

Transitions de phase en physique : quelles sont leurs caractéristiques ?

Transitions de phase

- Une **variation continue d'un paramètre d'état** déclenche une discontinuité d'un paramètre macroscopique → discontinuité des propriétés du système
- Caractéristiques universelles dépendant de quelques paramètres :
 - Dimension du système
 - Nombre de degré de liberté des objets en interaction
 - Portée des interactions

Etude des transitions de phase

- Modèle de Landau : notion de **paramètre d'ordre** (m) associé à une brisure de symétrie
- Analyse variationnelle du potentiel de Gibbs : le minimum définit l'**équilibre thermodynamique** et l'**enthalpie libre G** du système
- Plusieurs chemins possibles :
 - discontinu (chaleur latente) : transition de 1^{er} ordre, le potentiel de Gibbs a 2 minimums
 - continu (chaleur spécifique) : transition de 2nd ordre, un seul minimum du potentiel de Gibbs

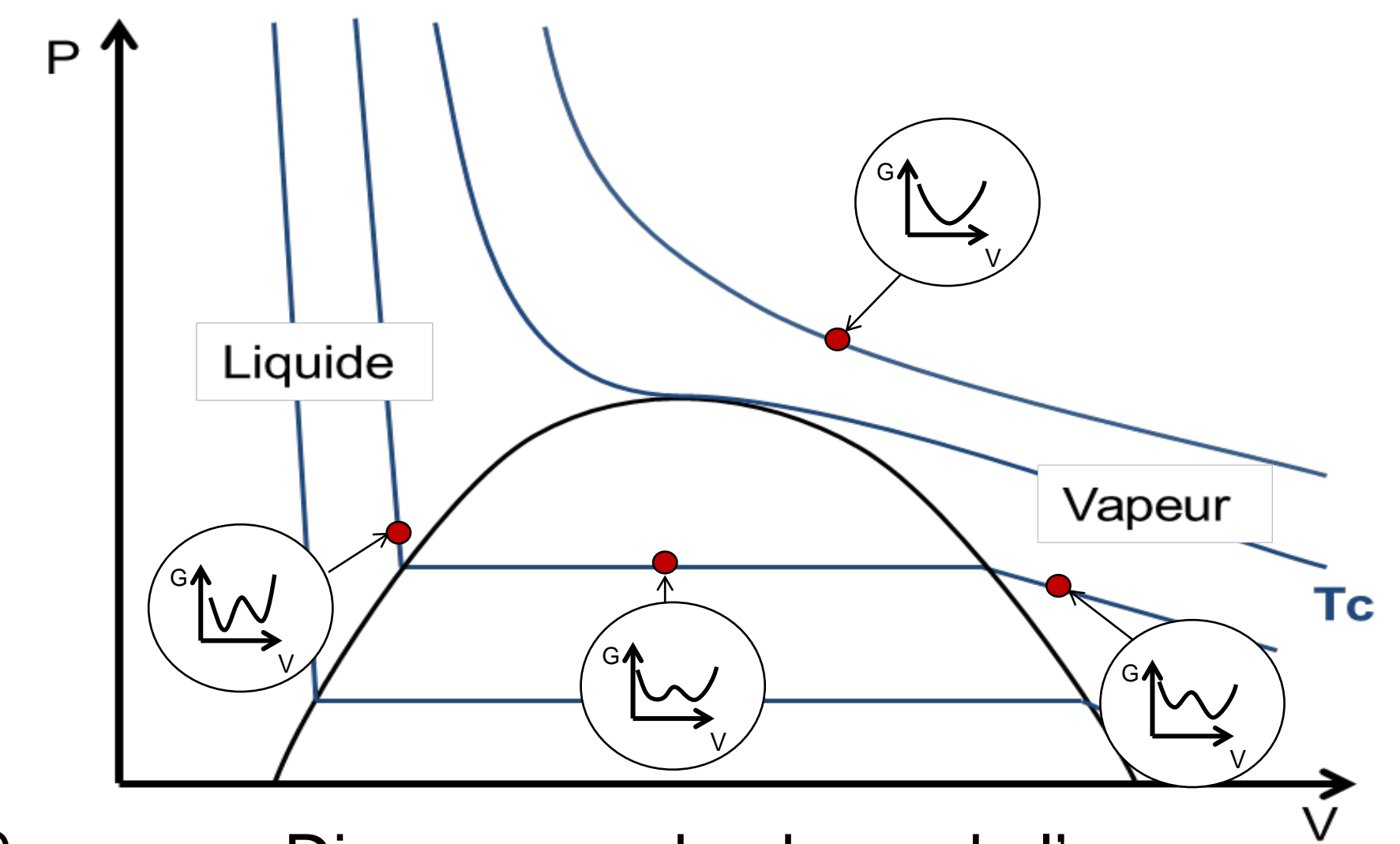


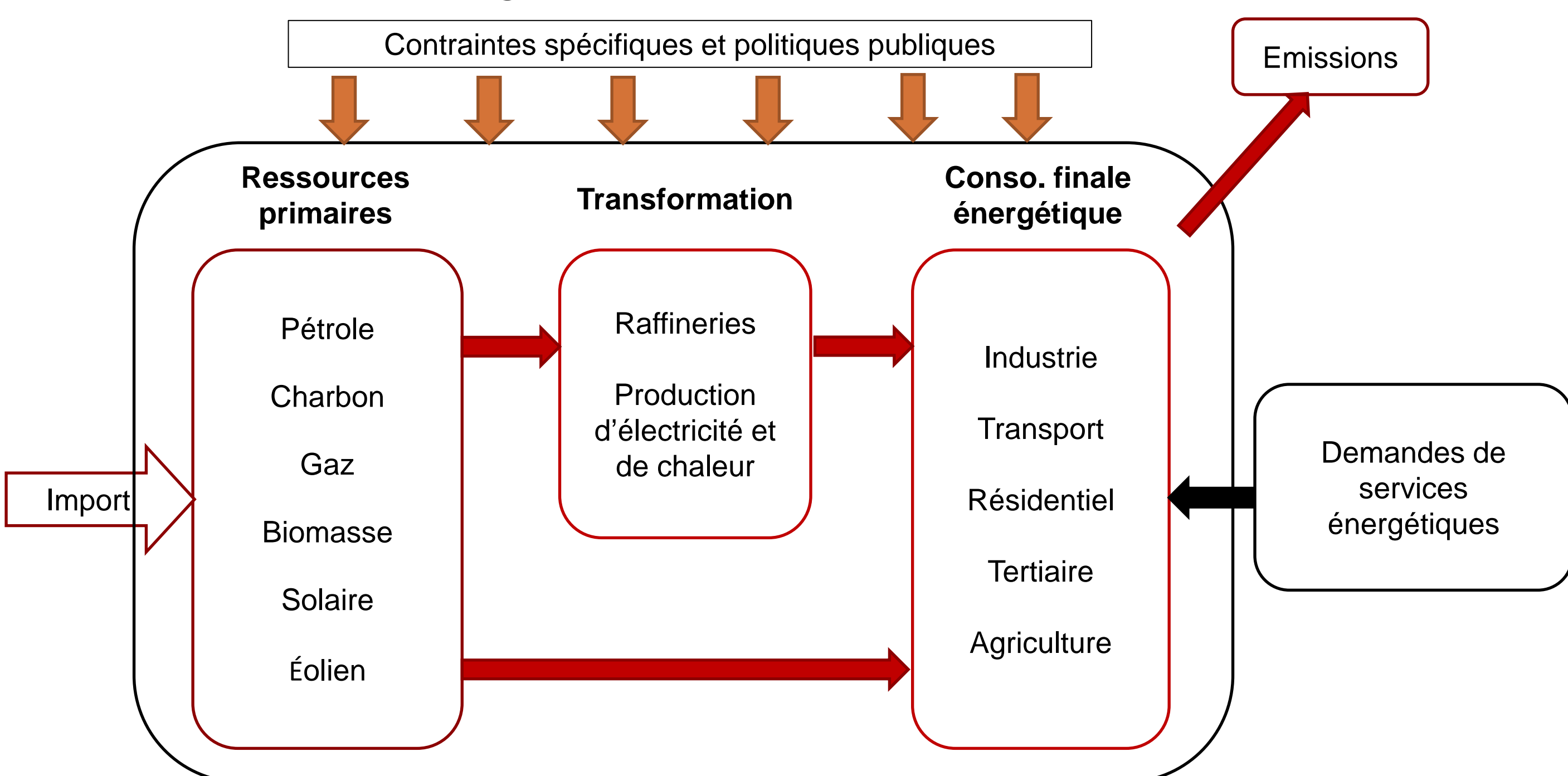
Diagramme de phase de l'eau : transition liquide-gaz

Comment étudier le système énergétique ?

