

COPIL I – Tâche 1

Contributeurs : Alexandre Pannier (TerriFlux), Jean-Yves Courtonne (INRIA), Antoine Fontaine (CNRS)

Contexte

- Tâche 1 : Quantification des flux thermiques et représentations métaboliques

1^{er} bloc de travail :

- TerriFlux (Alexandre Pannier) : 3 mois (à plein temps), de septembre à novembre 2024
- Stage L3, EMSE (Justine Montagne) : 3 mois (1 journée par semaine), de novembre 2024 à janvier 2025

Objectifs

- Tâche 1 : Quantification des flux thermiques et représentations métaboliques

Mettre en évidence (par des représentations graphiques) :

- Les **volumes des flux thermiques** par rapport aux autres flux énergétiques
- Les **sources d'énergie** à l'origine des flux thermiques
- Les **températures** des flux thermiques

Echelles géographiques : **France** + quelques **métropoles** (ex : Lyon)

Travaux existants (diagrammes de Sankey)

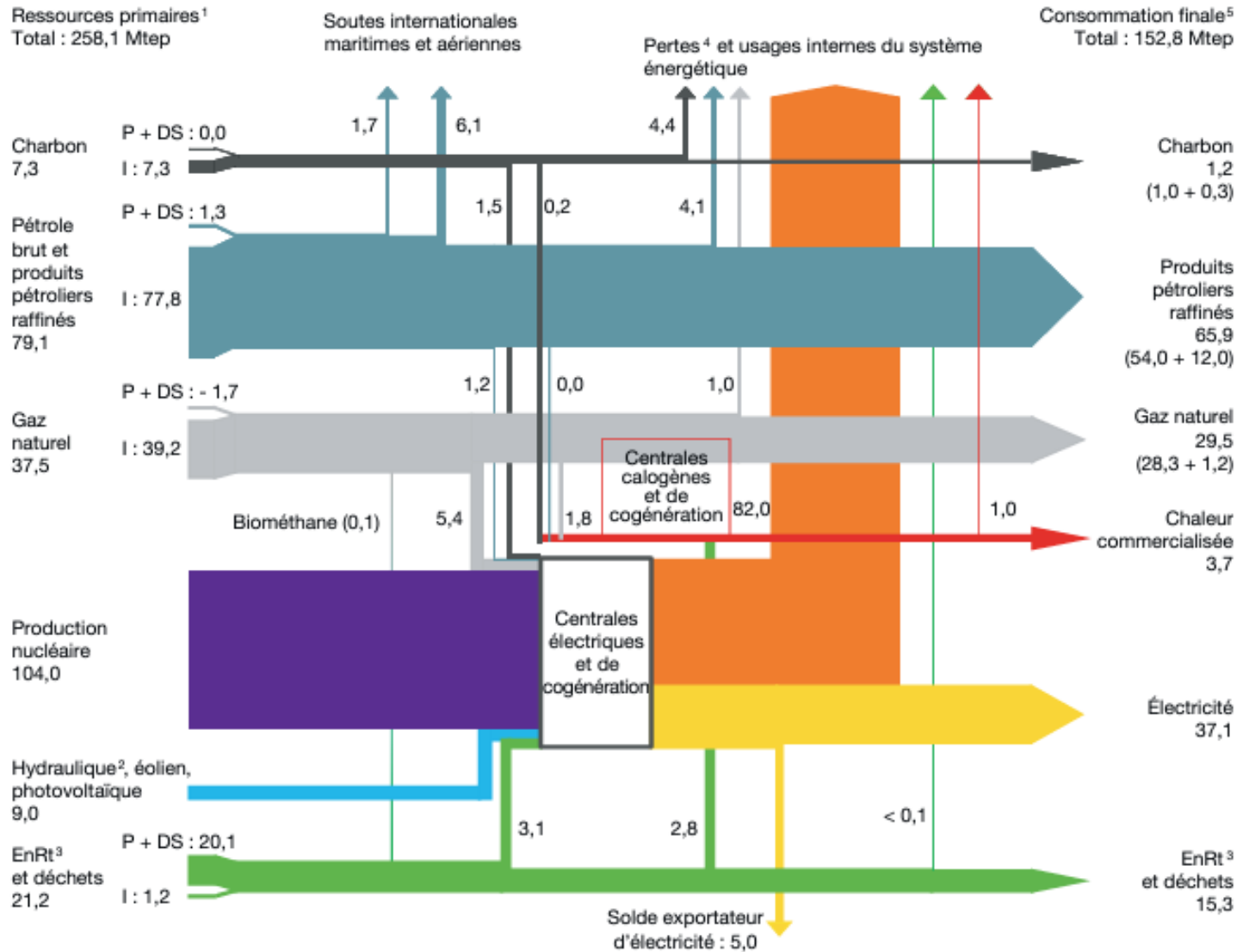
- **Ministère de la transition écologique**

Données SDES

Service des Données et Etudes Statistiques

- Bilan énergétique de la France, 2019

Ensemble des énergies – Bilan énergétique de la France en 2019 (Mtep)



P : production nationale d'énergie primaire. DS : déstockage. I : solde importateur.

¹ Pour obtenir la consommation primaire, il faut déduire des ressources primaires le solde exportateur d'électricité ainsi que les soutes maritimes et aériennes internationales.

² Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.

³ Énergies renouvelables thermiques (bois, solaire thermique, biocarburants, pompes à chaleur, etc.).

⁴ L'importance des pertes dans le domaine de l'électricité tient au fait que la production nucléaire est comptabilisée pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont les deux tiers sont perdus lors de la conversion en énergie électrique.

⁵ Usages non énergétiques inclus.

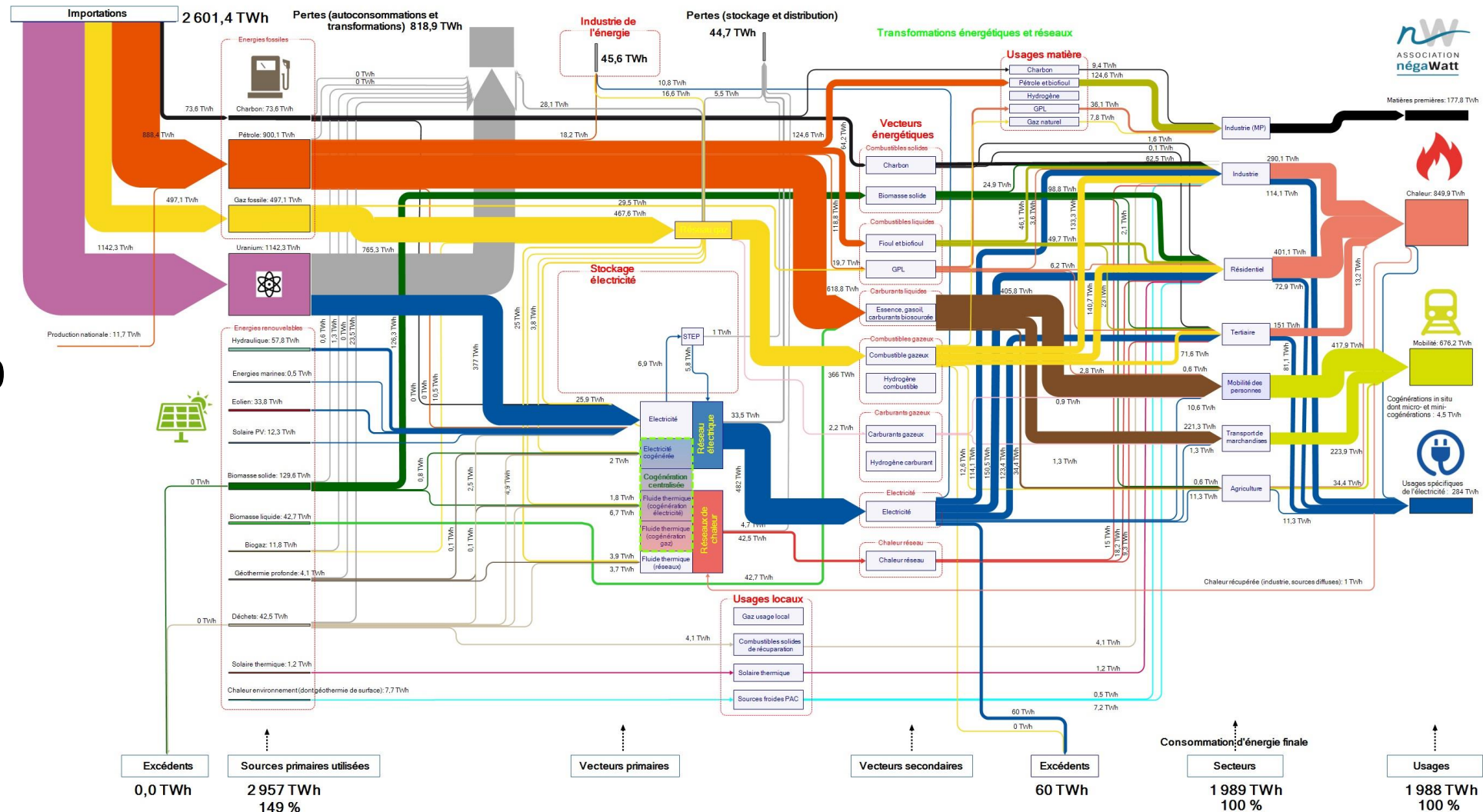
Source : calculs SDES

Travaux existants (diagrammes de Sankey)

- **Négawatt**

Données SDES

- **Bilan énergétique de la France, 2019**



Notes:
 1) Ce diagramme n'est pas une représentation physique des réseaux, mais une représentation des flux et pertes liées aux différentes transformations des énergies depuis les sources primaires jusqu'aux usages finaux.
 2) La plupart des valeurs sont arrondies à l'unité, pour ne pas alourdir le schéma. Il peut en résulter des bilans non parfaitement équilibrés.

