

Rétrofit automobile : Conversion optimisée pour une mobilité plus durable

Session 2025

« Transition, transformation, conversion »

Aya TAGHZOUTI

SCEI : 30676

Introduction

Objectif mondial pour 2050 : Remplacer la moitié du parc automobile international dans le cadre de la transition énergétique vers l'électrique.

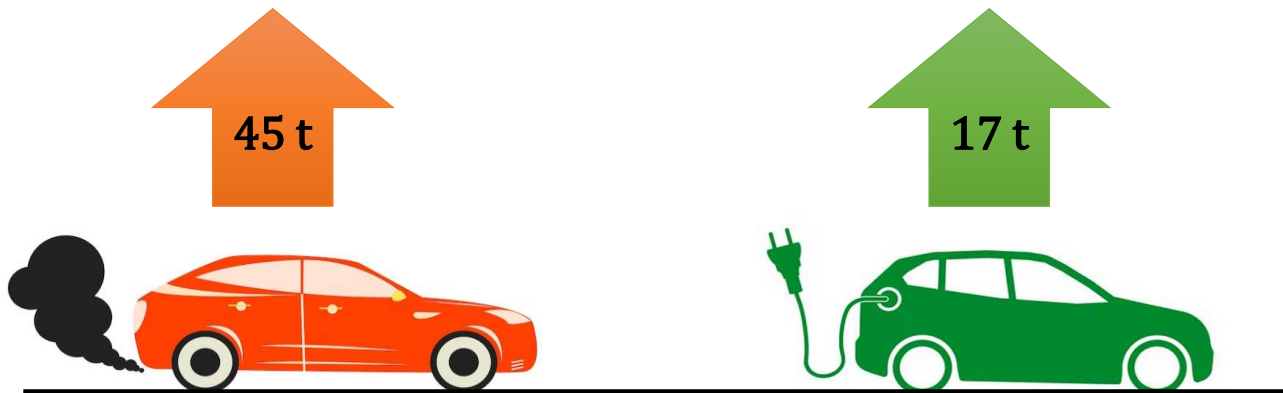


Figure-1 : Bilan carbone d'une voiture thermique vs électrique

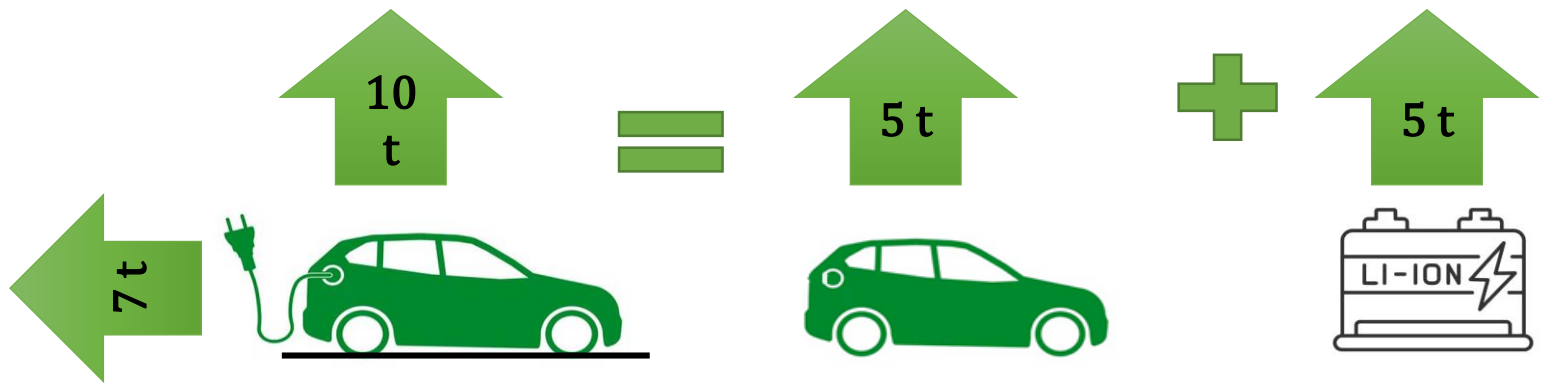


Figure-2 : Détail du bilan carbone d'un véhicule électrique

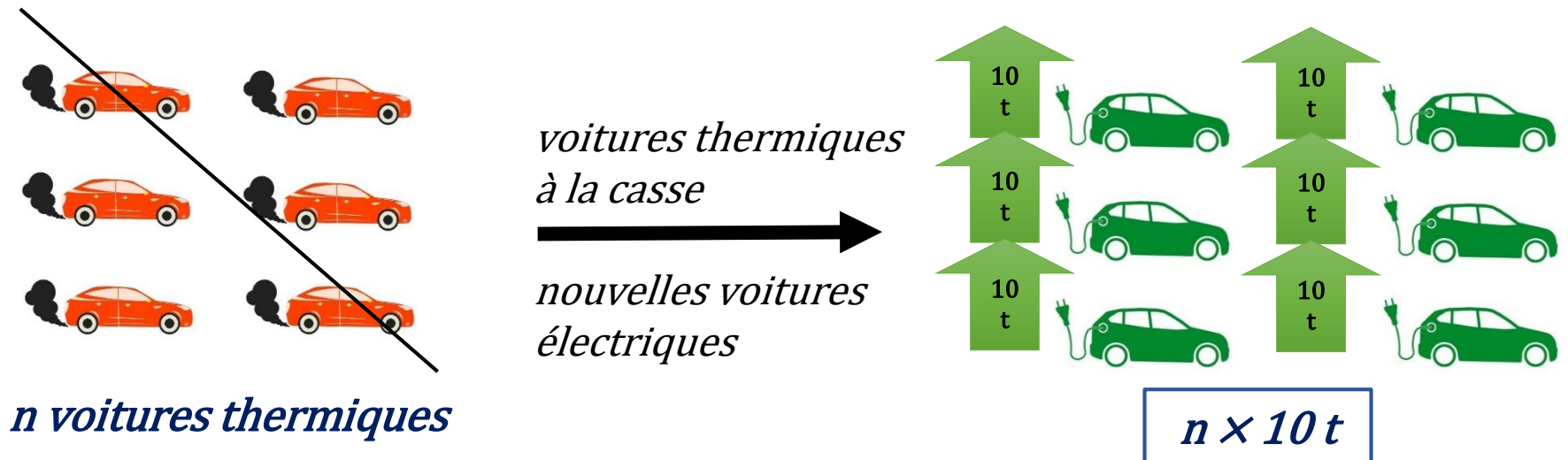


Figure-3 : Coût en carbone du remplacement radical du parc automobile

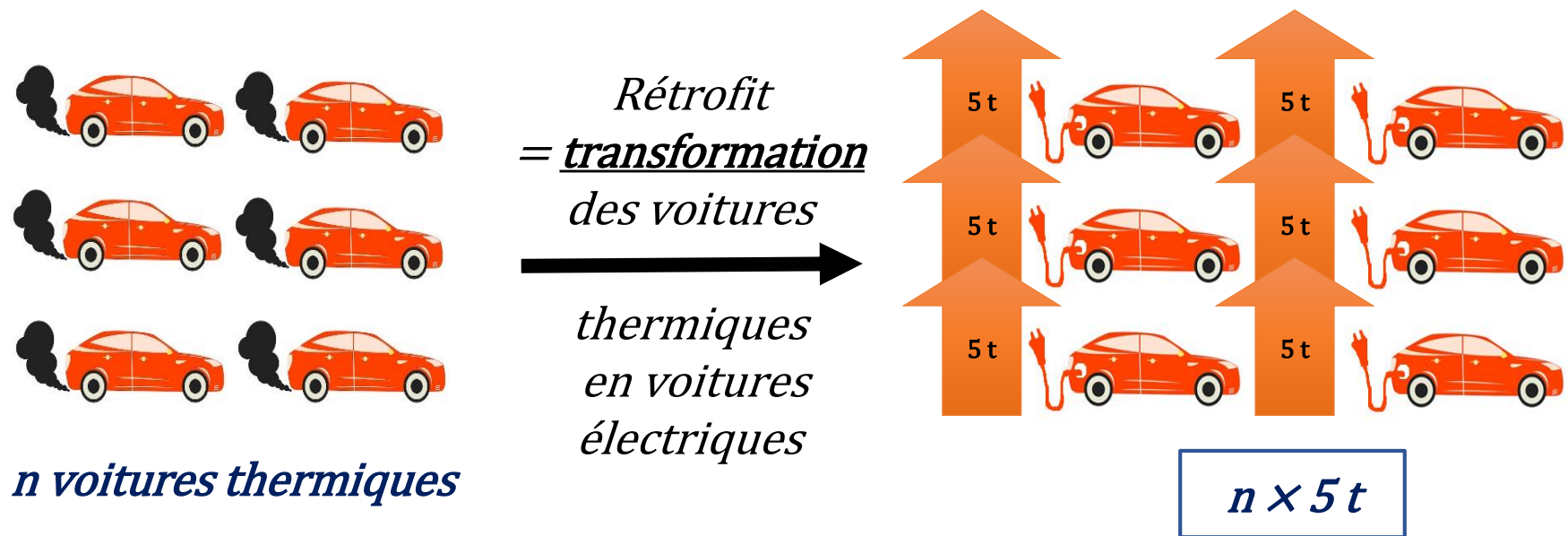


Figure-4 : Coût en carbone du remplacement partiel (retrofit) du parc automobile

Processus du retrofit électrique d'un véhicule thermique de type citadine

Élément	Poids retiré (kg)	Poids ajouté (kg)
Moteur thermique	107	—
Réservoir à carburant	5	—
Carburant (\approx plein)	20	—
Ligne d'échappement	8	—
Radiateurs	9	1
Démarrreur	6	—
