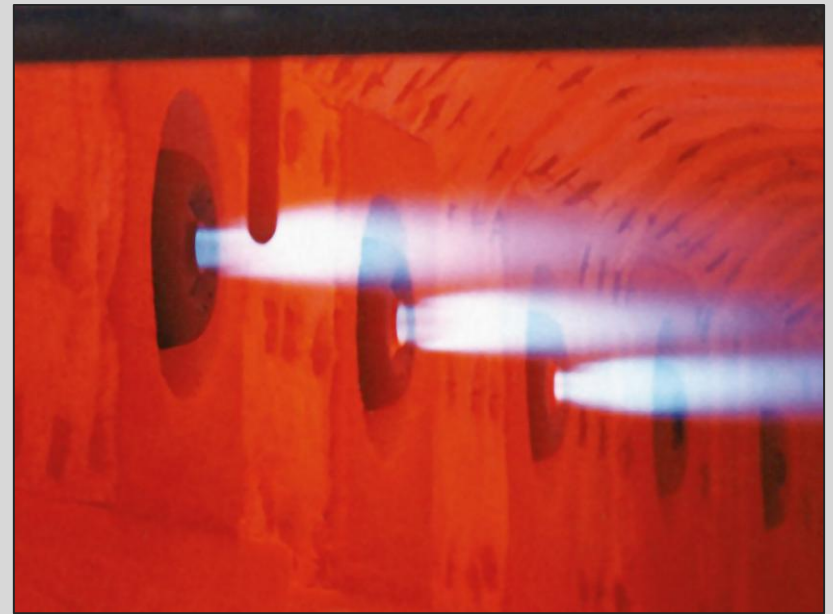


2A - Concevoir - Analyse Cycle de Vie

Dimensionnement Ligne de Forgeage

Approche Technique - Economique - Environnementale (1h20)



J. Artozoul – E. Pessard



Arts
et Métiers
Sciences et
Technologies

Promesse Arts et Métiers

Arts et Métiers forme des leaders des industries responsables, **acteurs de terrain** qui créent et mettent en œuvre les innovations **technologiques** et organisationnelles impactantes, indispensables aux transitions énergétique, sociétale et environnementale



Objectif de la séquence :

Appliquer ses connaissances scientifiques à des problèmes concrets autour des procédés et des matériaux

Quantifier, modéliser, estimer

Sens du concret

Séquence GIM2 - Concevoir

A l'issue de l'UE, l'étudiant sera capable de :

- Concevoir, modéliser et optimiser un produit ou un système mécanique en intégrant ses fonctions techniques, ses contraintes géométriques, ses interactions physiques avec l'environnement et ses impacts environnementaux (méthodes d'optimisation, outils numériques de simulation, démarche d'analyse de cycle de vie ...)

Analyse Cycle de Vie
(16h)

ACV
5h20 ED

ACV_DePI
1h20 ED
4h TPf *

ACV_Rectif
1h20 ED
4h00 TPf *

Coefficient 1

Conception et
Génération Surfaces
Complexes

Partie Conception
4h00 ED *

Partie Génération
5h20 ED
4h00 TPf *
4h00 TPf *

Coefficient 1

Séquence
Simulation
Numérique des PRCD

1h20 ED
2h40 ED
12h00 TPf *
(Forge ou
Fonderie)

Coefficient 1

Impact Procédés
matériau

Axe Fonderie
4h00 ED
8h00 TPf *

Axe DePI
2h40 ED
4h00 TPf *

Coefficient 1

* Evaluations

Séquence GIM2 - Concevoir

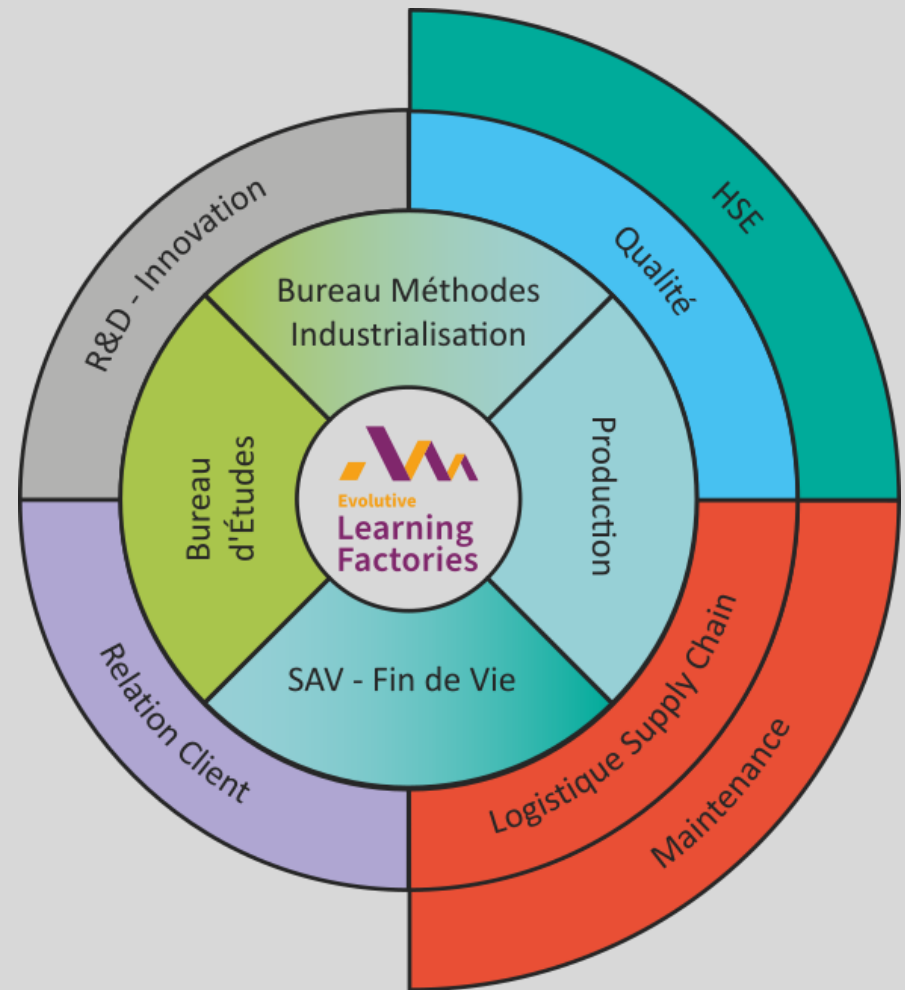
A l'issue de l'UE, l'étudiant sera capable de :

- Concevoir, modéliser et optimiser un produit ou un système mécanique en intégrant ses fonctions techniques, ses contraintes géométriques, ses interactions physiques avec l'environnement et ses impacts environnementaux (méthodes d'optimisation, outils numériques de simulation, démarche d'analyse de cycle de vie ...)