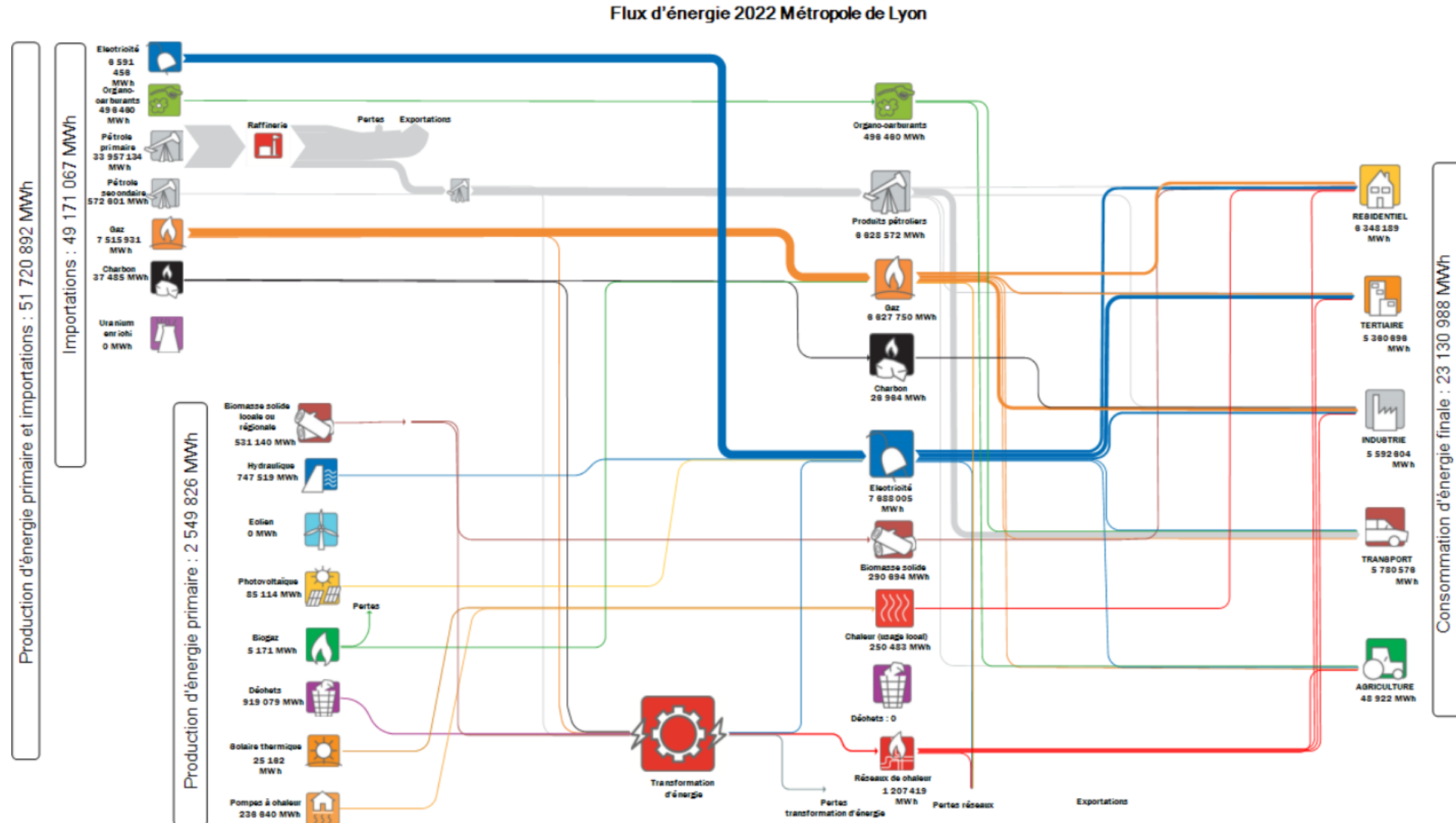
Travaux existants (diagrammes de Sankey)

- **ORCAE, AURA**

*Observatoire
Régional Climat Air
Energie, Auvergne-
Rhône-Alpes*

Données SDES

- Bilan énergétique de la métropole de Lyon, 2022



3 stades de l'énergie

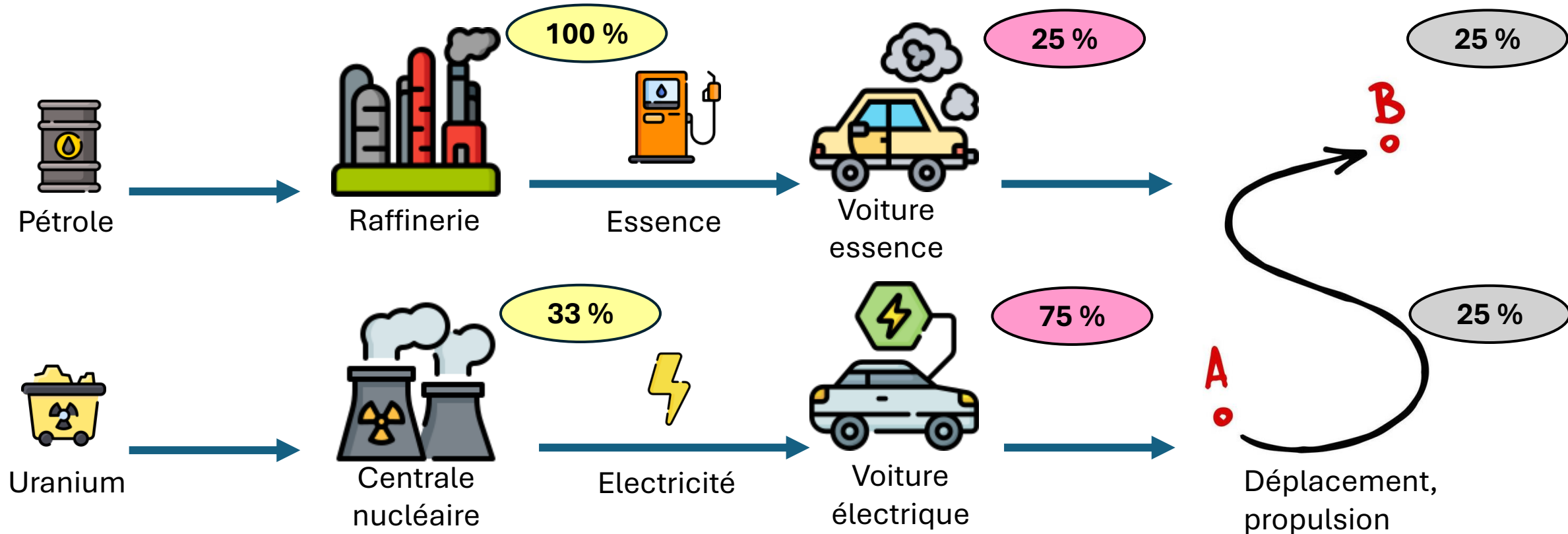
- Primaire : source d'énergie disponible dans à l'**état naturel** (ex : pétrole brut, bois, rayonnement solaire)
 - Finale : énergie consommée par les **machines**, afin de satisfaire les besoins (ex : pétrole raffiné, bois, électricité)
 - Utile : énergie dont on a réellement **besoin** (ex : propulsion, chaleur, lumière)
- Les 3 précédents travaux représentent les étapes primaire et finale

