

Recherche de débouchés pour le gisement de pneus et chambre à air de vélo et impact des véhicules électriques sur le Programme

Denis Rodrigue

Professeur titulaire

Département de génie chimique

Université Laval

Denis.Rodrigue@gch.ulaval.ca

Xiao Yuan Chen

Assistante de recherche

Département de génie chimique

Université Laval

xiao-yuan.chen.1@ulaval.ca

Plan de la rencontre

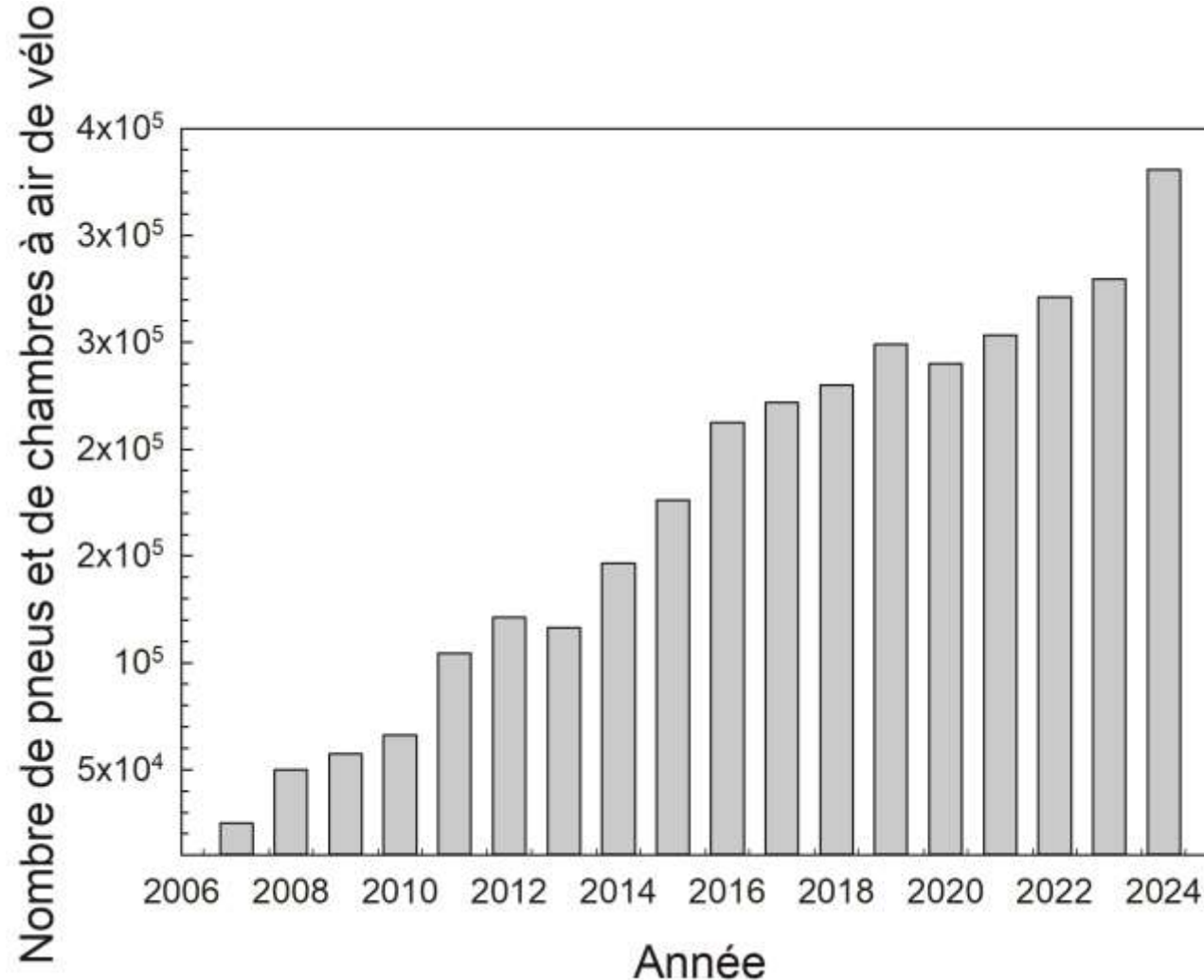
I. Recyclage des pneus et chambres à air de vélo

- Introduction
- Composition
- Technologies de recyclage et de valorisation
- Applications du caoutchouc recyclé
- Recyclage des chambres à air

II. Abrasion des pneumatiques : mécanismes et facteurs

- Usure des pneus en conditions de conduite réelles
- Mesure des abrasions de pneus d'auto (tests en cours)

Introduction



Nombre de pneus et de chambres à air de vélo collectés et traités au Québec depuis le début du programme en 2007.

Composition d'un pneu de vélo



Composante	Concentration (%)
Caoutchouc (NR, SBR, BR, IIR, etc.)	40–60
Noir de carbone / silice	20–30
Textiles (nylon, polyester, coton, aramide)	10–20
Acier (bords, courroies)	5–10
Huiles plastifiantes, résines, cires, antioxydants	3–5
Soufre + activateurs (agents de vulcanisation)	1–2
Pigments / autres additifs	<1

Composition des chambres à air de vélo

Composante	Concentration (%)
Caoutchouc butyle (IIR) ou caoutchouc halobutyle (CIIR/BIIR)-polymère de base	62-65
Noir de carbone / charge	30-33
Huile minérale, huile paraffinique, soufre, oxyde de zinc, acide stéarique, plastifiants, agents de vulcanisation	3.5-6.5

