

METABOLHEAT

Métabolisme énergétique national

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. Introduction générale..... | 3 |
| 2. Cadre théorique et définitions | 3 |
| 2.1. Définition des flux énergétiques et flux thermiques | 3 |
| 2.2. Niveaux de température, exergie et qualité énergétique | 5 |
| 2.3. Périmètre du système étudié | 7 |
| 2.4. Échelles et niveaux de granularité de l'analyse..... | 8 |
| 2.5. Conventions, unités et standards utilisés | 10 |
| 2.6. Hypothèses conceptuelles structurantes | 11 |
| 3. Données : recensement, traitement et structuration | 11 |
| 3.1. Sources de données mobilisables..... | 12 |
| 3.2. Périmètre d'étude des sources..... | 14 |
| 3.3. Échelle d'étude des sources | 15 |
| 3.4. Traitement des valeurs manquantes et des incertitudes..... | 16 |
| 3.5. Schéma final du modèle de données METABOLHEAT | 17 |
| 4. Méthodologie de quantification des flux énergétiques | 19 |
| 4.1. Structure conceptuelle des flux énergétiques et thermiques | 19 |
| 4.2. Assemblage des jeux de données et définition de deux configurations du modèle (Brockway et JRC) | 21 |
| 4.3. Quantification des énergies utiles et des flux thermiques..... | 25 |
| 4.4. Procédures de vérification et de validation | 28 |
| 5. Construction et représentation des flux énergétiques..... | 30 |
| 5.1. Choix du diagramme de Sankey pour la représentation des flux énergétiques | 30 |
| 5.2. Processus de construction des diagrammes | 31 |
| 5.3. Hiérarchies et niveaux de détail dans les diagrammes | 32 |
| 5.4. Conventions structurelles du modèle..... | 33 |
| 5.5. Conventions graphiques | 35 |
| 6. Résultats : métabolisme énergétique et flux thermiques en France..... | 35 |
| 6.1. Structure du métabolisme énergétique français | 36 |
| 6.1.2. Illustration des niveaux de désagrégation du modèle | 37 |
| 6.2. Structure et évolution du système énergétique français | 38 |
| 6.3. Répartition des usages énergétiques..... | 43 |
| 6.4. Flux thermiques et chaleur fatale dans le système énergétique | 46 |
| 7. Analyse critique et limites du modèle | 48 |
| 7.1. Points de vigilance liés aux hypothèses et aux reconstructions de données | 48 |
| 7.2. Limites spécifiques à l'estimation de la chaleur fatale | 49 |

| | |
|---|----|
| 7.3. Comparaison avec l'étude ADEME : analyse détaillée des écarts..... | 49 |
| 7.4. Limites du potentiel de valorisation de la chaleur fatale | 55 |
| 7.5. Limites d'interprétation et portée des résultats..... | 57 |
| 8. Conclusion et perspectives | 57 |
| 8.1. Rappel des objectifs et du positionnement du projet | 57 |
| 8.2. Principaux apports méthodologiques | 58 |
| 8.3. Principaux résultats obtenus | 58 |
| 8.4. Apports des représentations visuelles | 58 |
| 8.5. Limites du travail | 59 |
| 8.6. Perspectives de recherche et d'application | 59 |
| 8.7. Conclusion générale..... | 59 |
| Table des figures..... | 60 |
| Table des tableaux..... | 61 |
| Table des annexes | 61 |
| Annexes | 62 |

1. Introduction générale

La transition énergétique constitue l'un des principaux enjeux contemporains, au croisement des impératifs climatiques, économiques et sociaux. En France, les trajectoires de décarbonation, telles que formulées notamment dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) et les programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE), reposent en grande partie sur la transformation des systèmes de production, de distribution et d'usage de l'énergie. Dans ce cadre, la question de la **chaleur** occupe une place centrale : la moitié de l'énergie finale consommée en France est destinée à des usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, procédés industriels, confort d'été). Pourtant, les **flux thermiques** restent largement **sous-caractérisés**, tant dans leur structure que dans leur dynamique territoriale.

Le projet **METABOLHEAT** s'inscrit dans cette problématique en proposant une analyse systémique des flux de chaleur au sein des systèmes énergétiques contemporains. Il mobilise la notion de **métabolisme territorial**, entendue comme l'ensemble des échanges, conversions et transformations de matières et d'énergie au sein d'un territoire donné. L'objectif est d'identifier, quantifier et représenter les flux énergétiques — et plus spécifiquement thermiques — afin de mieux comprendre les déterminants techniques, spatiaux et socio-économiques des pratiques de chauffage et de refroidissement.

Ce rapport se concentre sur les travaux réalisés à **l'échelle nationale française**, constituant une première étape du projet. Cette échelle présente un double intérêt. D'une part, elle permet d'établir une **architecture globale des flux énergétiques** incluant les principaux vecteurs, secteurs d'usage et transformations. D'autre part, elle fournit un **référentiel cohérent** pour les analyses territorialisées qui seront menées dans une seconde phase du projet, notamment sur plusieurs métropoles françaises (Lyon, Grenoble, Lille, entre autres). Ces travaux locaux, bien que déjà définis conceptuellement, ne sont pas encore documentés ici et feront l'objet de rapports ultérieurs.

Les **objectifs spécifiques** de ce rapport sont donc les suivants :

- **Mesurer et quantifier** les flux énergétiques nationaux, en mettant l'accent sur les flux thermiques, tant utiles que dissipés.
- **Construire des représentations visuelles**, notamment sous forme de **diagrammes de type Sankey**, permettant de rendre lisible la structure des flux, leurs hiérarchies, leurs transformations et leurs pertes.
- **Analyser et interpréter** les résultats obtenus en regard des enjeux de transition énergétique, en identifiant les potentiels de récupération, de valorisation ou de réduction des pertes thermiques.

Ce premier rapport constitue ainsi une **référence méthodologique structurante** pour les analyses futures, en établissant la chaîne complète allant de la donnée brute à la représentation synthétique. Il documente l'ensemble des hypothèses, choix de modélisation et limites associées, afin de garantir la **reproductibilité** et la **transparence scientifique** du travail.

2. Cadre théorique et définitions

2.1. Définition des flux énergétiques et flux thermiques

Dans ce rapport, on entend par **flux énergétique** toute circulation mesurable d'énergie entre deux points d'un système, qu'il s'agisse d'une conversion, d'un transfert ou d'un usage final. Les flux sont caractérisés par un **vecteur énergétique** (gaz naturel, électricité, chaleur, biomasse,

carburants, etc.), un **niveau de puissance ou de quantité d'énergie**, ainsi qu'une **direction** exprimant la relation entre sources, transformations et usages.

Les trois stades de l'énergie et leurs implications

Dans l'analyse des systèmes énergétiques, il est essentiel de distinguer trois stades successifs de l'énergie, correspondant à trois moments de sa transformation dans la chaîne énergétique : **l'énergie primaire, l'énergie finale** et **l'énergie utile**.

- **Énergie primaire** : il s'agit de l'énergie contenue dans les ressources telles qu'extraites ou captées avant toute transformation. Elle inclut, par exemple, le pétrole brut, le gaz naturel, le charbon, l'uranium (converti par fission), ainsi que les flux renouvelables captés directement (rayonnement solaire, vent, biomasse, géothermie).
- **Énergie finale** : elle correspond à l'énergie mise à disposition de l'utilisateur après conversion, raffinage, production ou distribution. Par exemple : l'essence distribuée en station, l'électricité consommée à la prise, la vapeur vendue par un réseau de chaleur.
- **Énergie utile** : il s'agit de la part de l'énergie finale effectivement convertie en **service énergétique** rendu : chaleur dans un logement, propulsion d'un véhicule, chaleur de procédé, chauffage ou refroidissement d'un espace, etc.

Ces distinctions sont résumées et illustrées dans la Figure 1.

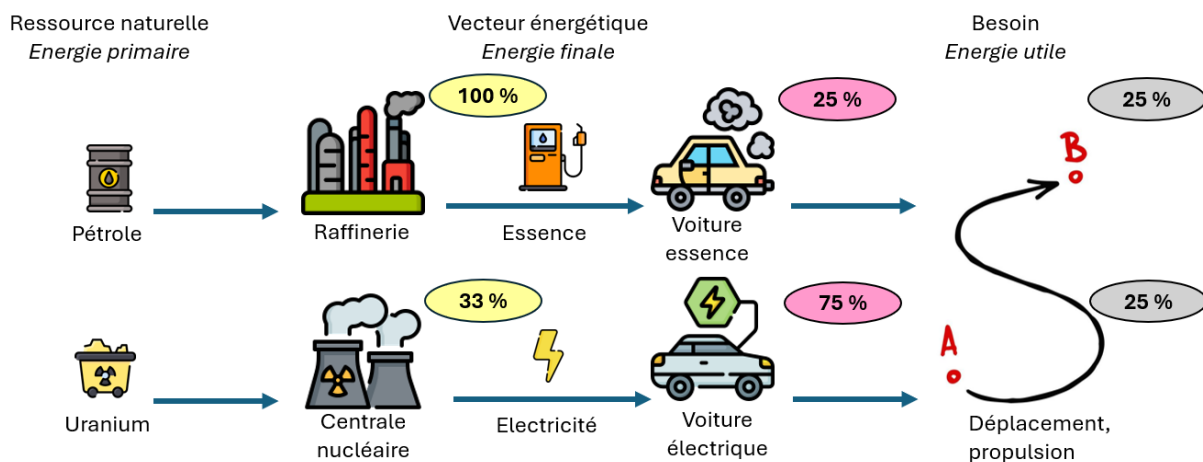


Figure 1 : Les trois stades de l'énergie (exemples pétrole → essence → propulsion et uranium → électricité → propulsion).
Source : infographie réalisée par TerriFlux. Les taux de rendement représentés sont indicatifs.

Cette figure met en évidence que :

- **Le rendement primaire → finale peut être très différent selon les filières**, par exemple ici entre les combustibles fossiles raffinés (100%) et l'électricité issue d'une centrale nucléaire (33%).
- **Le rendement finale → utile peut également être très différent entre filières**, car il dépend principalement du **dispositif d'usage** (moteur thermique (25%) vs. moteur électrique (75%), chaudière vs. pompe à chaleur, etc.).
- **Le rendement primaire → utile**, directement dépendant des deux rendements primaire → finale et finale → utile, **peut être très proche entre filières** (25% au total pour le circuit pétrole → essence → propulsion et pour le circuit uranium → électricité → propulsion) bien que les rendements sous-jacents soient très différents.

Ainsi, une analyse arrêtée à **l'énergie finale** masque des différences importantes de performance énergétique et surtout **cache l'existence de flux thermiques significatifs**, car c'est précisément au **stade de l'énergie utile** que les **flux de chaleur** apparaissent le plus distinctement, d'où l'intérêt scientifique de les quantifier.

Flux thermiques : chaleur primaire, chaleur finale et chaleur utile

Dans le cadre du présent travail, nous distinguons quatre formes de flux thermiques :

- 1. Chaleur** **primaire**
Il s'agit de la chaleur (ou du froid) **prélevée dans l'environnement** par un système thermodynamique (ex. pompe à chaleur, machine frigorifique) afin de produire une chaleur ou un froid valorisable. Cela peut être également la chaleur captée par des panneaux solaires thermiques ou par la géothermie.
- 2. Chaleur** **finale**
La chaleur primaire décrite précédemment est également considérée comme une chaleur finale si aucune transformation intermédiaire n'est effectuée (ex : rehaussement de la température) puisqu'elle est directement mise à disposition de l'utilisateur. A celle-ci s'ajoute la **chaleur distribuée via un vecteur organisé**, typiquement :
 - o **réseaux de chaleur** (vapeur, eau chaude)
 - o **réseaux de froid** (boucles d'eau glacée)La chaleur finale constitue donc une **énergie livrée** comparable, dans la chaîne énergétique, à l'électricité ou au carburant.
- 3. Chaleur** **utile**
C'est la **chaleur réellement reçue ou produite** volontairement au point d'usage pour répondre à un besoin : température intérieure dans un bâtiment, chaleur de procédé, chauffage d'un fluide, etc. Elle est généralement inférieure à la chaleur finale en raison des **pertes dans les émetteurs et les régulations**.
- 4. Chaleur fatale**
Elle est émise involontairement lors de conversions énergétiques (pertes des systèmes de production d'électricité, processus industriels, data centers, etc.).

La distinction entre chaleur utile et chaleur fatale est centrale dans METABOLHEAT, car elle permet d'identifier **des potentiels de récupération**, souvent sous-explorés dans les approches énergétiques nationales standard.

2.2. Niveaux de température, exergie et qualité énergétique

La caractérisation d'un flux thermique ne peut se limiter à la seule quantité d'énergie qu'il transporte. La **qualité** de cette énergie, c'est-à-dire sa capacité à être convertie en travail mécanique ou en chaleur utile à un niveau de température donné, est un paramètre déterminant. Cette qualité est couramment approchée par le concept d'**exergie**, défini comme la **part de l'énergie susceptible d'être transformée en travail utile**, par opposition à l'anergie, qui correspond à la part non convertible.

Dans le cas des **flux thermiques**, l'exergie est **fortement dépendante du niveau de température**. Plus la température du flux se rapproche de celle de l'environnement, plus la capacité à produire du travail diminue. De façon générale :

$$\text{Exergie}_{\text{chaleur}} = \left| 1 - \frac{T_{\text{env}}}{T_{\text{flux}}} \right| \cdot \text{Énergie thermique}$$

où T_{flux} est la température absolue du flux thermique et T_{env} la température de référence (souvent l'air ambiant).

Ainsi :

- Une **chaleur à haute température** (ex : > 150°C dans les procédés industriels) possède une **exergie élevée**, car elle est potentiellement convertible en travail ou valorisation énergétique efficace.
- Une **chaleur à basse température** (ex : < 40°C, issue d'effluents, eaux usées, ou rejets de condensation) possède une **exergie très faible**, ce qui rend sa valorisation plus complexe et dépendante de technologies spécifiques (pompes à chaleur, échangeurs basse température, stockages thermiques, etc.).

Inversement, pour la plupart des **vecteurs énergétiques non thermiques** (carburants liquides, gaz, biomasse, uranium, électricité), **l'exergie est très proche de l'énergie contenue**. Par exemple :

Tableau 1 : Ratios Energie/Exergie par vecteur énergétique

| Vecteur énergétique | Énergie ≈ Exergie ? | Justification |
|------------------------------|---------------------|--|
| Électricité | Oui (≈ 100 %) | Directement convertible en travail |
| Carburants (essence, diesel) | Oui (≈ 90 %) | Fort potentiel de conversion mécanique |
| Uranium (fission) | Oui | Potentiel thermodynamique très élevé |
| Chaleur basse température | Non | Exergie très faible, peu convertible |
| Chaleur haute température | Variable | Exergie croît avec la température |

Ainsi, **l'analyse exergétique fournit un référentiel commun permettant de comparer objectivement toutes les formes d'énergie**, ce que ne permet pas une analyse énergétique seule.

Exemple d'application dans la figure 2 ci-dessous.

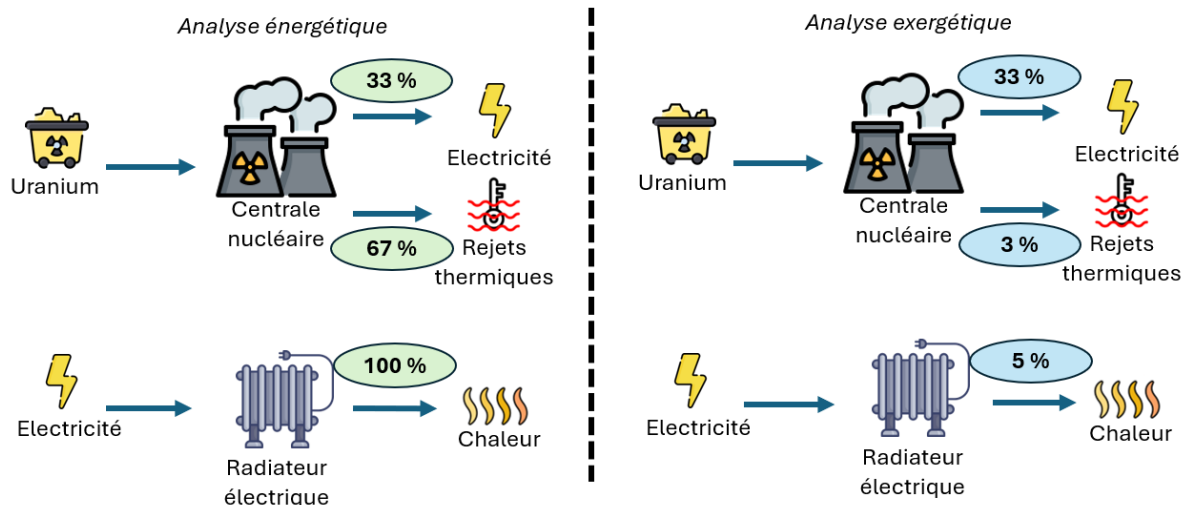


Figure 2 : Comparaison entre analyse énergétique (gauche) et analyse exergétique (droite) dans le cas d'une centrale nucléaire et d'un radiateur électrique.

Source : infographie réalisée par TerriFlux. Les taux de rendement représentés sont indicatifs.

Cette illustration montre que, du point de vue **énergétique** :

- Une centrale nucléaire apparaît comme produisant une grande quantité de **rejets thermiques** (≈ 67 %) et un fort potentiel de récupération de chaleur fatale.
- Un radiateur électrique semble, inversement, **très efficace** (≈ 100 %), puisqu'il convertit intégralement l'électricité en chaleur au point d'usage.

Cependant, du point de vue **exergétique** :

- La **chaleur fatale issue d'une centrale** est à **très basse exergie** : elle est difficilement valorisable même si sa quantité énergétique est élevée.

- Un **radiateur électrique** convertit **une énergie de très haute exergie (électricité)** en **chaleur de basse exergie**, ce qui est thermodynamiquement **peu pertinent** (faible performance exergétique $\approx 5\%$).

Ce renversement d'interprétation souligne l'importance d'une approche exergétique pour :

- **Hierarchiser les flux thermiques**, non seulement en quantité mais aussi en qualité.
- **Identifier les flux réellement valorisables**.
- **Éviter des conclusions trompeuses** basées uniquement sur des bilans énergétiques.

L'analyse exergétique justifie la focalisation de METABOLHEAT sur :

- l'**identification précise** des **niveaux de température** des flux thermiques,
- la **distinction explicite** entre chaleur primaire, chaleur finale et chaleur utile,
- et la **quantification séparée** des flux de chaleur à haute et basse exergie.

Ces éléments seront mobilisés dans les **méthodes de quantification** (Section 4) et dans les **interprétations des résultats** (Section 6).

2.3. Périmètre du système étudié

L'analyse menée dans le cadre de METABOLHEAT repose sur la définition explicite du périmètre d'étude **selon plusieurs dimensions**, permettant de structurer les flux énergétiques analysés. La clarté de ce périmètre est essentielle pour assurer la cohérence interne des quantifications, la comparaison avec d'autres travaux et la reproductibilité des résultats.

2.3.1. Périmètre territorial

Le périmètre territorial retenu dans ce rapport est celui de la **France entière** (comprenant métropole + Outre-mer, selon disponibilité des données), considérée comme un système énergétique unique. Les flux **d'importation** (vecteurs énergétiques, électricité, combustibles) et **d'exportation** sont intégrés comme flux **entrants** ou **sortants** du système national.

2.3.2. Périmètre des usages

Dans METABOLHEAT, les flux sont caractérisés selon les **usages de l'énergie**, entendus comme les fonctions auxquelles l'énergie est convertie. On distingue classiquement :

- **Usages énergétiques** : chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, propulsion, procédés industriels, climatisation, etc.
- **Usages non énergétiques** : matières premières pétrochimiques, stockage de carbone, etc.
- **Travail humain** (énergie métabolique)

Dans ce rapport, **seuls les usages énergétiques sont pris en compte**. Les usages non énergétiques et l'énergie métabolique ne sont pas inclus dans le périmètre, car ils ne produisent pas directement de flux thermiques analysables au sens de ce travail.

2.3.3. Périmètre des produits / formes d'énergie considérés

Le périmètre énergétique couvert inclut l'ensemble des formes nécessaires à la représentation des transformations énergétiques :

- **Énergies primaires** (pétrole brut, gaz, biomasse brute, uranium, renouvelables captées, etc.)
- **Énergies finales** (électricité livrée, carburants raffinés, chaleur distribuée via réseaux)
- **Énergies utiles** (chauffage effectif, propulsion réelle, chaleur de procédé)
- **Pertes énergétiques**, incluant :
 - pertes de transport et distribution,

- **chaleur fatale** (rejets thermiques).

Les pertes constituent explicitement des flux dans le système, et non des résidus implicites — choix indispensable afin de rendre ces flux visibles pour l’analyse thermique.

2.3.4. Périmètre temporel

Afin de réduire la quantité de données à rassembler, le modèle METABOLHEAT ne concernera que **la dernière année disponible (2021, cf. Partie II.3.)** pour laquelle il est possible d’estimer l’ensemble des flux énergétiques de façon détaillée.

2.3.5. Périmètre des empreintes étudiées : énergie et exergie

L’analyse peut reposer sur deux grandeurs complémentaires :

Tableau 2 : Définition et rôle des empreintes énergétiques et exergetiques

| Empreinte | Signification | Rôle potentiel dans METABOLHEAT |
|----------------|--|---|
| Énergie | Quantité d’énergie transférée | Permet de représenter les bilans massiques et la structure des flux |
| Exergie | Qualité thermodynamique (capacité à produire du travail) | Permet de hiérarchiser les flux selon leur potentiel de valorisation |

L’**analyse énergétique** permet de **quantifier les flux**, tandis que l’**analyse exergetique** permet de **différencier les flux valorisables des flux faiblement utiles**, en particulier dans le domaine thermique.

Afin de réduire la taille du modèle METABOLHEAT, **seule l’empreinte énergétique a été conservée** (cf. Partie II.3.). Le potentiel de valorisation des flux thermiques sera tout de même visibilisé par les niveaux de températures de ces flux.

2.4. Échelles et niveaux de granularité de l’analyse

Au-delà du périmètre conceptuel du système étudié, l’analyse des flux énergétiques et thermiques nécessite de préciser le **niveau de détail retenu**, c’est-à-dire la **granularité** à laquelle les flux sont décrits. Cette granularité conditionne à la fois la précision des résultats et leur interprétabilité.

Dans le cadre du présent rapport, quatre échelles d’analyse sont considérées : **territoriale, sectorielle / usages / technologique, énergétique, et temporelle.**

2.4.1. Échelle territoriale

L’analyse est réalisée à l’échelle de la **France entière**, considérée comme un système énergétique agrégé. Aucun découpage régional, départemental ou métropolitain n’est mobilisé dans ce rapport.

Ce choix présente un double avantage :

- il permet de construire une **architecture de flux nationale cohérente**, qui servira ensuite de référence ;
- il évite d’introduire des disparités territoriales dont la qualification nécessite des données plus fines (ces aspects feront l’objet des études métropolitaines prévues ultérieurement).

2.4.2. Échelle sectorielle, des usages et des machines

Afin de décrire finement la formation des flux énergétiques, plusieurs niveaux de détail sont distingués :

- **Par secteurs économiques** (niveau macro) : Résidentiel, Tertiaire, Industrie, Transports, Agriculture.

- **Par sous-secteurs** (niveau méso) :
Par exemple, dans l'Industrie : acier, métaux ferreux, ciment, verre, papier, agroalimentaire, etc.
Dans les Transports : transport routier particulier, transport routier marchandises, aérien, maritime, ferroviaire, fluvial.
- **Par usages énergétiques** (niveau fonctionnel) :
Chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, climatisation, propulsion, chaleur de procédé, etc.
Seuls les usages énergétiques sont considérés ; les usages non énergétiques (pétrochimie par exemple) sont exclus ici.
- **Par machines ou technologies** (niveau micro, lorsqu'il est pertinent) :
Radiateur électrique, chaudière gaz, pompe à chaleur, moteur thermique, moteur électrique, réfrigérateur, TV, lave-linge, etc.

Cette stratification permet, lorsque les données le permettent, **d'attribuer les flux énergétiques et thermiques à des dispositifs techniques concrets**, ce qui est indispensable pour la quantification et l'analyse des **potentiels de récupération et de substitution**.

