



POTENTIEL DE RECUPERATION DE CHALEUR FATALE

Méthodologie

SEPTEMBRE 2025

Sous le pilotage de :



Opéré par :



REVISIONS DU DOCUMENT

Version	Date	Rédacteurs	Commentaires
V0	30/01/2025	Samba-Fall DIOP AURA-EE	
V1	03/02/2025	Samba-Fall DIOP AURA-EE	
V2	24/03/2025	Nicolas PICOU	
V3	24/03/2025	Yolande RAVAUD	

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	3
1.1 Contexte et objectifs de l'étude.....	3
2. Méthodologie	3
2.1 Cadre général	3
2.1.1 Calcul de la chaleur fatale disponible	3
2.1.2 Régime de température	4
2.2 Le secteur industriel	5
2.2.1 Méthode de calcul	5
2.2.2 Calcul de la consommation par établissement	5
2.2.3 Estimation de la chaleur fatale récupérable	7
2.2.4 Calcul du nombre d'employés par secteur	7
2.2.5 Calcul du rendement global η_s des secteurs	8
2.2.6 Suppression des doubles comptages	9
2.3 Le secteur « incinérateurs »	9
2.4 Le secteur « cimenteries »	9
2.5 Le secteur « station d'épuration	9
2.6 Le secteur « méthanisation »	10
2.7 Le secteur « stations thermales »	10
3. Glossaire	10

1. Introduction

1.1 Contexte et objectifs de l'étude

Ce document a pour but de détailler la méthodologie d'estimation du potentiel de récupération de chaleur fatale en région Auvergne-Rhône-Alpes.

Également appelée chaleur résiduelle ou chaleur perdue, il s'agit de l'énergie thermique produite par des processus industriels ou des équipements qui n'est pas utilisée et est généralement rejetée dans l'environnement. Cette chaleur peut provenir de diverses sources telles que les cheminées d'usines, les systèmes de refroidissement, les incinérateurs, et même les centres de données.

Dans le SRADDET, l'objectif de valorisation de chaleur fatale est estimé à 271 GWh/an en 2030 (hors UIOM). Dans ce contexte, il est essentiel d'avoir un aperçu sur l'état actuel des gisements de chaleur résiduelle en région.

2. Méthodologie

2.1 Cadre général

2.1.1 Calcul de la chaleur fatale disponible

La méthodologie pour estimer le potentiel de chaleur fatale en Auvergne-Rhône-Alpes est différenciée selon les secteurs considérés :

- Le secteur industriel, hors cimenteries et hors incinérateurs ;
- Les cimenteries ;
- Les incinérateurs ;
- Les entrepôts frigorifiques ;
- Les stations d'épuration ;
- Les stations thermales ;
- Les unités de méthanisation.

Les méthodes de calcul reposent sur les données les plus précises qui soient à disposition.

2.1.2 Régime de température

Le niveau de température de la chaleur récupérée est une information importante pour évaluer les possibilités de valorisation, notamment pour le raccordement à un réseau de chaleur existant.

Selon les secteurs et/ou les rubriques ICPE concernées, les régimes de température définis sont les suivants :

Secteur	Catégorie ICPE	Branche	Régime de température
Industrie	Combustion 2910, 3110	Industrie agro-alimentaire, imprimerie, électronique, enrobés, fabrication de produits non métalliques	Basse température (<80°C)
		Métallurgie, traitement des déchets	Haute température (>400°C)
		Autres secteurs	Moyenne température (<150°C)
	Fonderie (2551,2252,3240,3250) laminoirs et forgeage (3230)		Haute température (>400°C)
	Chauffage par bains de sels fondus		Moyenne température (<150°C)
	Entrepôt frigorifique (1511), réfrigération (2920), refroidissement évaporatif (2921)		Basse température (<80°C)
Incinérateurs			Haute température (>400°C)
Cimenteries			Haute température (>400°C)
Station d'épuration			Très basse température <40°C)
Stations thermales			Très basse température <40°C)
Méthanisation			Température moyenne (>150°C)

2.2 Le secteur industriel

2.2.1 Méthode de calcul

La méthodologie pour le secteur industriel est effectuée par établissement et s'inspire de la formule de calcul de la chaleur excédentaire par secteur industriel proposée par l'article de ZUBERI et al (2018) intitulé « *Excess heat recovery : an invisible energy resource for the Swiss industry sector* ». Cette étude évalue le potentiel de récupération de chaleur excédentaire techno-économique dans l'industrie suisse et fournit une cartographie de ce potentiel par niveau de température.

