



Laboratoire Ampère

Unité Mixte de Recherche CNRS

Génie Électrique, Électromagnétisme, Automatique, Microbiologie Environnementale et Applications

Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité.

Arnaud Devie

Composition du jury

Stephan Astier – Laplace

Emmanuel Boutleux – Ampère

Elie Durcik – EDF R&D

Bernard Multon – SATIE

Serge Pélissier – IFSTTAR

Stéphane Raël – GREEN

Pascal Venet – Ampère

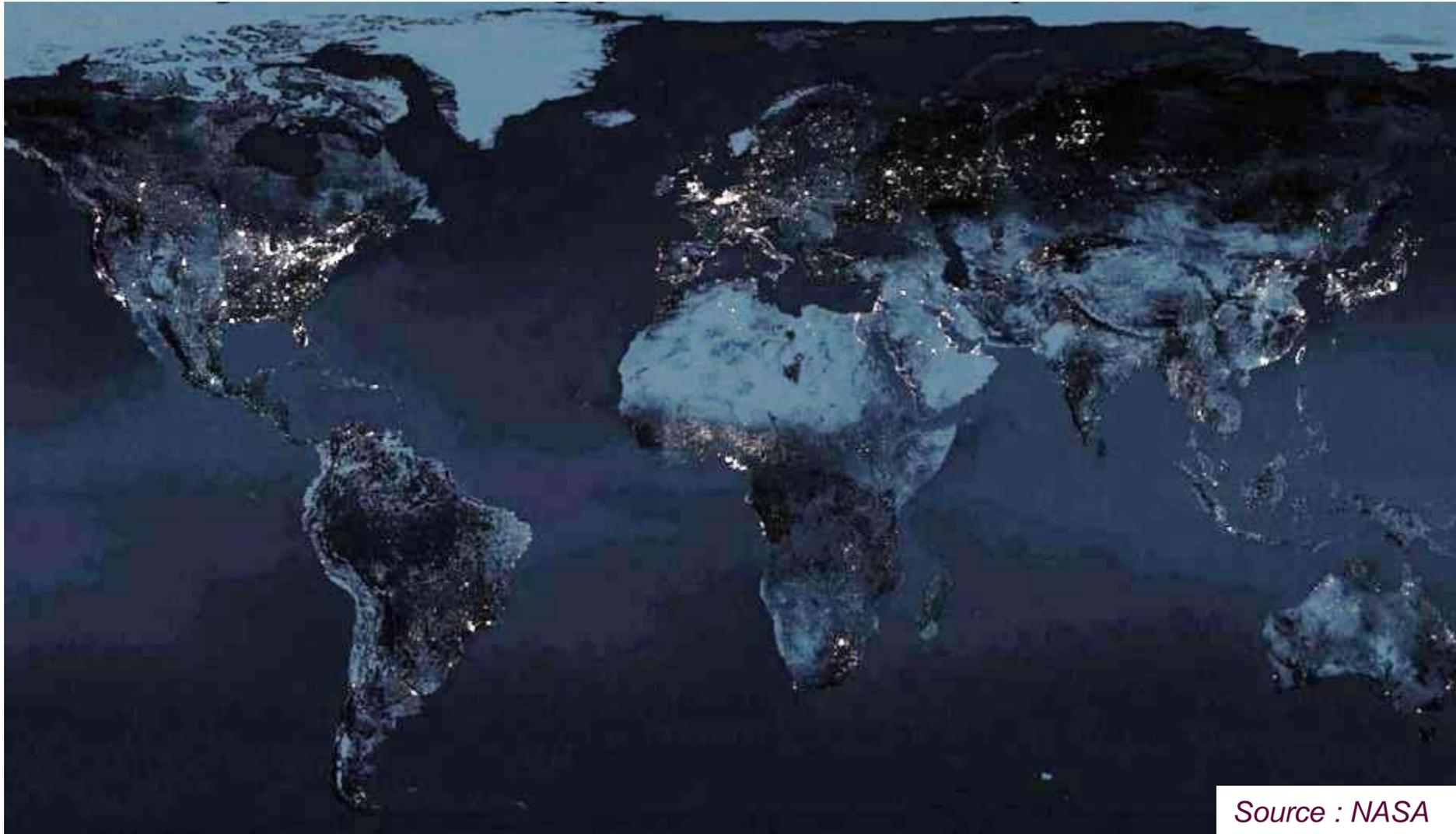
MOTIVATIONS

PROBLEMATIQUE

METHODOLOGIE

RESULTATS

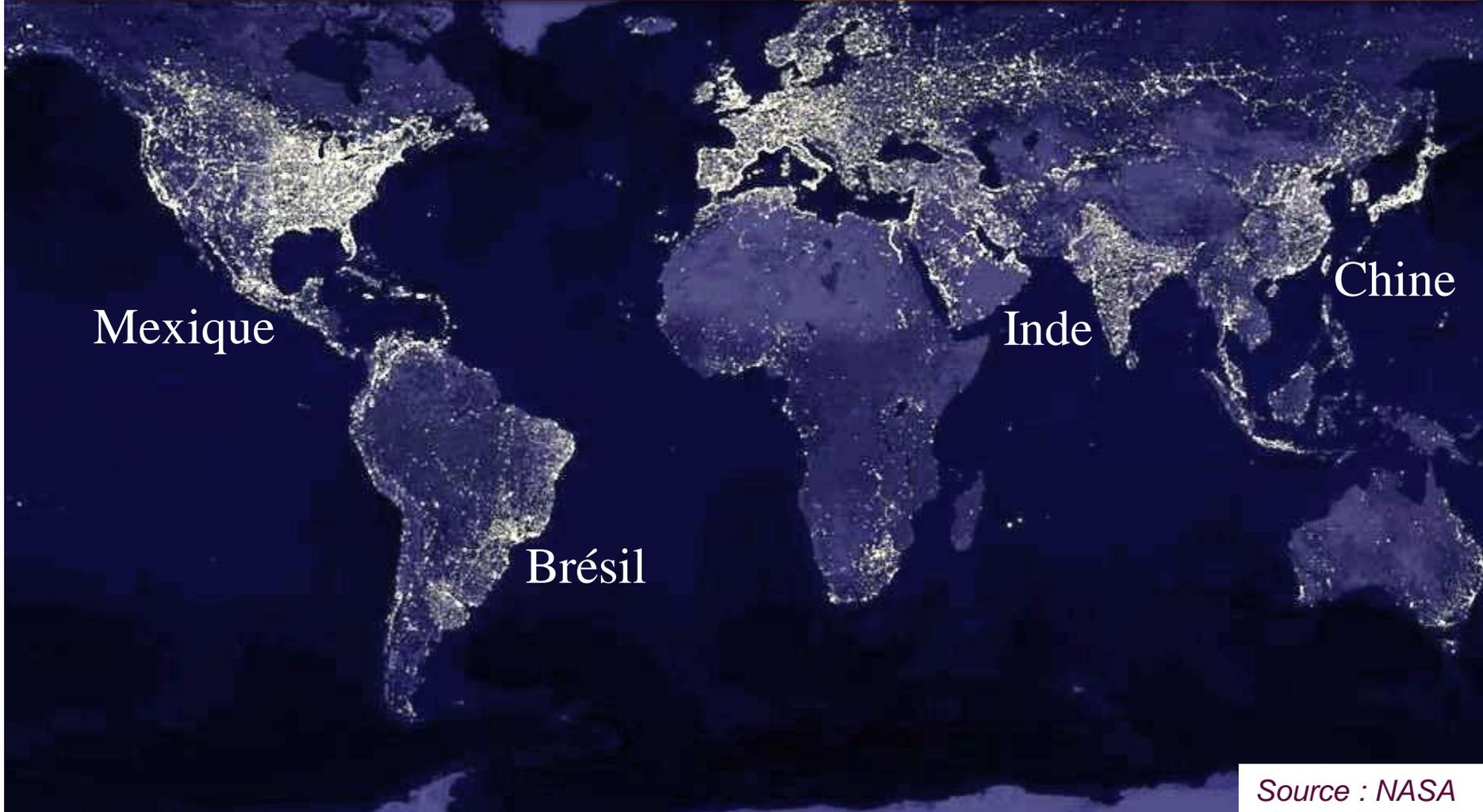
CONCLUSION



Source : NASA

Transport = 70% Pétrole consommé

Transport dépend à 98% Pétrole

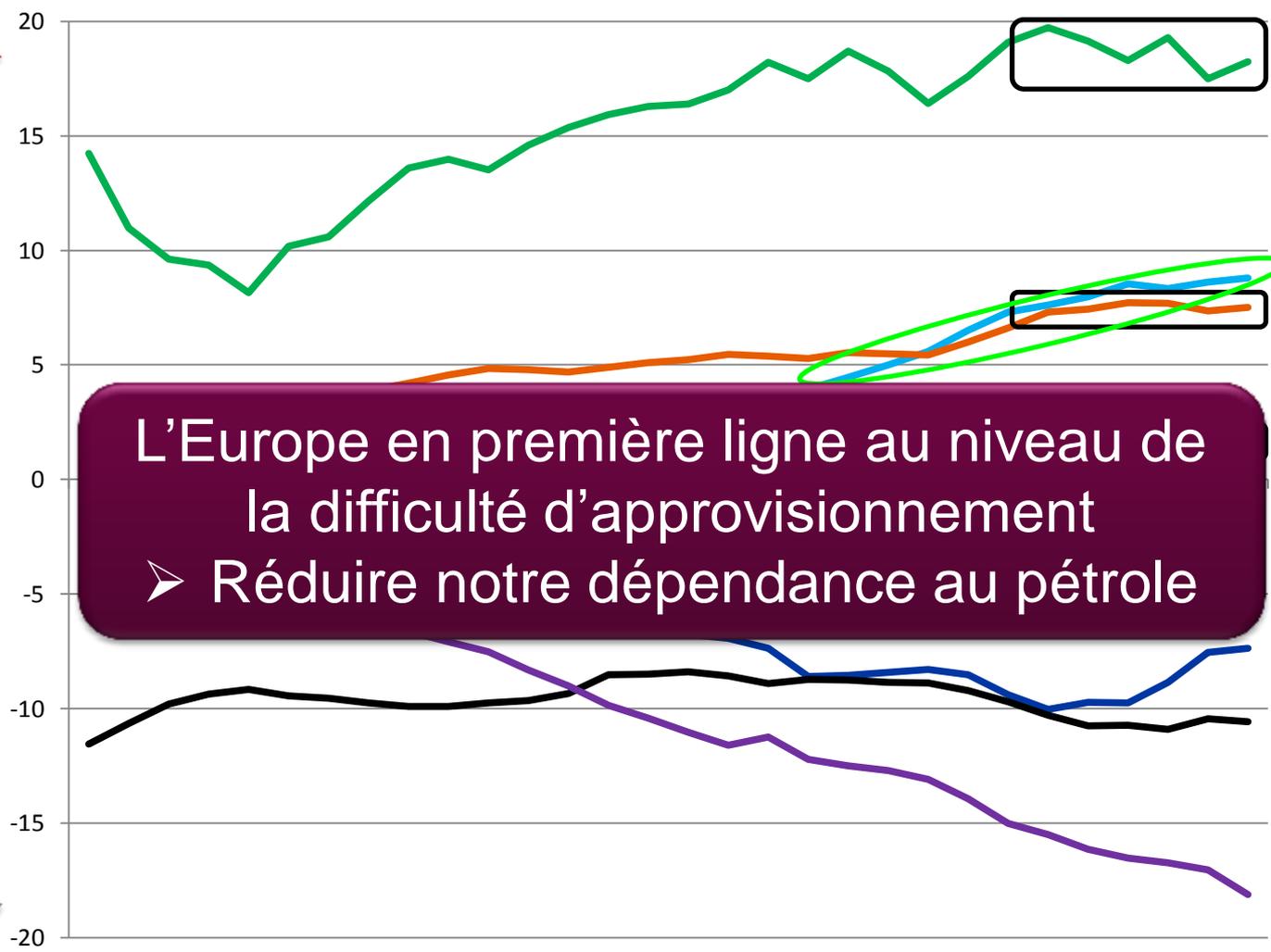
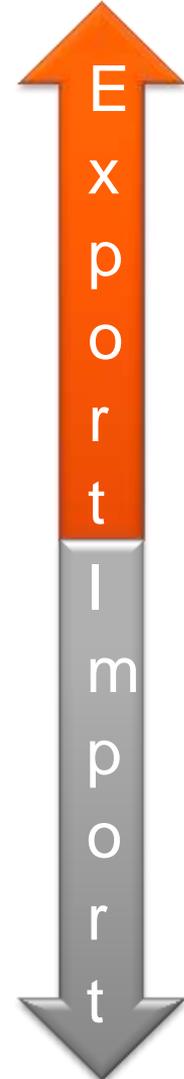


Source : NASA



Déclin des ressources énergétiques

↪ Evolutions des flux d'import/export pétroliers (Mbarils/jour)



Stagnation
Déclin

Croissance

L'Europe en première ligne au niveau de la difficulté d'approvisionnement
➤ Réduire notre dépendance au pétrole

- Golfe
- Eurasie
- Afrique
- Latine
- Amerique
- Europe
- Asie

MOTIVATIONS
PROBLEMATIQUE
METHODOLOGIE
RESULTATS
CONCLUSION

De nombreuses architectures électrifiées

Les véhicules électriques



Nissan Leaf



Tesla S



Renault Kangoo ZE



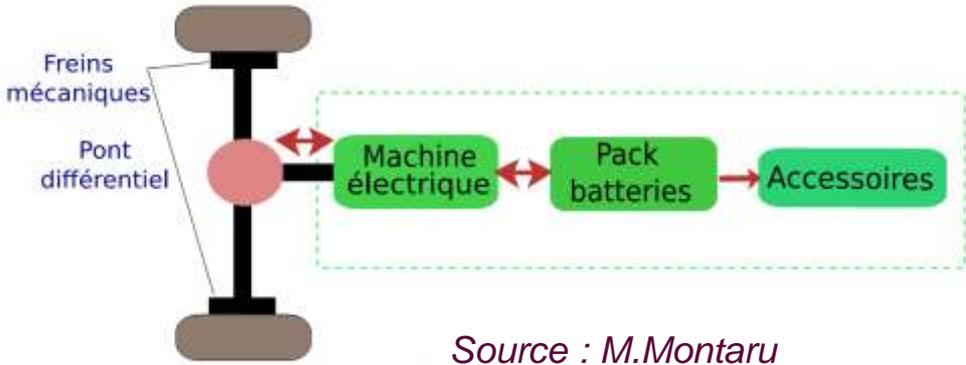
Renault Zoé



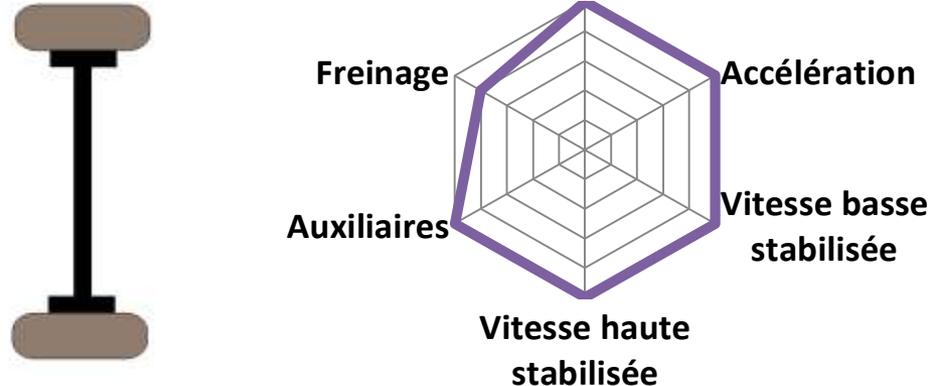
Renault Twizy



Peugeot e-Vivacity



Source : M.Montaru



De nombreuses architectures électrifiées

Les véhicules hybrides utilisant des batteries Lithium-ion



Toyota Prius V



Ford C-Max Hybrid



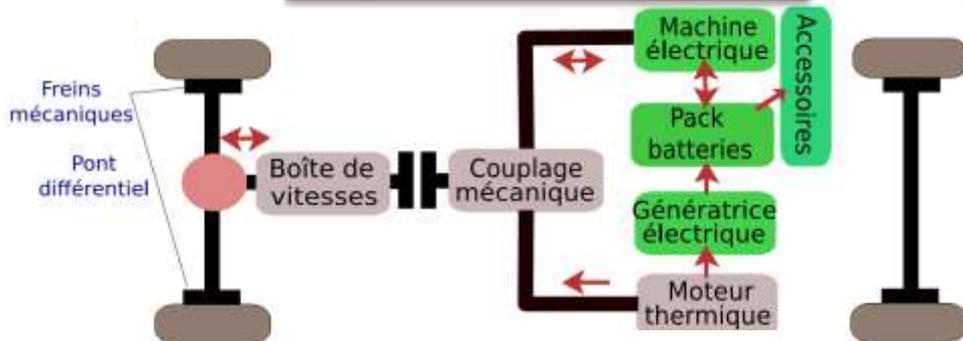
Ford Mondeo Hybrid



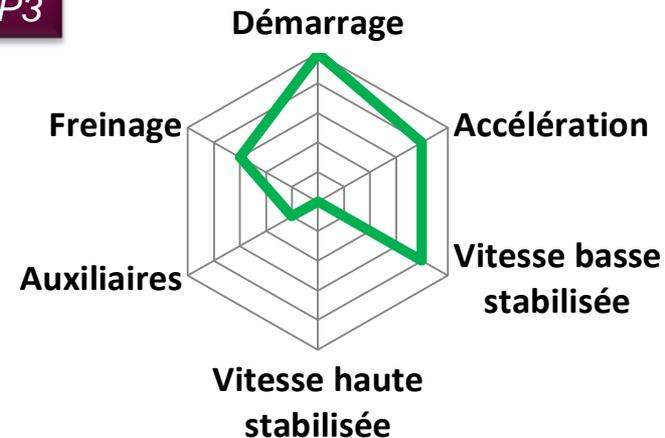
Peugeot 3008 Hybrid4 (NiMH)