A: Butyle normal
Poids=101 g



C: Latex
Poids=81 g

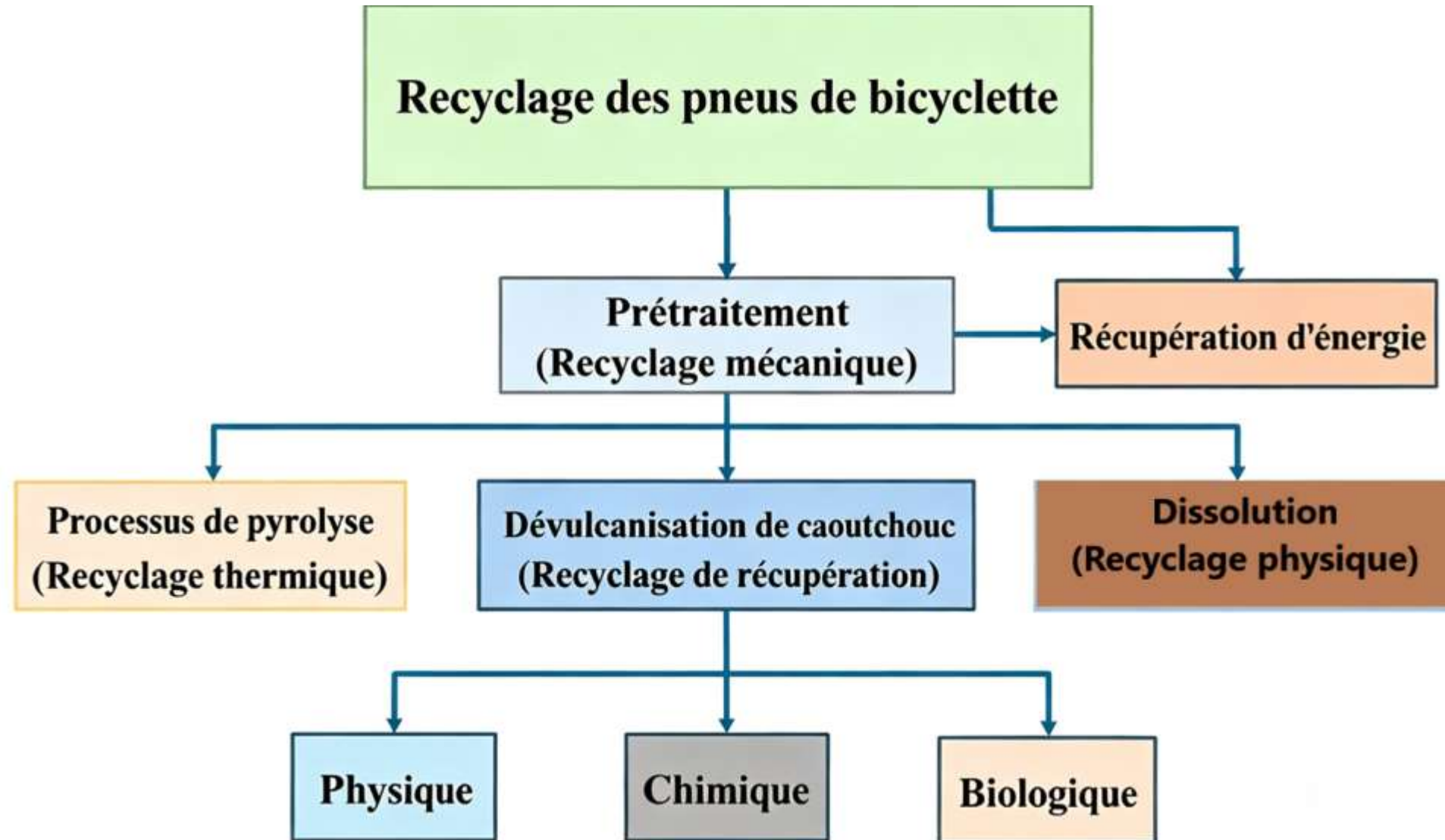
B: butyle léger
Poids=52 g



D: TPU
Poids=34 g

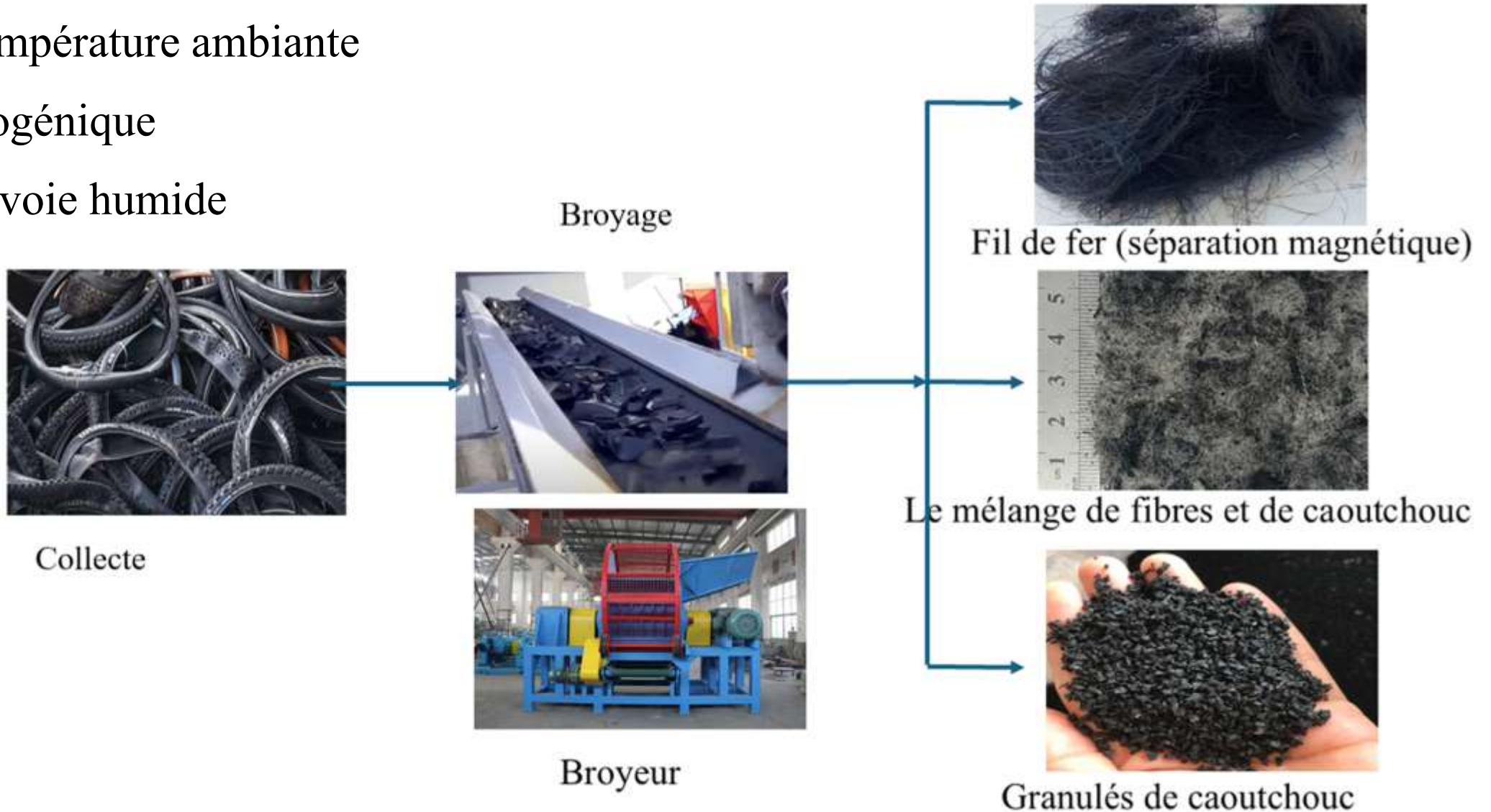
Comparaison du poids des chambres à air en butyle (A,B) et en latex (C) par rapport aux chambres à air en TPU (D).