3 stades de l'énergie

Ressource naturelle
Energie primaire

Vecteur énergétique
Energie finale

Besoin
Energie utile



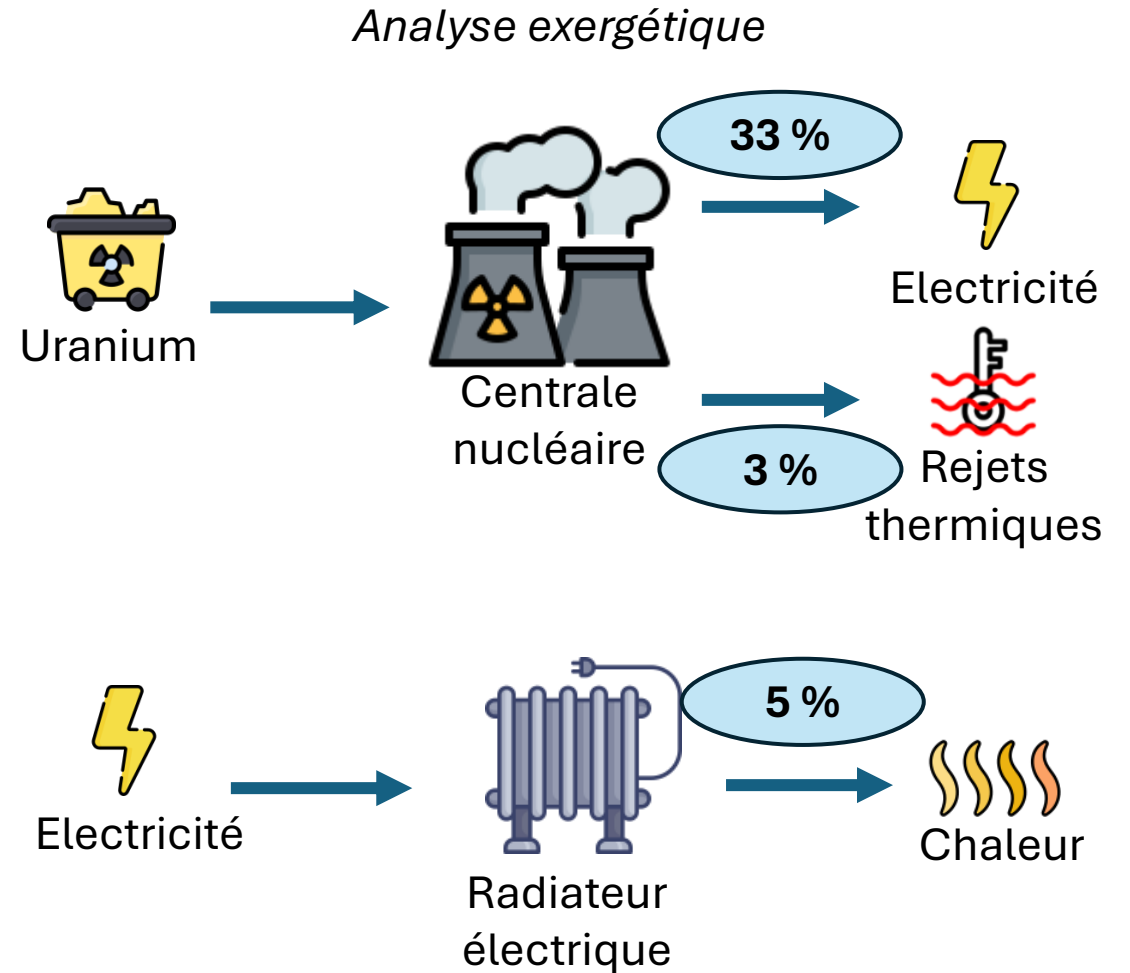
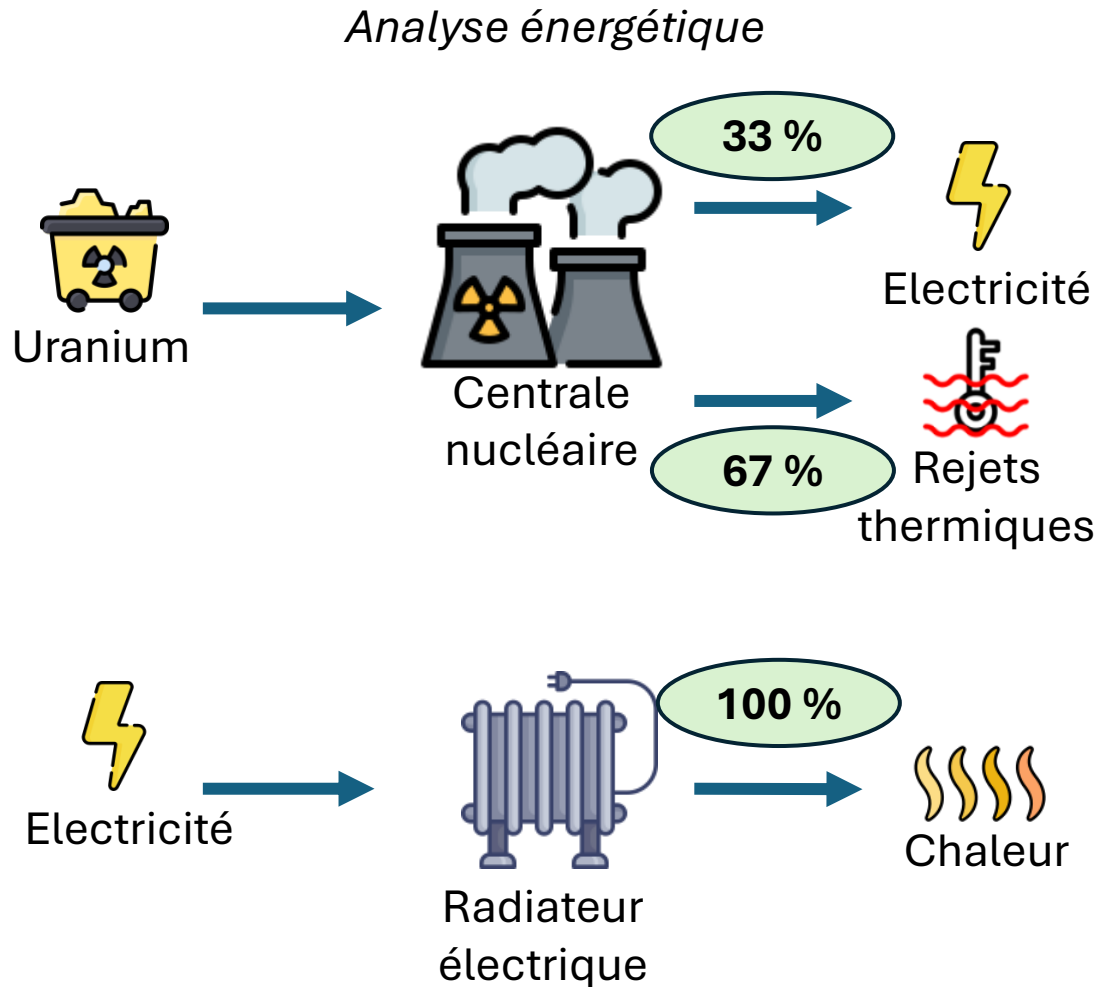
- Le rendement PF est très différent, alors que le rendement PFU est équivalent
- Autre intérêt de quantifier l'énergie utile : les flux de chaleur et de froid apparaissent principalement à ce stade

Analyse exergétique

- Exergie : travail (énergie de grande qualité) maximal qu'il est possible de produire à partir d'une source d'énergie
 - Permet de rendre compte de la **qualité d'une énergie**
- **Exergie** \ll **énergie** pour les **flux thermiques** (chaleur/froid) : plus la température du flux est proche de la température de l'environnement, plus l'exergie est faible
- **Exergie** \approx **énergie** pour tous les **autres flux d'énergie** (pétrole, charbon, uranium, bois, électricité, etc.)

