

Metabol'Heat

Tâche 1 : Quantification des flux thermiques et représentations
métaboliques

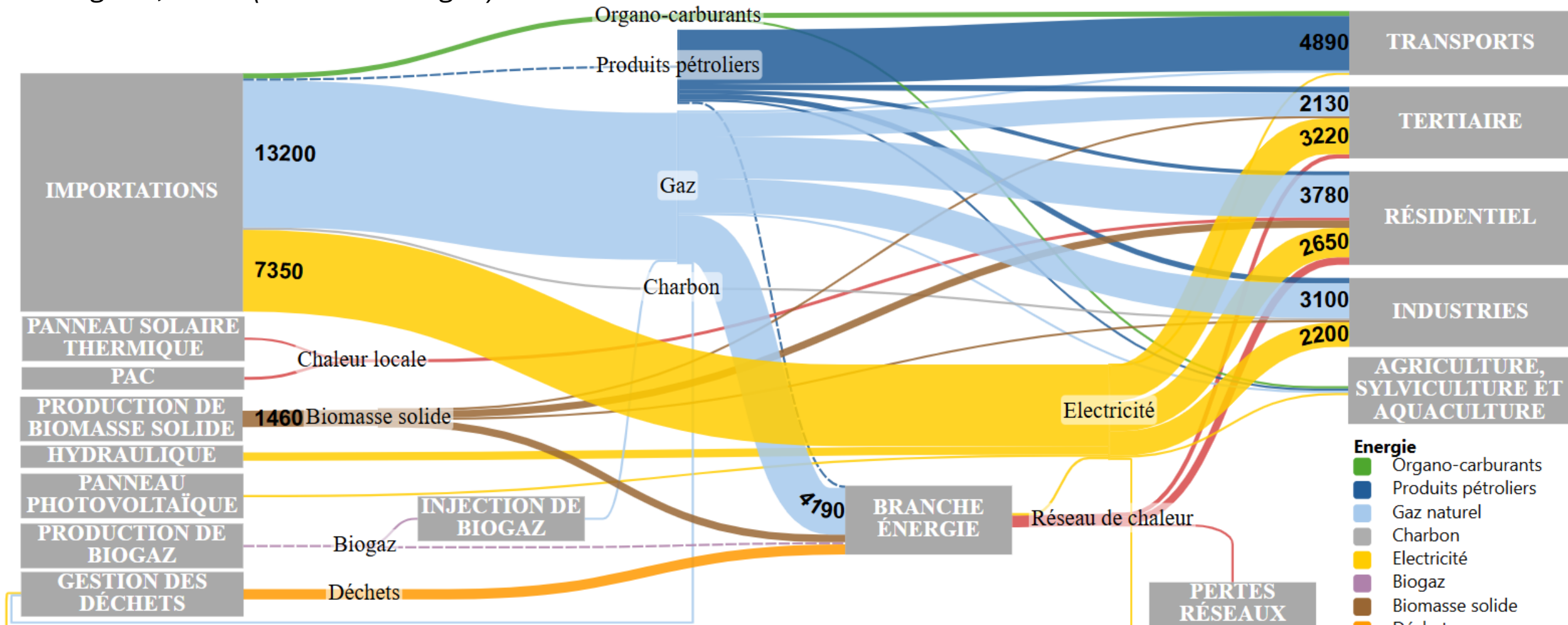
Phase 2 – Refonte du modèle national

Sommaire général

- Rappels sur la **1^{ère}** phase : *septembre – novembre 2024*
 - Définition des concepts énergétiques
 - Réalisation d'un modèle sur la métropole de Lyon
 - Construction du **modèle national, basé sur CL-PFU (Brockway)**
⇒ Principales limites
- Travaux sur la **2^{nde}** phase : *juillet – octobre 2025*
 - **Cartographie des sources**
 - Construction d'une 2^{nde} version du **modèle national, basé sur IDEES (JRC)**
 - Mise à jour des principaux diagrammes et production de nouveaux visuels
 - Principales limites du modèle national
- Ouverture sur la **3^{ème}** phase
 - Modèle local
 - Sources de données disponibles/Hypothèses
 - Différences par rapport au modèle national

Echelle locale - Métropole de Lyon (2022)

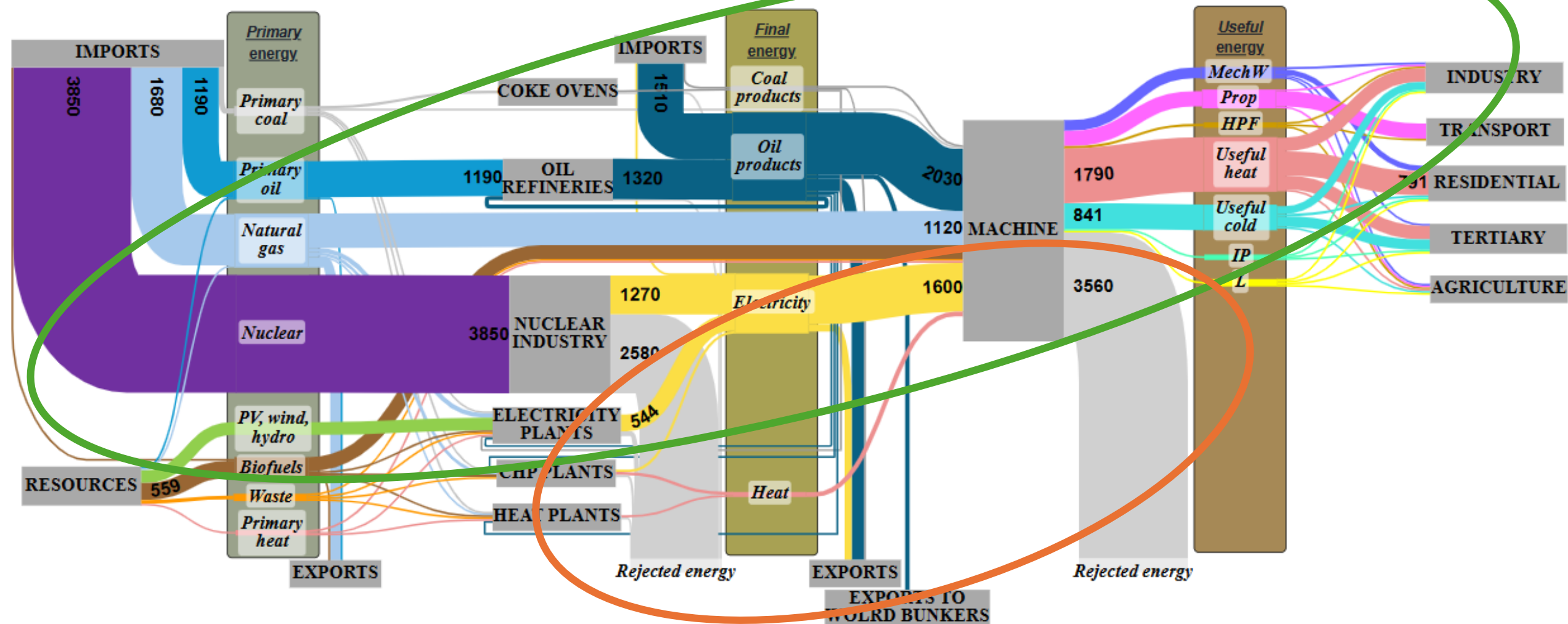
Stage L3, EMSE (Justine Montagne)



- 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**

1^{er} modèle national- Sources

Vue 1.1.3 : Diagramme désagrégé de la filière Energie



- **Energies primaires, finales, utiles** : Base de données **CL-PFU (Brockway)**, principalement basée sur AIE + JRC
- **Chaleurs fatales** : Qualification et répartition d'après « **Estimating the global waste heat potential** » (**Forman**)

1^{er} modèle national- Périmètre/Hypothèses

Périmètre d'étude

- Filière : Energies primaires, finales et utiles + Chaleur fatale
- Pays : France
- Année : 2020 (dernière année disponible)
- Empreinte : Energie + Exergie
- Unité : PJ

Hypothèses/Choix de modélisation

- Chaleur fatale
 - Correspondance machines Brockway avec machines Forman
 - Rendements FU souvent différents entre les 2 sources => conserver la répartition entre les flux de chaleur fatale
- Exergie
 - Estimation exergie chaleur fatale (reprise des coefficients exergie/énergie en fonction des niveaux de température)

1^{er} modèle national- Limites

Cohérence de la base de données CL-PFU

- Détail des **consommations d'énergie final par usage** (ou répartition énergie utile)
- Modélisation des **systèmes de type pompe à chaleur**

Comparaison avec les estimations du SDES (secteur Résidentiel) :

