



# ***Réduction de la consommation énergétique dans l'exploitation de lignes grâce à des solutions novatrices dans le concept de véhicules***

Fabio Widmer / EPFZ  
Jan Wunderlich / HESS  
5 juin 2024

## Contexte tiré de projets précédents

|  | Potentiels<br>existants |
|--|-------------------------|
| ■ Champ d'action I: entraînement et récupération     | ✓                       |
| ■ Champ d'action II: construction légère             | ✓                       |
| ■ Champ d'action III: optimisation réglementation HT | ✓                       |
| ■ Champ d'action IV: chauffage et climatisation      | ++                      |
| ■ Champ d'action V: carrosserie du véhicule          | +++                     |
| ■ Champ d'action VI: technologie de batteries        | +                       |
| ■ ...  |                         |

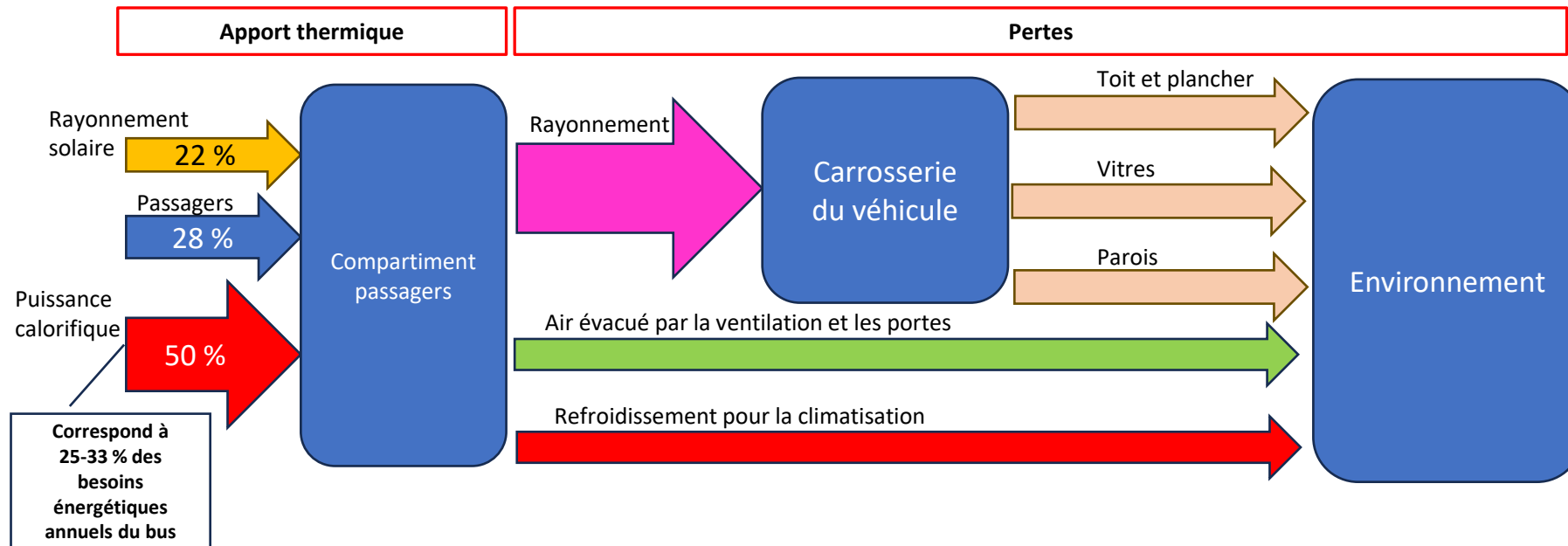
*Exigence:*

*«Aider les moyens de transport publics routiers propres à s'imposer»... **par une technologie applicable, des innovations et de l'audace***

# Innovations dans le chauffage et le refroidissement

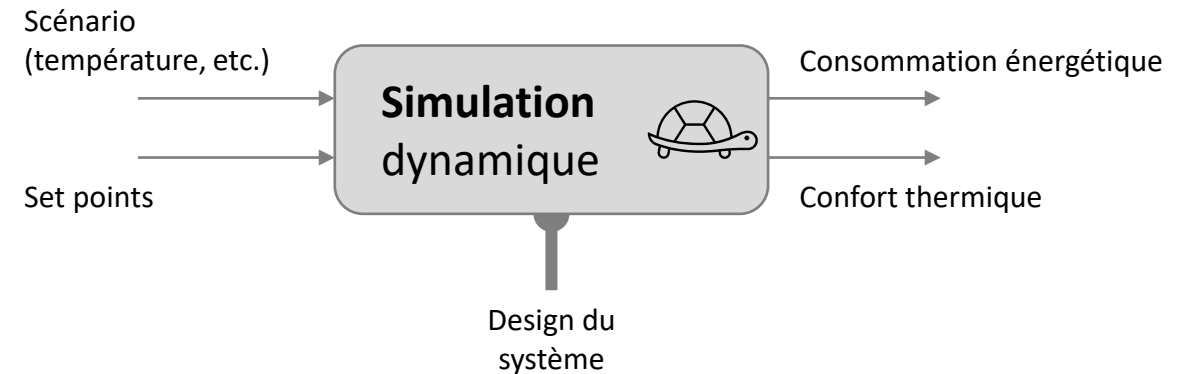
## Flux d'énergie de chauffage et de refroidissement dans un bus en moyenne annuelle

Où y a-t-il un potentiel énergétique dans la construction de bus?