Divers périphériques	—	30
Batterie de traction	—	100 à 600
Chargeur embarqué	—	13
Convertisseur DC/DC	—	2
Onduleur moteur	—	4
Total	~ 155 kg	~ 210 à 710 kg

Figure-5 : Éléments retirés/ajoutés à un véhicule de type citadine ~ 1100 kg dans le cadre du retrofit

Problématique

- ⚡ La batterie détermine l'autonomie mais aussi le poids ;
- ⚡ Loi internationale : +20% de masse maximale autorisée après le retrofit ;
- ⚡ Le moteur doit encore assurer des performances acceptables.

→ Jusqu'à quelle capacité de batterie un retrofit reste-t-il pertinent sans dépasser la masse autorisée ni dégrader les performances du véhicule ?

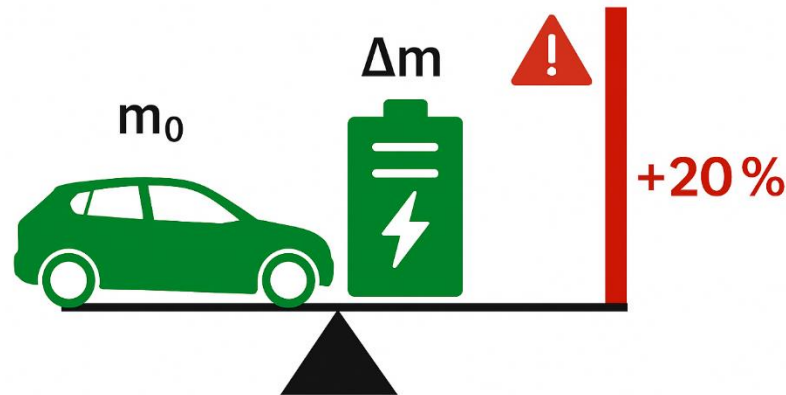
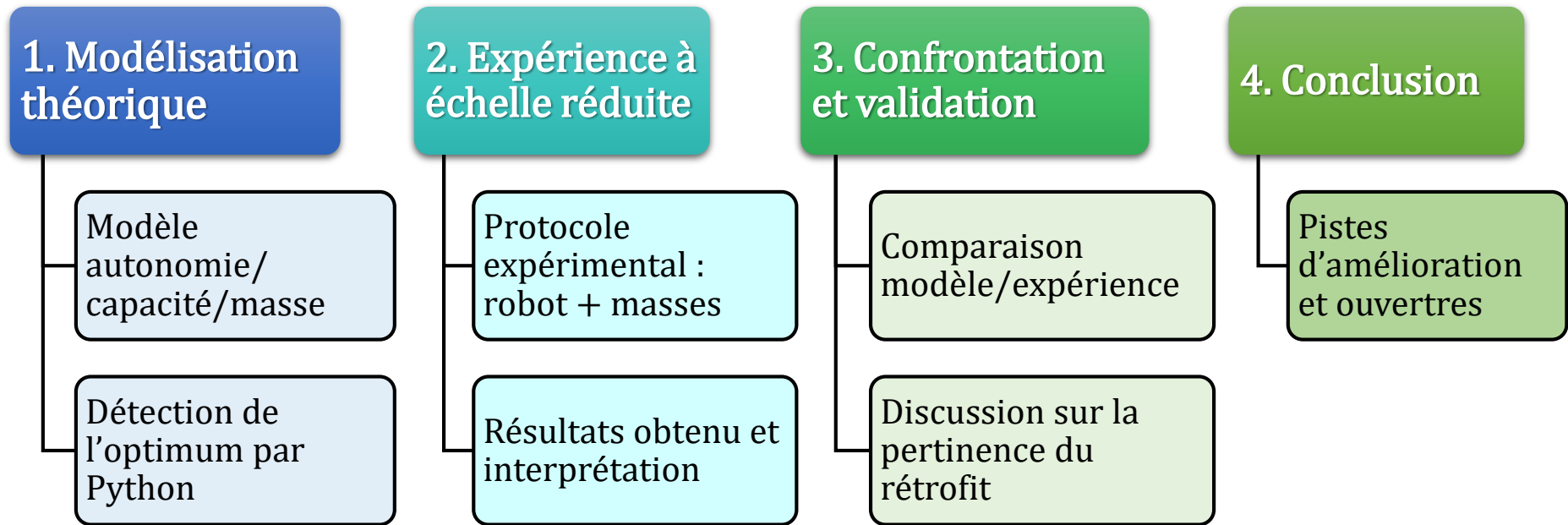


Figure-6 : Trouver le compromis masse/autonomie idéal sans enfreindre la loi

Sommaire



Modélisation mathématique

Objectif = Trouver **la capacité de batterie optimale**, afin de :

- ⚡ Maximiser l'autonomie,
- ⚡ Éviter une surconsommation due à la masse,
- ⚡ Respecter la **réglementation rétrofit**.