Le modèle TIMES-FR

un modèle d'optimisation technico-économique

Un modèle technologiquement riche



Un modèle d'optimisation : **minimisation du coût total** actualisé du système pour déterminer un choix de technologies

$$\min \sum_{y \in \text{years}} (1 + d_y)^{\text{REFYEAR} - y} * \text{ANNCOST}(y)$$

Quelle analogie entre la transition énergétique et les transitions de phase ?

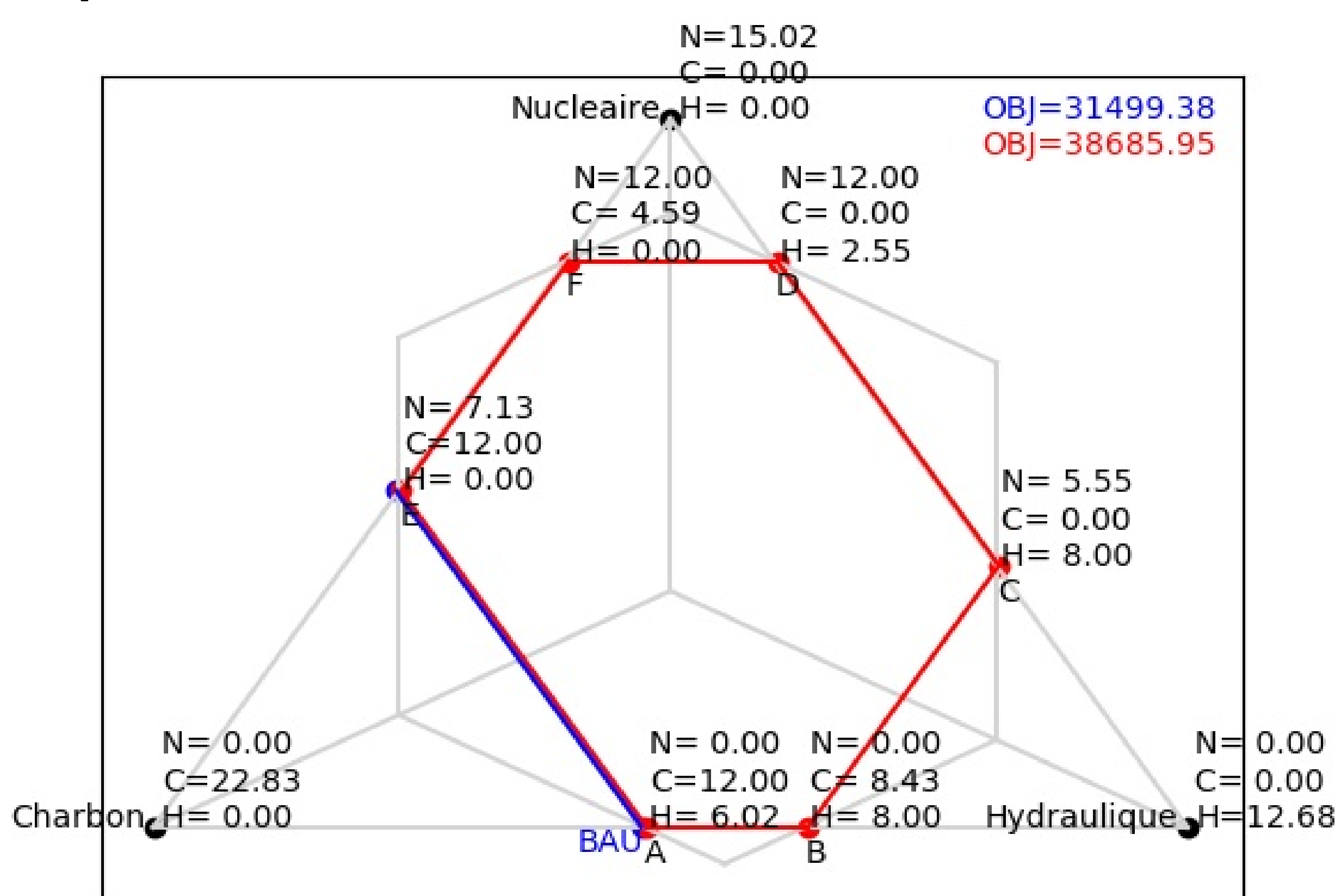
Transition de phase	Transition énergétique
Etat du système : défini par les paramètres macroscopiques Ex : (P,V,T) définit un état de l'eau	Trajectoire du système énergétique : définie par ses capacités installées ou son approvisionnement en énergie primaire
Phase : ensemble d'états dont les propriétés physiques sont uniformes	Phase : ensemble de trajectoires dont les caractéristiques sont similaires (par exemple, les mêmes niveaux d'émissions)
Enthalpie libre (minimum du potentiel de Gibbs)	Coût total actualisé (minimum)
Potentiel de Gibbs (fonctionnelle thermodynamique)	Fonctionnelle du coût total actualisé