Technologies de recyclage du caoutchouc des pneus de vélo

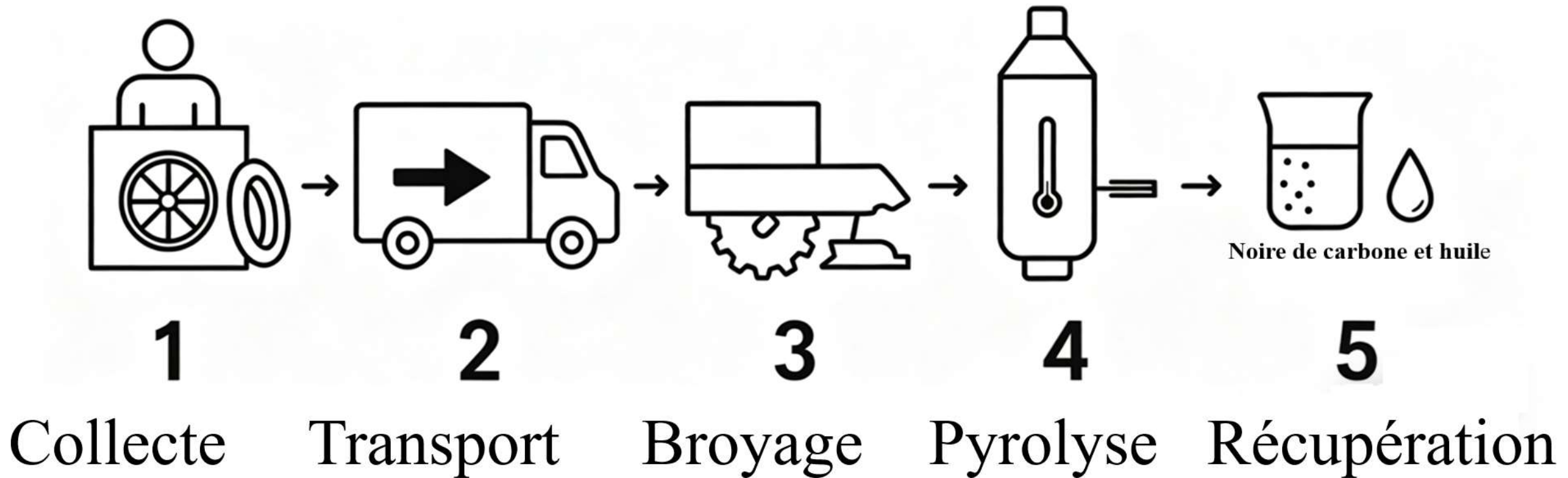


Recyclage mécanique (Prétraitement)

- Broyage à température ambiante
- Broyage cryogénique
- Broyage par voie humide



Recyclage des pneus de vélo - Procédé de pyrolyse (Schwalbe)



Recyclage des chambres à air (Schwalbe)

100% RECYCLABLE



Collecte



Dévulcanization
et recyclage



Fabrication

Application des chambres à air de vélo recyclées



Recyclage des chambres à air

Broyage à $< 1\text{ mm}$ (poudre)



Après plusieurs lavages



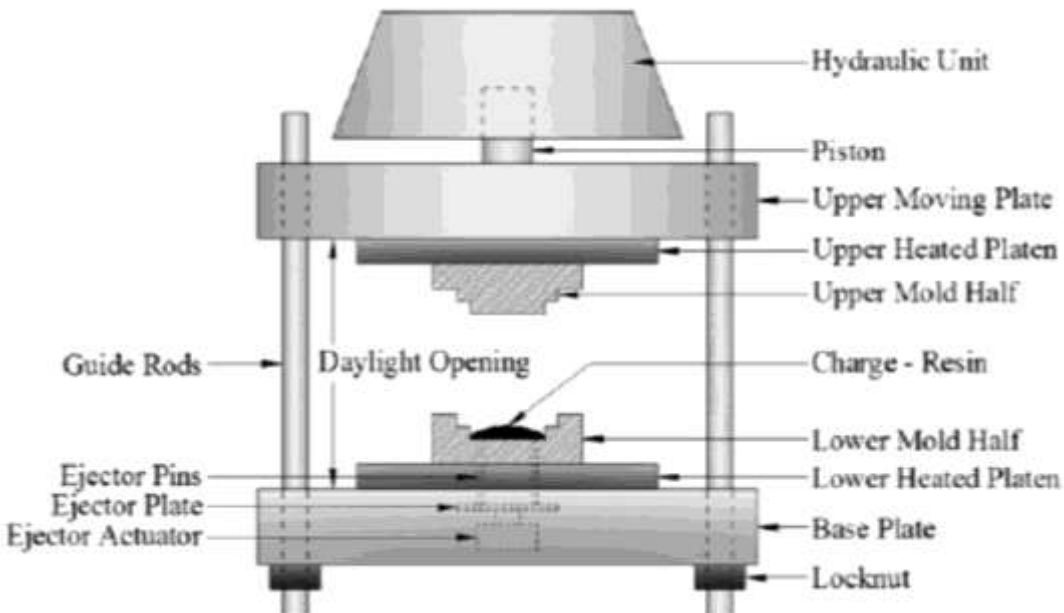
Découpage



Broyage cryogénique

Recyclage des chambres à air

Moulage en compression thermique avec LDPE



rLDPE

10%

20%

30%

Recyclage des chambres à air

Tests mécaniques (tension)

Propriété	rLDPE	10%	20%	30%
Module (MPa)	72.5±1.4	64.2±0.8	40.1±2.6	37.0±1.8
Résistance (MPa)	16.9±0.8	7.2±0.2	5.8±0.3	3.8±0.7
Déformation maximale à la traction (mm/mm)	15.4±1.1	3.1±1.0	1.5±0.1	1.2±0.3