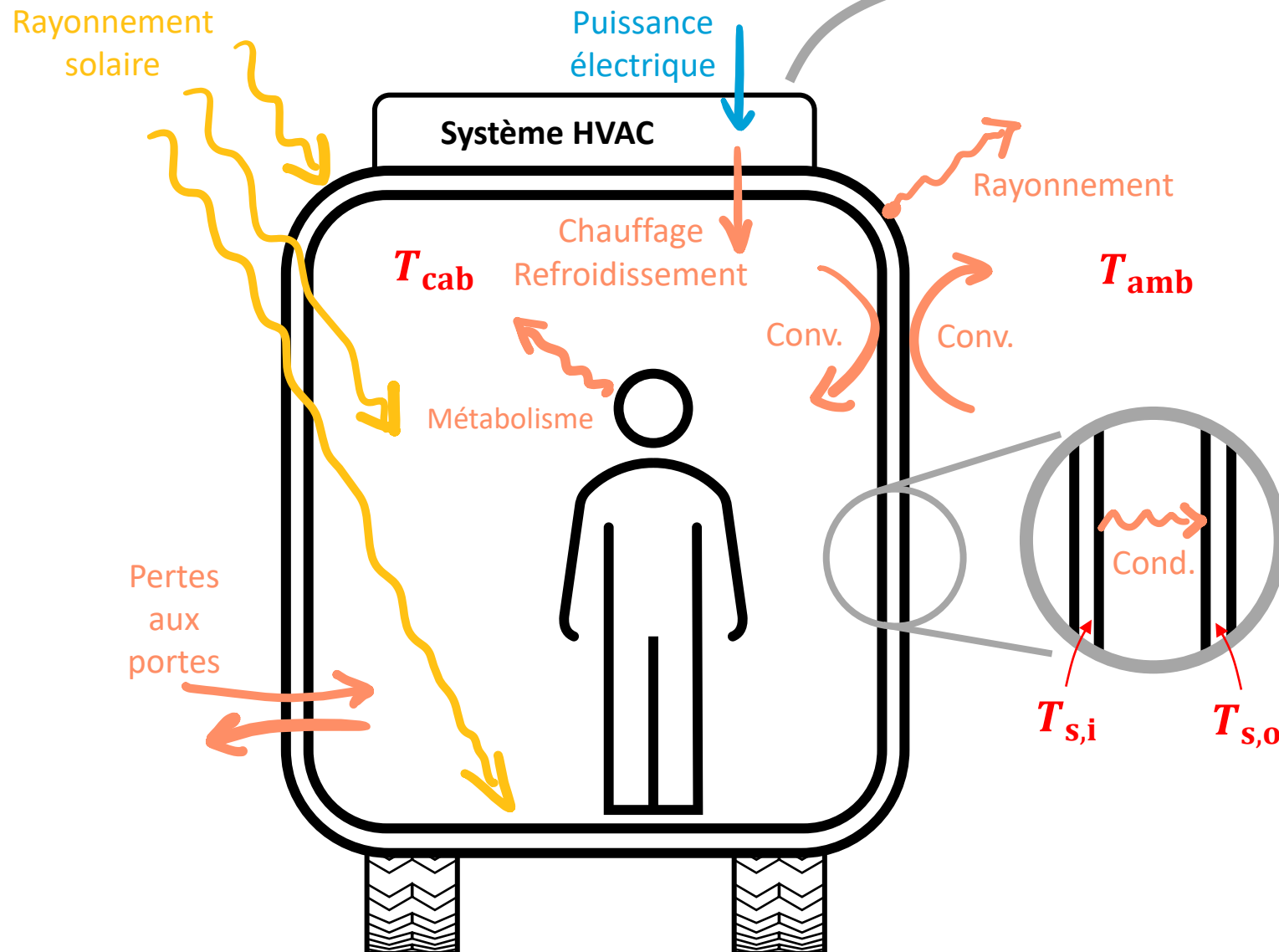


# Développement d'un environnement de simulation: motivation

- Comparaison de différentes configurations de système HVAC
  - Sur la base de simulations
- Les simulations physiques dynamiques sont lentes
  - # Scénarios limités pris en compte
  - # Paramètres modifiables limités
- **Nous voulons une simulation rapide et efficace**



## Vue d'ensemble du modèle



## Système HVAC

Refroidissement: climatisation

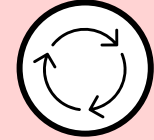
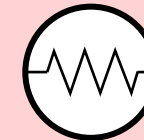
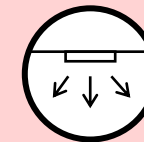


Chauffage:

à résistance

ou

pompe à chaleur

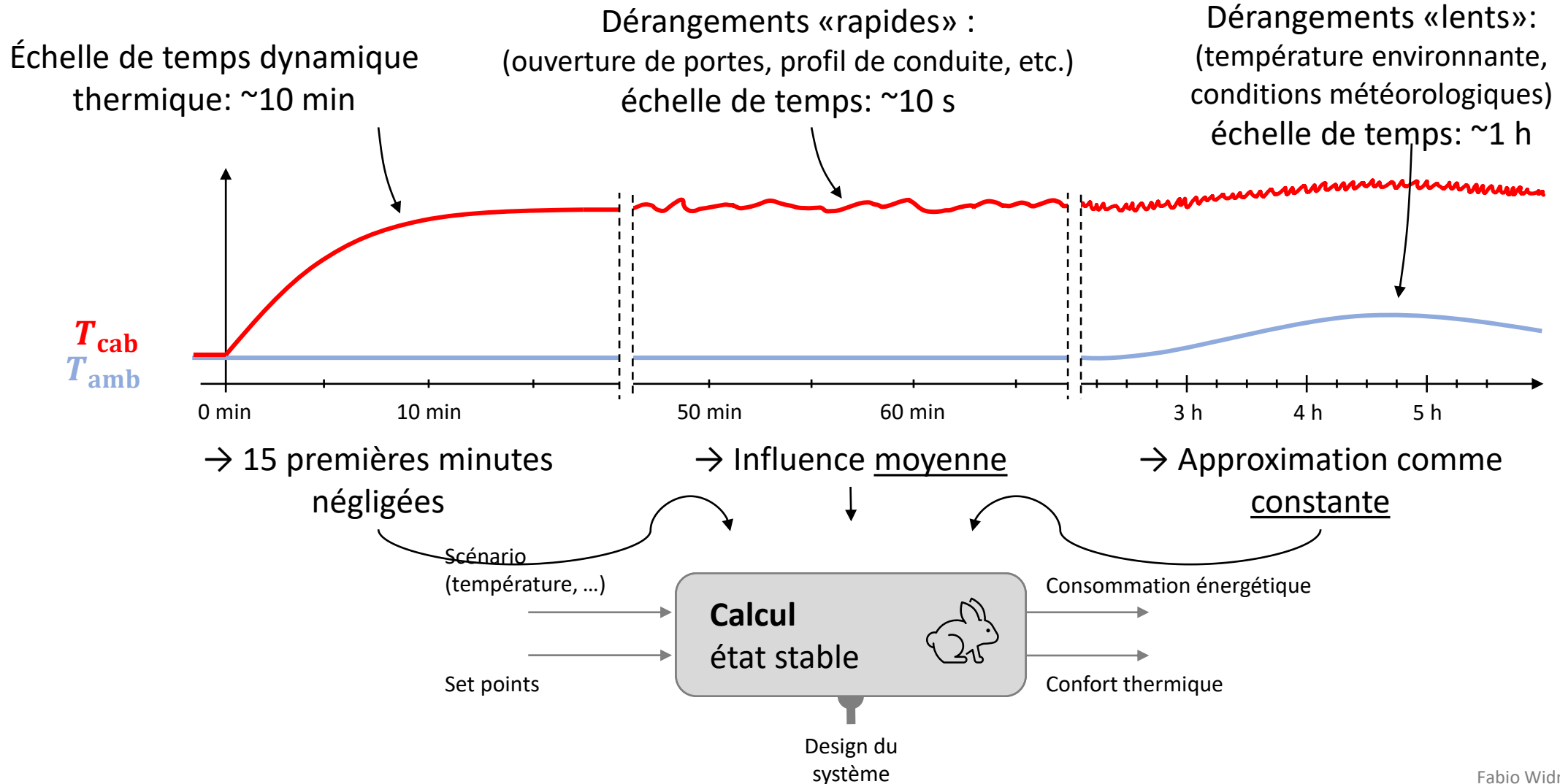
+ chauffage  
infrarouge

En sus:



rideau d'air

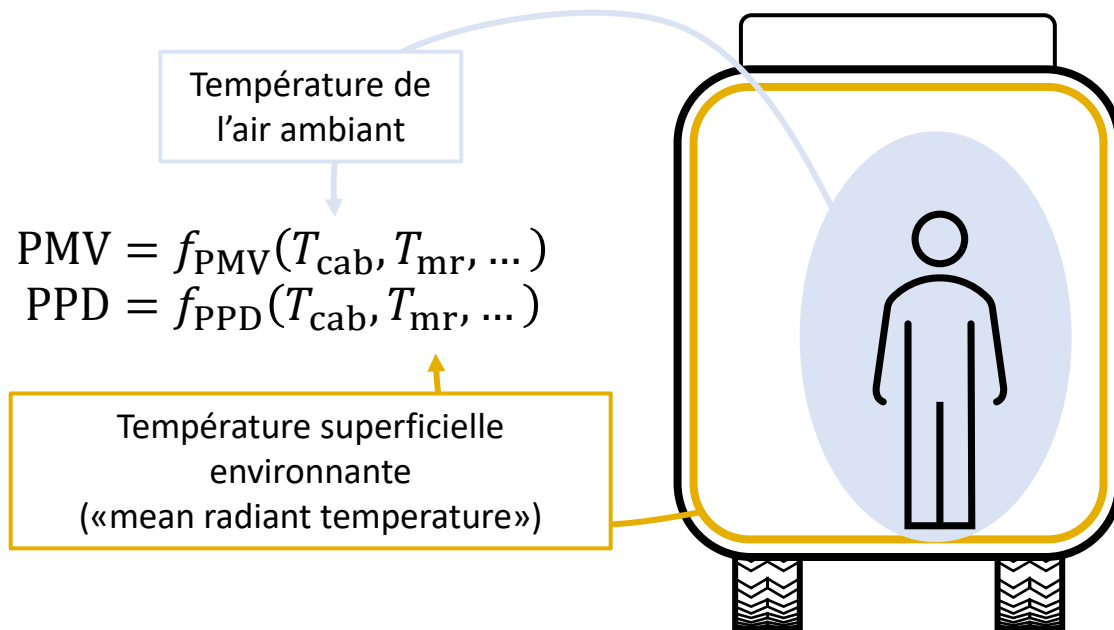
# Simplification par l'approche de l'état stable