Piaggio MP3



Source : M.Montaru



De nombreuses architectures électrifiées

Les véhicules électriques à prolongateur d'autonomie ou hybrides rechargeables



Toyota Prius Rechargeable



Ford C-Max Energi



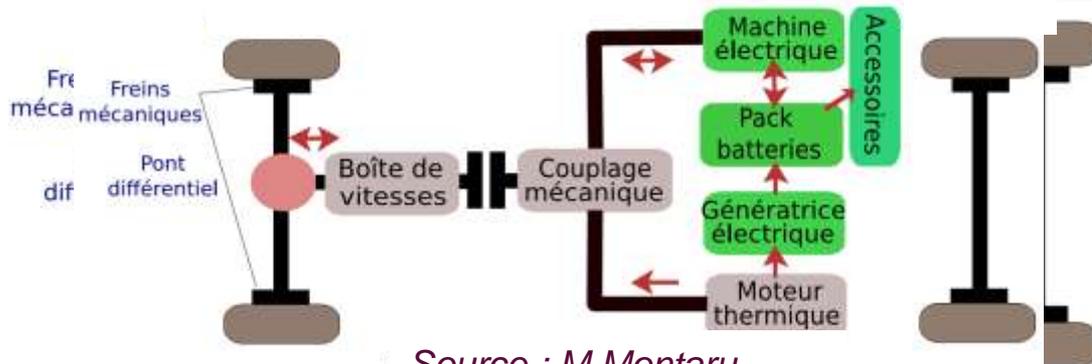
Ford Mondeo Energi



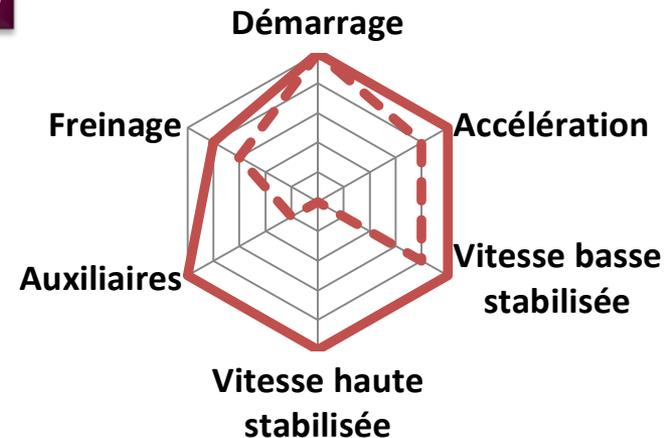
Chevrolet Volt



Fisker Karma



Source : M.Montaru

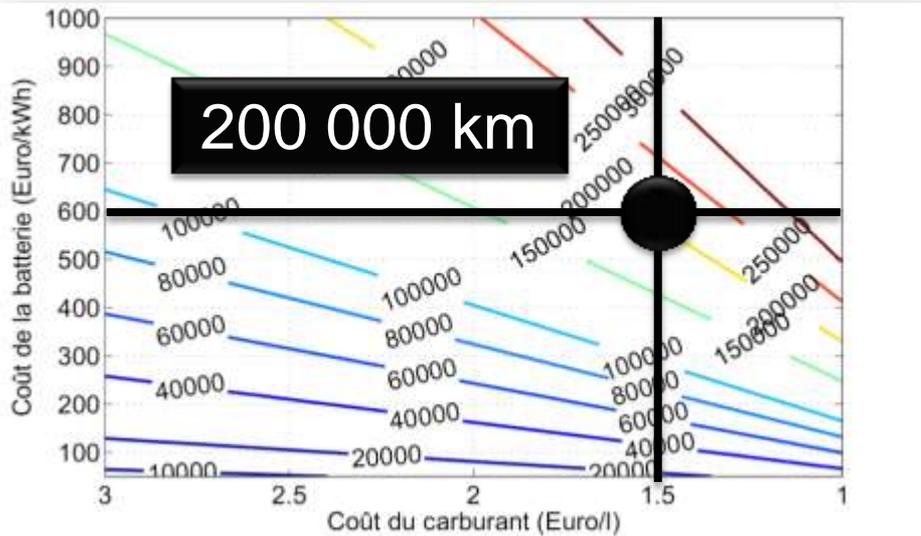




Opportunité économique d'un véhicule électrique face à un véhicule conventionnel

Seuil de rentabilité exprimé en kilomètres parcourus

Seuil de rentabilité exprimé en nombre de cycles de charge/décharge équivalents



Hypothèses

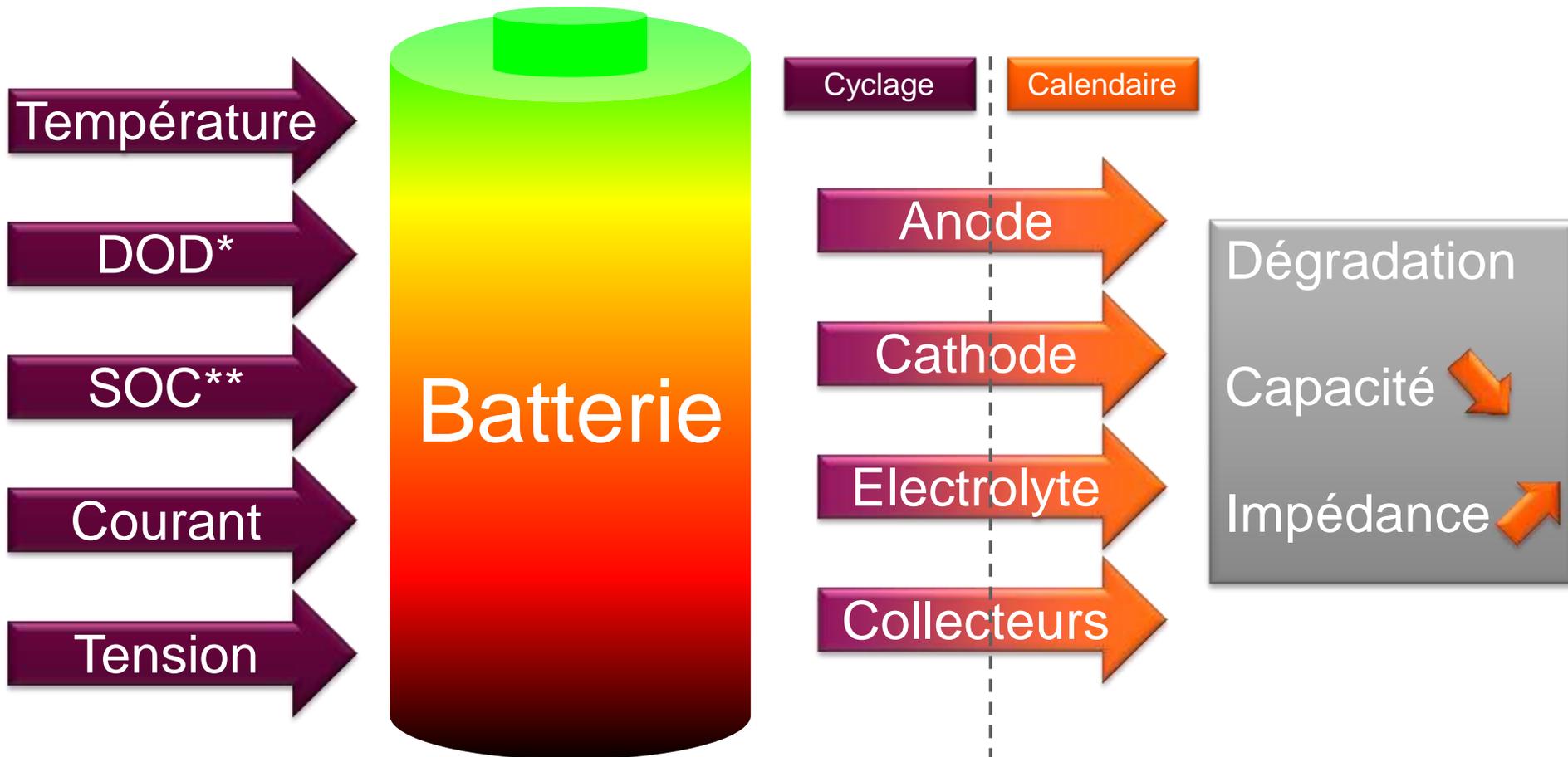
Coût de la batterie (Euro/kWh)

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Taille batterie | 25kWh |
| Autonomie réelle | ~100km |
| Consommation essence | 6l/100 km |
| Consommation électrique | 200Wh/km (à la prise) |
| Coût électricité | 9.36c€/kWh (heures creuses) |
| Rendement charge/décharge | 90% |

Un seuil de rentabilité long à atteindre

contraintes sur la durée de vie de la batterie

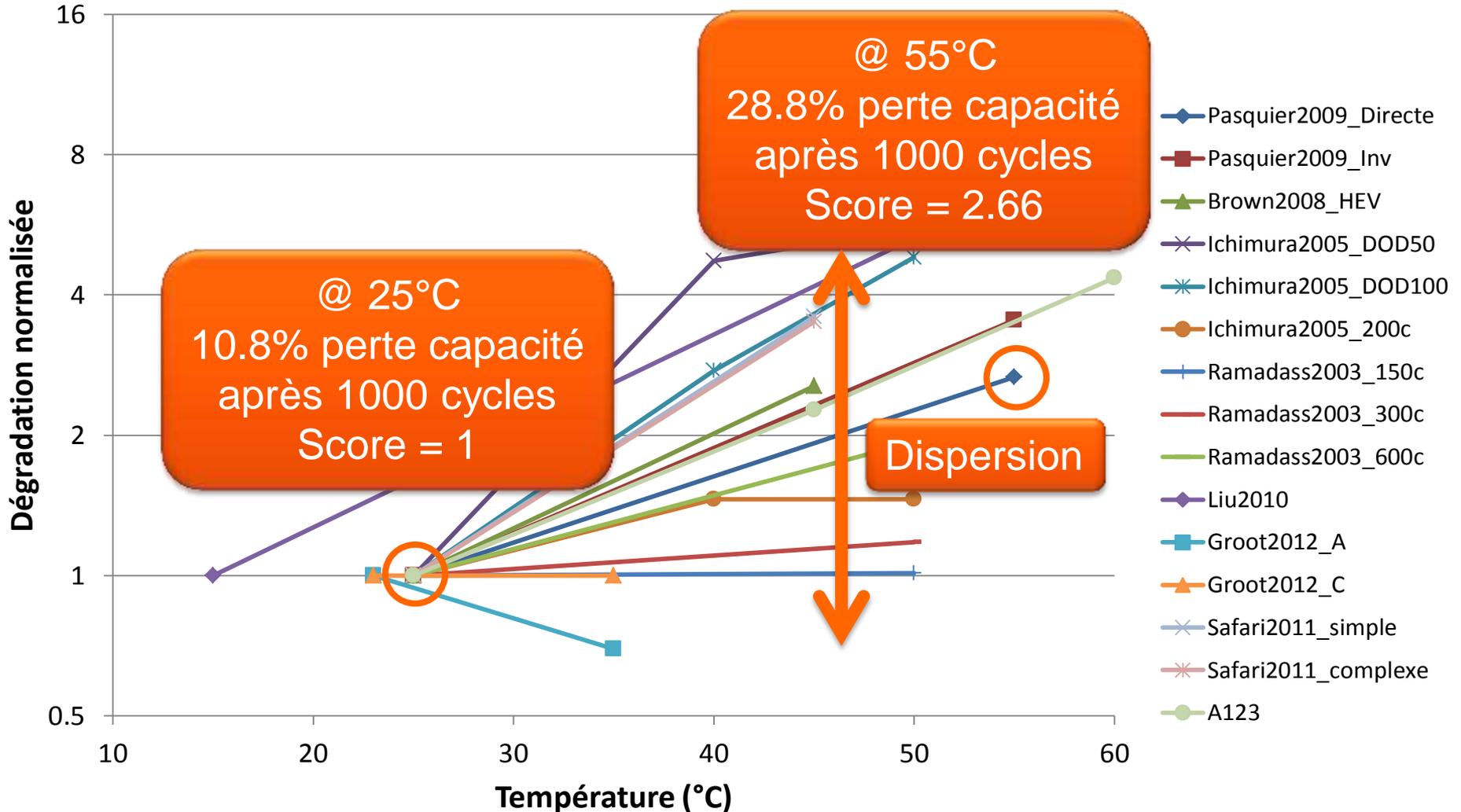
Des mécanismes de dégradation complexes, nombreux et mal quantifiés



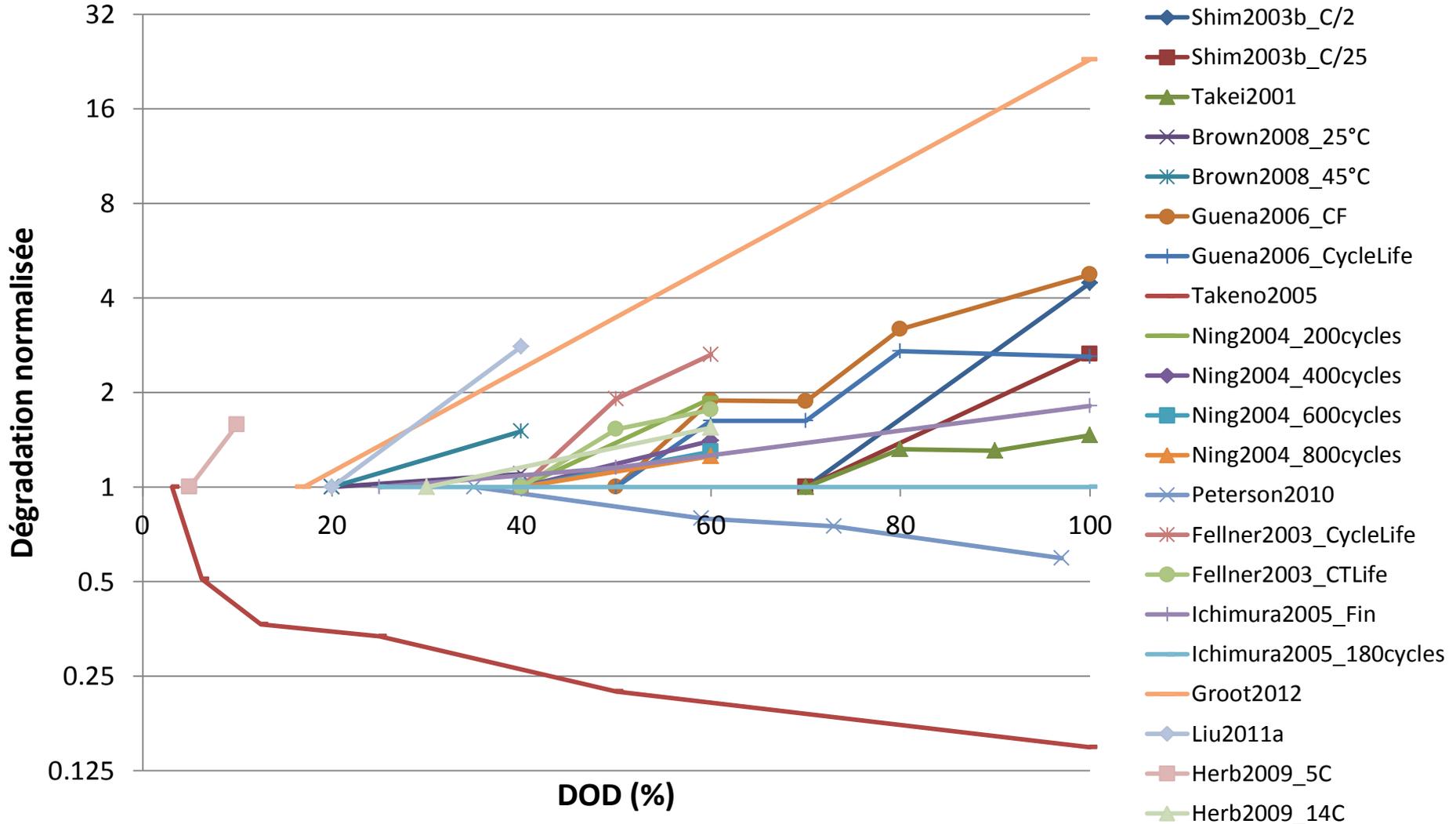
*DOD : Depth Of Discharge (Profondeur de décharge)

**SOC : State Of Charge (Etat de charge)

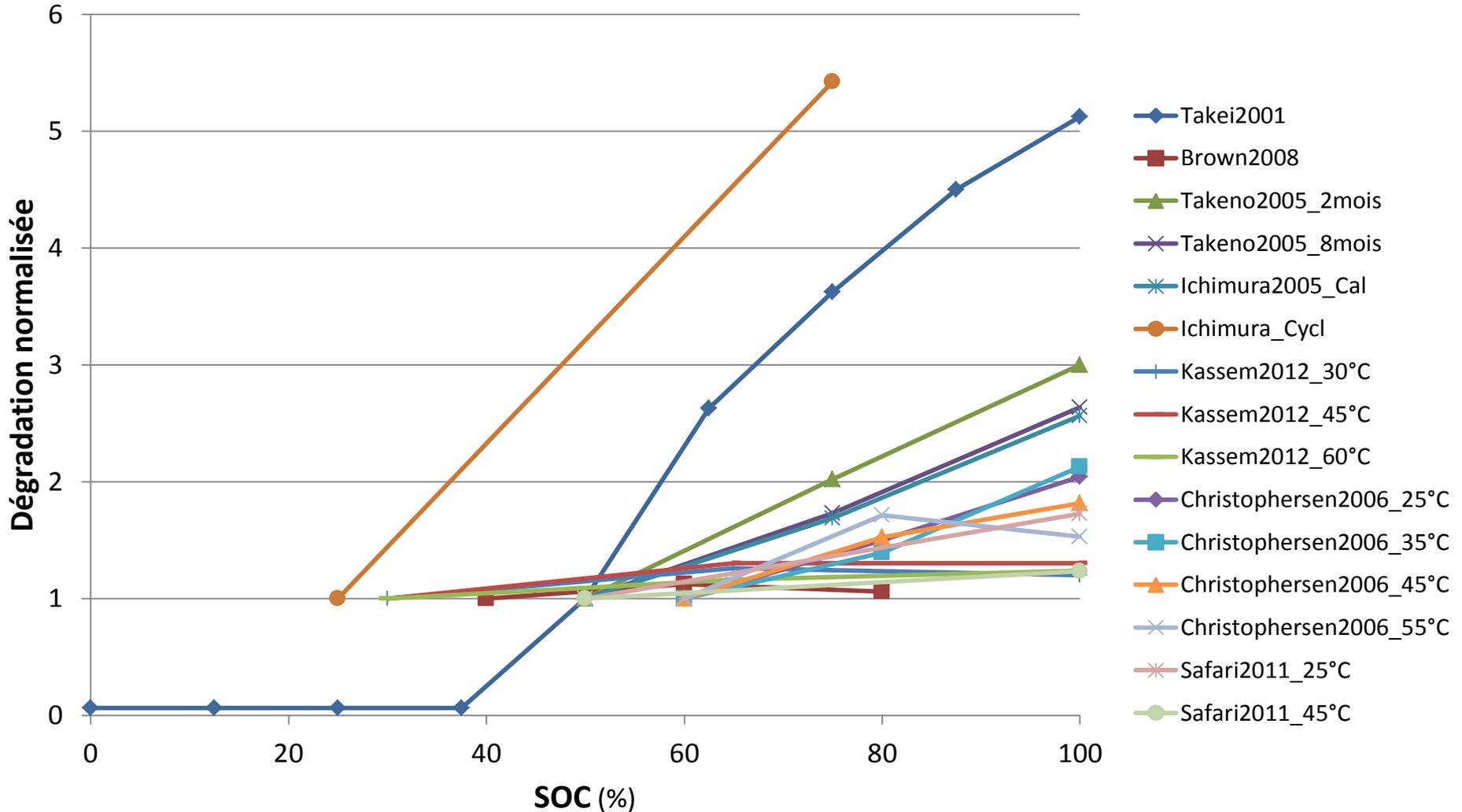
Effet de la température sur le rythme de dégradation



