Contribution aux méthodes de conception et de gestion des systèmes énergétiques multi-sources par optimisation systémique. Application aux trains hybrides électriques et autonomes

Marie POLINE

Directeur de thèse : Laurent GERBAUD

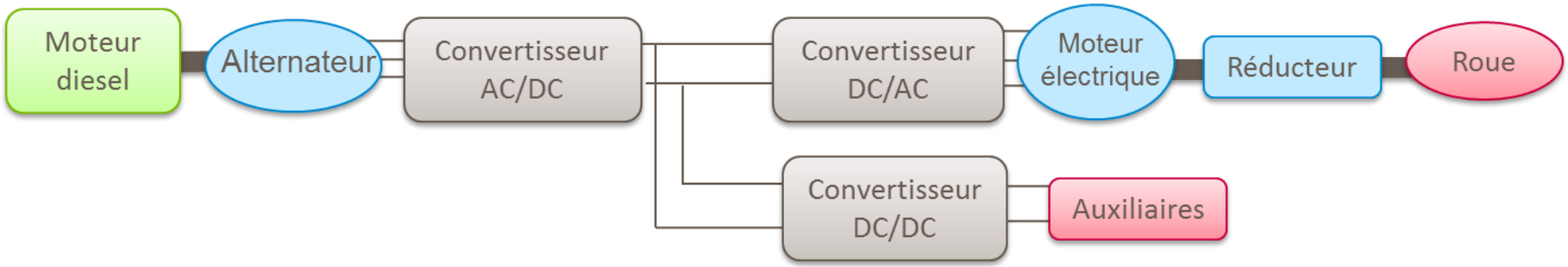
Encadrants SNCF : Julien POUGET et Frédéric CHAUVET

Plan

- Contexte industriel et scientifique
- Système étudié
- Modélisation
- Résultats
- Conclusion et perspectives

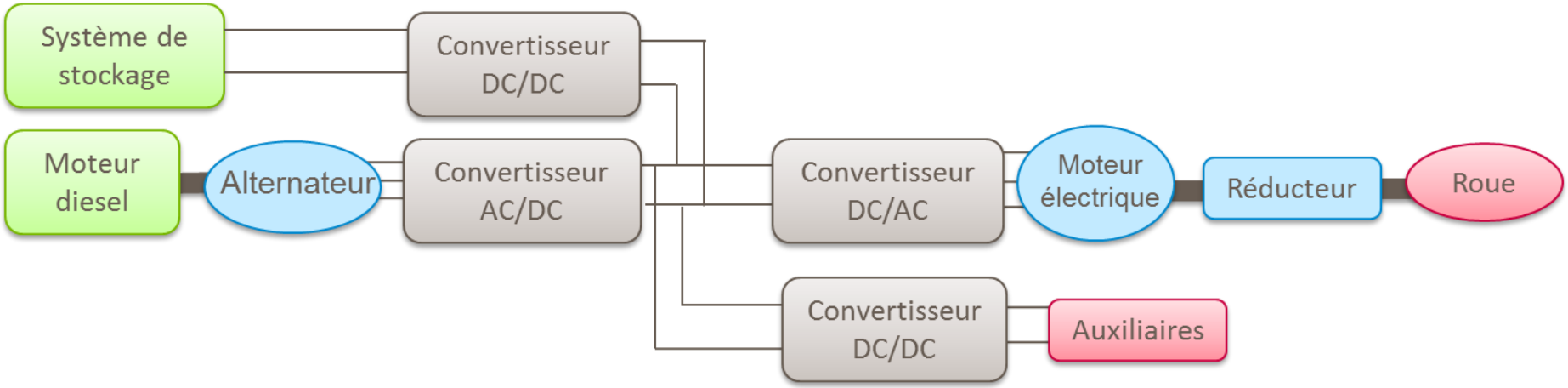
Contexte industriel

- **15% du trafic français en traction autonome : train diesel-électrique**
- **Inconvénients :**
  - Consommation de carburant (énergie fossile)
  - Emission de gaz à effet de serre
  - Dissipation de l'énergie de freinage



Contexte industriel

- **Solution : ajouter du stockage en embarqué**
- **Avantages :**
  - Réduction de la consommation de carburant
  - Récupération de l'énergie de freinage
  - Amélioration de la gestion énergétique



Contexte scientifique

- **Approche historique :**
  - Réaliser un dimensionnement optimal de systèmes multi-sources

Définir l'architecture → Choisir la gestion → Déterminer le dimensionnement optimal

  - Trouver la gestion optimale de systèmes multi-sources :

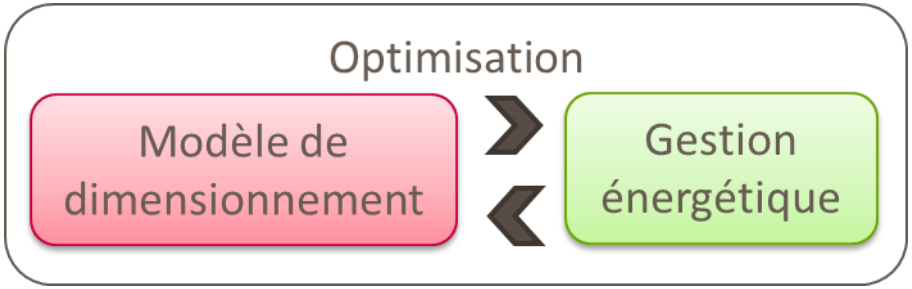
Définir l'architecture → Choisir le dimensionnement → Déterminer la gestion optimale

→ **Approche découplée**

Contexte scientifique

Objectif scientifique

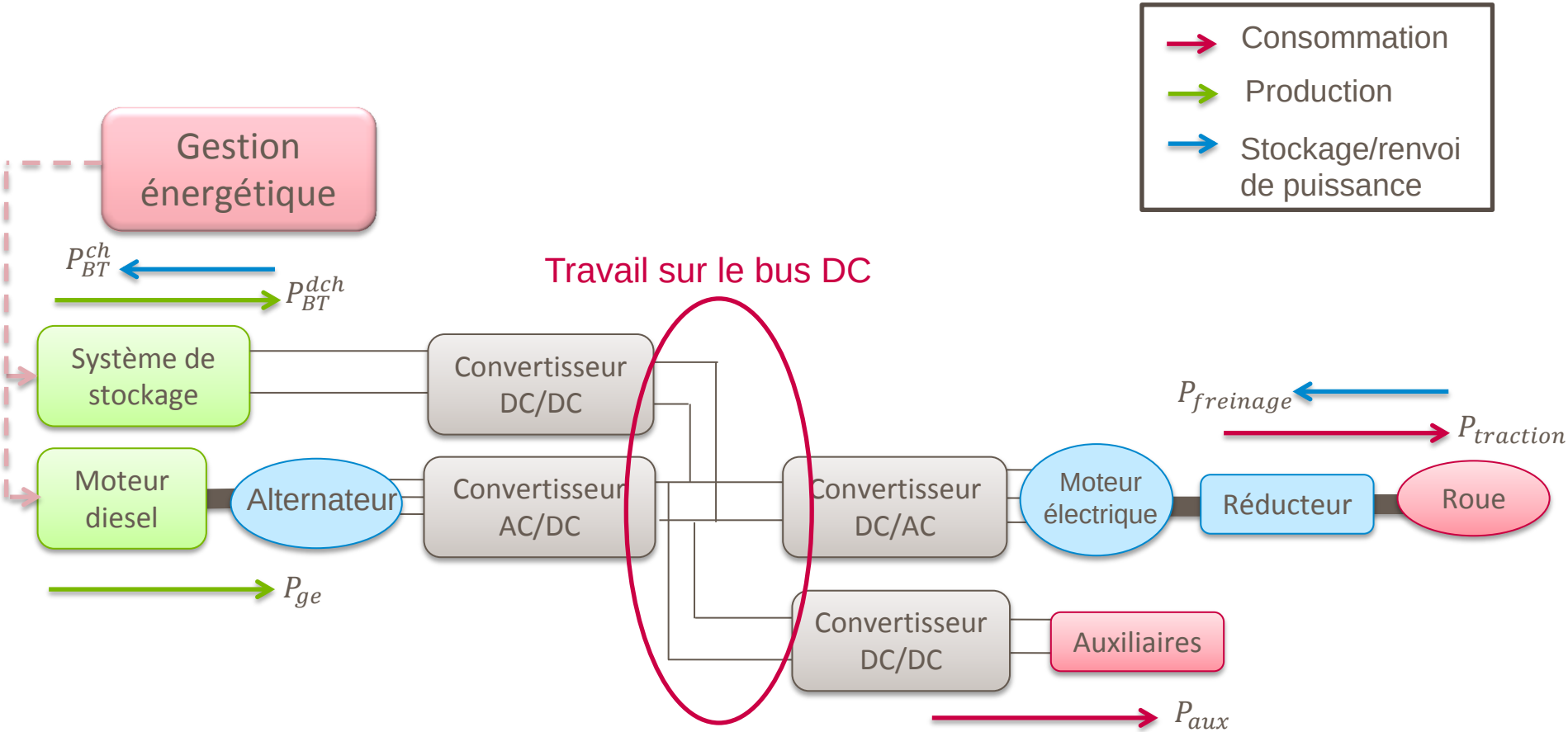
- Prendre en compte l'influence mutuelle de la gestion et du dimensionnement
- Utiliser l'optimisation *combinée* pour définir la **gestion** et le **pré-dimensionnement** d'un train hybride diesel-électrique
- Utilisation de l'algorithme SQP
- Modélisation en flux de puissance