2.4.3. Échelle des produits et des formes d'énergie

Les flux sont représentés à un niveau de détail permettant de restituer les **enjeux de transformation et de pertes** :

- **Produits énergétiques primaires** : pétrole brut, gaz naturel, uranium, biomasse brute, énergies renouvelables captées.
- **Produits énergétiques finaux** : électricité, carburants (essence, diesel, biogazole), bois énergie, biogaz, chaleur distribuée par réseau.
- **Énergie utile** : chauffage réel, propulsion, chaleur de procédé, rafraîchissement, etc.
- **Pertes** :
 - pertes de transport et distribution,
 - chaleur fatale lors de la **conversion de l'énergie primaire en énergie finale**, rejetée par l'industrie de l'énergie (ex : centrales thermiques, raffinage),
 - chaleur fatale lors de la **conversion de l'énergie finale en énergie utile**, rejetée par les machines (ex : chaudière, voiture, procédé industriel).

Les flux thermiques sont, lorsque les données le permettent, **classés par niveaux de température**, ce qui permettra ultérieurement l'analyse en termes de **potentiel de valorisation** (Section 6).

2.4.4. Échelle temporelle

L'ensemble de l'analyse est réalisé à une **granularité annuelle**. Aucun effet **saisonnier, mensuel, journalier ou horaire** n'est introduit à ce stade.

Ce choix est cohérent avec :

- la majorité des bilans et statistiques énergétiques nationaux,
- la construction des diagrammes Sankey, généralement établis à échelle annuelle,
- l'objectif de représenter **l'organisation structurelle** du système avant d'aborder les **dynamiques temporelles** (qui seraient pertinentes dans les études territorialisées futures).

2.5. Conventions, unités et standards utilisés

L'expression quantitative de l'énergie peut mobiliser diverses unités selon les domaines : ingénierie, physique, statistique énergétique, nutrition, sciences humaines, etc. Le choix d'une unité de référence dans METABOLHEAT vise à assurer :

- la **neutralité méthodologique** vis-à-vis des vecteurs considérés,
- la **comparabilité** entre secteurs et usages,
- la **lisibilité** des ordres de grandeur dans les bilans nationaux.

2.5.1. Principales unités énergétiques et leurs domaines d'usage

Tableau 3 : Liste des principales unités énergétiques

| Unité principale | Définition | Usages principaux | Conversion |
|--|--|---|------------------------------------|
| tonne équivalent pétrole (tep) (multiples : <i>ktep, Mtep</i>) | Quantité d'énergie contenue dans 1 tonne de pétrole brut | Bilans énergétiques globaux, énergie primaire | 1 tep = 41,868 × 10 ⁹ J |
| wattheure (Wh) (multiples : <i>kWh, MWh, GWh, TWh</i>) | Énergie consommée par une puissance de 1 W pendant 1 h | Comptage et facturation, électricité | 1 Wh = 3 600 J |
| calorie (cal) (multiples : <i>kcal</i>) | Énergie nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 g d'eau | Domaine alimentaire / métabolique | 1 cal = 4,184 J |
| joule (J) (multiples : <i>kJ, MJ, GJ, TJ, PJ</i>) | Unité du système international (SI) pour l'énergie et le travail | Domaine scientifique et ingénierie | 1 J = 1 × 10 ⁻¹⁵ PJ |

2.5.2. Justification du choix du pétajoule (PJ)

Dans METABOLHEAT, l'unité principale retenue est le **pétajoule (PJ)**. Ce choix repose sur quatre arguments :

1. **Neutralité sectorielle**
Contrairement au Wh (associé à l'électricité) ou à la tep (associée à l'énergie primaire), le PJ **ne privilégie aucun vecteur énergétique**.
2. **Cohérence avec les bilans nationaux**
Les ordres de grandeur typiques des flux énergétiques français (ex. consommation finale ≈ 7 000 PJ/an) sont lisibles et sans notation scientifique lourde.
3. **Pertinence pour l'étude des flux thermiques**
Puisque le projet porte sur la **chaleur utile** et les **pertes thermiques**, le PJ évite toute association à une filière spécifique.
4. **Facilité de conversion**
Comme le montre le tableau précédent, la conversion entre unités est systématique et réversible.

2.5.3. Convention PCI vs. PCS

Pour les combustibles, l'énergie est exprimée en **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** et non en **pouvoir calorifique supérieur (PCS)**.

Tableau 4 : Définition et interprétation des différents types de pouvoirs calorifiques

| Terme | Définition | Interprétation physique | Choix METABOLHEAT |
|------------|---|--|-------------------|
| PCS | Inclut la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau | Représente la quantité d'énergie <i>théorique maximale</i> | Non retenu |
| PCI | Exclut cette chaleur latente (non récupérée dans la plupart des usages) | Représente l'énergie réellement valorisable | Retenu |

Ce choix garantit la **comparabilité inter-secteurs**, notamment entre systèmes à combustion (gaz, fioul, biomasse) et systèmes électriques.

2.5.4. Données réelles vs. données corrigées des variations climatiques

On distingue :

Tableau 5 : Définition des données corrigées des variations climatiques

| Donnée | Définition | Avantage | Limite |
|------------------------------------|---|----------------------------------|--|
| Données réelles | Consommations observées pour l'année considérée | Fidélité aux usages réels | Dépendent des conditions climatiques |
| Données corrigées du climat | Données recalculées pour un climat « normal » | Permet la comparaison temporelle | S'éloigne des consommations effectives |

Dans METABOLHEAT, nous **retenons les consommations réelles**, car :

- l'objectif est de **caractériser les flux thermiques effectivement produits et dissipés**, pas de simuler leur valeur « normalisée » ;
- la représentation Sankey vise une **photographie du système réel**, non une projection conventionnelle.

2.6. Hypothèses conceptuelles structurantes

Deux hypothèses générales guident la modélisation :

1. **Principe de conservation de l'énergie** : l'énergie totale est conservée à chaque étape ; seules les conversions et pertes sont redistribuées entre vecteurs ou formes.
2. **Représentation centralisée des pertes thermiques** : la chaleur fatale est explicitement représentée comme un **flux sortant dédié**, et non incorporée implicitement dans des rendements globaux.

3. Données : recensement, traitement et structuration

La construction du modèle de données METABOLHEAT repose sur l'exploitation de sources statistiques, institutionnelles et scientifiques décrivant les flux énergétiques à l'échelle nationale. Dans un premier temps, un **recensement des jeux de données existants** (qui se veut le plus exhaustif possible) a été réalisé, couvrant les organismes publics nationaux, les agences internationales, les centres d'expertise sectoriels et les travaux académiques récents. Ces sources ont été **analysées, comparées et évaluées** selon plusieurs critères : granularité sectorielle, couverture temporelle, cohérence des conventions (PCI/PCS), disponibilité des usages énergétiques, présence ou non de données sur l'énergie utile et les flux thermiques, et

compatibilité avec une analyse exergétique. L'objectif de cette analyse préalable est de **sélectionner les sources les plus pertinentes** pour la construction du modèle METABOLHEAT, en évitant les redondances, en assurant la compatibilité entre jeux de données, et en garantissant la traçabilité des hypothèses méthodologiques.

3.1. Sources de données mobilisables

Ci-dessous, la liste des sources de données pertinentes pour le modèle METABOLHEAT à l'échelle de la France ayant été identifiées.

Tableau 6 : Liste des sources de données énergétiques à l'échelle nationale

| Source | Nature / statut | Type de données | Intérêt potentiel pour METABOLHEAT | Limites / précautions |
|--|-----------------------------------|---|---|--|
| SDES - Service des données et études statistiques (Ministère de la Transition Énergétique) | Organisme public français | Bilan énergétique national, consommations finales par secteur, par vecteur, données réseaux (électricité / gaz / chaleur) | Référence principale pour les bilans énergétiques nationaux ; cohérent dans le temps ; compatible avec conventions françaises (PCI, énergie finale) | Peu d'information sur qualité de chaleur (température), pas d'énergie utile , couverture détaillée industrie limitée → nécessite croisements |
| Eurostat - Statistics on Energy | Agence statistique de l'UE | Bilans énergie primaire / finale / transformation, par secteurs et vecteurs, harmonisés UE | Permet de situer la France dans un contexte européen ; cohérence méthodologique inter-pays ; utile pour comparaisons internationales | Moins détaillé que SDES pour les secteurs ; nécessite conversion d'unités et vérification cohérence (PCI/PCS) |
| AIE - Agence Internationale de l'Énergie | Organisation intergouvernementale | Données mondiales énergie primaire, usages finaux, systèmes énergétiques | Permet de comparer la France à d'autres pays et d'inscrire METABOLHEAT dans les analyses internationales ; utile pour communication scientifique | Les données peuvent être agrégées → perte de finesse sectorielle ; certaines données non publiques |
| CEREN (Centre d'Études et de Recherches Économiques sur l'Énergie) | Organisme français spécialisé | Consommations détaillées par secteurs et sous-secteurs (résidentiel, industrie, tertiaire), par vecteur | Apporte des données fines par usage et sous-secteur ; indispensable pour le détail des usages énergétiques (ex. chauffage vs ECS vs cuisson) | Données souvent non publiques ; méthodologie interne à documenter ; nécessite parfois redressements statistiques |

| Source | Nature / statut | Type de données | Intérêt potentiel pour METABOLHEAT | Limites / précautions |
|---|--|---|---|--|
| JRC - Joint Research Centre (Commission européenne) | Centre scientifique de la Commission Européenne | Bases de données techniques et environnementales, dont ODYSSEE-MURE , BAT, taux de rendement, efficacité énergétique | Utile pour caractériser les efficacités des processus → permet d'estimer l'énergie utile et les pertes thermiques dans les systèmes | Hétérogénéité des sources ; nécessite interprétation d'experts pour articuler les données aux flux nationaux |
| Brockway et al. (2021+) – Base de données mondiale exergétique | Travaux académiques → <i>Global Exergy Dataset, Energy Conversion Chain Models</i> | Analyse exergétique mondiale : énergie utile, pertes par conversion, structure des chaînes énergétiques par pays | Ressource clé pour construire l'analyse exergétique : fournit ratios énergie finale → utile et pertes thermiques par secteur | Résultats modélisés et non mesurés ; nécessite adaptation aux conventions françaises ; granularité parfois plus faible que CEREN/SDES |

Ces sources peuvent potentiellement jouer des rôles complémentaires :

- **SDES** fournit l'**ossature énergétique nationale** en énergie primaire et finale.
- **CEREN** apporte la **finesse sectorielle et par usage** nécessaire pour descendre au **niveau fonctionnel** (chauffage, ECS, propulsion, etc.).
- **JRC-IDEES** et **Brockway et al.** fournissent les éléments permettant d'obtenir l'**énergie utile** et les **pertes thermiques**, qui n'apparaissent pas dans les bilans classiques.
- **Eurostat** et **AIE** permettent de **situer la France** dans un cadre international et de vérifier la **cohérence globale**.

Cartographie des sources de données

Afin de structurer et clarifier les relations entre ces différentes sources, une **cartographie détaillée des jeux de données** disponibles a été réalisée (voir **Annexe 1**).

Cette cartographie représente :

- les **principales institutions productrices de données** (SDES, AIE, Eurostat, JRC, Ceren, Brockway, Forman) ;
- les **jeux de données** qu'elles produisent ou alimentent (bilan énergétique, consommation désagrégée, comptes de flux physiques, etc.) ;
- leurs **liens d'interdépendance** (ex. : les bilans nationaux du SDES alimentent Eurostat et l'AIE) ;
- ainsi que les **différences méthodologiques et de périmètre** entre ces bases (par ex. différences de conventions PCI/PCS, d'unités, ou de catégorisation sectorielle).

Cette carte met bien en évidence :

- les **chaînes de circulation des données** : la base de référence nationale (SDES) est à la source de la plupart des autres bases européennes ou internationales ;
- les **zones d'incertitude** ou d'incohérence possibles : pertes thermiques, chaleur de pompe à chaleur non toujours comptabilisée, différences de conventions ;

- et enfin la **position de METABOLHEAT** dans cet écosystème : le projet se fonde à la fois sur des bilans officiels (SDES, Eurostat, AIE) et sur des travaux de recherche (Brockway, JRC) pour reconstruire un modèle énergétique complet, intégrant les flux thermiques.

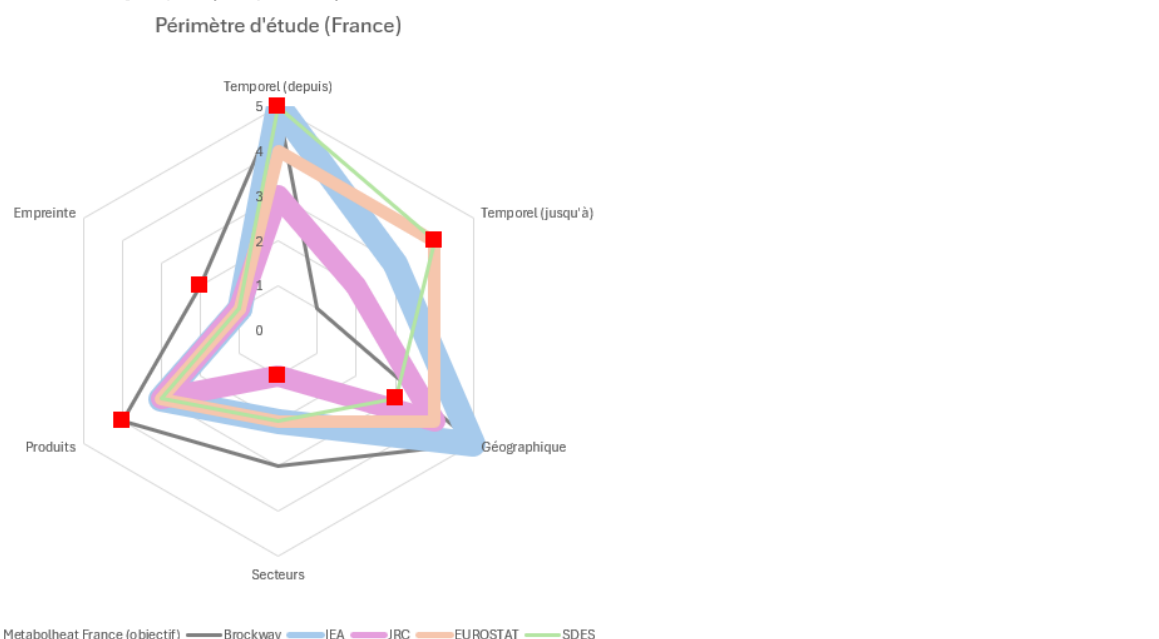
Cette analyse, couplée à une comparaison des périmètres et échelles d'études des sources (cf. sections suivantes 3.2. et 3.3.), a permis d'identifier deux voies principales d'assemblage du modèle national (représentées sur la cartographie) :

- une **première version**, fondée principalement sur les travaux **Brockway et al.** pour l'estimation de l'énergie utile et des pertes thermiques (avec empreinte exergétique),
- une **seconde version**, s'appuyant davantage sur les données et ratios d'efficacité issus du **JRC** (notamment ODYSSEE-MURE, employés dans le projet JRC-IDEES) pour renforcer la cohérence sectorielle et technologique (sans empreinte en exergétique).

Cette cartographie constitue donc la **charpente décisionnelle** ayant permis de retenir les sources utilisées dans la suite du projet.

3.2. Périmètre d'étude des sources

Afin d'évaluer la pertinence des différentes sources statistiques mobilisables pour le projet METABOLHEAT, une analyse comparative des **périmètres d'étude** a été conduite. Le diagramme radar présenté à la **Figure 3** permet de visualiser la couverture des périmètres par les principales bases de données existantes (SDES, Eurostat, AIE, JRC, Brockway) et de les confronter aux **objectifs du projet** (en points).



| 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 | | | |

Figure 3 : Périmètre d'étude des sources mobilisables (modèle France)

Lecture : en points, le périmètre des objectifs du projet ; en courbe, le périmètre des sources statistiques mobilisables.

Toutes les sources recensées portent sur les statistiques énergétiques françaises, mais elles présentent des **périmètres d'étude de tailles différentes**, plus ou moins étendus que ceux visés par METABOLHEAT.

Parmi elles, la base **Brockway** se distingue comme celle qui **couvre le périmètre le plus proche des objectifs** : elle inclut à la fois les énergies primaires, finales et utiles ainsi que les pertes d'énergie, et propose une approche combinant les bilans énergétiques officiels et des reconstitutions d'exergie. Néanmoins, sa **limite temporelle (année 2020)** apparaît comme le principal écart par rapport aux ambitions du projet, qui visent une reconstruction historique étendue sur plusieurs décennies.

Le **modèle METABOLHEAT-France** suit logiquement ce périmètre, en s'appuyant sur les données Brockway tout en maintenant une compatibilité structurelle avec les bilans du SDES et d'Eurostat.

L'analyse du radar montre ainsi que la principale marge d'amélioration concerne le **périmètre temporel**, encore restreint, tandis que les périmètres sectoriel, produit et empreinte sont déjà bien alignés avec les objectifs initiaux.

3.3. Échelle d'étude des sources

De manière analogue, la Figure 4 présente la comparaison des **échelles d'étude** couvertes par les différentes sources de données. Cette analyse vise à identifier la granularité spatiale, sectorielle, temporelle et énergétique de chaque source, et à évaluer leur adéquation avec les besoins méthodologiques du projet METABOLHEAT.

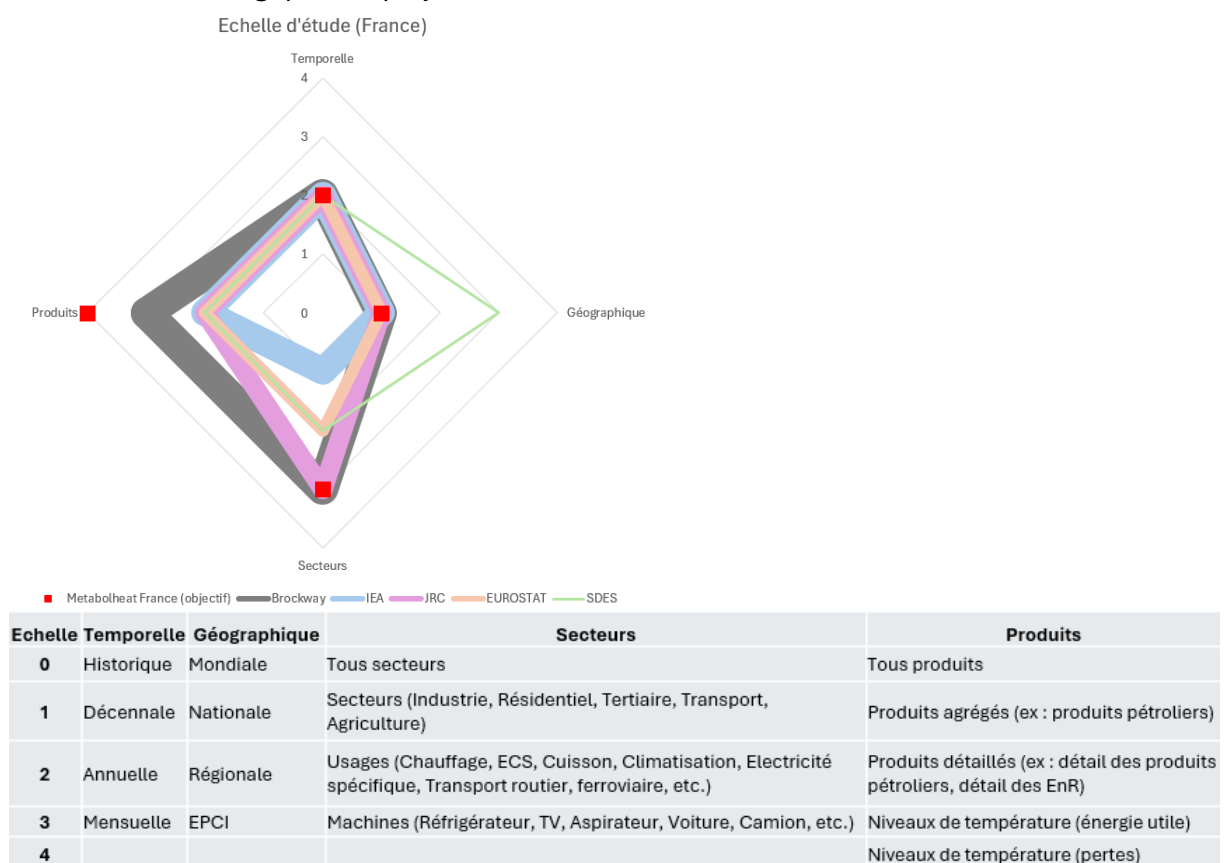


Figure 4 : Échelle d'étude des sources mobilisables (modèle France)

Lecture : en fond, l'échelle des objectifs du projet ; en points, l'échelle du modèle METABOLHEAT en cours ; en courbe, l'échelle des sources statistiques mobilisables.

L'examen des échelles met en évidence que, bien que toutes les sources décrivent la situation énergétique française, elles diffèrent fortement par **leur niveau de détail**. Les bases officielles (SDES, Eurostat, AIE) restent centrées sur des bilans nationaux à **résolution annuelle**, agrégés par grands secteurs et produits.

À l'inverse, la base **Brockway** atteint un niveau de désagrégation supérieur : elle fournit des données détaillées par **secteurs, usages et produits énergétiques**, mais sans encore distinguer les flux thermiques par niveaux de température.

Le **modèle METABOLHEAT** s'appuie sur cette structure Brockway tout en cherchant à atteindre les objectifs de détail fixés par le projet : intégration des **niveaux de température** pour les flux de chaleur et de pertes énergétiques. Pour combler cette lacune, les **travaux de Forman et al.** ont été exploités afin d'affiner la représentation des pertes d'énergie par niveau de température, apportant ainsi une première brique vers une modélisation plus complète des flux thermiques.

Les sections précédentes ont permis d'évaluer la **pertinence thématique** (périmètres) et la **granularité** (échelles) des sources disponibles. La prochaine étape consiste à examiner la **qualité et la complétude des données** — en particulier la gestion des valeurs manquantes, les incertitudes associées et les méthodes de reconstitution employées — avant de proposer le schéma consolidé du modèle de données METABOLHEAT.

3.4. Traitement des valeurs manquantes et des incertitudes

La construction d'un modèle national intégrant les flux énergétiques, thermiques et exergétiques implique nécessairement de composer avec des **valeurs manquantes**, des **hétérogénéités de conventions** et des **incertitudes statistiques**. Ces limites ne sont pas spécifiques à METABOLHEAT, mais relèvent de la nature même des systèmes énergétiques complexes et des sources disponibles. L'enjeu méthodologique consiste donc à **identifier explicitement ces lacunes**, à les **documenter**, et à adopter des **méthodes de reconstitution cohérentes et traçables**.

3.4.1. Typologie des valeurs manquantes

Les valeurs manquantes identifiées dans les sources mobilisées relèvent principalement de deux catégories :

1. **Absence de données sur l'énergie utile**

Les bilans énergétiques institutionnels (SDES, Eurostat, AIE) s'arrêtent généralement à l'énergie finale. Les flux d'énergie utile et les pertes associées aux usages finaux ne sont pas mesurés directement et doivent être **estimés** à partir de rendements ou de ratios.

2. **Manque d'information sur les flux thermiques et les pertes**

Les rejets thermiques issus des conversions (centrales, procédés industriels, moteurs thermiques) sont rarement explicités, ou seulement de manière agrégée, sans distinction par niveau de température.

3.4.2. Méthodes de reconstitution et d'estimation

Pour pallier ces lacunes, plusieurs méthodes complémentaires ont été mobilisées :

- **Recours aux bases technico-économiques européennes** (JRC, ODYSSEE-MURE) pour estimer des rendements moyens par secteur, usage ou technologie lorsque les données nationales faisaient défaut : ce sont même les données énergétiques détaillées estimées par le JRC pour la France qui ont été directement intégrées au modèle.
- **Utilisation de ratios issus de la littérature scientifique**, notamment ceux proposés par Forman et al. pour les conversions énergie finale → énergie utile absentes des travaux du JRC ainsi que l'estimation des pertes par forme de rejet (liquide, gazeux, diffus) et par niveau de température.

- **Cohérence ascendante et descendante des bilans** : toute estimation est contrainte par le respect du principe de conservation de l'énergie, garantissant que la somme des flux utiles et des pertes égale l'énergie finale correspondante.

Ces méthodes permettent de produire une **reconstruction complète et cohérente** des flux, tout en conservant une distinction claire entre données observées et données estimées.