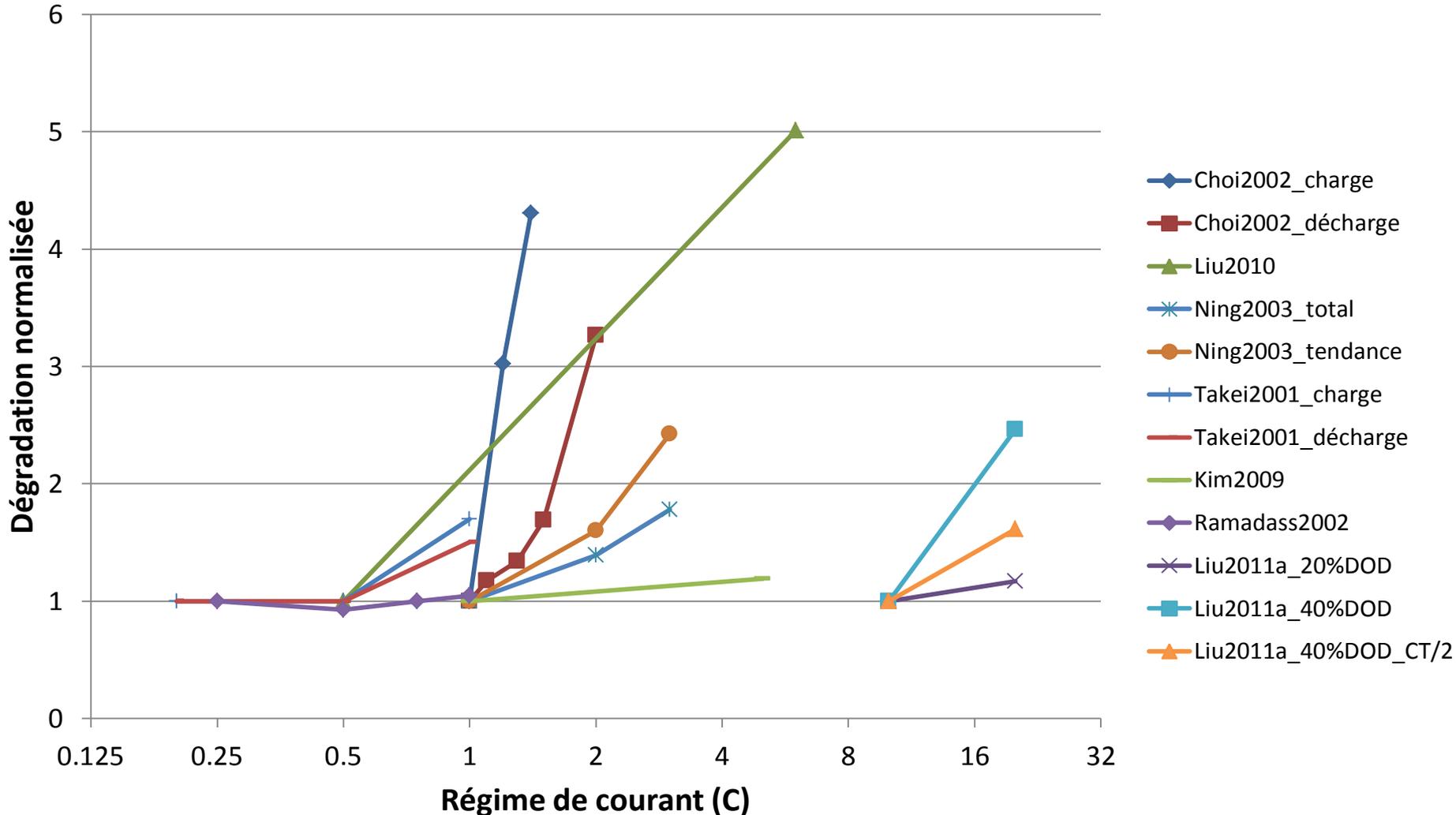
Effet de la DOD sur le rythme de dégradation



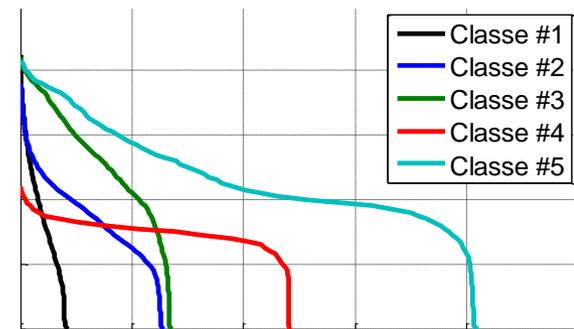
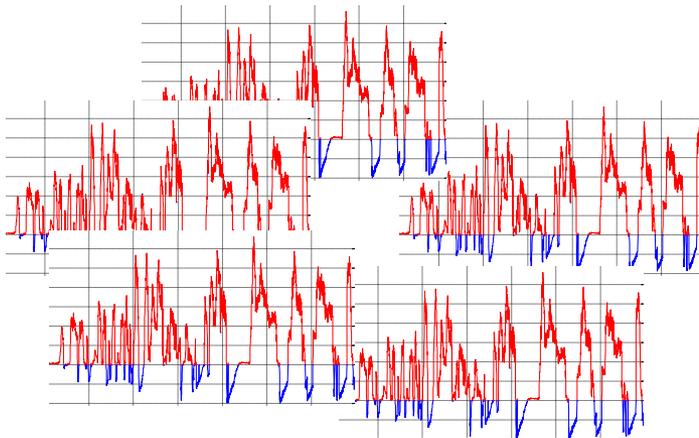
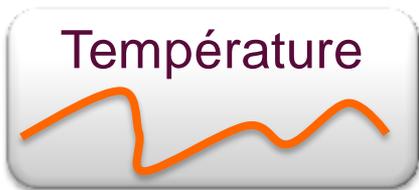
Effet du SOC sur le rythme de dégradation



Effet du courant sur le rythme de dégradation



Comment évaluer la durée de vie des batteries Lithium-ion dans les applications de transport électrifié caractérisés par de fréquentes variations des paramètres d'usage ?