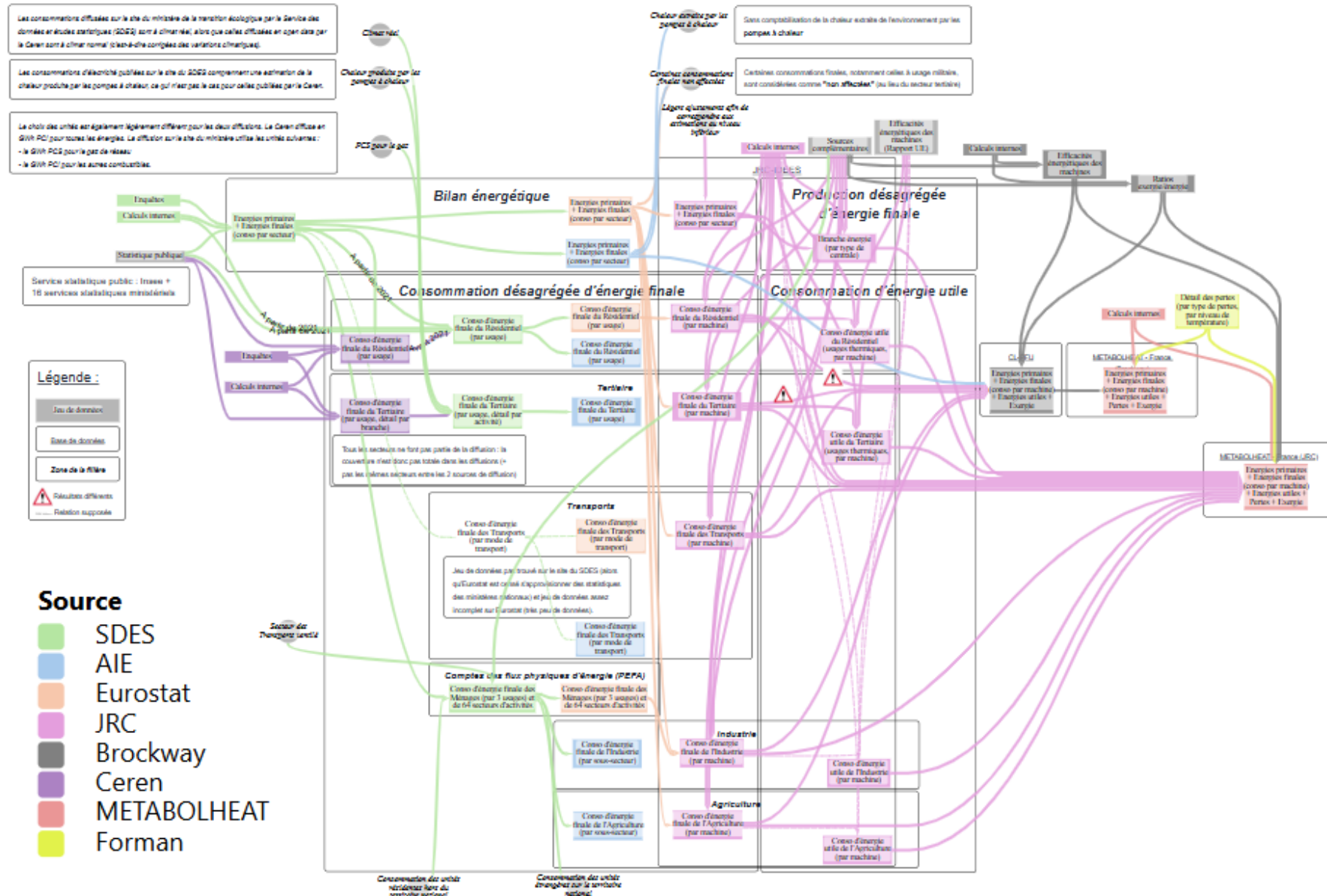
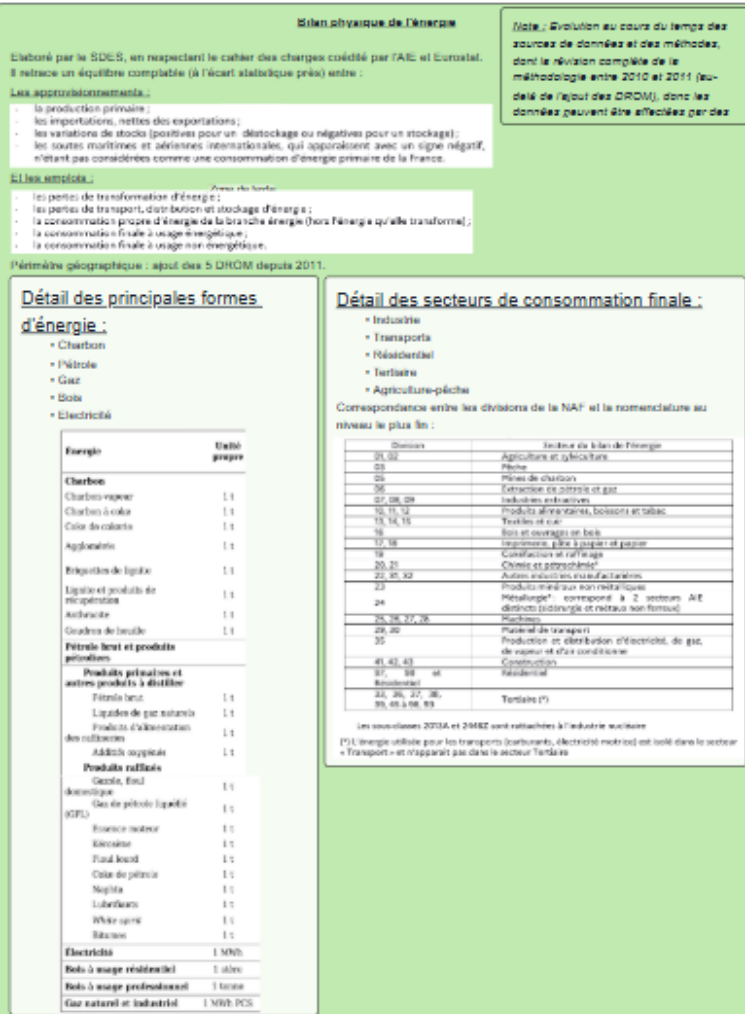
- le chauffage électrique résidentiel (hors PAC) semble **sous-estimé d'environ un facteur 2** ;
- les **pompes à chaleur résidentielles** semblent absentes ;
- les **chaudières fioul** semblent absentes ;
- la **climatisation résidentielle** semble absente ;
- les **chauffe-eaux électriques** semblent absents ;
- la **cuisson** semble surestimée ($\sim \times 2$) ;
- la **consommation spécifique d'électricité** semble surestimée ($\sim \times 1,5$) ;
- la catégorie **“Autres produits pétroliers”** apparaît surdimensionnée sans correspondance claire dans les statistiques nationales.

❖ Explication des écarts : allocations JRC 2015 **obsolètes** ou allocations **moyennes mondiales** pour la France

Valorisation des travaux

- **Accès aux données AIE** requis : difficile de valoriser les résultats détaillés et même de donner accès au modèle complet
- **Machines non détaillées par secteur** (ou demande à minima des hypothèses/rétro-ingénierie pour le faire) : difficile d'extraire le gisement de chaleur fatale de l'industrie par exemple
- **Dernière année disponible** relativement ancienne (2020) + année COVID

Construction 2nd modèle national – Cartographie des sources disponibles (et leurs méthodes)



Périmètre d'étude (modèle France)