Utile afin de comparer toutes les énergies dans **un même référentiel**

Analyse exergétique



Biais possibles avec une analyse énergétique seule :

- Centrale nucléaire : grand potentiel de valorisation de chaleur fatale
- Radiateur électrique : très bonne efficacité

Méthode

- Recensement des **bases de données** énergétiques
- Quantification de l'**énergie utile**
- Quantification et analyse du gisement de **chaleur fatale**
- Estimation des **températures des flux thermiques**
- Calcul d'**exergie**

Bases de données

- *Echelle nationale*
 - SDES : France, **énergies primaires et finales + consommation d'énergie finale par usage** pour certains secteurs
 - AIE (Agence Internationale de l'Energie) : Monde, **énergies primaires et finales** (reprend les données du SDES pour la France)
 - ✓ CL-PFU (Brockway et al.) : Monde, **énergies primaires et finales** (reprend les données de l'AIE) + estimation détaillée des **énergies utiles** (et les machines associées) + quantification de l'**exergie**
 - ✓ Global waste heat potential (Forman et al.) : Monde, **rendements des machines + répartition détaillée de la chaleur fatale** par niveau de température
- *Echelle locale*
 - ✓ ORCAE (reprend notamment les données du SDES) : AURA, **énergies primaires et finales + consommation d'énergie finale par usage** pour certains secteurs

Résultats

Niveau de détail de la BDD CL-PFU :

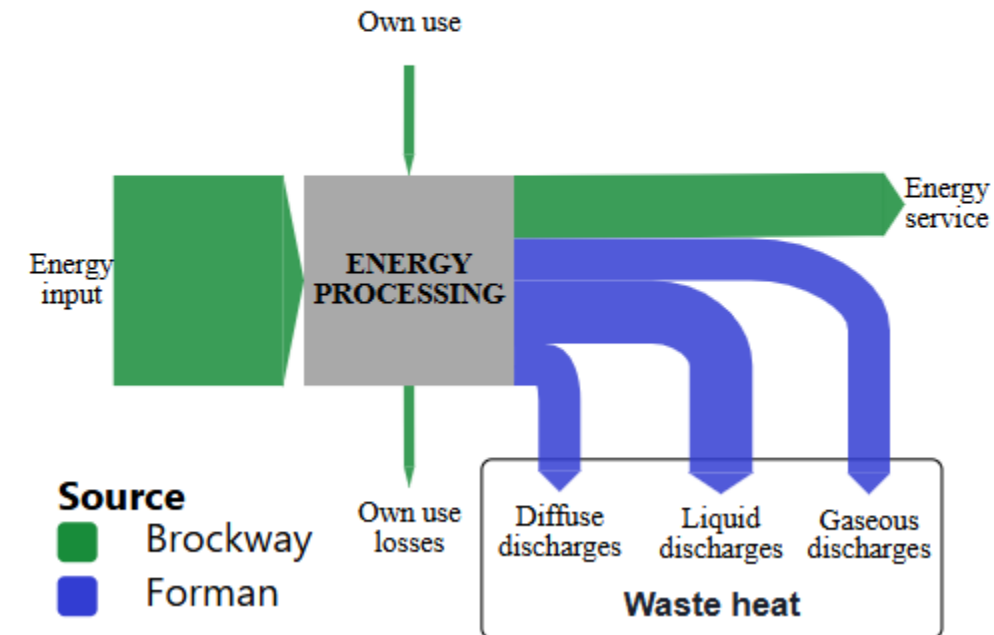
- 50 énergies primaires et finales
- 30 énergies utiles
- 20 secteurs de transformation (PF)
- 90 machines (FU)
- 50 années

Détail des machines (Brockway) :

- par **énergie utile** produite, par exemple propulsion (air, mer, route, rail) ou chaleur (20 °C, 100 °C, 500 °C, 1000 °C, etc.) ;
- par source d'**énergie finale** consommée, par exemple diesel, gaz ou électricité ;
- d'**autres détails** encore, par exemple le type d'usage (commercial ou industriel)

Détail de la chaleur fatale (Forman) :

Structure des secteurs de conversion d'énergie (valeurs arbitraires ici)



Production de visuels :

- 40 diagrammes de Sankey
- 20 séries temporelles

Exemple : détail des machines liées au transport

Vue 3.3.3 Transport : Diagramme détaillé de la consommation d'énergie finale, par couple machine-secteur

Energy type

- Natural gas
- Biofuels
- Oil products
- Electricity
- Propulsion
- High-pressure fluids

Unit : TJ
 Physical quantity : Energy
 Year : 2020
 Country : France
 Dataset : CI-PFU IEA
 Matrix : R, U_feed, U_EIOU, V, Y

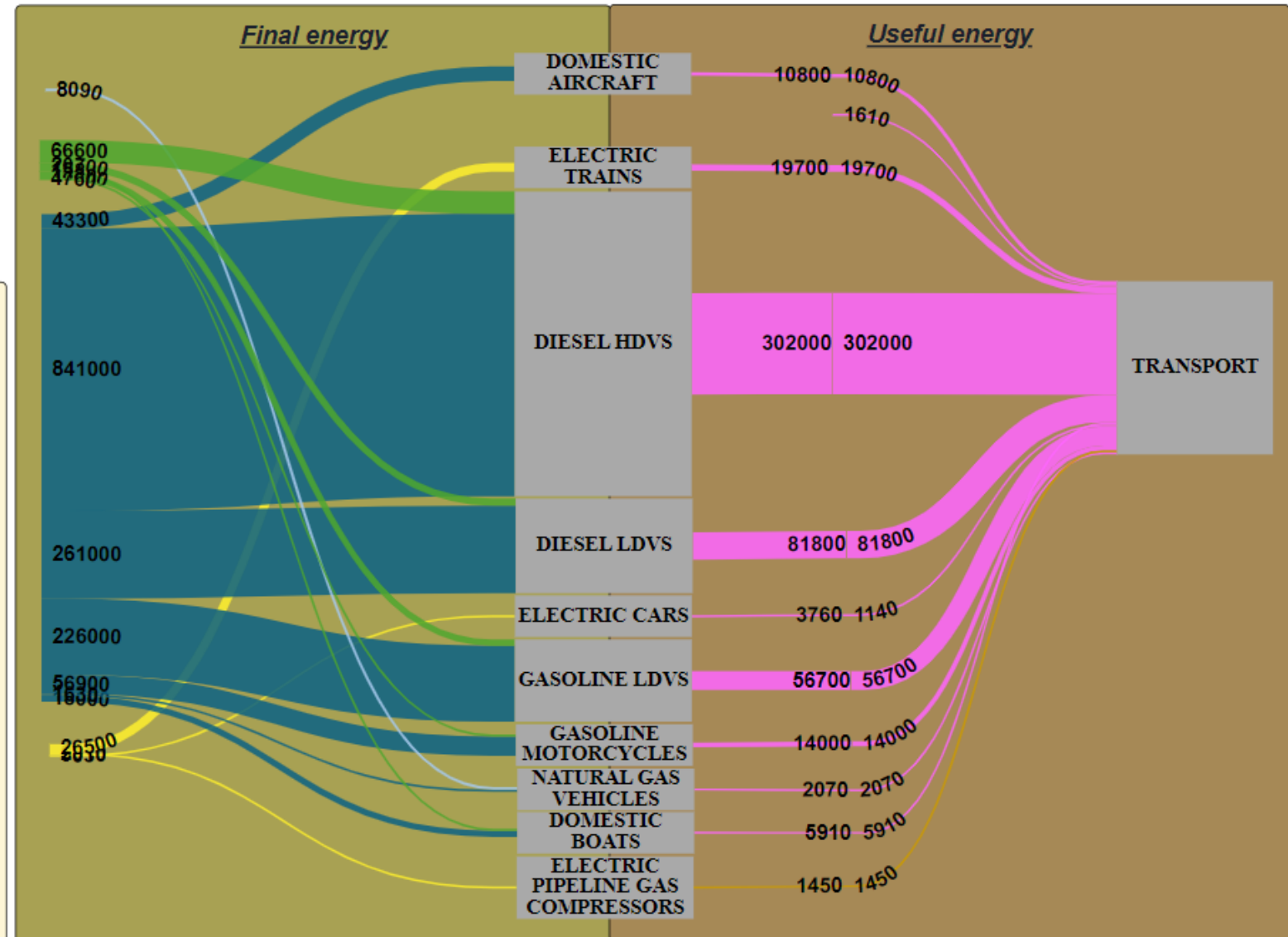
Remarques :

1) La machine Diesel trains (entre Domestic aircraft et Electric trains) n'est pas présente sur le diagramme : c'est une erreur qui sera corrigée lors de la prochaine mise à jour de la vue.

2) Il se peut que certaines machines soient partagées entre plusieurs secteurs (dans les statistiques). C'est le cas d'Electric cars : la production de propulsion de cette machine se divise ensuite entre les secteurs du transport et de l'industrie, ce qui cause un écart de bilan (entrées-sorties) sur l'énergie utile car en amont est représentée la totalité de la production d'Electric cars et en aval uniquement la part consommée par le secteur des transports. Idéalement, il faudrait donc estimer uniquement la part liée au transport en amont et en aval d'Electric cars.