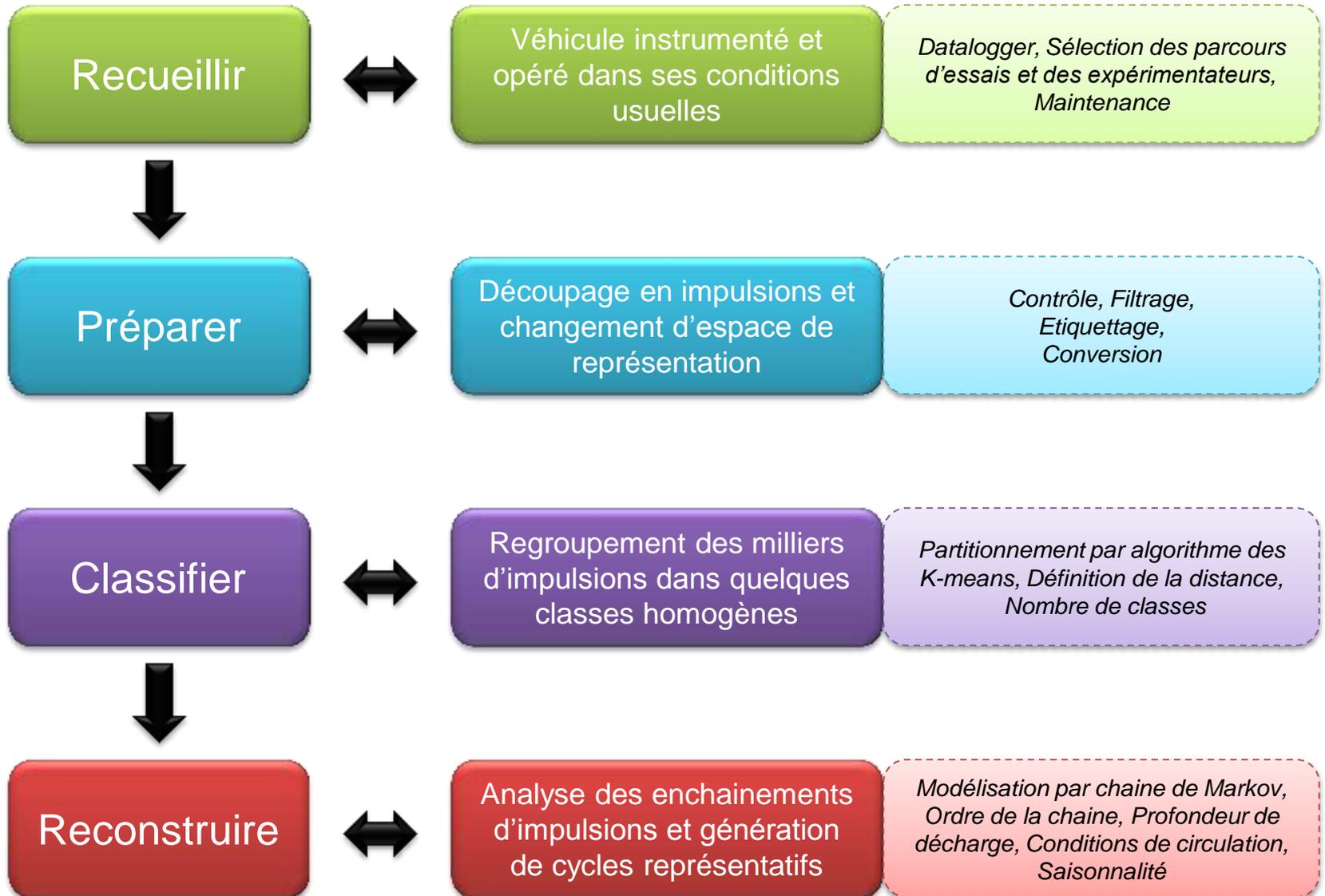


Certains de trajets → Sollicitations typiques simples à manipuler

Campagnes de vieillissement simplifiées mais réalistes

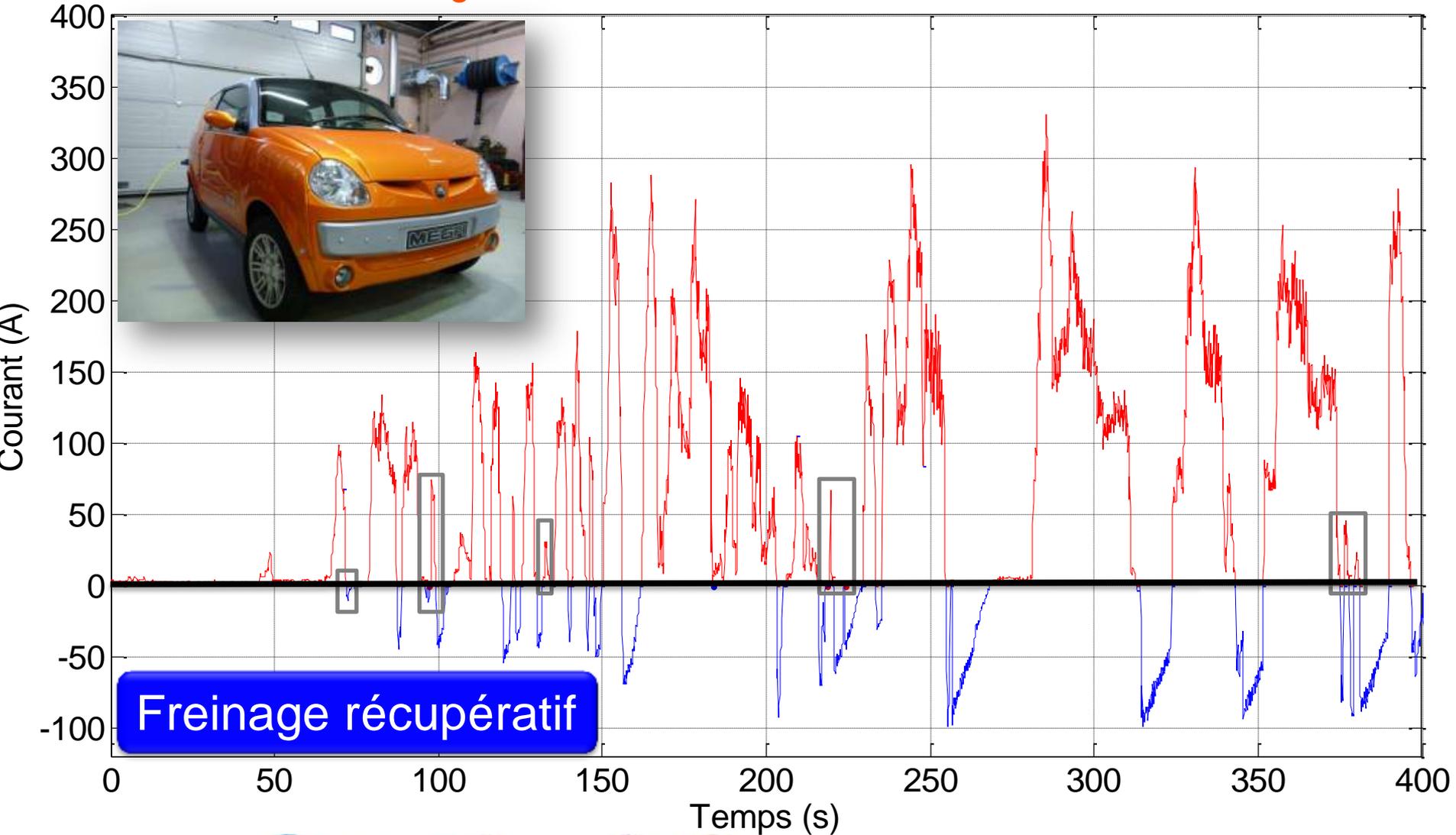
MOTIVATIONS
PROBLEMATIQUE
METHODOLOGIE
RESULTATS
CONCLUSION

Démarche retenue



Découpe en impulsions de courant

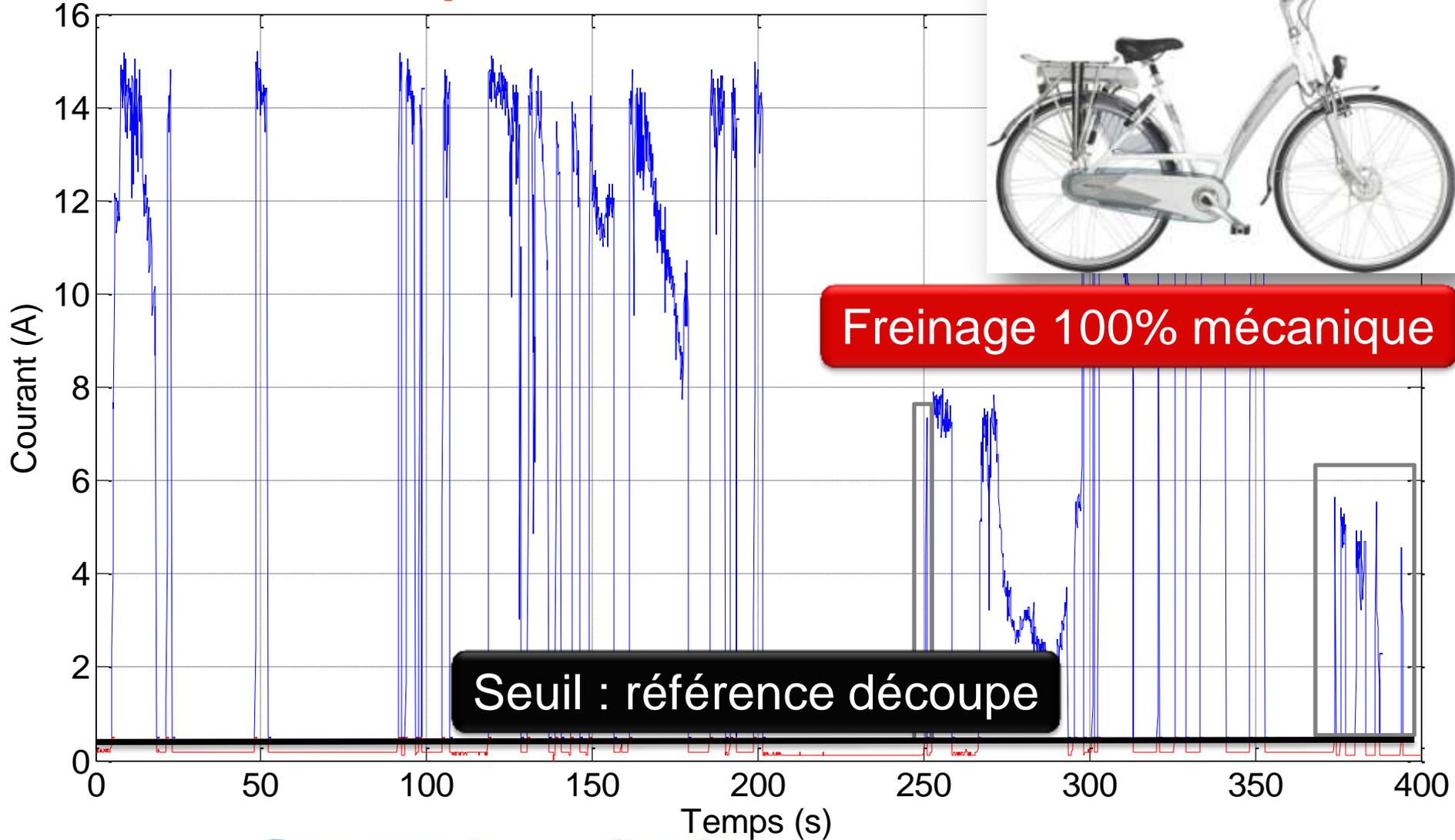
Profil de courant à 2 signes



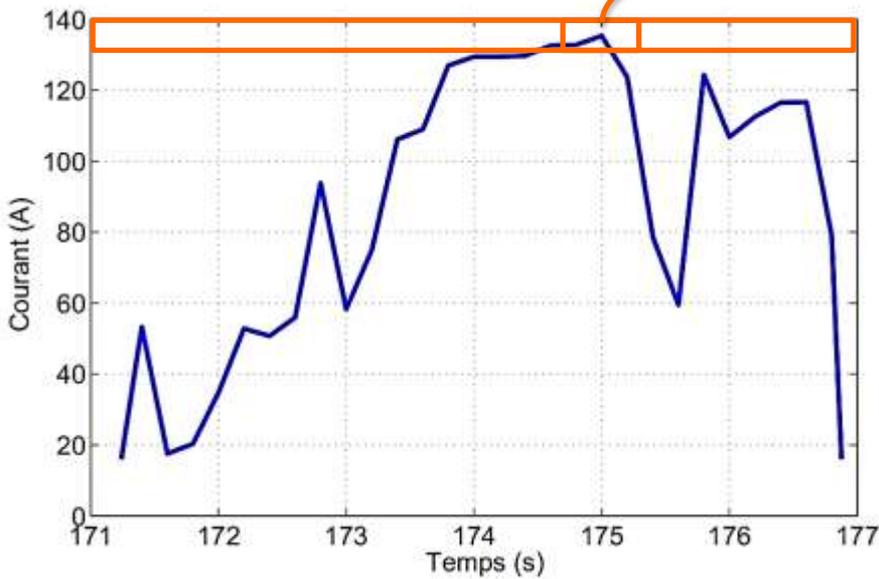
Freinage récupératif

Découpe en impulsions de courant

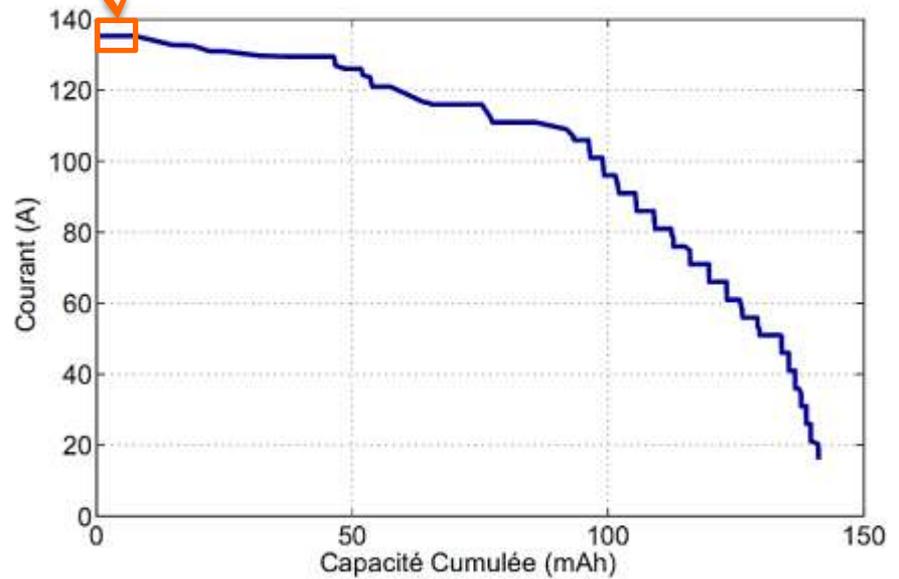
Profil de courant à 1 signe



Contribution entre 130 et 140A

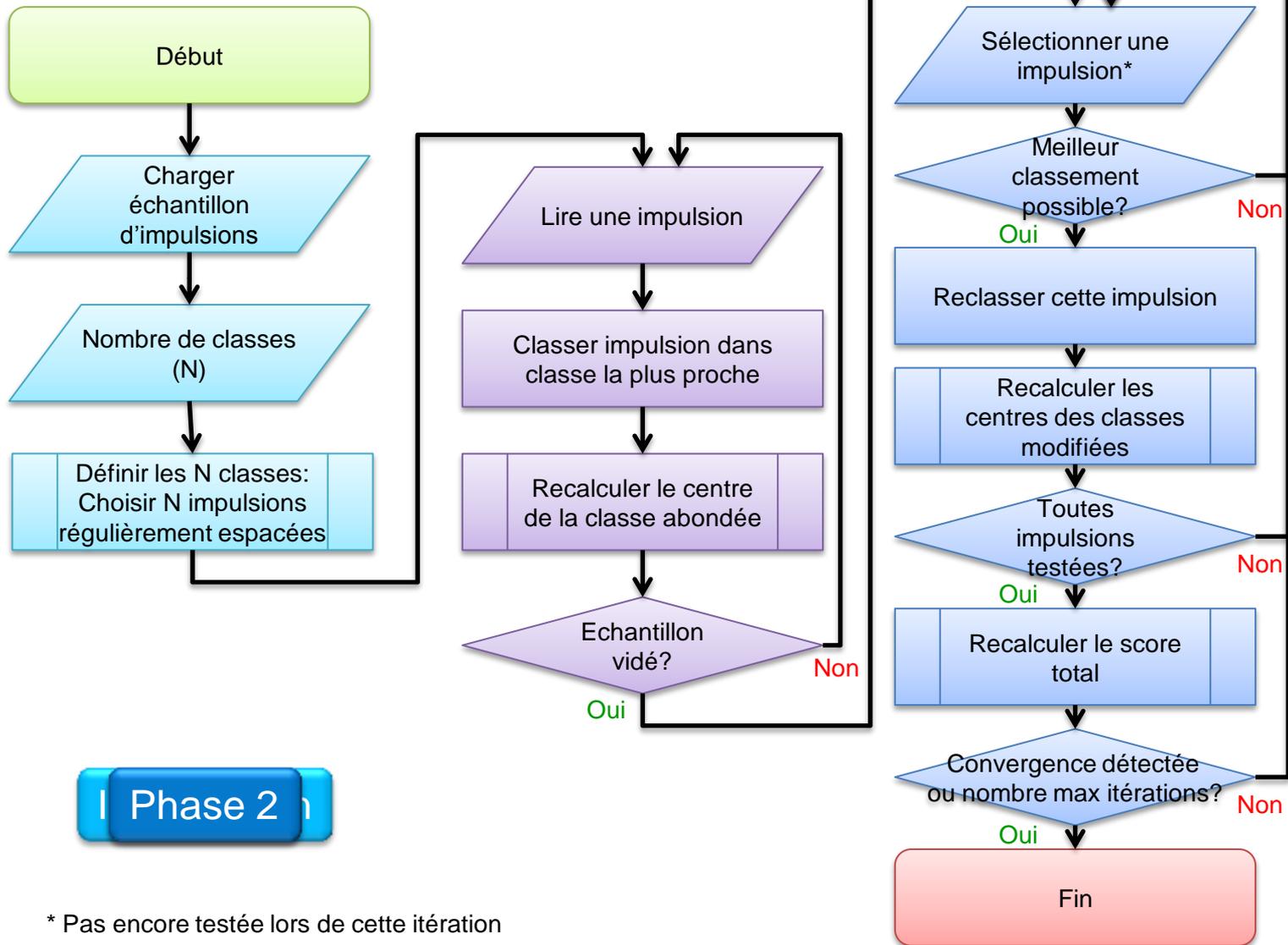


Représentation temporelle



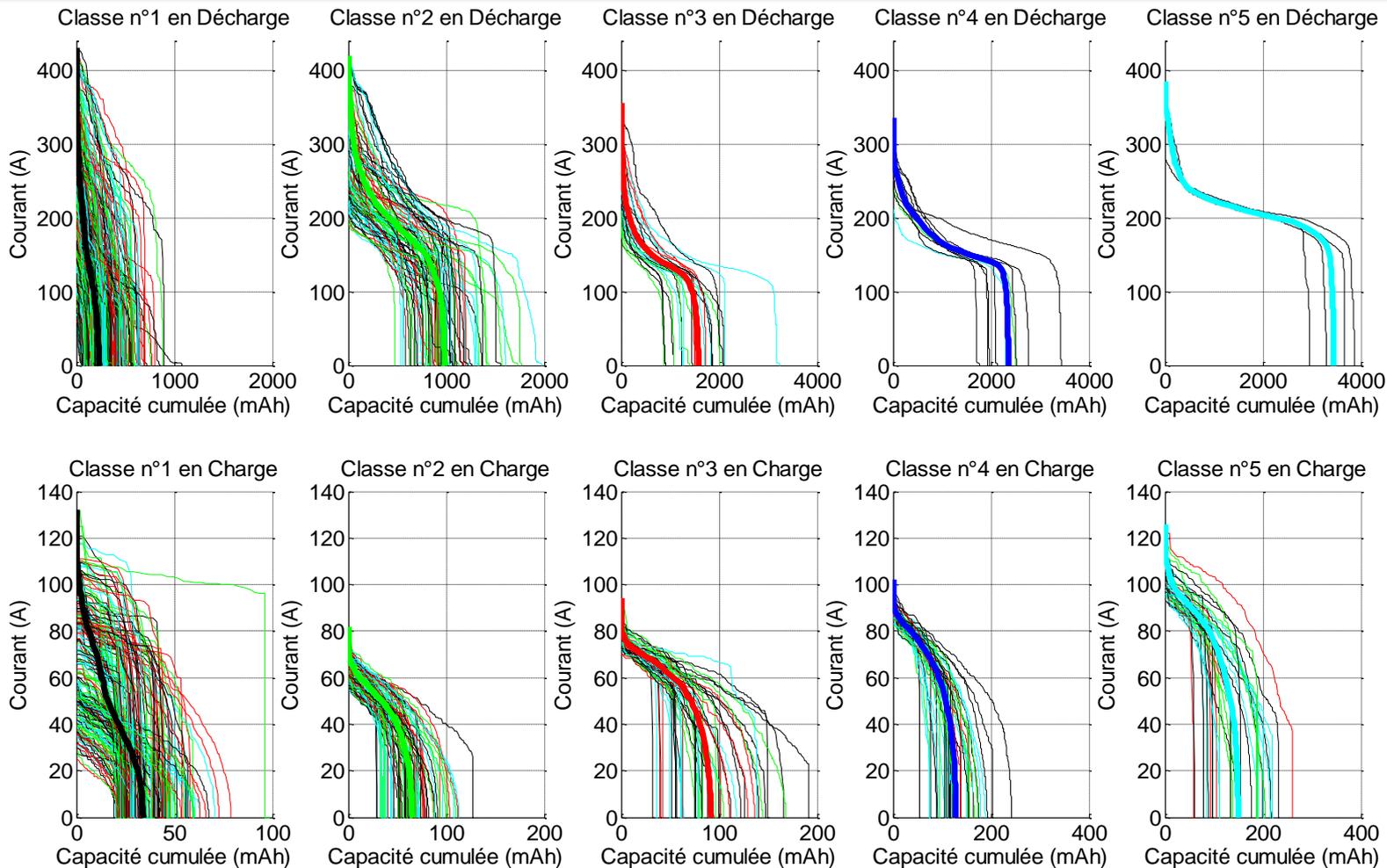
Représentation transformée

Algorithme des K-means



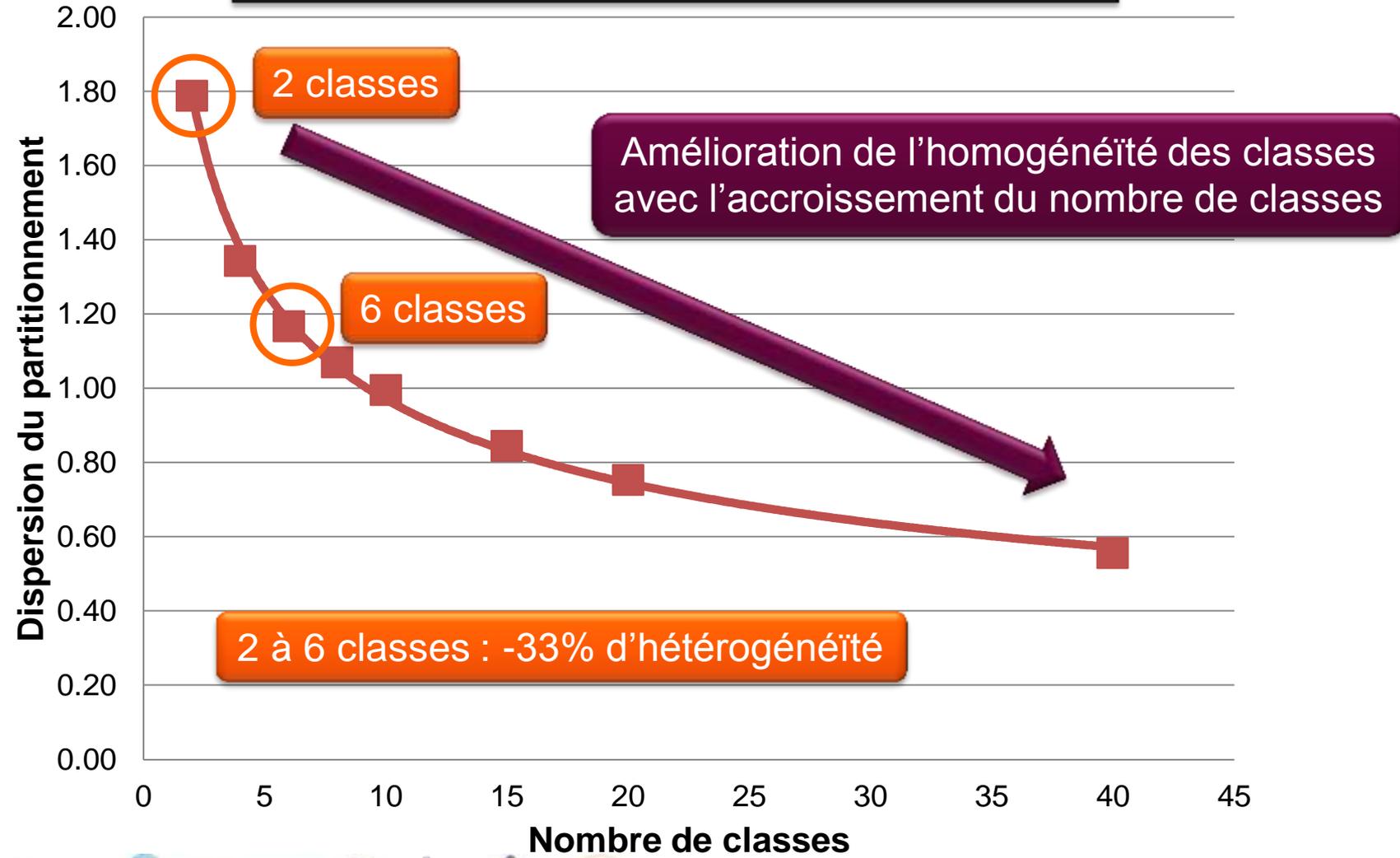
* Pas encore testée lors de cette itération

Représentation des impulsions typiques et des impulsions constituant chaque classe

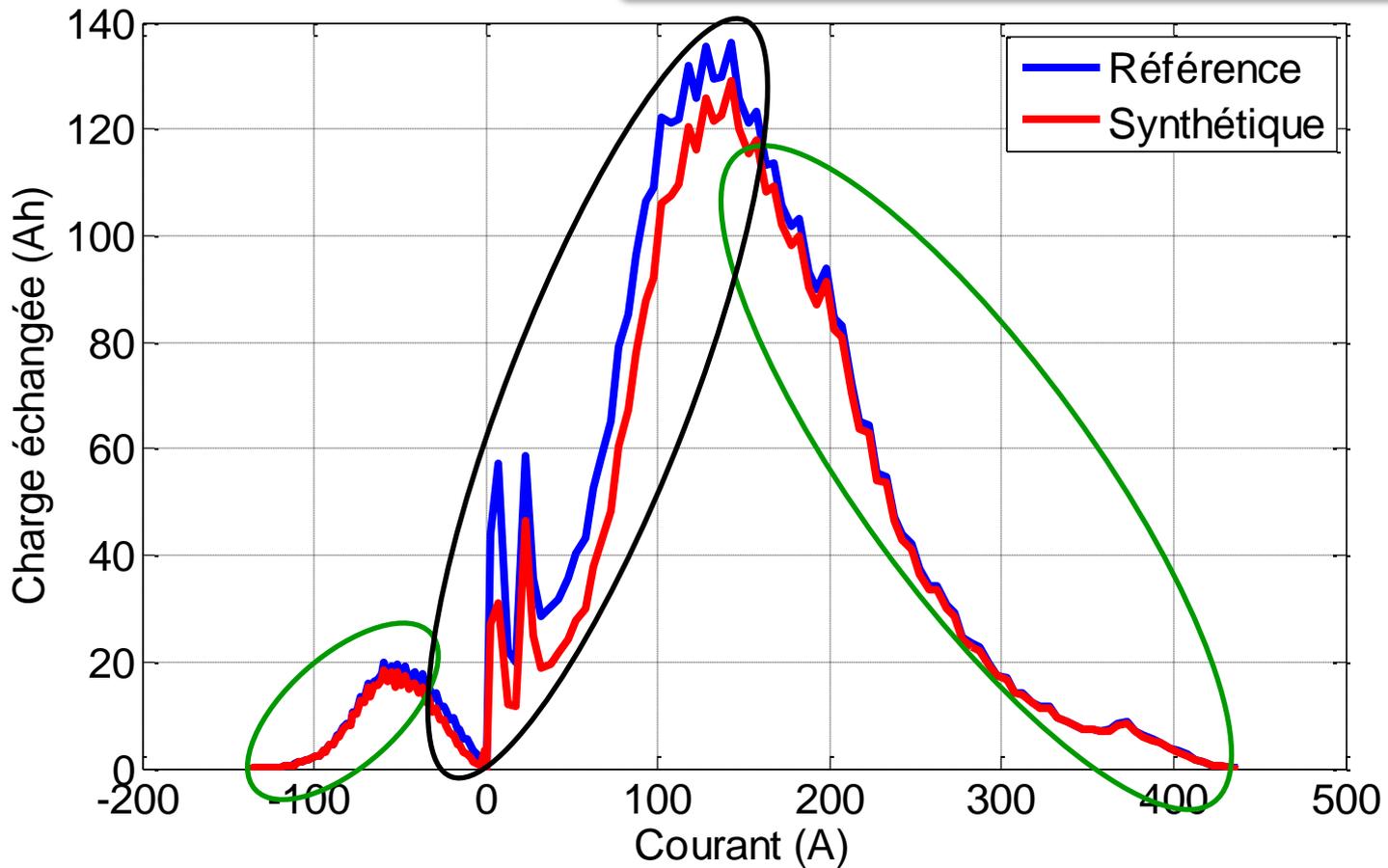


Choix du nombre de classes

Evolution de la performance de partitionnement en fonction du nombre de classes demandé



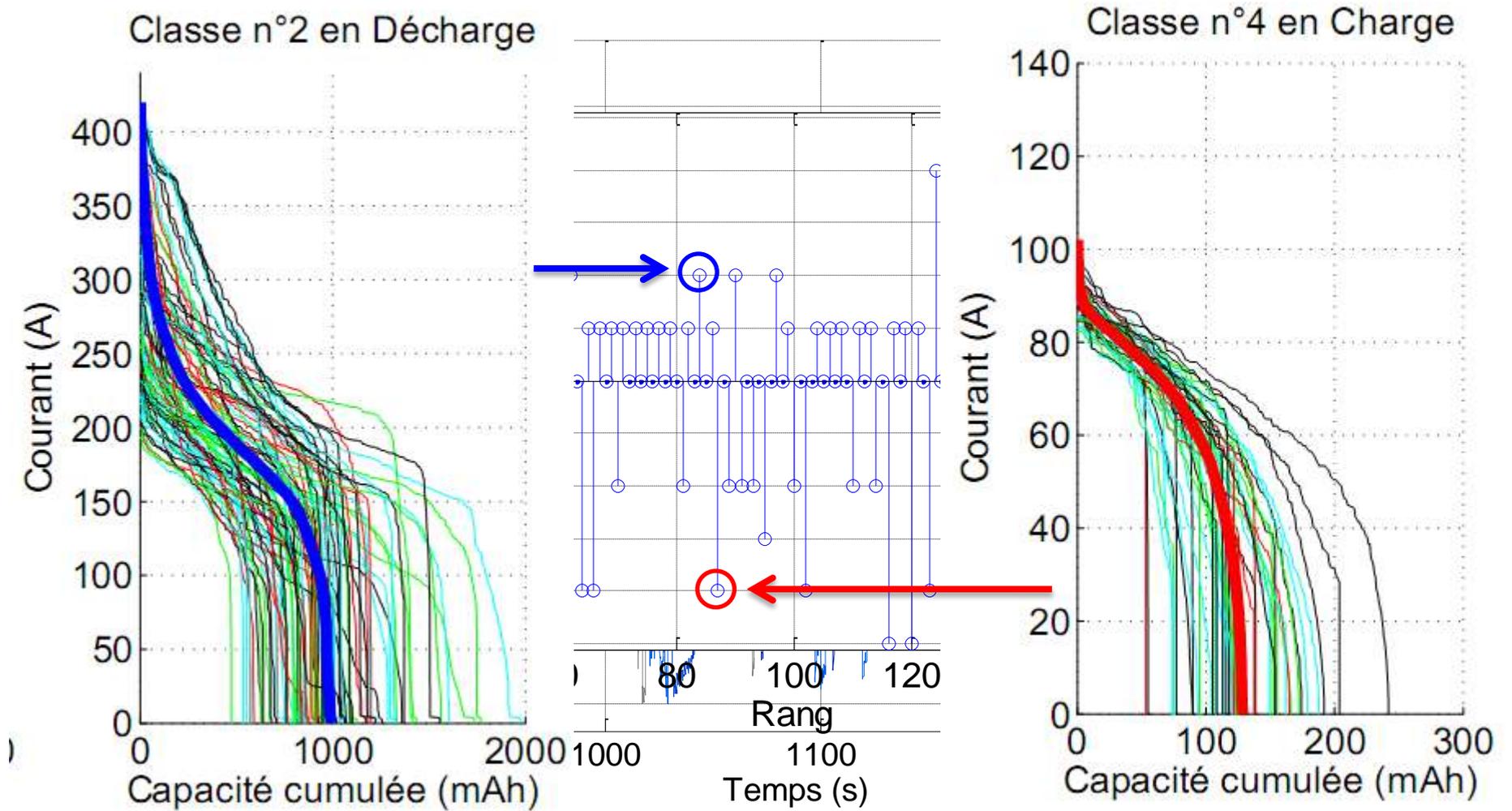
Evictions des impulsions jugées mineures