Hypothèses :

- ⚡ Vitesse constante, pas de récupération d'énergie.
- ⚡ Consommation du véhicule dépend de la masse de la batterie.

$$E(C) = E_0 + k \times \Delta m$$

consommation
d'énergie d'un
véhicule électrique
par kilomètre
(Wh/kg)

consommation
de base du
véhicule
(Wh/kg)

pénalisation par
kg de la masse
ajoutée
(Wh/kg²)

masse de la
batterie
(kg)

$$\Delta m = \frac{C}{r}$$

capacité de la batterie
(Wh)

densité énergétique
(Wh/kg)

Modèle de l'autonomie

$$A(C) = \frac{C \times \eta}{E_0 + \frac{k \times C}{r}}$$

rendement du moteur $\approx 0,9$ (kg)

autonomie de la batterie (km)

- ⚡ Autonomie **croît** avec capacité, mais **non linéairement** ;
- ⚡ À cause du poids, l'autonomie atteint un **maximum** ;
- ⚡ **Objectif** : trouver ce compromis optimal dans la zone légale (+20%) = maximum de la fonction rationnelle A.

Intégration de la contrainte légale

La loi impose :

$$m_{total} \leq m_0 + 0,2 \times m_0$$

Donc :

$$\Delta m \leq 0,2 \times m_0 \rightarrow \frac{C}{r} \leq 0,2 \times m_0$$

$$\rightarrow C \leq 0,2 \times r \times m_0$$

Limite sur C pour une voiture de type citadine (1100kg) :

$$C_{max} = 33 \text{ kW}$$

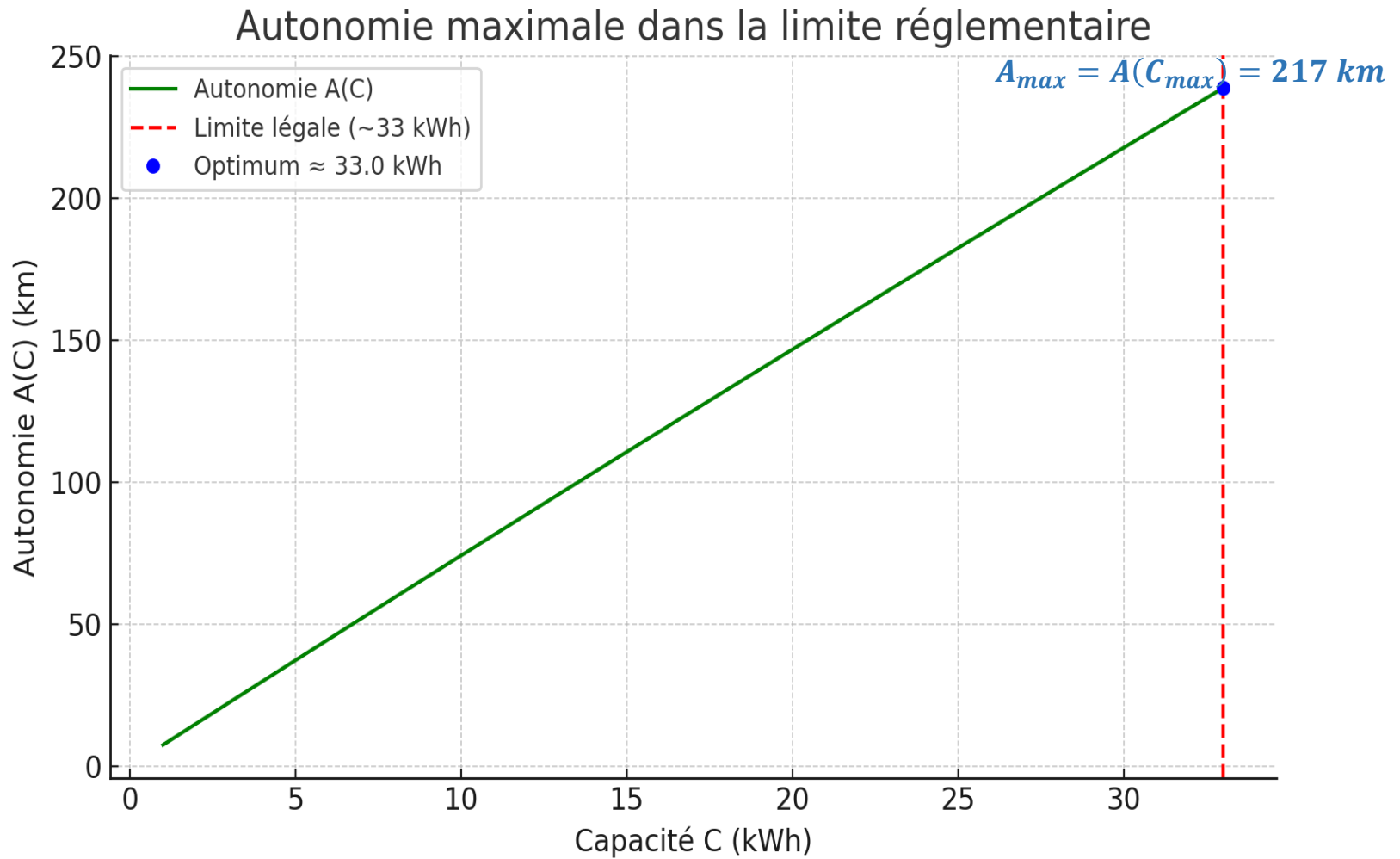


Figure-7 : Autonomie maximale atteignable dans la limite légale de rétrofit

Expérience à échelle réduite

Objectif de l'expérience : simuler une batterie plus lourde en **ajoutant des masses**.

→ La capacité C_{max} fournit-elle une performance satisfaisante en comparaison aux batteries de capacité inférieure ?

Comment ?

- ⚡ En quantifiant à partir de quelle masse on remarque un déclin de performance significatif ;
- ⚡ En vérifiant si l'ajout de batterie reste rentable en autonomie ;
- ⚡ En validant que le modèle théorique s'accorde avec la réalité.