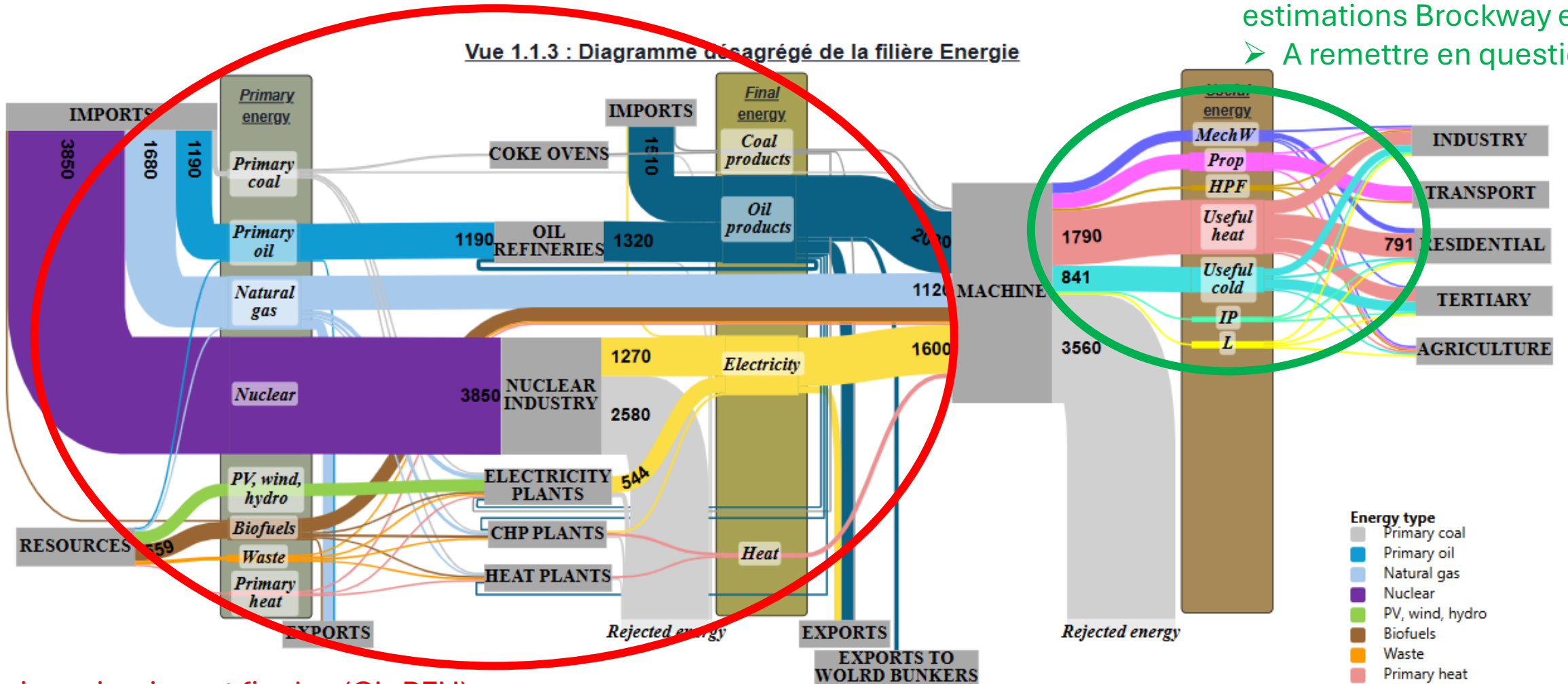
3) Ce n'est pas nécessaire pour cette vue de représenter les derniers flux entrant dans le secteur Transport car il s'agit précisément d'une vue concernant uniquement ce secteur : ils sont juste là pour illustrer la 2nde remarque.

4) Ce n'est pas non plus forcément nécessaire de représenter les flux en sortie des machines puisque l'objectif initial de la vue était d'analyser uniquement la consommation des machines. Cependant, ils permettent de visualiser le rendement des couples machine-secteur : intérêt à débattre.



Métabolisme énergétique (France, 2020, en PJ) **équivalent aux travaux de références** (Ministère, Négawatt), avec énergie utile en plus

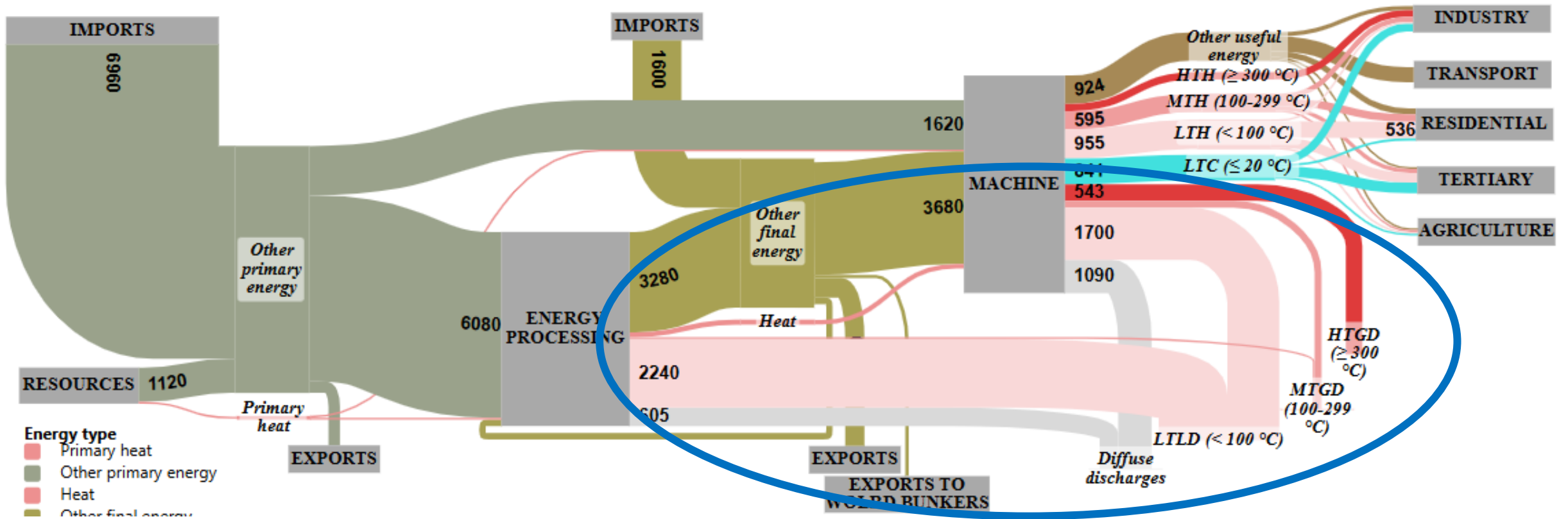
Energies utiles (CL-PFU) = estimations Brockway et al.
 ➤ A remettre en question ?



Energies primaires et finales (CL-PFU)
 = stats AIE = stats SDES

Mise en avant des flux thermiques et de leur niveau de température

Vue 1.2.2 : Diagramme désagrégé des énergies thermiques (chaleur + froid) dans la filière Energie



Détail des pertes = estimations à partir des travaux de Forman et al.

- Consommation de chaleur à basse température principalement et idem pour la production de chaleur fatale
- Gisement de chaleur fatale comparable aux consommations de chaleur utile
 - Mais tout est-il récupérable ?

Détail des pertes valorisables

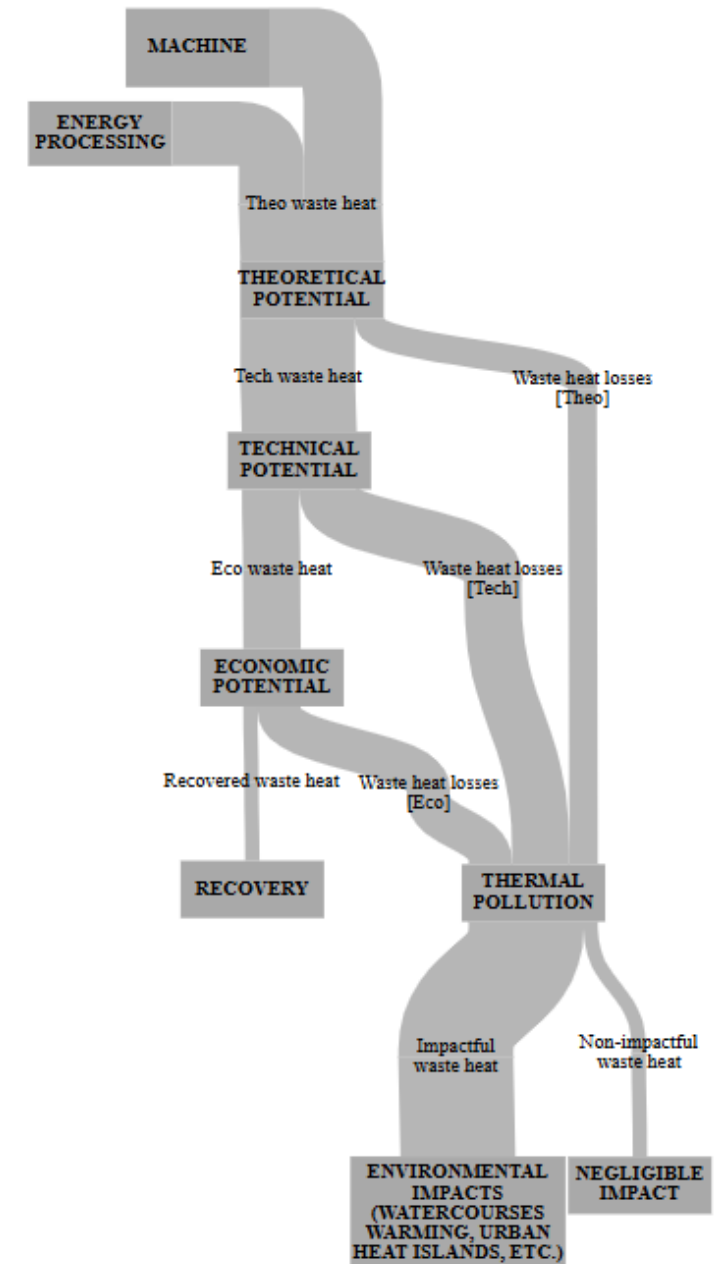
Gisement **théorique**
≥
Gisement **technique**
≥
Gisement **économique**

- Quantification de ces différents gisements **difficile à l'échelle nationale**

2 impacts environnementaux de la non-valorisation du gisement de chaleur fatale, qui implique une :

- **surconsommation des ressources** naturelles (système énergétique global peu efficient) ;
- **pollution thermique** éventuelle (rejets dans l'environnement).