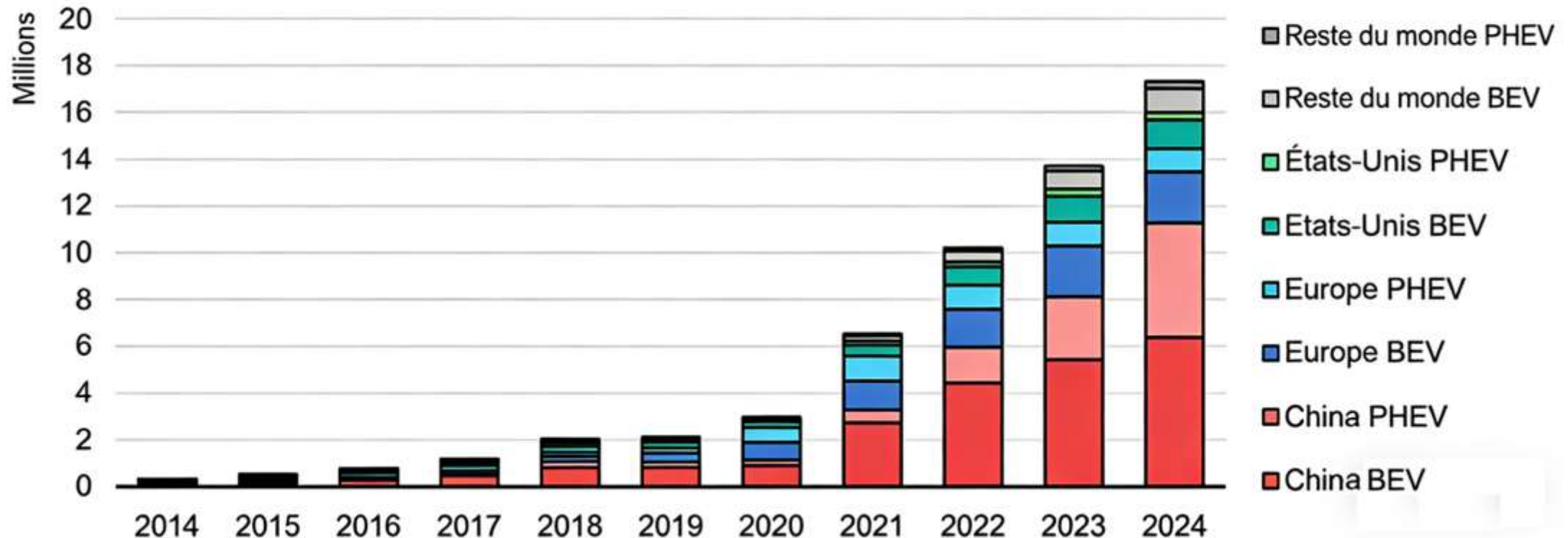
Conclusion

- Le recyclage des pneus et des chambres à air de vélo devient important avec l'augmentation des déchets.
- Plusieurs technologies permettent aujourd'hui de transformer ces matériaux en produits à valeur ajoutée.
- Mais il reste des problèmes: la collecte est difficile, les matériaux sont complexes et les marchés sont instables.
- Dans le futur, l'amélioration des technologies et une meilleure collaboration entre les différents acteurs seront essentielles pour développer une économie circulaire plus durable.

Partie II. Abrasion des pneus

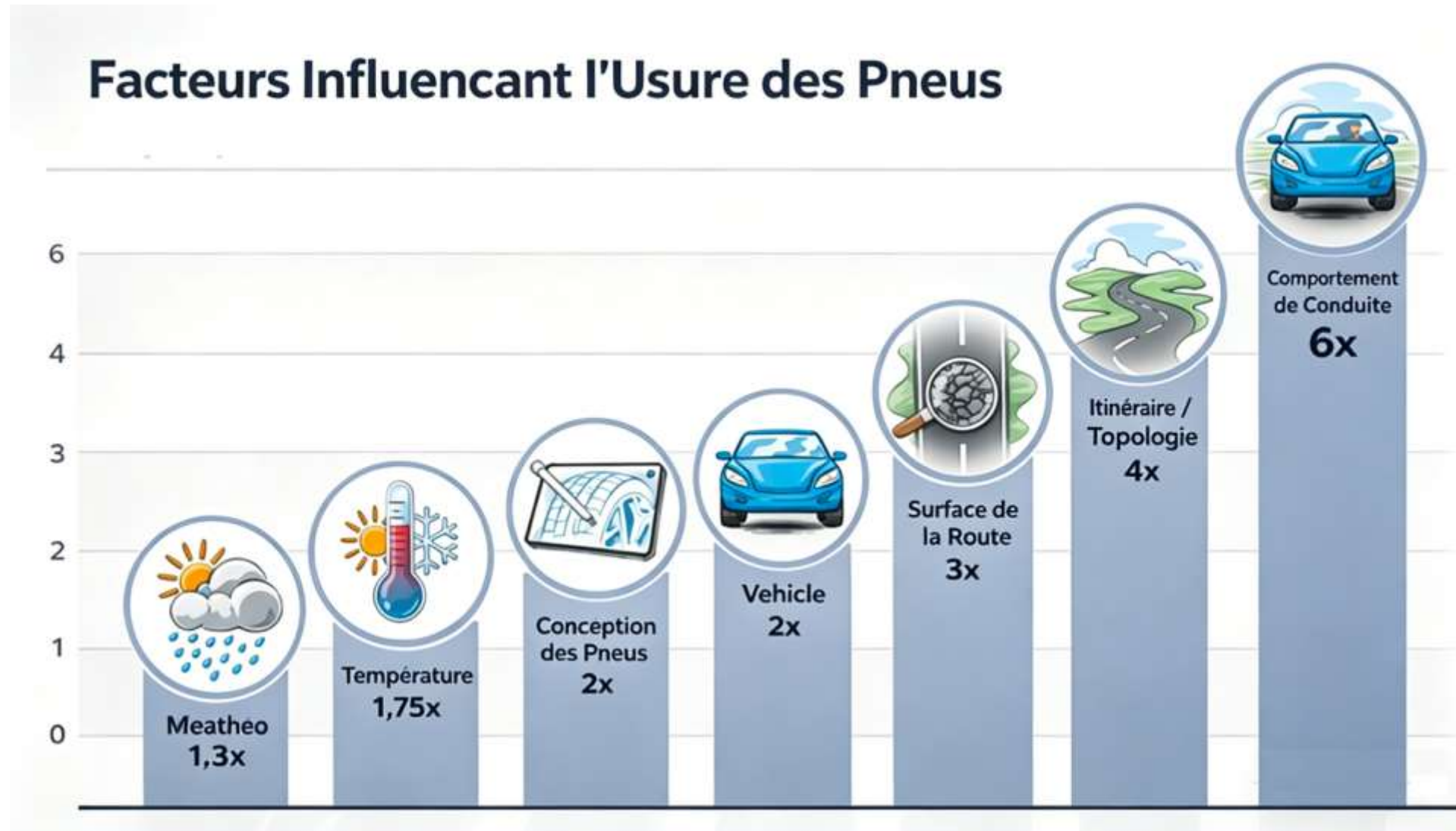
Croissance des véhicules hybrides et électriques