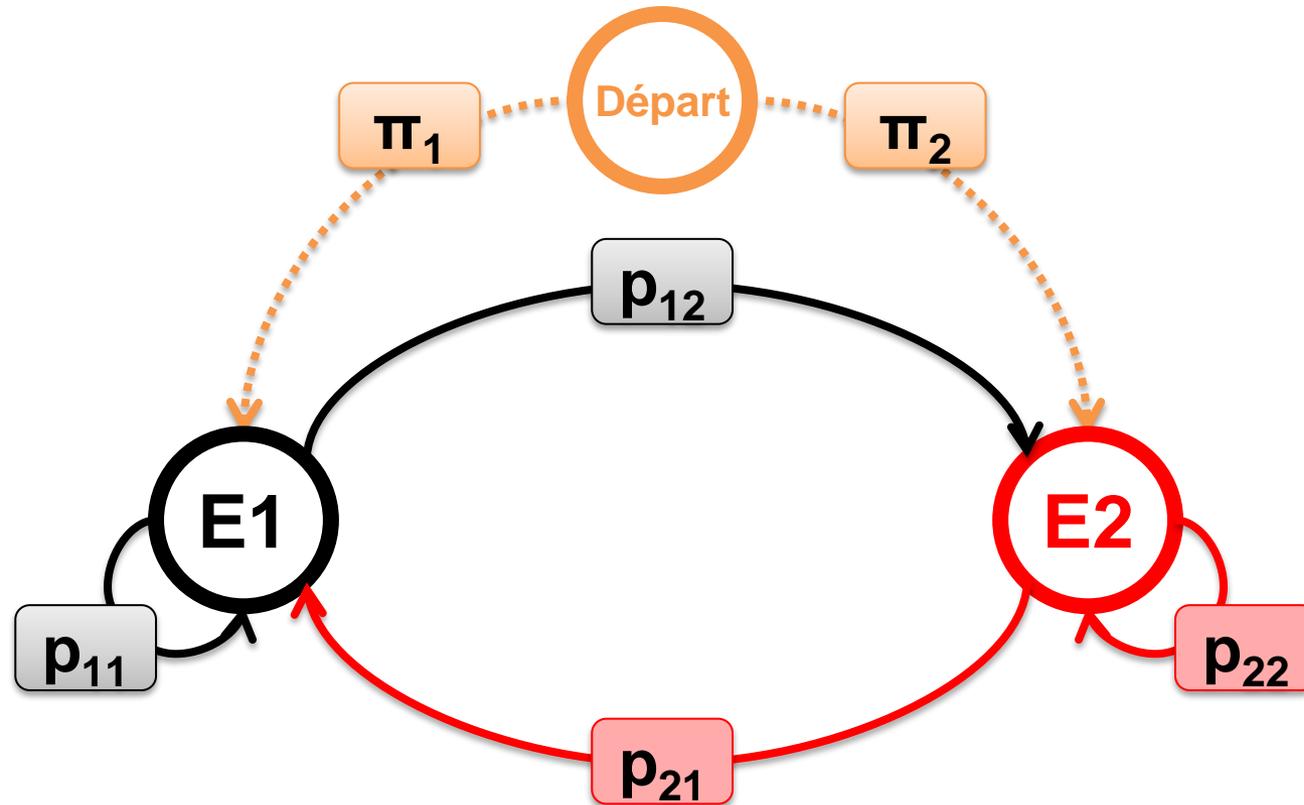
Référence : profils de courant non traités (originaux)

Synthétique : impulsions typiques et leurs proportions

↳ Séquence des classes d'impulsion



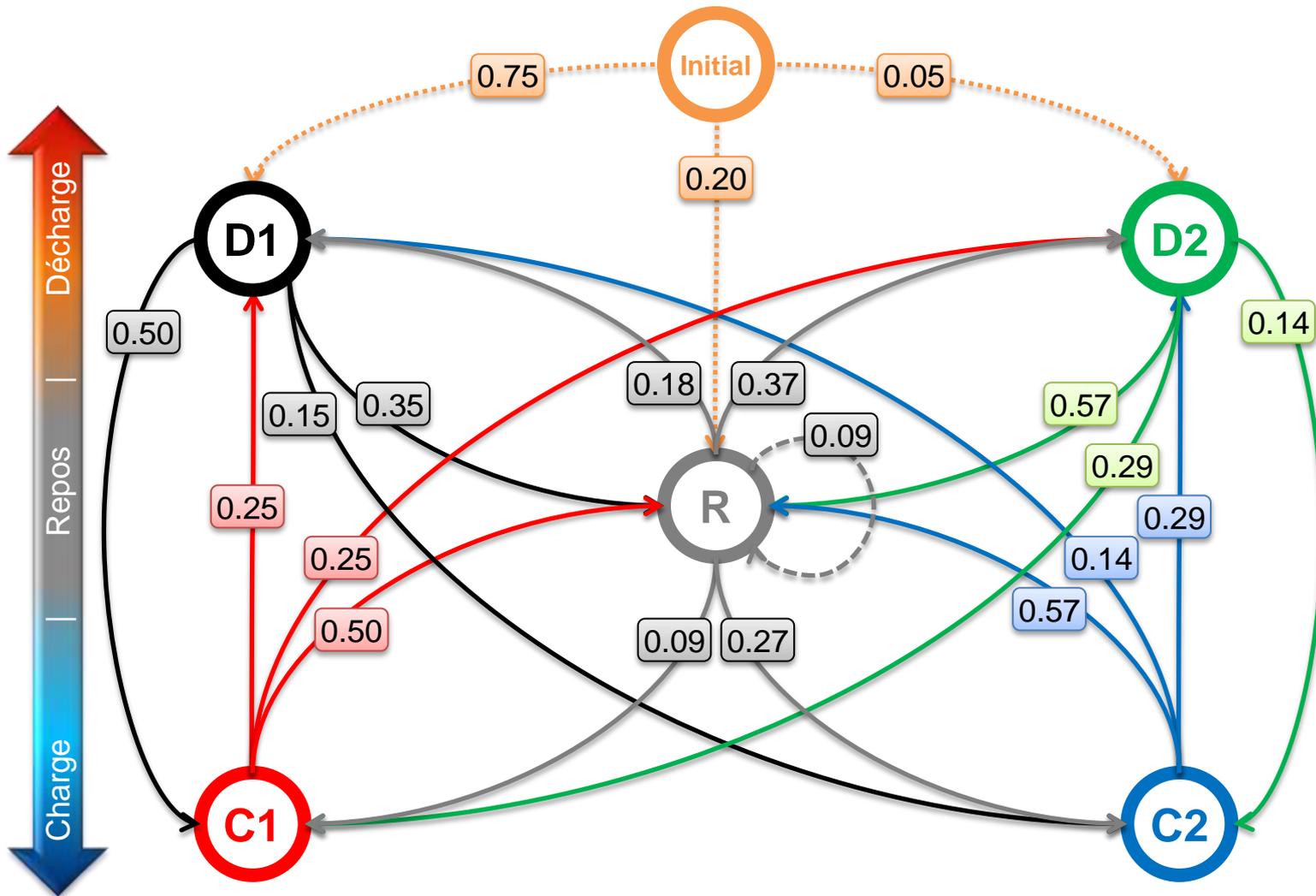
↳ Chaîne de Markov basique à 2 états



$$\Pi = \left(\pi_1 \quad \pi_2 \right)$$

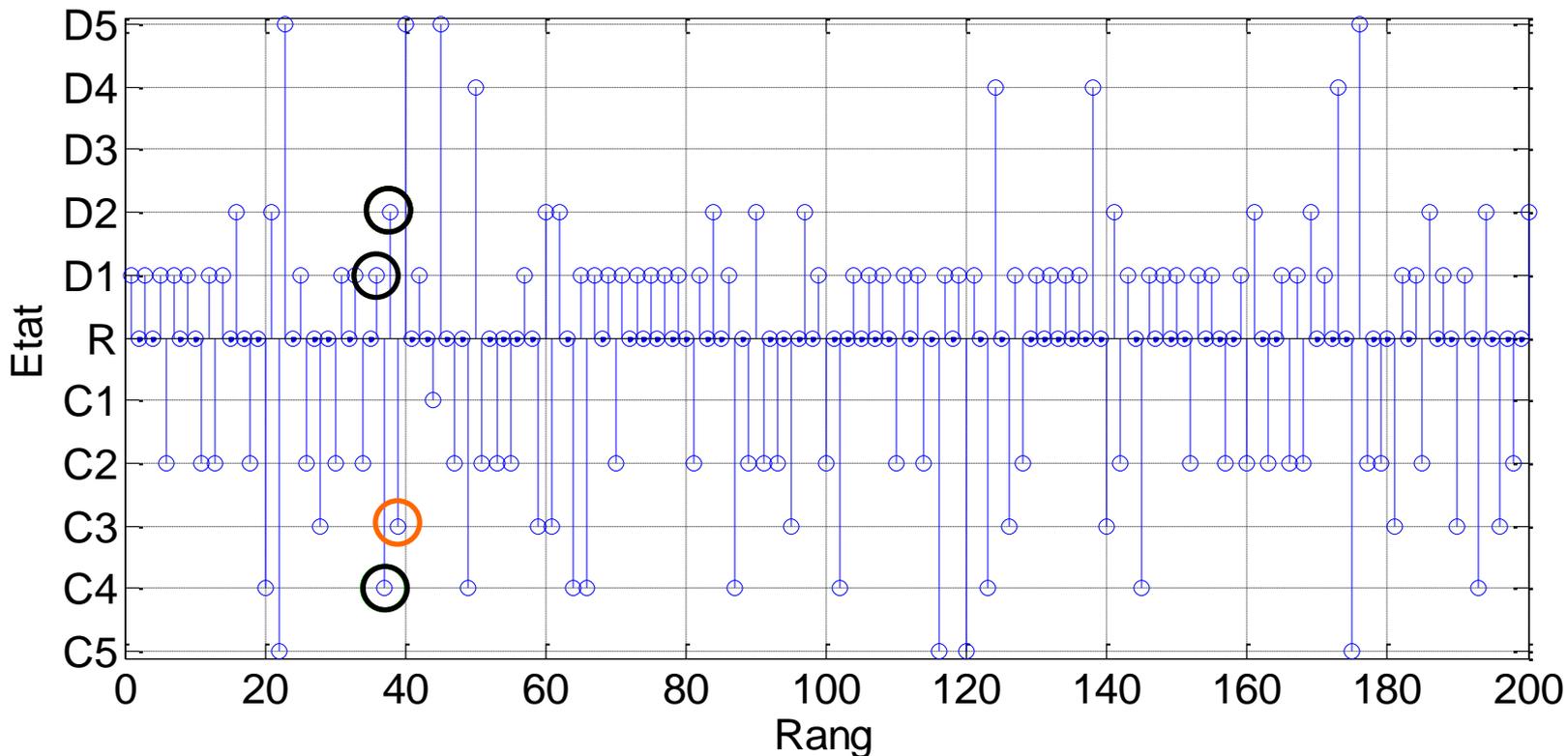
$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} E1 & E2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} E1 \\ E2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Chaine de Markov appliquée



Prendre en compte un présent plus « large »

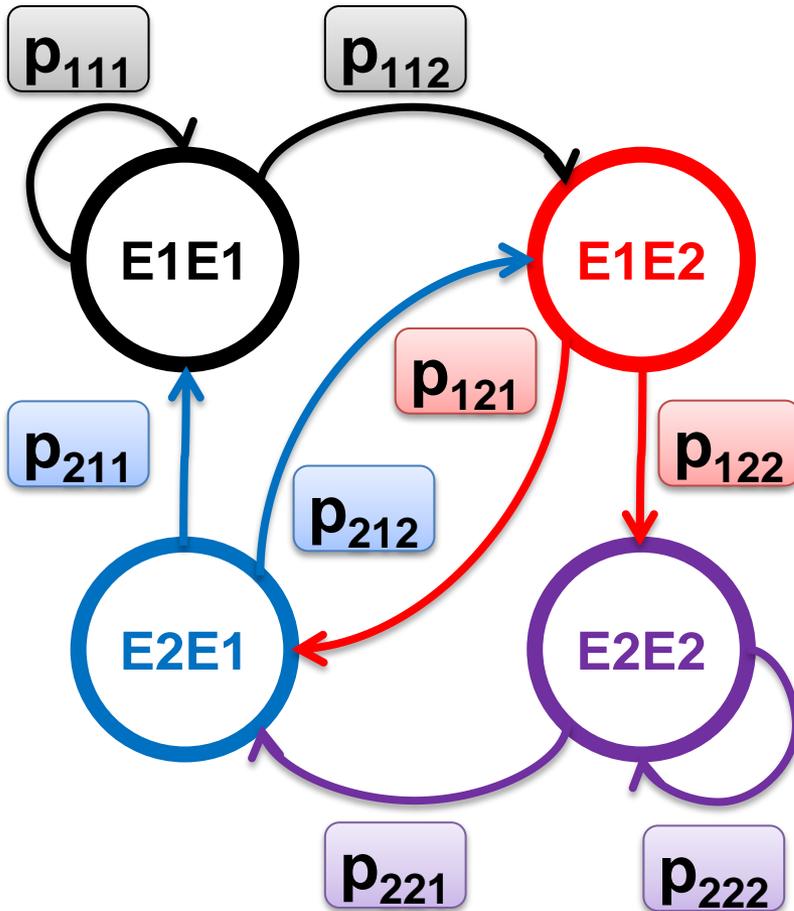
- ordre 1
- ordre 2
- ordre 3



Comptabilisation d'une transition D1C4D2 → C3

Chaîne de Markov à un ordre supérieur à 1

↳ Chaîne de Markov basique à 2 états (E1, E2) à l'ordre 2



Etat suivant : E1

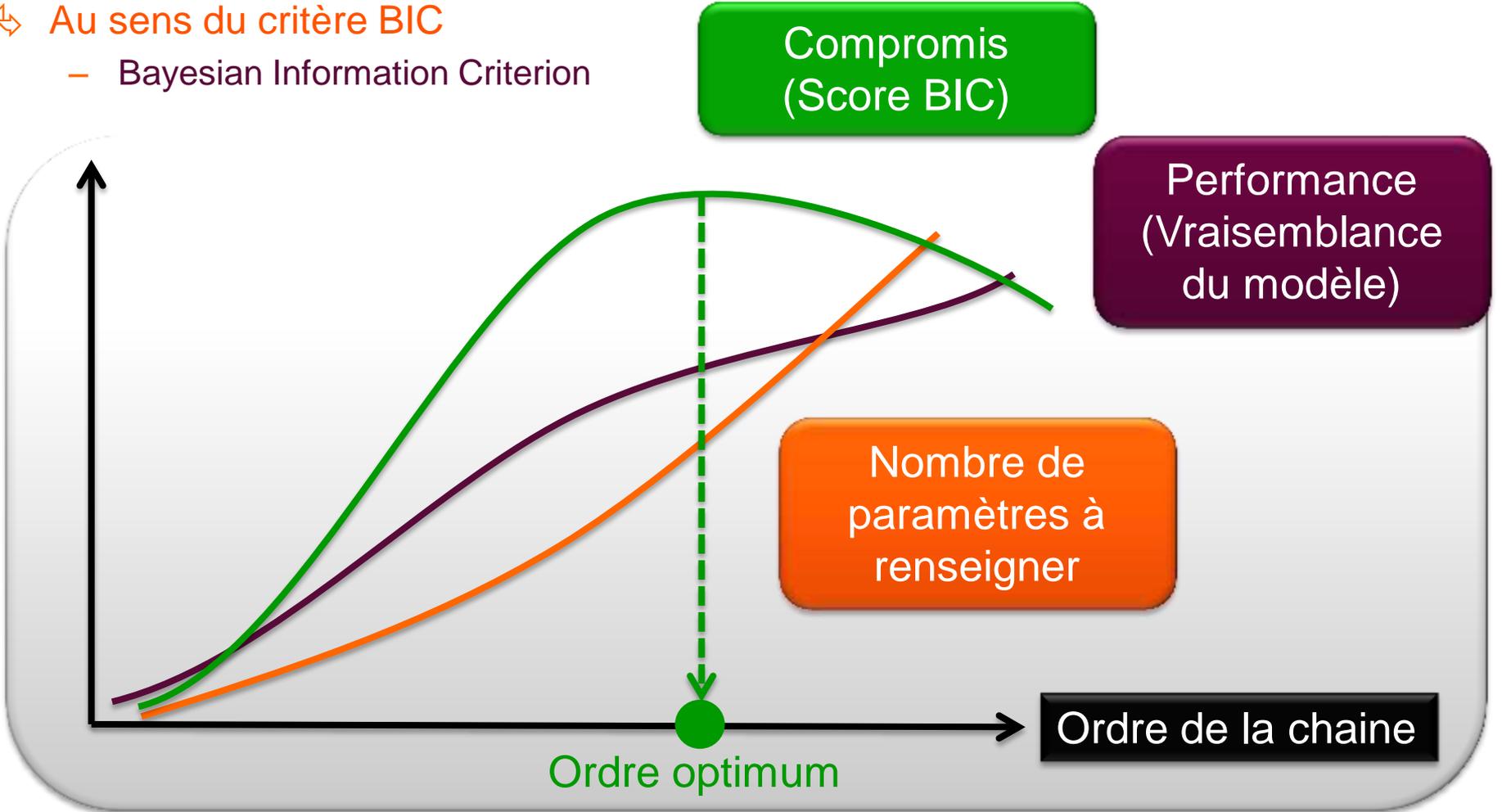
Etat suivant : E2

$$\pi = (\pi_{11} \pi_{12} \pi_{21} \pi_{22})$$

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} E1 & E2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} E11 \\ E12 \\ E21 \\ E22 \end{matrix} & \begin{pmatrix} p_{111} & p_{112} \\ p_{121} & p_{122} \\ p_{211} & p_{212} \\ p_{221} & p_{222} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Choix de l'ordre optimal