Comment faire une transition du système énergétique ?

Utilisation des coûts réduits

- **Coût réduit associé à une variable** : changement maximal du coefficient de la fonction objectif sans modifier la solution optimale → permet le passage d'une solution à une autre : une technologie peut devenir optimale avec l'application du coût réduit
- Agit comme des taxes ou subventions pour chaque technologie

Exemple d'utilisation des coûts réduits :



Graphique des solutions obtenues avec les coûts réduits dans un système à 3 technologies

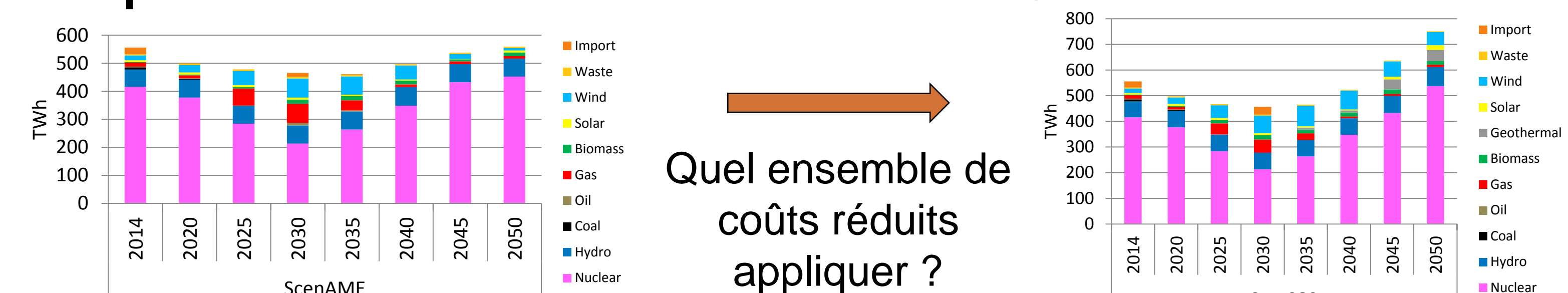
Heuristique pour transiter d'un Business as Usual à un système décarboné :

- Détermination du BAU, des coûts réduits et du minimum d'émission
 - Idée : les fonctions objectifs donnant le minimum d'émission se trouvent dans le **cône des contraintes actives** → recherche des coûts réduits à appliquer sur la fonction objectif initiale pour la déplacer dans le cône
- Résultat** : un **ensemble de coûts réduits** à appliquer sur les coefficients de la fonction objectif pour chaque variable

Exemple d'un système énergétique simplifié à 2 variables "capa" et "ncap" imitant le modèle TIMES-FR :

	BAU : capa			Min. émi. : capa			RC utilisé : capa			RC utilisé : ncap		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Charbon	9	9	9	0.5	0.5	0.5	0	0	RC + ε	0	0	0
Éolien	1	1	12.5	1	2.5	15	0	0	0	0	RC - ε	0
Gaz	3.2	9.5	10	0.5	3.8	3.8	0	0	RC + ε	0	0	0
Hydro	8	8	8	8	8	8	0	0	0	0	0	0
Nucléaire	3	3	3	10.5	12	12	0	0	0	RC + ε	RC + ε	0

Perspectives : utilisation avec le modèle TIMES-FR



Quel ensemble de coûts réduits appliquer ?