Poids	Module	type	coeff	Remarque
1	Analyse Cycle de Vie	Test	1	
	Analyse Cycle de Vie	Note TP	0,5	Regroupe les 2 TPs
1	Génération de surfaces	Test	1	Effectué pendant dernier ED CAO
	Génération de surfaces	Livable	0,6	Evaluation travail TPs Modulation suite déroulement TPf
1	Interaction Procédé Matériau	Note TP	0,5	Regroupe 3 TPf (μ -test en début de séance + déroulement TP)
	Interaction Procédé Matériau	Test	1	
1	Simu Procédés	Test	1	Effectué pendant dernier TPs SIMU
	Simu Procédés	Livable	1	Rapport de projet + mise en données
	Simu Procédés	Note TP	1	Evaluation individuelle pendant le projet

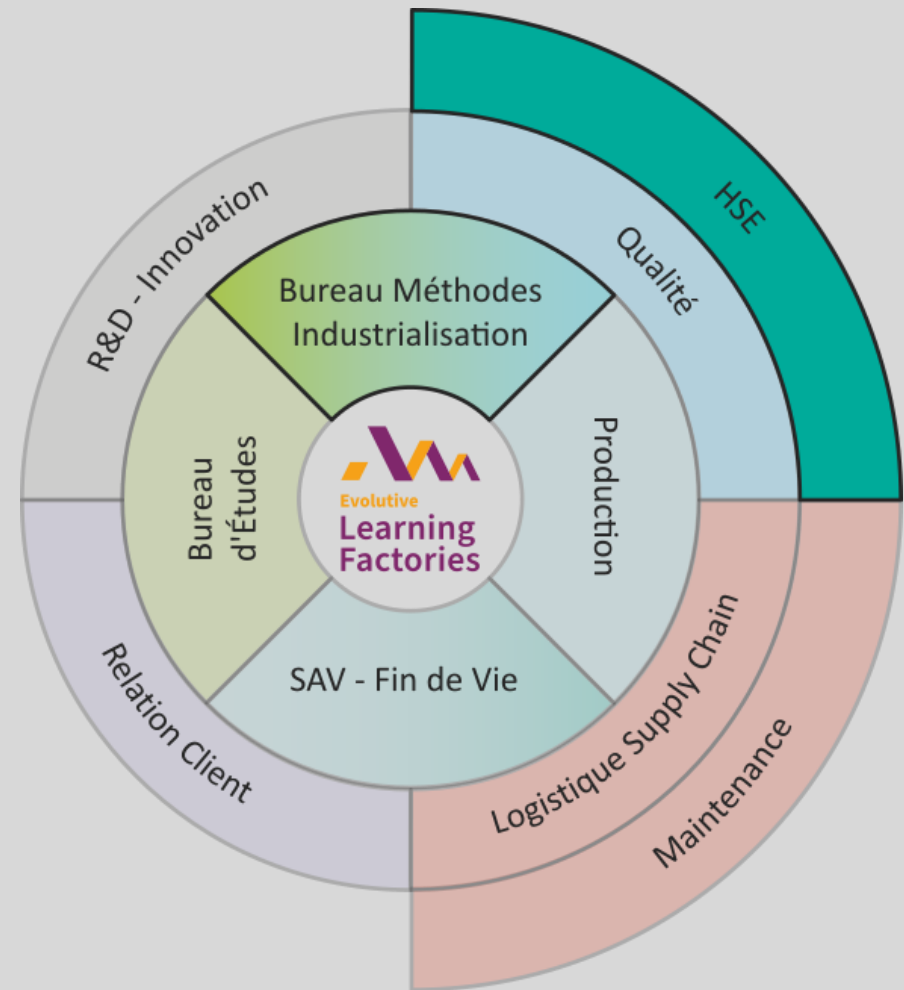
Dimensionnement Ligne de Forgeage

- Services de l'industrie



Dimensionnement Ligne de Forgeage

- Services de l'industrie



Plan de la présentation

1

Aspect Technique : Thermique

2

Cas de chauffe et refroidissement

3

Cas d'auto-échauffement

4

Aspect Eco. et Environnemental

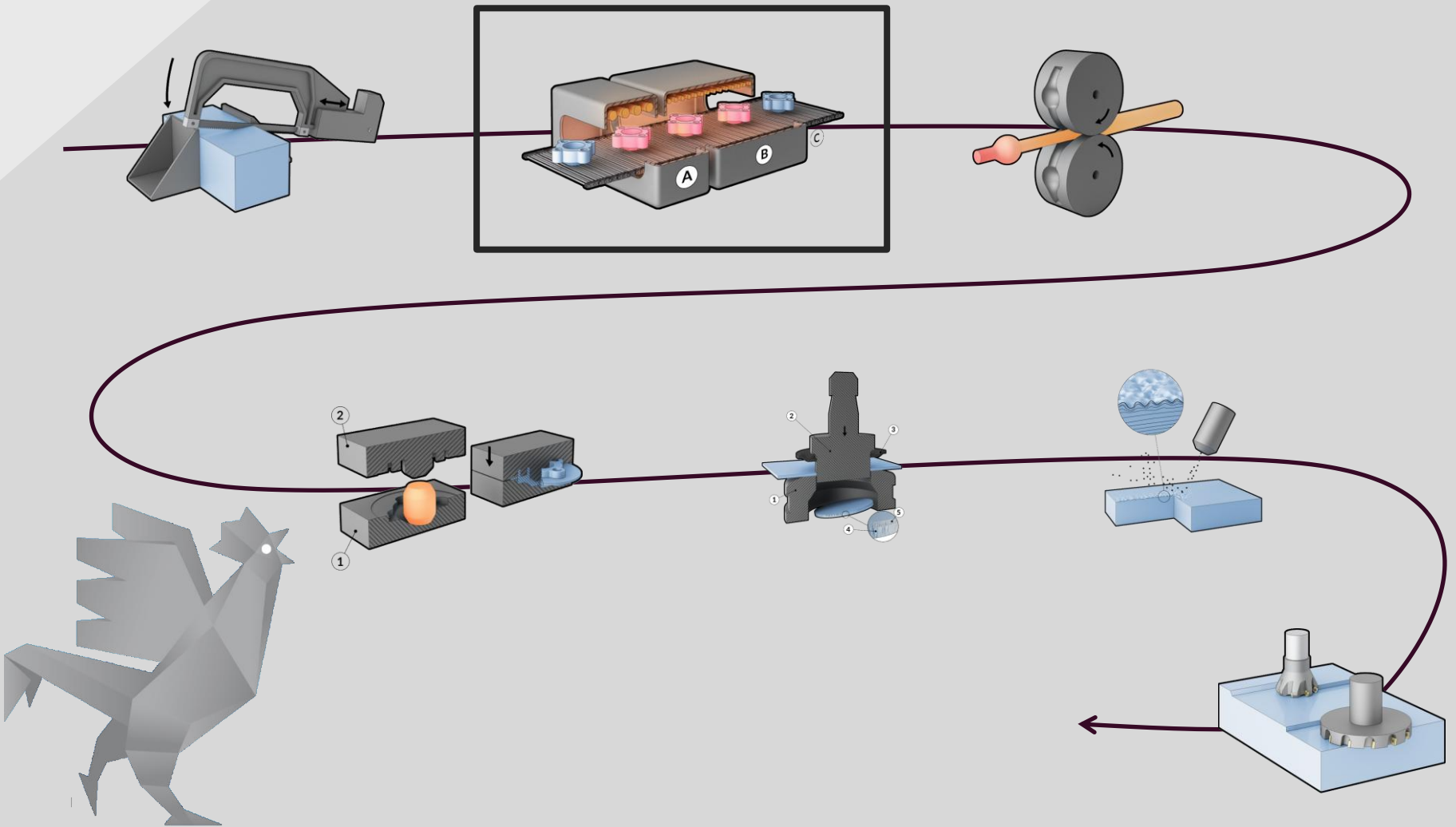
5

Résumé



Arts Sciences et
Technologies
et Métiers

Ligne de Fabrication Produit Forgé



Ligne de Fabrication Produit Forgé

Aspect Technique

Aspect Economique

Aspect Environnemental



Plan de la présentation

1

Rappel de thermique

2

Cas de chauffe et refroidissement

3

Cas d'auto-échauffement

4

Aspect Eco. et Environnemental

5

Résumé

Thermique

(*EN – Thermal engineering*)