Plan

- **Contexte industriel et scientifique**
- **Système étudié**
  - Train hybride
  - Mission ferroviaire
  - Schéma de fonctionnement
- **Modélisation**
- **Résultats**
- **Conclusion et perspectives**

Train hybride



Mission ferroviaire

- **Optimisation sur un cycle temporel**

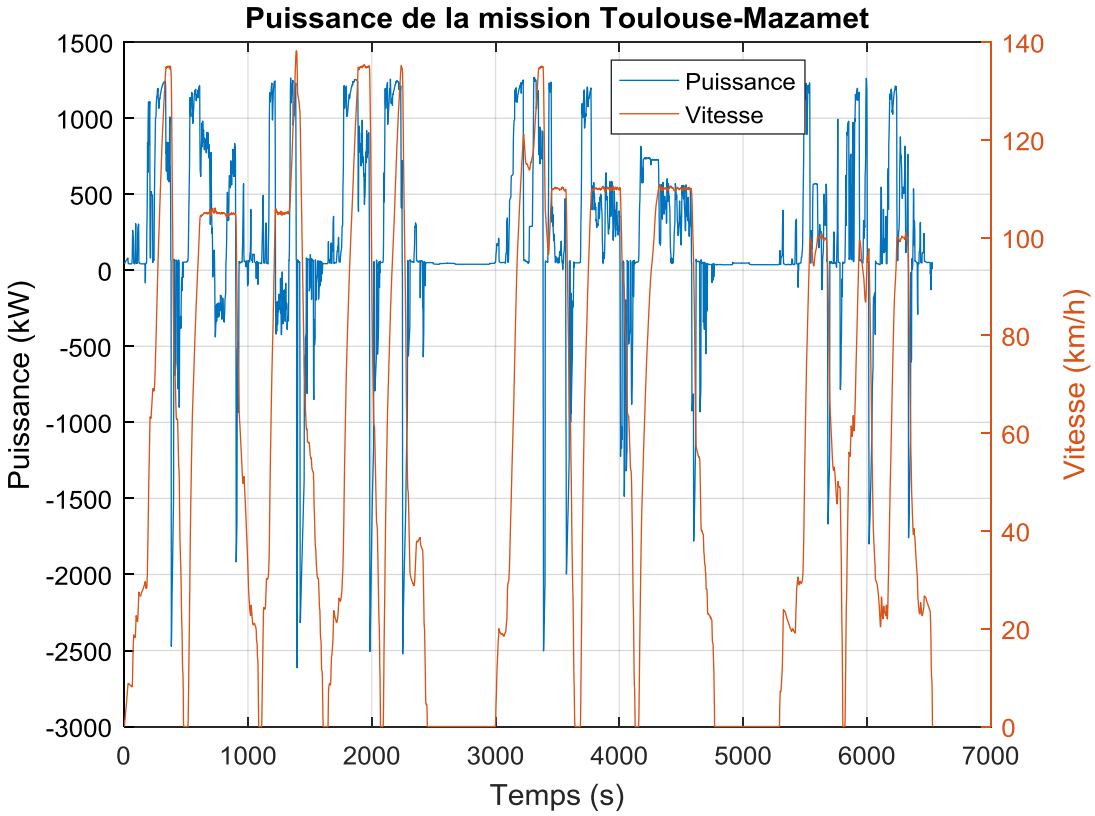
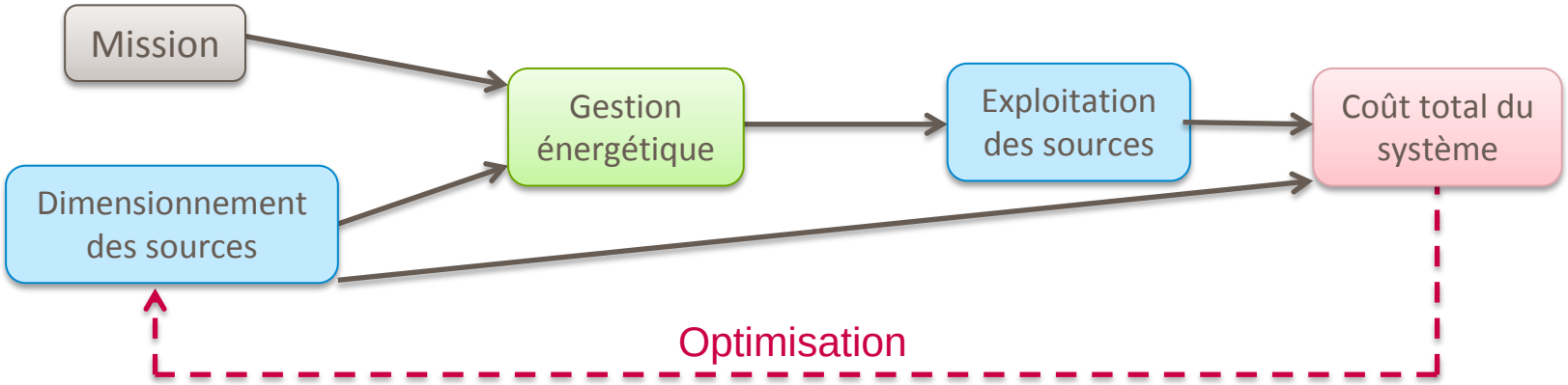


Schéma de fonctionnement

- **Etapes :**
  - Modéliser les sources d'énergie
  - Gestion énergétique
  - Exploitation des sources d'énergies
  - Calcul des coûts



Plan

- **Contexte industriel et scientifique**
- **Système étudié**

- **Modélisation**
  - Modélisation des source d'énergies
  - Gestion énergétique
  - Exploitation des sources d'énergies
  - Coûts