3.4.3. Gestion des incertitudes

Les incertitudes associées aux données et aux estimations proviennent principalement :

- des **incertitudes statistiques** des bilans énergétiques (erreurs d'enquête, redressements, arrondis) ;
- des **hypothèses de rendement** utilisées pour estimer l'énergie utile ;
- de la **variabilité réelle des usages et des technologies**, masquée par l'utilisation de valeurs moyennes.

Dans ce rapport, les incertitudes ne sont pas quantifiées sous forme d'intervalles statistiques explicites. En revanche, elles sont **traitées qualitativement**, par :

- la **documentation systématique des hypothèses** retenues ;
- l'identification des flux les plus sensibles aux hypothèses (en particulier les flux très détaillés) ;
- la distinction explicite entre flux issus de données directes et flux reconstruits.

Ce choix est cohérent avec l'objectif principal du projet à ce stade : fournir une **représentation structurante et lisible** des flux énergétiques et thermiques, plutôt qu'une analyse probabiliste détaillée.

3.4.4. Implications pour l'interprétation des résultats

Les résultats présentés dans la suite du rapport doivent être interprétés à la lumière de ces choix méthodologiques. En particulier :

- les ordres de grandeur des flux sont robustes à l'échelle nationale ;
- les répartitions sectorielles et par usage sont dépendantes des hypothèses de désagrégation ;
- les flux thermiques (notamment la chaleur fatale) doivent être compris comme des **estimations informées**, destinées à éclairer les dynamiques du système plutôt qu'à fournir des valeurs exactes au sens métrologique.

Cette transparence méthodologique constitue une condition essentielle pour la **reproductibilité**, la **discussion scientifique** et l'extension future du modèle METABOLHEAT à d'autres échelles territoriales.

3.5. Schéma final du modèle de données METABOLHEAT

À l'issue de l'analyse comparative des sources, de leurs périmètres, de leurs échelles et des méthodes de traitement des valeurs manquantes, un **modèle de données cible** a été défini pour le projet METABOLHEAT. Ce modèle vise à structurer de manière cohérente l'ensemble des informations nécessaires à la **quantification** et à la **représentation des flux énergétiques et thermiques**, tout en garantissant la traçabilité des hypothèses et des sources mobilisées.

3.5.1. Principes généraux du modèle de données

Le modèle de données METABOLHEAT repose sur les principes suivants :

- **Centralité des flux** : l'unité fondamentale du modèle est le *flux énergétique*, caractérisé par une origine, une destination, une forme d'énergie et une quantité.
- **Compatibilité multi-sources** : le modèle permet d'intégrer des données issues de sources hétérogènes (statistiques officielles, bases européennes, travaux académiques).
- **Adaptabilité à d'autres échelles** : bien que construit ici à l'échelle nationale, le modèle est conçu pour être déclinable à des échelles territoriales plus fines.

3.5.2. Structure logique du modèle

Le modèle s'organise autour de plusieurs **tables conceptuelles** (ou dimensions), reliées entre elles par des identifiants communs.

a) Table des flux énergétiques (table centrale)

Chaque enregistrement correspond à un flux énergétique élémentaire et comprend notamment :

- origine et destination du flux,
- type de flux (énergie, chaleur, froid),
- niveau de température (lorsqu'il s'agit d'un flux thermique),
- quantité d'énergie (en PJ),
- source de données et méthode d'estimation,
- année de référence,
- territoire de référence.

Cette table constitue le **noyau** du modèle METABOLHEAT.

b) Dimensions sectorielles et d'usages

Les flux sont associés à plusieurs niveaux de description fonctionnelle, par la hiérarchisation des nœuds :

- **secteur** (résidentiel, tertiaire, industrie, transports, agriculture),
- **sous-secteur** (ex. industrie agroalimentaire, transport routier de voyageurs),
- **usage énergétique** (chauffage, eau chaude sanitaire, propulsion, cuisson, climatisation, etc.),
- **machine ou technologie** (lorsque l'information est disponible ou reconstruite).

Cette structuration permet de naviguer du niveau macro (bilan national) vers des niveaux plus fins, utiles pour l'analyse des flux thermiques.

c) Dimension produits et vecteurs énergétiques

Chaque flux est associé à un **produit énergétique** ou à une **forme d'énergie**, parmi lesquels :

- ressources primaires (pétrole brut, gaz naturel, uranium, biomasse, énergies renouvelables),
- produits finaux (électricité, carburants, chaleur de réseau),
- énergie utile (chaleur utile, travail mécanique, froid utile),
- pertes énergétiques (chaleur fatale, dissipation).

Cette dimension garantit la cohérence entre les bilans énergétiques classiques et la représentation élargie des flux thermiques.

Les flux sont également associés à plusieurs niveaux de description du vecteur énergétique, par la hiérarchisation des nœuds :

- stade énergétique (énergie primaire, finale, utile),
- type d'énergie (énergies fossiles, énergies renouvelables),

- groupes de produits énergétiques (produits pétroliers, produits du charbon, énergie marine, déchets, chaleur),
- produits énergétiques détaillés (fioul, kérosène, biogaz, solaire photovoltaïque),
- niveaux de température (pour la chaleur utile et la chaleur fatale).

d) Dimensions temporelle et géographique

Dans la dernière version du modèle :

- la **dimension temporelle** correspond à 2021 (l'année la plus récente et complète) ;
- la **dimension géographique** correspond à la France entière.

Ces dimensions sont néanmoins explicitement intégrées dans le modèle afin de permettre des extensions ultérieures (comparaisons temporelles ou déclinaisons territoriales).

3.5.3. Articulation avec les diagrammes de flux

Le schéma de données est conçu pour alimenter directement les **représentations de type Sankey**, par l'intermédiaire de l'application web OpenSankey. Chaque flux de la table centrale correspond à un lien entre deux nœuds définis par :

- un secteur ou usage,
- un produit énergétique.

Cette correspondance directe entre structure de données et représentation graphique garantit la **reproductibilité des diagrammes** et facilite la génération de visualisations alternatives (par secteur, par usage, par niveau de température, etc.).

3.5.4. Statut du modèle et évolutivité

Le modèle de données METABOLHEAT doit être compris comme un **modèle évolutif** :

- une première version est construite à partir des meilleures données disponibles (Brockway dans la 1^{ère} version et JRC dans la 2^{nde} version) ;
- des versions ultérieures pourront intégrer des données plus récentes, une profondeur temporelle accrue ou une désagrégation territoriale plus fine ;
- chaque évolution du modèle pourra être documentée sans remettre en cause la structure générale.

Cette approche garantit à la fois la **robustesse scientifique** du modèle et sa capacité à accompagner les développements futurs du projet.

La section 3 a permis de définir les **sources**, les **périmètres**, les **échelles** et la **structure du modèle de données**. La section suivante détaille désormais la **méthodologie de quantification des flux énergétiques et thermiques**, c'est-à-dire la manière dont les données structurées sont mobilisées pour calculer les flux, estimer les pertes et construire les bilans représentés dans les diagrammes de flux.

4. Méthodologie de quantification des flux énergétiques

4.1. Structure conceptuelle des flux énergétiques et thermiques

La quantification des flux dans METABOLHEAT repose sur une représentation systémique du fonctionnement énergétique national. Cette représentation vise à décrire de manière cohérente l'ensemble des transformations de l'énergie, depuis les ressources primaires jusqu'aux usages

finaux, en mettant un accent particulier sur la formation, la circulation et la dissipation des flux thermiques.

4.1.1. Principe général de la chaîne énergétique

Le système énergétique est modélisé comme une **chaîne de transformations successives**, structurée autour des trois stades de l'énergie définis précédemment :

Énergie primaire → Énergie finale + Pertes → Énergie utile + Pertes

Cette chaîne est complétée par l'identification explicite des **flux thermiques** associés à chaque étape, qu'ils soient :

- produits intentionnellement (chaleur utile),
- récupérés dans l'environnement (chaleur primaire via pompes à chaleur),
- ou dissipés (chaleur fatale).

L'objectif est de rendre visible l'ensemble des transformations énergétiques, y compris celles qui restent habituellement implicites dans les bilans classiques.

4.1.2. Typologie des flux représentés

Dans METABOLHEAT, chaque flux est classé selon une typologie unifiée permettant une lecture croisée énergétique et thermique.

a) Flux d'énergie primaire

Ils correspondent à l'énergie contenue dans les ressources avant transformation (pétrole brut, gaz naturel, uranium, biomasse, flux renouvelables captés). Ces flux constituent les **entrées du système national**.

b) Flux d'énergie finale

Ils représentent l'énergie livrée aux secteurs utilisateurs après transformation et distribution (électricité, carburants, chaleur de réseau, combustibles). Ce niveau correspond au **point d'observation principal** des statistiques énergétiques conventionnelles.

c) Flux d'énergie utile

Ils décrivent l'énergie effectivement convertie en **service énergétique** au niveau des usages : chauffage des locaux, eau chaude sanitaire, propulsion mécanique, froid utile, chaleur de procédé, etc.
Cette couche est **reconstruite** dans METABOLHEAT à partir des données disponibles et de rendements technologiques.

d) Flux de pertes énergétiques

Les pertes sont représentées explicitement et comprennent :

- pertes de conversion (centrales, raffinage, moteurs),
- pertes de transport et distribution,
- pertes à l'usage,
- **chaleur fatale** rejetée dans l'environnement.

Cette explicitation constitue un élément structurant du modèle.

4.1.3. Position spécifique des flux thermiques

L'un des apports centraux de METABOLHEAT est la mise en visibilité des flux thermiques, qui interviennent à plusieurs niveaux du système :

- **chaleur primaire** : énergie thermique prélevée dans l'environnement (pompes à chaleur, machines frigorifiques) ;
- **chaleur finale** : chaleur distribuée par vecteur organisé (réseaux de chaleur ou de froid) ;
- **chaleur utile** : chaleur effectivement reçue au point d'usage ;
- **chaleur fatale** : chaleur dissipée lors des conversions énergétiques.

Ces flux sont traités comme des **flux énergétiques à part entière**, et non comme de simples résidus.

4.1.4. Articulation énergie – exergie

La structure conceptuelle permet une double lecture :

- une lecture **énergétique** (quantités en PJ),
- une lecture **exergétique** (qualité thermodynamique des flux).

Cette articulation est particulièrement déterminante pour les flux thermiques, dont la valorisation dépend fortement du niveau de température. Lorsque l'information est disponible ou reconstruite, les flux thermiques sont donc associés à une **classe de température**, permettant leur évaluation exergétique.

4.1.5. Niveaux de modélisation

Le système est représenté de manière hiérarchique, selon les niveaux de détail disponibles dans les jeux de données, permettant de contenir les données sur 3 principaux niveaux imbriqués :

- **niveau macro** : bilan énergétique national par grands vecteurs et secteurs ;
- **niveau méso** : désagrégation par usages énergétiques ;
- **niveau micro (lorsque disponible)** : technologies ou machines spécifiques.

Cette structuration garantit la cohérence entre la vision globale (nécessaire aux Sankey nationaux) et les analyses plus fines des flux thermiques.

La structure conceptuelle présentée ci-dessus définit le cadre commun de quantification. Sa mise en œuvre opérationnelle repose toutefois sur l'assemblage de jeux de données hétérogènes. La section suivante décrit la construction de **deux configurations du modèle METABOLHEAT**, respectivement fondées sur l'approche de Brockway et sur celle du JRC, représentant deux étapes distinctes dans la conception du modèle national.

4.2. Assemblage des jeux de données et définition de deux configurations du modèle (Brockway et JRC)

La mise en œuvre opérationnelle de la structure conceptuelle présentée en section 4.1 repose sur l'assemblage de jeux de données issus de sources hétérogènes. Compte tenu des différences de périmètre, de granularité et de conventions méthodologiques entre ces sources, une stratégie d'intégration progressive a été adoptée. Elle a conduit à la construction de **deux configurations successives du modèle national METABOLHEAT**, respectivement fondées sur la base CL-PFU (Brockway et al.) puis sur la base JRC-IDEES.

4.2.1. Méthodologie d'assemblage des jeux de données

Les jeux de données bruts issus des différentes sources ont été centralisés dans un **environnement de travail commun (fichier Excel structuré)**. Afin de préserver l'intégrité des données d'origine et d'assurer la traçabilité complète des traitements, **aucune modification directe des fichiers sources n'a été réalisée**.

L'harmonisation repose sur la construction d'une **table de correspondance hiérarchisée des flux**, permettant de relier entre eux des jeux de données utilisant des nomenclatures différentes (produits énergétiques, procédés de transformation, usages, technologies). Cette table joue un rôle pivot en assurant :

- la correspondance entre périmètres hétérogènes ;
- la compatibilité entre niveaux de détail différents ;
- la possibilité d'agrégation ou de désagrégation contrôlée des flux.

Cette architecture présente plusieurs avantages méthodologiques majeurs :

- **traçabilité totale** entre la donnée collectée et les résultats du modèle ;
- **modularité**, permettant d'intégrer de nouvelles sources sans restructurer l'ensemble ;
- **cohérence globale des bilans**, garantie par les procédures de vérification (cf. section 4.6) ;
- **flexibilité de restitution**, le modèle pouvant produire des résultats à tout niveau de détail disponible dans les sources.

Cette approche constitue le socle commun aux deux versions successives du modèle national.

4.2.2. Première configuration du modèle national : approche basée sur Brockway

a) Présentation de la base CL-PFU

La première phase du projet s'est appuyée sur la base **CL-PFU (Country-Level Primary-Final-Useful)** développée par Brockway et al. dans l'article :

Brockway, P. et al., "A country-level primary-final-useful (CL-PFU) energy and exergy database: overview of its construction and 1971–2020 world-level efficiency results".

Cette base constitue une référence académique majeure, visant à reconstruire de manière cohérente les chaînes énergétiques nationales en intégrant explicitement les trois stades de l'énergie ainsi que l'exergie associée.

b) Intérêts pour METABOLHEAT

La base CL-PFU présente plusieurs atouts déterminants :

- **Séries longues** : couverture temporelle 1971–2020
- **Chaîne énergétique complète** : énergie primaire, finale et utile
- **Quantification exergétique** des flux
- **Granularité technologique élevée**, notamment au niveau des machines

Niveau de détail de la base CL-PFU :

- ~50 énergies primaires et finales
- ~30 formes d'énergie utile
- ~20 secteurs de transformation
- ~90 machines (niveau utile)
- ~50 années

Le niveau machine distingue notamment :

- le type d'énergie utile produite (propulsion par mode, chaleur par niveau de température, etc.) ;
- la source d'énergie finale ;
- le type d'usage (industriel, commercial, etc.).

Ces caractéristiques rendaient la base particulièrement attractive pour une première implémentation de METABOLHEAT.

c) Limites

- dernière année relativement éloignée + année COVID (2020) ;
- pertes non explicites ;
- pas de niveau d'agrégation intermédiaire par **usage** ;
- accès limité.

d) Construction du modèle France 2020

Le premier modèle national a été construit en se basant **quasi intégralement** sur CL-PFU pour les quantités d'énergie et d'exergie en France, en se limitant à l'année **2020** pour des raisons de complexité computationnelle.

Les **flux de chaleur fatale**, absents de CL-PFU, ont été reconstruits par bilan input-output puis qualifiés à l'aide des travaux de :

Forman, C. et al., "Estimating the global waste heat potential".

Les coefficients de répartition par type de rejet (gazeux, liquide, diffus) et par niveau de température ont été repris de Forman et appliqués aux pertes calculées.

4.2.3. Problèmes de cohérence identifiés dans la base CL-PFU

Malgré ses qualités, l'analyse de cohérence avec les statistiques nationales françaises (SDES) a révélé plusieurs écarts significatifs, notamment dans le secteur résidentiel.

Les comparaisons ont mis en évidence que, dans CL-PFU (par rapport au SDES) :

- 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-eau 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.

Ces écarts ont été discutés avec les auteurs de la base (Paul Brockway et Matthew Heun). Il ressort que CL-PFU s'appuie sur les **allocations par usage du JRC disponibles lors de sa construction (édition 2015)**. Or, une **mise à jour majeure du JRC est intervenue en 2021**, révélant des différences importantes.

Les anomalies observées pour 2020 proviennent vraisemblablement :

- soit de l'utilisation des allocations JRC 2015 désormais obsolètes ;
- soit de l'usage d'allocations mondiales moyennes pour la France après 2015.

Compte tenu de l'ampleur des écarts pour l'interprétation des résultats METABOLHEAT, il a été décidé de développer une seconde configuration du modèle.

4.2.4. Seconde configuration du modèle : approche basée sur JRC-IDEES

a) Présentation de la base JRC-IDEES

La seconde version du modèle s'appuie principalement sur la base :

JRC-IDEES-2021: the Integrated Database of the European Energy System.

Cette base européenne fournit des bilans énergétiques sectoriels détaillés pour les États membres et va jusqu'à estimer des allocations de consommation d'énergie finale par machine en cohérence avec les consommations d'énergie finales par usage nationales.

b) Intérêts pour METABOLHEAT

Principaux atouts :

- bilan énergétique quasi complet ;
- dernière année plus récente (**2021**) ;
- **meilleure cohérence avec les données SDES** ;
- niveau d'agrégation intermédiaire par **usage** ;
- accès libre.

c) Limites

- séries longues limitées (\approx depuis 2000) ;
- énergie utile partielle ;
- pas d'exergie ;
- pertes non explicites.

d) Construction du modèle 2021

Le modèle a été reconstruit secteur par secteur à partir de JRC-IDEES, puis complété par :

- **Forman et al.** pour les rendements finale \rightarrow utile manquants ;
- **CL-PFU** pour la qualification des formes d'énergie utile ;
- **Forman** pour la répartition des chaleurs fatales.

Pour des raisons de taille, le modèle reste mono-année (2021).

L'empreinte exergetique a été abandonnée dans cette version afin de simplifier le modèle, tout en conservant une lecture qualitative des flux thermiques via les niveaux de température.

4.2.5. Synthèse comparative des deux configurations

La comparaison des deux versions met en évidence une complémentarité forte mais aussi des arbitrages méthodologiques.

Tableau 7 : Comparaison des deux versions du modèle national

| Critère | Version Brockway | Version JRC |
|---------------------|------------------|-------------|
| Source principale | CL-PFU | JRC-IDEES |
| Année | 2020 | 2021 |
| Analyse exergetique | Oui | Non |
| Stades energie | Complets | Complets |
| Détail pertes | Oui | Oui |
| Niveau macro | Oui | Oui |
| Niveau méso (usage) | Non | Oui |

| Critère | Version Brockway | Version JRC |
|-------------------------|------------------|-------------|
| Niveau micro (machine) | Oui | Oui |
| Cohérence SDES | Non | Oui |
| Données confidentielles | Oui | Non |

En synthèse :

- la version **Brockway** est plus riche thermodynamiquement et technologiquement ;
- la version **JRC** est plus cohérente avec les statistiques nationales et les usages ;
- le choix entre les deux dépend de l'objectif analytique (exergie vs cohérence nationale).

4.3. Quantification des énergies utiles et des flux thermiques

La construction du modèle METABOLHEAT nécessite de compléter les bases de données existantes afin d'obtenir une représentation cohérente de l'ensemble de la chaîne énergétique, depuis les ressources primaires jusqu'aux usages finaux, tout en identifiant explicitement les pertes thermiques associées aux processus de conversion. Cette section décrit les méthodes utilisées pour identifier et quantifier les **énergies utiles**, estimer les **flux thermiques fatals**, et compléter les bilans énergétiques en intégrant les flux thermodynamiques non explicités dans les statistiques conventionnelles.

4.3.1. Identification et estimation des énergies utiles

Dans la base de données **JRC-IDEES**, les quantités d'énergie utile sont directement quantifiées pour certains usages thermiques, notamment :

- chauffage,
- climatisation,
- eau chaude sanitaire,
- cuisson,

et ce pour l'ensemble des secteurs économiques. De plus, les productions d'énergie utile sont également estimées pour un grand nombre de **machines industrielles**, ce qui permet d'obtenir une représentation relativement détaillée des transformations finales d'énergie.

Cependant, certaines catégories d'usages spécifiques ne sont pas explicitement quantifiées dans IDEES, notamment :

- les usages de **transport**,
- certains usages électriques spécifiques (éclairage, multimédia, ventilation, etc.),
- certains équipements particuliers.

Afin de compléter ces informations, les **rendements par machine estimés par Forman et al.** dans l'article :

Forman, C. et al., "Estimating the global waste heat potential"

ont été mobilisés. Cela a nécessité d'établir une **correspondance directe entre les machines décrites dans la base IDEES et celles utilisées dans les travaux de Forman**, permettant ainsi d'estimer les productions d'énergie utile correspondantes.

Par ailleurs, même lorsque l'énergie utile est explicitement quantifiée dans IDEES, celle-ci n'est généralement pas caractérisée de manière suffisamment détaillée. Il a donc été nécessaire de qualifier les flux d'énergie utile selon :

- leur **type d'énergie** (chaleur, froid, propulsion, énergie mécanique, etc.),
- et, pour les flux thermiques, leur **niveau de température**.

Pour cela, la base **CL-PFU** développée par Brockway et al. a été mobilisée. Les caractéristiques des énergies utiles ont été attribuées **par analogie entre les machines décrites dans IDEES et**

celles présentes dans CL-PFU, ce qui a nécessité la construction d'une seconde table de correspondance entre ces deux bases.

Ces deux étapes successives ont permis :

- d'estimer les productions d'énergie utile manquantes,
- de qualifier les flux d'énergie utile par type et par niveau de température,
- et d'obtenir un **bilan énergétique complet aux trois stades de l'énergie : primaire, finale et utile.**

4.3.2. Identification et estimation des flux thermiques fatals

Les bases de données CL-PFU et JRC-IDEES ne fournissent pas directement les flux de pertes thermiques associés aux processus de conversion énergétique. Afin de compléter ces informations, les pertes ont été estimées par **bilan entrée-sortie** pour chaque processus énergétique.

Concrètement, pour chaque processus de transformation, les pertes thermiques ont été calculées comme la différence entre :

- l'énergie entrant dans le processus,
- et la somme des flux d'énergie utiles et d'énergie finale produits.

Une fois ces pertes totales estimées, leur **répartition par type de rejet et par niveau de température** a été réalisée en s'appuyant sur les travaux de Forman et al., qui proposent des coefficients de ventilation des pertes thermiques pour différents types de processus énergétiques.

Les pertes thermiques ont ainsi été réparties selon trois catégories principales :

- **rejets diffus**, associés à des pertes thermiques non captables ou difficilement localisables ;
- **rejets liquides**, généralement à basse température (inférieure à 100 °C) ;
- **rejets gazeux**, généralement à température plus élevée (supérieure ou égale à 100 °C) ;

avec pour chacun (hormis les rejets diffus) une estimation du niveau de température précis (ex : 35 °C, 120°C, etc.).

Remarque : un même process peut même avoir plusieurs rejets liquides ou gazeux à différentes températures (ex : 80% de rejet liquide à 30 °C + 20 % de rejet liquide à 85 °C).

Cette ventilation nécessite également d'établir une correspondance entre :

- les processus énergétiques décrits dans les bases **IDEES** et **CL-PFU**,
- et les processus de conversion étudiés par **Forman**.

La structure générale d'un processus de conversion énergétique tel que modélisé dans les travaux de Forman est illustrée ci-dessous.

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

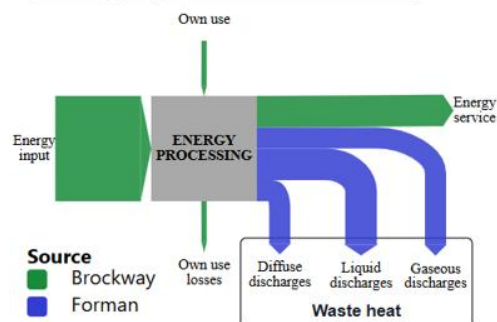


Figure 5 : Illustration d'un processus de conversion d'énergie et des flux thermiques associés (d'après Forman et al.)

Ce traitement permet d'obtenir une base de données décrivant non seulement les flux énergétiques aux trois stades de l'énergie, mais également une **caractérisation détaillée des pertes thermiques issues des processus de conversion**.

4.3.3. Hypothèses thermodynamiques et justification des approximations

Les bases de données énergétiques traditionnelles, qu'il s'agisse de CL-PFU, IDEES ou des bilans de l'Agence internationale de l'énergie (IEA), ne décrivent pas toujours l'ensemble des flux énergétiques impliqués dans certains systèmes thermodynamiques tels que :

- les **pompes à chaleur**,
- les **climatiseurs**,
- les **systèmes frigorifiques**.