Les échanges thermiques jouent un rôle tout aussi prépondérant dans les opérations de forgeage :

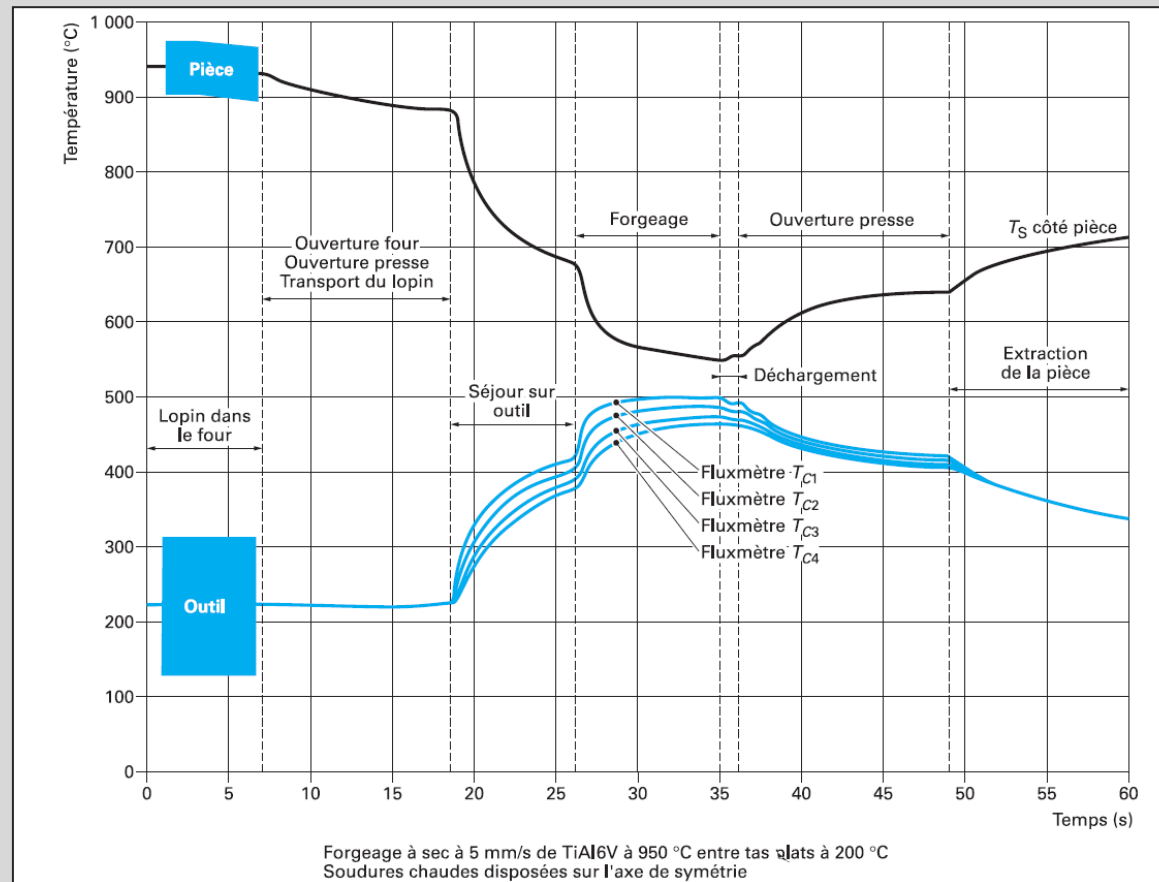


- ils influent sur le **comportement du matériau**
- les **gradients de température** induisent des gradients de comportement
- ils pilotent aussi les **déformations** et **contraintes résiduelles** de la pièce
- ils influent sur la qualité **métallurgique** et les **propriétés** de la pièce forgée
- ils influent aussi sur l'**usure** des outillages

Thermique

(EN – Thermal engineering)

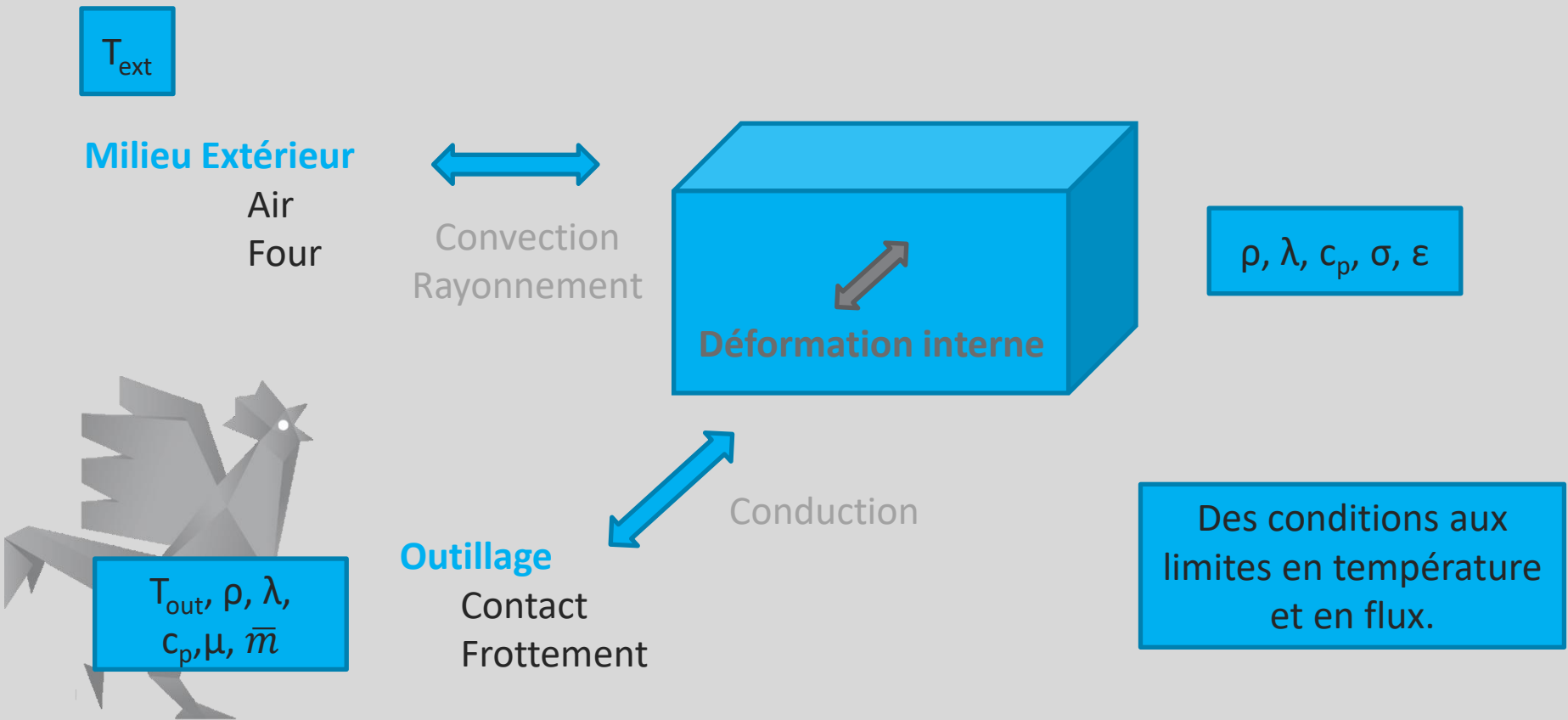
Comment peut-on appréhender, modéliser ces échanges?