- **Résultats**
- **Conclusion et perspectives**

Modélisation du groupe diesel

Variable de dimensionnement : P_{genom}

Paramètres

Emission spécifique CO2 diesel
Masse volumique diesel
Prix au litre du diesel
Masse du conteneur à vide

Variables d'optimisation

Gestion

$Carburant_{emb}$

P_{genom}

Optimisation

Modèle du groupe diesel

Sorties

- Masse de fuel embarqué
- Volume de fuel embarqué

- Masse du moteur diesel
- Volume du moteur diesel
- Coût d'investissement du moteur diesel

Modélisation du stockeur

Variable de dimensionnement : nb_{stock}

Paramètres

Capacité
Courants (charge, décharge, crête)
Tension nominale
Profondeur de décharge
Etat de charge initial
Rendement

Coût d'une cellule
Masse d'une cellule
Volume d'une cellule

Variables d'optimisation

Nb_{stock}

Optimisation

Modèle du stockeur

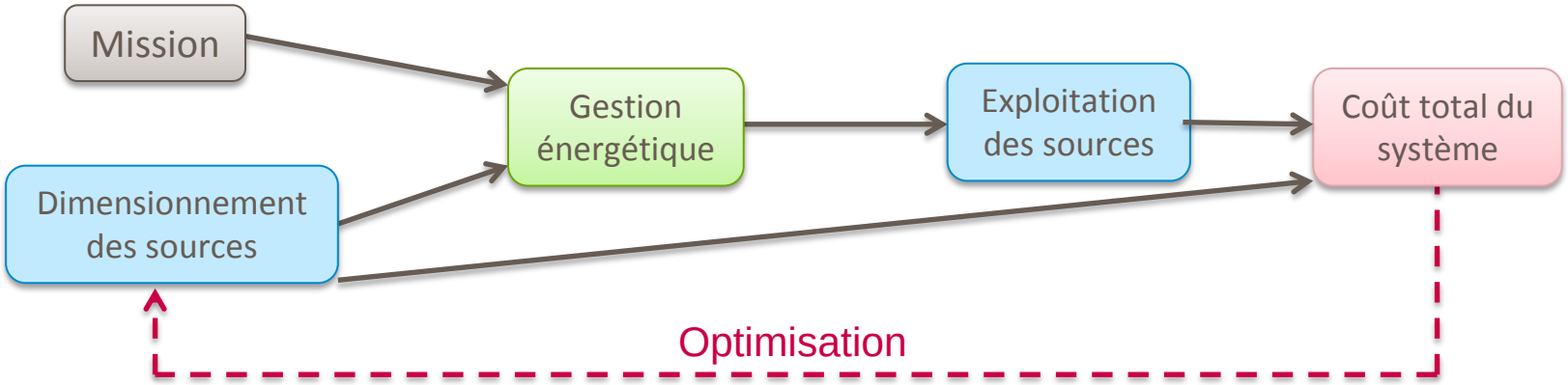
Sorties

- Energie maximale
- Energie minimale
- Puissance de charge
- Puissance de décharge
- Puissance crête

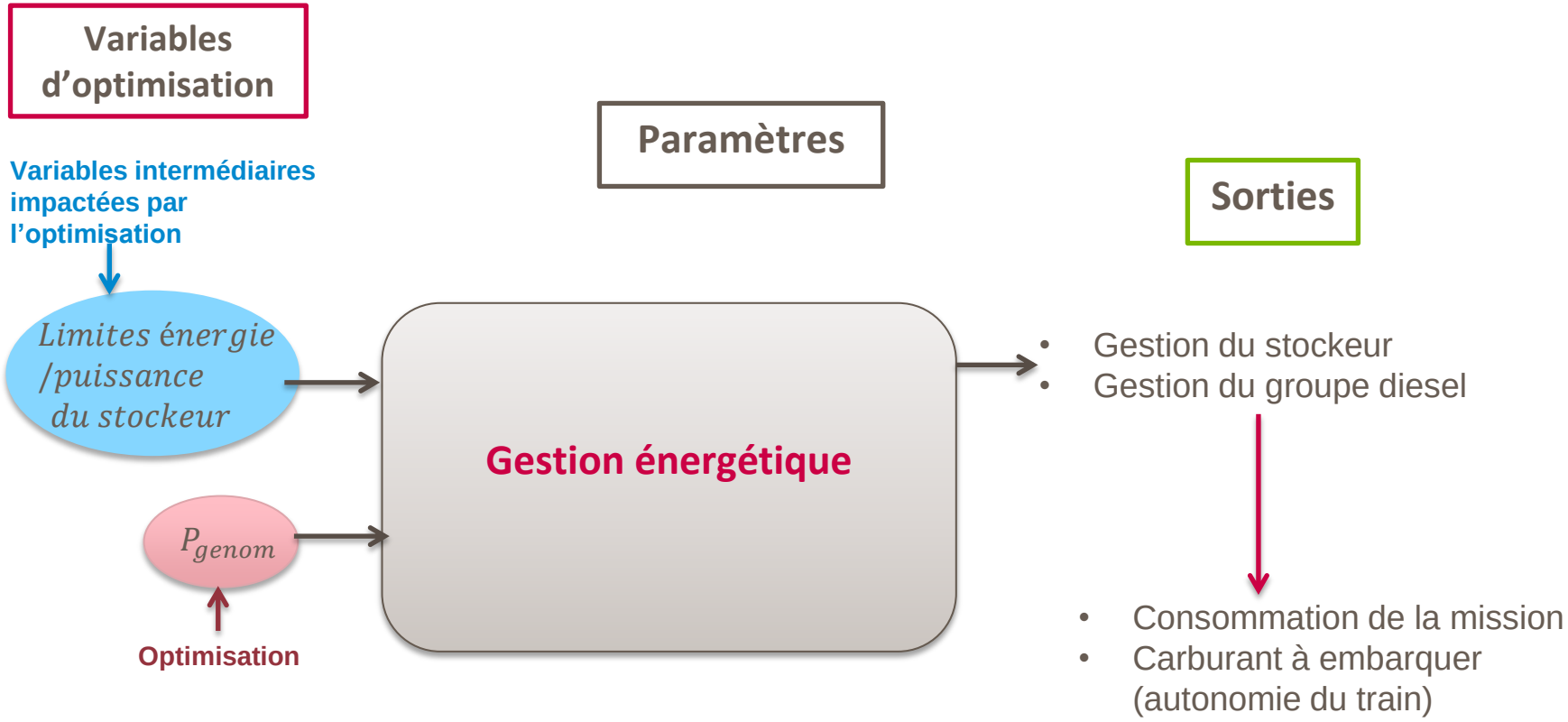
- Coût d'investissement
- Volume du pack
- Masse du pack

Schéma de fonctionnement

- **Etapes de modélisation :**
  - Modéliser les sources d'énergie
  - **Gestion énergétique**
  - Exploitation des sources d'énergies
  - Calcul des coûts



Gestion énergétique



Gestion énergétique

- **Méthodes implantées :**
  - Gestion fréquentielle
    - uniquement dans le cas de deux stockeurs pour séparer la puissance de la mission selon sa dynamique
  - Gestion à base de règles
    - Avantages : facilité d'implantation, possibilité d'ajouter des spécificités
    - Inconvénients : demande une bonne connaissance du fonctionnement des sources, pas de garantie d'avoir un « optimum global » (décision prise à chaque pas de temps)
  - Programmation dynamique
    - Avantages : proposition d'une gestion optimale globale, champs d'exploration plus large
    - Inconvénients : coûte cher en temps de calcul et mémoire utilisés

Gestion fréquentielle

- **Dans le cas de deux types de stockeurs embarqués**
- **Gestion placée avant une gestion par règles ou par programmation dynamique**