Dans ces bases, seuls deux flux sont généralement explicitement représentés :

- l'énergie finale consommée (par exemple l'électricité),
- et l'énergie utile produite (chaleur ou froid).

Cependant, dans ces systèmes, les coefficients de performance (COP pour la production de chaleur) ou d'efficacité énergétique (EER pour la production de froid) sont généralement **supérieurs à 1**, ce qui signifie que la quantité d'énergie utile produite est supérieure à l'énergie finale consommée. Cette situation est physiquement possible car ces systèmes exploitent également une **énergie thermique prélevée dans l'environnement**.

La figure suivante illustre cette situation dans le cas d'un climatiseur.

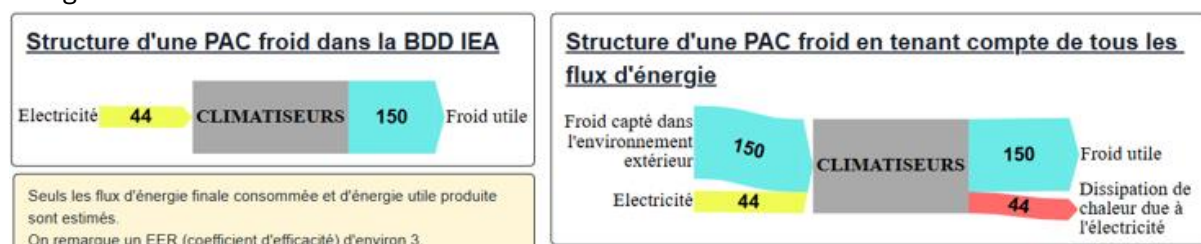


Figure 6 : Exemple de représentation d'un système thermodynamique (climatiseur) et des flux énergétiques associés

Dans la représentation classique des bilans énergétiques (schéma de gauche), seuls l'électricité consommée et le froid produit sont comptabilisés. Le bilan entrée-sortie semble donc incohérent si l'on ne considère que ces flux.

En réalité, deux flux supplémentaires doivent être pris en compte :

1. le **flux thermique extrait de l'environnement extérieur**, qui constitue la source du froid produit ;
2. la **chaleur dissipée dans l'environnement**, résultant de la conversion de l'électricité consommée.

En intégrant ces flux, le bilan énergétique du système redevient cohérent, comme illustré dans le schéma de droite.

Dans le modèle METABOLHEAT, ces flux ont donc été explicitement ajoutés pour les systèmes thermodynamiques :

- pour les systèmes de **production de chaleur** (pompes à chaleur), la chaleur ambiante prélevée dans l'environnement est déjà quantifiée dans IDEES ; la chaleur issue de l'électricité consommée contribue également au service thermique produit ;
- pour les systèmes de **production de froid**, ces flux ne sont généralement pas quantifiés et ont donc été ajoutés explicitement dans le modèle.

Enfin, pour les systèmes frigorifiques de **réfrigération** (notamment dans les secteurs résidentiel et tertiaire), aucune production d'énergie utile n'est fournie dans la base IDEES. Dans ce cas, un

coefficient d'efficacité moyen de 3 a été retenu afin d'estimer les flux d'énergie utile correspondants.

Ces hypothèses permettent de garantir la **cohérence thermodynamique globale du modèle**, tout en restant compatibles avec les données disponibles dans les bases statistiques existantes.

4.4. Procédures de vérification et de validation

La construction du modèle énergétique national METABOLHEAT repose sur l'assemblage de jeux de données multiples, la reconstruction de flux manquants et l'introduction d'hypothèses thermodynamiques complémentaires. Dans ce contexte, il est indispensable de mettre en œuvre des **procédures de vérification et de validation** afin de garantir la cohérence interne du modèle et la robustesse des résultats obtenus.

Ces procédures reposent sur trois niveaux complémentaires : la **cohérence des bilans énergétiques**, la **comparaison avec les statistiques nationales de référence**, et la **validation structurelle du modèle**.

4.4.1. Vérification de la cohérence des bilans énergétiques

La première étape de validation consiste à vérifier que les **principes fondamentaux de conservation de l'énergie** sont respectés dans l'ensemble du modèle.

Pour chaque processus énergétique, les flux doivent vérifier la relation générale :

$$\text{Énergie consommée} = \text{Énergie produite} + \text{Pertes}$$

Un processus peut produire soit de l'**énergie finale** (par exemple une centrale électrique produisant de l'électricité), soit de l'**énergie utile** (par exemple une chaudière produisant de la chaleur utile).

Cette vérification est appliquée :

- à chaque **processus de transformation énergétique** (raffinage, centrales électriques, etc.) ;
- ainsi qu'à chaque **machine ou technologie finale** (moteurs, chaudières, pompes à chaleur, etc.).

Les bilans entrée-sortie sont également vérifiés sur chaque produit énergétique (fioul, gaz, électricité, etc.).

La vérification des bilans énergétiques est réalisée à l'aide de l'outil **OpenSankey**, qui permet de représenter le système énergétique sous forme de réseau de flux et de contrôler automatiquement les équilibres énergétiques.

Dans cet outil, chaque **nœud** représente un produit énergétique, un processus de transformation ou un usage. Le logiciel calcule automatiquement la différence entre les flux entrants et sortants. Lorsque cette différence est nulle, aucune correction n'est nécessaire : on parle alors d'**absence de réconciliation**.

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.

4.4.2. Comparaison avec les statistiques énergétiques nationales

La seconde étape de validation consiste à confronter les résultats du modèle aux **statistiques énergétiques officielles**, en particulier celles publiées par le **Service des données et études statistiques (SDES)**.

Cette comparaison est réalisée pour plusieurs niveaux d'agrégation :

- consommation d'énergie finale par **secteur** ;
- consommation d'énergie finale par **vecteur énergétique** ;
- consommation par **usage énergétique**, lorsque ces données sont disponibles.

Cette étape permet d'identifier d'éventuels écarts entre le modèle et les statistiques nationales. Lorsque des différences significatives sont observées, une analyse détaillée est réalisée afin d'en identifier l'origine. Ces écarts peuvent provenir :

- de différences de périmètre ou de convention entre les bases de données ;
- d'hypothèses de rendement technologique ;
- de la désagrégation des usages énergétiques.

Dans le cadre du projet METABOLHEAT, cette procédure de validation a notamment permis d'identifier les incohérences de la base CL-PFU pour certains usages du secteur résidentiel, ce qui a conduit à la construction de la seconde version du modèle basée sur les données JRC-IDEES.

4.4.3. Validation structurelle du modèle

Enfin, une validation structurelle est réalisée afin de vérifier la cohérence globale du modèle énergétique construit.

Cette validation porte notamment sur :

- la **continuité de la chaîne énergétique** entre énergie primaire, énergie finale et énergie utile ;
- la cohérence des **correspondances entre bases de données** (IDEES, CL-PFU, Forman) ;
- la cohérence des **tables de correspondance utilisées pour relier les nomenclatures** des différentes sources.

L'outil **OpenSankey** permet également de vérifier la **cohérence hiérarchique des nomenclatures** utilisées dans le modèle. Les produits énergétiques et les processus étant organisés selon des structures hiérarchiques (par exemple : produits énergétiques agrégés → sous-produits → produits détaillés), le logiciel s'assure automatiquement que les agrégations soient cohérentes et que les flux soient correctement répartis entre les différents niveaux.

Cette fonctionnalité a notamment permis de **contrôler la cohérence des correspondances de nomenclature établies entre les différentes bases de données** utilisées dans METABOLHEAT. L'architecture du modèle, fondée sur une table de correspondance hiérarchisée des flux, permet ainsi de garantir que :

- chaque flux énergétique possède une origine et une destination cohérentes ;
- aucune énergie n'est créée ou détruite dans le système ;
- les agrégations sectorielles et technologiques sont consistantes à tous les niveaux d'analyse.

Cette structure modulaire permet également d'intégrer de nouvelles sources de données ou de modifier certaines hypothèses sans compromettre la cohérence globale du modèle.

4.4.4. Limites de la validation

Malgré ces procédures de contrôle, certaines incertitudes sur les résultats demeurent. Elles sont principalement liées :

- à la reconstruction de l'énergie utile pour certains usages ;
- aux hypothèses de rendement utilisées pour certaines technologies ;
- à la ventilation des pertes thermiques par niveau de température.

Ces limites sont toutefois inhérentes à la nature des données énergétiques disponibles et sont explicitement documentées dans le modèle.

Les sections précédentes ont permis de décrire successivement :

- la **structure conceptuelle du modèle énergétique** ;
- l'**assemblage des jeux de données** issus de différentes sources ;
- les **méthodes de quantification des flux énergétiques et thermiques** ;
- et les **procédures de vérification garantissant la cohérence du modèle**.

Ces éléments constituent le cadre méthodologique sur lequel repose l'analyse des flux énergétiques et thermiques présentée dans la suite du rapport.

5. Construction et représentation des flux énergétiques

La représentation graphique des flux énergétiques constitue un élément central de l'analyse du métabolisme énergétique national. Les visualisations permettent en effet de synthétiser des volumes importants de données, d'identifier les principales chaînes de conversion de l'énergie et de mettre en évidence les pertes thermiques associées aux différents processus.

Dans le cadre du projet METABOLHEAT, plusieurs types de diagrammes ont été utilisés afin de représenter les résultats du modèle énergétique :

- **diagrammes de flux de type Sankey**, permettant de représenter la structure complète du système énergétique ;
- **diagrammes en barres (histogrammes)**, utilisés pour comparer les contributions de différents secteurs ou usages ;
- **diagrammes circulaires**, permettant d'illustrer la répartition relative de certaines catégories de flux.

La présente section décrit la méthodologie de construction de ces visualisations.

5.1. Choix du diagramme de Sankey pour la représentation des flux énergétiques

Les diagrammes de Sankey constituent un outil de visualisation particulièrement adapté à la représentation des systèmes énergétiques. Dans ce type de diagramme, l'épaisseur des flux est proportionnelle à la quantité d'énergie qu'ils représentent, ce qui permet de visualiser simultanément :

- les sources d'énergie,
- les transformations énergétiques,
- les usages finaux,
- et les pertes associées.

Ce type de représentation est largement utilisé dans l'analyse des systèmes énergétiques. On le retrouve notamment dans :

- les **bilans énergétiques de la France** publiés par le **SDES** ;
- les **scénarios énergétiques** élaborés par l'association **négaWatt** ;
- les outils de visualisation des statistiques énergétiques développés par **Eurostat** ;
- les représentations des chaînes énergétiques dans les travaux de **Brockway et al.**

L'utilisation de diagrammes de Sankey dans METABOLHEAT s'inscrit donc dans une **continuité méthodologique** avec les travaux existants, tout en permettant d'intégrer des niveaux de détail supplémentaires, notamment pour les flux d'énergie utile et les pertes thermiques.

5.2. Processus de construction des diagrammes

La génération des diagrammes repose sur un processus en plusieurs étapes combinant **Excel** et le logiciel **OpenSankey**.

A. Collecte et structuration des données

L'ensemble des données collectées à partir des différentes sources est rassemblé dans un **fichier Excel unique**. Ce fichier constitue l'environnement central du modèle.

Les données y sont organisées sous forme de tables structurées décrivant :

- les flux énergétiques,
- les produits énergétiques,
- les processus de transformation,
- les usages,
- et les correspondances entre nomenclatures.

Les données sont ensuite structurées dans ce même fichier Excel afin de pouvoir être **directement lues par l'application OpenSankey**.

B. Calcul et réconciliation des flux

Le fichier Excel est ensuite chargé dans l'application **OpenSankey**. Le logiciel permet de :

- vérifier automatiquement la cohérence des bilans énergétiques ;
- effectuer la **réconciliation des flux** lorsque cela est nécessaire ;
- compléter certaines valeurs manquantes afin d'assurer l'équilibre des bilans.

Le résultat de cette étape est un **fichier Excel réconcilié**, contenant l'ensemble des flux énergétiques cohérents à tous les niveaux de détail.

C. Génération des diagrammes de Sankey

Le fichier Excel réconcilié est ensuite chargé à nouveau dans **OpenSankey**, qui permet de générer différents diagrammes de Sankey à partir des résultats du modèle.

Grâce à la structure hiérarchique des données, il est possible de produire :

- des diagrammes très agrégés représentant l'ensemble du système énergétique ;
- ou au contraire des diagrammes détaillés focalisés sur un secteur ou un usage particulier.

De plus, les options de mises en forme (couleurs, formes, positionnements, textes, etc.) sont totalement personnalisables et permettent un large éventail de représentations possibles.

D. Production d'autres types de graphiques

L'application OpenSankey ne permet actuellement de générer que des diagrammes de flux. Les autres types de visualisations utilisés dans le rapport ont donc été produits directement dans **Excel**, à partir des données issues du fichier réconcilié.

Cela concerne notamment :

- les **histogrammes**, utilisés pour comparer les contributions sectorielles ;
- les **diagrammes circulaires**, utilisés pour illustrer la répartition relative de certains flux.
- les **diagrammes courbes**, utilisés pour illustrer les évolutions temporelles des consommations d'énergie.

5.3. Hiérarchies et niveaux de détail dans les diagrammes

L'un des avantages majeurs du modèle METABOLHEAT réside dans l'utilisation de **nomenclatures hiérarchiques** permettant d'analyser les flux énergétiques à différents niveaux de détail.

Les principales dimensions hiérarchiques utilisées dans le modèle pour classer les processus sont :

- **secteur** (transport, industrie, résidentiel, etc.) ;
- **sous-secteur** ;
- **usage énergétique** ;
- **machine ou technologie** ;
- **source d'énergie**.

Cette structuration permet de représenter les flux énergétiques selon différents niveaux d'agrégation.

La figure suivante illustre cette capacité de désagrégation à partir du cas du **secteur des transports**.

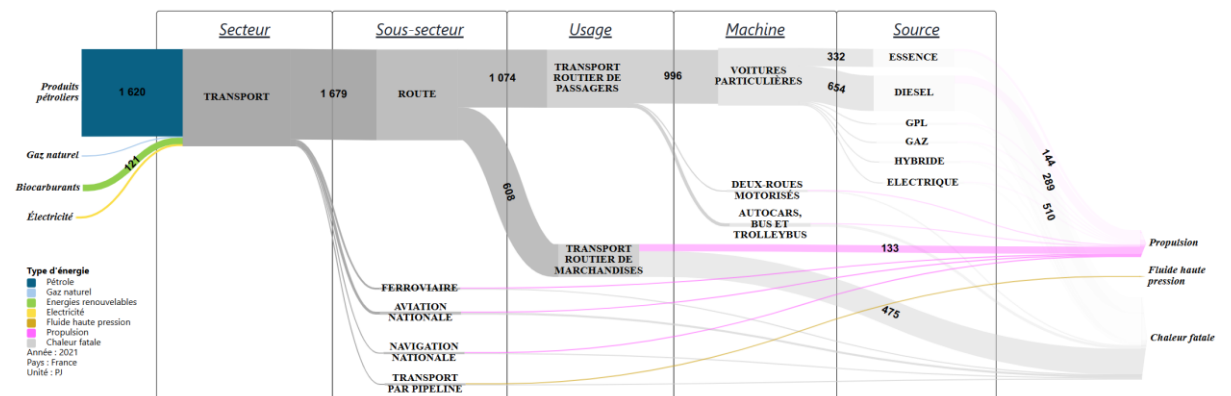


Figure 7 : Exemple de diagramme de Sankey détaillé pour le secteur des transports : branche des voitures particulières détaillée

Dans ce diagramme, les flux énergétiques sont représentés depuis les **produits énergétiques** jusqu'aux **services énergétiques**. Afin d'alléger la représentation, seule la branche concernant les voitures particulières est détaillée jusqu'au bout.

L'exemple présenté met en évidence plusieurs éléments selon le niveau de détail, avec entre autres :

- la forte dominance des **produits pétroliers** dans la consommation énergétique du transport ;
- la prédominance du **transport routier de passagers** dans l'usage de ces produits ;
- la diversité des technologies associées aux **voitures particulières** (essence, diesel, hybride, électrique, etc.).

La représentation met également en évidence les **flux d'énergie utile (propulsion)** ainsi que les **pertes thermiques** associées aux processus de conversion énergétique.

Ce type de diagramme illustre la capacité du modèle METABOLHEAT à représenter simultanément :

- la **structure sectorielle du système énergétique** ;
- la **diversité des technologies** ;
- et la **circulation des flux énergétiques** tout au long de la filière énergétique.

5.4. Conventions structurelles du modèle

La construction du modèle METABOLHEAT a nécessité l'adoption de certaines conventions structurelles concernant la représentation des flux énergétiques. Ces choix influencent la manière dont les flux sont organisés dans les diagrammes et donc la façon dont les résultats peuvent être interprétés. Deux choix méthodologiques principaux ont été retenus : la représentation de l'énergie utile dans la chaîne énergétique et la représentation des flux thermiques associés aux systèmes frigorifiques.

5.4.1. Représentation de l'énergie utile et des secteurs de consommation

Dans la première version du modèle national, basée sur la base de données **CL-PFU** (Brockway et al.), la structure retenue distinguait explicitement deux étapes successives :

1. les **machines** consommaient de l'énergie finale ;
2. ces machines produisaient ensuite de l'**énergie utile**, laquelle était modélisée comme étant **consommée par les secteurs économiques**.

Cette organisation est illustrée dans la figure suivante.

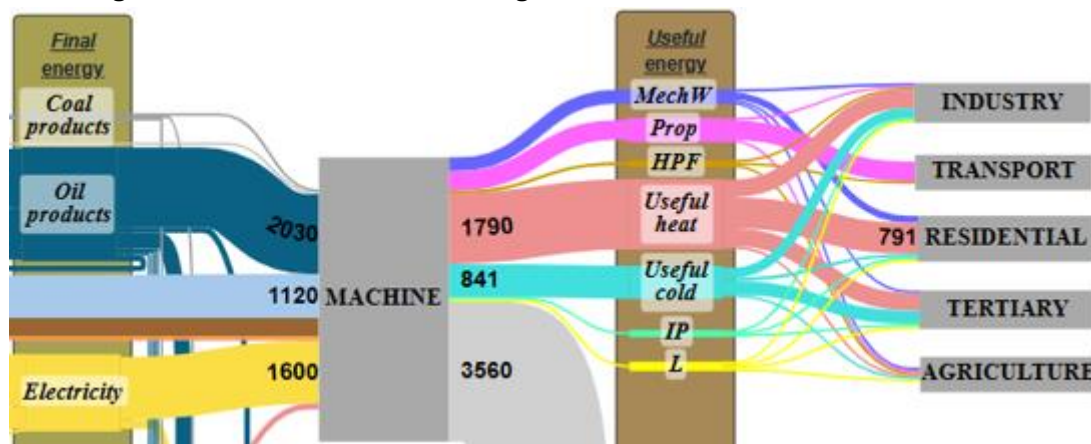


Figure 8 : Représentation de l'énergie utile dans la première version du modèle basée sur CL-PFU

Dans cette structure, l'énergie finale est transformée par les machines en différentes formes d'énergie utile (chaleur utile, propulsion, travail mécanique, etc.), lesquelles sont ensuite attribuées aux différents secteurs économiques (industrie, transport, résidentiel, tertiaire, agriculture).

Cette représentation présente l'avantage de distinguer clairement les trois stades de l'énergie (primaire, finale, utile). Toutefois, elle présente également certaines limites pour l'analyse sectorielle du système énergétique.

Tout d'abord, l'énergie utile produite par les machines est nécessairement **consommée intégralement par les secteurs**, ce qui conduit à une forme de redondance dans la représentation des flux. Ensuite, les machines n'étant pas explicitement segmentées par secteur dans la base CL-PFU (par exemple un radiateur électrique n'étant pas distingué selon qu'il appartient au secteur résidentiel ou tertiaire), l'analyse des consommations d'énergie finale par secteur devient moins directe et nécessite des estimations supplémentaires.

Dans la seconde version du modèle, basée principalement sur la base **JRC-IDEES**, une structure différente a donc été adoptée. Dans cette configuration :

- les machines sont **explicitement associées à un secteur et à un usage** ;
- la production d'énergie utile correspond directement à sa **consommation finale par le secteur**.

Ainsi, seule la **production d'énergie utile** est explicitement représentée dans la chaîne énergétique, ce qui correspond simultanément à la consommation d'énergie utile par le secteur concerné.

Cette structure présente plusieurs avantages :

- elle facilite l'analyse directe des **consommations d'énergie finale par secteur** ;
- elle permet de relier plus directement les technologies aux **usages énergétiques sectoriels** ;
- elle correspond davantage aux structures généralement utilisées dans les **bilans énergétiques nationaux**.

Ce choix structurel améliore ainsi la lisibilité du modèle et la cohérence entre les flux énergétiques, les usages et les secteurs économiques.

5.4.2. Représentation des flux thermiques des systèmes frigorifiques

La représentation des flux énergétiques associés aux systèmes frigorifiques (climatiseurs, réfrigérateurs) nécessite également certaines conventions spécifiques.

Comme décrit dans la section 4.3.3, ces systèmes reposent sur le transfert de chaleur entre un environnement et le système étudié. Les bases de données énergétiques classiques ne représentent généralement que deux flux :

- l'énergie finale consommée (souvent l'électricité) ;
- l'énergie utile produite (chaleur ou froid).

Dans le modèle METABOLHEAT, une représentation plus complète du bilan énergétique a été retenue, afin de respecter le principe de conservation de l'énergie.

La figure suivante illustre les deux représentations possibles pour un système de climatisation.

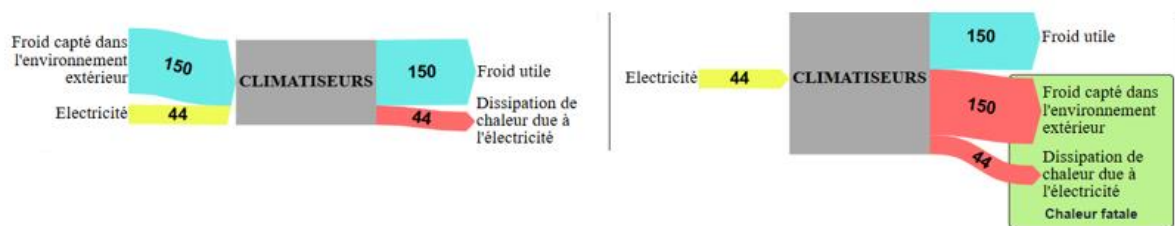


Figure 9 : Représentation des flux thermiques d'un système frigorifique

Dans la représentation retenue dans le modèle (schéma de gauche), le bilan énergétique du système est explicité en distinguant :

- l'électricité consommée ;
- le froid utile produit ;
- la chaleur dissipée dans l'environnement ;
- et le flux thermique extrait de l'environnement extérieur.

Cette représentation permet de conserver une **cohérence thermodynamique du bilan énergétique du système**.

Une représentation alternative (schéma de droite) consisterait à considérer que le flux de froid extrait de l'environnement correspond en réalité à un **flux de chaleur rejeté vers l'environnement**, ce qui permettrait de regrouper l'ensemble des rejets thermiques en sortie du processus. Cette représentation présente un intérêt particulier pour l'analyse globale des rejets thermiques du système énergétique. Cependant, puisque la représentation du **bilan énergétique des processus** est celle préférée dans le modèle METABOLHEAT afin d'illustrer la conservation de l'énergie tout au long des transformations successives (principe clé dans la quantification des pertes thermiques), le flux de froid ambiant prélevé dans l'environnement doit être interprété dans l'analyse des pollutions thermiques comme un **rejet de chaleur de faible température**

(typiquement assimilé à un rejet liquide autour de 35 °C). Par analogie, les systèmes de production de chaleur par pompe à chaleur doivent être interprétés comme produisant un **rejet de froid vers l'environnement**.

Cette convention est principalement pertinente dans l'analyse des **pollutions thermiques associées au système énergétique**, mais elle reste de moindre importance dans l'analyse du **potentiel de récupération de chaleur fatale**, ces flux étant généralement :

- à **faible température** ;
- **dispersés** dans l'espace ;
- et principalement associés aux secteurs résidentiel et tertiaire.

Ces caractéristiques limitent en pratique leur potentiel de valorisation énergétique.