# Quantification du confort thermique

## Fanger's PMV & PPD Model (ISO 7730):

- PMV: Predicted Mean Vote  
→ «ressenti moyen attendu»
- PPD: Predicted Percentage Dissatisfied  
→ «taux d'insatisfaction moyen attendu»



PPD [%]

100  
80  
60  
40  
20  
0

Cold = -3

Cool = -2

Slightly  
cool = -1

Neutral = +0

Slightly  
warm = +1

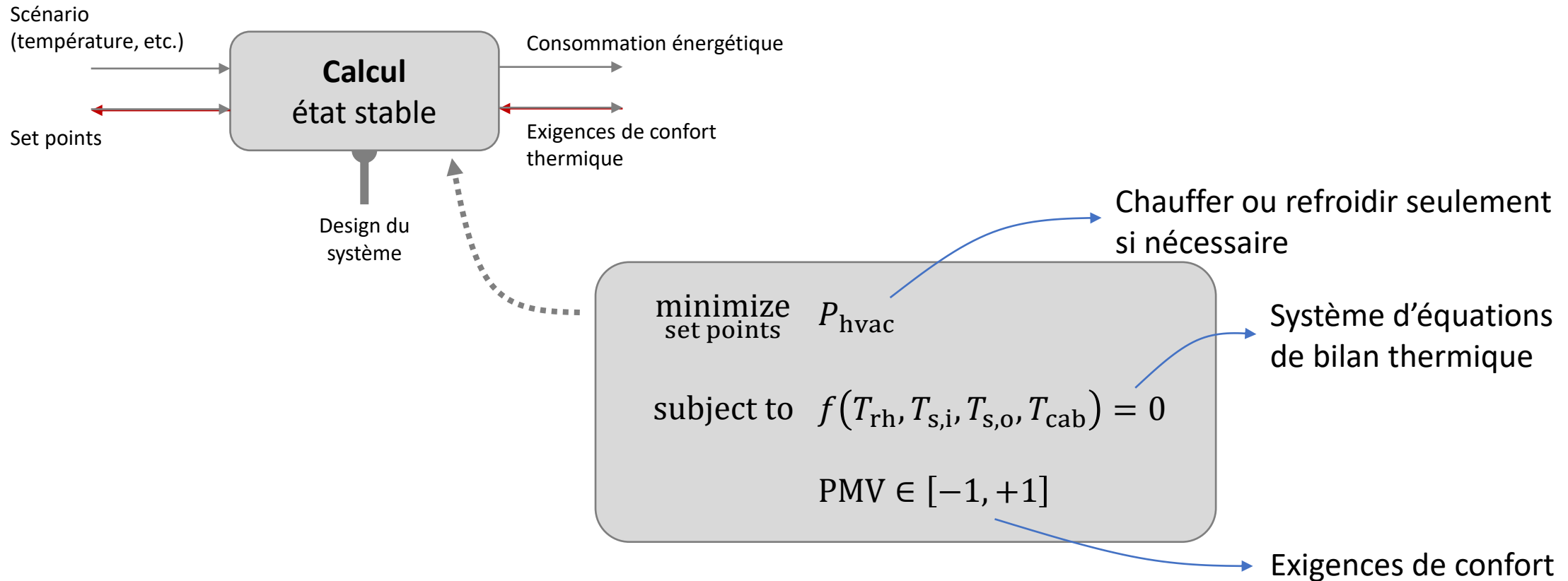
Warm = +2

Hot = +3