Thermique

(EN – Thermal engineering)

Bilan thermique



Thermique

(EN – Thermal engineering)

Comment peut-on appréhender, modéliser ces échanges?

Le long de la chaîne de fabrication on étudiera :

- Cas chauffe Lopin dans le four
- Cas refroidissement (transfert et forgeage)
- Cas de l'auto-échauffement (forgeage)



Thermique

(EN – Heat equation)

- Equation de la chaleur

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \operatorname{div} \left(\overrightarrow{\operatorname{grad}}(T) \right) = \dot{W}$$

ρ	masse volumique	[kg/m ³]
c_p	capacité thermique massique	[J/(kg.K)]
λ	conductivité thermique	[W/(m.K)]
$\dot{W}$	source chaleur volumique	[W/m ³]



Thermique

(EN – Heat transfer)

- Echanges thermiques

Quelques rappel de vocabulaire

Q

quantité de chaleur [J]

énergie

$\dot{Q} = \Phi$

flux [W]

quantité de chaleur par seconde :

puissance

ϕ

densité de flux [W/m²]

puissance par unité de surface



Rayonnement

(EN – Thermal radiation)

$$\varphi_{ray.} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{ext}^4 - T^4)$$

σ constante de Stefan-Boltzmann
($5.67e-8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

ε émissivité du matériau

Le rayonnement est le mécanisme de transfert thermique principal à l'intérieur d'un four à 1000 °C.



Convection

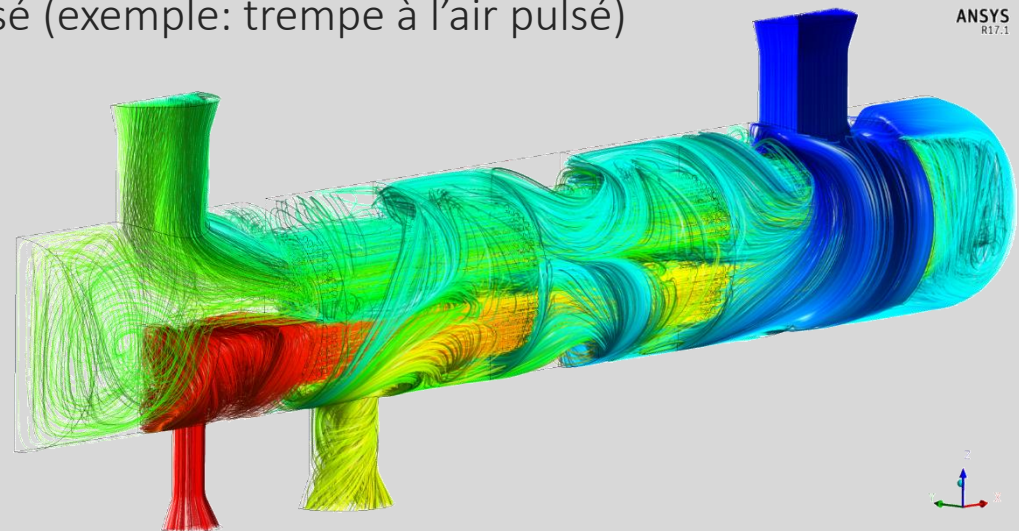
(EN – Convection)

$$\varphi_{conv.} = h \cdot (T_{ext} - T)$$

h coefficient d'échange thermique [W/K.m²]

Usuellement vaut 10 - 20 dans le cas de la convection libre air

Quelques 100-500 dans le cas d'air pulsé (exemple: trempe à l'air pulsé)



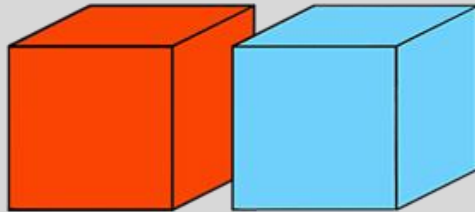
Conduction

(EN – Thermal Conduction)

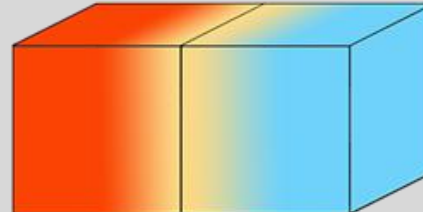
$$\varphi = \lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

λ conductivité thermique [W/(m.K)]

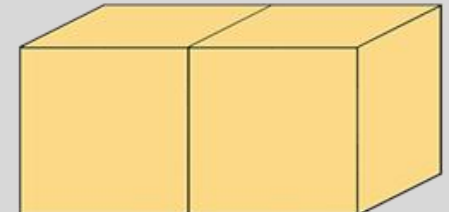
1. Not Touching - No Conduction



2. Conduction begins:
heat transfers to colder object



3. Conduction completed:
Two objects are in equilibrium



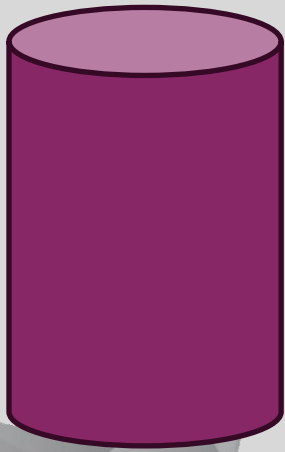
Echanges thermiques

(EN – Heat exchange)

Convection : $\varphi_{conv.} = h \cdot (T_{ext} - T)$

Rayonnement : $\varphi_{ray.} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{ext}^4 - T^4)$

Conduction : $\varphi_{cond.} = \lambda \cdot \frac{dT}{dx}$



Mode transfer prédominant

Nombre de Biot [adimensionnel]

$$Bi = \frac{h}{\lambda} \cdot L$$

Si $Bi < 0.1$

Neglige conduction

$Bi > 0.1$

Conduction significative

Auto-échauffement

(*EN – self heating*)

- 2 formulations équivalentes liées à l'énergie de déformation plastique :

$$Q_{def.} = \frac{\eta}{V} \int F. dl \quad [J/ m^3]$$

$$Q_{def.} = \eta. \int \sigma. d\varepsilon \quad [N.m^{-2}.s^{-1}] \text{ donc } [J/m^3]$$



V volume du lopin [m^3]

η coefficient de Taylor-Quinley, usuellement 0.9

Il représente un rendement : 90% de l'énergie de déformation sera transformer en chaleur. Les 10% restant étant dissipé sous la forme de modification microstructurale.