5.5. Conventions graphiques

Afin d'assurer la lisibilité et la cohérence des diagrammes, plusieurs conventions graphiques ont été adoptées :

- **l'épaisseur des flux** est proportionnelle à la quantité d'énergie (exprimée en PJ) ;
- les **couleurs** sont utilisées pour distinguer les différents types d'énergie (produits pétroliers, gaz naturel, électricité, énergies renouvelables, etc.) ;
- les **grandes familles** de produits énergétiques ou processus sont regroupées de façon à faciliter le repérage dans le diagramme et à limiter les croisements de flux ;
- les **pertes thermiques** sont représentées vers le bas du diagramme (souvent absentes des représentations existantes du bilan énergétique).

Ces conventions permettent de faciliter la lecture des diagrammes et d'identifier rapidement les principales caractéristiques du système énergétique étudié.

Les conventions structurelles et graphiques décrites dans cette section permettent d'assurer une représentation cohérente et interprétable des flux énergétiques et thermiques dans le modèle METABOLHEAT. Elles garantissent notamment la compatibilité entre la structure du modèle de données, les principes de conservation de l'énergie et les besoins d'analyse sectorielle du système énergétique. Sur cette base méthodologique, il devient possible de produire une représentation détaillée du métabolisme énergétique national et d'analyser la circulation des flux énergétiques et thermiques à différentes échelles d'agrégation.

La partie suivante présente les **résultats issus du modèle METABOLHEAT pour la France**, en s'appuyant sur les diagrammes de flux et les indicateurs dérivés afin de caractériser la structure du système énergétique, la répartition sectorielle des usages et l'ampleur des pertes thermiques associées.

6. Résultats : métabolisme énergétique et flux thermiques en France

Les sections précédentes ont présenté le cadre conceptuel, les sources de données et les méthodes utilisées pour construire le modèle énergétique METABOLHEAT. Cette partie présente les résultats obtenus pour le cas de la France et vise à caractériser la structure du métabolisme énergétique national, depuis l'approvisionnement énergétique jusqu'aux services énergétiques effectivement rendus.

L'analyse s'appuie sur plusieurs représentations graphiques issues du modèle, en particulier des diagrammes de flux de type Sankey, qui permettent de visualiser simultanément les différentes

étapes de transformation de l'énergie ainsi que les pertes associées. L'objectif est de mettre en évidence les principaux flux énergétiques du système socio-économique, leur répartition sectorielle et l'importance des flux thermiques qui en résultent.

La présentation des résultats suit une progression logique allant de la structure globale du système énergétique vers l'analyse des usages énergétiques et, enfin, vers l'étude des flux thermiques et de la chaleur fatale. Cette approche permet de relier les transformations énergétiques observées dans la filière énergie aux besoins physiques auxquels répond le système énergétique.

6.1. Structure du métabolisme énergétique français

6.1.1. Vue d'ensemble du métabolisme énergétique

La figure 10 présente une représentation synthétique du métabolisme énergétique de la France pour l'année 2021. Ce diagramme de flux illustre les transformations successives de l'énergie depuis les ressources primaires jusqu'aux services énergétiques utiles, en distinguant les différentes étapes de la filière énergétique : approvisionnement énergétique, transformation de l'énergie et consommation finale.

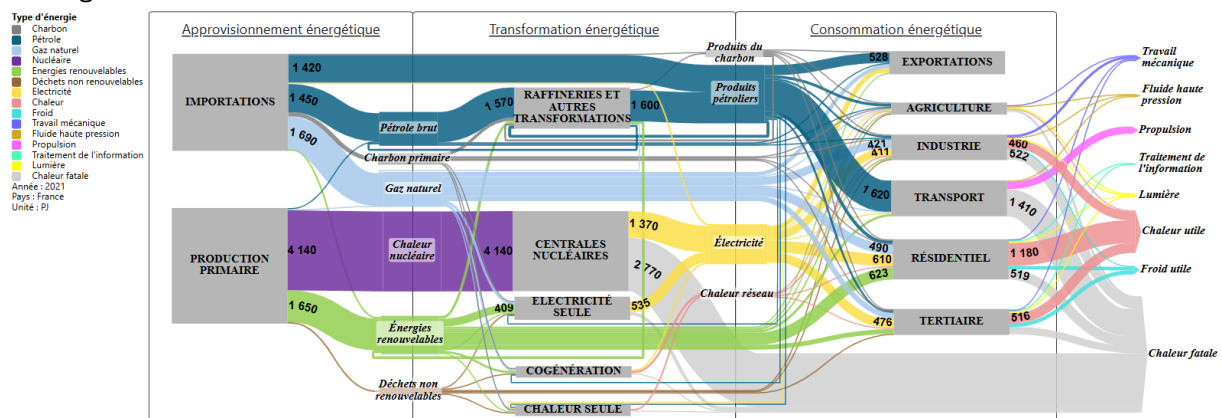


Figure 10 : Métabolisme énergétique de la France en 2021 : flux d'énergie primaire, finale et utile (modèle METABOLHEAT)

L'analyse de ce diagramme met en évidence plusieurs caractéristiques structurantes du système énergétique français. Tout d'abord, l'approvisionnement énergétique repose largement sur les importations de ressources énergétiques. Les flux entrants provenant de l'étranger représentent une part importante de l'énergie primaire disponible dans le système, notamment sous forme de pétrole brut, de gaz naturel et de charbon. La production primaire nationale est dominée par l'énergie nucléaire, qui constitue la principale source d'énergie primaire domestique.

Les ressources énergétiques primaires sont ensuite transformées au sein de différents processus énergétiques. Parmi ceux-ci, les centrales nucléaires jouent un rôle central dans la production d'électricité, tandis que les raffineries assurent la transformation du pétrole brut en produits pétroliers destinés à la consommation finale. D'autres processus, tels que la cogénération ou la production de chaleur seule, contribuent également à la conversion de l'énergie primaire en vecteurs énergétiques utilisables par les secteurs économiques.

La phase suivante correspond à la consommation énergétique des différents secteurs de l'économie. Les flux d'énergie finale sont dirigés vers cinq grands secteurs : l'industrie, les transports, le secteur résidentiel, le secteur tertiaire et l'agriculture. Le diagramme met notamment en évidence l'importance des produits pétroliers dans le secteur des transports, tandis que l'électricité et le gaz naturel jouent un rôle majeur dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

L'un des apports principaux du modèle METABOLHEAT réside dans l'intégration explicite du troisième stade de l'énergie, à savoir l'énergie utile. Celle-ci correspond aux services énergétiques effectivement produits par les technologies de conversion : chaleur utile, froid utile, propulsion, travail mécanique, lumière ou encore traitement de l'information. La représentation de ces flux permet de relier directement les consommations d'énergie finale aux besoins physiques du système socio-économique.

Enfin, le diagramme met en évidence l'ampleur des pertes énergétiques associées aux transformations de l'énergie. Une part importante de l'énergie consommée est dissipée sous forme de chaleur fatale lors des processus de conversion énergétique. Ces pertes thermiques apparaissent notamment dans les centrales nucléaires et thermiques, dans les processus industriels ou encore dans les moteurs thermiques utilisés dans les transports.

Ainsi, cette représentation globale du métabolisme énergétique met en évidence la complexité des transformations énergétiques et souligne l'importance des flux thermiques au sein du système énergétique. Elle constitue une base essentielle pour analyser plus finement la structure des usages énergétiques et les sources de chaleur fatale.

Toutefois, la figure 10 reste relativement agrégée et ne permet pas d'illustrer pleinement le niveau de détail accessible dans le modèle METABOLHEAT. Afin de mieux comprendre la structure du modèle et les possibilités d'analyse qu'il offre, il est utile d'examiner un exemple de désagrégation sectorielle.

6.1.2. Illustration des niveaux de désagrégation du modèle

La figure 11 présente un exemple de désagrégation des flux énergétiques pour le secteur résidentiel. Ce diagramme illustre la capacité du modèle METABOLHEAT à représenter simultanément plusieurs niveaux d'analyse, allant des vecteurs énergétiques jusqu'aux services énergétiques rendus.

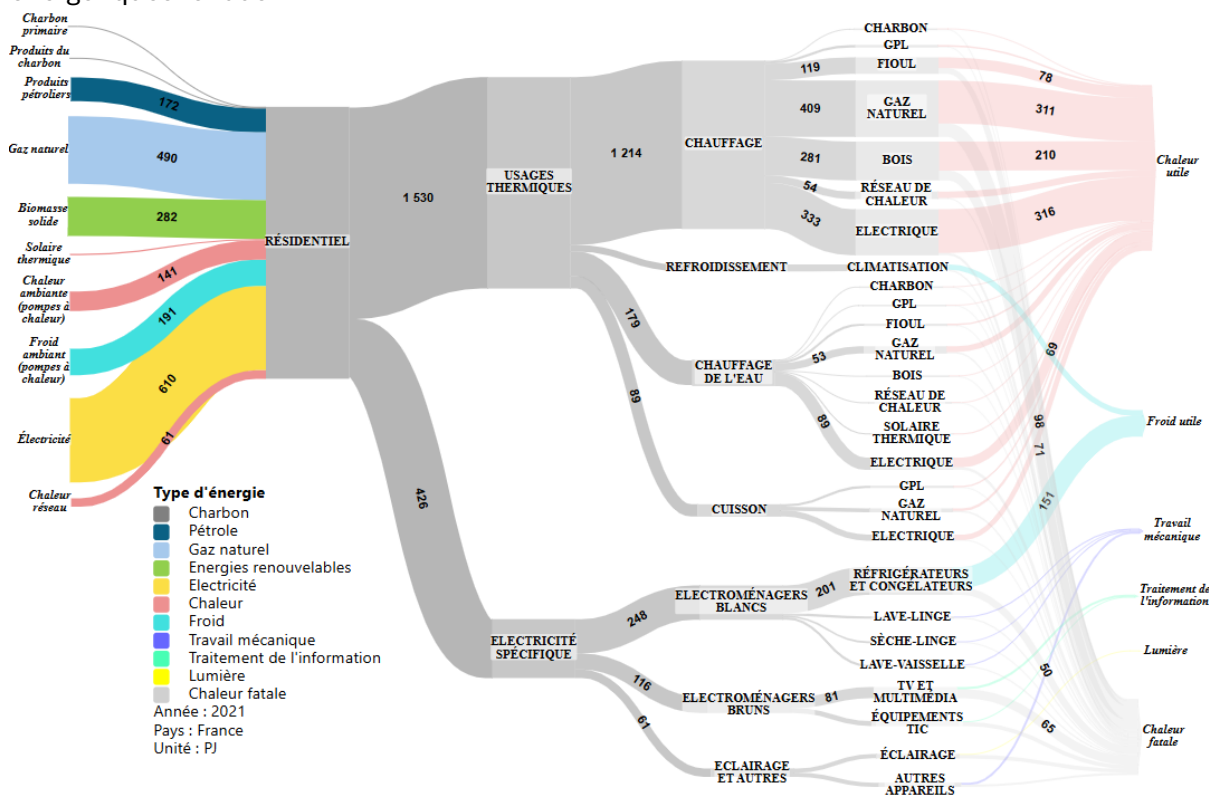


Figure 11 : Exemple de désagrégation sectorielle du modèle METABOLHEAT : flux énergétiques du secteur résidentiel (France, 2021)

Dans ce diagramme, les flux énergétiques sont organisés selon plusieurs niveaux hiérarchiques. Les vecteurs énergétiques consommés par le secteur résidentiel apparaissent dans la partie gauche du diagramme. Ceux-ci comprennent notamment le gaz naturel, les produits pétroliers, la biomasse solide, l'électricité, les réseaux de chaleur et les flux thermiques captés dans l'environnement par les pompes à chaleur.

Ces vecteurs énergétiques sont ensuite associés aux différents usages énergétiques du secteur résidentiel. Les usages thermiques, qui comprennent le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire et la cuisson, représentent une part importante de la consommation énergétique du secteur. Les usages électriques spécifiques, tels que l'électroménager, les équipements numériques ou l'éclairage, constituent également une composante significative de la demande énergétique.

Le modèle permet également de représenter les technologies associées à ces usages, telles que les chaudières, les systèmes de chauffage électrique, les climatiseurs ou les équipements électroménagers. Ces technologies convertissent l'énergie finale en différentes formes d'énergie utile correspondant aux services énergétiques recherchés.

L'analyse de cette figure met en évidence la prédominance des usages thermiques dans le secteur résidentiel. Le chauffage des bâtiments constitue de loin le principal usage énergétique, suivi par la production d'eau chaude sanitaire. Les usages électriques spécifiques représentent quant à eux une part plus limitée de la consommation énergétique totale.

Cette représentation détaillée illustre la capacité du modèle METABOLHEAT à relier les consommations d'énergie finale aux services énergétiques effectivement produits par les technologies. Elle constitue également un outil précieux pour analyser les flux thermiques associés aux différents usages énergétiques.

La prise en compte explicite des usages énergétiques permet ainsi de mieux comprendre les besoins énergétiques auxquels répond le système énergétique. Dans la section suivante, l'analyse sera étendue à l'ensemble du système énergétique français afin d'examiner la structure de la consommation énergétique aux différents stades de l'énergie et son évolution au cours des dernières décennies.

6.2. Structure et évolution du système énergétique français

L'analyse du métabolisme énergétique présentée dans la section précédente met en évidence la structure globale des flux énergétiques en France. Afin de mieux comprendre les mécanismes qui organisent ce système, il est utile d'examiner plus précisément la répartition de l'énergie aux différents stades de la chaîne énergétique, ainsi que son évolution sur le long terme.

La première sous-section s'intéresse à la structure du système énergétique aux trois stades de l'énergie — énergie primaire, énergie finale et énergie utile — tandis que la seconde examine l'évolution historique du système énergétique français depuis les années 1970.

6.2.1. Structure énergétique aux trois stades de l'énergie

La figure 12 présente la consommation d'énergie par type d'énergie aux trois stades du système énergétique : énergie primaire, énergie finale et énergie utile.

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

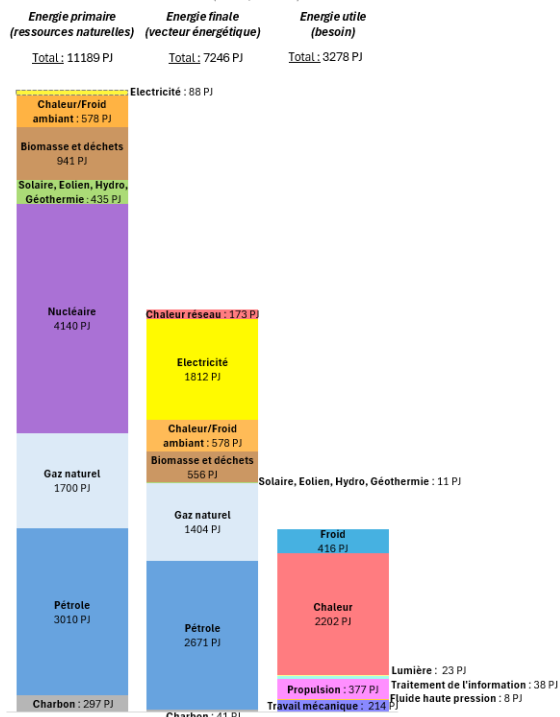


Figure 12 : Consommation d'énergie par type d'énergie aux trois stades du système énergétique : primaire, finale et utile (France, 2021)

Note de lecture : L'électricité (vecteur énergétique) représentée au stade primaire correspond aux importations françaises d'électricité. En toute rigueur, il faudrait convertir ce volume en énergie primaire, en fonction des mix électriques des pays exportant de l'électricité vers la France.

L'énergie primaire correspond aux ressources énergétiques mobilisées dans l'environnement ou importées dans le système énergétique. En 2021, la consommation d'énergie primaire en France s'élève à environ **11 189 PJ**. La structure de ce mix énergétique est dominée par trois grandes sources : l'énergie nucléaire, le pétrole et le gaz naturel. L'énergie nucléaire constitue la principale source d'énergie primaire nationale, tandis que le pétrole et le gaz naturel sont majoritairement importés.

Lorsque l'on examine la structure de l'énergie finale — c'est-à-dire l'énergie livrée aux utilisateurs finaux sous forme de vecteurs énergétiques — la répartition énergétique se modifie sensiblement. L'électricité devient un vecteur énergétique majeur, en raison de la conversion de l'énergie nucléaire dans les centrales électriques. Les produits pétroliers demeurent également très présents dans l'énergie finale, principalement en raison de leur utilisation dans le secteur des transports. Le gaz naturel et la biomasse occupent également une place significative dans la consommation finale d'énergie. La consommation d'énergie finale en France s'élève à **7246 PJ**, la différence avec le volume d'énergie primaire s'explique par les pertes générées par la branche de transformation de l'énergie, notamment les centrales nucléaires (soit un rendement de conversion énergie primaire/finale global d'environ 65 %).

La structure de l'énergie utile diffère encore davantage de celle de l'énergie finale. L'énergie utile correspond aux services énergétiques effectivement produits par les technologies de conversion. On observe ainsi que la **chaleur utile représente la forme d'énergie dominante**, avec plus de deux mille pétajoules consommés sous forme de chaleur pour les usages thermiques. Les autres formes d'énergie utile comprennent notamment le froid utile, la propulsion mécanique, le travail mécanique, ainsi que des usages spécifiques tels que la production de lumière ou le traitement de l'information. La consommation d'énergie utile en France s'élève à **3278 PJ**, la différence avec

Le volume d'énergie finale s'explique par les pertes générées par les machines d'utilisation finale de l'énergie, notamment dans le secteur des transports, ainsi que par les exportations (soit un rendement de conversion énergie finale/utile global d'environ 53 %, exportations exclues). Cette transformation progressive du mix énergétique entre les trois stades de l'énergie met en évidence l'importance des processus de conversion énergétique dans le fonctionnement du système énergétique. Une grande partie de l'énergie primaire est transformée avant d'être utilisée sous forme de services énergétiques, ce qui s'accompagne de pertes énergétiques significatives (rendement de conversion énergie primaire/utile global d'environ 32 %, exportations exclues).

Afin de compléter cette analyse, la figure 13 présente la consommation d'énergie aux trois stades du système énergétique selon les secteurs économiques cette fois-ci.

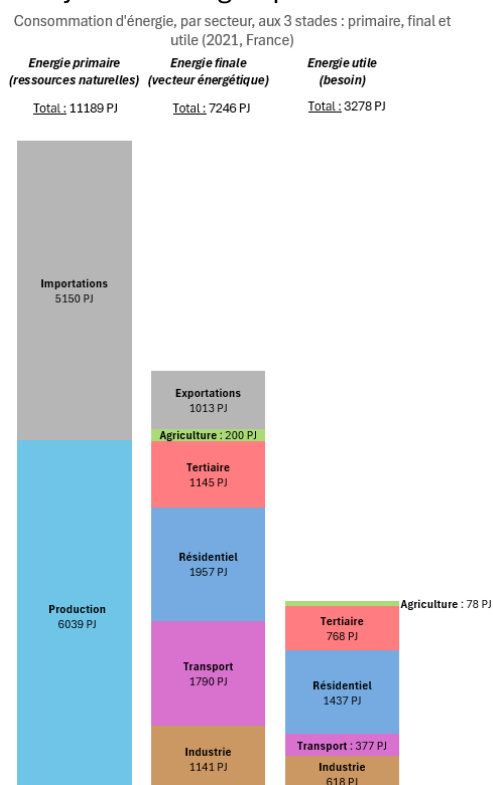


Figure 13 : Consommation d'énergie par secteur aux trois stades de l'énergie (France, 2021)

L'analyse sectorielle met en évidence des différences importantes entre les stades de l'énergie. Du point de vue de l'énergie finale, le secteur du résidentiel apparaît comme le principal consommateur d'énergie, avec près de **2 000 PJ**, suivi par les secteurs du transport et tertiaire. L'industrie représente également une part importante de la consommation énergétique finale. Cependant, lorsque l'on examine la structure de l'énergie utile, la hiérarchie sectorielle se modifie légèrement. Le secteur résidentiel apparaît largement comme le principal consommateur d'énergie utile, en raison de l'importance des usages thermiques liés au chauffage des bâtiments et à la production d'eau chaude sanitaire. Les secteurs tertiaire et industriel présentent également une consommation importante d'énergie utile, tandis que la consommation d'énergie utile dans le secteur des transports correspond principalement à la production de propulsion mécanique (faible rendement de conversion d'énergie finale/utile).

Ces résultats illustrent l'intérêt de distinguer les différents stades de l'énergie dans l'analyse du système énergétique. Alors que l'énergie finale décrit les vecteurs énergétiques livrés aux utilisateurs, l'énergie utile permet de caractériser plus directement les services énergétiques rendus au système socio-économique.

Toutefois, la structure actuelle du système énergétique ne peut être pleinement comprise sans prendre en compte son évolution historique. Les transformations du mix énergétique observées aujourd’hui résultent en effet de plusieurs décennies d’évolution des politiques énergétiques, des technologies et des usages. La section suivante examine ainsi l’évolution du système énergétique français depuis les années 1970 (début du nucléaire) jusqu’à l’année la plus récente disponible (2023), à partir des séries longues publiées par le SDES.

6.2.2. Évolution historique du système énergétique

La figure 14 présente l’évolution de la consommation d’énergie primaire en France métropolitaine depuis le début des années 1970.

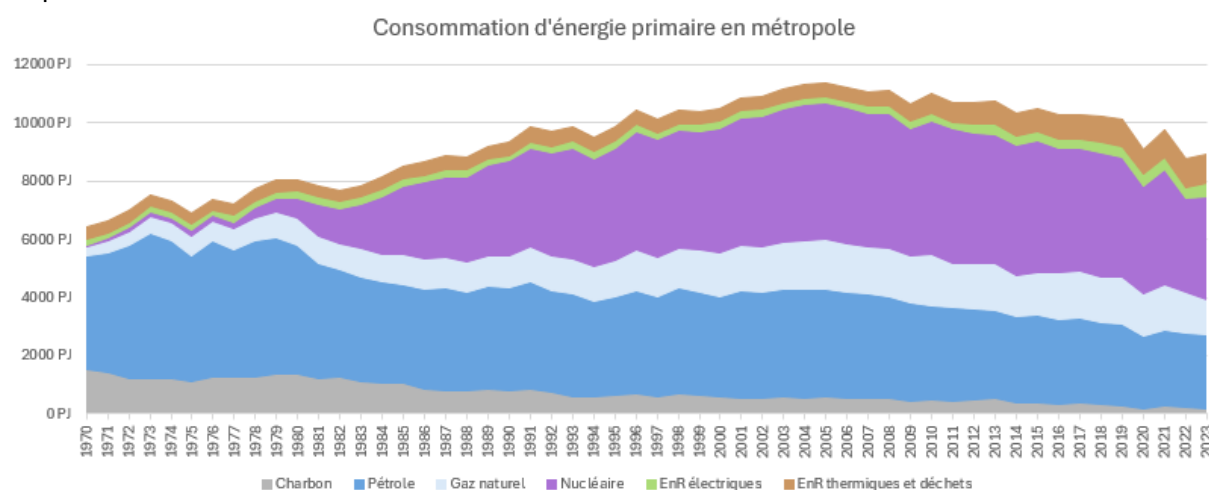


Figure 14 : Évolution de la consommation d’énergie primaire en France métropolitaine par source d’énergie (1970–2023)

L’analyse de cette figure met en évidence plusieurs transformations majeures du système énergétique français. Dans les années 1970, la consommation d’énergie primaire repose essentiellement sur les combustibles fossiles, en particulier le pétrole. Cette forte dépendance au pétrole apparaît clairement au début de la période étudiée.

À partir de la fin des années 1970 et au cours des décennies suivantes, la structure du mix énergétique se transforme profondément sous l’effet du développement du programme électronucléaire français. La part de l’énergie nucléaire augmente progressivement et devient la principale source d’énergie primaire dans les années 1990. Cette évolution contribue à réduire la dépendance du système énergétique français aux combustibles fossiles pour la production d’électricité.

La consommation totale d’énergie primaire connaît également une croissance importante entre les années 1970 et le début des années 2000, avant de se stabiliser puis de diminuer légèrement au cours des dernières années. Cette évolution reflète à la fois des gains d’efficacité énergétique et des transformations structurelles de l’économie.

La figure 15 permet de compléter cette analyse en distinguant la production nationale d’énergie primaire et les importations énergétiques.