- ↳ Au sens du critère BIC
 - Bayesian Information Criterion



MOTIVATIONS
PROBLEMATIQUE
METHODOLOGIE
RESULTATS
CONCLUSION

Véhicules étudiés



Aixam Megacity
Electrique



Toyota Prius II
Hybride



Sparta eMotion C2
VAE



Irisbus Cristalis
Trolleybus



Kalkhoff Agattu
VAE

*VAE : Vélo à Assistance Electrique

1^{er} cas appliqué

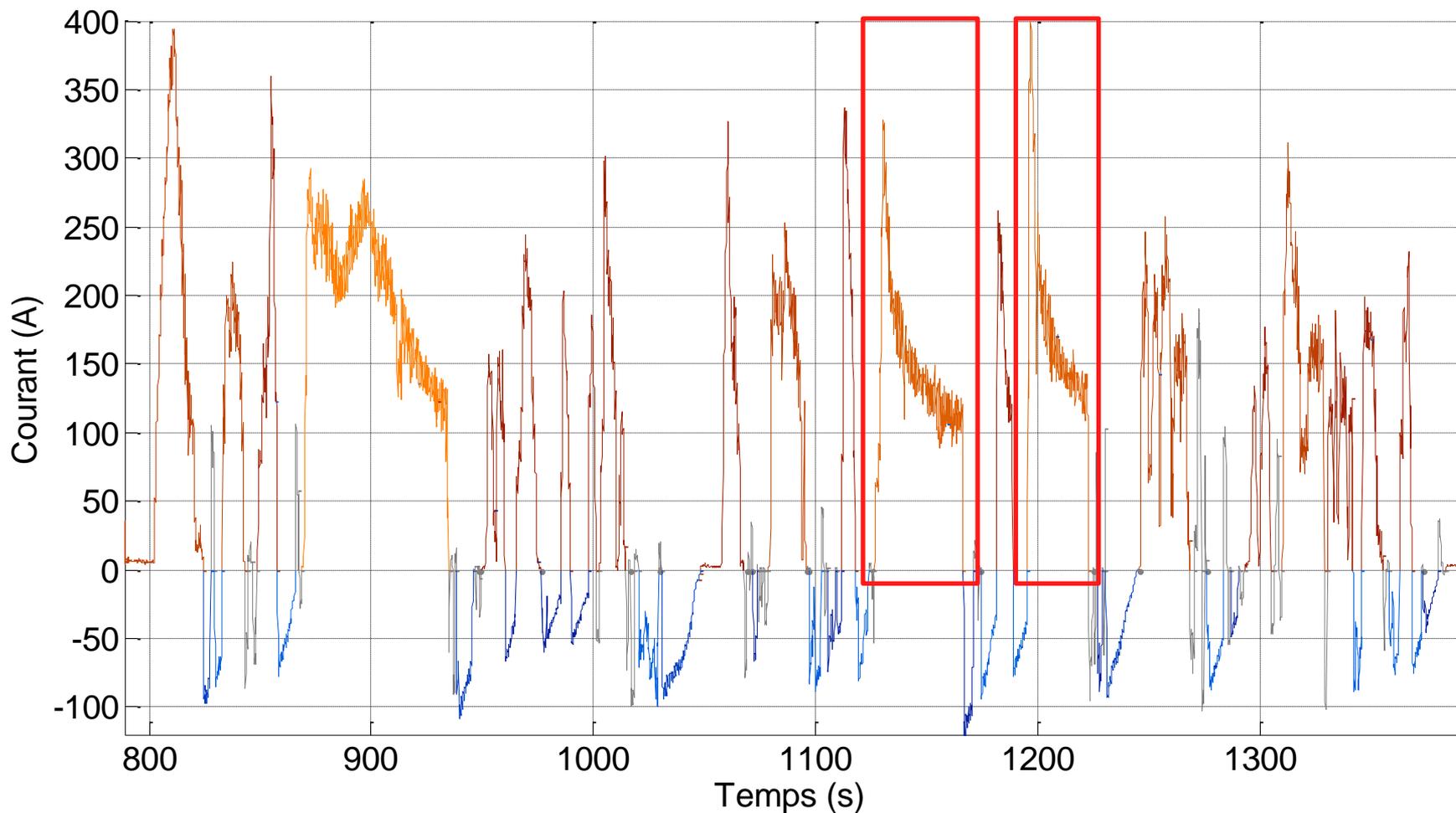


Aixam Megacity
Electrique

| | |
|--------------------|---|
| Poids | 750 kg (350kg) |
| Machine | MCC 4kW (12kWc) |
| Batterie | Plomb AGM (Exide) 10kWh 48V 210Ah |
| Vitesse maximale | 65km/h |
| Autonomie annoncée | 80km (125Wh/km) |
| Période | Avril-Novembre 2010 |
| Lieu | Agglomération Lyon |
| Conducteurs | 19 agents IFSTTAR |
| Trajets | Domicile-travail 227 (1778km) |
| Enregistrement | 10Hz, tension, courant, température, vitesse |

Allure du courant sur ce véhicule

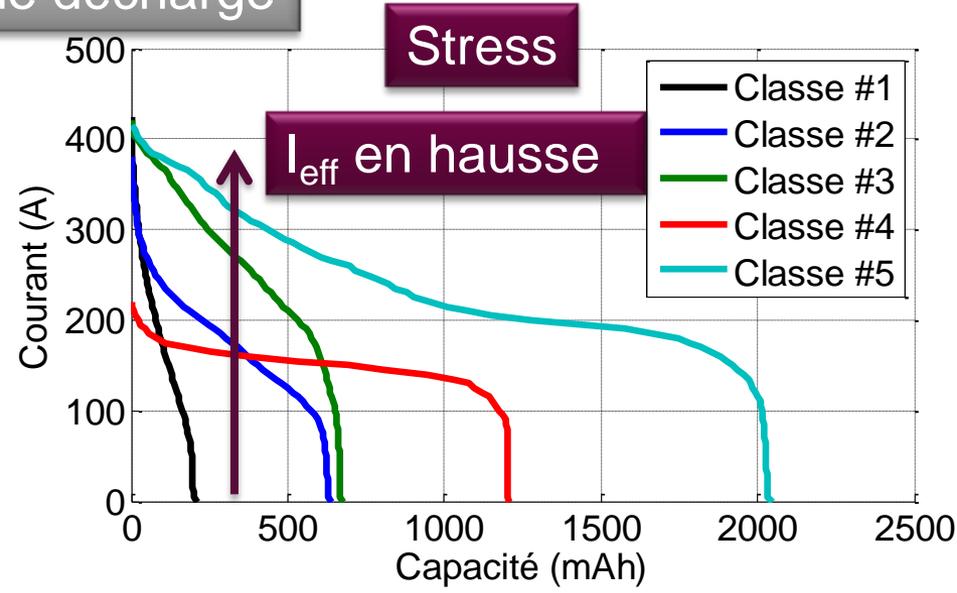
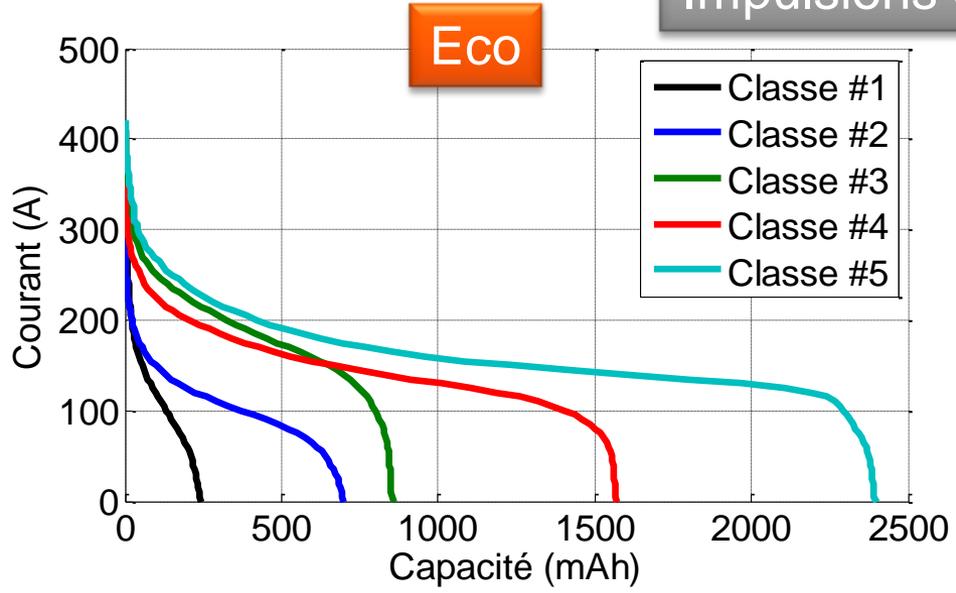
1 teinte = 1 classe d'impulsion





Éco-conduite Vs. conduite agressive

Impulsions de décharge



| Impulsions de la Classe n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Total |
|----------------------------|------|-------|------|------|------|-------|
| Consommation par km (Wh) | 34.4 | 13.7 | 21.7 | 22.2 | 14.5 | 106 |
| Consommation par km (Wh) | 64.5 | 33.1 | 32.5 | 3.2 | 10.9 | 144 |
| Variation | +88% | +142% | +50% | -86% | -25% | +36% |

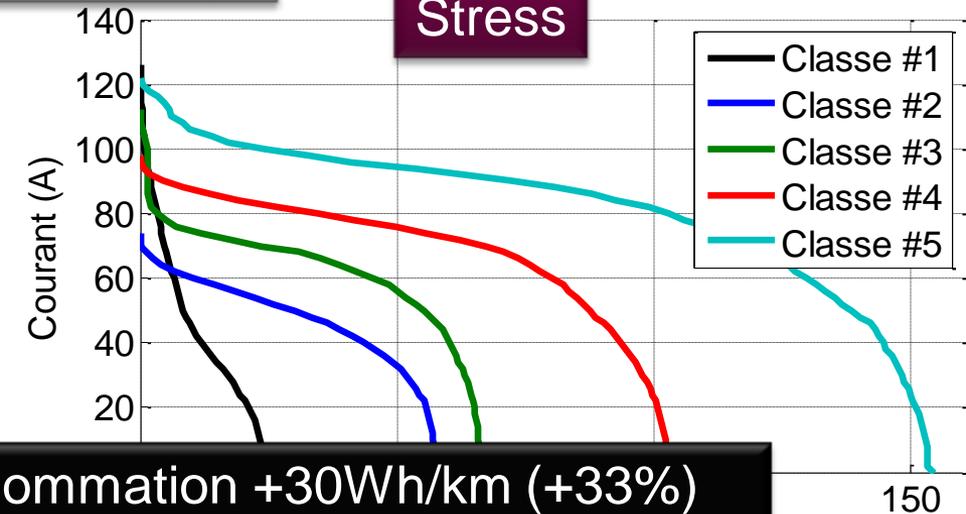
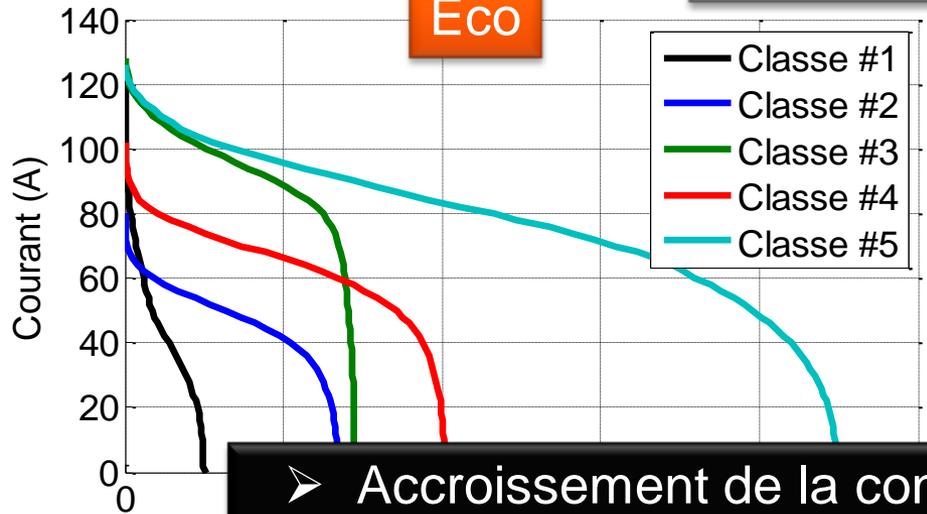


Éco-conduite Vs. conduite agressive

Impulsions de charge

Eco

Stress

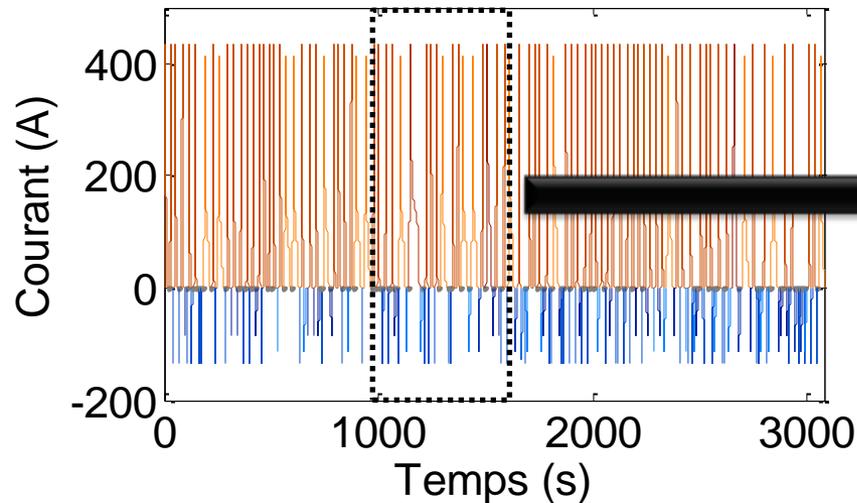


- Accroissement de la consommation +30Wh/km (+33%)
- Doublement du nombre d'impulsions par unité de distance
 - Usage accrue de la batterie
- Davantage de vieillissement à distance équivalente

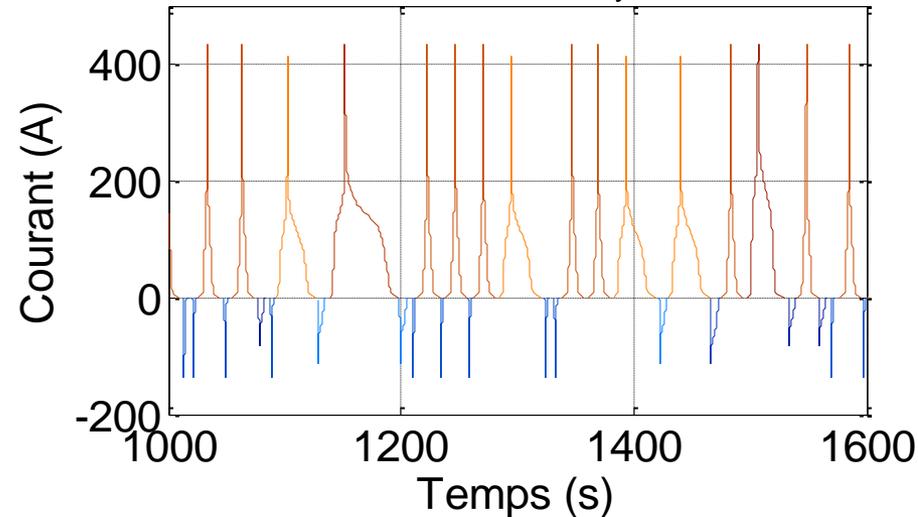
| Impulsions de la Classe n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Total |
|----------------------------|-------|------|-------|-----|------|-------|
| Récupération par km (Wh) | 3.6 | 3.4 | 1.7 | 3.8 | 2.5 | 15.1 |
| Récupération par km (Wh) | 7.9 | 4.9 | 4.1 | 3.7 | 2.1 | 22.7 |
| Variation | +119% | +44% | +141% | -3% | -16% | +50% |

Cycle synthétique généré

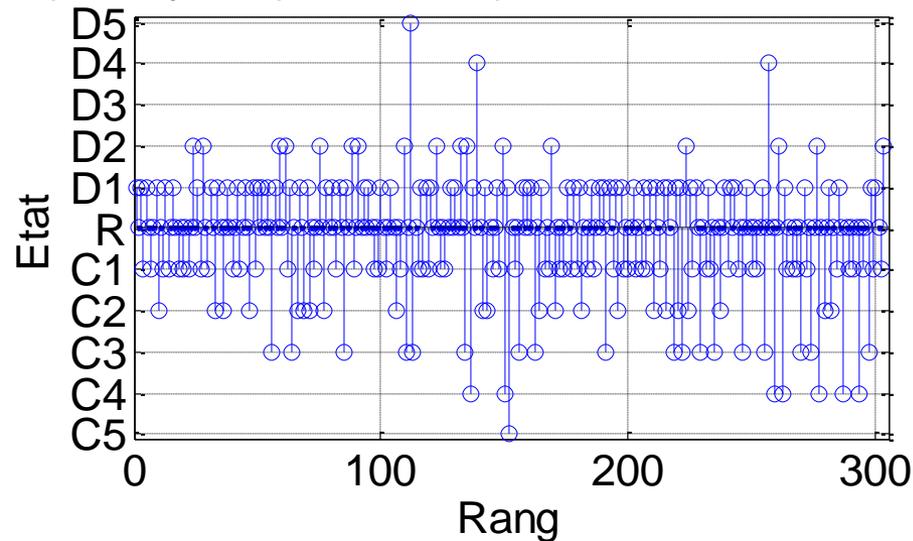
Profil synthétique de courant simulant 20%DOD