Plan de la présentation

1

Aspect Technique : Thermique

2

Cas de chauffe et refroidissement

3

Cas d'auto-échauffement

4

Aspect Eco. et Environnemental

5

Résumé

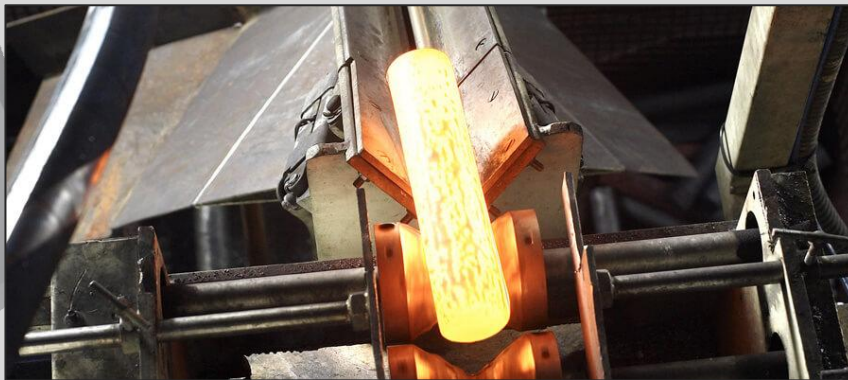
Thermique

(EN – Thermal engineering)

Comment peut-on appréhender, modéliser ces échanges?

Le long de la chaîne de fabrication on étudiera :

- Cas chauffe lopin dans le four
- Cas refroidissement (transfert et forgeage)



Cas chauffe lopin dans le four

(EN – furnace heating case)

Nous souhaitons modéliser dans le but de dimensionner le temps de chauffe d'un lopin de forme quelconque dans un four de forge.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \text{div} \left(\overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \dot{W}$$

Hypothèses

- Nous considérerons une température uniforme du lopin.
(pertinent si temps de chauffe est grand devant conduction)

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{W}$$

Cas chauffe lopin dans le four

(EN – furnace heating case)

Nous souhaitons modéliser dans le but de dimensionner le temps de chauffe d'un lopin de forme quelconque dans un four de forge.

Le lopin est donc à l'intérieur d'un four soumis à des échanges par conduction, convection et rayonnement :

$$\varphi = h \cdot (T_{ext} - T) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{ext}^4 - T^4)$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{W}$$

$$\dot{W} = \frac{\oint \varphi \cdot dS}{V} = \frac{h \cdot S \cdot (T_{four} - T) + \sigma \cdot S \cdot \varepsilon \cdot (T_{four}^4 - T^4)}{V}$$

$h_{app.}$

S

V

coefficient d'échange convectif [W/m^2]

surface d'échange du lopin [m^2]

volume du lopin [m^3]

T_{four}

ε

σ

température du four [K]

émissivité du lopin

Constante radiative [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

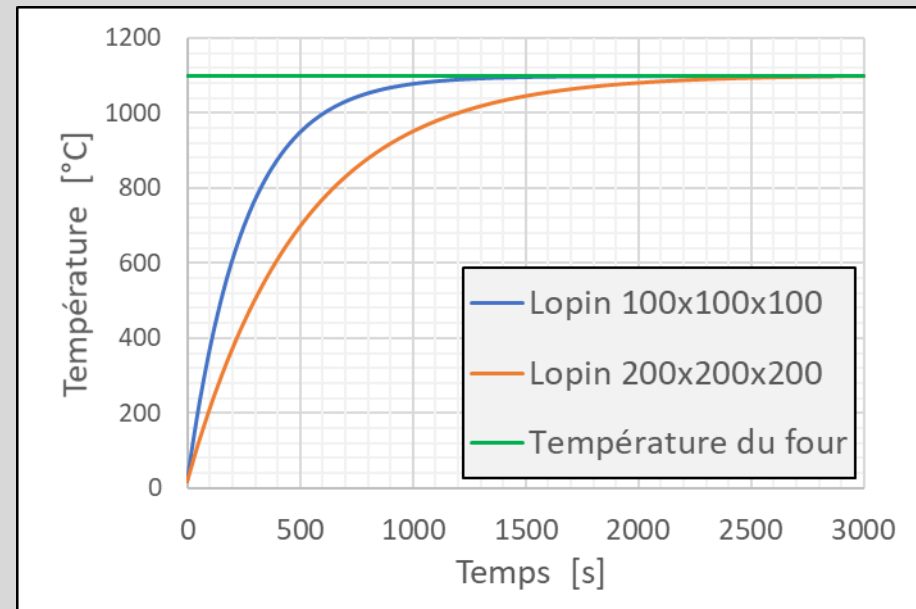
Cas chauffe lopin dans le four

(EN – furnace heating case)

Il n'existe donc pas de **solution analytique**. Il faut donc passer à une **résolution numérique**.

cf **Méthode d'Euler**

Il est alors possible de modéliser la chauffe dans le but de dimensionner le temps minimum nécessaire pour le process.



Cas refroidissement (transfert et forgeage)

(EN – cooling case)

Nous souhaitons modéliser dans le but de prédire le refroidissement d'un lopin de forme quelconque à l'air libre et sur un outillage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \text{div} \left(\overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \dot{W}$$

Hypothèses

- Nous considérerons une température uniforme du lopin.

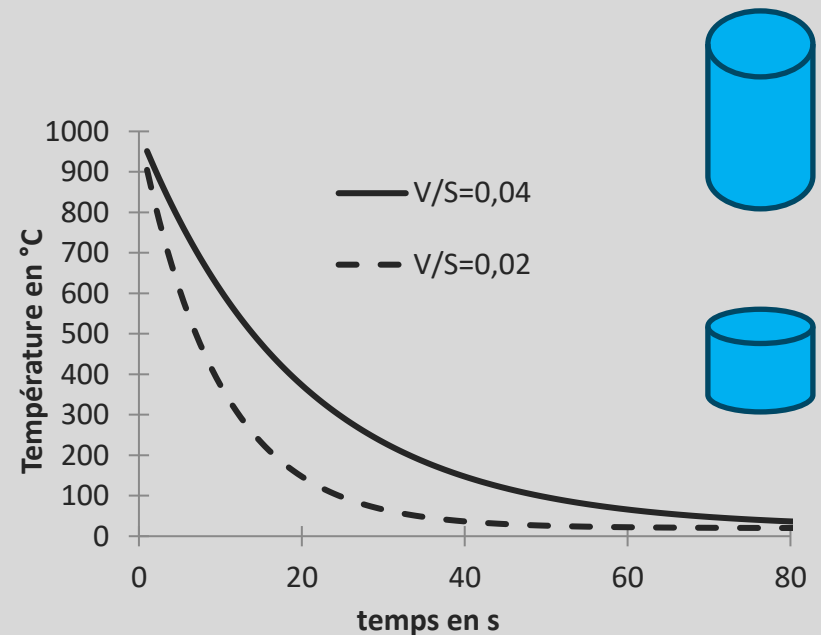
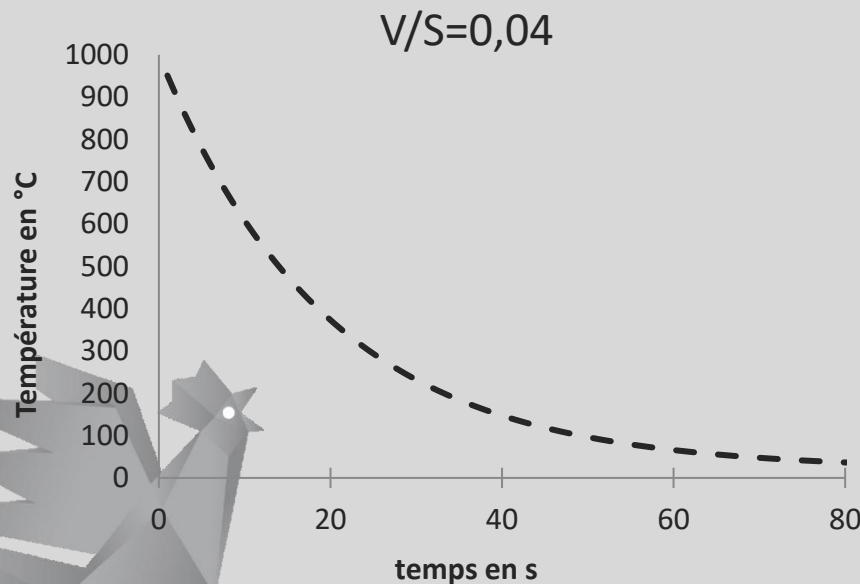
(pertinent si temps de refroidissement est grand devant

cond Conditions identiques au cas précédant seules T_{ext} et h changent de valeur