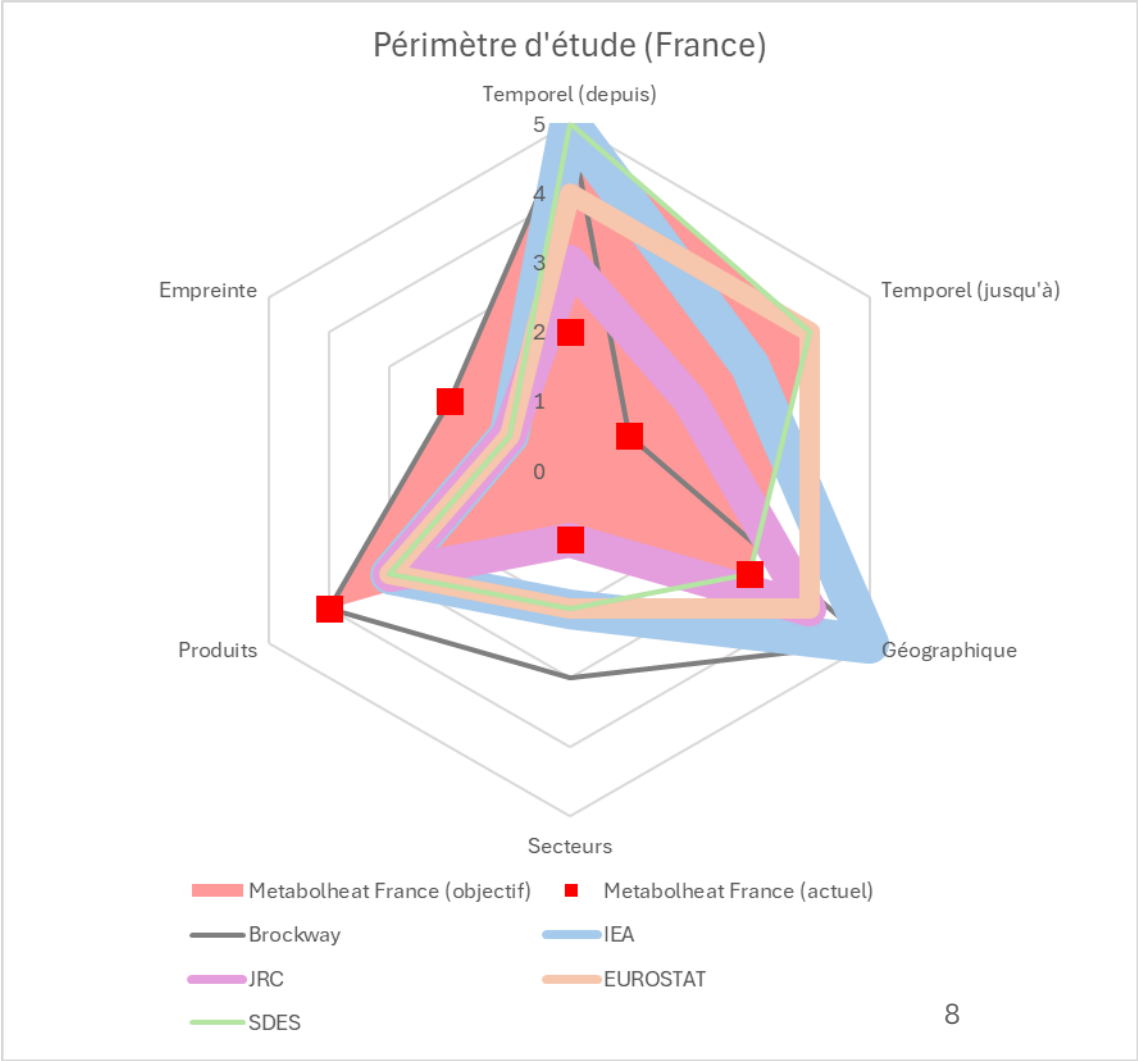
Périmètre	Temporel (depuis)	Temporel (jusqu'à)	Géographique	Secteurs	Produits	Empreinte
0	Aucune période	Aucune période	Aucun territoire	Aucun secteur	Aucune énergie	Aucune unité
1	Depuis 2022	Jusqu'à 2020	Lyon	Usages énergétiques	Energie primaire	Energie
2	Depuis 2020	Jusqu'à 2021	AURA	Usages non énergétiques	Energie finale	Exergie
3	Depuis 2000	Jusqu'à 2022	France	Travail humain	Pertes	
4	Depuis 1990	Jusqu'à 2023	Europe		Energie utile	
5	Depuis 1970	Jusqu'à 2024	Monde			

Grille de lecture rapide :

- En **fond** : le périmètre des **objectifs** du projet
- En **points** : le périmètre du **modèle** en cours de réalisation
- En **courbe** : le périmètre des **sources** statistiques mobilisables

Analyses :

- Toutes les sources, bien que concernant les statistiques énergétiques de la France, couvrent des **périmètres différents**, plus ou moins larges que les objectifs du projet.
- **Brockway** semble bien être la source **remplissant le plus d'objectifs** : seule l'année la plus récente disponible (2020) est la plus éloignée des potentiels besoins.
- Le modèle en cours de réalisation suit logiquement le périmètre de Brockway (source utilisée) tout en respectant celui du projet. Par rapport aux objectifs, **seul le périmètre temporel peut faire défaut** (modélisation de l'année 2020 contre idéalement un modèle depuis les années 70 jusqu'à aujourd'hui).



Echelle d'étude (modèle France)

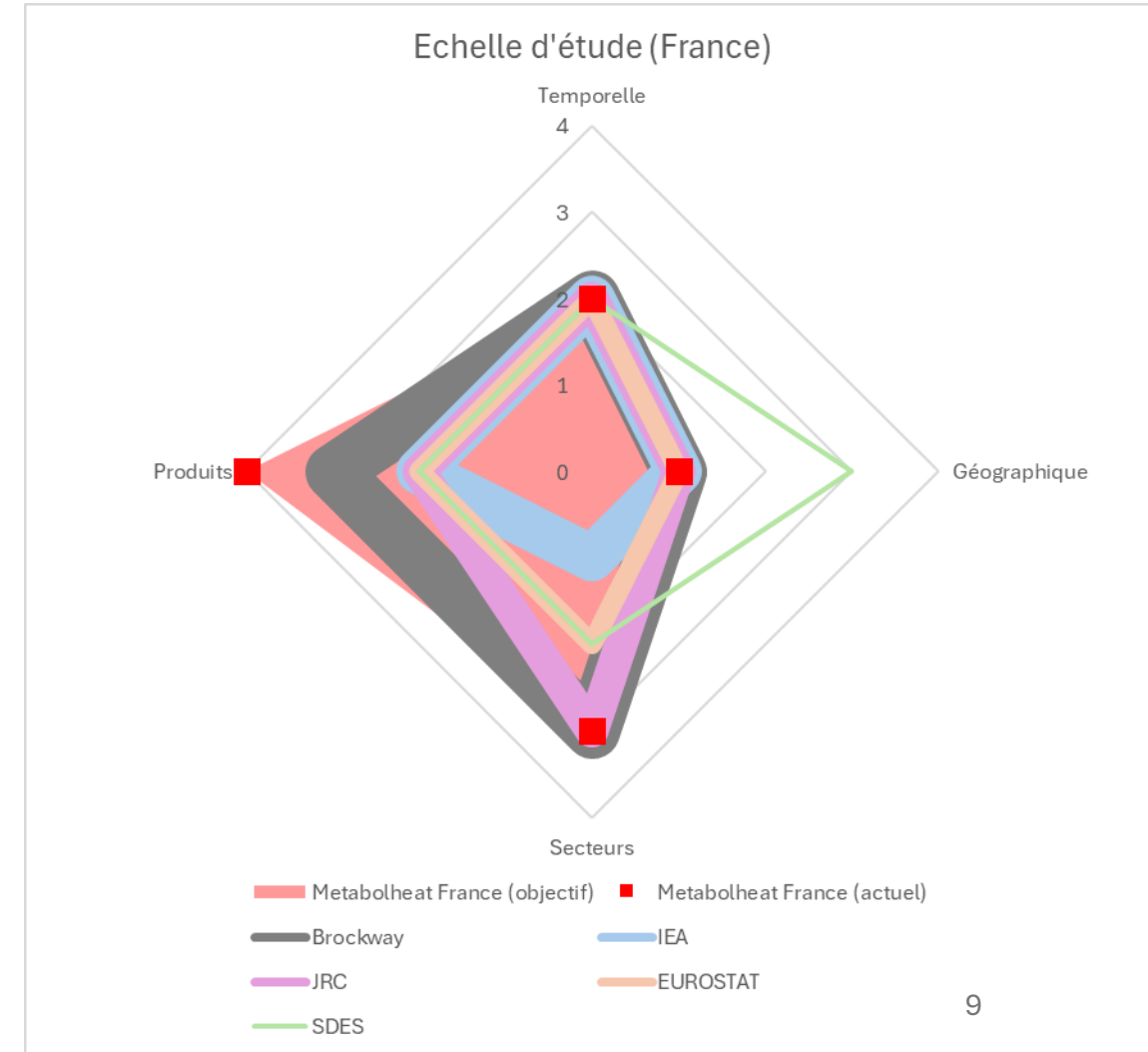
Echelle	Temporelle	Géographique	Secteurs	Produits
0	Historique	Mondiale	Tous secteurs	Tous produits
1	Décennale	Nationale	Secteurs (Industrie, Résidentiel, Tertiaire, Transport, Agriculture)	Produits agrégés (ex : produits pétroliers)
2	Annuelle	Régionale	Usages (Chauffage, ECS, Cuisson, Climatisation, Electricité spécifique, Transport routier, ferroviaire, etc.)	Produits détaillés (ex : détail des produits pétroliers, détail des EnR)
3	Mensuelle	EPCI	Machines (Réfrigérateur, TV, Aspirateur, Voiture, Camion, etc.)	Niveaux de température (énergie utile)
4				Niveaux de température (pertes)

Grille de lecture rapide :