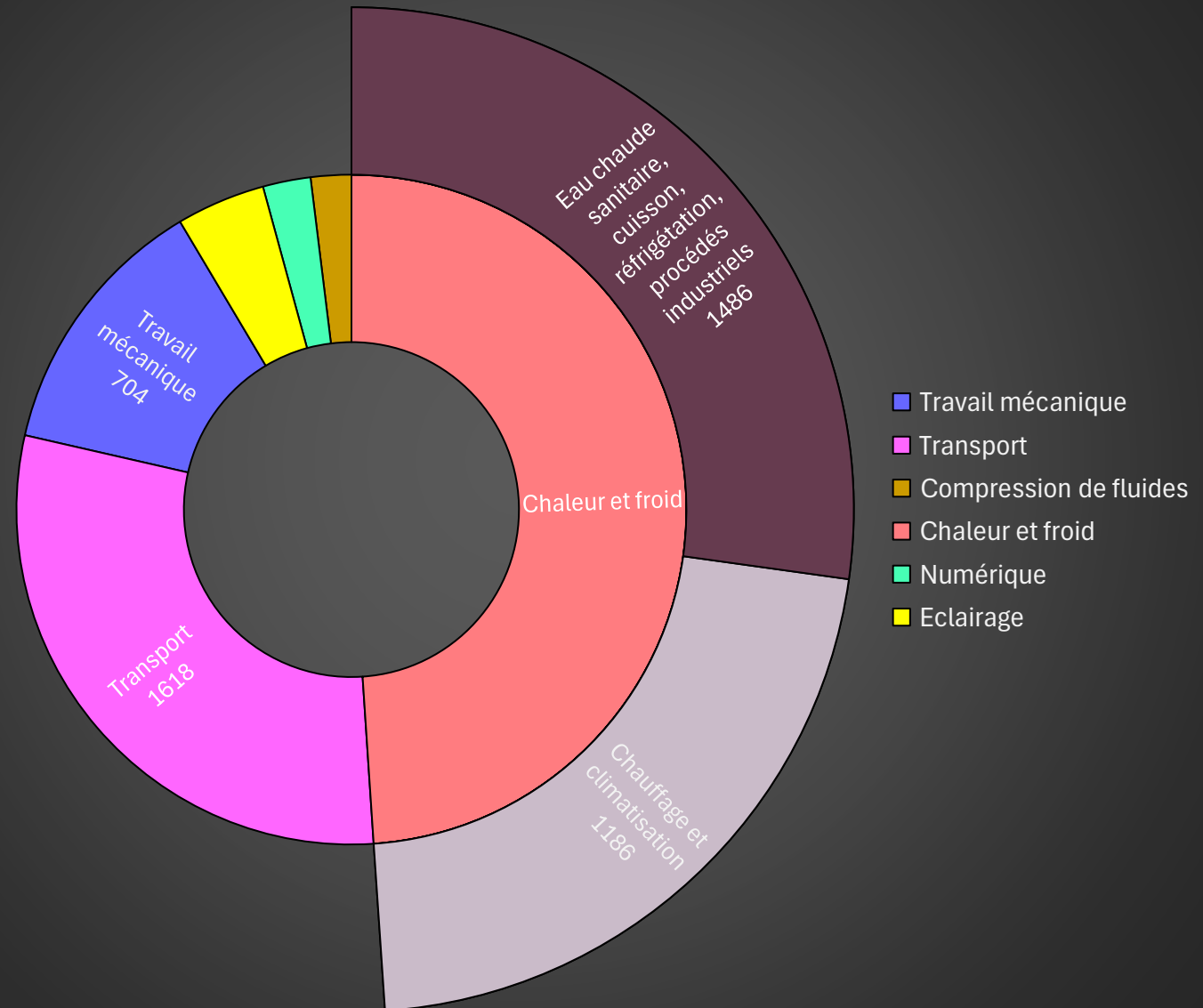
Structure de la décomposition des flux de chaleur fatale dans le modèle Metabol'heat (valeurs arbitraires ici)



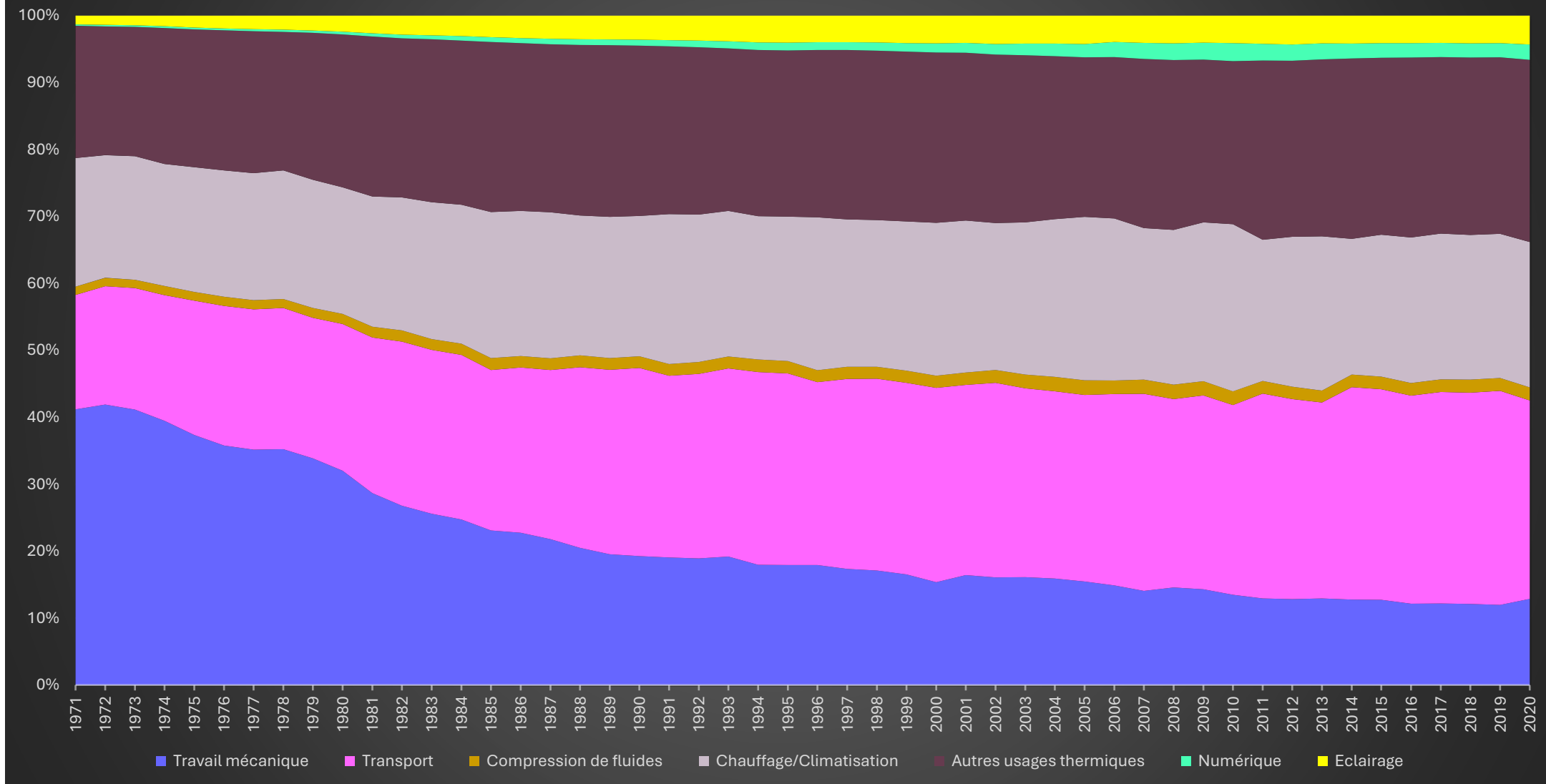
Analyse de la consommation d'énergie et de la part de chaleur/froid