La formule de calcul de la chaleur excédentaire est la suivante :

$$Q_{loss,H} = \left(\frac{Q_{in,s}}{NEs} \right) * NEh * (1 - \eta_s)$$

Avec :

- $Q_{in,s}$: demande (ou consommation) de chaleur process pour un secteur s
- NEs : nombre d'employés dans le secteur s
- NEh : nombre d'employés par hectare dans la localisation géographique considérée
- η_s : efficacité énergétique pour un secteur s

2.2.2 Calcul de la consommation par établissement

Les calculs sont faits à partir de la valeur renseignée par établissement ICPE et par rubrique, qui peut être soit une puissance installée, un volume (ex. m³, L), ou une surface (ex. m²).

Une hypothèse est faite sur le nombre d'heures de fonctionnement et sur l'hypothèse d'un ratio en kWh par unité afin de convertir ces mesures en énergie.

Ci-après, le tableau des hypothèses par rubrique ICPE :

Rubrique ICPE	Libellé	Unité	kWh/unité	Nombre heures de fonctionnement
1511	Entrepôts frigorifiques	m ³	49.37	8760
2551	Fonderie (fabrication produits moulés) métaux et alliages ferreux	t/jours	37780	5000
2552	Fonderie (fabrication de produits moulés) métaux et alliages non ferreux	t/jours	35000	5000
2562	Chauffage par bains de sels fondus	L	4	5000
2910	Combustion	kW, m ³		3000
2920	Réfrigération ou compression	kW		8760
2921	Installations de refroidissement évaporatif	kW, m ² , m ³		3000
3110	Combustion	kW		3000
3230	Opérations de forgeage	kW, t/jours	3500	3000
3240	Exploitation de fonderies de métaux ferreux	kW		5000
3250	Fonderie du plomb et du cadmium	t/jours, kW	35000	5000

Le calcul de Q_{in} varie en fonction de l'unité de mesure de la valeur suivie par ICPE. On présente les différentes formules appliquées ci-dessous par type d'unité de mesure :

- Valeur en kW :

$$Q_{in} = V_{kW} * nb \text{ heures fonctionnement}$$

- Valeur en m³ :

$$Q_{in} = V_{m^3} * kWh/m^3$$

- Valeur en tonnes/jours :

$$Q_{in} = V_{t/j} * 365j * kWh/t$$

- Valeur en litres :

$$Q_{in} = V_l * 365j * kWh/l$$

Pour cette dernière formule, l'hypothèse implicite qu'il s'agit de litres par jour est faite mais cela n'apparaît ni dans les données ICPE, ni dans la fiche de nomenclature de la rubrique concernée (2562).

2.2.3 Estimation de la chaleur fatale récupérable

Cette approche s'appuie sur les données individuelles des entreprises de la base de données de ICPE pour estimer la chaleur récupérable. Dans cette source, seules certaines rubriques ont été sélectionnées pour les calculs. Elles sont listées dans la section sur le calcul des consommations.

Les formules de calcul utilisées pour calculer la chaleur perdue diffèrent cependant de celles de l'article mentionné ci-dessus.

La chaleur perdue se calcule en fonction de l'unité renseignée dans la rubrique de la base ICPE concernée :

- Lorsque l'unité de la nomenclature ICPE utilisée est en kW :

$$Q_{loss} = Q_{in} * \frac{NE_{icpe}}{NE_{secteur,commune}} * (1 - \eta_s)$$

Avec NE_{icpe} = le nombre d'employés par établissement et $NE_{secteur,commune}$ = la somme des emplois des établissements par secteur NA17i et par commune.

- Lorsque l'unité est différente du kW :

$$Q_{loss} = Q_{in}$$

Pour la chaleur récupérable, on applique une hypothèse de 65% de taux de récupération :

$$Q_{recup} = Q_{loss} * 0.65$$

Nous détaillons les étapes de calcul dans les sections suivantes.

2.2.4 Calcul du nombre d'employés par secteur

La base de données INSEE par Siret des établissements a été utilisée afin de récupérer les informations sur leur nombre de salariés, leur catégorie (PME, ETI, GE), etc.

<https://api.insee.fr/catalogue/site/themes/wso2/subthemes/insee/pages/item-info.jag?name=Sirene&version=V3.11&provider=insee>

Hypothèse :

Pour les entreprises pour lesquelles on n'a pas pu obtenir le nombre de salariés, une valeur moyenne calculée à partir des données renseignées est attribuée selon la catégorie de l'entreprise.

Le calcul de la colonne NEs se fait en sommant le nombre de salariés par établissement par commune et par secteur NA17i.

2.2.5 Calcul du rendement global η_s des secteurs

Les calculs sont faits à partir de la valeur renseignée par établissement ICPE et par rubrique, qui peut être soit une puissance installée, un volume (ex. m³, L), ou une surface (ex. m²). Une hypothèse est faite sur le nombre d'heures de fonctionnement et sur l'hypothèse d'un ratio en kWh par unité afin de convertir ces mesures en énergie.