Ventes mondiales de voitures électriques 2014-2024



Ventes mondiales de voitures électriques (2014-2024) BEV = véhicule électrique à batterie; PHEV = véhicule hybride rechargeable. Comprend uniquement les voitures particulières neuves.

Introduction: Facteurs influençant l'usure des pneus



Mécanismes d'abrasion et d'usure des pneus

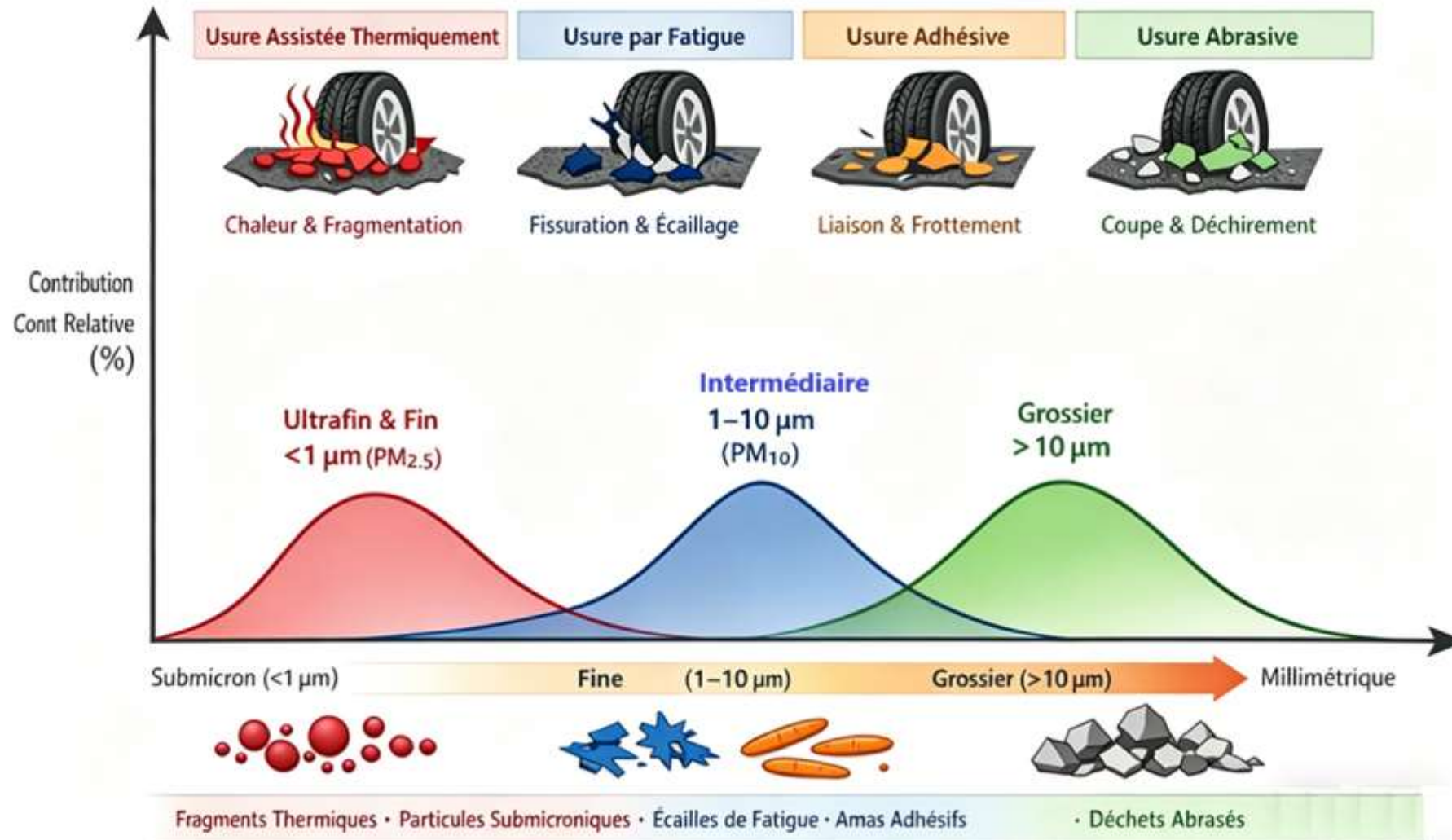
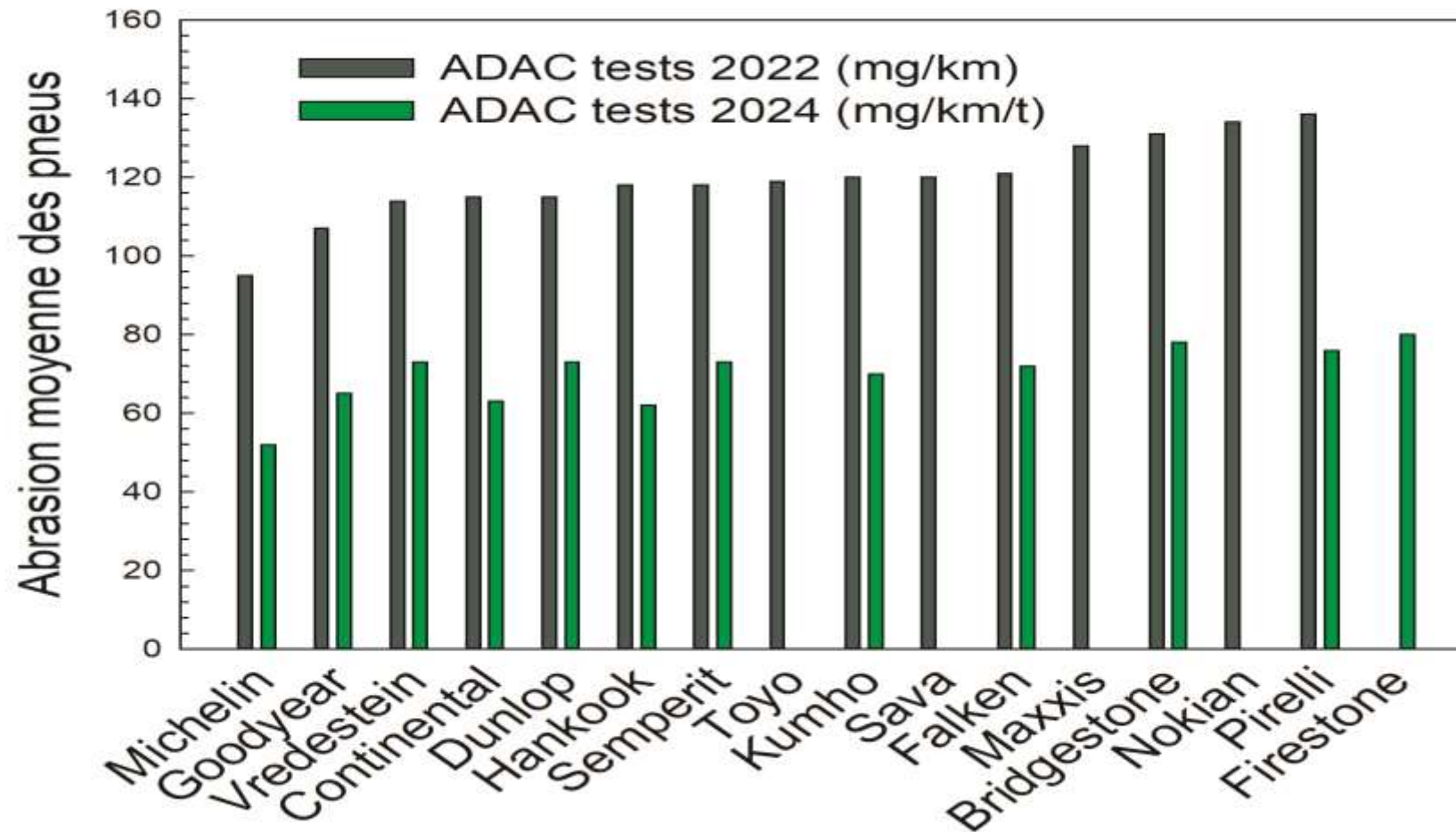