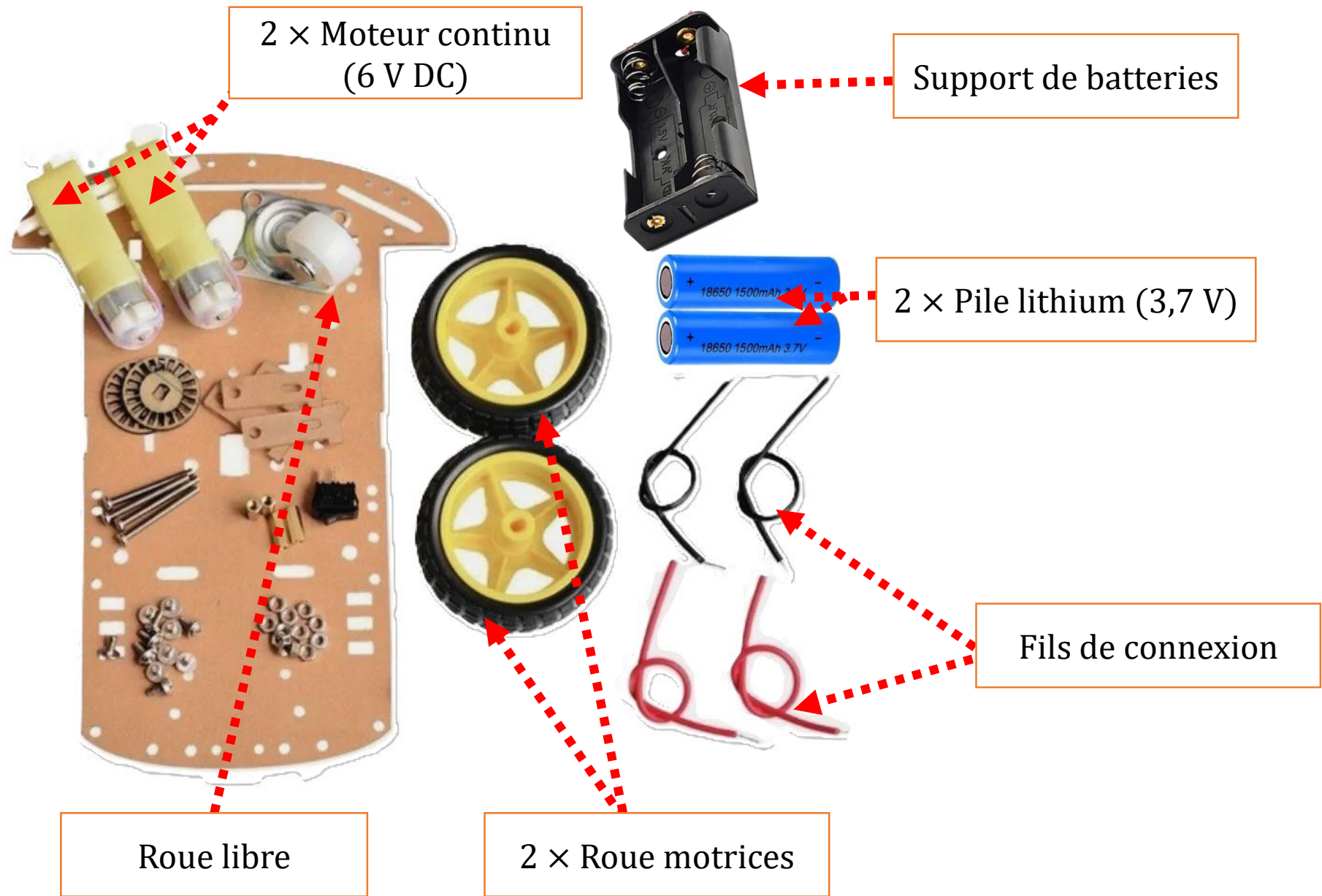


Figure-8 : Composantes du châssis robotique



Figure-9 : Vue de droite du châssis robotique

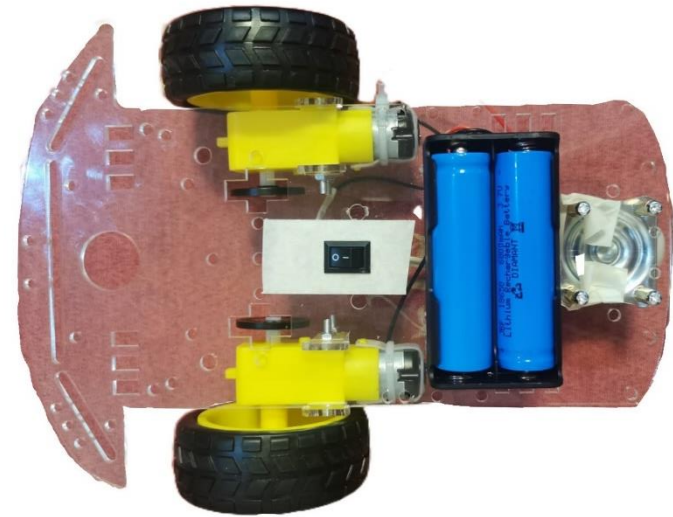


Figure-10 : Vue de bas du châssis robotique

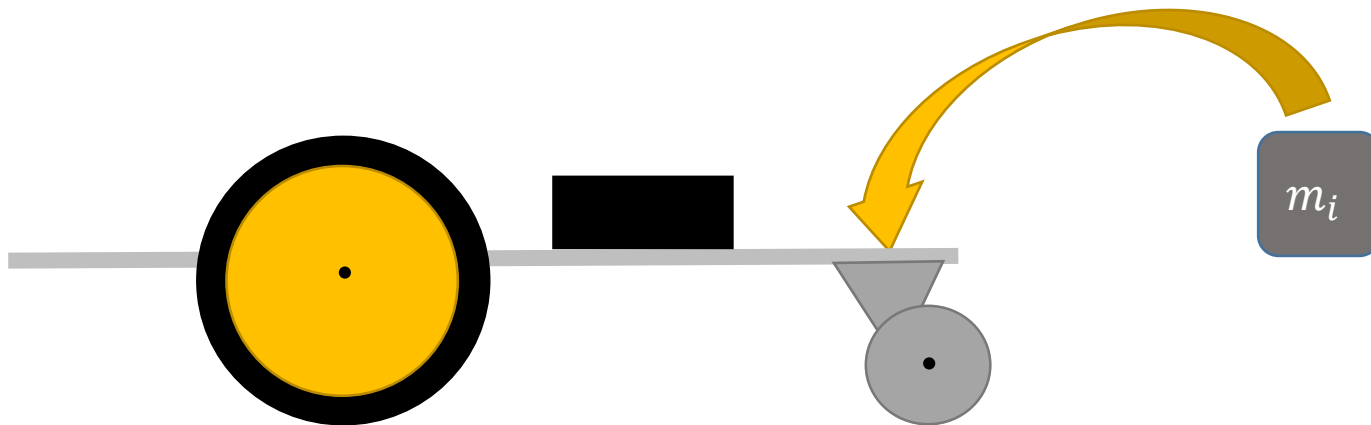


Figure-11 : Schéma explicatif

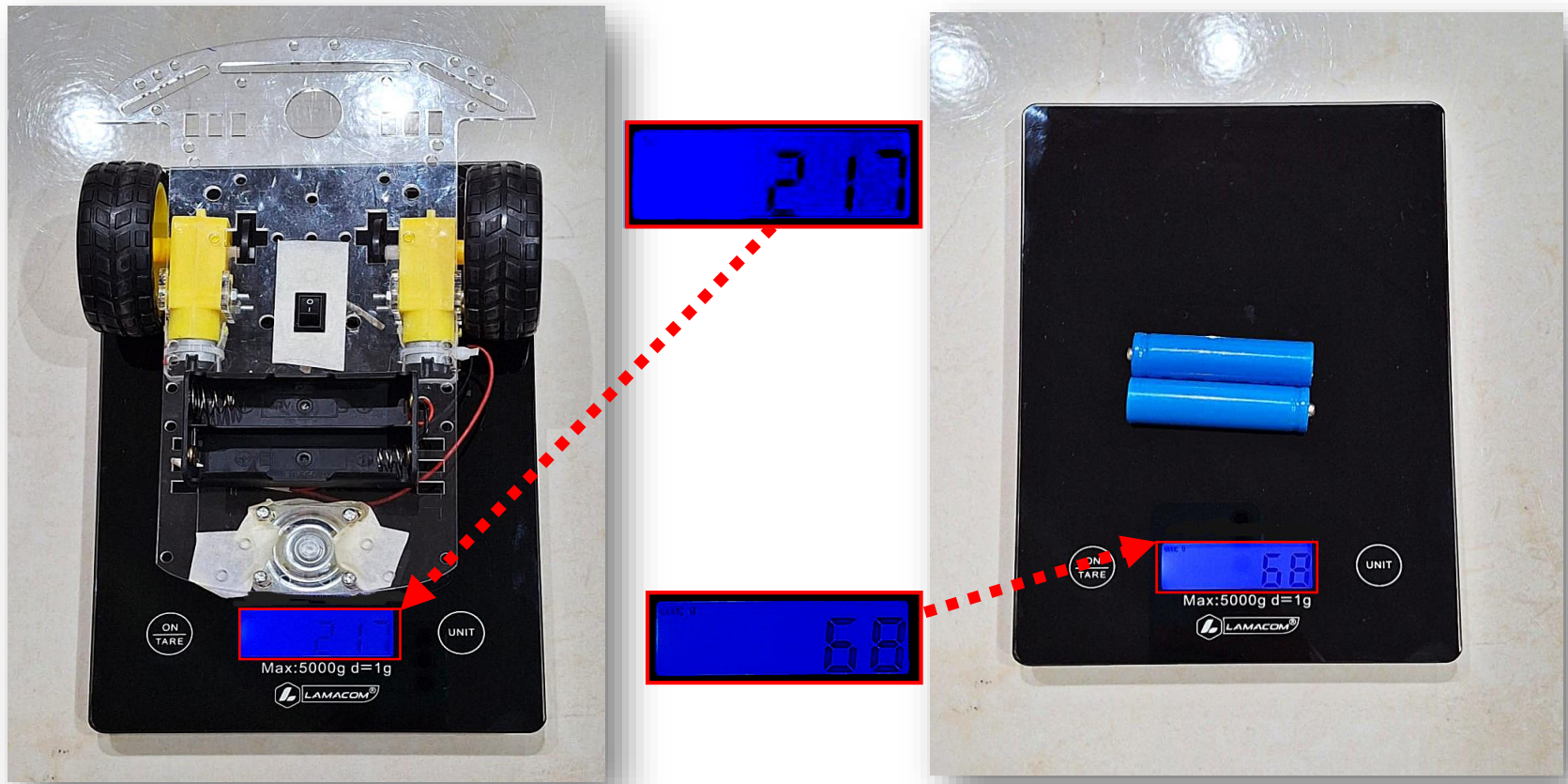


Figure-12 : Masses respectives du robot et de l'ensemble (2 × Pile)

Masse du robot avec piles	Masse d'une voiture de type citadine	Échelle
$m_{robot} = 285 \text{ g}$	$m_{voiture} = 1\,100\,000 \text{ g}$	$e = 3859$

Problème de la densité énergétique

⚡ $r' \text{ (pile li-on)} = 270 \text{ kWh/kg} > r \text{ (batterie de voiture rétrofitée)} = 100$

kWh/kg.

⚡ On garde la masse $m_{piles} = 68 \text{ g}$ et on calcule la capacité $C_{piles-théorique}$ qui

leur correspond avec une densité énergétique $r = 100 \text{ kWh/kg}$.

→ $C_{piles-théorique} = 6,8 \text{ Wh}$ en échelle réduite (26,3 kWh en échelle 1).

Masse ajoutée (g)	Masse totale (g)	Capacité simulée (kWh)
0	68	26.2
10	78	30.1
20	88	34.0
40	108	41.7
50	118	45.5
60	128	49.4
80	148	57.1
100	168	64.8

Figure-13 : Masses (réelle et en échelle réduite) équivalente à la capacité de chaque batterie simulée