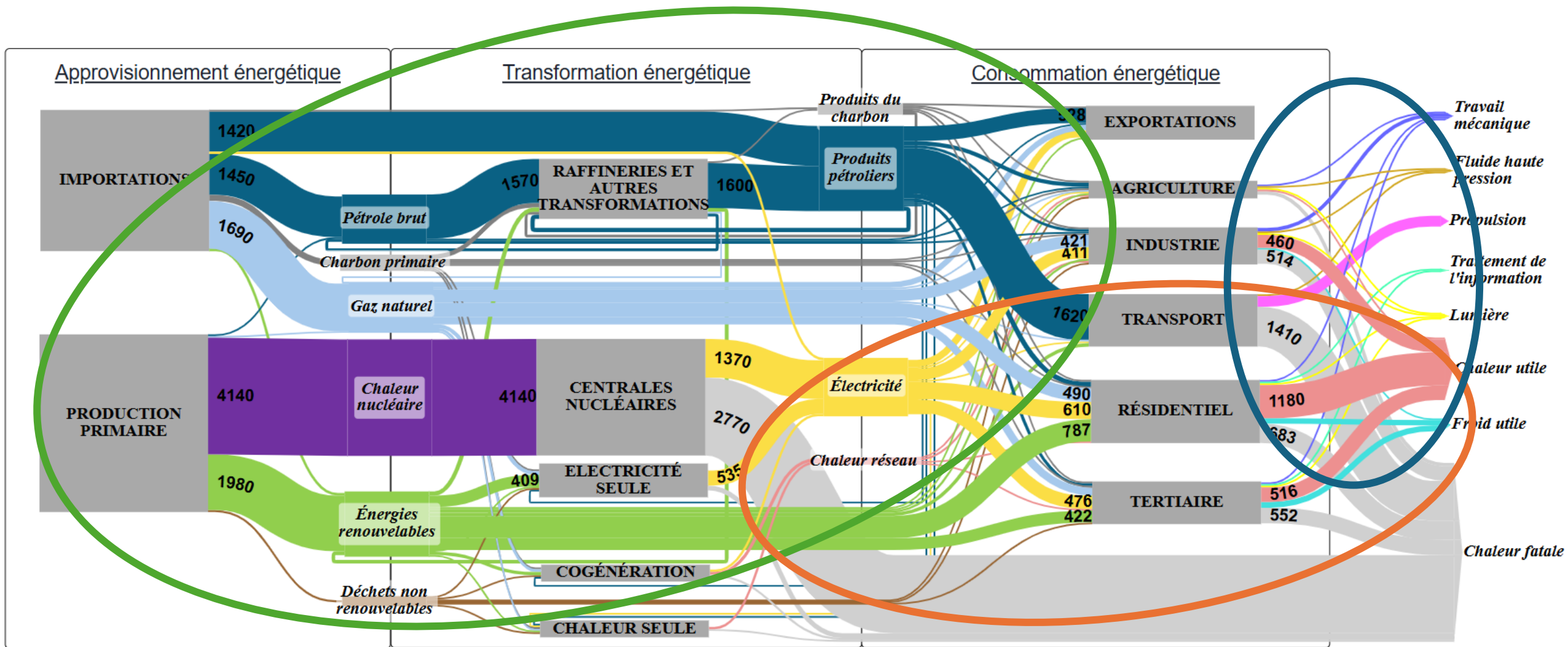
- En **fond** : l'échelle des **objectifs** du projet
- En **points** : l'échelle du **modèle** en cours de réalisation
- En **courbe** : l'échelle des **sources** statistiques mobilisables

Analyses :

- Toutes les sources, bien que concernant les statistiques énergétiques de la France, couvrent des **échelles différentes**, plus ou moins larges que les objectifs du projet.
- **Brockway** semble bien être la source **remplissant le plus d'objectifs** : seul le détail des niveaux de température des pertes d'énergie manque.
- Le modèle en cours de réalisation suit logiquement le périmètre de Brockway (source utilisée) tout en respectant celui du projet. Afin d'atteindre les objectifs, les **travaux de Forman ont aussi été utilisés** afin de détailler les pertes thermiques par niveau de température.

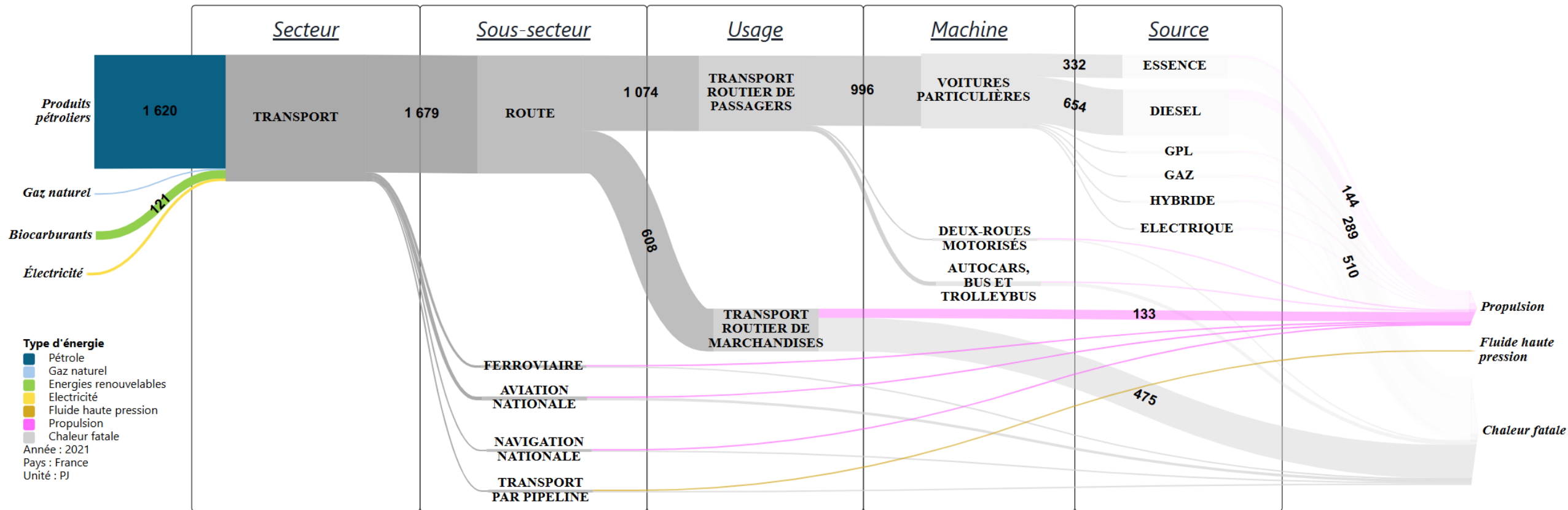


2nd modèle national- Sources



- **Energies primaires, finales** : Base de données **JRC**
- **Energies utiles** : Quantification à partir du **JRC** si disponible, sinon rendement d'après « **Estimating the global waste heat potential** » (**Forman**). Qualification par analogie avec la base de données **CL-PFU** (**Brockway**)
- **Chaleurs fatales** : Qualification et répartition d'après « **Estimating the global waste heat potential** » (**Forman**)

Structure du modèle : exemple sur les voitures



Dans le cas du modèle METABOLHEAT, l'absence de réconciliation signifie que :

- tous les **bilans énergétiques sont respectés** ;
- pour **tous les produits énergétiques** (plus de 100 produits);
- pour **tous les processus de conversion** (près de 1000 processus);
- **à tous les niveaux de détail hiérarchiques** (jusqu'à 7 niveaux);
- **et tout au long de la filière énergétique** (5 grandes étapes : production et consommation primaire, production et consommation finale, production utile).

Cette vérification systématique constitue un contrôle essentiel de la cohérence interne du modèle.

Synthèse comparative des deux versions

Critère	Version Brockway	Version JRC
Source principale	CL-PFU	JRC-IDEES
Année	2020	2021
Analyse exergétique	Oui	Non
Stades énergie	Complets	Complets
Détail pertes	Oui	Oui
Niveau macro	Oui	Oui
Niveau méso (usage)	Non	Oui
Niveau micro (machine)	Oui	Oui
Cohérence SDES	Non	Oui
Données détaillées confidentielles	Oui	Non