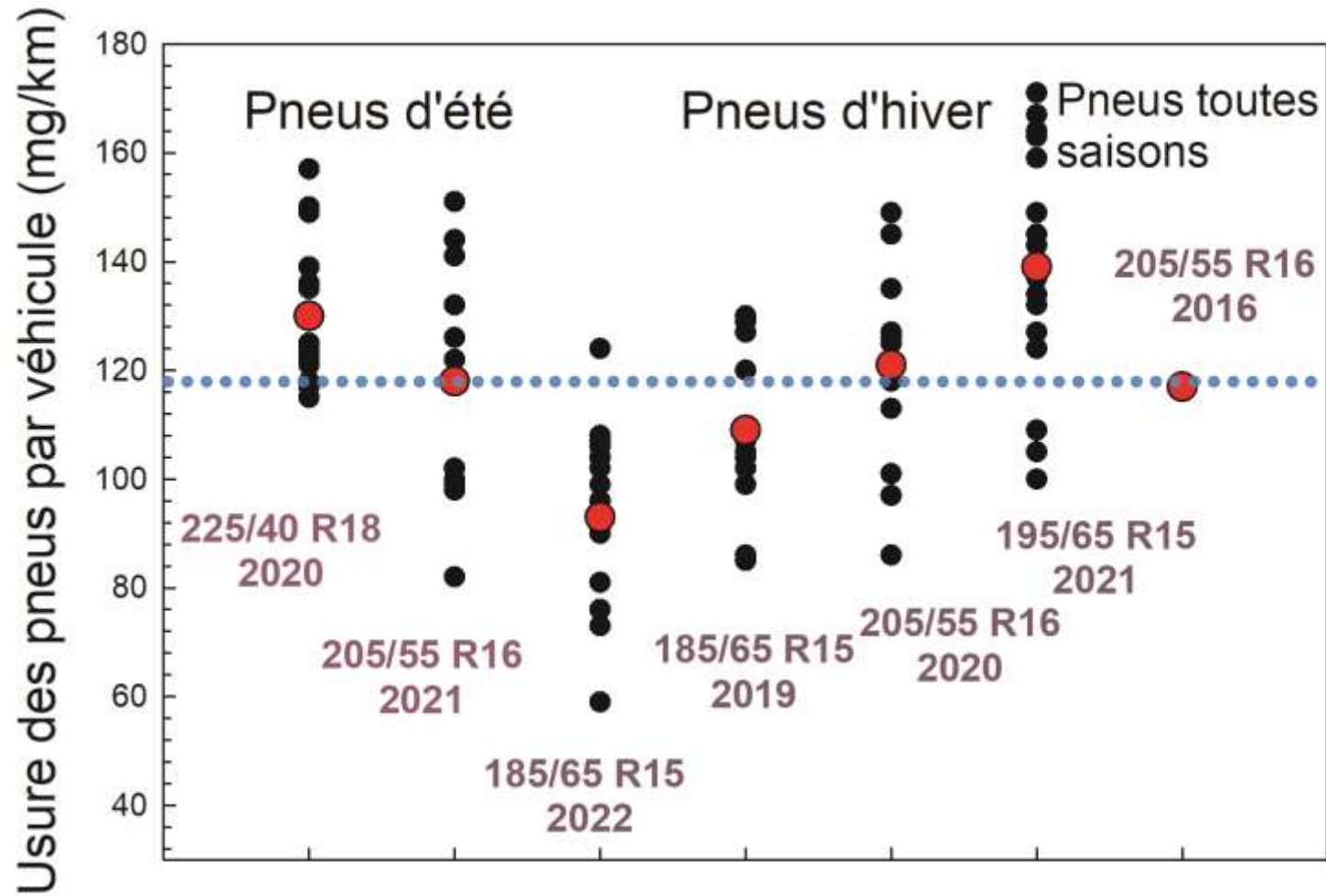
Schéma reliant les mécanismes d'usure des pneus à la distribution granulométrique des particules.

Usure des pneus en conditions de conduite réelles



Usure moyenne des pneus par fabricant (au moins 5 modèles dans le test ADAC sont pris en compte) en 2022 et 2024.