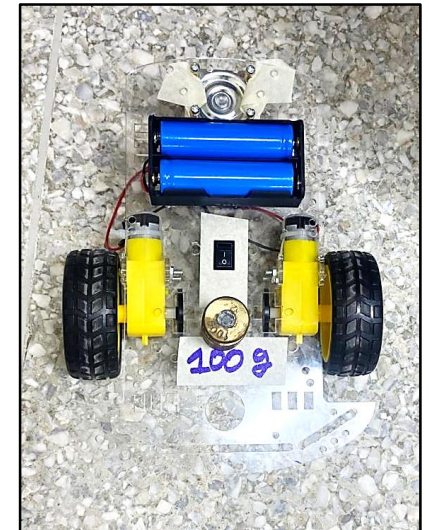
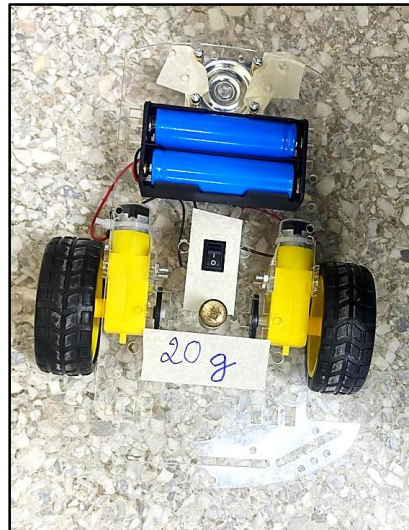
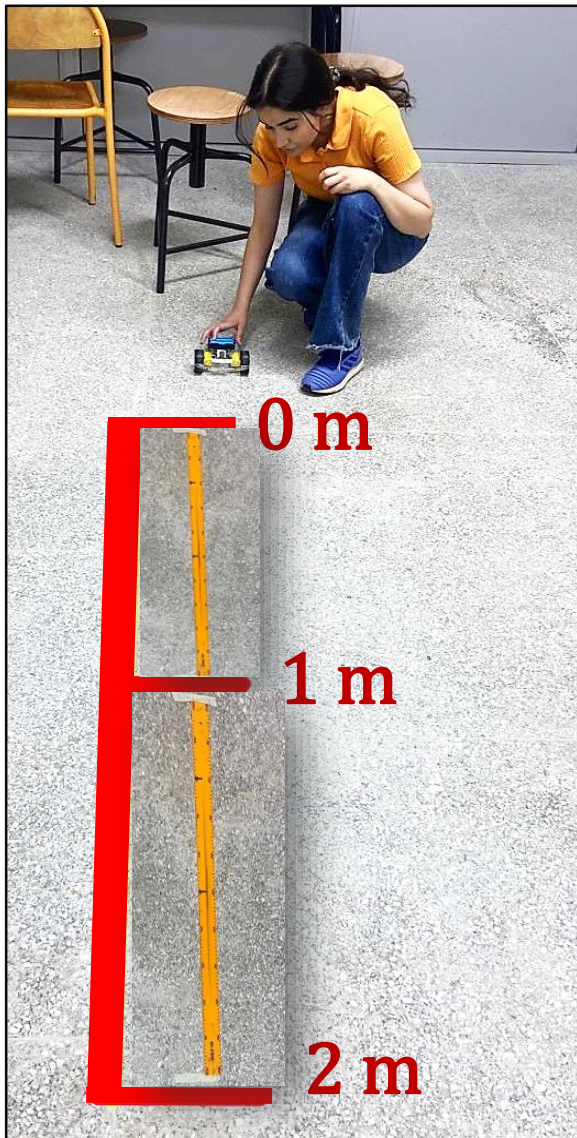
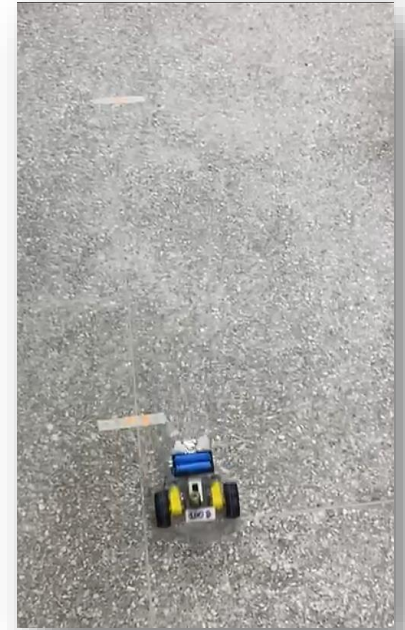
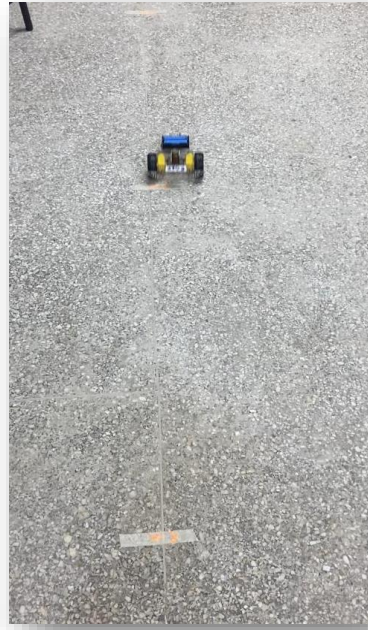


Figure-14 : Détails du protocole expérimental



$t_i = 1 \text{ s}$

$t_f = X$

t

$$V(m_i) = \frac{d}{X - t_i}$$

Résultats expérimentaux

Masse ajoutée (g)	Temps pour 2 m (s)	Vitesse (m/s)
0	2.60	0.77
10	2.75	0.73
20	2.90	0.69
40	3.40	0.59
50	3.70	0.54
60	4.00	0.50
80	4.50	0.44
100	5.10	0.39