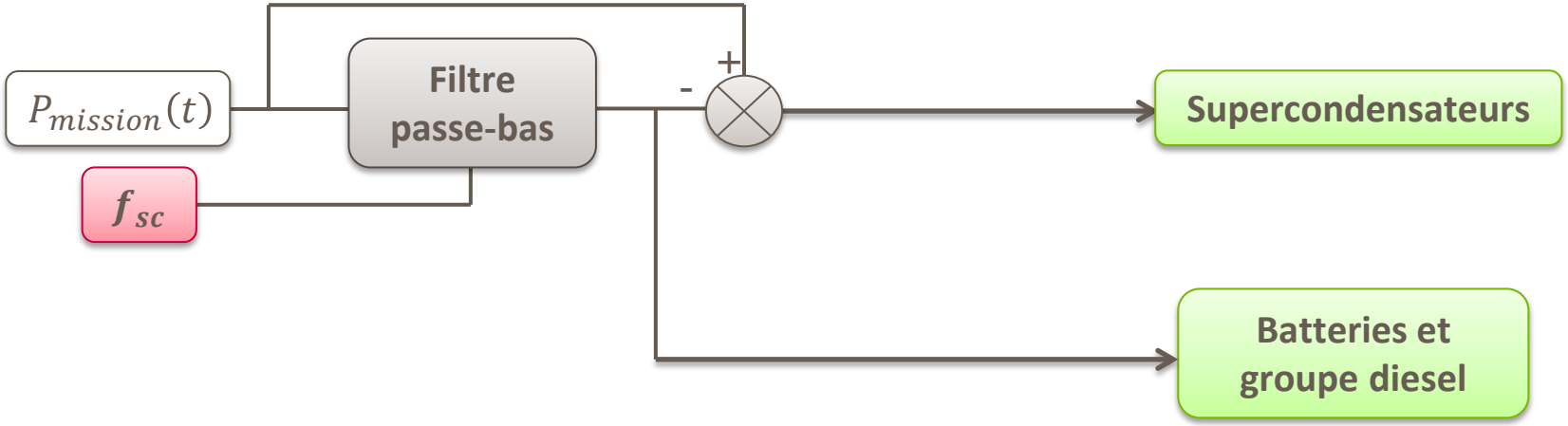
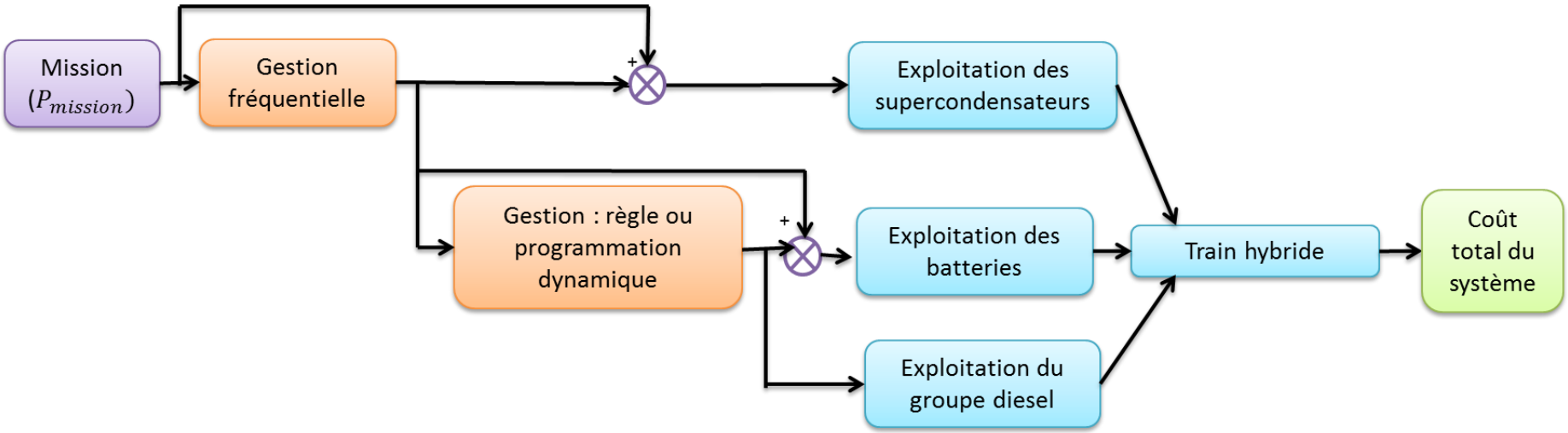