Usure des pneus en conditions de conduite réelles



Fabricant	Modèle	WB (kg)	WT (kg)	Ratio (%)
Tesla	Model 3 (Long Range)	~480	~1,835	~26.2
Tesla	Model S (Plaid)	~630	~2,195	~28.7
Tesla	Model Y (Long Range)	~450	~1,860	~24.2
Nissan	Leaf (40 kWh)	~270	~1,670	~16.2
Nissan	Leaf (62 kWh)	~350	~1,756	~19.9
BMW	i3 (42 kWh)	~230	~1,405	~16.4
BMW	i4 (83.9 kWh)	~500	~1,950	~25.6
Volkswagen	ID.4 (82 kWh)	~480	~2,095	~22.9
Volkswagen	ID.3 (58 kWh)	~350	~1,750	~20.0
Hyundai	Kona Electric	~400	~1,770	~22.6
Hyundai	Ioniq 5	~450	~2,040	~22.1
GM	Chevrolet Bolt EV	~380	~1,645	~23.1
GM	Cadillac Lyriq	~600	~2,440	~24.6
Ford	Mustang Mach-E	~450	~2,045	~22.0
Ford	F-150 Lightning	~700	~2,740	~25.5
Rivian	R1T	~750	~2,735	~27.4
Rivian	R1S	~750	~2,735	~27.4
Lucid Motors	Air	~650	~2,245	~28.9
Polestar	Polestar 2	~480	~2,100	~22.9

ICE, BEV et Hybride

Poids de la batterie (WB) vs poids total du véhicule (WT) pour des véhicules électriques à batterie (BEV).

1. Model S Owner's Manual Available online: https://www.tesla.com/ownersmanual/models/en_cn/GUID-91E5877F-3CD2-4B3B-B2B8-B5DB4A6C0A05.html? (accessed on 3 March 2026).

2. The Average Weight of an Electric Vehicle (SUVs, Trucks, Sedans & Coupes) - ReadySetRev Available online: <https://readyserev.com/how-much-do-electric-vehicles-weigh> (accessed on 3 March 2026).

3. How Much Does an EV Battery Weigh? Electric Car Battery Weight by Type. *Dynasty electric car corpor.* <https://www.itiselectric.com/how-much-does-an-ev-battery-weigh-electric-car-battery-weight-by-type/>

ICE, BEV et Hybrid

Comparaison du poids à vide et du couple des véhicules selon leur motorisation. Données compilées à partir des spécifications techniques de Toyota, Tesla, VW et Nissan.

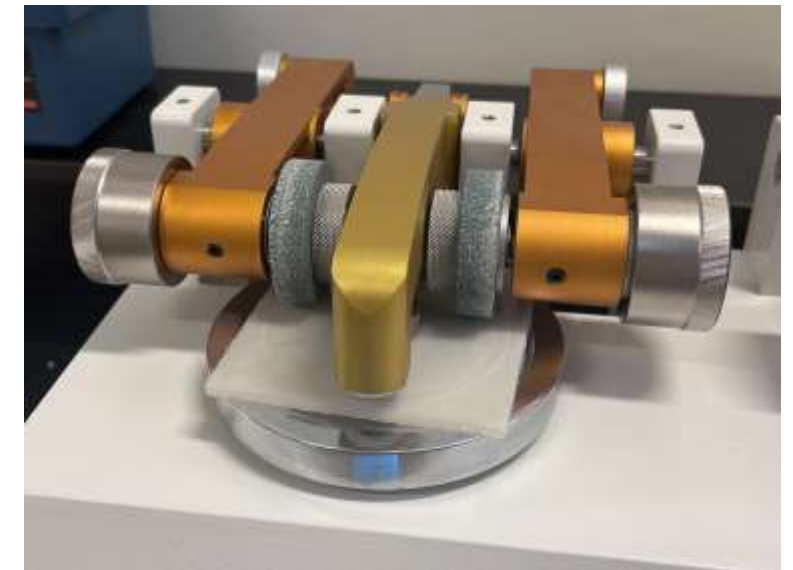
Type de véhicule	Poids à vide (kg)	Couple (Nm)	Poids vs essence (%)	Couple vs essence (%)
Toyota bZ4X (EV)	1,900–2,000	266–336	51	115
Toyota Prius (Hybrid)	1,385–1,420	142	9	-
Toyota Corolla (essence)	1,265–1,320	121–173	-	-
Tesla Model 3 (RWD)	1,825	420	-	112
Honda e:Ny1	1,752	310	-	57
VW ID.4 (RWD)	2,049	545	-	175
Nissan leaf (EV)	1597-1736	320-339	20*	66*
Nissan e-POWER (Hybrid)	1880-1949	250	38*	26*
Nissan Sentra 2024 (gas)	1377-1399	198	-	-

* Calculé par rapport à la Nissan Sentra 2024. Autres calculs par rapport à la Toyota Corolla.

Paramètres spécifiques au véhicule influençant le taux d'usure

- A. **Poids du véhicule**: Un poids plus élevé entraîne une abrasion accrue (la batterie contribue de façon importante à la masse du véhicule).
- B. **Caractéristiques du couple**: Le couple de démarrage élevé des véhicules électriques augmente considérablement l'usure lors des accélérations (les moteurs électriques délivrent un couple maximal élevé à un certain régime moteur).
- C. **Alignement des essieux**: Une géométrie d'essieu non optimale accélère encore plus l'usure des pneus.
- D. **Le kilométrage peut être influencé par deux paramètres**: le taux d'abrasion et la hauteur de la bande de roulement. Plus la bande de roulement est profonde à l'état neuf, plus le pneu peut être utilisé longtemps !