Figure-15 : Vitesse du robot selon la masse ajoutée

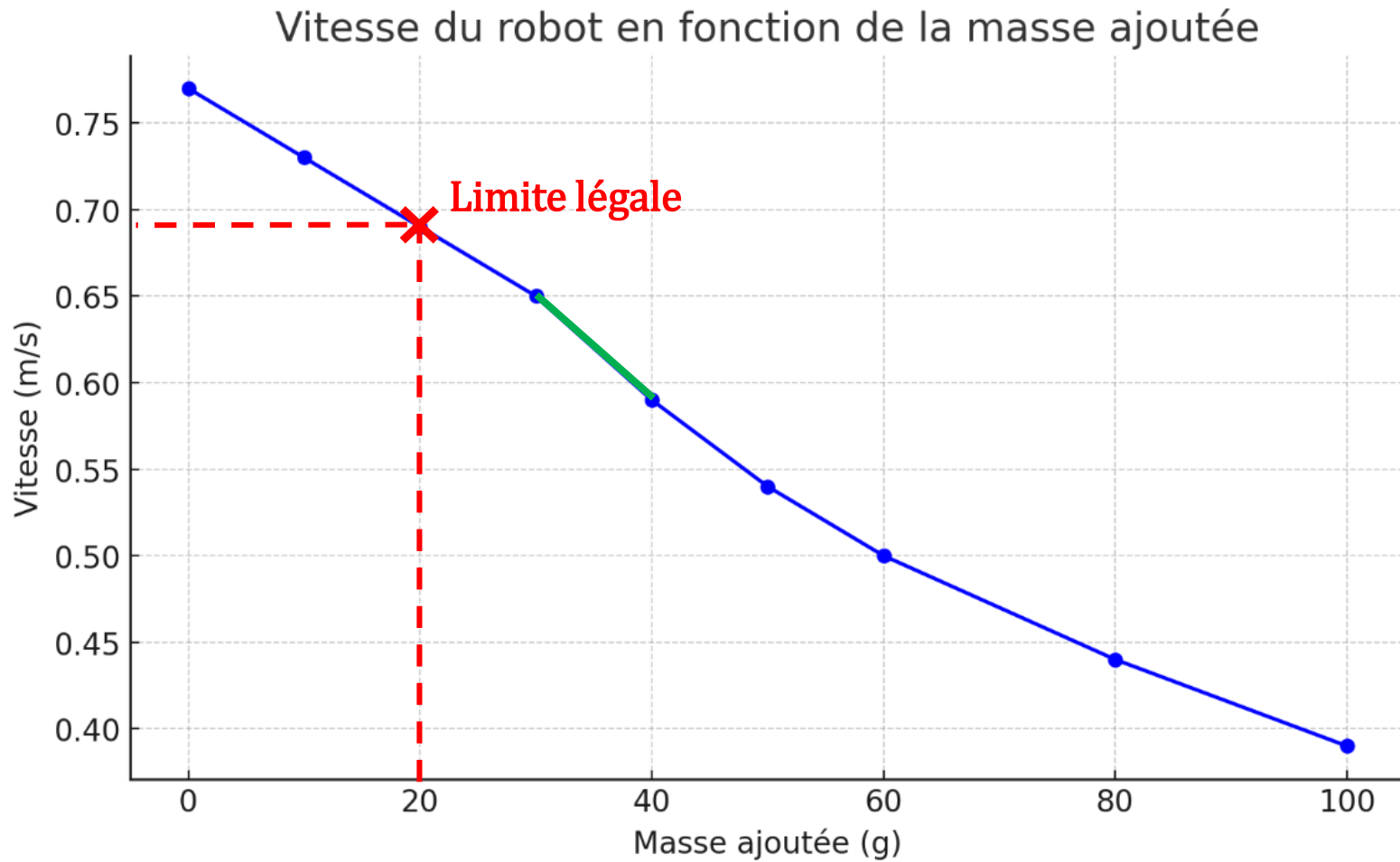


Figure-16 : Vitesse du robot selon la masse ajoutée

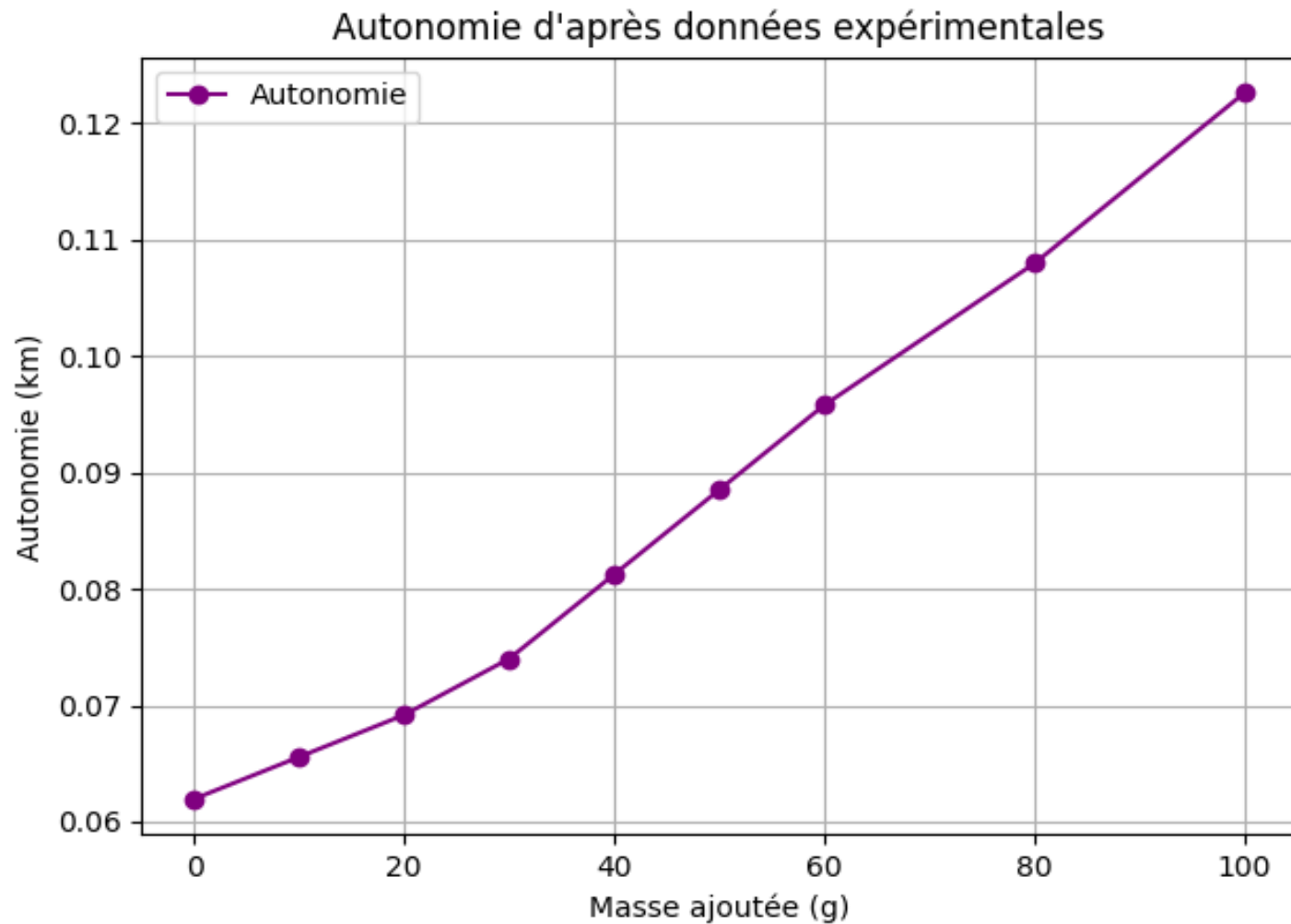


Figure-17 : Autonomie du robot selon la masse ajoutée

Interprétation des résultats

- ⚡ Déclin significatif de vitesse (performance) à partir de $m_{critique} = 98 \text{ g}$, qui correspond à $C_{critique} = 38 \text{ kWh}$
 - Limite réglementaire (+20% maximum) **justifiée**.
- ⚡ Dans la marge étudiée, **l'ajout de batterie reste rentable en autonomie**.
- ⚡ Le retrofit d'une **voiture de type citadine** de masse $m = 1100 \text{ kg}$ est **pertinent et optimal** pour une **batterie de type Li-on**, de rendement énergétique $r \geq 100 \text{ Wh/kg}$, et de capacité $C_{optimale} = 33 \text{ kW}$.