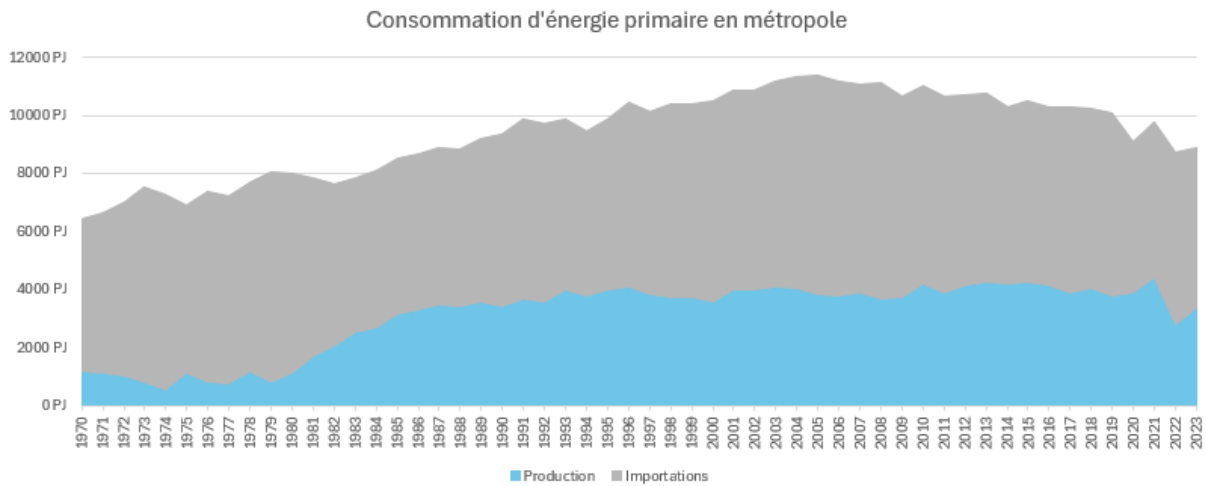


Figure 15 : Évolution de l’approvisionnement énergétique français : production nationale et importations (1970–2023)

Cette figure met en évidence la forte dépendance du système énergétique français aux importations d’énergie. Malgré le développement du parc nucléaire, qui constitue la principale source de production nationale d’énergie primaire, une part importante de l’énergie consommée en France continue de provenir de l’étranger, notamment sous forme de pétrole, de gaz naturel et de charbon.

La figure 16 présente ensuite l’évolution de la consommation d’énergie finale par type de vecteur énergétique.

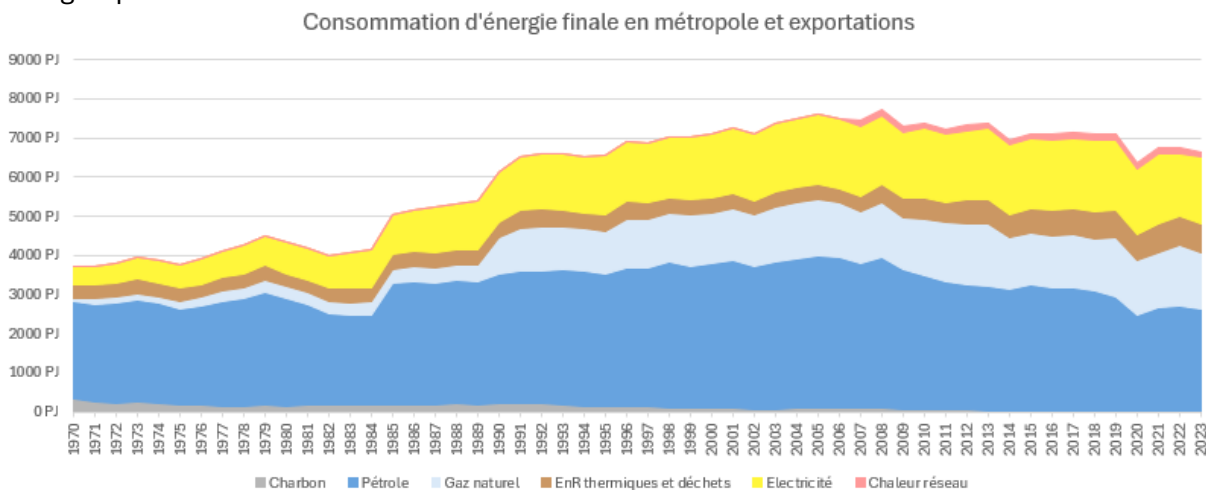


Figure 16 : Évolution de la consommation d’énergie finale par vecteur énergétique (1970–2023)

Cette évolution reflète les transformations progressives du système énergétique français. Les produits pétroliers ont longtemps constitué la principale source d’énergie finale, en particulier dans le secteur des transports. Toutefois, la part de l’électricité dans la consommation finale a fortement augmenté au cours des dernières décennies, en raison du développement du parc nucléaire et de l’électrification progressive de certains usages énergétiques.

Enfin, la figure 17 présente l’évolution de la consommation d’énergie finale par secteur économique.

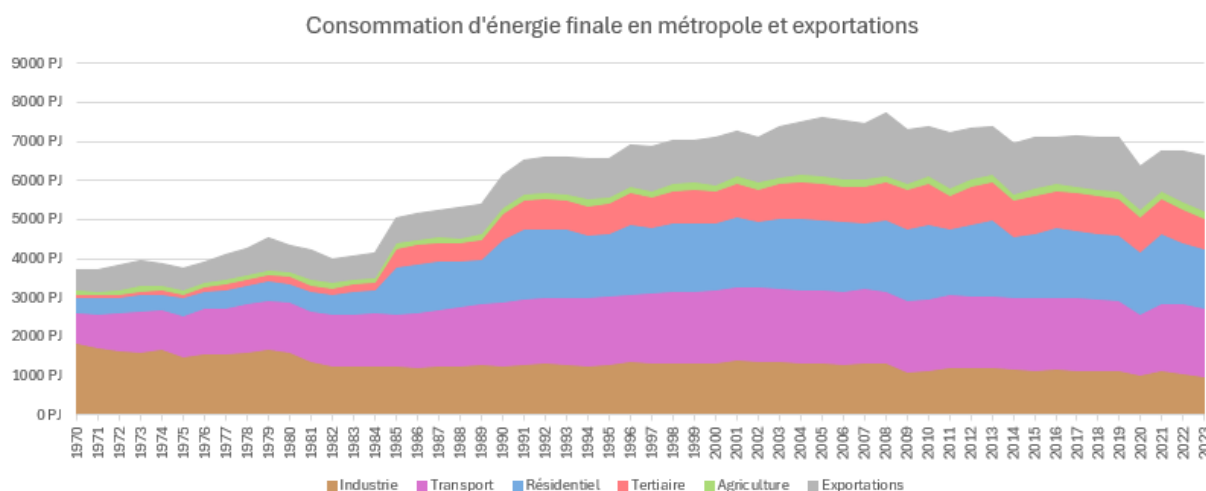


Figure 17 : Évolution de la consommation d'énergie finale par secteur (1970–2023)

L'analyse sectorielle met en évidence la croissance importante de la consommation énergétique dans le secteur des transports au cours des dernières décennies. Ce secteur constitue aujourd'hui l'un des principaux consommateurs d'énergie finale en France. Les secteurs résidentiel et tertiaire représentent également une part importante de la consommation énergétique, en particulier pour les usages thermiques liés au chauffage des bâtiments.

L'industrie, qui occupait historiquement une place plus importante dans la consommation énergétique, voit sa part relative diminuer progressivement, ce qui reflète les transformations structurelles de l'économie française.

Remarque : Les deux augmentations brusques des consommations d'énergie finale du résidentiel et du tertiaire en 1985 (augmentation de la consommation de pétrole) et 1990 (augmentation de la consommation de gaz naturel) s'expliquent par des ruptures de série importantes dans la méthodologie du SDES : c'est pourquoi dans d'autres travaux les analyses sur les séries longues débutent en 1990 ou introduisent une variable de rupture pour ces périodes.

Dans l'ensemble, ces évolutions témoignent des transformations profondes du système énergétique français au cours des dernières décennies. Elles permettent de mieux comprendre la structure actuelle du métabolisme énergétique et les enjeux associés à la transition énergétique.

Toutefois, l'analyse des vecteurs énergétiques et des secteurs ne suffit pas à caractériser pleinement les besoins énergétiques du système socio-économique. Pour cela, il est nécessaire d'examiner plus directement les **usages énergétiques** auxquels répond la consommation d'énergie. La section suivante s'intéresse ainsi à la répartition de la consommation d'énergie selon les principaux usages énergétiques.

6.3. Répartition des usages énergétiques

L'analyse des vecteurs énergétiques et des secteurs présentée dans la section précédente permet de caractériser la structure du système énergétique du point de vue de l'offre et de la consommation finale. Toutefois, cette approche ne permet pas encore d'identifier directement les **services énergétiques** auxquels répond l'énergie consommée.

Dans le cadre du projet METABOLHEAT, l'identification des usages énergétiques constitue une étape essentielle pour comprendre les besoins physiques du système socio-économique et pour analyser les flux thermiques associés à ces usages. La consommation d'énergie finale peut en

effet être interprétée comme la réponse à un ensemble de besoins énergétiques fondamentaux tels que le chauffage des bâtiments, le transport des personnes et des marchandises, l'éclairage ou encore le fonctionnement des équipements électriques.

La figure 18 présente la répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2021 selon les principaux usages énergétiques.

6.3.1. Répartition globale des usages énergétiques

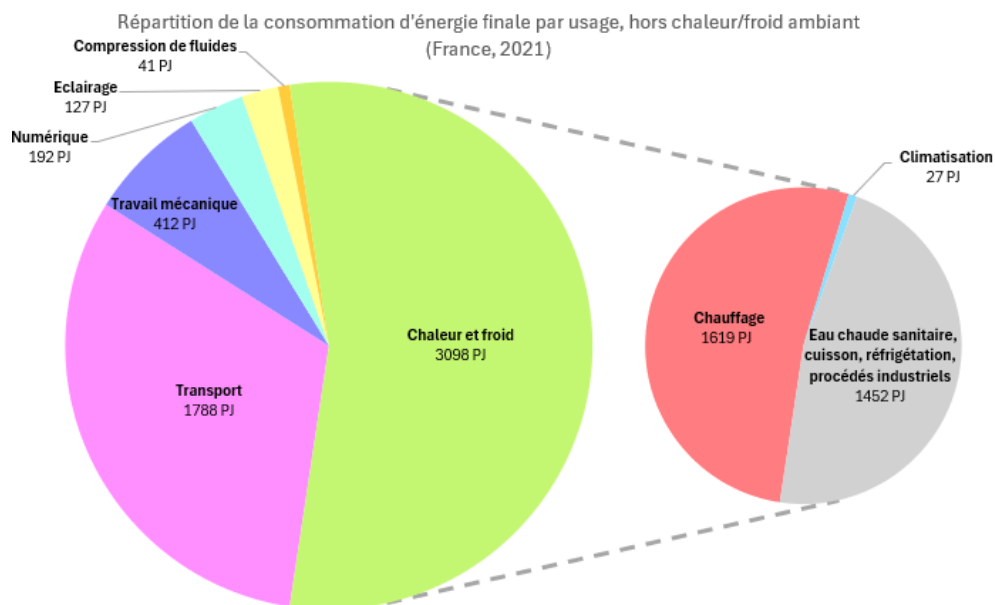


Figure 18 : Répartition de la consommation d'énergie finale par usage énergétique en France (2021)

L'analyse de cette figure met en évidence la forte dominance des **usages thermiques** dans la consommation énergétique française. Les besoins de chaleur et de froid représentent en effet plus de la moitié de la consommation totale d'énergie finale, avec plus de **3 000 PJ** consommés pour les usages thermiques.

Ces usages thermiques comprennent principalement le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire, certains procédés industriels nécessitant de la chaleur ainsi que les besoins de refroidissement et de climatisation. Cette prédominance des usages thermiques constitue une caractéristique structurelle des systèmes énergétiques contemporains, dans lesquels la gestion de la chaleur joue un rôle central.

Le **transport** représente le second usage énergétique majeur, avec près de **1 800 PJ** consommés pour la propulsion des véhicules. Cette catégorie inclut à la fois le transport de personnes et le transport de marchandises, principalement assuré par des moteurs thermiques utilisant des produits pétroliers.

Les autres usages énergétiques apparaissent relativement plus limités en volume, avec un peu plus de **400 PJ** pour le travail mécanique, généré notamment par l'électroménager et certains procédés industriels. Enfin, certaines catégories d'usages spécifiques, comme le numérique, l'éclairage et la compression de fluides, représentent des volumes énergétiques plus modestes. Cette répartition met en évidence un point fondamental pour l'analyse du métabolisme énergétique : **la chaleur constitue le principal besoin énergétique du système socio-économique**. Cette observation est particulièrement importante dans le contexte du projet METABOLHEAT, et justifie l'intérêt de s'intéresser précisément à la quantification et à l'analyse des flux thermiques dans la filière énergétique.

Afin de mieux comprendre la structure de ces usages thermiques, il est utile d'examiner plus en détail la répartition de la consommation énergétique associée au chauffage, qui constitue le principal usage thermique.

6.3.2. Analyse détaillée des usages thermiques : le chauffage

La figure 19 présente la répartition de la consommation d'énergie pour le chauffage en France en 2021 selon les secteurs économiques et les vecteurs énergétiques utilisés.

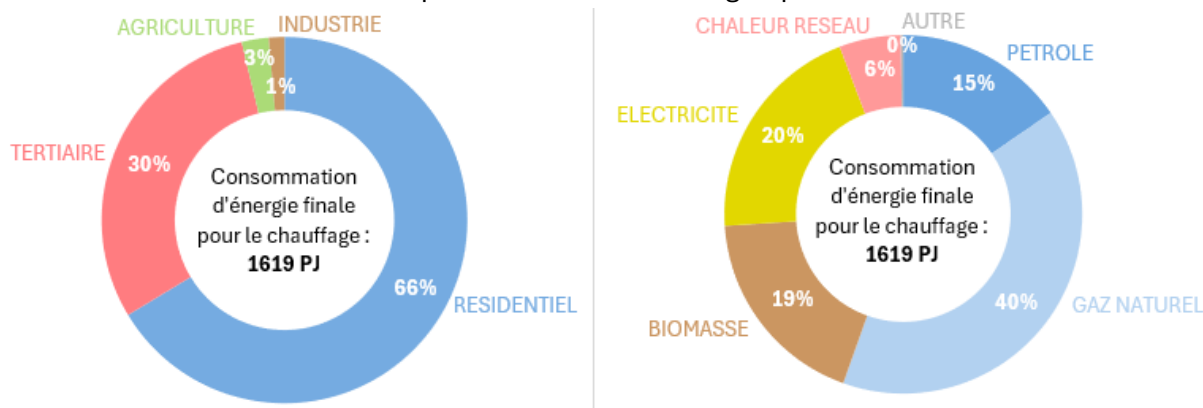


Figure 19 : Répartition de la consommation d'énergie pour le chauffage par secteur et par vecteur énergétique (France, 2021)

L'analyse de cette figure met en évidence la prédominance du **secteur résidentiel**, qui représente environ les deux tiers de consommation énergétique pour le chauffage des bâtiments. Ce résultat reflète l'importance du parc de logements en France et le rôle central du chauffage dans la consommation énergétique des ménages. Le secteur tertiaire représente également une part significative de la consommation énergétique liée au chauffage avec le tiers restant. Dans le secteur tertiaire, les besoins de chauffage concernent principalement les bâtiments de bureaux, les établissements d'enseignement, les commerces et les bâtiments publics.

La répartition des vecteurs énergétiques utilisés pour le chauffage met en évidence la diversité des sources énergétiques mobilisées. Le **gaz naturel** constitue l'un des principaux vecteurs énergétiques pour le chauffage, en particulier dans les secteurs résidentiel et tertiaire. L'électricité représente également une part importante de la consommation énergétique pour le chauffage, notamment sous forme de chauffage électrique direct ou de pompes à chaleur. La **biomasse solide**, principalement sous forme de bois énergie, joue également un rôle significatif dans le chauffage résidentiel. Les réseaux de chaleur et les produits pétroliers (fioul notamment) représentent quant à eux une part plus limitée de la consommation énergétique totale pour le chauffage.

Ces résultats illustrent la diversité des technologies et des vecteurs énergétiques utilisés pour répondre aux besoins de chaleur dans le système énergétique français. Ils mettent également en évidence les secteurs qui pourraient être les plus concernés par la récupération de chaleur fatale pour le chauffage ainsi que les sources d'énergie qui pourraient être remplacées par cette chaleur fatale.

Dans le cadre du projet METABOLHEAT, cette prédominance des usages thermiques revêt une importance particulière. En effet, les processus de production, de conversion et d'utilisation de la chaleur sont également associés à la production de **flux thermiques dissipés dans l'environnement**, communément appelés chaleur fatale.

L'analyse des usages énergétiques permet ainsi d'identifier les principaux besoins thermiques du système socio-économique. La section suivante s'intéresse plus directement aux flux

thermiques générés tout au long de la filière énergétique et à leur contribution aux pertes énergétiques du système.

6.4. Flux thermiques et chaleur fatale dans le système énergétique

L'analyse des usages énergétiques présentée dans la section précédente met en évidence l'importance des besoins thermiques dans la consommation énergétique française. Toutefois, la chaleur intervient également à de nombreuses autres étapes du système énergétique, notamment lors des processus de transformation et de conversion de l'énergie.

Dans les systèmes énergétiques contemporains, une part importante de l'énergie consommée n'est pas convertie en services énergétiques utiles mais est dissipée sous forme de chaleur dans l'environnement. Ces flux thermiques, souvent qualifiés de **chaleur fatale**, constituent une composante majeure du métabolisme énergétique et représentent un enjeu important pour l'efficacité énergétique et la valorisation énergétique.

L'objectif de cette section est d'analyser la place des flux thermiques dans la filière énergétique française et d'identifier les principales sources de chaleur fatale dans le système énergétique.

6.4.1. Flux thermiques dans la filière énergétique

La figure 20 présente une représentation synthétique des flux thermiques dans la filière énergétique française en 2021. Ce diagramme compare les flux thermiques correspondant aux **besoins utiles de chaleur et de froid** et les flux thermiques dissipés dans l'environnement au cours des différents processus énergétiques.

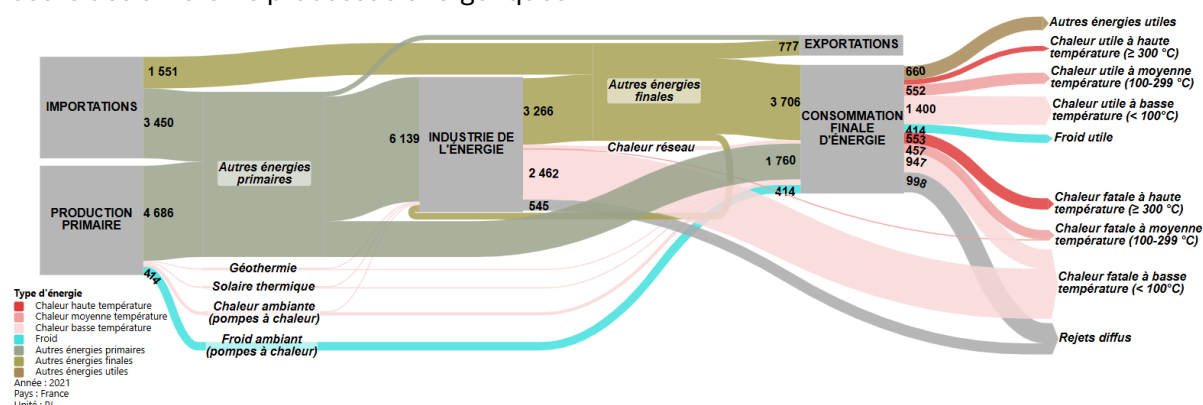


Figure 20 : Flux thermiques dans la filière énergétique française : besoins utiles et rejets thermiques (France, 2021)

L'analyse de cette figure met en évidence l'importance des flux thermiques dans le fonctionnement global du système énergétique. Les besoins thermiques utiles — comprenant le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire, les procédés industriels nécessitant de la chaleur et les besoins de refroidissement — représentent une part importante de l'énergie utile consommée dans le système socio-économique.

Cependant, ces besoins thermiques utiles ne représentent qu'une partie des flux thermiques circulant dans le système énergétique. Une quantité significative d'énergie est également dissipée sous forme de chaleur au cours des processus de transformation énergétique.

Ces pertes thermiques apparaissent à plusieurs niveaux de la filière énergétique. Elles sont notamment associées aux processus de production d'électricité dans les centrales thermiques, aux processus de transformation de l'énergie dans les raffineries ou les installations industrielles, ainsi qu'aux technologies de conversion énergétique utilisées dans les secteurs consommateurs d'énergie. L'analyse de la figure met en évidence que les flux thermiques dissipés dans l'environnement représentent un volume énergétique considérable, comparable, voire supérieur,

aux besoins thermiques utiles du système socio-économique. Cette observation souligne le rôle central des pertes thermiques dans le métabolisme énergétique.

La quantification et la caractérisation de ces flux thermiques constituent précisément l'un des objectifs du projet METABOLHEAT. En identifiant les sources et les caractéristiques de la chaleur fatale, il devient possible d'évaluer les opportunités potentielles de valorisation énergétique de ces flux.

Toutefois, l'ensemble des flux thermiques dissipés dans l'environnement ne présente pas nécessairement le même potentiel de récupération. Afin de mieux comprendre les possibilités de valorisation énergétique de ces flux, il est nécessaire d'examiner plus précisément leur origine sectorielle et leurs caractéristiques thermodynamiques.

6.4.2. Juxtaposition des besoins énergétiques et du potentiel de récupération de la chaleur fatale

La figure 21 présente la répartition de la chaleur fatale en France en 2021 selon les secteurs d'activité et les caractéristiques thermiques des rejets.

De l'énergie consommée à la chaleur perdue : bilan des besoins et rejets thermiques en France (2021)

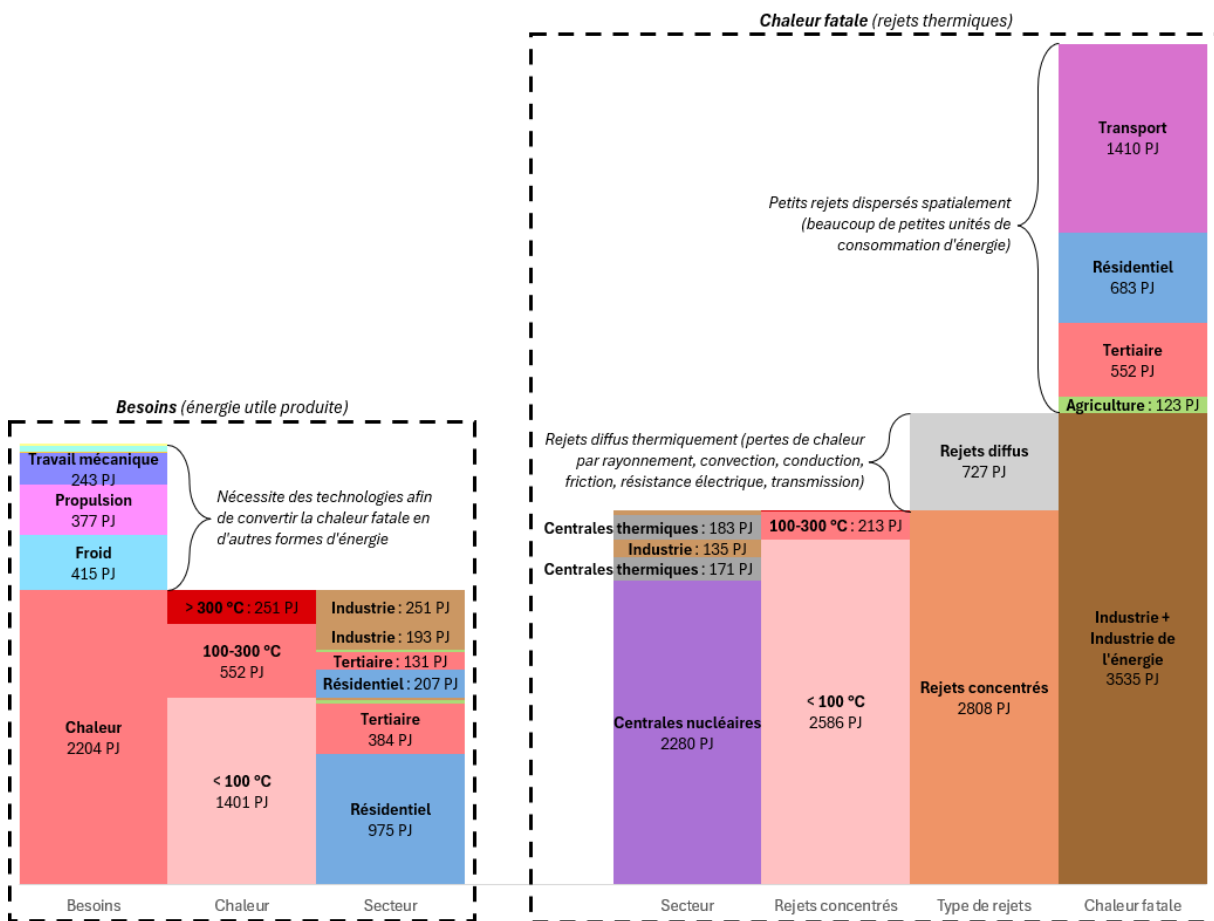


Figure 21 : Répartition sectorielle et thermique de la chaleur fatale en France (2021)

L'analyse de cette figure met en évidence le rôle dominant de certains secteurs dans la production de chaleur fatale (histogramme de droite). Les **centrales thermiques de production d'électricité**, et en particulier les centrales nucléaires, constituent la principale source de rejets thermiques dans le système énergétique français. Une grande partie de l'énergie thermique produite dans ces installations n'est pas convertie en électricité et est dissipée dans l'environnement, notamment par les systèmes de refroidissement. L'**industrie** constitue

également une source significative de chaleur fatale, en particulier dans les procédés industriels à haute température tels que la production de métaux, les procédés chimiques ou la production de ciment. Les autres secteurs (transport, résidentiel, tertiaire et agriculture) sont également responsables d'une part importante du gisement de chaleur fatale mais qui résulte d'une multitude de sources dispersées dans le système socio-économique et donc plus difficilement valorisables à grande échelle.