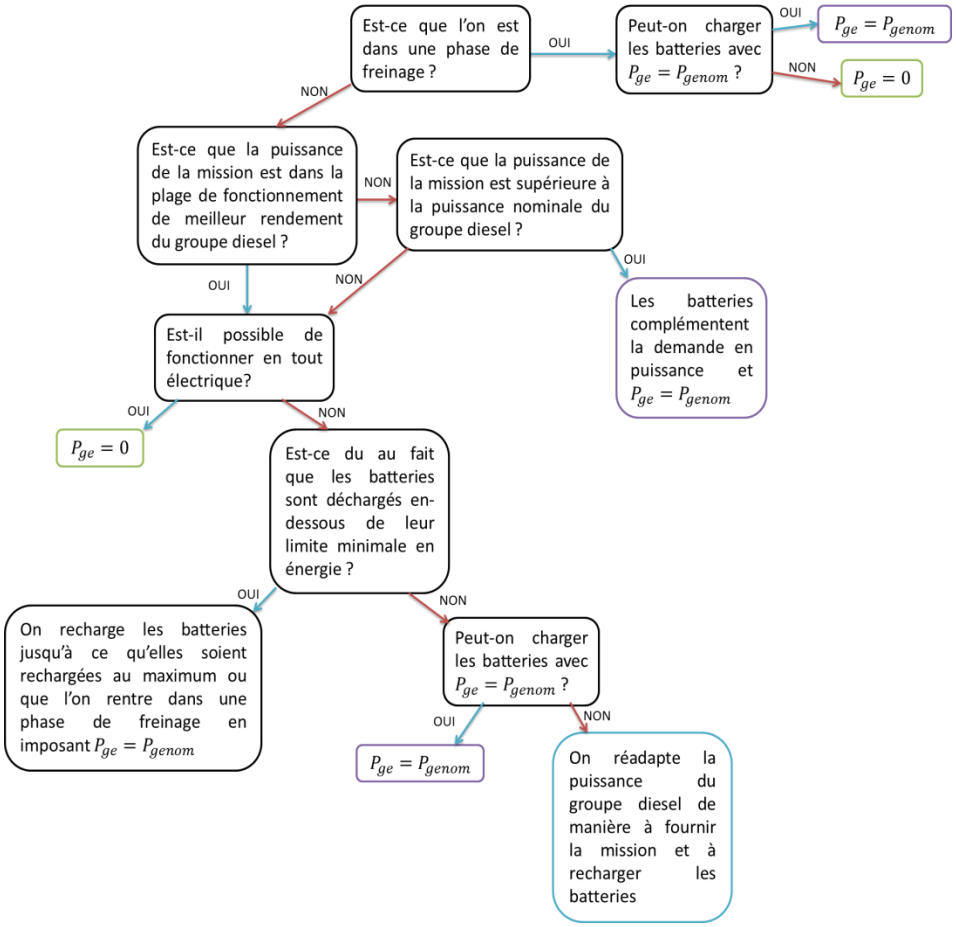
Schéma des gestions



Gestion à base de règles

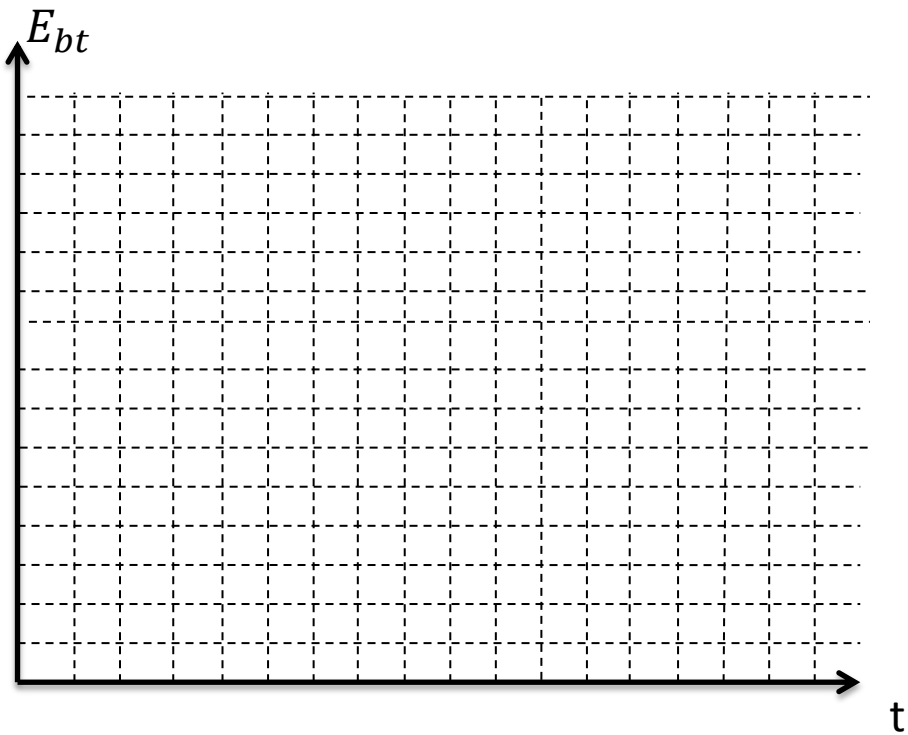
- **5 cas possibles**

Mission	Sources
Freinage de faible puissance	BT (ch) + GD
Freinage de forte puissance	BT (ch)
Traction de faible puissance	BT (dch)
Traction de puissance moyenne	BT (ch) + GD
Traction de forte puissance	BT (dch) + GD



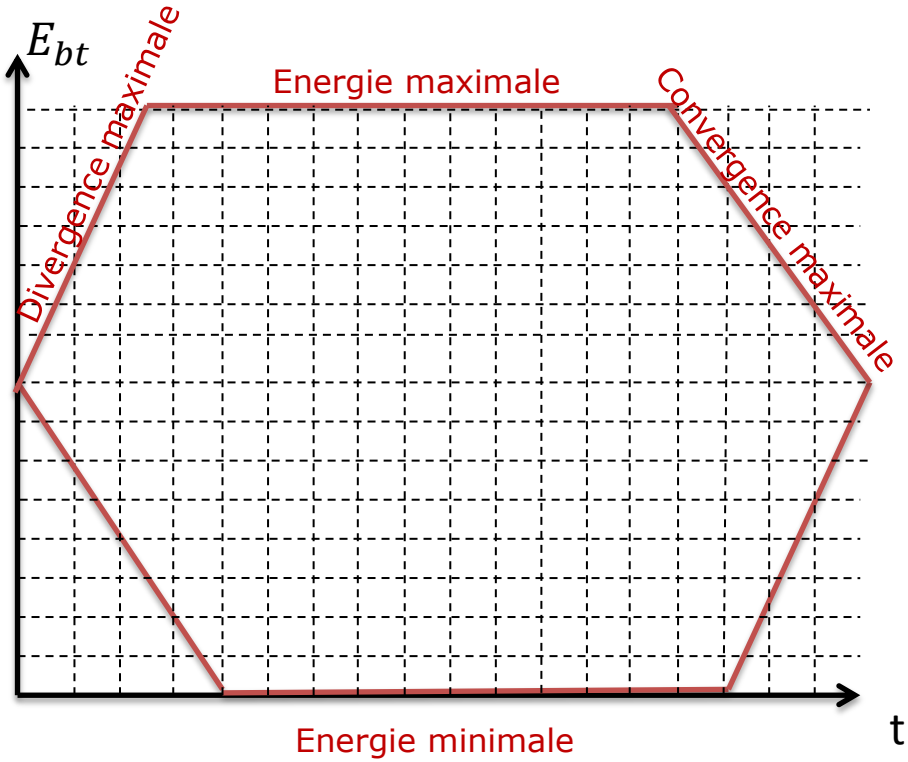
Programmation dynamique

- **Principe :**
  - Maillage de la variable d'état



Programmation dynamique

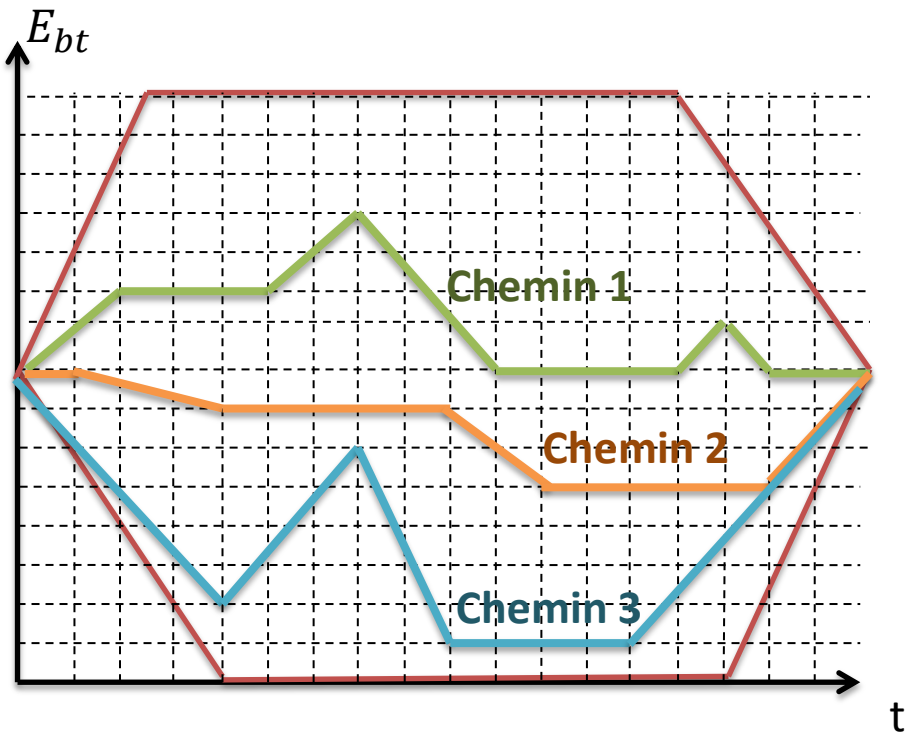
- **Principe :**
  - Maillage de la variable d'état
  - Limitations
    - Énergie max/min
    - Convergence/divergence (puissance)



Programmation dynamique

Principe :