Ci-après, le tableau des hypothèses par rubrique ICPE :

Combustible	Rendement moyen	Unité	Remarques
Gaz naturel et autres gaz	45	%	Rendement de conversion selon le lien [24]
Biogaz et biométhane	45	%	
Coke de pétrole	58,33	%	Moyenne rendement fioul Rapport UNIGE 2018, faute d'indisponibilité de chiffres
Butane propane	45	%	
Fioul lourd	33	%	
Fioul domestique	65	%	Cf. rapport UNIGE 2018[12]
Gazole non routier	36	%	
Autres produits pétroliers	58,33	%	Moyenne rendement fioul Rapport UNIGE 2018, faute d'indisponibilité de chiffres
Liqueurs noires	0	%	Pas de données d'appréciation, hormis sur la cogénération 66%
Bois et sous-produit du bois	77,5	%	Compris entre 0,7 et 0,85 : bois déchiqueté, granulé de bois, plaquette forestière, bois de récupération
Hydrogène	30	%	Estimation pile à combustible le lien [25]
Combustibles spéciaux renouvelables	45	%	Biomasse
Combustibles spéciaux non renouvelables	35	%	Charbon
Achats de vapeur	50	%	Cf. Rapport 2010 energy utilisations[14]
Électricité	86,67	%	Moyenne rendement élec Rapport UNIGE 2018, faute d'indisponibilité de chiffres jusque-là

TABLE 8 – Rendements moyens source d'énergie + système industriel

Ensuite on calcule la proportion de chaque combustible par secteur avant d'estimer le rendement par secteur. (source :

https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/6967797/naf_T1.csv)

Pour cette dernière étape, il s'agit de la somme des produits de rendements moyens par combustible et le pourcentage de consommation de combustible pour chaque secteur. Autrement dit, il s'agit du produit matriciel entre la matrice des parts de consommation de combustible k par secteur i et le vecteur des rendements moyen combustible η_k :

$$\eta_s = \sum_{k=1}^n C_{ik} \eta_k$$

K représentant les combustibles et i le secteur d'activité.

2.2.6 Suppression des doubles comptages

Pour les établissements qui répondent à plusieurs rubriques ICPE dont la rubrique 2921 : Installation de refroidissement évaporatif, et soit combustion (2910, 3110) soit fonderie 2551, 2552, 3240, 3250) afin d'éviter les doubles comptages, la chaleur récupérable sur la rubrique 2910 a été soustraite de celle de la rubrique combustion. Dans le cas où le résultat est négatif, la chaleur récupérable sur la rubrique 2910 a été considérée comme nulle.

2.3 Le secteur « incinérateurs »

Pour le secteur incinérateurs, les données utilisées proviennent de l'enquête annuelle de l'ORDEC, où les incinérateurs renseignent leur quantité d'énergie issue des déchets en entrée, et la quantité d'électricité produite ainsi que la chaleur valorisée.

Le gisement de chaleur fatale est calculé comme la différence de rendement réel de l'installation par rapport à un rendement théorique moyen de 75%.

2.4 Le secteur « cimenteries »

Pour le secteur cimenteries, les données utilisées proviennent de l'enquête annuelle de l'ORDEC, où les établissements déclarent les quantités d'énergie déchets en entrée et la quantité de chaleur récupérée pour valorisation.

Le gisement de chaleur fatale est calculé comme la différence entre le rendement théorique de 60% et l'énergie réellement valorisée.

2.5 Le secteur « station d'épuration

Pour les stations d'épuration, seules les stations d'une capacité de plus de 20 000 équivalent habitants sont considérées.

Pour le calcul du gisement de chaleur fatale, la chaleur valorisable Erecup est déterminée par la formule :

$$E_{recup} = Q \times p \times DT \times h \times r$$

Où

- Q = débit moyen de la station en m³/h
- P = Chaleur spécifique de l'eau : 1163 Wh/L
- DT : différentiel de température théorique entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, par convention de 5°C
- h : durée de fonctionnement de l'installation (1400h/an)
- r : rendement de l'installation de pompe à chaleur : 200%

2.6 Le secteur « méthanisation »

Pour le secteur méthanisation, les données issues de l'observatoire régional permettent de disposer directement des quantités d'énergie thermique disponibles, pour les méthaniseurs en cogénération.

2.7 Le secteur « stations thermales »

Pour les stations thermales, les données sont issues des données de l'ARS sur le nombre de curistes par station thermique, multiplié par un ratio issu d'une étude de l'ADEME de la filière, de 0,174 MWh de chaleur fatale rejetée par curiste.

3. Glossaire

- ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement
- INSEE : Institut National de Statistiques et des Etudes Economiques
- kW : unité de puissance électrique ou thermique
- Q_{in} : Quantité d'énergie consommée par l'établissement
- Q_{loss} : Quantité de chaleur perdue par le process de l'établissement