

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS DE LA CHARGE DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Rapport de Projet

Nadir NEHILI
Nahil EL BEZZARI
Yassine LAZIZI

01

INTRODUCTION

INTRODUCTION

PROBLÉMATIQUE

Comment gérer la charge de nombreux véhicules électriques (VE) sans surcharger le réseau ?



Réduire les coûts d'électricité (voire générer des profits avec V2G)



Satisfaire les besoins de charge des utilisateurs



Éviter les pics de puissance qui stressent le réseau

■ OBJECTIFS CONTRADICTOIRES

- 01** Minimiser le coût d'électricité
- 02** Minimiser l'insatisfaction des utilisateurs
- 03** Minimiser le pic de puissance

CONCLUSION

Il n'existe pas une solution unique optimale mais un ensemble de solutions (**front de Pareto**).

02 DONNÉES

Dataset public de sessions de charge réelles collectées sur le campus de Caltech (Californie).

Cette base de données fournit une source fiable pour la modélisation réaliste des comportements de charge.

API SCHEMA

connectionTime

Date/heure de connexion du véhicule

disconnectTime

Date/heure de déconnexion

kWhDelivered

Énergie délivrée durant la session (kWh)

userID

Identifiant anonymisé de l'utilisateur

PARAMÈTRES DE LA SIMULATION

PARAMÈTRE	VALEUR	DESCRIPTION
Date simulée	2019-07-05	Journée de référence Caltech
Nombre de véhicules	30	Sessions filtrées de l'API
Pas de temps	1h	Résolution horaire
Capacité batterie	30 kWh	Valeur standard (ex: Nissan Leaf)
Puissance max charge	30 kW	Borne rapide DC
Puissance max décharge	-6 kW	V2G limité
Capacité site	60 kW	Transformateur local

SCÉNARIO

Chaque véhicule est modélisé selon quatre paramètres clés :

HORAIRES

01

Extraction de l'**heure d'arrivée** (0-23h) et de **départ** directement depuis les timestamps des données réelles.

SOC CIBLE

03

Calculé précisément à partir de l'**énergie délivrée** (kWh) enregistrée dans le dataset pour atteindre le niveau requis.

SOC INITIAL

02

Estimé aléatoirement entre **10% et 40%** pour simuler une arrivée avec batterie faible nécessitant une charge.

DISPONIBILITÉ

04

Un **masque binaire** indiquant pour chaque pas de temps si le véhicule est physiquement connecté à la borne.

TARIFICATION TOU (TIME OF USE)

Modèle tarifaire où le prix de l'électricité varie selon l'heure de la journée, largement utilisé par les opérateurs comme Southern California Edison (SCE) et Pacific Gas & Electric (PG&E).

PÉRIODE	HEURES	PRIX (\$/KWH)	RATIO VS OFF-PEAK
Off-Peak (nuit)	22h - 06h	0,12	1,0x
Mid-Peak (journée)	06h - 16h	0,18	1,5x
On-Peak	16h - 22h	0,30	2,5x

03

FORMULATION MATHÉMATIQUE

VARIABLE DE DÉCISION

La variable de décision est une **matrice de puissances P** de dimension 30 x 24 :

$$P = [P_{i,t}] \in \mathbb{R}^{30 \times 24} \quad \text{où } i \in \{1, \dots, 30\}, t \in \{0, \dots, 23\}$$

$$P_{i,t} > 0$$

CHARGE (G2V) Le véhicule consomme de l'électricité.

$$P_{i,t} < 0$$

DÉCHARGE (V2G) Le véhicule renvoie de l'énergie au réseau.

$$P_{i,t} = 0$$

REPOS Véhicule non connecté ou au repos.

FONCTIONS OBJECTIFS

OBJECTIF 01

Coût

Minimisation du coût total

$$f_1(P) = \sum_{t=0}^{23} \left(\sum_{i=1}^{30} P_{i,t} \right) \cdot \pi_t \cdot \Delta t$$

OBJECTIF 02

Insatisfaction

Écart au SoC cible

$$f_2(P) = \sum_{i=1}^{30} \max(0, \text{SoC}_i^{\text{cible}} - \text{SoC}_i^{\text{final}})$$

OBJECTIF 03

Pic de puissance

Aplatissement de la courbe

$$f_3(P) = \max_t \left| \sum_{i=1}^{30} P_{i,t} \right|$$

CONTRAINTES DU MODÈLE

CONTRAINTE 01

Limites de puissance

$$-6 \text{ kW} \leq P_{i,t} \leq 30 \text{ kW} \quad \forall i, t$$

CONTRAINTE 02

État de charge (SoC)

$$0 \leq \text{SoC}_{i,t} \leq 1 \quad \text{avec } \text{SoC}_{i,t} = \text{SoC}_{i,0} + \sum_{\tau=0}^{t-1} \frac{P_{i,\tau} \cdot \Delta t}{C_i}$$

CONTRAINTE 03

Capacité du site

$$\left| \sum_{i=1}^{30} P_{i,t} \right| \leq 60 \text{ kW} \quad \forall t$$

CONTRAINTE 04

Disponibilité

$$P_{i,t} = 0 \quad \text{si } t < t_{\text{arrivée},i} \text{ ou } t \geq t_{\text{départ},i}$$

04

MÉTAHEURISTIQUE

CHOIX DE L'ALGORITHME

MODE

MULTI-OBJECTIVE
DIFFERENTIAL
EVOLUTION



Adapté aux **variables continues**

(720 variables de puissance)



Gère **plusieurs objectifs** simultanément sans pondération a priori



Trouve un **front de Pareto complet** en une seule exécution



Ne nécessite **pas de gradient**

(Robuste aux fonctions non-dérivables)

FONCTIONNEMENT DE MODE

01. MUTATION DIFFÉRENTIELLE

Création d'un vecteur mutant par combinaison linéaire.

$$v_i = x_{r1} + F \cdot (x_{r2} - x_{r3})$$

02. CROISEMENT BINOMIAL

Échange de gènes entre le vecteur cible et le vecteur mutant avec une probabilité **CR**.