Cas refroidissement (transfert et forgeage)

(EN – cooling case)

Nous souhaitons modéliser dans le but de prédire le refroidissement d'un lopin de forme quelconque à l'air libre.



Cas refroidissement (transfert et forgeage)

(EN – cooling case)

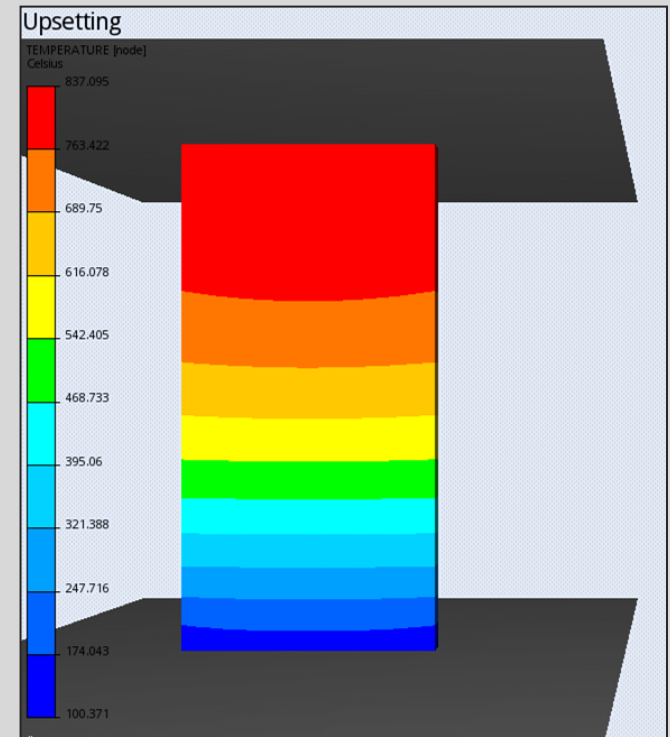
Nous souhaitons modéliser dans le but de prédire le refroidissement d'un lopin de forme quelconque sur un outillage.

Lopin d'acier à 1015°C

Température du lopin après 10s?

Effet du gradient

Dans les premières approximations présentées, uniquement une température moyenne est calculée. La prise en compte de gradient peut être obtenu par éléments finis.



Cas refroidissement (transfert et forgeage)

(EN – cooling case)

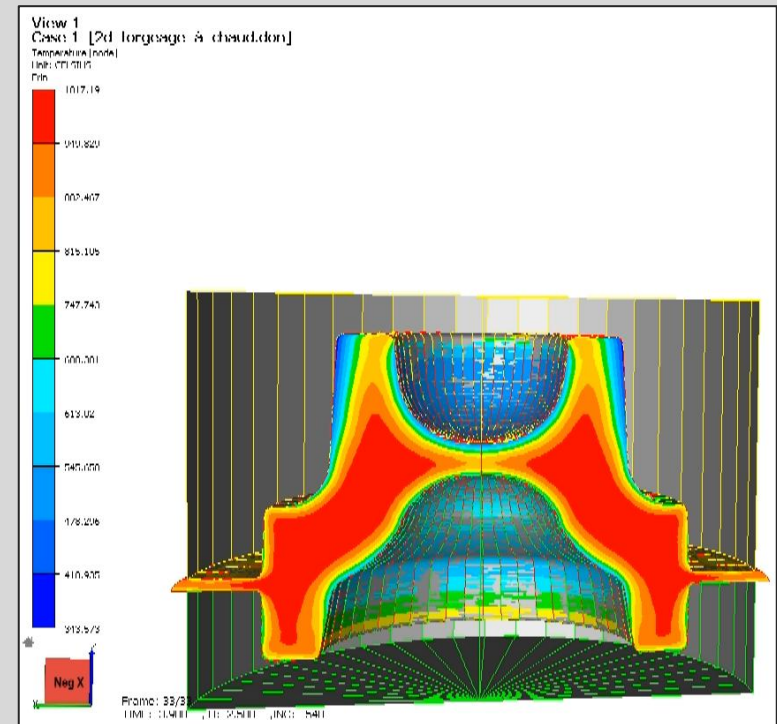
Nous souhaitons modéliser dans le but de prédire le refroidissement d'un lopin de forme quelconque sur un outillage.

Lopin d'acier à 1015°C

Température du lopin après forgeage?

Effet du gradient

Dans les premières approximations présentées, uniquement une température moyenne est calculée. La prise en compte de gradient peut être obtenu par éléments finis.



Plan de la présentation

1

Aspect Technique : Thermique

2

Cas de chauffe et refroidissement

3

Cas d'auto-échauffement

4

Aspect Eco. et Environnemental

5

Résumé

Thermique

(EN – Thermal engineering)

Comment peut-on appréhender, modéliser ces échanges?

Le long de la chaine de fabrication on étudiera :

- Cas de l'auto-échauffement (forgeage)



3

Cas d'auto-échauffement



Arts
et Métiers

Sciences et
Technologies

L321

Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \text{div} \left(\overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \dot{W}$$

Hypothèses

- Nous considérerons une température uniforme du lopin.
(pertinent si temps de chauffe est grand devant conduction)
- Nous considérons l'opération adiabatique
(pertinent si temps de forgeage est très court)

Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

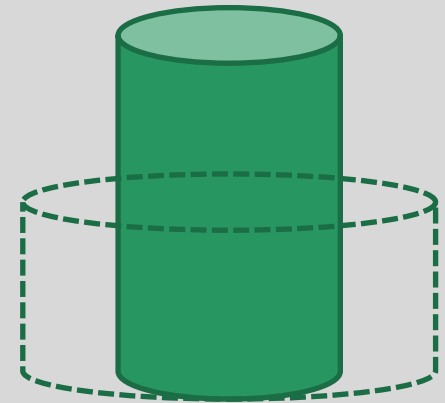
Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

Lopin Ø15mm hauteur 30mm

écrasé jusqu'à hauteur 15mm

sur marteau pilon vitesse 2,1m/s

sur presse hydraulique 21mm/s



$\Delta T?$

Grâce hypothèses on a :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{W}$$