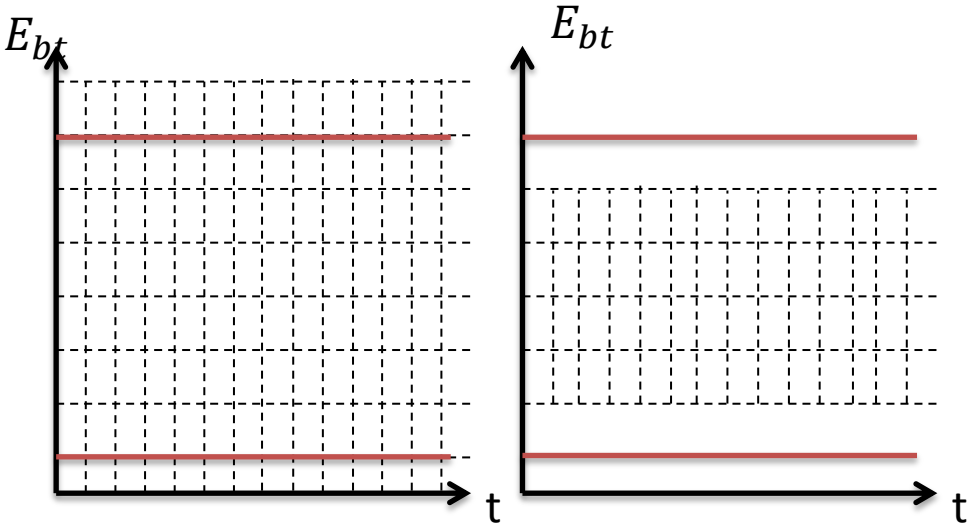
- Maillage de la variable d'état
- Limitations
  - Énergie max/min
  - Convergence/divergence (puissance)
- Fonctionnement récursif
- Calcul du coût de chaque point du maillage (*carburant*) :
  - coût de l'état précédent
  - + coût de transition
- Au point initial : coût total → choix du chemin avec le coût le plus faible



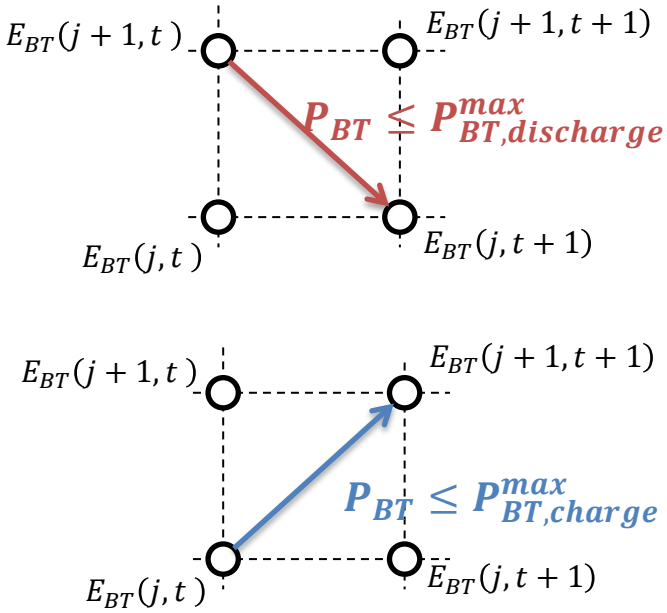
Programmation dynamique

Point délicat : choix de la taille du maillage

- Taille du maillage



- Taille d'une maille



Plus il y a de points et plus une maille est petite, meilleur sera l'optimum trouvé.

Programmation dynamique

- **Problématique : méthode non dérivable (SQP)**

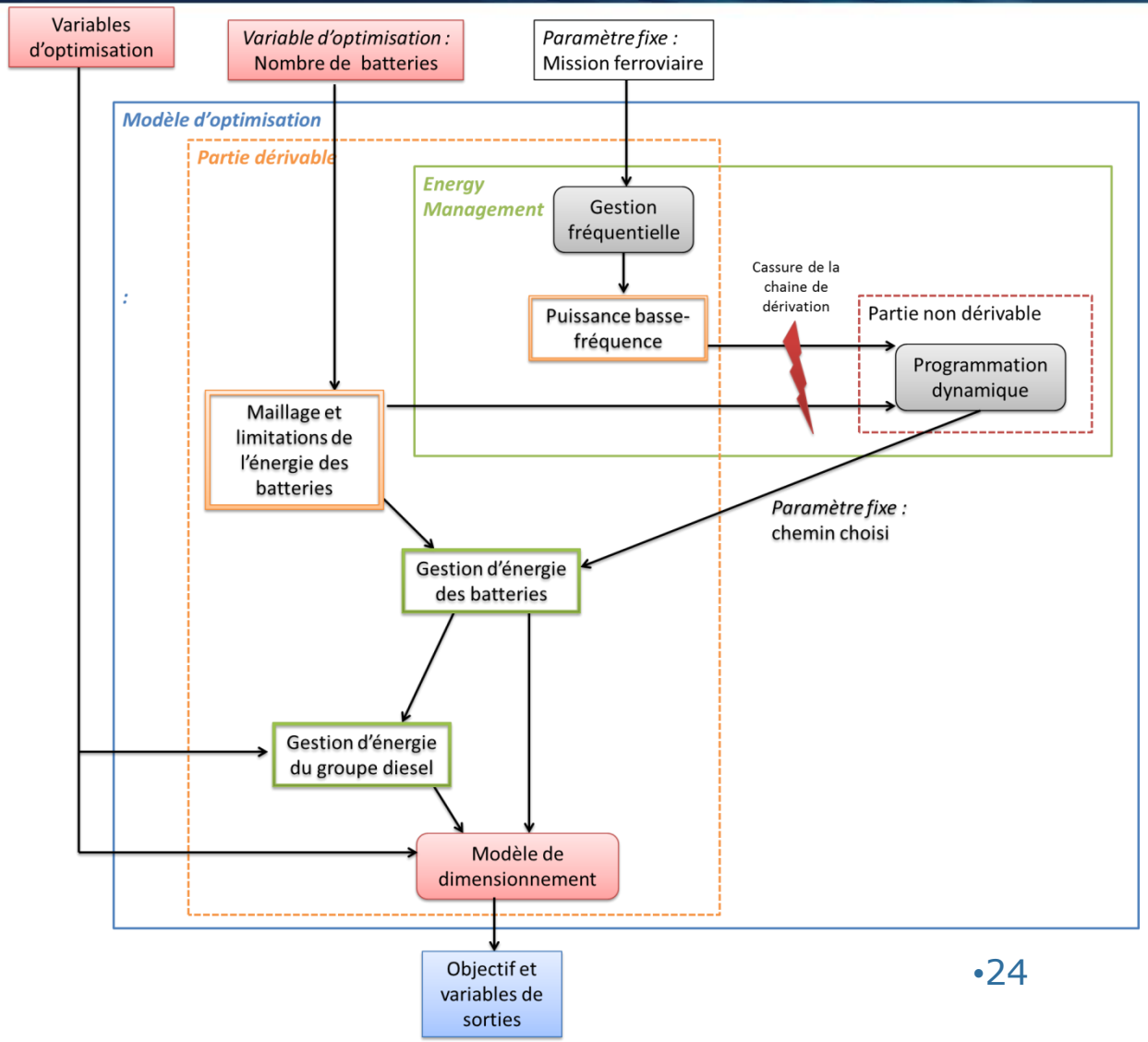
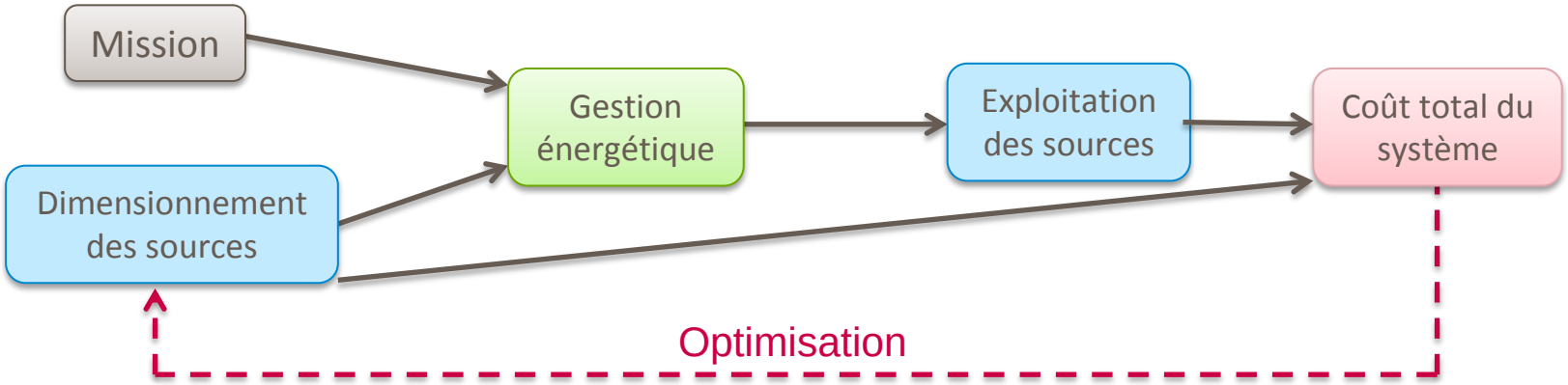


