elles permettre une optimisation dynamique et prédictive de la consommation d'énergie électrique dans un environnement manufacturier, tout en garantissant la continuité et l'efficacité de la production ?

**3. Objectifs de la recherche :**

- ★ Objectif Principal : Développer une preuve de concept (PoC) d'un jumeau numérique pour la modélisation et l'optimisation énergétique.
- ★ Objectifs Secondaires :
  - Identifier et modéliser les principaux équipements consommateurs d'énergie d'un atelier (machines CNC, robots, systèmes de climatisation, éclairage...).
  - Concevoir une architecture IoT pour la collecte et la remontée en temps réel des données énergétiques (puissance, courant, état ON/OFF).

- Développer le modèle numérique (géométrique, physique, comportemental) de l'atelier et de ses flux énergétiques.
- Intégrer des algorithmes d'IA (régression, réseaux de neurones) pour la prédiction de la consommation en fonction du planning de production.
- Implémenter un module d'optimisation (par exemple, par algorithme génétique ou renforcement Learning) pour suggérer des plannings de production à moindre coût énergétique.
- Évaluer les gains énergétiques potentiels grâce à des simulations sur le jumeau numérique.

#### 4. Méthodologie :

- Revue de Littérature : État de l'art sur les jumeaux numériques, l'IoT industriel (Protocoles : MQTT, OPC UA), et les techniques d'optimisation énergétique par l'IA.
- Modélisation :
  - Utilisation d'un logiciel de modélisation 3D (ex: Unity, Siemens NX) ou d'une plateforme dédiée (ex: Azure Digital Twins, AWS IoT TwinMaker) pour créer le jumeau.
  - Définition des métriques et des KPI énergétiques (kWh/produit, efficacité énergétique globale).
- Acquisition des Données :
  - Simulation des données de capteurs (pour la PoC: Proof Of Concept) à partir d'un modèle mathématique ou utilisation d'un jeu de données public.
  - (Si accès à un labo) Installation de capteurs de puissance (ex: SCT-013) connectés à un microcontrôleur (Arduino/ESP32) transmettant les données à une plateforme cloud (Node-RED, AWS IoT Core).
- Développement IA :
  - Entraînement d'un modèle de prédiction de charge avec des bibliothèques comme TensorFlow ou PyTorch.
  - Développement de l'algorithme d'optimisation.
- Intégration et Validation : Connexion du jumeau au flux de données, exécution de scénarios de test et analyse des résultats.

## II- Résultats attendus

### 1. Résultats scientifiques et techniques :

- ★ Une Architecture de Référence : Une proposition d'architecture technique détaillée (couches IoT, cloud, jumeau numérique, interface utilisateur) pour un système d'optimisation énergétique basé sur le jumeau numérique, utilisable comme modèle pour d'autres projets.
- ★ Un Modèle de Jumeau Numérique Fonctionnel : Une preuve de concept (PoC) logicielle qui est la réplique virtuelle d'un atelier ou d'une ligne de production. Ce modèle intégrera :
  - La géométrie des équipements (simplifiée).
  - La physique et les règles comportementales (ex: consommation à l'arrêt, en marche, en phase de production).
  - La connexion aux Données en temps réel (simulées ou réelles).

- ★ Un Modèle Prédictif d'IA : Un algorithme d'apprentissage machine (par exemple, un réseau de neurones LSTM ou un modèle de régression avancé) capable de prédire la consommation énergétique totale de l'atelier en fonction :
  - Du planning de production prévu.
  - Des paramètres environnementaux (ex: température ambiante).
  - De l'état des machines.
- ★ Un Module d'Optimisation : Un algorithme (ex: algorithme génétique, optimisation par essais particuliers) qui, en s'appuyant sur le modèle prédictif, propose des scénarios de production alternatifs pour minimiser la consommation ou le coût énergétique (en intégrant possiblement les tarifs variables de l'électricité).