Cas auto-échauffement en forgeage

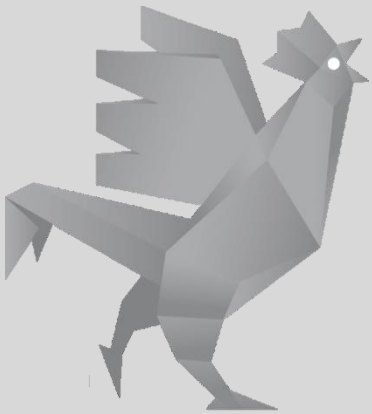
(EN – self heating case)

Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{W}$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \dot{W} \partial t = W = \frac{\eta \cdot F \cdot dl}{V} \quad [\text{J /m}^3]$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \dot{W} \partial t = W = \eta \cdot \sigma \cdot d\varepsilon \quad [\text{J/m}^3]$$



2 possibilités :

- connaissance de l'effort lors de l'essai
- connaissance de la loi de comportement

Cas auto-échauffement en forgeage

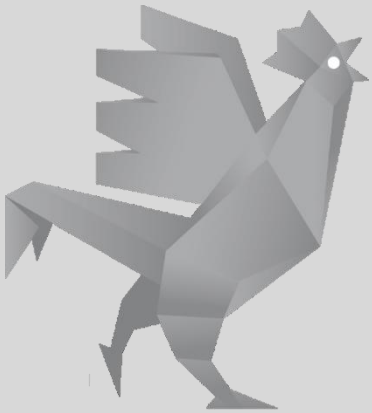
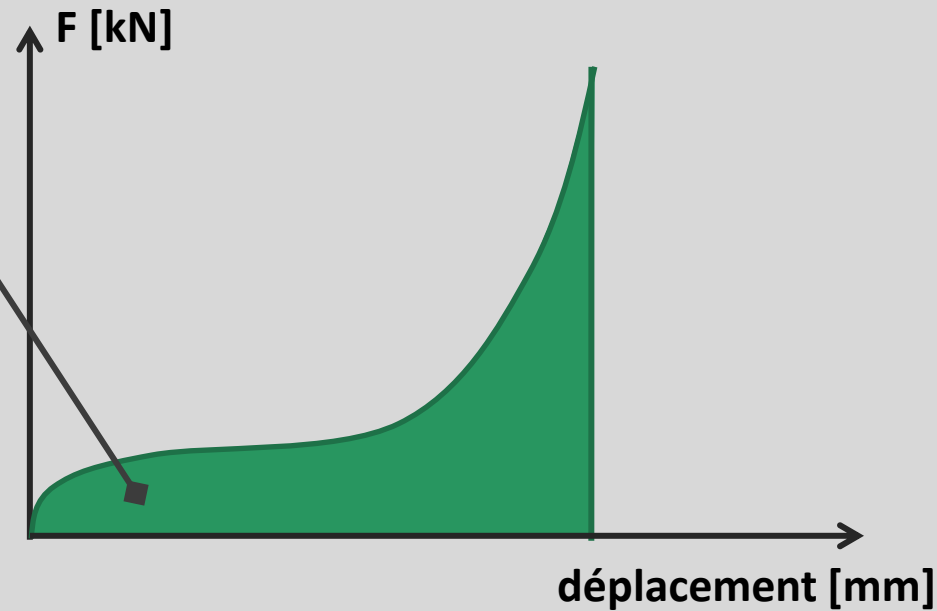
(EN – self heating case)

Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \dot{W} \partial t = W = \frac{\eta \cdot F \cdot dl}{V} \quad [\text{J} / \text{m}^3]$$

$$V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T = \eta \int F \cdot dl$$

Nécessite d'avoir mesuré les efforts durant l'opération.



Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \dot{W} \partial t = W = \eta \cdot \sigma \cdot d\varepsilon \quad [\text{W/m}^3]$$

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \eta \cdot \sigma \cdot d\varepsilon$$

Nous ne connaissons pas a priori l'évolution de σ au cours de l'essai.

Mais si nous connaissons le lien entre σ et ε (c'est-à-dire la loi de comportement $f(\varepsilon)$) nous pouvons conclure

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho \cdot c_p} \int f(\varepsilon) \cdot d\varepsilon$$

Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

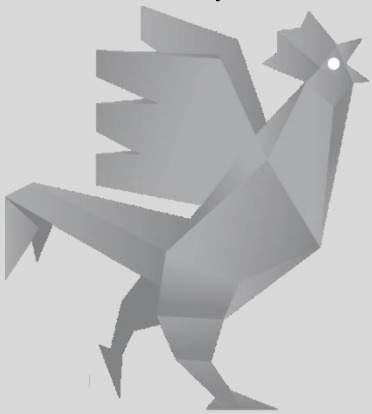
Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \eta \cdot \sigma \cdot \partial \varepsilon$$

Considérons un acier C35 dont la loi de comportement d'Hansel et Spittel simplifiée est connue à chaud et à froid :

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

	à froid	à chaud
A	900	1500
m ₁	-0.012	-0.027
m ₂	0.19	-0.05
m ₃	0.012	0.15



Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

Nous souhaitons modéliser l'**auto-échauffement** que subit une pièce forgée. L'objectif est de connaître l'élévation de température qu'elle subit lors de son opération de forgeage.

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \eta \cdot \sigma \cdot \partial \varepsilon$$

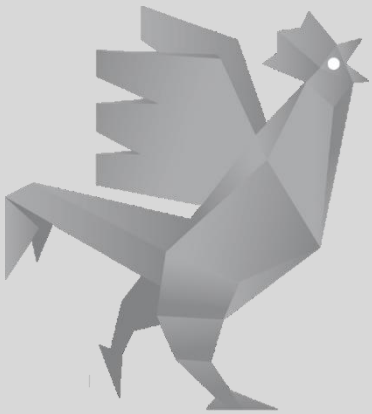
$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T = \eta \cdot A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot \partial \varepsilon$$

Etudions 4 scénarios

$h_i = 30\text{mm}$

$h_f = 15\text{mm}$

	à chaud	à froid
Marteau Pilon	T= 1000°C v = 2,1m/s	T= 20°C v = 2,1m/s
Presse Hydraulique	T= 1000°C v = 21mm/s	T= 20°C v = 21mm/s



Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

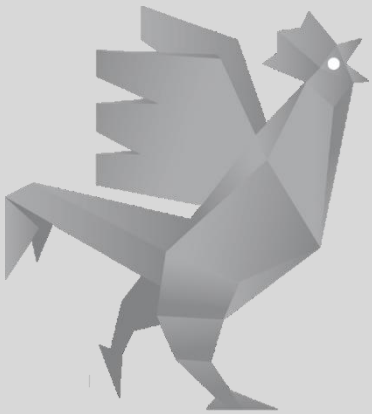
Etudions 4 scénarios

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{h_f}{h_i} \right) = -0.69$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_f}{\frac{\Delta h}{v}}$$

	à chaud	à froid
Marteau Pilon	T= 1000°C $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$	T= 20°C $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$
Presse Hydraulique	T= 1000°C $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$	T= 20°C $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

Dans chaque scénario hypothèse $\dot{\varepsilon}$ et T sont constant



$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m$$

	à chaud	à froid
Marteau Pilon	K = 117 m = -0.05	K = 929 m = 0.19
Presse Hydraulique	K = 58 m = -0.05	K = 878 m = 0.19