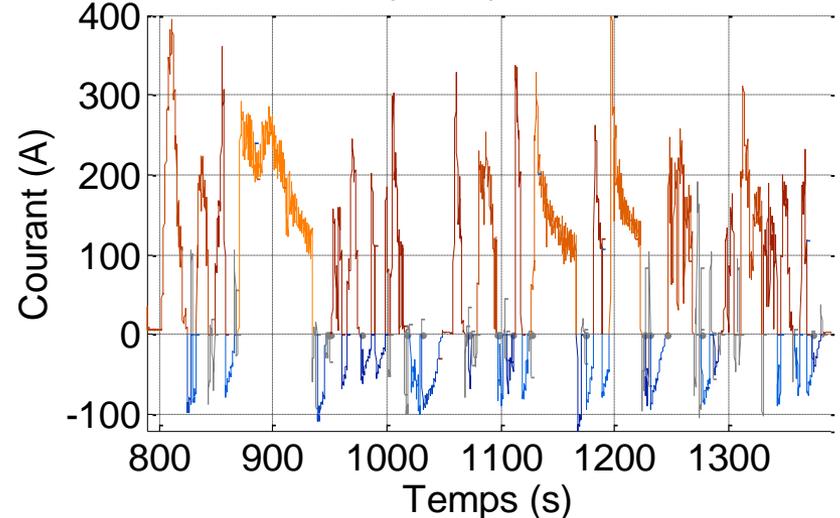
Zoom sur 5 minutes de ce cycle



Séquence synthétique obtenue d'après la chaîne de Markov d'ordre 13



Exemple de profil réel



2nd cas appliqué

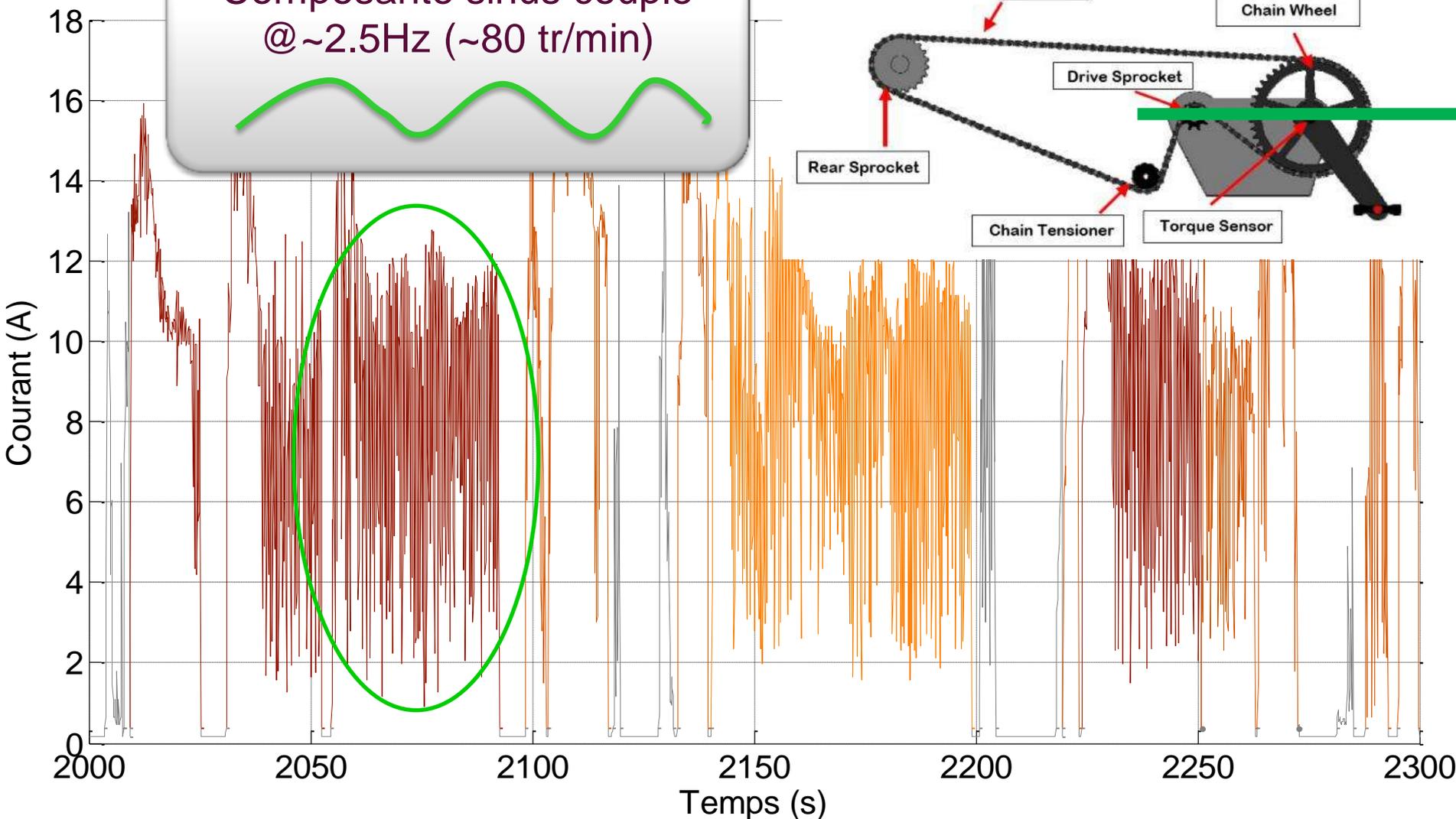


**Kalkhoff Agattu
VAE**

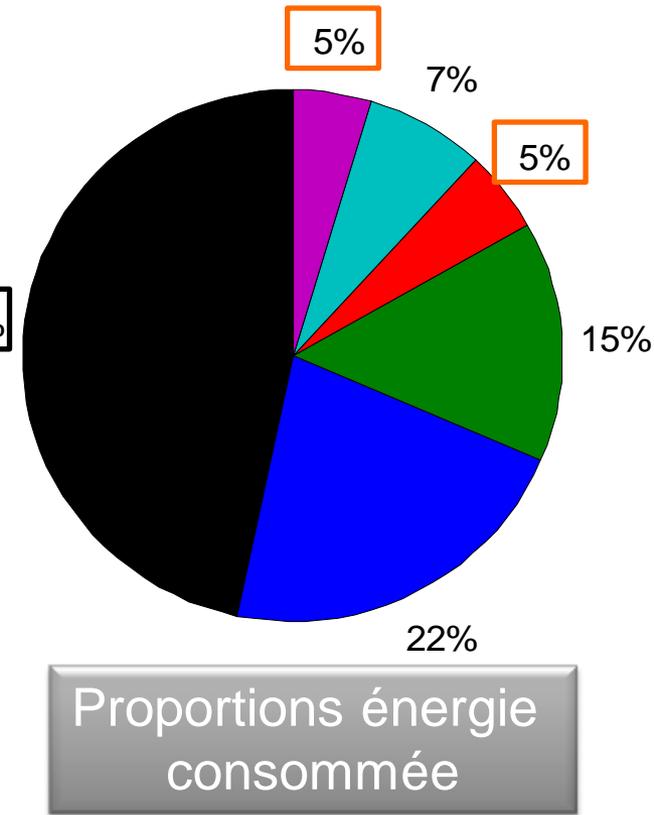
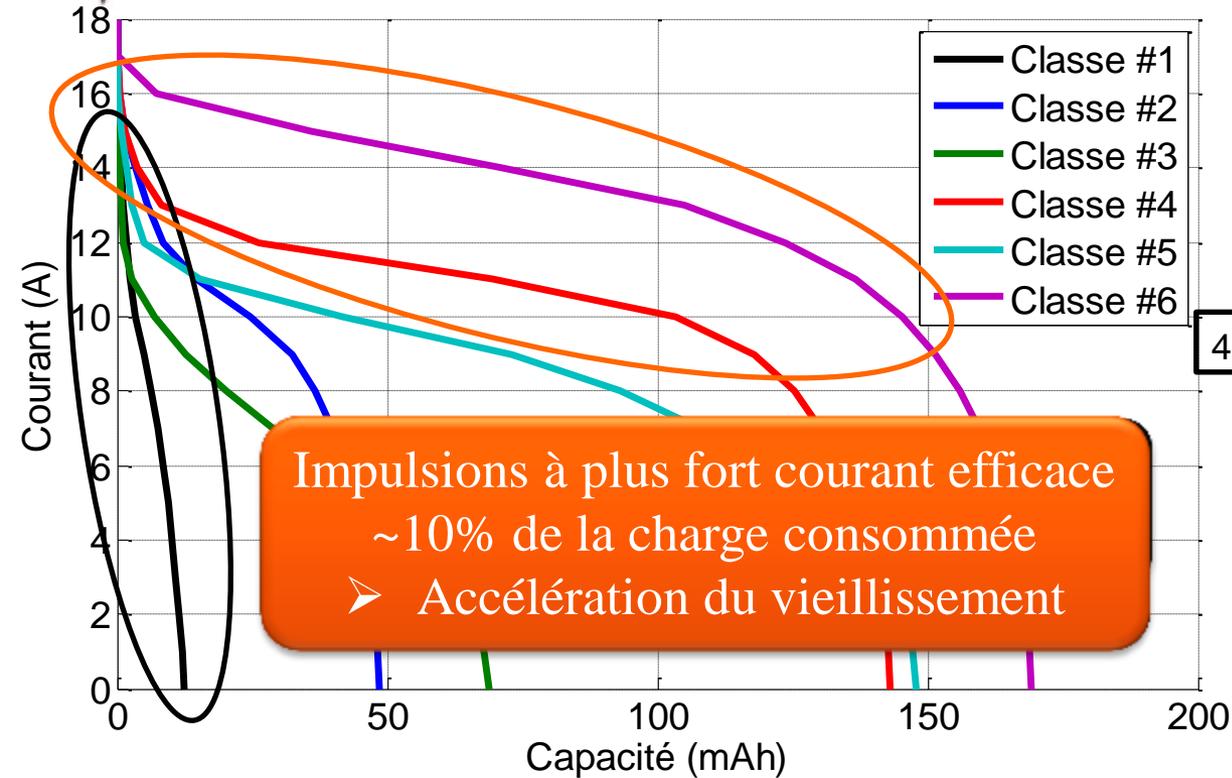
| | |
|--------------------|--|
| Poids | 23 kg (2.7kg) |
| Machine | Moteur pédalier DC Brushless 250W |
| Batterie | Li-ion NCM (Sanyo) 312Wh, 26V, 12Ah |
| Vitesse maximale | 27km/h |
| Autonomie annoncée | 90km (3.5Wh/km) |
| Période | Avril 2011-2012 |
| Lieu | Agglomération Lyon |
| Conducteurs | 14 agents Ampère ou IFSTTAR |
| Trajets | Domicile-travail 300 (2204km) |
| Enregistrement | 10Hz, tension, courant, température, vitesse |

Allure du courant sur ce véhicule

Composante sinus couple
@ ~2.5Hz (~80 tr/min)

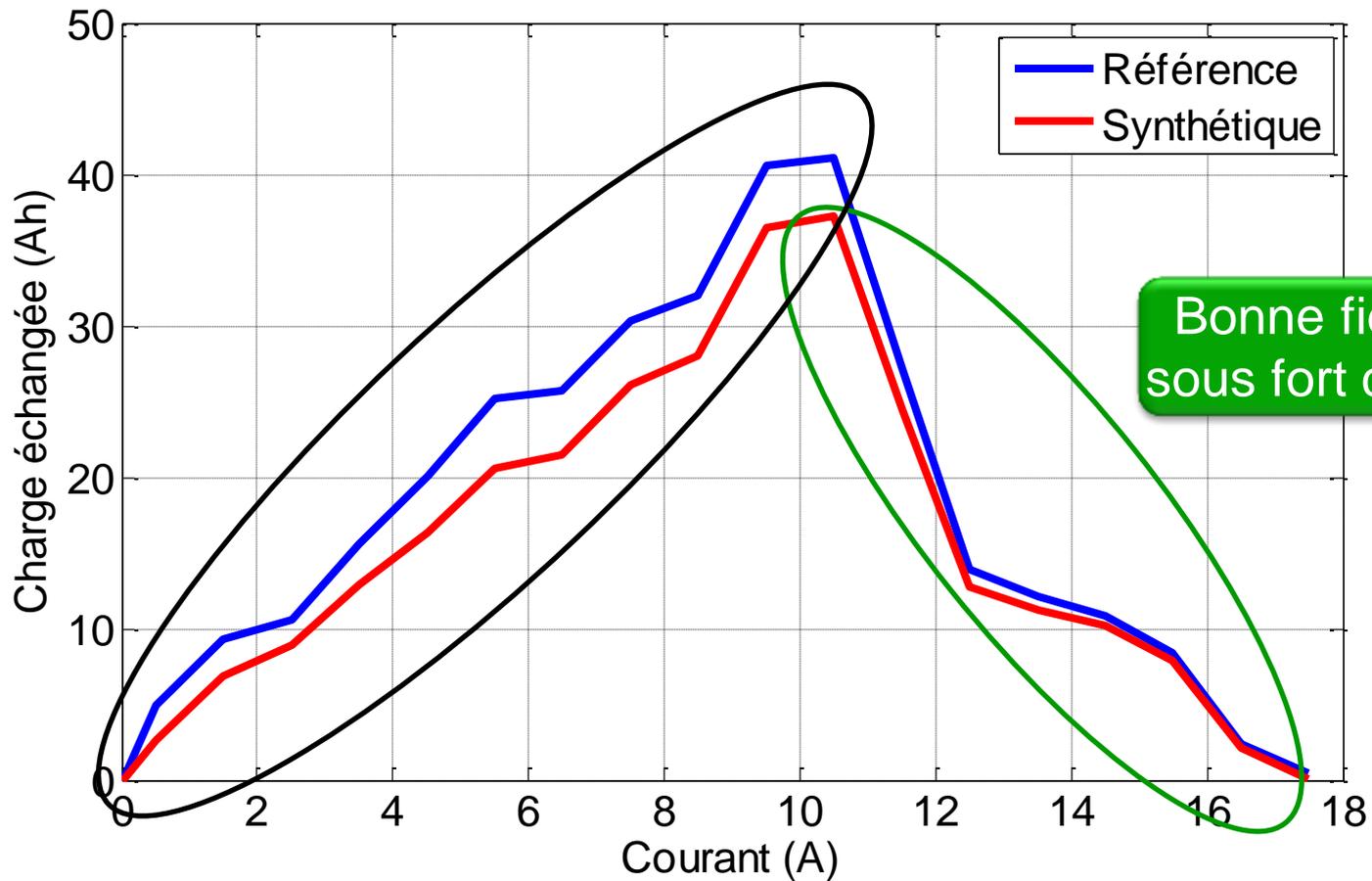


Impulsions typiques globales



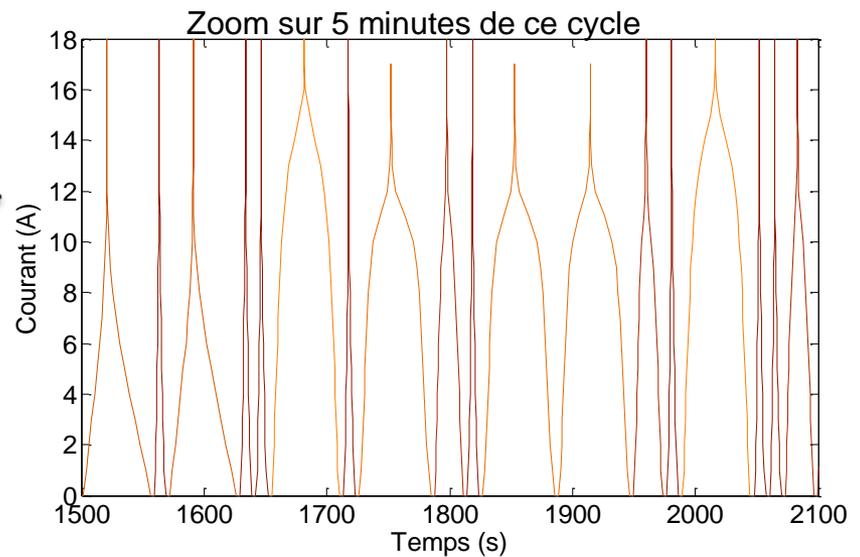
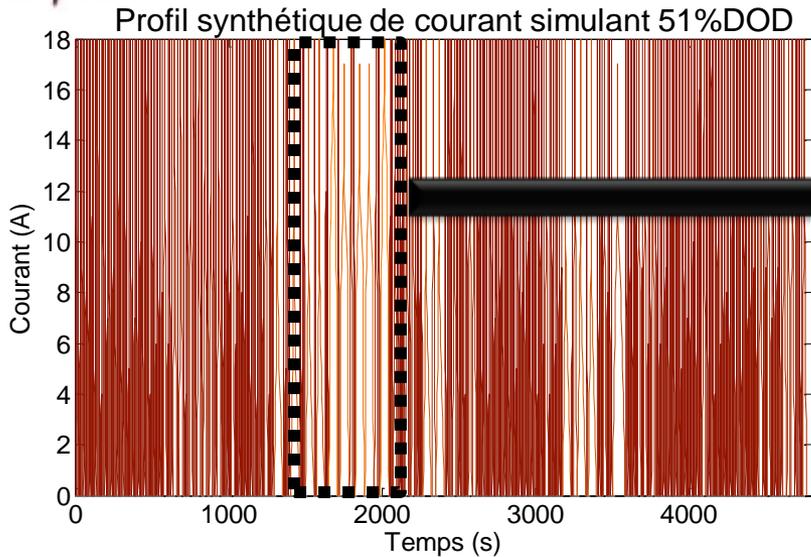
| Impulsions de la Classe n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Total |
|-----------------------------|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| Occurrences par 100km | 689 | 82 | 39 | 6.3 | 8.7 | 5.0 | 829 |
| Consommation par 100km (Wh) | 227 | 106 | 71.1 | 24.3 | 34.6 | 22.8 | 486 |

Distributions de courant

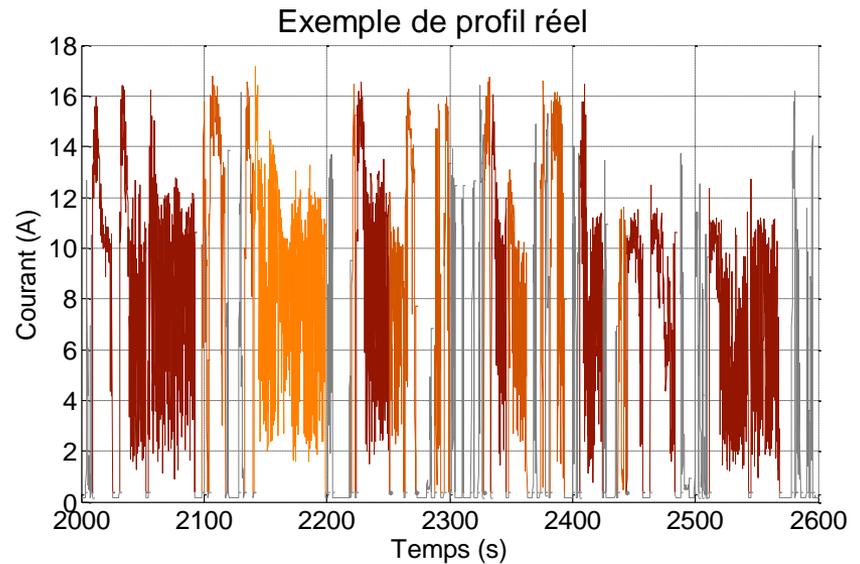
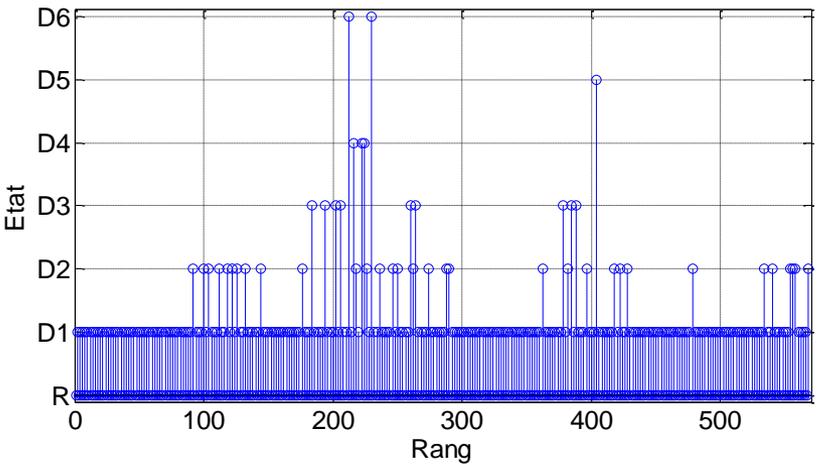