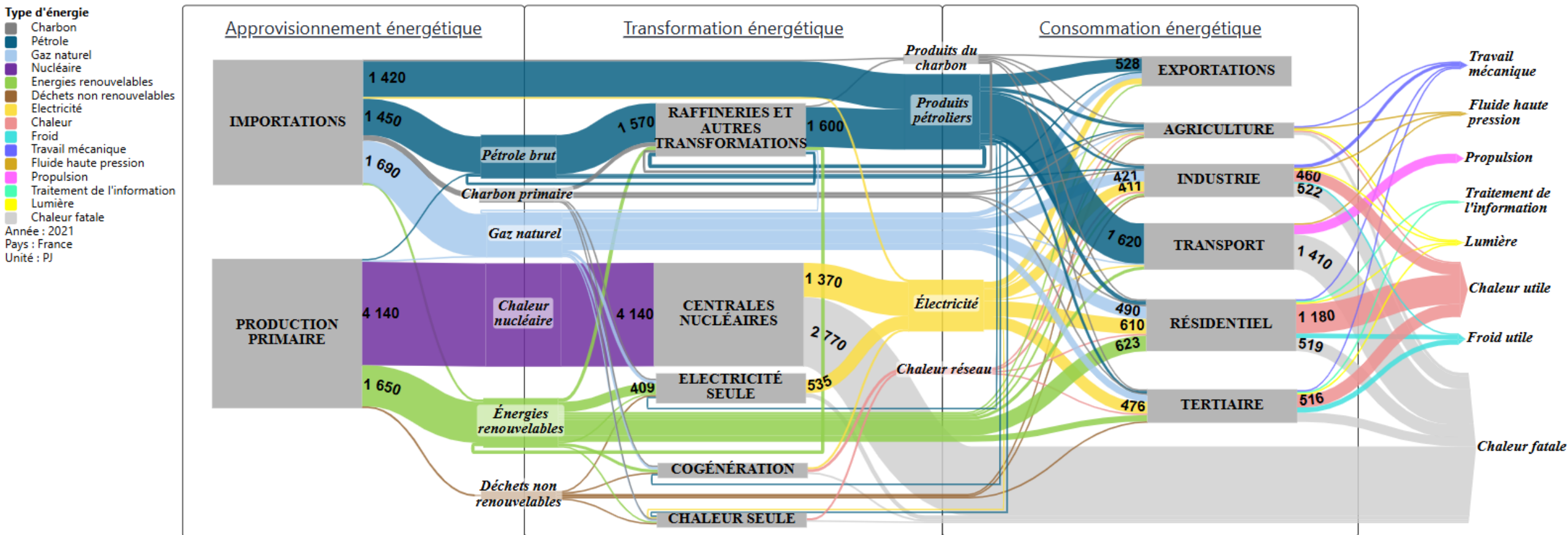
➤ Version **Brockway** plus riche thermodynamiquement

➤ Version **JRC** plus cohérente avec les statistiques nationales

En s'appuyant à présent sur la 2nde version du modèle national :

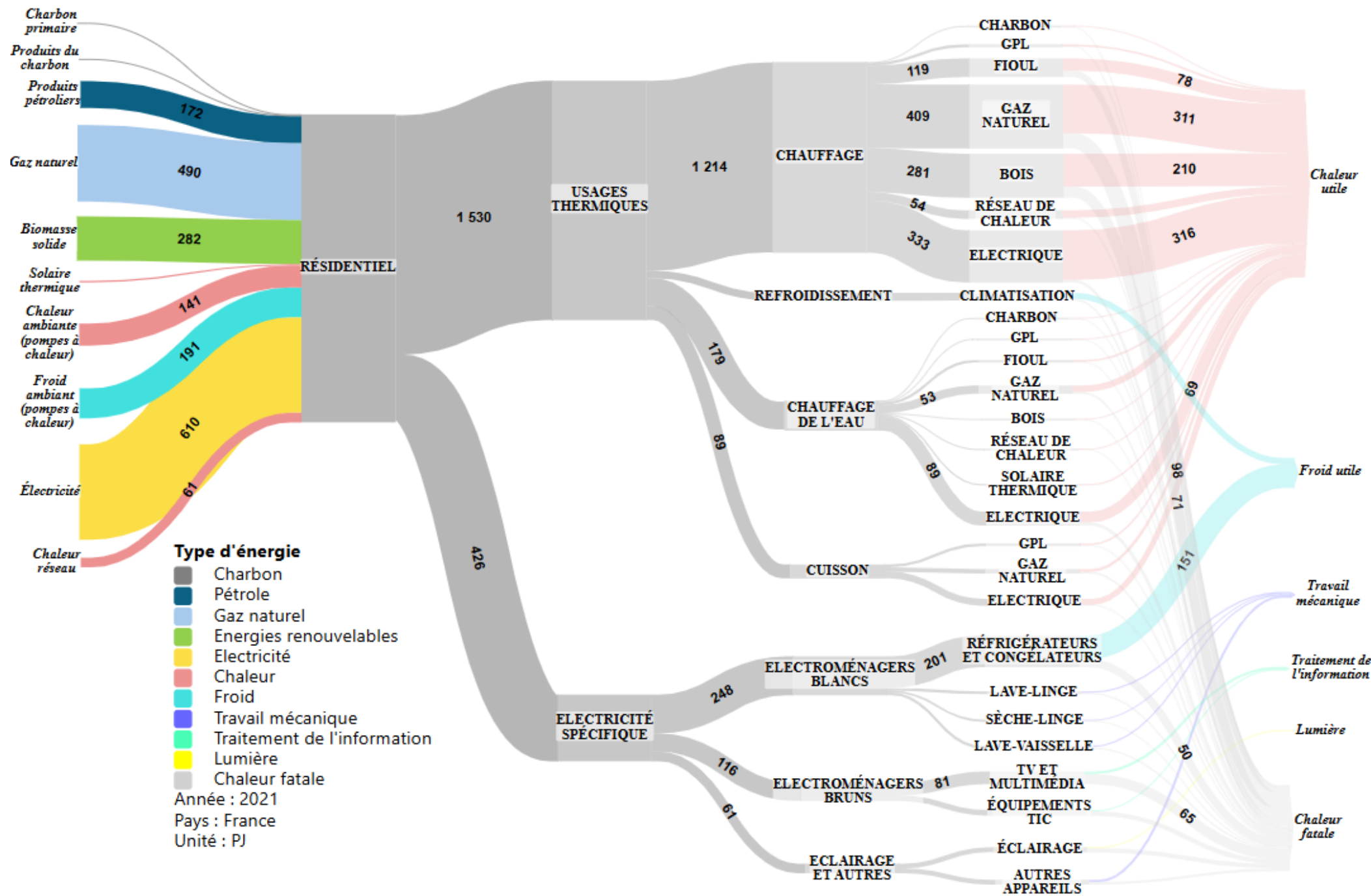
- ✓ Mise à jour des représentations existantes
- ✓ Elaboration de nouveaux visuels

Vue d'ensemble du métabolisme énergétique français



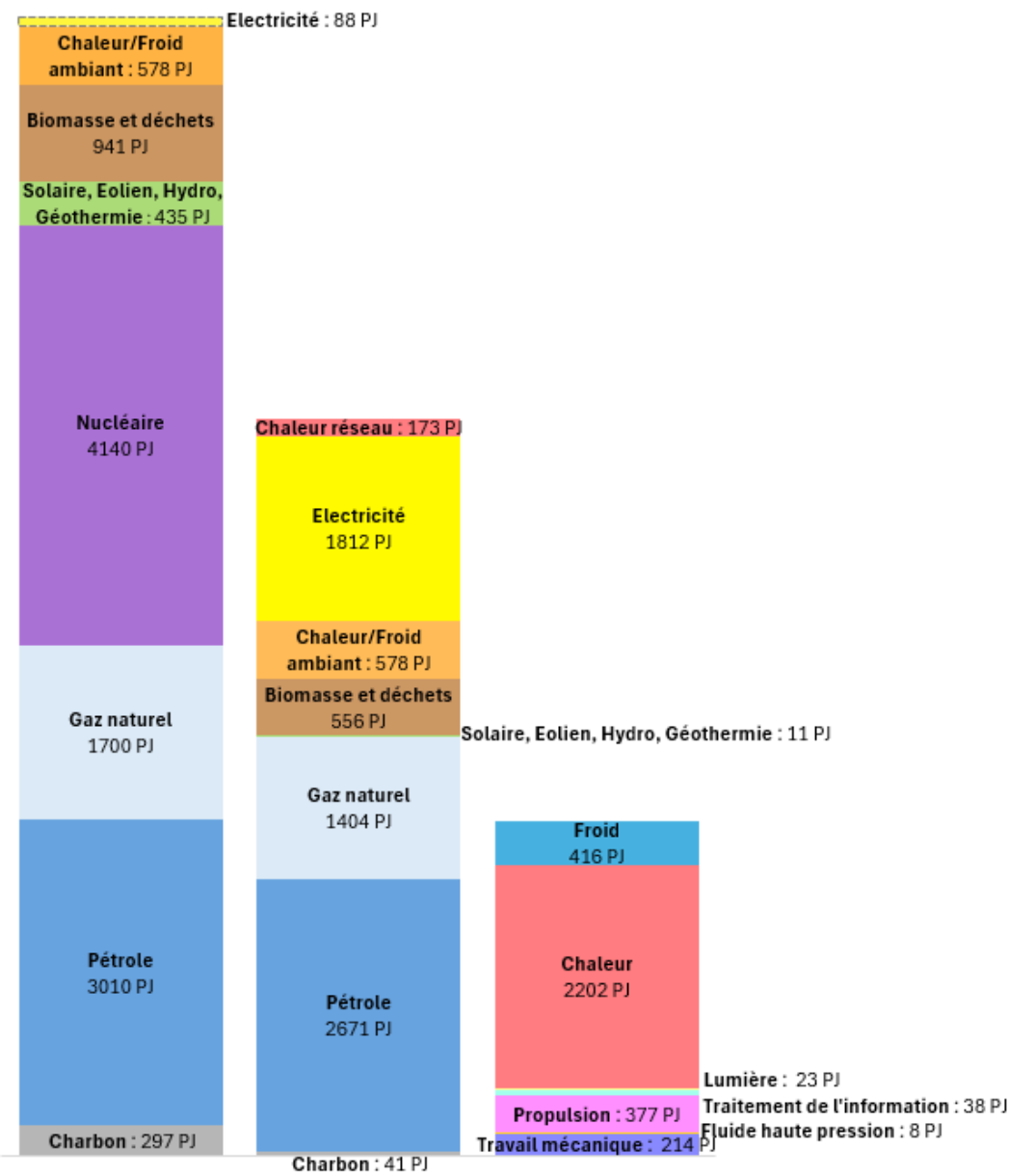
Etapas de la filière énergétique : approvisionnement, transformation, consommation
Identification des rejets de chaleur fatale