- La consommation d'énergie pour production de **chaleur et de froid** représente la **moitié** de l'énergie finale consommée (France, 2020)
- La consommation d'énergie pour le **chauffage et la climatisation** représente la **moitié** de l'énergie consommée pour la production de chaleur/froid (France, 2020)

Répartition de la consommation d'énergie finale par usage
(France, 2020, en PJ)

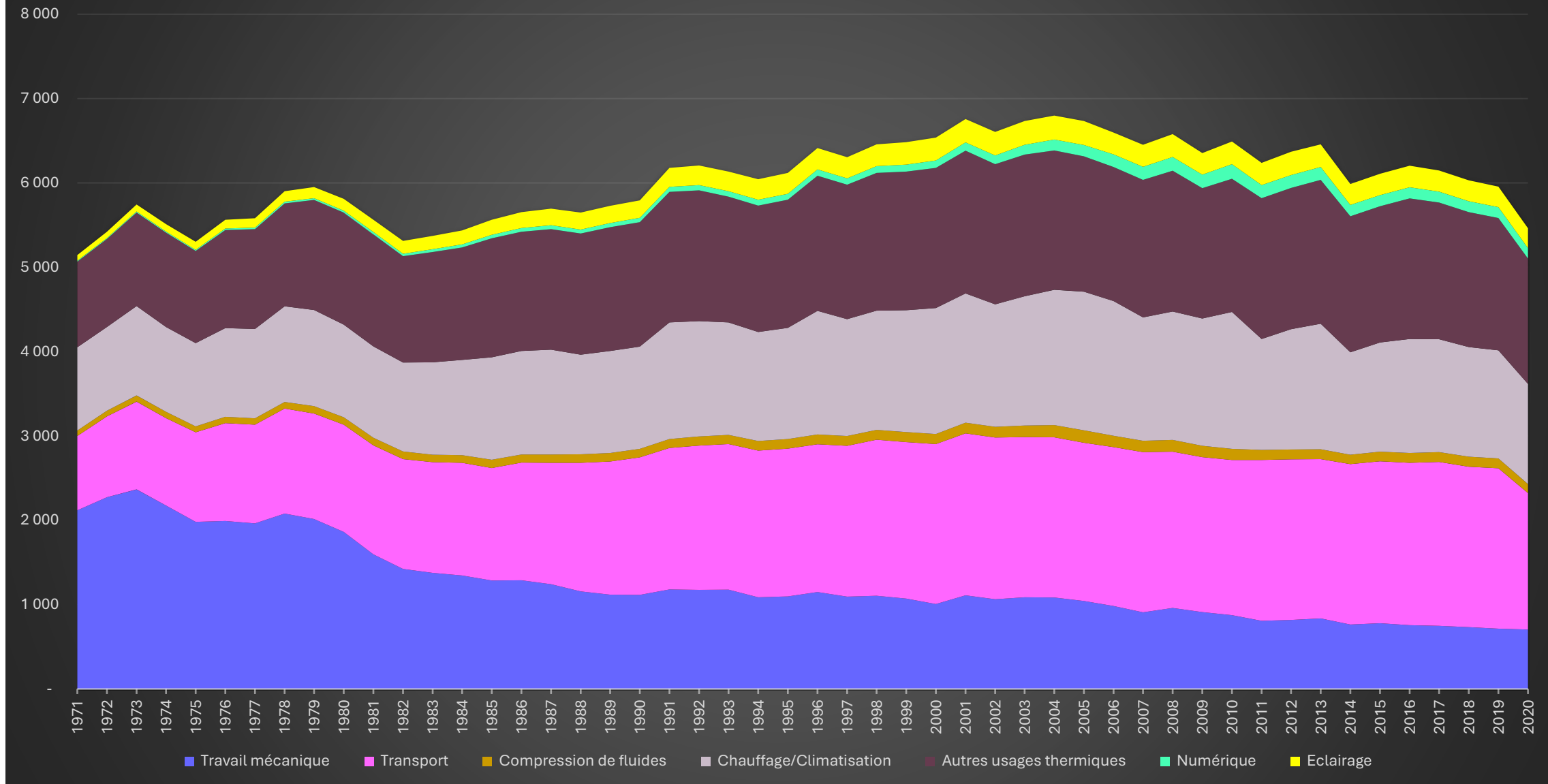


Evolution de la consommation d'énergie finale, en France (%)



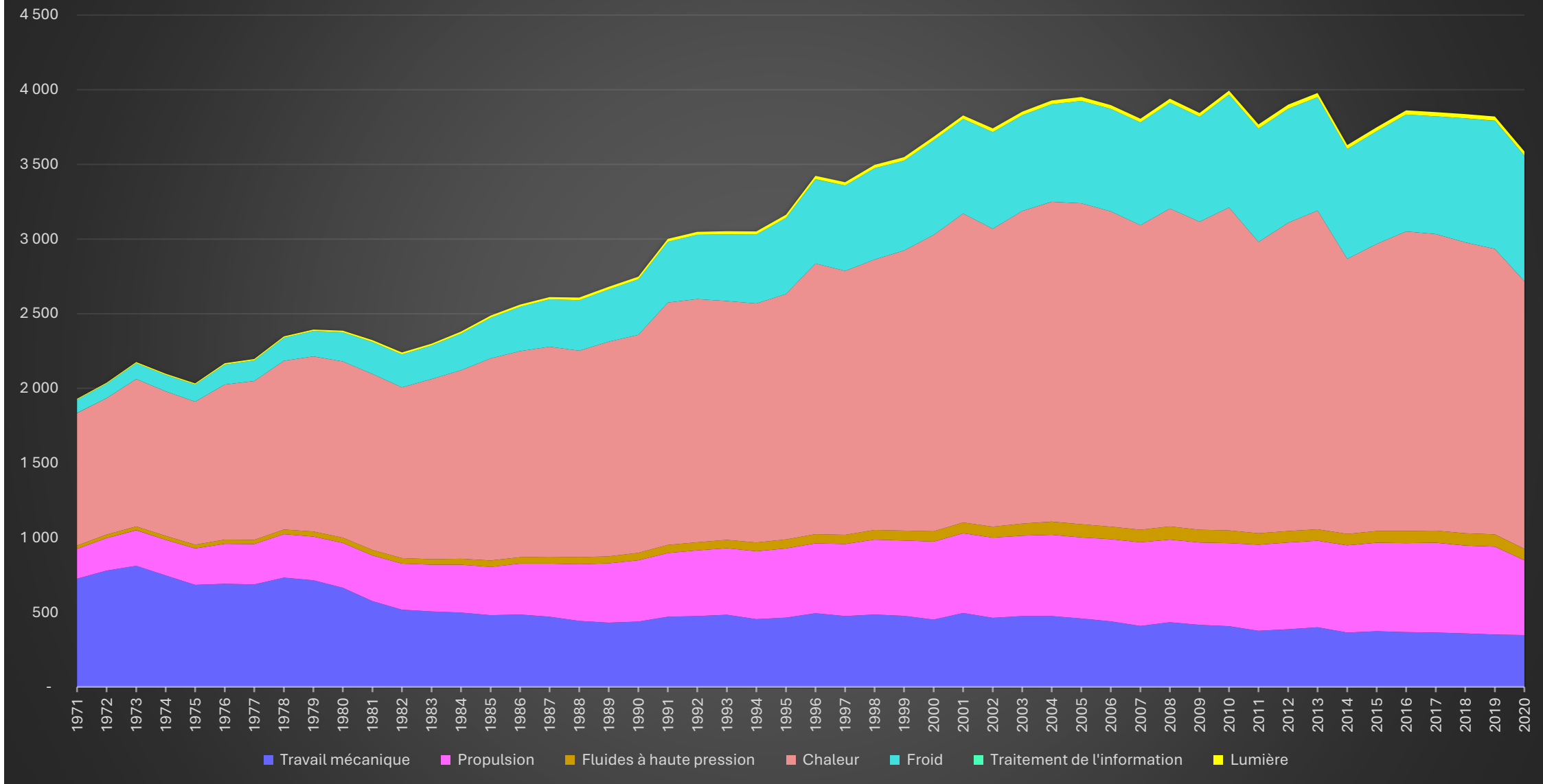
- Part de la consommation d'énergie pour la production de chaleur et de froid à peu près constante sur 50 ans (environ 40 % en 1971 puis 50 % en 2020). Idem pour la répartition chauffage/climatisation VS autres usages de chaleur et froid (50 % chacun).