Test d'abrasion Type TABER



Résistance à l'abrasion

$$AR = 100 (A - B) / A$$

- AR = résistance à l'abrasion (%)
- A = Propriété de l'échantillon initial
- B = Propriété de l'échantillon après le test

Procédure des tests

L'usure testée a passé 24 h sur la charge de 750 g



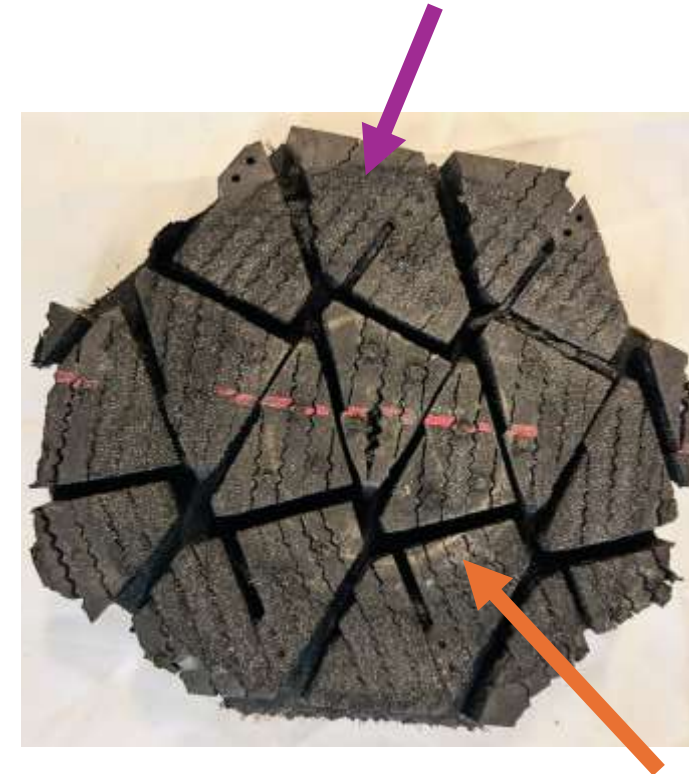
Pneu original



Pneu coupé

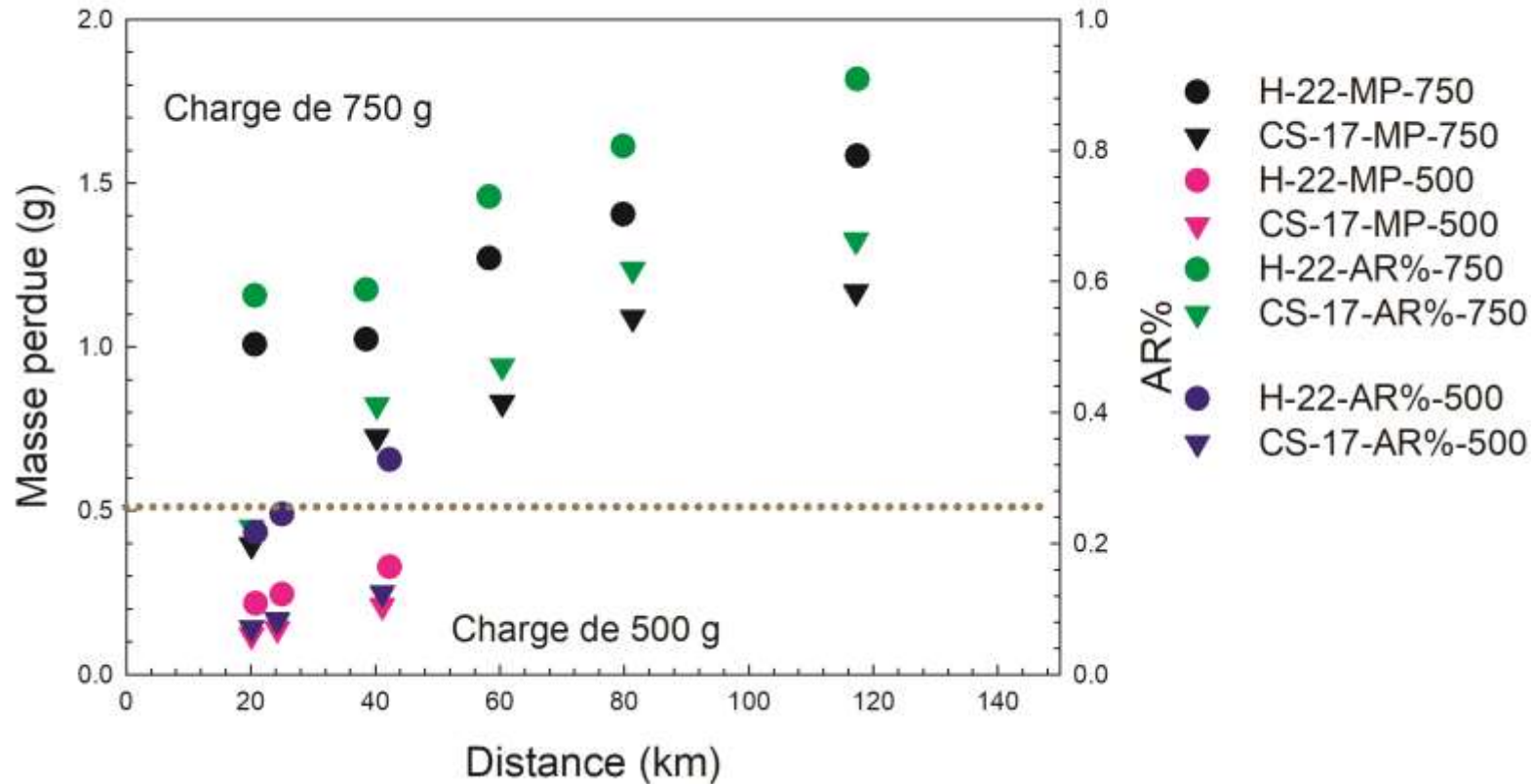


Échantillon initial



Échantillon final

Résultats des tests d'abrasion



Conditions de test :

Type de roue utilisée :

H-22 (action abrasive
grossière) et CS-17

Vitesse : 60 rpm

Charge appliquée : 750 g

Échantillon : plaque de
pneus $100 \times 100 \times 20$
mm

Vidéo d'un test d'abrasion



Conclusion

- L'abrasion des pneus est une **source majeure d'émissions de particules** autres que les gaz d'échappement, contribuant à la **pollution atmosphérique** (particules en suspension, poussières routières et microplastiques). Pourtant, elles demeurent largement non réglementées.
- L'usure des pneus résulte de **l'adhérence, de la fatigue et de la dégradation thermomécanique**, influencées par la charge du véhicule, le couple, l'état de la chaussée et la conception du pneumatique.
- Le passage aux **véhicules électriques** à batterie pourrait **accroître l'abrasion des pneus** en raison de la masse plus élevée du véhicule et du couple moteur instantané, ce qui rend l'usure des pneus importante dans les analyses environnementales et du cycle de vie.
- Les progrès réalisés en matière de composés de gomme, de structures de pneus renforcées et de **pneus intelligents** munis de capteurs offrent des solutions prometteuses pour réduire l'usure tout en préservant l'efficacité et la sécurité.

Merci !

Questions ?