Exemple de désagrégation sectorielle du modèle METABOLHEAT : flux énergétiques du secteur résidentiel



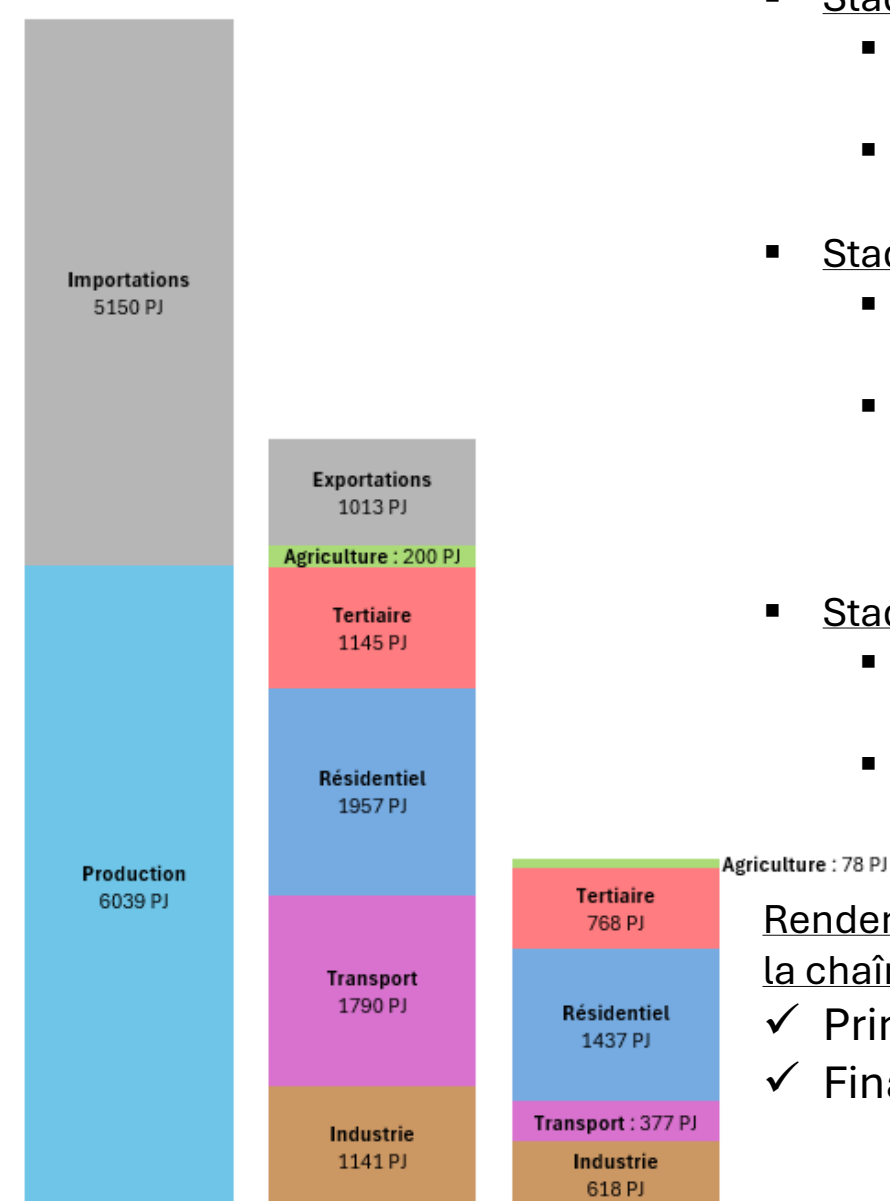
Consommation d'énergie, par type d'énergie, aux 3 stades : primaire, final et utile (2021, France)

<i>Energie primaire (ressources naturelles)</i>	<i>Energie finale (vecteur énergétique)</i>	<i>Energie utile (besoin)</i>
<u>Total</u> : 11189 PJ	<u>Total</u> : 7246 PJ	<u>Total</u> : 3278 PJ



Consommation d'énergie, par secteur, aux 3 stades : primaire, final et utile (2021, France)

<i>Energie primaire (ressources naturelles)</i>	<i>Energie finale (vecteur énergétique)</i>	<i>Energie utile (besoin)</i>
<u>Total</u> : 11189 PJ	<u>Total</u> : 7246 PJ	<u>Total</u> : 3278 PJ

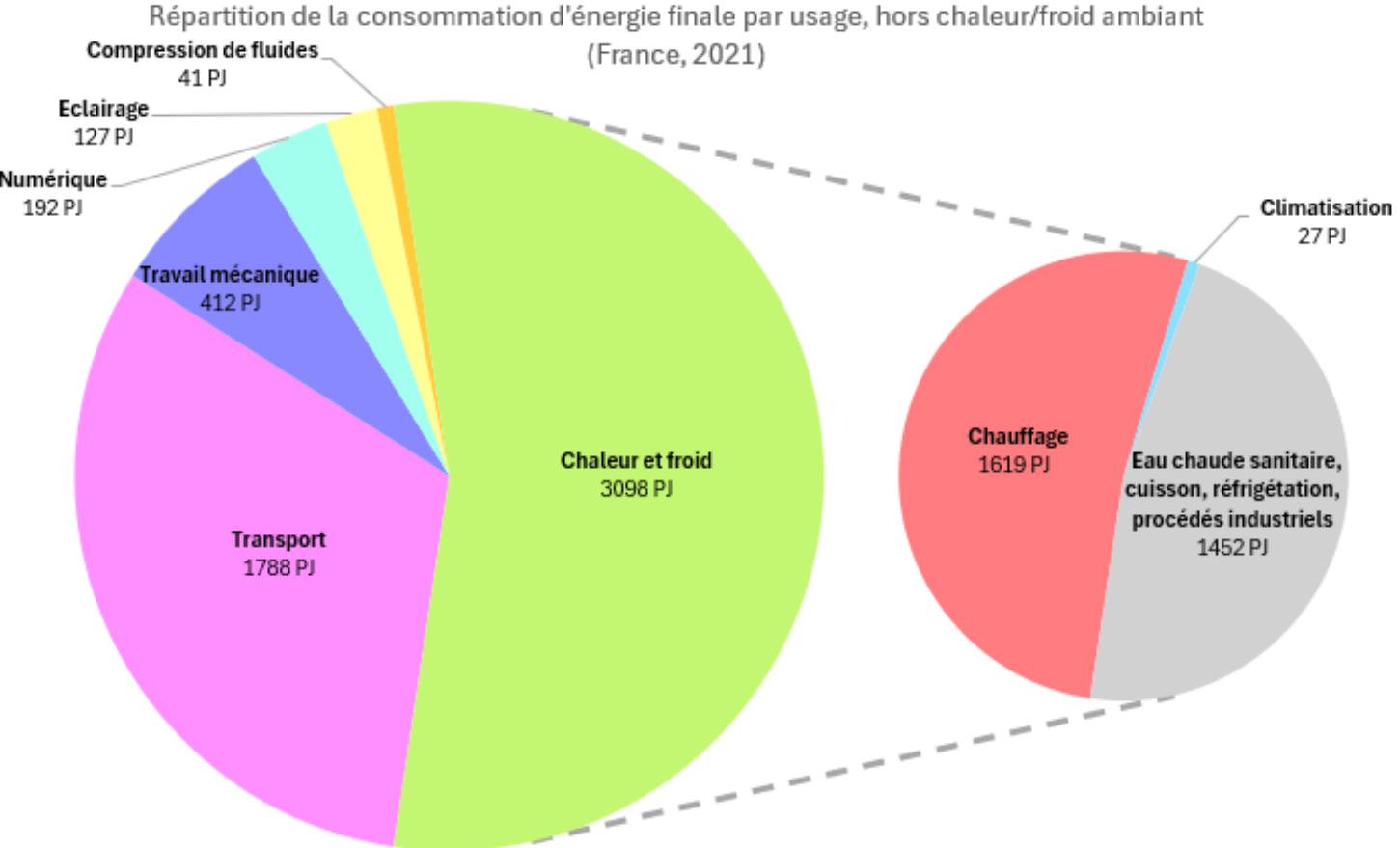


Structure énergétique aux trois stades de l'énergie

- Stade primaire :
 - Energies fossiles = importées
 - Energies renouvelables + fissile = produites
- Stade final :
 - Electricité** majoritairement produite à partir du nucléaire
 - Secteurs **Résidentiel** et **Transports** majoritaires, suivis du Tertiaire et de l'Industrie
- Stade utile :
 - Principalement **chaleur** et **froid**
 - Dans les secteurs **Résidentiel** puis **Tertiaire**