PMV



# Garantie du confort dans le modèle → «causalité inversée»

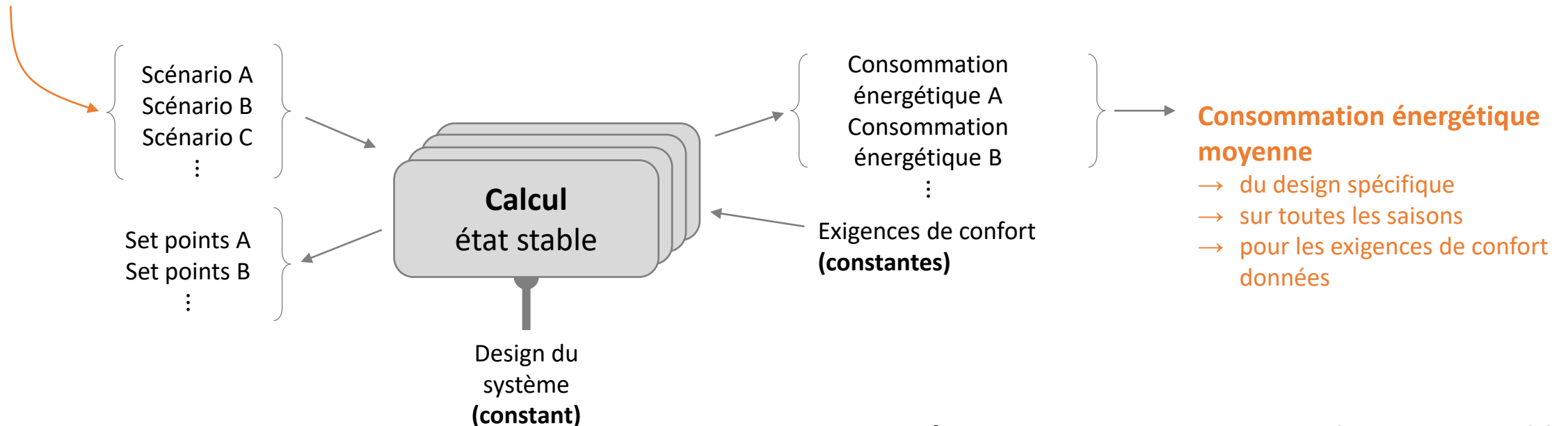


→ Peut être résolu en 0,2 seconde sur un ordinateur portable

# Des scénarios isolés à la prise en compte de toute l'année

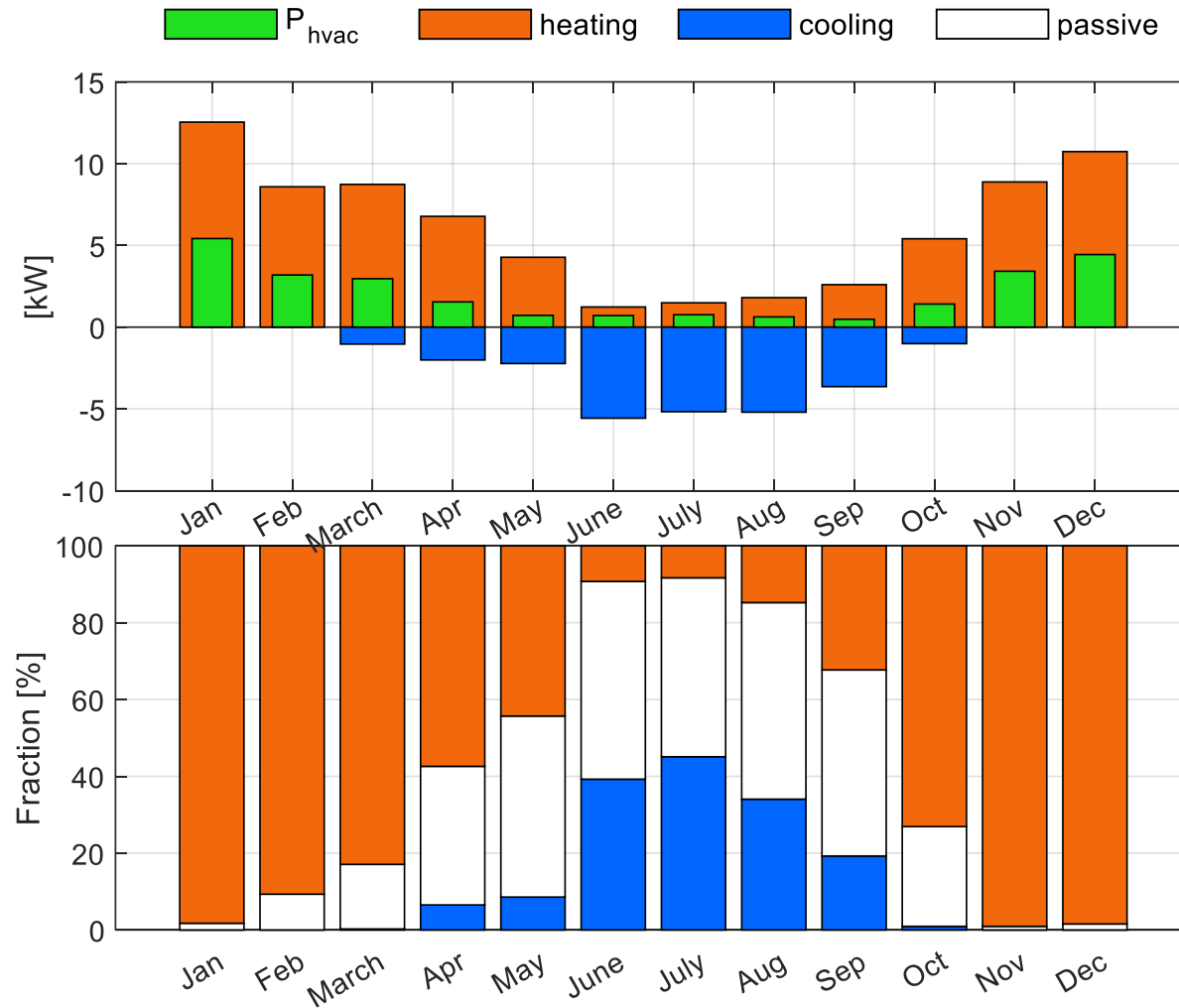
## 7500 scénarios

- Sur la base de données de mesure (ZTBus\*)
- Collectés sur 3 ans
- Couvrent toutes les saisons