Evolution de la consommation d'énergie finale, en France (PJ)



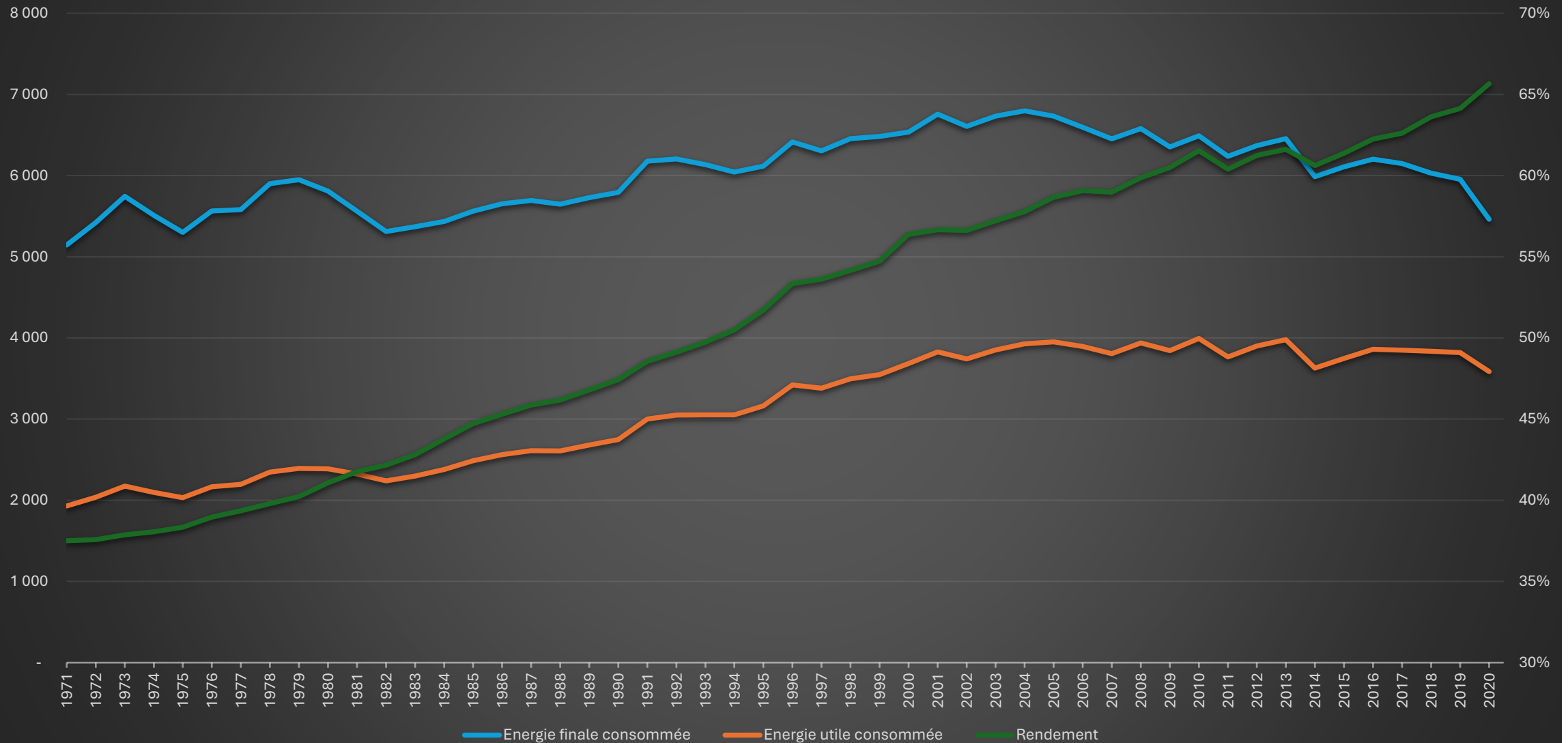
- Consommation d'énergie finale totale ayant légèrement augmenté en 50 ans (de 5000 PJ en 1971 à 6000 PJ en 2019 (+20 %))....

Evolution de la consommation d'énergie utile, en France (PJ)



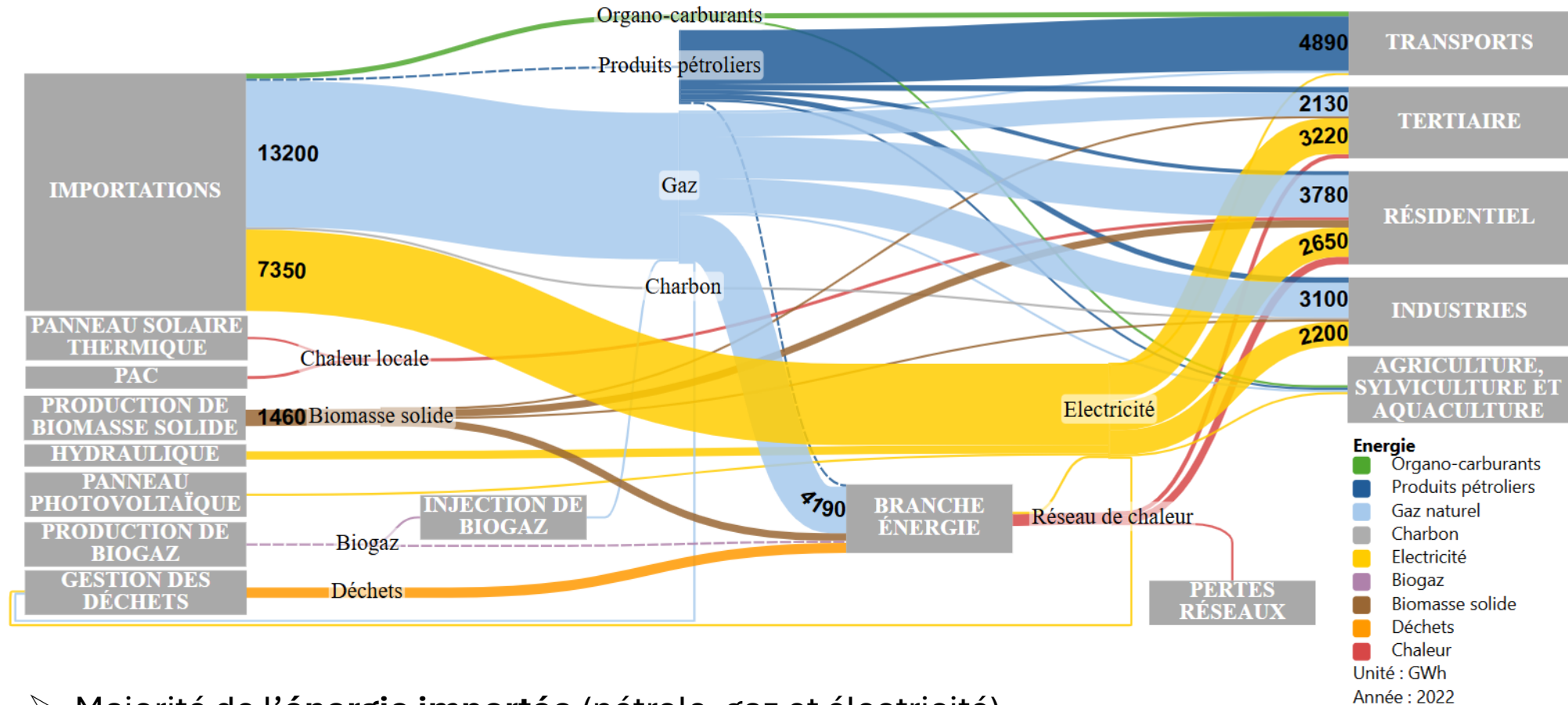
- Alors que dans le même temps, les besoins (consommation d'énergie utile) ont doublé (de 2000 PJ en 1971 à 4000 PJ en 2019 (+100 %))...

Evolution de la consommation d'énergie finale et d'énergie utile, ainsi que le rendement global des machines, en France (PJ)



- Ce graphique le confirme : le rendement global moyen des machines a presque doublé, pour autant la consommation d'énergie finale a légèrement augmenté => intérêt d'étudier l'**énergie utile**

Echelle locale - Métropole de Lyon (2022)



- Majorité de l'énergie importée (pétrole, gaz et électricité)
- **Consommation équilibrée** entre les 4 principaux secteurs de consommation d'énergie
- **Rendement** de la branche énergie **anormalement faible** (consommation de gaz trop élevée ?)
- ❖ Différencier les consommations d'énergie finale **par usage**

Limites/pistes de poursuite

Echelle nationale	Echelle locale
Remettre en question la partie énergie utile de la BDD CL-PFU	Remettre en question le rendement de la branche énergie
Approfondir la partie réseau de chaleur/froid , et estimer le niveau de température	Ajouter le détail des consommations par usage
Estimer le gisement de chaleur fatale techniquement et économiquement valorisable	Approfondir l'analyse à l'image du travail à l'échelle nationale : estimation des énergies utiles, niveaux de température, gisement de chaleur fatale, exergie
Définir les usages dans le projet, comment exploiter les résultats ?	Répéter la méthode sur les autres métropoles (utiliser d'autres BDD pour les métropoles hors région AURA ?)