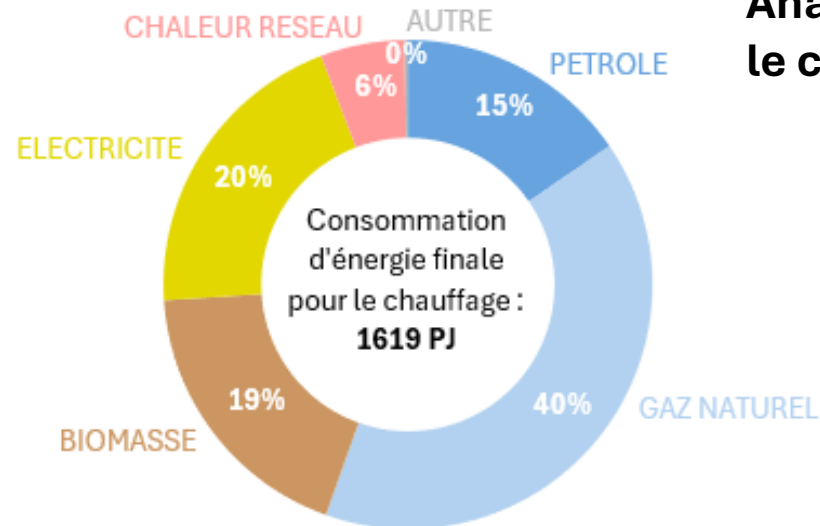
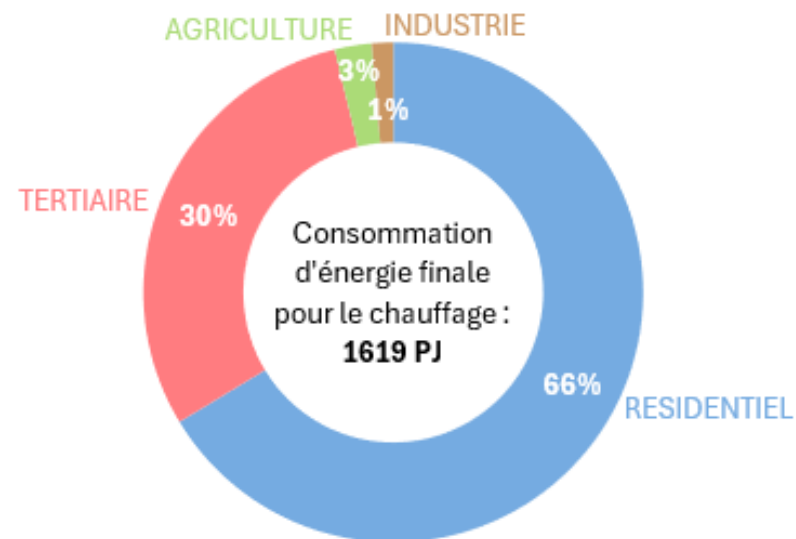
Rendements de conversion globaux de la chaîne de transformation :

- ✓ Primaire - Final : **65 %**
- ✓ Final – Utile : **53 %**



Répartition globale des usages énergétiques

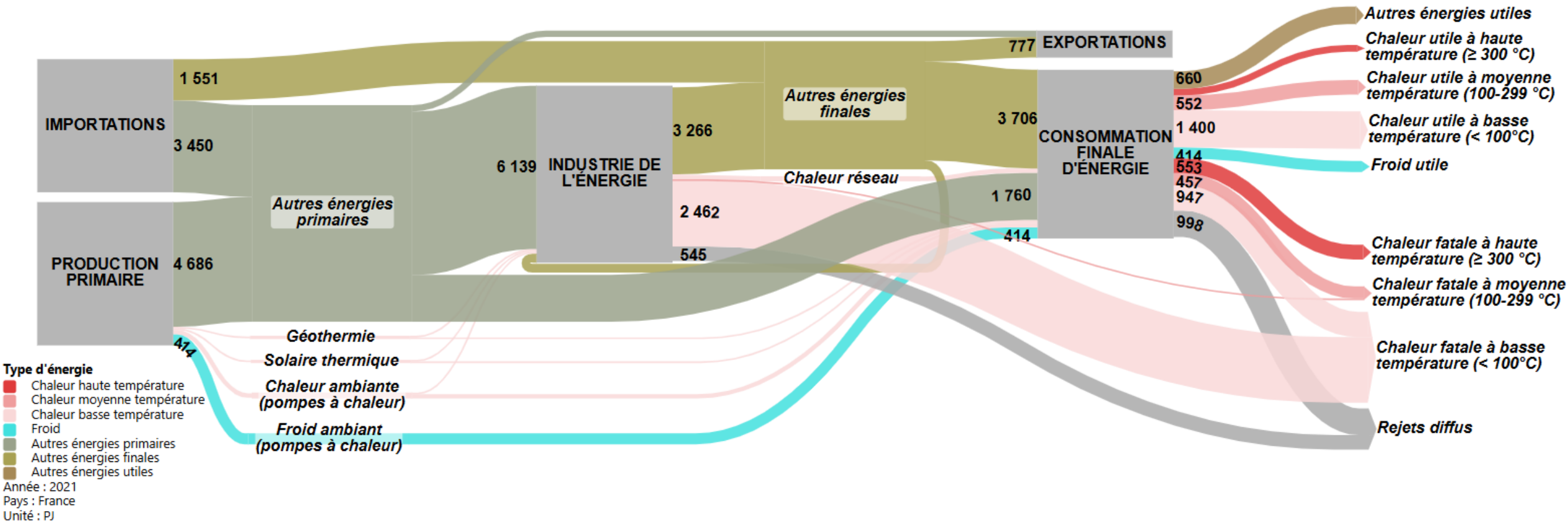
- Principalement **chaleur et froid**, suivi du transport
- En majeure partie pour le **chauffage**



Analyse détaillée des usages thermiques : le chauffage

- Consommation quasi-exclusivement due aux secteurs **Résidentiel et Tertiaire**
- Beaucoup de **gaz** puis **électricité**, **bois** et **fioul**