Les caractéristiques thermodynamiques des rejets jouent également un rôle déterminant dans les possibilités de valorisation énergétique de la chaleur fatale. Les rejets diffus sont difficilement récupérables contrairement aux rejets concentrés (sous forme liquide ou gazeuse). De plus, les flux thermiques à haute température – issus du secteur industriel et des centrales thermiques de production d'énergie – présentent généralement un potentiel de récupération plus élevé, tandis que les flux thermiques à basse température – principalement issus des centrales nucléaires – sont souvent plus difficiles à valoriser, notamment en raison de leur faible exergie. Dans le cas du système énergétique français, une part importante de la chaleur fatale correspond à des flux thermiques de relativement basse température ou à des rejets thermiques dispersés. Ces caractéristiques limitent les possibilités de récupération directe de ces flux thermiques.

Concernant le détail des besoins énergétiques de la France, les besoins en chaleur sont les plus importants et sont également les plus faciles à subvenir à partir de la récupération de chaleur fatale (la chaleur fatale récupérée peut potentiellement être valorisée directement sans transformation). Presque les deux tiers sont à basse température (inférieur à 100 °C) et se situent principalement dans le résidentiel puis dans le tertiaire, principalement pour le chauffage des bâtiments. Les deux tiers des besoins de chaleur restants sont à moyenne température (entre 100 et 300 °C) et se situent également dans le résidentiel et le tertiaire, principalement pour l'eau chaude sanitaire. Le reste des besoins en chaleur est à haute température (supérieur à 300 °C), exclusivement pour les procédés industriels.

Juxtaposer ainsi le gisement de chaleur fatale avec les besoins énergétiques du pays – avec leurs caractéristiques et organisations sectorielles – permet d'identifier le potentiel de valorisation de chaleur fatale ainsi que ses usages. Le bilan d'un gisement de chaleur fatale globalement supérieur aux besoins est à modérer car il s'agit ici du potentiel maximum récupérable, ne tenant pas compte de critères géographiques ou technico-économiques notamment, qui réduiraient fortement le champ des possibles (cf. partie suivante).

Néanmoins, l'identification et la quantification de ces flux constituent une étape essentielle pour améliorer la compréhension du fonctionnement thermodynamique du système énergétique et pour identifier les opportunités potentielles de valorisation énergétique.

L'analyse des flux thermiques réalisée dans cette section met ainsi en évidence le rôle central de la chaleur dans le métabolisme énergétique. Elle souligne également l'importance des pertes thermiques dans les systèmes énergétiques contemporains et la nécessité de prendre en compte ces flux dans l'analyse des transitions énergétiques.

7. Analyse critique et limites du modèle

7.1. Points de vigilance liés aux hypothèses et aux reconstructions de données

Les résultats présentés dans ce travail reposent sur une combinaison de sources statistiques hétérogènes (JRC, Forman, Brockway) et sur un ensemble de traitements visant à reconstruire

des flux non directement observables, en particulier l'énergie utile et la chaleur fatale. Cette approche implique nécessairement plusieurs niveaux d'hypothèses et d'approximation.

En premier lieu, la reconstitution de l'énergie utile repose sur l'application de rendements moyens par usage et par technologie. Ces rendements, issus de la littérature (notamment JRC et Forman), ne reflètent qu'imparfaitement la diversité des situations réelles, en particulier la variabilité des performances selon les équipements, les conditions d'exploitation ou encore l'ancienneté des installations. Il en résulte une incertitude structurelle sur les niveaux d'énergie utile estimés.

En second lieu, la quantification des pertes thermiques repose sur des bilans énergétiques simplifiés à l'échelle des processus :

$$\text{énergie consommée} = \text{énergie produite} + \text{pertes}$$

Si cette relation garantit la cohérence énergétique globale du modèle, elle ne permet pas de distinguer finement la nature des pertes (rayonnement, convection, rejets liquides, etc.), ni leur localisation précise dans les systèmes. Par ailleurs, l'absence de données détaillées sur les niveaux de température des rejets conduit à recourir à des hypothèses génériques pour caractériser les flux thermiques (ventilations issues de Forman), or la température constitue un paramètre déterminant pour l'évaluation du potentiel de valorisation. Cette simplification limite donc la portée des analyses relatives à la récupération de chaleur. Enfin, certaines reconstructions reposent sur des correspondances entre nomenclatures (par exemple entre secteurs JRC et Forman) : elles introduisent un niveau supplémentaire d'incertitude, notamment dans l'allocation sectorielle des flux.

Ainsi, les résultats doivent être interprétés comme des **ordres de grandeur cohérents à l'échelle macroéconomique**, mais non comme des valeurs précises à un niveau fin.

7.2. Limites spécifiques à l'estimation de la chaleur fatale

La quantification du gisement de chaleur fatale constitue un exercice particulièrement délicat, en raison de la nature même de cette grandeur. Tout d'abord, la chaleur fatale n'est pas directement mesurée dans les statistiques énergétiques. Elle est définie comme la part non valorisée de l'énergie thermique issue d'un processus. Son estimation dépend donc entièrement des hypothèses retenues sur les rendements et sur la répartition des usages énergétiques.

De plus, la dimension temporelle n'est pas prise en compte : les flux sont considérés comme continus et moyens sur l'année, alors que, dans la réalité, les profils de production et de consommation de chaleur sont souvent désynchronisés. Cette simplification tend à surestimer implicitement le potentiel de valorisation. Enfin, le modèle adopte une approche strictement énergétique, sans intégrer la qualité de l'énergie (exergie) dans l'analyse des pertes thermiques. Cette limitation est particulièrement importante pour les flux de basse température, qui représentent une part majoritaire du gisement mais sont difficilement valorisables.

Ces différents éléments impliquent que le gisement estimé dans METABOLHEAT correspond essentiellement à un **gisement théorique**, qui ne préjuge pas directement de son potentiel de valorisation effectif.

7.3. Comparaison avec l'étude ADEME : analyse détaillée des écarts

Afin de consolider la robustesse du modèle METABOLHEAT, une analyse comparative approfondie a été menée avec l'étude ADEME de référence sur la chaleur fatale industrielle. Cette comparaison repose sur un travail d'alignement des périmètres et sur l'exploitation de plusieurs jeux de données structurés (consommations par usage et par secteur, gisements par secteur et par type de rejet, ainsi que cas spécifiques comme les unités d'incinération des ordures ménagères (UIOM)).

La mise en cohérence des périmètres des résultats de METABOLHEAT avec l'étude ADEME a été rendu possible par l'organisation par hiérarchie du modèle METABOLHEAT (possibilité de ne regarder les résultats que pour une famille de produits énergétiques ou de secteurs énergétiques). Cependant, la correspondance entre les périmètres reste incertaine de part :

- les **nomenclatures différentes** utilisées entre les deux études (parfois pas de correspondance exacte) ;
- le **manque de détails sur le périmètre** pour chacun des résultats de l'étude ADEME (le périmètre d'étude est souvent légèrement modifié selon les analyses effectuées sans que ça soit clairement indiqué) ;
- certaines **caractéristiques fondamentalement différentes entre les deux études** (impossibles à faire correspondre), par exemple l'année d'étude ou les types de rejets pris en compte (cf. tableau 8 ci-dessous).

Tableau 8 : Comparaison des périmètres entre l'étude ADEME et le modèle METABOLHEAT

| 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 |

En termes de couverture sectorielle, le périmètre général de l'étude ADEME est encadré en bleu dans la figure suivante représentant une version agrégée du modèle METABOLHEAT.

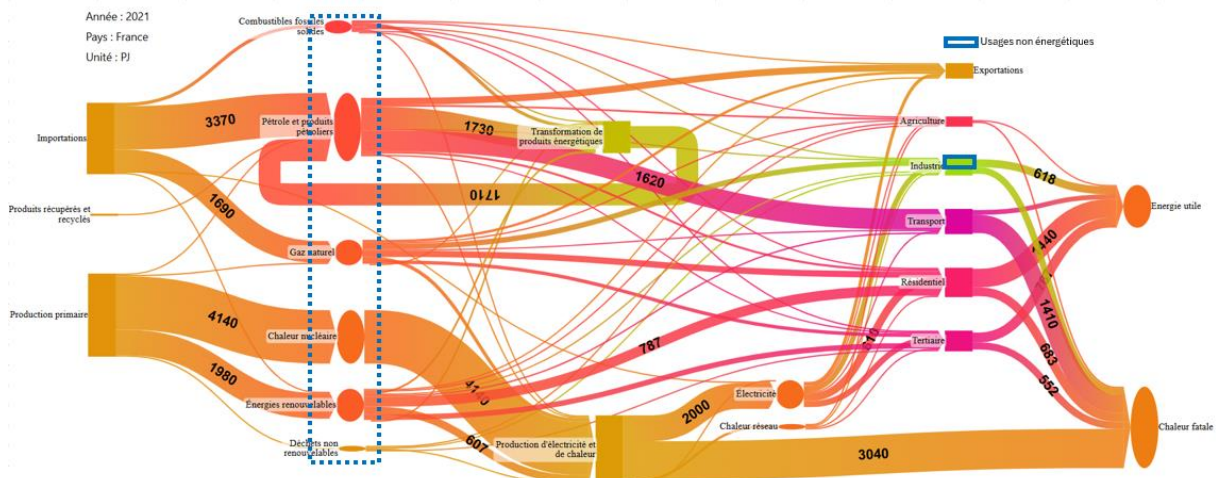
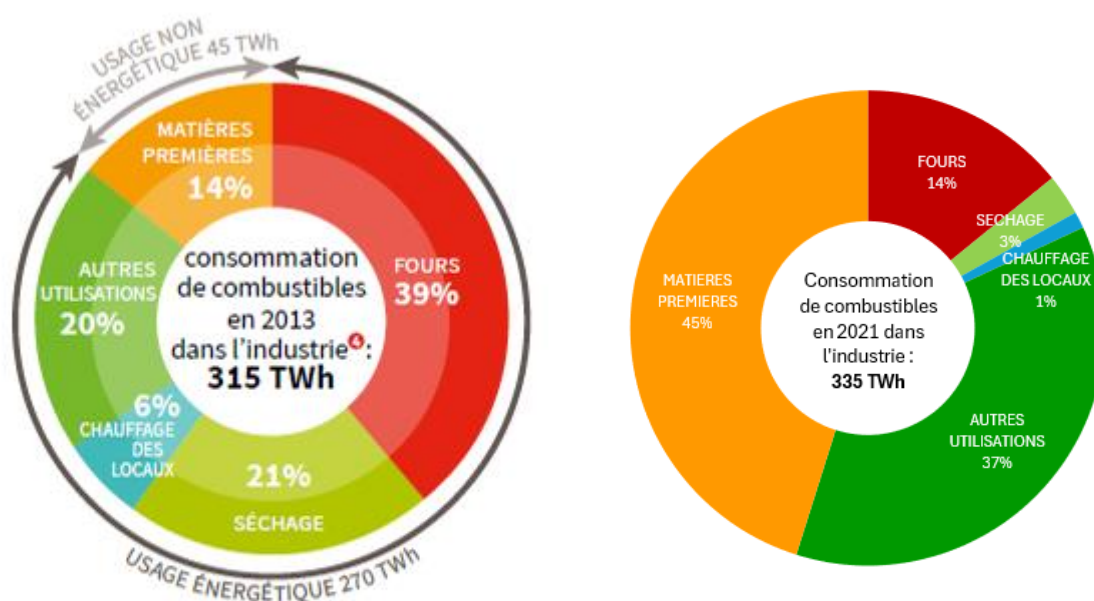


Figure 22 : Périmètre industriel de l'étude ADEME projeté en bleu sur le modèle METABOLHEAT

En termes de produits énergétiques, l'étude ADEME ne considère que les combustibles consommés par l'industrie (charbon, pétrole, gaz, bois, déchets) et au niveau sectoriel, elle ne considère qu'une partie seulement du secteur industriel de consommation finale (taux de couverture des industries < 100%). Elle contient cependant dans son périmètre les industries de transformation de produits énergétiques pour des usages non énergétiques, non comprises dans le périmètre METABOLHEAT.

7.3.1. Comparaison des consommations énergétiques par usage

La première étape de la comparaison a consisté à analyser la répartition des consommations énergétiques par usage, qui constitue un déterminant fondamental du niveau de chaleur fatale générée.



Source : ADEME, d'après CEREN

Une faible part d'électricité (18%, soit 21 TWh en 2013) sert à la production thermique (fours à résistance et à arc principalement).

Figure 23 : Juxtaposition des consommations d'énergie par usage dans l'étude ADEME (à gauche) et le modèle METABOLHEAT (à droite), ajusté autant que possible au périmètre ADEME

Bien que les volumes totaux de consommation de combustibles soient proches, l'analyse met en évidence des écarts notables entre METABOLHEAT et l'étude ADEME dans la structuration des usages énergétiques :

- Le volume consommé comme matière première est bien plus élevé que l'étude ADEME : dans les données du JRC (150 TWh), la majeure partie est du naphta pour l'industrie chimique, or l'étude ADEME ne précise pas cet usage... Peut-être que le périmètre de l'étude ADEME ne considère que les usages non énergétiques hors pétrochimie (ce qui donnerait un volume d'environ 15 TWh selon le JRC, cette fois bien en-dessous du volume ADEME).
- La catégorie « Autres utilisations » est bien plus importante que l'étude ADEME tandis que les autres catégories sont plus faibles : ceci s'explique par la correspondance sectorielle parfois incertaine entre les nomenclatures.

- Concernant les statistiques sur l'électricité, les résultats sont similaires entre les 2 études.

Ainsi, cette première comparaison met en évidence un point structurant : la représentation des usages énergétiques constitue un **levier majeur de divergence** entre les deux approches, en amont même du calcul des gisements.

7.3.2. Comparaison des consommations énergétiques par secteur

La deuxième étape de la comparaison a consisté à analyser les consommations d'énergie par secteur, qui servent également de base au calcul des gisements.

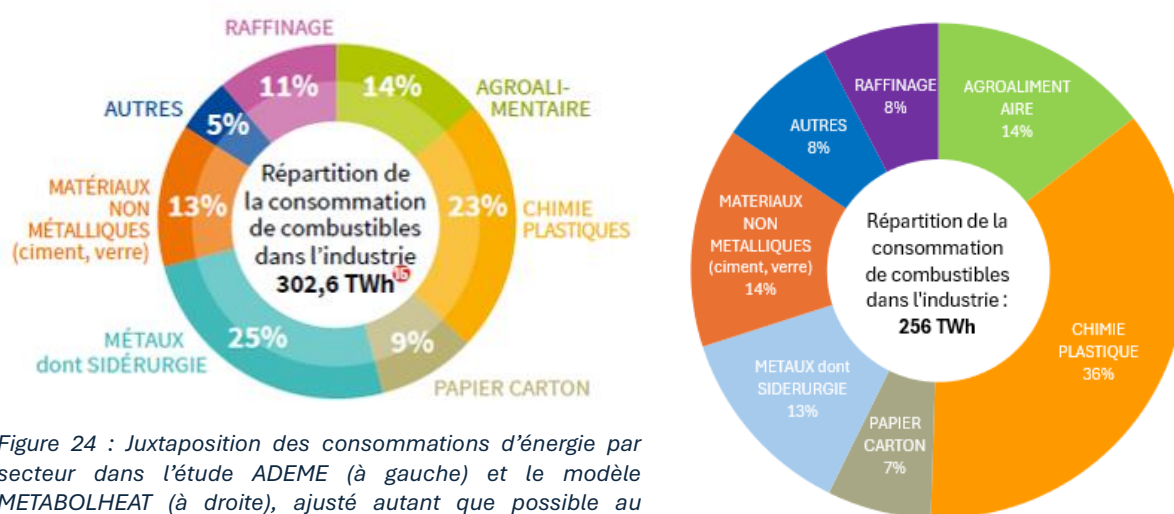


Figure 24 : Juxtaposition des consommations d'énergie par secteur dans l'étude ADEME (à gauche) et le modèle METABOLHEAT (à droite), ajusté autant que possible au périmètre ADEME

Les résultats montrent des écarts significatifs dans la répartition sectorielle des consommations, bien que les ordres de grandeur globaux restent cohérents.

Le volume total est plus faible que l'étude ADEME mais la baisse de l'activité industrielle en France entre 2013 et 2021 peut en être la cause. Par ailleurs, la ventilation des consommations entre secteurs industriels (chimie, agroalimentaire, métallurgie, etc.) diffère sensiblement. Cette divergence est directement liée aux méthodes d'allocation : METABOLHEAT repose sur une approche statistique agrégée, tandis que l'étude ADEME s'appuie sur des données issues d'enquêtes industrielles détaillées (CEREN), permettant une répartition plus fidèle aux réalités sectorielles.

Ces écarts en amont influencent directement les estimations de chaleur fatale, puisque celles-ci sont proportionnelles aux consommations énergétiques.

7.3.3. Comparaison du gisement de chaleur fatale par secteur

Malgré les différences de construction, les résultats montrent une convergence remarquable des volumes totaux de chaleur fatale.

109,5 TWh, soit **36 %** de la consommation de combustibles de l'industrie¹⁴,
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.

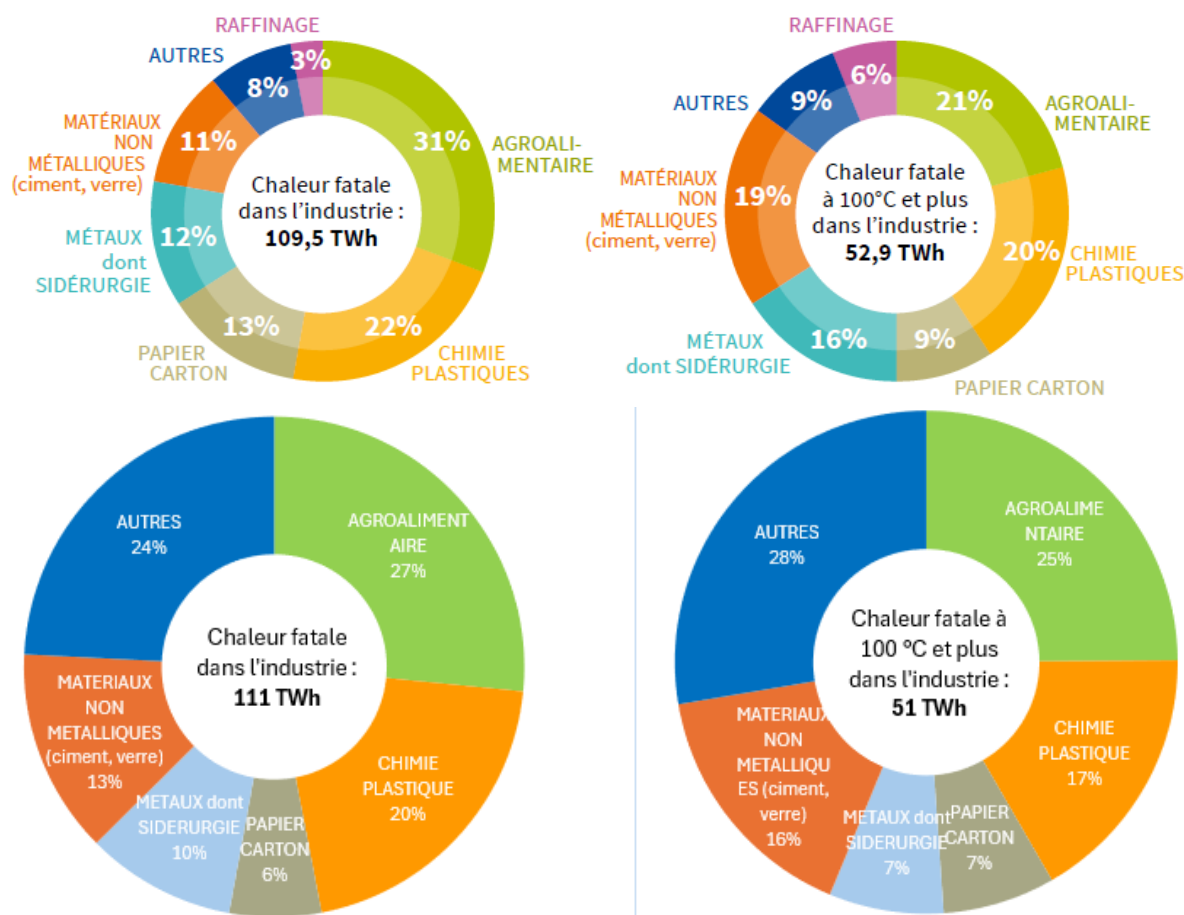


Figure 25 : Juxtaposition des gisements de chaleur fatale par secteur et par niveau de température dans l'étude ADEME (en haut) et le modèle METABOLHEAT (en bas), ajusté autant que possible au périmètre ADEME

L'étude ADEME estime un gisement de 109,5 TWh de chaleur fatale industrielle, dont 52,9 TWh à plus de 100°C. Les estimations issues de METABOLHEAT sont du même ordre de grandeur, ce qui constitue un résultat important de validation. Cependant, cette proximité des volumes globaux peut apparaître « remarquable », voire surprenante au regard des différences méthodologiques. En effet, cette convergence masque des écarts significatifs dans la répartition sectorielle du gisement :

- aucun gisement de chaleur fatale n'a été identifié pour le secteur du raffinage dans METABOLHEAT ;
- la part représentée par les autres industries est largement supérieure aux estimations de l'ADEME ;
- les évolutions entre le gisement de toute la chaleur fatale et celui de la chaleur fatale à 100 °C et plus sont parfois différentes selon les secteurs (la sidérurgie voit sa part diminuer dans METABOLHEAT contrairement à l'ADEME, idem pour l'industrie du papier-carton).

7.3.4. Comparaison du gisement par type de rejets

L'analyse par type de rejets met en évidence des écarts plus marqués entre les deux approches.