Schéma de fonctionnement

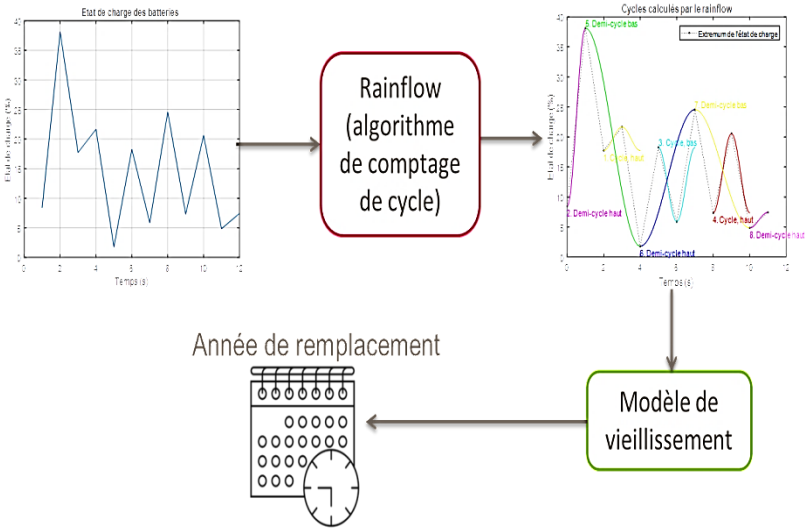
- **Etapes de modélisation :**
  - Modéliser les sources d'énergie
  - Gestion énergétique
  - **Exploitation des sources d'énergies**
  - Calcul des coûts



Exploitation

Batteries :

- Coût de rachat éventuel (étude sur 30 ans)



Groupe diesel :

- Consommation par mission
- On en déduit :
  - Le carburant à embarquer
  - La consommation annuelle

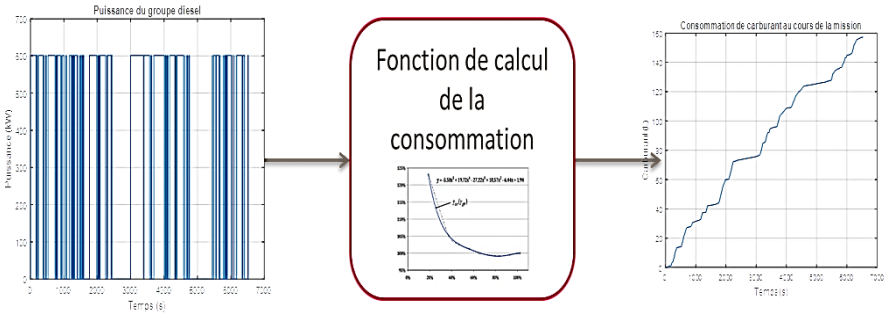
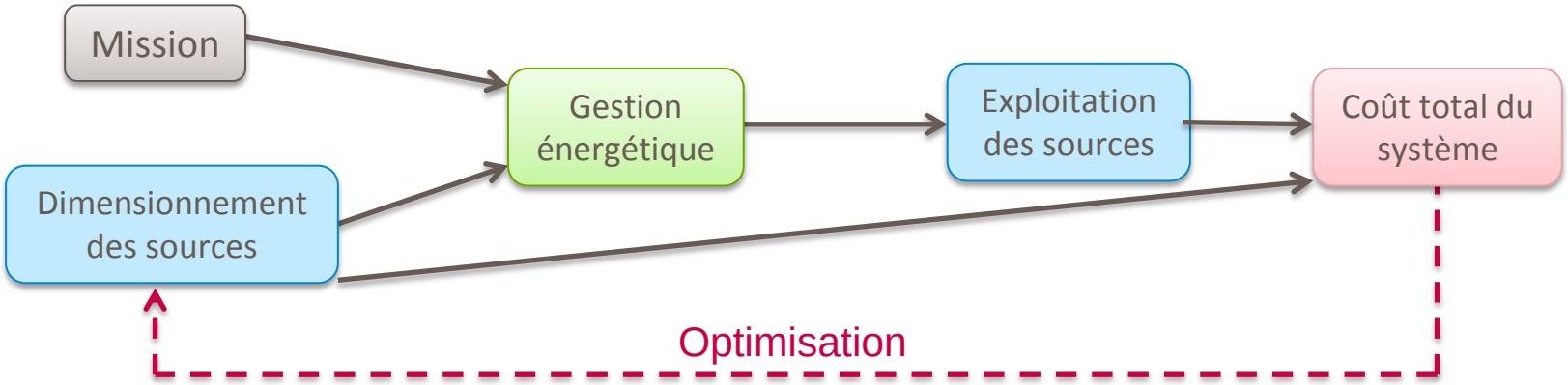
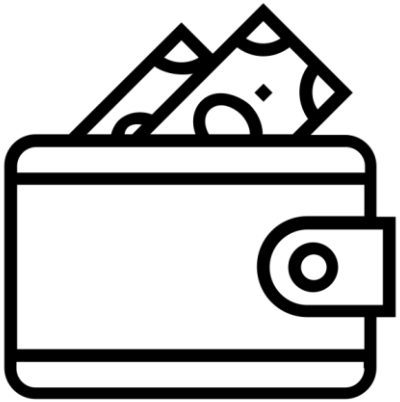
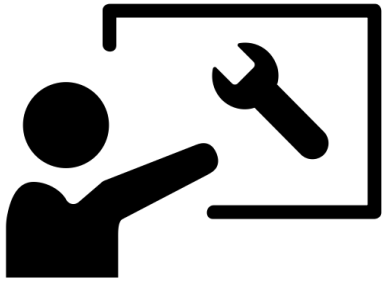


Schéma de fonctionnement

- **Etapes de modélisation :**
  - Modéliser les sources d'énergie
  - Gestion énergétique
  - Exploitation des sources d'énergies
  - **Calcul des coûts**