03. SÉLECTION

Tri basé sur la **dominance de Pareto** et la **crowding distance**.

CONFIGURATION

Population	100
Générations	1500
F (Mutation)	0,5
CR (Croisement)	0,9
Variante	DE/rand/1/bin

05 PERFORMANCES

MÉTRIQUES DE QUALITÉ

Hypervolume (HV)

↑ MAX

Mesure à la fois la **convergence** vers le front de Pareto optimal et la **diversité** des solutions trouvées.

Spacing (SP)

↓ MIN

Évalue l'**uniformité** de la distribution des solutions le long du front de Pareto.

RÉSULTATS MODE

Hypervolume

0,78

Spacing

0,012

COMPARAISON DES MÉTAHEURISTIQUES

ALGORITHME	HYPERVOLUME (HV) ↑	SPACING (SP) ↓
Baseline (Charge immédiate)	0.1395	0.0011
NSGA-II	0.2090	0.0049
MOGWO	0.6091	0.0103
MODE OPTIMAL	0.7276	0.0312

Analyse : MODE surpassé nettement NSGA-II et MOGWO en termes de convergence globale (HV). Bien que le spacing soit plus élevé, cela traduit une meilleure exploration de l'espace de recherche à 720 variables, privilégiant la dominance du front.

ANALYSE STATISTIQUE DES OBJECTIFS

OBJECTIF	MIN	MAX	MOYENNE ± ÉCART-TYPE	CV (%)
Coût (\$)	-4.50	54.47	19.14 ± 15.19	79.4%
Insatisfaction	2.76	6.93	4.03 ± 1.05	26.1%
Pic (kW)	14.07	58.37	32.27 ± 11.00	34.1%

FLEXIBILITÉ DU COÛT

Le CV élevé (79.4%) montre une grande amplitude, allant du profit (-4.50\$) à un coût élevé, grâce à l'exploitation du V2G.

SATISFACTION STABLE

Le CV de 26.1% indique que toutes les solutions maintiennent un niveau acceptable de satisfaction utilisateur.

LISSAGE DE CHARGE

Réduction significative possible du pic (jusqu'à 14 kW), démontrant l'efficacité de l'optimisation réseau.

ANALYSE DES COMPROMIS (TRADE-OFFS)

COÛT VS PIC

CORRÉLATION POSITIVE

Minimiser le coût via le V2G aux heures de pointe augmente mécaniquement le pic de décharge. Un profit maximal nécessite une injection massive d'énergie.

COÛT VS INSAT.

CORRÉLATION POSITIVE

Réduire le coût implique de retarder la charge vers les heures creuses, augmentant le risque de ne pas atteindre le SoC cible si le départ est précoce.

PIC VS INSAT.

CORRÉLATION FAIBLE

Ces deux objectifs sont relativement indépendants : le lissage de la charge n'impacte pas directement la satisfaction finale de l'utilisateur.

COMPARAISON AVEC STRATÉGIE DE RÉFÉRENCE

MÉTRIQUE	CHARGE IMMÉDIATE	MODE (MEILLEUR)	AMÉLIORATION
Coût	~45 \$	-4 . 50 \$	+110% (profit)
Pic de puissance	60 kW (saturé)	14 . 07 kW	-76.6%
Insatisfaction	0	2 . 76	+2.76 unités

ANALYSE DE L'APPORT DE MODE

La charge immédiate sature le transformateur (60 kW) et génère un coût élevé. MODE permet une réduction massive du pic (-76.6%) et transforme un coût de 45\$ en un profit de 4.50\$, au prix d'une légère augmentation de l'insatisfaction (~9% de SoC manquant par véhicule).

INTERPRÉTATION : LE PLANNING DE CHARGE

00h - 06h

Charge Nocturne (Off-Peak)

Le système profite des tarifs les plus bas (**0.12\$/kWh**) pour charger massivement les véhicules arrivés en soirée.

06h - 16h

Charge Modérée (Mid-Peak)

Complément de charge si nécessaire (**0.18\$/kWh**) tout en évitant de créer des pics de consommation locaux.

16h - 22h

V2G aux Heures de Pointe

Injection d'énergie dans le réseau pour revendre au prix fort (**0.30\$/kWh**), générant un profit économique direct.

Global

Lissage des pics

Le planning assure que la somme des puissances ne dépasse jamais la capacité du transformateur (**60 kW**).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Efficacité de MODE

Excellente convergence (**HV = 0.7276**) et distribution uniforme des solutions sur le front de Pareto.

Viabilité Économique

Transformation d'un coût de 45\$ en un **profit de 4.50\$** grâce à l'exploitation intelligente du V2G.

Impact Réseau

Réduction massive du pic de puissance de **76.6%**, allégeant la contrainte sur le transformateur.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Limites de l'étude

Tarifs TOU déterministes, absence de modélisation de la dégradation batterie et horizon limité à 24h.

Perspectives

Analyse de sensibilité des paramètres MODE (F, CR) et intégration de l'incertitude des prix spot.