→ Nécessite ~6 minutes sur un ordinateur portable

## Vue d'ensemble sur toute l'année



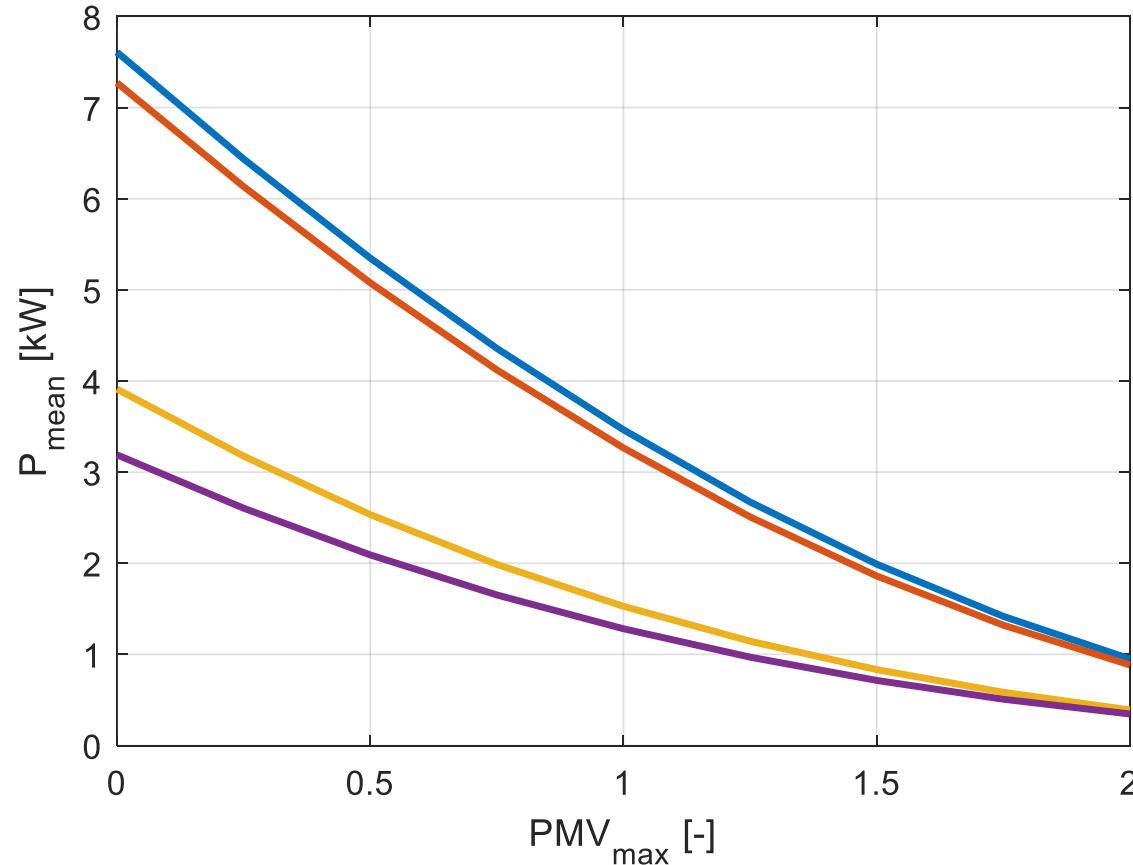
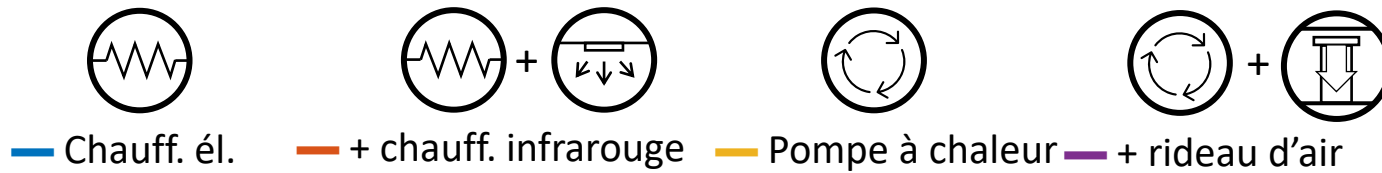
Exigences de confort:  
 $PMV \in [-1, +1]$

→ Chauffer nécessite plus d'énergie que refroidir

→ Le chauffage est plus souvent employé que le refroidissement

→ Souvent, ni l'un ni l'autre ne sont nécessaires (passif = aération)

# Comparaison de différentes combinaisons de technologies



- Le chauffage infrarouge peut augmenter l'efficacité de 5 à 10 %
- Une pompe à chaleur peut augmenter l'efficacité de 50 à 60 %
- La combinaison entre chauffage infrarouge et pompe à chaleur n'apporte aucun avantage
- Les rideaux d'air sont prometteurs également en combinaison avec une pompe à chaleur

# Principaux enseignements de l'approche de l'état stable

- Les pompes à chaleur sont très importantes
- Dans les conditions climatiques suisses, le chauffage est nettement plus important que le refroidissement  
→ Des améliorations de l'efficacité du chauffage sont souhaitables
- Le chauffage infrarouge n'est pas recommandé en combinaison avec une pompe à chaleur
- Les rideaux d'air sont une technologie prometteuse

## Références:

- F. Widmer et al., Highly efficient year-round energy and comfort optimization of HVAC systems in electric city buses, 22nd IFAC World Congress. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.715>.
- F. Widmer et al., Optimization of the energy-comfort trade-off of HVAC systems in electric city buses based on a steady-state model, preprint submitted to Control Engineering Practice (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.00517>.