Coûts

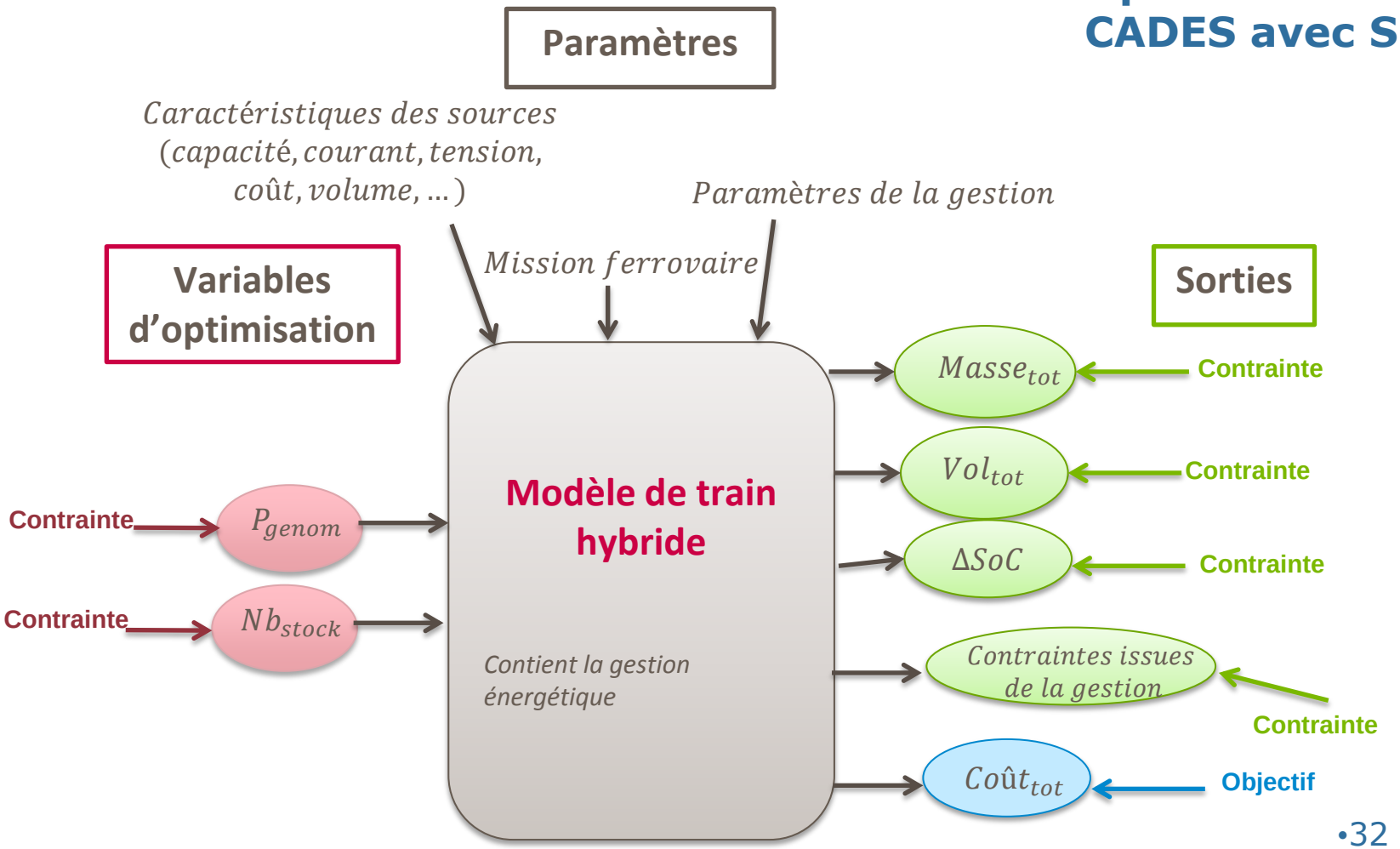
Coût d'investissement	Coût exploitation	
	Usage	Maintenance
		

Coûts

Coût d'investissement	Coût exploitation	
	Usage	**Maintenance**
Stockeur : - Nombre de cellules - Coût d'une cellule **Groupe diesel :** - Puissance nominale - Fonction de calcul du coût d'achat	**Stockeur :** - Coût d'achat du stockeur - Année de rachat **Groupe diesel :** - Consommation annuelle - Prix au litre du carburant	**Stockeur :** - Nombre de cellules - Coût de maintenance annuelle par kWh **Groupe diesel :** - Puissance nominale - Nombre de kilomètre annuel - Coût de maintenance annuelle au kilomètre

Bilan

Optimisation dans CADES avec SQP



Plan

- **Contexte industriel et scientifique**
- **Système étudié**
- **Modélisation**

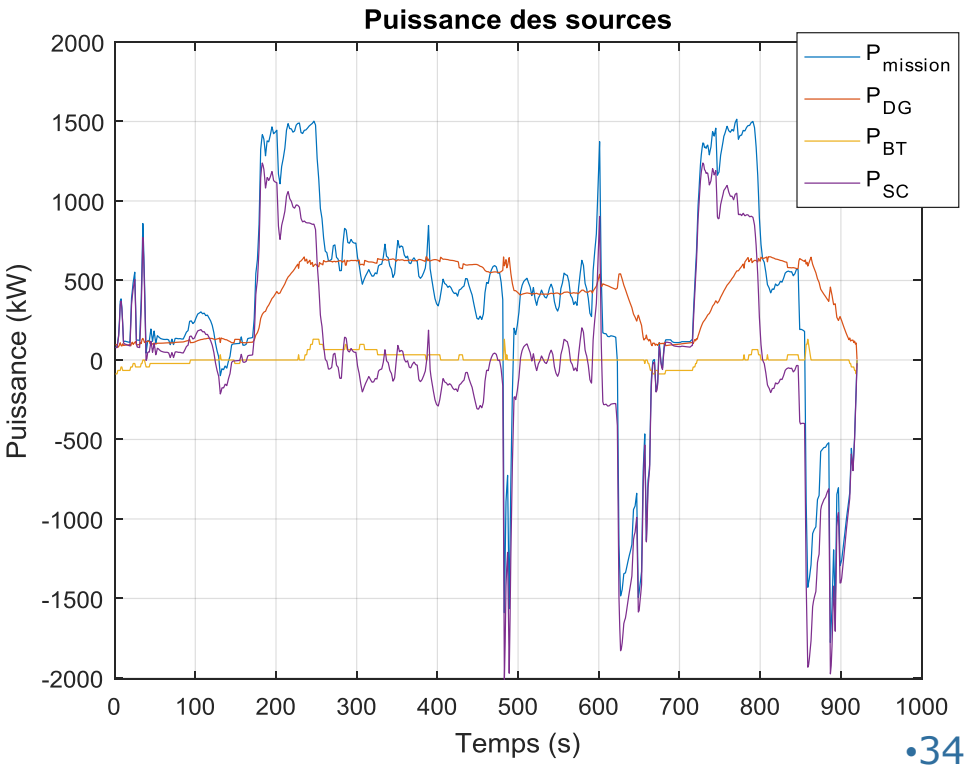
- **Résultats**

- **Conclusion et perspectives**

Résultats

- **Cas d'étude :**
  - Train hybride composé d'un groupe diesel, de batteries et de supercondensateurs
  - Gestion utilisée : fréquentielle et programmation dynamique

Variables	Résultat
Fréquence de coupure du filtre passe-bas	0,001 Hz
Nombre de cellules de supercondensateurs	7 250
Nombre de cellules de batteries	484
Puissance nominale du groupe diesel	650kW
Consommation sur une mission	25L
Volume des sources	40m^3
Masse des sources	13T
Coût total actualisé sur 30 ans	5 900k€



Plan

- **Contexte industriel et scientifique**
- **Système étudié**
- **Modélisation**
- **Résultats**

- **Conclusion**

Conclusion

Conclusion

- Optimisation combinée : dimensionnement et gestion
- Dimensionnement avec des modèles en flux de puissance
- Méthode de gestion énergétique étudiées : fréquentielle, à base de règle, programmation dynamique
- Application au train diesel-électrique

Perspectives

- Développer le modèle (focus sur un modèle thermique de batteries)
- D'autres méthodes de gestion énergétique (Pontryagin)

- Changement d'applicatif : traction électrique hybride

Merci de votre attention

Des questions ?