Confrontation et validation

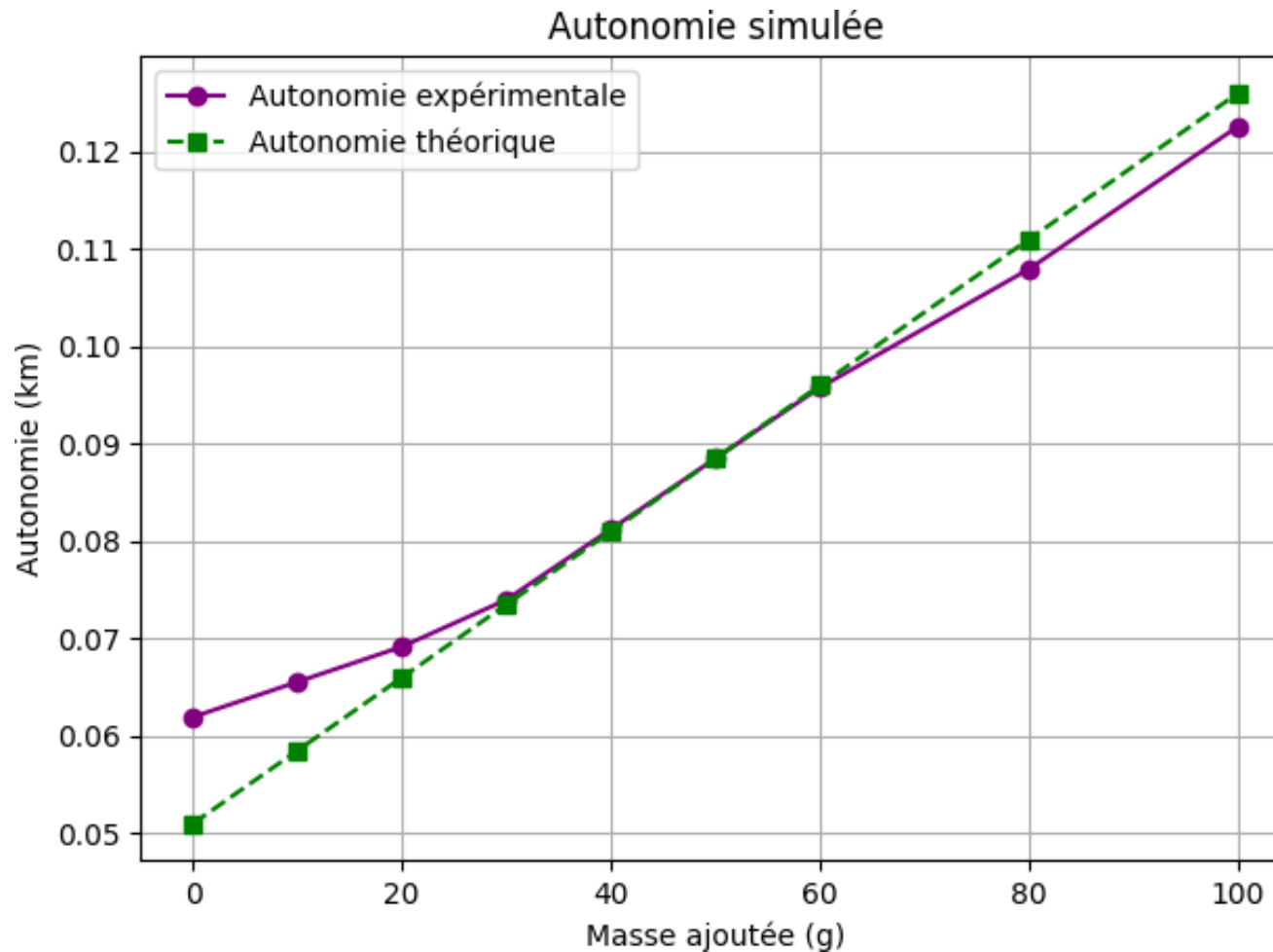


Figure-18 : Autonomie du robot selon la capacité simulée, en fonction des résultats de l'expérience

Validation du modèle mathématique suggéré

La formule proposée est-elle donc valide ?

- ⚡ D'après le graphe comparatif, le modèle théorique fournit des résultats assez proches de ceux de l'expérience.
- ⚡ Des écarts dus aux paramètres négligés : inertie, pertes, frottements, ...
 - On peut donc valider partiellement le modèle théorique suggéré au début, et s'y appuyer pour juger l'efficacité du retrofit pour d'autres types de véhicules ou de batteries.

Conclusions

- ⚡ La tendance générale est confirmée : ajouter de la masse améliore l'autonomie jusqu'à un point, puis la dégrade.
- ⚡ Les écarts observés entre modèle et expérience sont dus à des effets réels (pertes mécaniques, frottements, simplifications du modèle).
- ⚡ L'expérience a validé partiellement le modèle proposé, et permis d'illustrer l'intérêt du rétrofit bien dimensionné.

Ce travail pourrait être amélioré par une **étude du cycle complet de vie** d'un véhicule rétrofité, une **modélisation énergétique plus fine**, ou encore par une **optimisation multi-critères** intégrant coût, autonomie, et impact environnemental.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Fin de la présentation

Annexe : Formule utilisée pour le calcul des masses à ajouter au robot

$$m_{\text{exp}} = \frac{C \cdot 1000}{r} \times \frac{m_{\text{robot}}}{m_{\text{voiture}}}$$

où :

- C : capacité de la batterie à simuler (en **kWh**)
- r : densité énergétique (en **Wh/kg**)
- m_{robot} : masse totale de ton robot (en **g**)
- m_{voiture} : masse réelle du véhicule (en **g**),

Annexe : Modèle de consommation simulée

$$\text{Autonomie simulée} = \frac{E_{\text{batt}}}{\text{conso}(v)} \quad \text{où } \text{conso}(v) = a \cdot v + b$$

avec :

- E_{batt} : énergie disponible
- $\text{conso}(v)$: consommation simulée (en Wh/km) croissante avec la vitesse
- $a = 40, b = -1$

Annexe : Code Python pour le tracé de la courbe de l'autonomie $A(C)$

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 m0 = 1100
5 r = 150
6 eta = 0.9
7 E0 = 120
8 k = 0.02
9
10 # Capacité maximale selon la contrainte des +20 %
11 C_max = 0.2 * m0 * r # En Wh
12
13 C = np.linspace(1000, C_max, 500)
14
15 A = (C * eta) / (E0 + (k * C / r))
16
17 plt.figure(figsize=(8, 5))
18 plt.plot(C / 1000, A, label='Autonomie A(C)', color='green')
19 plt.axvline(x=C_max / 1000, color='red', linestyle='--', label='Limite légale (~33 kWh)')
20 plt.xlabel("Capacité C (kWh)")
21 plt.ylabel("Autonomie A(C) (km)")
22 plt.title("Autonomie en fonction de la capacité (dans la limite réglementaire)")
23 plt.grid(True)
24 plt.legend()
```

Annexes : Code Python pour le tracé du graphe de confrontation

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 masses = np.array([0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100])
5 temps_2m = np.array([2.6, 2.75, 2.9, 3.1, 3.4, 3.7, 4.0, 4.5, 5.1])
6 vitesses = 2 / temps_2m
7 vitesses_kmh = vitesses * 3.6
8
9 E_batt = 6.8
10
11 a, b = 40, -1
12 conso = a * vitesses_kmh + b
13 autonomie_co = E_batt / conso
14 eta, E0, k, r = 0.9, 120, 0.02, 100
15 capacites_wh = (masses + 68) / 1000 * r
16 autonomie_theo = (capacites_wh * eta) / (E0 + k * capacites_wh / r)
17
18 plt.plot(masses, autonomie_co, marker='o', linestyle='-', color='purple', label="Autonomie expérimentale")
19 plt.plot(masses, autonomie_theo, 's--', label='Autonomie théorique', color='green')
20 plt.xlabel("Masse ajoutée (g)")
21 plt.ylabel("Autonomie (km)")
22 plt.title("Autonomie")
23 plt.grid(True)
24 plt.legend()
25 plt.tight_layout()
26 plt.show()
```