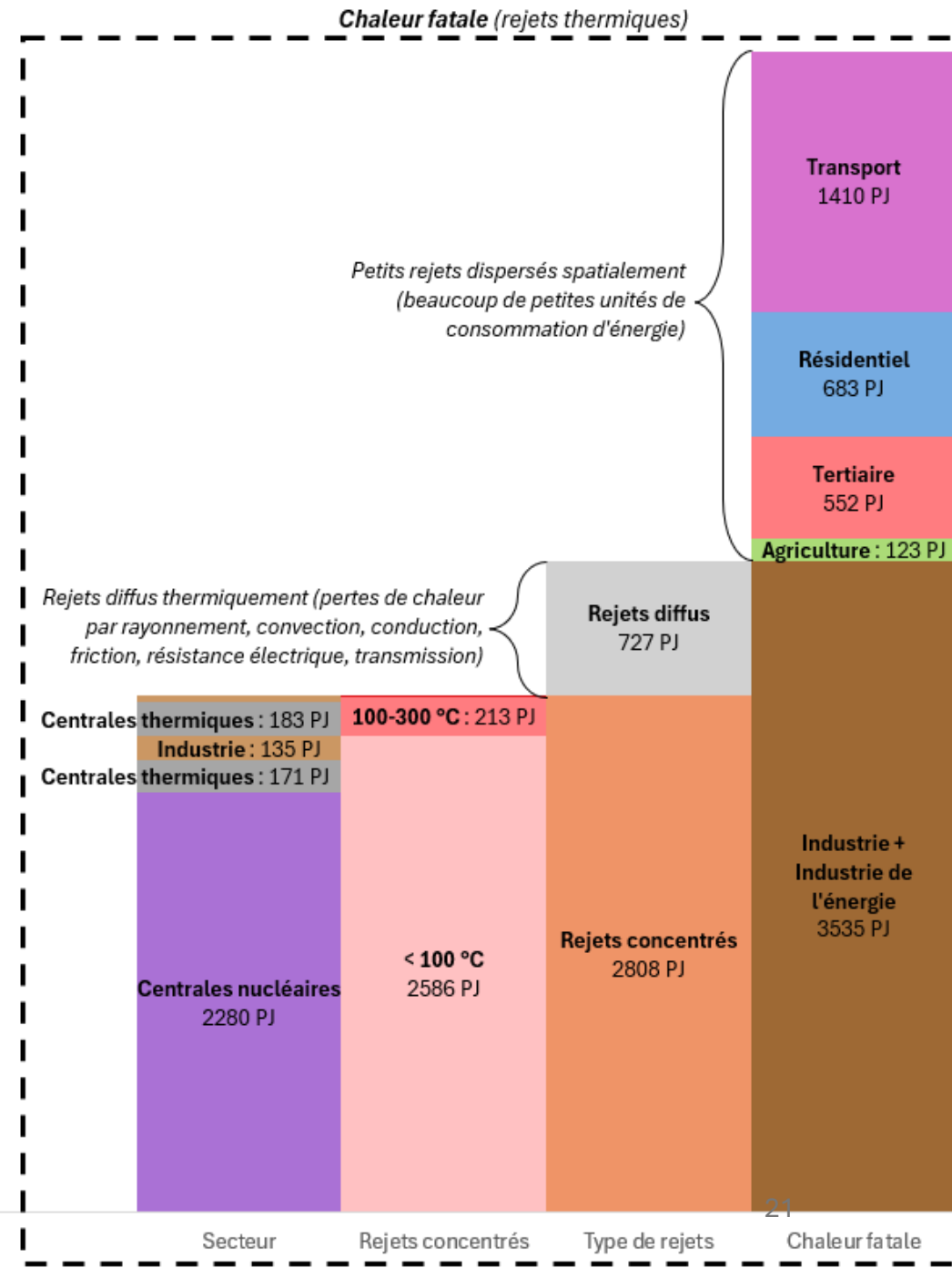
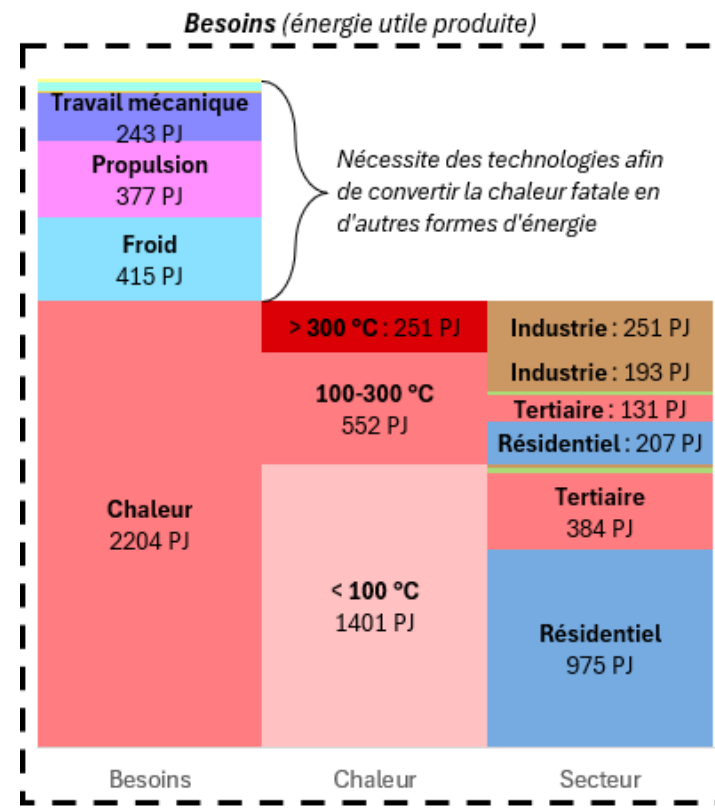
Flux thermiques dans la filière énergétique



- ✓ La majorité des besoins est sous forme de chaleur (stade final)
- ✓ **Peu de consommation d'énergie directement sous forme de chaleur**
- ✓ La majorité des pertes de transformation sont sous forme de chaleur potentiellement récupérables (lors de la phase de conversion ou de consommation de l'énergie)

➤ Juxtaposition des besoins avec le potentiel de récupération de chaleur fatale

	Besoins	Gisement de chaleur fatale
Haute température	Industrie	/
Moyenne température	Résidentiel, Industrie, Tertiaire	Centrales thermiques
Basse température	Résidentiel puis Tertiaire	Centrales nucléaires puis Centrales thermiques, Industrie



Comparaison avec étude ADEME sur le gisement de chaleur fatale

Périmètre	ADEME	METABOLHEAT
Année	2013	2021
Territoire	France	France
Secteurs	Industrie + STEP + UIOM + Data Center	Tous
Produits	Combustibles	Tous (dont électricité et vapeur achetée)
Chaleur fatale	Fumées de fours, buées de séchoir, fumées de chaudières, chaleur sensible, eaux usées de nettoyage, fluides de refroidissement de compresseurs, fluides de refroidissement des systèmes frigorifiques	Hors chaleur sensible + eau de nettoyage

Limites :

- **Méthodologies** différentes
- **Périmètres** d'étude différents
- **Année** différente
- **Correspondances** entre nomenclature très incertaines

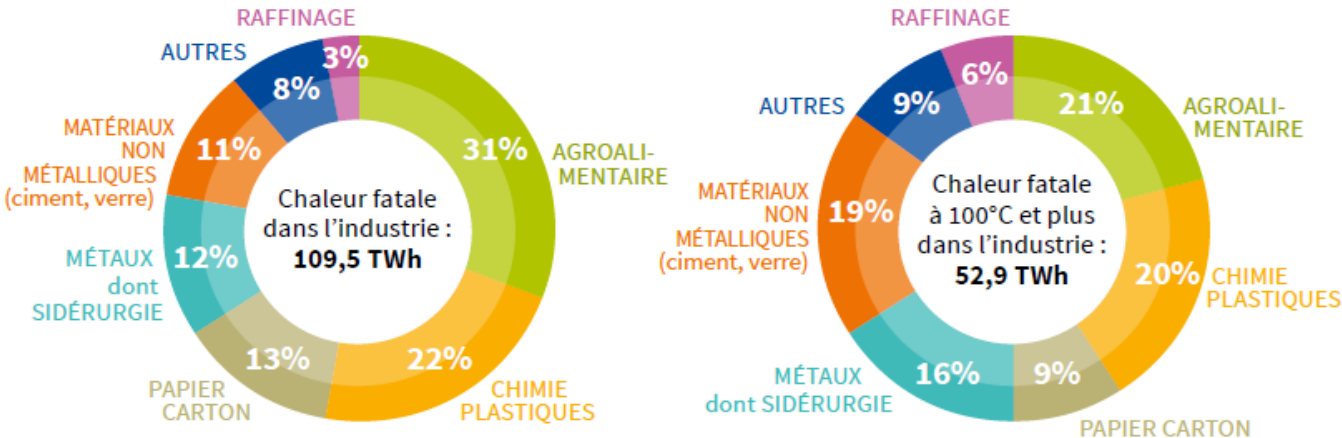
Résultats : Volumes totaux très proches mais c'est trompeur car :

- Chaleur fatale **raffineries** absentes de METABOLHEAT
- **Répartitions par secteurs industriels et type de rejets** relativement différentes
- **Consommations d'énergie de ces industries et répartitions** assez différentes également

109,5 TWh, soit **36 %** de la consommation de combustibles de l'industrie¹², rejetés sous forme de chaleur, dont **52,9 TWh** perdus à plus de 100°C

Origine du gisement

La moitié du gisement concerne les deux grands secteurs de l'agro-alimentaire et de la chimie.



Limites

- **Incertitudes sur les sources de données** (ventilations par machines estimées par le JRC, rendements moyens de Forman)

⇒ Plus le niveau de détail est grand, plus l'incertitude est élevée :

- Consommation sectorielle > par usage > par machine
- Gisement chaleur fatale > par type de rejet > par niveau de température)

- **Correspondances parfois incertaines** entre nomenclatures très différentes :

- IDEES (100 machines)
- CL-PFU (50 machines)
- Forman (30 machines)

- Prise en compte partielle des **critères géographiques et de la faisabilité technico-économique** de la valorisation de chaleur fatale

⇒ Possible à l'échelle locale ?

Vers des modèles locaux (Phase 3)

- Sources de données
 - Bilan énergétique par usage (ORCAE ou SDES ? (selon région))
 - Affiner avec une collecte sur le terrain ?
- Hypothèses
 - Proxys modèle national si niveau de détail insuffisant (probablement représentatif pour les secteurs Résidentiel, Tertiaire et Transport)
- Avantages/inconvénients par rapport au modèle national
 - Avantages
 - Si données locales = plus fiable
 - Conclusions plus précises/concrètes
 - Inconvénients
 - Si pas de données terrain (proxys) = moins fiable
 - Modèle moins polyvalent/complet (pas autant de détail sur tous les secteurs, probablement affiné sur les secteurs avec le plus d'intérêt/données)