# Transfert de technologie avec accent sur l'exploitation de lignes

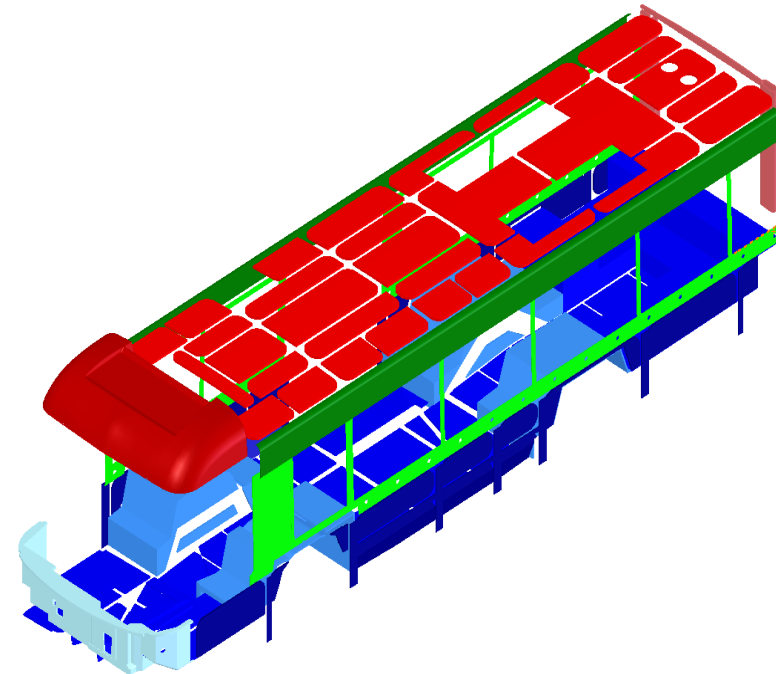
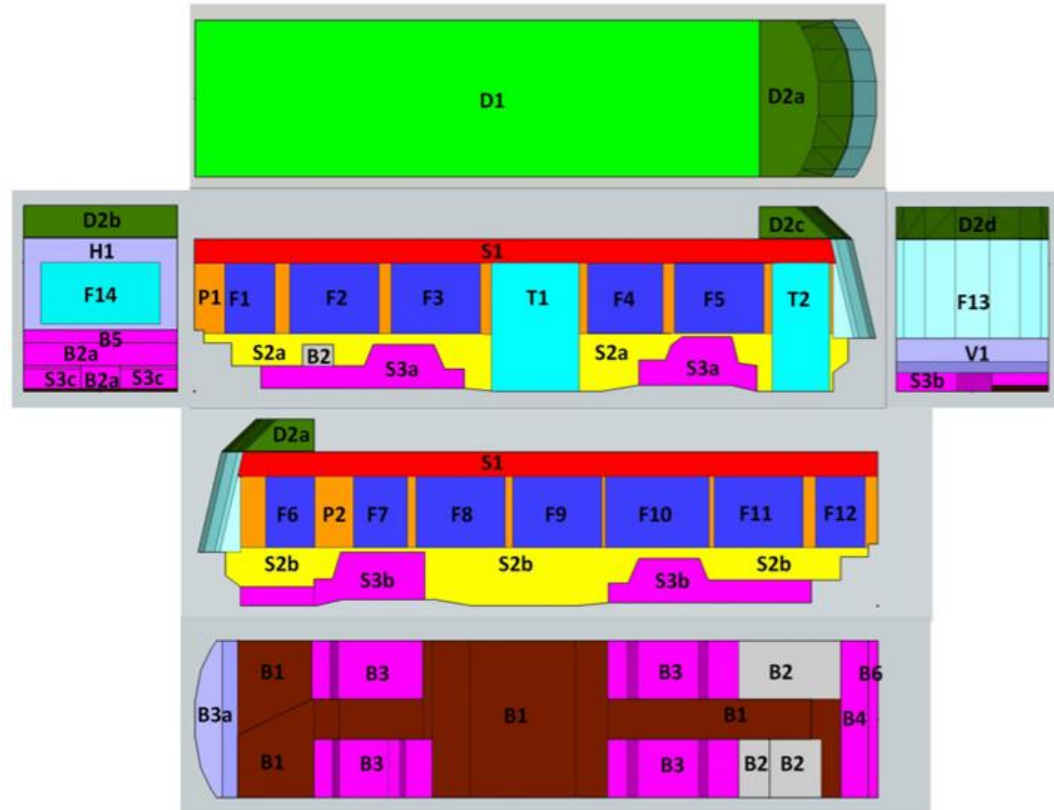
Enseignements et mise en œuvre concrète:

«One solution fits all»