## 2. Résultats opérationnels et mesurables :

- ★ Une Plateforme de Visualisation (Dashboard) : Une interface utilisateur (application web personnalisée "MOMES") qui visualise en temps réel :
  - L'état du système physique et de son jumeau.
  - La consommation énergétique actuelle est prédite.
  - Les KPI clés (efficacité énergétique, coût/heure, émissions CO<sub>2</sub> évitées).
  - Les alertes et les recommandations d'optimisation.
- ★ Une Quantification des Gains Potentiels : Le mémoire devra fournir une estimation chiffrée des économies d'énergie potentielles réalisables grâce à l'utilisation du jumeau numérique sur le cas d'étude choisi (ex: "réduction de 5 à 15% de la consommation lors des changements de poste" ou "optimisation de 10% du coût énergétique grâce au shifting vers les heures creuses").
- ★ Une Validation de la Démarche : Une démonstration de la capacité du jumeau à simuler différents scénarios (ex: que se passe-t-il si je démarre cette machine 2 heures plus tard ?) et à comparer leurs impacts énergétiques respectifs.

## 3. Livrables Concrets :

- Le code source complet de la plateforme.
- Le modèle de données et le jeu de données utilisé/ généré.
- Un rapport de validation des modèles d'IA (précision des prédictions, performance des algorithmes)

### 3- Principales références (voir tous les articles sur le Drive Partagé :

[https://drive.google.com/drive/folders/1Xczy3hVvD-HBscRxT-e8eWBJ2J31tLJF?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1Xczy3hVvD-HBscRxT-e8eWBJ2J31tLJF?usp=drive_link))

[1]	Digital Twins for IoT-Driven Energy Systems:A Survey <a href="https://drive.google.com/file/d/17_dDCE4zRThHXxZ4_Uzd5uTDwRQ0oCxu/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/17_dDCE4zRThHXxZ4_Uzd5uTDwRQ0oCxu/view?usp=sharing</a>
[2]	Haidar Hosamo Hosamo, Henrik Kofoed Nielsen, Dimitrios Kraniotis, Paul Ragnar Svennevig, Kjeld Svidt: Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings, Energy and Buildings, Volume 281, 2023, 112732, ISSN 0378-7788, <a href="https://drive.google.com/file/d/1lk4aUpnPOMVpqquNTFkYg9XdKXuhLGId/view?usp=drive_link">https://drive.google.com/file/d/1lk4aUpnPOMVpqquNTFkYg9XdKXuhLGId/view?usp=drive_link</a>
[3]	AI-powered deep learning for sustainable industry 4.0 and internet of things: Enhancing energy management in smart buildings. <a href="https://drive.google.com/file/d/1lkhImYJlhqzk8yJiFMIMlwvcJLM5VqJ7/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1lkhImYJlhqzk8yJiFMIMlwvcJLM5VqJ7/view?usp=sharing</a>
[4]	A Framework of Energy Consumption Modelling for Additive Manufacturing Using Internet of Things <a href="https://drive.google.com/file/d/18xId4mX1e8sXaj-1QnGQS0iaTzqmx7_e/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/18xId4mX1e8sXaj-1QnGQS0iaTzqmx7_e/view?usp=sharing</a>
[5]	Vance, D., Jin, M., Wenning, T., Nimbalkar, S., & Price, C. (2025). Next-Level Energy Management in Manufacturing: Facility-Level Energy Digital Twin Framework Based on Machine Learning and Automated Data Collection. Energies, 18(13), 3242.
[6]	Integrating artificial intelligence into energy management: A case study on energy consumption data analysis and forecasting in a German manufacturing company: <a href="https://drive.google.com/file/d/18w0FNvbl6LbGeyMZBGH9AHg_ZnV1EW83/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/18w0FNvbl6LbGeyMZBGH9AHg_ZnV1EW83/view?usp=sharing</a>
[7]	Alshathri, S., Hemdan, E. E. D., El-Shafai, W., & Sayed, A. (2023). Digital twin-based automated fault diagnosis in industrial IoT applications. Computers, Materials & Continua, 75(1), 183-196.