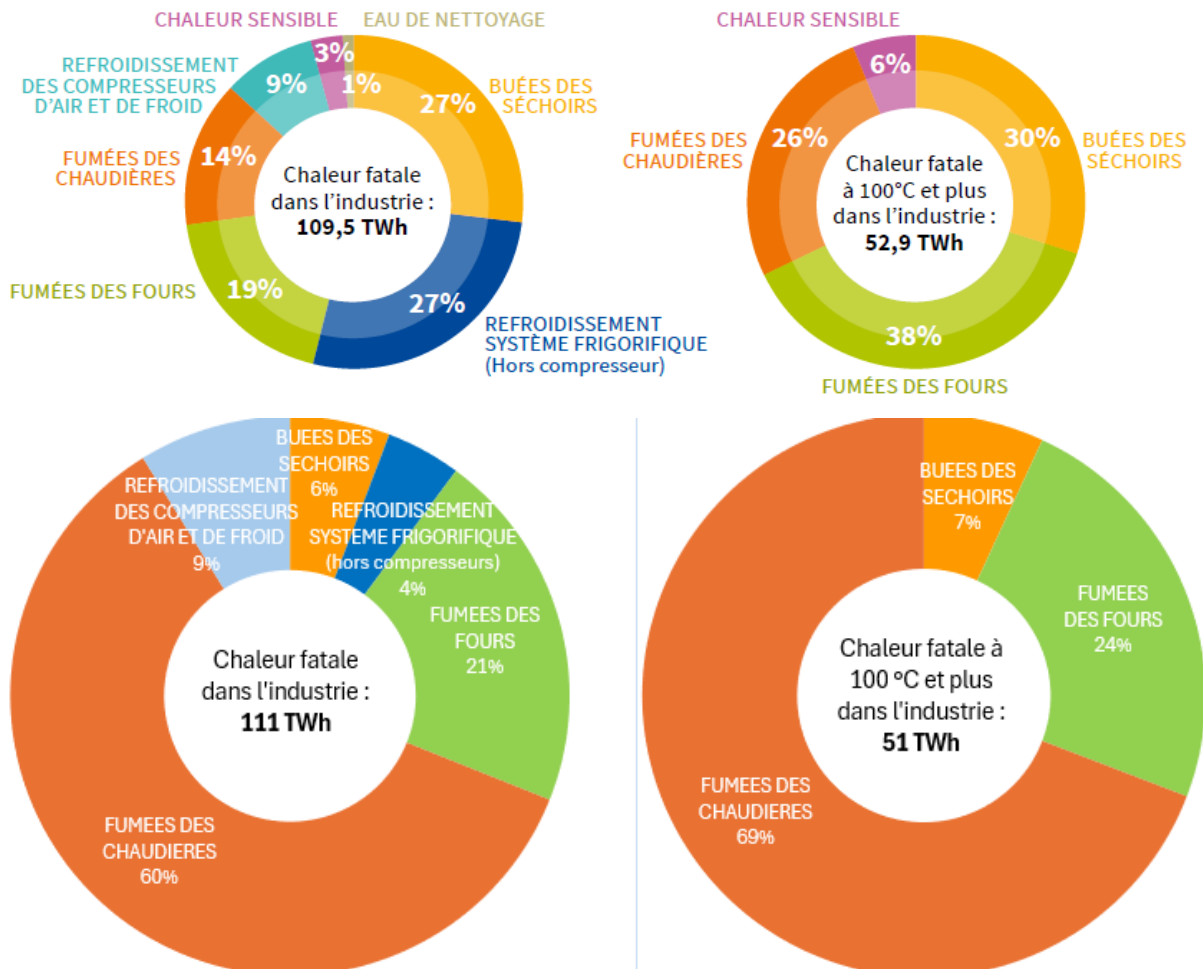


Figure 26 : Juxtaposition des gisements de chaleur fatale par type de rejets et par niveau de température dans l'étude ADEME (en haut) et le modèle METABOLHEAT (en bas), ajusté autant que possible au périmètre ADEME

Ici aussi les volumes totaux de chaleur fatale sont très proches entre les deux études alors que la répartition par type de rejets est sensiblement différente :

- les rejets de chaleur fatale issus de la chaleur sensible et des eaux de nettoyage n'ont pas été quantifiés dans METABOLHEAT ;
- la part de chaleur fatale issue des fumées des chaudières est largement supérieure aux estimations de l'ADEME. Cela rejoint le constat réalisé précédemment concernant la consommation par usage : la correspondance entre les processus de consommation d'énergie industriels de l'ADEME et du JRC est parfois incertaines ce qui explique des transferts de catégories vers les autres dans les usages et les types de rejets ;
- la part concernant le refroidissement des compresseurs semble correspondre à celle de l'ADEME mais celle concernant le refroidissement des systèmes frigorifiques est bien plus faible.

7.3.5. Cas spécifique des UIOM

L'analyse spécifique des UIOM montre une cohérence globale, mais avec des écarts non négligeables.

Tableau 9 : Comparaison des résultats concernant les UIOM

| UIOM | ADEME | METABOLHEAT |
|----------------------------|---------|-------------|
| Consommation de déchets | 36 TWh | 25 TWh |
| Production d'électricité | 3 TWh | 4 TWh |
| Production de chaleur | 9.5 TWh | 9 TWh |
| Gisement de chaleur fatale | 4.4 TWh | 12 TWh |

La consommation de déchets en volume d'énergie est sensiblement différente tandis que la production d'électricité et de chaleur est très proche entre les deux études. Le gisement de chaleur fatale estimé dans METABOLHEAT est quant à lui trois fois supérieur à celui estimé par l'ADEME. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il s'agisse du gisement théoriquement récupérable dans METABOLHEAT, sans tenir compte de critères de faisabilité technique ou économique (cf. section 7.4).

7.3.6. Synthèse des écarts et enseignements

La comparaison met en évidence plusieurs enseignements majeurs. Tout d'abord, elle confirme la robustesse des ordres de grandeur obtenus avec METABOLHEAT. Malgré des méthodologies très différentes, les deux approches convergent vers un gisement de chaleur fatale de l'ordre de 100 TWh, avec une dominance des flux à basse température, ce qui valide la cohérence globale du modèle.

Ensuite, elle met en évidence une forte sensibilité des résultats aux hypothèses de modélisation. La structure des résultats dépend directement des choix relatifs aux rendements, à la ventilation sectorielle et à la représentation des usages énergétiques. Les différences s'expliquent directement par la nature des approches. L'ADEME adopte une démarche bottom-up fondée sur l'identification des procédés et des types de rejets, en intégrant leurs caractéristiques physiques (température, nature du fluide, facilité de captation). À l'inverse, METABOLHEAT adopte une approche top-down dans laquelle les pertes sont déduites globalement, sans distinction explicite des processus générateurs (fortes incertitudes sur les correspondances entre process et types de rejets entre les deux études).

Ainsi, la comparaison met en évidence une limite importante du modèle : la difficulté à caractériser finement la nature physique des flux thermiques, alors même que cette caractérisation est déterminante pour l'évaluation de leur valorisabilité.

Cela souligne la complémentarité des deux approches. METABOLHEAT offre une vision systémique et cohérente du métabolisme énergétique, intégrant l'ensemble des secteurs, tandis que l'étude ADEME fournit une caractérisation fine et physiquement fondée des flux thermiques, orientée vers l'analyse opérationnelle.

Cette analyse comparative constitue un élément clé de validation du modèle. Elle montre que, malgré des simplifications importantes, METABOLHEAT permet de reproduire de manière cohérente les ordres de grandeur des gisements de chaleur fatale à l'échelle nationale.

Cependant, les écarts observés soulignent la nécessité de compléter cette approche par des analyses plus fines, notamment pour toute application opérationnelle liée à la valorisation de la chaleur fatale.

7.4. Limites du potentiel de valorisation de la chaleur fatale

L'un des points essentiels dans l'interprétation des résultats concerne la distinction entre les différents niveaux de gisement de chaleur fatale.

Comme illustré dans la figure 27, il convient de distinguer :

- le **gisement théorique**,
- le **gisement technique**,
- le **gisement économique**.

Ces niveaux sont décroissants :

$$\text{gisement théorique} \geq \text{gisement technique} \geq \text{gisement économique}$$

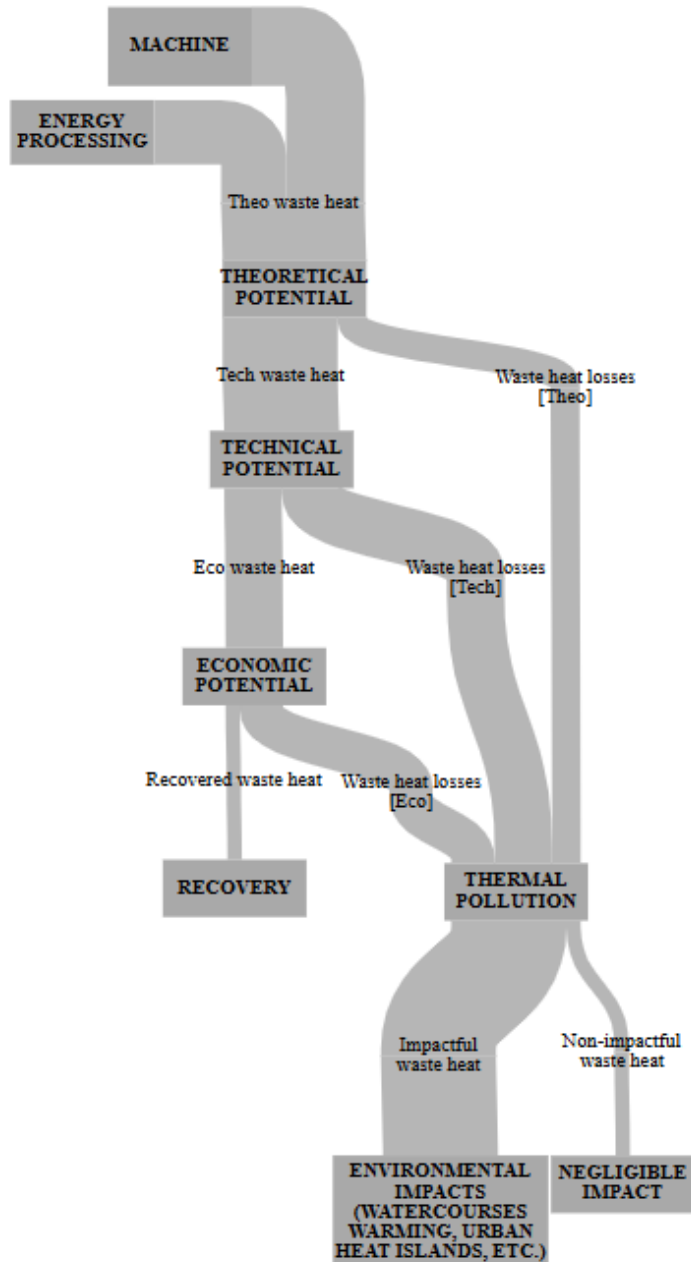


Figure 27 : Décomposition du gisement de chaleur fatale pour son potentiel de récupération, puis son impact environnemental potentiel

Le modèle METABOLHEAT se positionne principalement au niveau du gisement théorique. Or, le passage aux niveaux technique et économique dépend de nombreux facteurs qui ne sont pas intégrés dans le modèle.

Parmi ces facteurs, les contraintes géographiques jouent un rôle déterminant. La valorisation de la chaleur fatale nécessite une proximité entre les sources et les besoins, ou la présence d'infrastructures adaptées (réseaux de chaleur). L'étude ADEME souligne notamment

l'importance de la localisation des gisements par rapport aux réseaux existants pour estimer les potentiels réellement mobilisables.

Par ailleurs, la faisabilité technico-économique constitue une limite majeure. La mise en œuvre de solutions de récupération (échangeurs, pompes à chaleur, stockage thermique, etc.) dépend :

- des niveaux de température,
- de la continuité des flux,
- des coûts d'investissement et d'exploitation.

De plus, certains flux, en particulier les rejets diffus ou de très basse température, sont intrinsèquement difficiles à capter ou à valoriser. Ainsi, le gisement effectivement mobilisable est généralement **très inférieur** au gisement théorique estimé.

La figure 27 met également en évidence qu'au-delà de l'intérêt lié à la réduction de la consommation de ressources énergétiques primaires, la valorisation de la chaleur fatale présente également un enjeu environnemental significatif en matière de limitation des pollutions thermiques. En effet, en l'absence de récupération, cette chaleur est généralement rejetée dans l'environnement extérieur. Selon les quantités mises en jeu et les écarts de température avec le milieu récepteur, ces rejets peuvent engendrer des impacts environnementaux non négligeables, tels que le réchauffement des cours d'eau ou la formation d'îlots de chaleur urbains.

7.5. Limites d'interprétation et portée des résultats

Au-delà des aspects méthodologiques, plusieurs précautions doivent être prises dans l'interprétation des résultats. Tout d'abord, les résultats doivent être compris comme une représentation agrégée du système énergétique, et non comme une description détaillée des situations locales. Ils ne permettent pas, en particulier, d'identifier directement des opportunités concrètes de valorisation à l'échelle d'un site ou d'un territoire. Ensuite, l'absence de prise en compte de la dimension spatiale limite fortement l'analyse. Or, comme le souligne l'ADEME, la valorisation de la chaleur fatale s'inscrit dans une logique territoriale, impliquant des synergies entre acteurs industriels, urbains et énergétiques. Enfin, il convient de souligner que la non-valorisation de la chaleur fatale peut avoir des impacts environnementaux significatifs. Elle se traduit à la fois par une surconsommation de ressources énergétiques — en raison d'un système moins efficace — et par des rejets thermiques dans l'environnement, susceptibles de contribuer à des phénomènes de pollution thermique.

L'analyse critique met en évidence que, malgré une cohérence globale et une robustesse des ordres de grandeur, les résultats du modèle METABOLHEAT doivent être interprétés avec prudence. Ils constituent avant tout un **outil d'analyse systémique**, permettant de comprendre les grands équilibres du métabolisme énergétique et d'identifier les enjeux associés à la chaleur fatale, plutôt qu'un outil d'aide directe à la décision opérationnelle.

8. Conclusion et perspectives

8.1. Rappel des objectifs et du positionnement du projet

Le projet METABOLHEAT s'inscrit dans une démarche d'analyse systémique du métabolisme énergétique, visant à mieux comprendre la circulation, la transformation et la dissipation de l'énergie au sein du système énergétique national. Il accorde une attention particulière aux flux thermiques, souvent peu visibles dans les bilans énergétiques classiques, ainsi qu'à la chaleur

fatale issue des processus de conversion et d'usage de l'énergie. Dans ce cadre, deux objectifs principaux ont guidé les travaux présentés dans ce rapport. Le premier consiste à quantifier de manière cohérente et exhaustive les flux énergétiques aux différentes étapes du système (énergies primaire, finale et utile), en intégrant explicitement les pertes. Le second vise à développer des outils de représentation visuelle, en particulier des diagrammes de Sankey, permettant de restituer ces flux de manière lisible, hiérarchisée et exploitable pour l'analyse.

8.2. Principaux apports méthodologiques

Les travaux réalisés dans le cadre du projet METABOLHEAT apportent plusieurs contributions méthodologiques significatives. En premier lieu, le projet propose une structuration cohérente du système énergétique reposant sur la distinction entre les trois stades de l'énergie (primaire, finale et utile), ainsi que sur l'intégration explicite des pertes énergétiques. Cette approche permet de dépasser les limites des bilans traditionnels, souvent centrés sur l'énergie finale, et d'accéder à une représentation plus complète du fonctionnement thermodynamique du système. En second lieu, un travail approfondi d'assemblage de données hétérogènes a été réalisé. Celui-ci repose sur le croisement de plusieurs sources internationales et nationales (notamment JRC-IDEES, travaux de Brockway et al., Forman et al.), ainsi que sur la construction de tables de correspondance hiérarchisées permettant d'assurer la cohérence entre nomenclatures. Cette méthodologie garantit une traçabilité complète des données et permet de produire des résultats à différents niveaux de granularité, du niveau macro-sectoriel jusqu'au niveau des machines. Enfin, le projet introduit des éléments de modélisation thermodynamique permettant d'intégrer des flux souvent absents des bases de données énergétiques classiques. Cela concerne notamment la prise en compte des systèmes thermodynamiques (pompes à chaleur, systèmes frigorifiques) et la reconstitution des flux de chaleur fatale par bilan énergétique. L'ensemble de ces éléments contribue à proposer une représentation enrichie du système énergétique, intégrant à la fois les quantités et la qualité des flux énergétiques.

8.3. Principaux résultats obtenus

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence plusieurs caractéristiques structurantes du métabolisme énergétique de la France. Tout d'abord, l'analyse met en lumière la structure globale du système énergétique, caractérisée par une forte dépendance à certains secteurs et par une répartition différenciée des flux entre production, transformation et usages finaux. La représentation multi-niveaux développée dans le cadre du projet permet d'appréhender cette complexité de manière cohérente.

Ensuite, les résultats soulignent le rôle central des flux thermiques. Une part significative de l'énergie consommée est utilisée sous forme de chaleur, en particulier pour des usages tels que le chauffage, la production d'eau chaude ou certains procédés industriels. Parallèlement, une fraction importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur fatale, révélant l'ampleur des pertes thermiques dans le système.

8.4. Apports des représentations visuelles

Un des apports majeurs du projet réside dans le développement de représentations visuelles adaptées à l'analyse du système énergétique.

Les diagrammes de Sankey, en particulier, permettent de représenter simultanément la structure, les volumes et les transformations des flux énergétiques. Leur caractère hiérarchique offre la possibilité de naviguer entre différents niveaux de détail, depuis une vision globale du système jusqu'à une analyse fine par secteur, usage ou type de machine.

Ces représentations facilitent l'identification des principaux postes de consommation et des zones de pertes, contribuant ainsi à une meilleure compréhension du fonctionnement énergétique global. Elles constituent également des outils pédagogiques puissants, permettant de rendre accessibles des informations complexes à différents types d'acteurs. En complément, d'autres types de visualisations (diagrammes circulaires, histogrammes) permettent de mettre en évidence des répartitions spécifiques et de renforcer l'analyse quantitative.

8.5. Limites du travail

Malgré les apports du projet, plusieurs limites doivent être soulignées. Les résultats reposent tout d'abord sur un ensemble d'hypothèses et d'estimations, notamment en ce qui concerne les rendements énergétiques (Forman), la ventilation des usages (JRC) et la reconstitution des flux thermiques. Ces choix peuvent influencer la structure des résultats et introduire des incertitudes. Par ailleurs, le modèle ne permet pas de représenter de manière détaillée la physique des procédés industriels, ce qui limite sa capacité à caractériser finement la nature des flux de chaleur fatale. Enfin, certaines dimensions essentielles pour l'évaluation opérationnelle du potentiel de valorisation, telles que les contraintes géographiques ou la faisabilité technico-économique, ne sont pas prises en compte dans le cadre de ce travail.

8.6. Perspectives de recherche et d'application

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées afin de prolonger et d'enrichir les travaux réalisés. Une première voie d'amélioration concerne le modèle lui-même, avec la possibilité d'intégrer des données plus détaillées, d'affiner les hypothèses de rendement et de mieux représenter les procédés générateurs de chaleur fatale. Une seconde perspective réside dans l'application du modèle à des échelles territoriales plus fines, notamment à l'échelle de métropoles telles que Lyon, Grenoble ou Lille. Une telle approche permettrait de mieux prendre en compte les spécificités locales et de rapprocher l'analyse des enjeux opérationnels. Par ailleurs, l'intégration de critères géographiques et économiques permettrait d'évaluer plus précisément le potentiel réel de valorisation de la chaleur fatale, en distinguant le gisement théorique du potentiel effectivement mobilisable. De plus, une représentation plus fine des réseaux de chaleur existants pourrait permettre de faire un lien plus concret entre le gisement de chaleur fatale et sa valorisation. Enfin, le modèle pourrait être étendu à l'analyse d'autres enjeux, tels que les impacts environnementaux liés aux rejets thermiques ou l'intégration dans des scénarios de transition énergétique.

8.7. Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce rapport montrent que le projet METABOLHEAT permet de proposer une représentation cohérente et enrichie du système énergétique, intégrant à la fois les flux énergétiques, les pertes thermiques et leur structuration à différents niveaux d'analyse. En mettant en évidence des flux souvent invisibles dans les bilans traditionnels, en particulier la chaleur fatale, le projet contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement thermodynamique du système énergétique et des marges d'amélioration associées. Bien que certaines limites subsistent, notamment en ce qui concerne la représentation fine des procédés et l'évaluation opérationnelle des potentiels de valorisation, METABOLHEAT constitue une base solide pour le développement d'analyses plus détaillées et pour l'exploration de nouvelles approches de la transition énergétique.

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Les trois stades de l'énergie (exemples pétrole → essence → propulsion et uranium → électricité → propulsion)..... | 4 |
| Figure 2 : Comparaison entre analyse énergétique (gauche) et analyse exergétique (droite) dans le cas d'une centrale nucléaire et d'un radiateur électrique. | 6 |
| Figure 3 : Périmètre d'étude des sources mobilisables (modèle France) Lecture : en points, le périmètre des objectifs du projet ; en courbe, le périmètre des sources statistiques mobilisables. | 14 |
| Figure 4 : Échelle d'étude des sources mobilisables (modèle France) Lecture : en fond, l'échelle des objectifs du projet ; en points, l'échelle du modèle METABOLHEAT en cours ; en courbe, l'échelle des sources statistiques mobilisables. | 15 |
| Figure 5 : Illustration d'un processus de conversion d'énergie et des flux thermiques associés (d'après Forman et al.)..... | 26 |
| Figure 6 : Exemple de représentation d'un système thermodynamique (climatiseur) et des flux énergétiques associés..... | 27 |
| Figure 7 : Exemple de diagramme de Sankey détaillé pour le secteur des transports : branche des voitures particulières détaillée..... | 32 |
| Figure 8 : Représentation de l'énergie utile dans la première version du modèle basée sur CL-PFU..... | 33 |
| Figure 9 : Représentation des flux thermiques d'un système frigorifique..... | 34 |
| Figure 10 : Métabolisme énergétique de la France en 2021 : flux d'énergie primaire, finale et utile (modèle METABOLHEAT)..... | 36 |
| Figure 11 : Exemple de désagrégation sectorielle du modèle METABOLHEAT : flux énergétiques du secteur résidentiel (France, 2021)..... | 37 |
| Figure 12 : Consommation d'énergie par type d'énergie aux trois stades du système énergétique : primaire, finale et utile (France, 2021)..... | 39 |
| Figure 13 : Consommation d'énergie par secteur aux trois stades de l'énergie (France, 2021) ... | 40 |
| Figure 14 : Évolution de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine par source d'énergie (1970–2023) | 41 |
| Figure 15 : Évolution de l'approvisionnement énergétique français : production nationale et importations (1970–2023)..... | 42 |
| Figure 16 : Évolution de la consommation d'énergie finale par vecteur énergétique (1970–2023) | 42 |
| Figure 17 : Évolution de la consommation d'énergie finale par secteur (1970–2023) | 43 |
| Figure 18 : Répartition de la consommation d'énergie finale par usage énergétique en France (2021) | 44 |
| Figure 19 : Répartition de la consommation d'énergie pour le chauffage par secteur et par vecteur énergétique (France, 2021) | 45 |
| Figure 20 : Flux thermiques dans la filière énergétique française : besoins utiles et rejets thermiques (France, 2021) | 46 |
| Figure 21 : Répartition sectorielle et thermique de la chaleur fatale en France (2021) | 47 |
| Figure 22 : Périmètre industriel de l'étude ADEME projeté en bleu sur le modèle METABOLHEAT | 50 |
| Figure 23 : Juxtaposition des consommations d'énergie par usage dans l'étude ADEME (à gauche) et le modèle METABOLHEAT (à droite), ajusté autant que possible au périmètre ADEME | 51 |

| | |
|---|----|
| Figure 24 : Juxtaposition des consommations d'énergie par secteur dans l'étude ADEME (à gauche) et le modèle METABOLHEAT (à droite), ajusté autant que possible au périmètre ADEME | 52 |
| Figure 25 : Juxtaposition des gisements de chaleur fatale par secteur et par niveau de température dans l'étude ADEME (en haut) et le modèle METABOLHEAT (en bas), ajusté autant que possible au périmètre ADEME | 53 |
| Figure 26 : Juxtaposition des gisements de chaleur fatale par type de rejets et par niveau de température dans l'étude ADEME (en haut) et le modèle METABOLHEAT (en bas), ajusté autant que possible au périmètre ADEME | 54 |
| Figure 27 : Décomposition du gisement de chaleur fatale pour son potentiel de récupération, puis son impact environnemental potentiel..... | 56 |

Table des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Ratios Energie/Exergie par vecteur énergétique..... | 6 |
| Tableau 2 : Définition et rôle des empreintes énergétiques et exergétiques | 8 |
| Tableau 3 : Liste des principales unités énergétiques | 10 |
| Tableau 4 : Définition et interprétation des différents types de pouvoirs calorifiques | 11 |
| Tableau 5 : Définition des données corrigées des variations climatiques..... | 11 |
| Tableau 6 : Liste des sources de données énergétiques à l'échelle nationale | 12 |
| Tableau 7 : Comparaison des deux versions du modèle national | 24 |
| Tableau 8 : Comparaison des périmètres entre l'étude ADEME et le modèle METABOLHEAT | 50 |
| Tableau 9 : Comparaison des résultats concernant les UIOM | 55 |

Table des annexes

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Cartographie détaillée des jeux de données concernant l'échelle nationale | 62 |
|--|----|