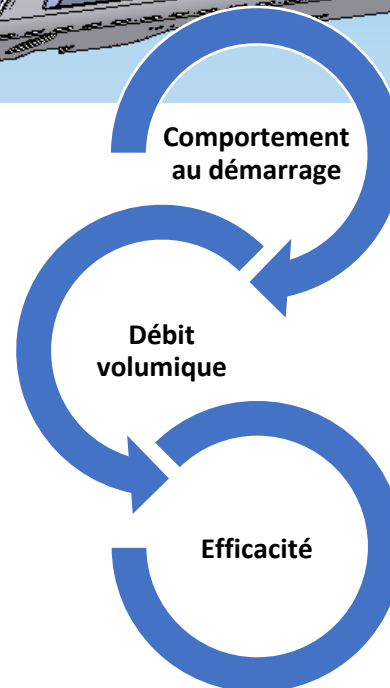
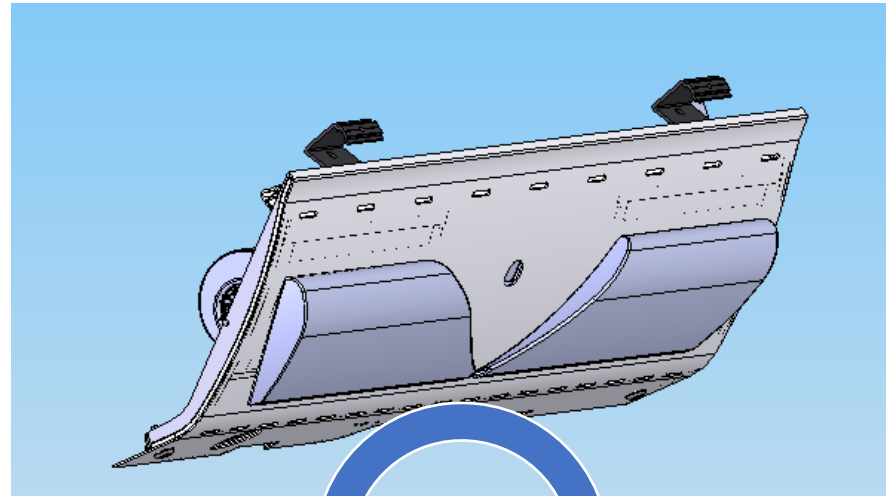


- **Dimensionnement du système en fonction des besoins dans le châssis lighTram®** – quelle option est la plus durable dans chaque scénario et pour l'ensemble du concept du véhicule?
- **Optimisation du châssis du véhicule** – ajustement détaillé de tous les matériaux et surfaces
- **Grande puissance de charge par prise CCS2** – flexibilité opérationnelle pour une intégration efficace et une utilisation optimale de la flotte de bus électriques
- **Sous-systèmes réglés en fonction des besoins** – réactifs et adaptatifs en fonction des exigences extérieures, et intelligents grâce à l'interconnexion des systèmes
- **Pompe à chaleur CO<sub>2</sub>** – efficacité élevée avec accent sur la période de chauffage
- **Optimisation énergétique des portes et des entrées** – évitement de pertes
- ...

# Transfert de technologie avec accent sur l'exploitation de lignes



# Transfert de technologie avec accent sur l'exploitation de lignes

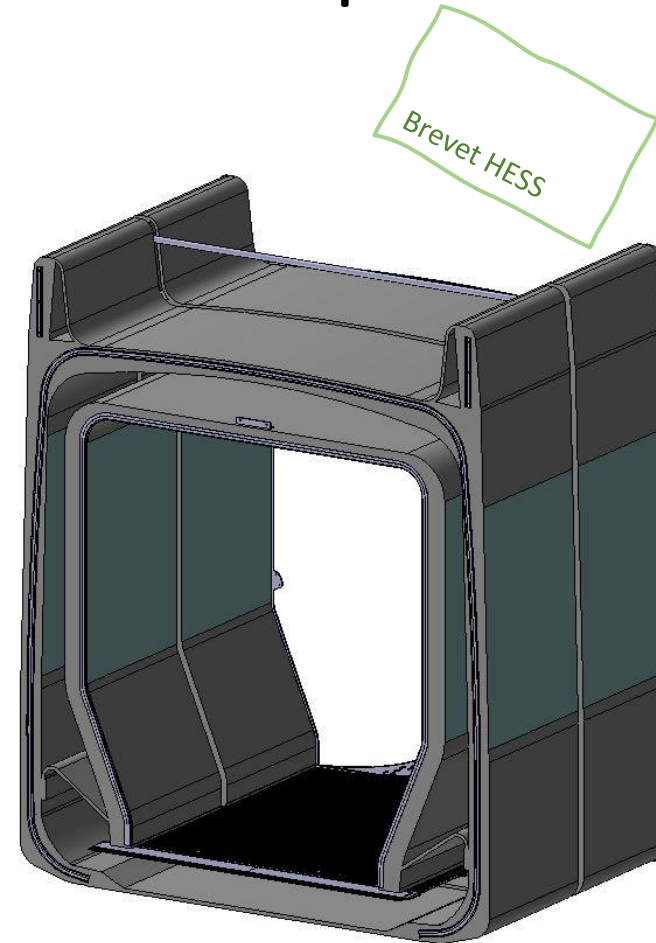




# Transfert de technologie avec accent sur l'exploitation de lignes

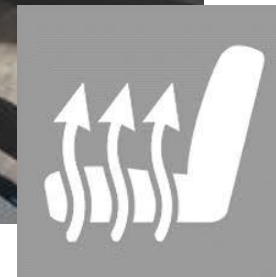
Zone d'articulation optimalement isolée et confortable:

- Intégralement à double paroi pour une meilleure isolation et l'atténuation du bruit
- Zone translucide agrandie pour encore plus de lumière naturelle
- Compatible avec la bordure Kassel



# Transfert de technologie avec accent sur l'exploitation de lignes

Confort thermique → chaleur au bon endroit et au bon moment



- Transfert direct de chaleur – permet un niveau de température plus bas dans l'ensemble du compartiment voyageurs

***Merci pour votre attention.  
N'hésitez pas à observer nos innovations dans l'exposition.***