Bonne fidélité sous fort courant

Cycle synthétique généré



Séquence synthétique obtenue d'après la chaîne de Markov d'ordre 15

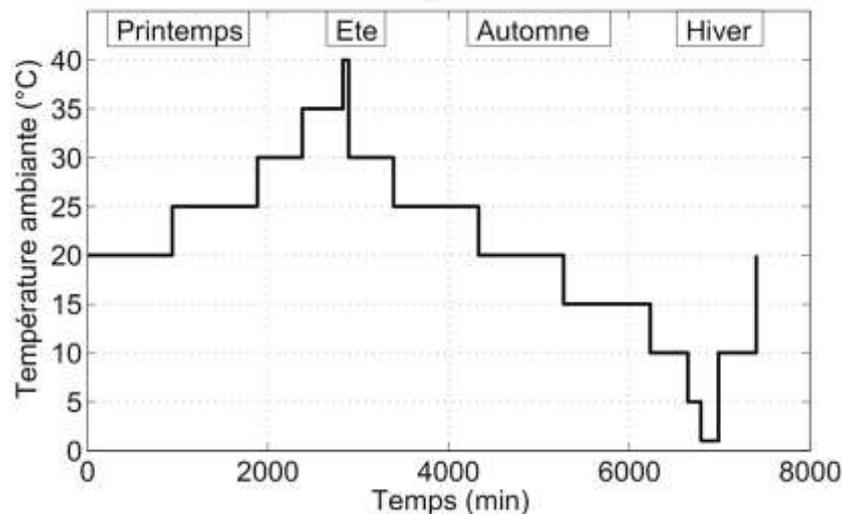
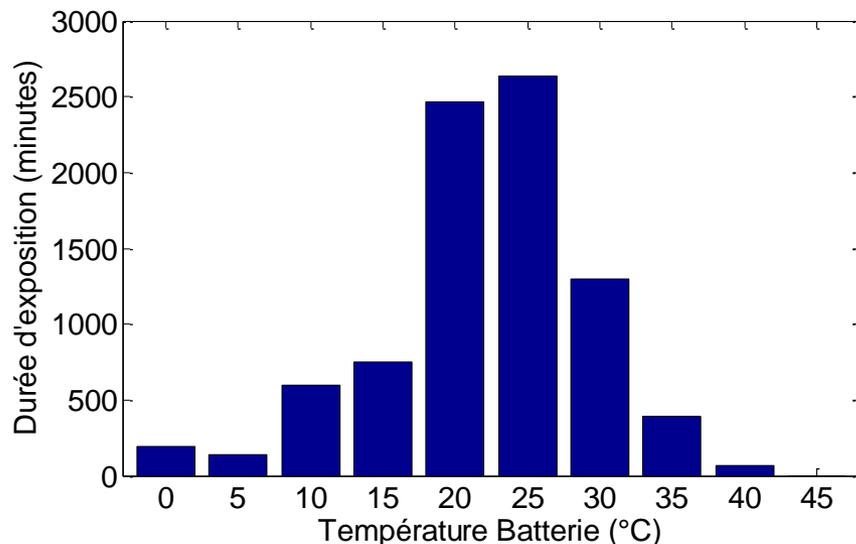




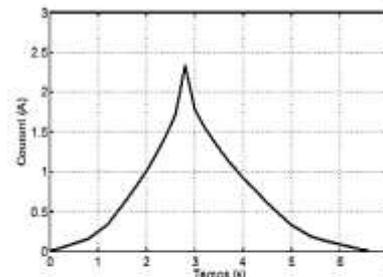
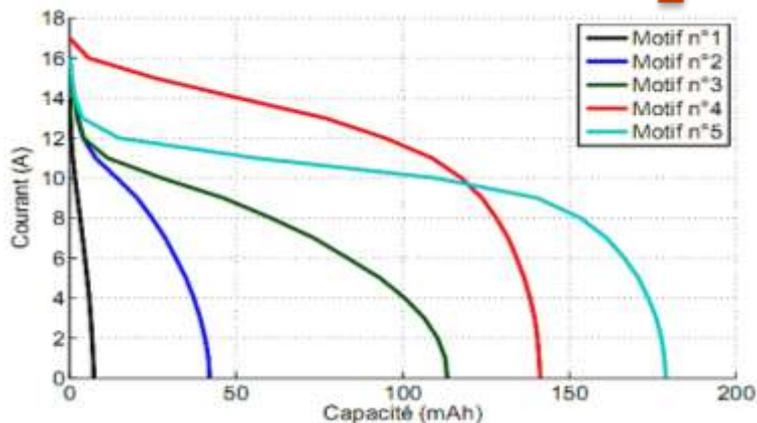
Validation expérimentale

Protocole d'essai

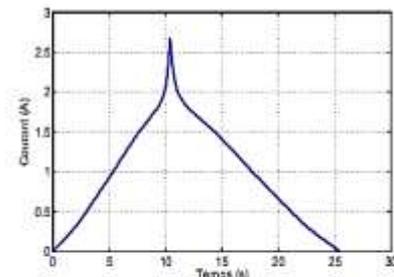
| | |
|-----------------------|---|
| Nombre de cycles | Eq. à 2200km/an 2 années d'utilisation |
| Profil utilisé | 5 impulsions typiques VAE Kalkhoff |
| Plage de SOC (DOD) | 100-25% (25-50-75%) |
| Température | 0 à 40°C ambiant Cycle saisonnier |
| Protocole de charge | CC-CV, C/6, 25°C 4.2V (NCM), 3.6V(LFP) |
| Caractérisations | 48h charge individuelle 25°C |
| Echantillon | 3 cellules NCM Sanyo 3 cellules LFP A123 |



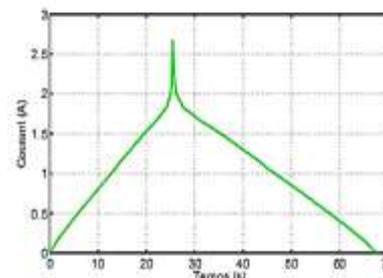
Profil de courant appliqué



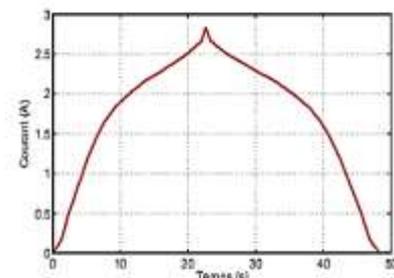
(a) Motif n°1



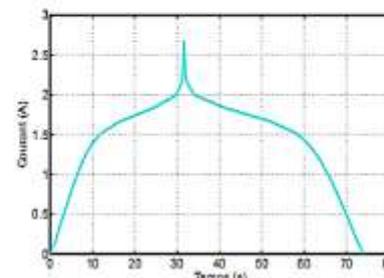
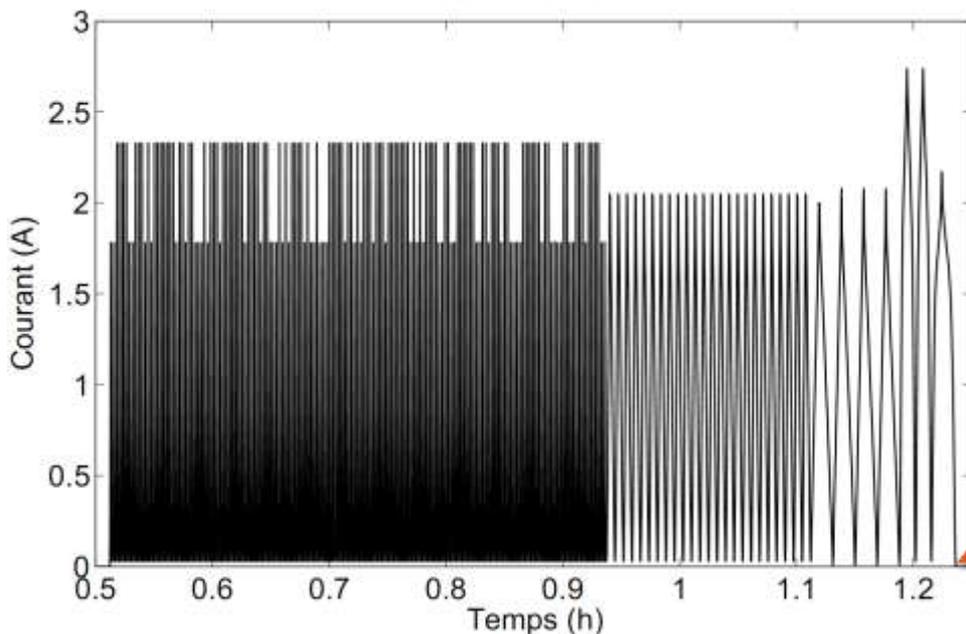
(b) Motif n°2



(c) Motif n°3



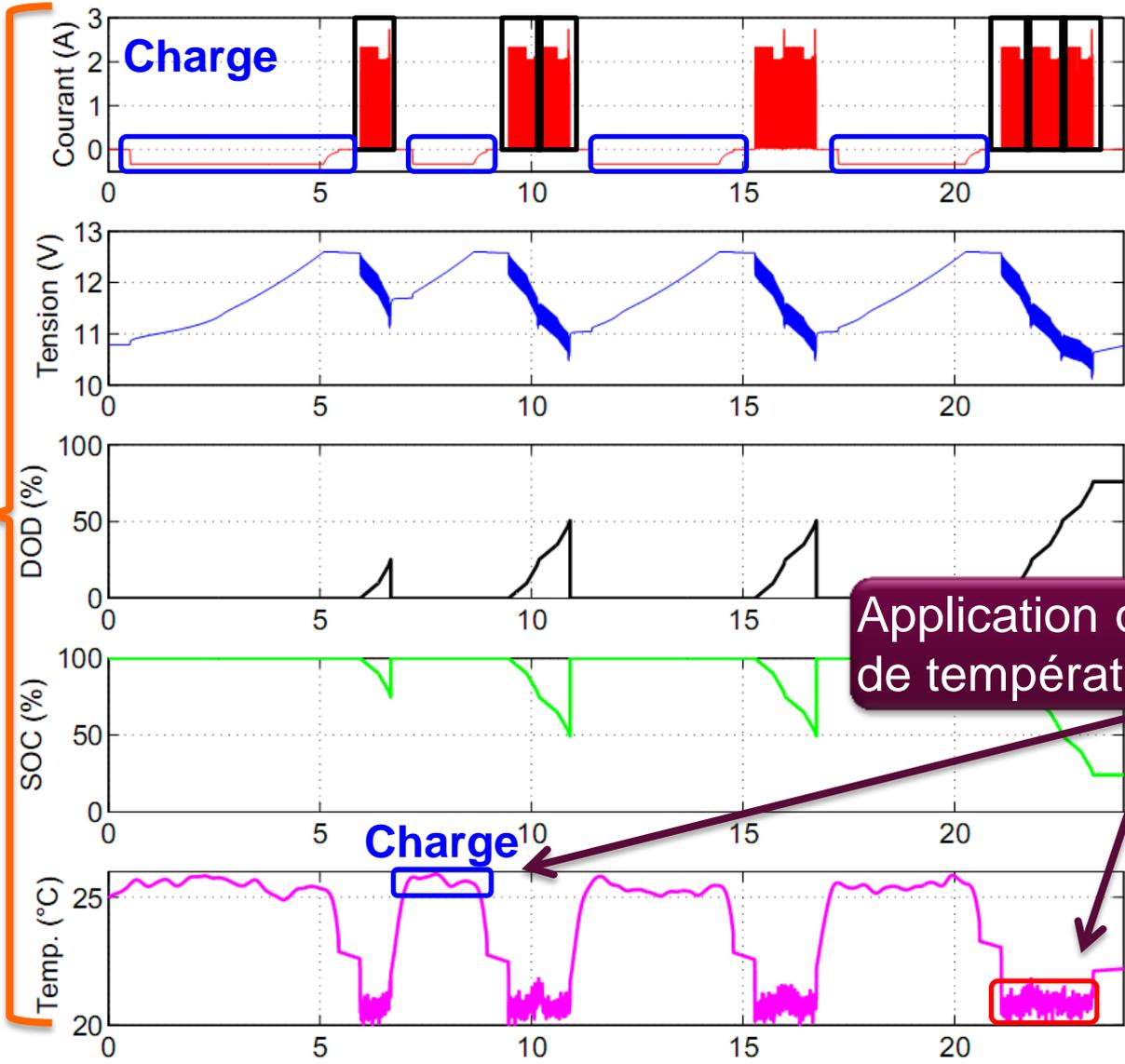
(d) Motif n°4



(e) Motif n°5

Validation expérimentale

24h cyclage



Cycles de 25, 50 et 75%DOD

Application d'une consigne de température variable

Réaliser des cycles thermiques complexes et automatisés

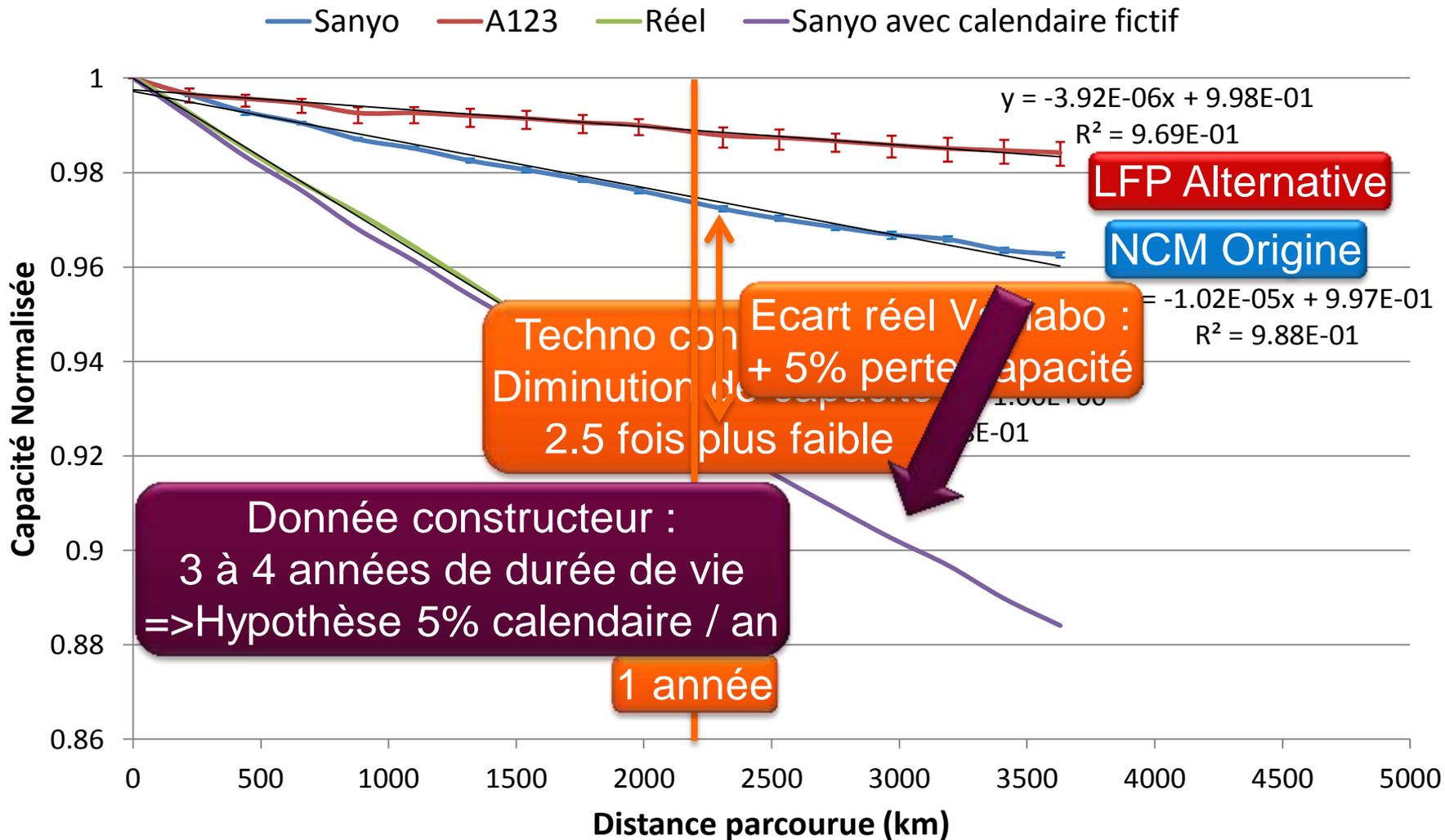
Mesure et régulation

Entrées/sorties
Banc cyclage
Affichage



Pilotage température

Validation expérimentale



MOTIVATIONS
PROBLEMATIQUE
METHODOLOGIE
RESULTATS
CONCLUSION

- ↪ Mise au point d'un logiciel d'analyse automatisé des impulsions de courant batterie dans les applications de transport électrifié
 - Universel (hybride & électrique)
 - Obtention de signature de l'usage typique d'un véhicule
 - Analyse fine de l'influence des conditions de circulation sur l'usage des batteries
 - Comparaison avec conséquence sur sollicitations batterie en fonction de :
 - Stratégie de gestion de l'énergie
 - Variation d'architecture de traction
 - Dimensionnement

- ↪ Utilisation de l'algorithme des K-means pour regrouper les impulsions en classes homogènes
 - Distance euclidienne

- ↪ Utilisation d'une modélisation par chaîne de Markov pour synthétiser des profils synthétiques
 - Utilisation du critère BIC pour sélectionner l'ordre présentant le meilleur compromis entre vraisemblance du modèle et nombre de paramètres requis

↳ 5 véhicules étudiés

- 20 kg à 13 tonnes
- 250W à 120kW
- + de 7000km enregistrés et analysés

↳ 13 campagnes de vieillissement sur cellules Lithium-ion

- Vérification d'hypothèses
 - Influence de la forme des impulsions sur le vieillissement
 - Effet individuel de chaque classe d'impulsions
- Validation expérimentale
 - Application au VAE Kalkhoff

↳ Développement d'équipements de cyclage dédiés

- Amélioration de la productivité
- Prise en compte du cyclage thermique saisonnier
- Prise en compte du cyclage thermique usage extérieur / intérieur

- ↪ Mener davantage d'essais de validation expérimentale
 - Coûteux en temps d'expérimentation
- ↪ Etendre la démarche aux différents paramètres d'usage
 - Température, DOD, SOC
- ↪ Adapter les équipements de cyclage
 - Difficulté de programmation actuelle
 - Faciliter la mise en œuvre des cycles issus des chaînes de Markov
- ↪ Prédire la performance d'une nouvelle technologie de batteries sur une application donnée
- ↪ Utiliser les cycles représentatifs de courant batterie pour la mise au point
 - Stratégies de gestion d'énergie dans les systèmes multi-sources
 - Algorithmes BMS
- ↪ Développer des cycles d'usages représentatifs des systèmes de stockage pour les applications réseaux électriques (Smart Grid)

Merci pour votre
attention