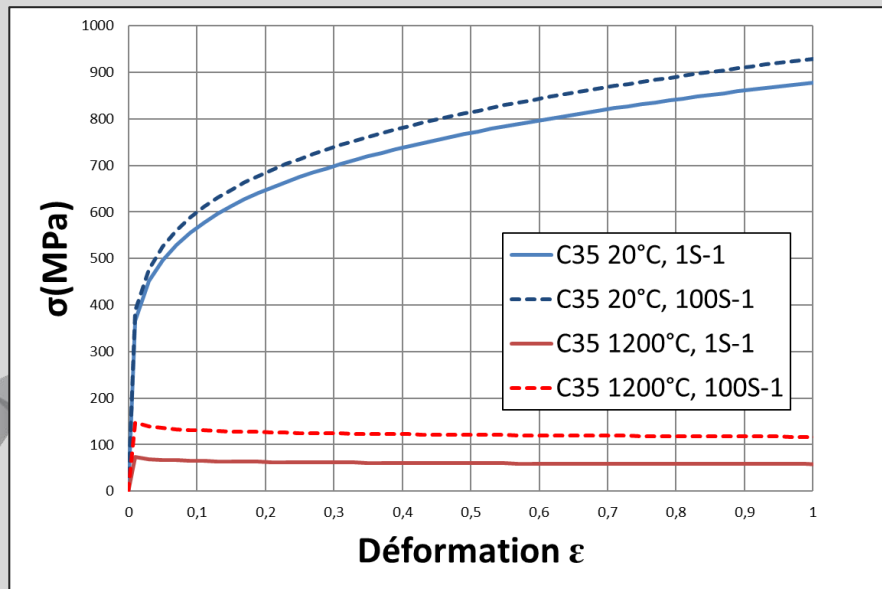
Cas auto-échauffement en forgeage

(EN – self heating case)

Etudions 4 scénarios

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m$$

	à chaud	à froid
Marteau Pilon	K = 117 m = -0.05	K = 929 m = 0.19
Presse Hydraulique	K = 58 m = -0.05	K = 878 m = 0.19



La vitesse de déformation à moins d'influence à basse température qu'à haute température.

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho \cdot c_p} \cdot \int_0^{\varepsilon_f} K \cdot \varepsilon^m \cdot d\varepsilon$$

Cas auto-échauffement en forgeage

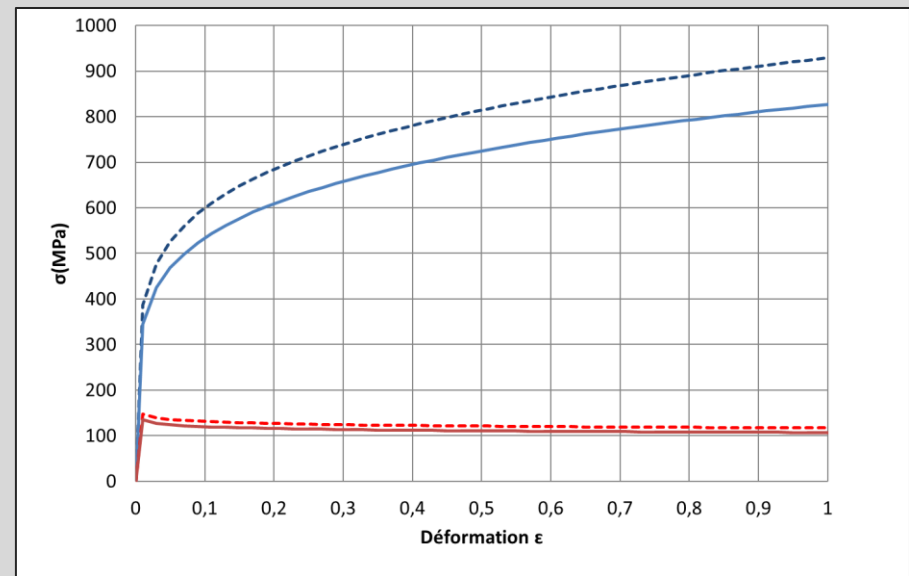
(EN – self heating case)

Etudions 4 scénarios

L'effet de l'adoucissement thermique peut influencer les efforts de forgeage de plus de 10%.

	à chaud	à froid
Marteau Pilon	$\Delta T = 14^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 81^{\circ}\text{C}$
Presse Hydraulique	$\Delta T = 6^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 76^{\circ}\text{C}$

- C35 – Pilon - 20°C
- C35 – Pilon - 101°C
- C35 – Pilon - 1000°C
- C35 – Pilon - 1014°C



Plan de la présentation

1

Aspect Technique : Thermique

2

Cas de chauffe et refroidissement

3

Cas d'auto-échauffement

4

Aspect Eco. et Environnemental

5

Résumé

Aspect Economique

Energie

unité mesure kW.h

Compteur

Electrique kW.h

Gaz m³

Notion

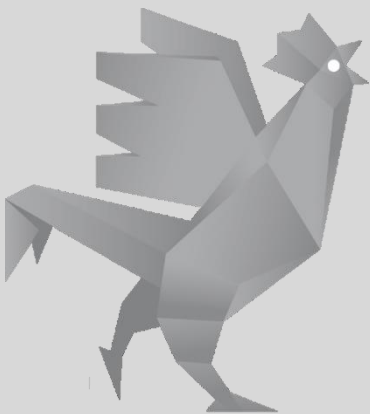
PCI - Pouvoir Calorifique Inférieur

Energie / Masse

GJ/t

Prix Energie	Electricité	
€/kWh	Heures Pleines	Heures Creuses
2020	0.17	0.13
Juillet 2022	0.41	

Prix Energie	Gaz	
€/kWh	Mars - Novembre	Novembre - Mars
2020	0.03	0.05
Juillet 2022	0.25	



Aspect Economique

Energie

unité mesure kW.h

Comustible - PCI

Combustibles solides	Recommandation France		Recommandation Europe	
	GJ/T	Source	GJ/T	Source
Charbon à coke	26	ETS ¹⁰¹ + OMINEA ¹⁰²	28,5	Décision 2007/589/CE
Charbon à vapeur	26	ETS + OMINEA		
Charbon sous-bitumineux	20	ETS + OMINEA		
Agglomérés de houille	32	ETS + OMINEA		
Lignite	17	ETS + OMINEA	11,9	Décision 2007/589/CE
Briquettes de lignite	17	ETS + OMINEA		
Tourbe	11,6	ETS + OMINEA	9,8	Décision 2007/589/CE
Houille	32	OMINEA		
Anthracite	26,7	Décision 2007/589/CE ¹⁰³	26,7	Décision 2007/589/CE
Schistes bitumineux	9,4	OMINEA	8,9	Décision 2007/589/CE
Coke de houille	28	ETS + OMINEA	28	Décision 2007/589/CE
Coke de lignite	17	ETS + OMINEA	28,2	Décision 2007/589/CE
Coke de pétrole	32	ETS + OMINEA		
Ordures ménagères	9,3	ETS + OMINEA		
Pneumatiques	26	ETS + OMINEA		
Plastiques	23	ETS + OMINEA		

PCI des combustibles fossiles solides

Combustibles gazeux	Recommandation France		Recommandation Europe	
	GJ/T	Source	GJ/T	Source
gaz naturel			48	Décision 2007/589/CE
gaz naturel - type H	49,6	ETS + OMINEA		
gaz naturel - type B	38,2	ETS + OMINEA		
gaz naturel liquéfié	49,6	ETS + OMINEA	44,2	Directive ETS
gaz de haut fourneau	2,3	ETS + OMINEA	2,5	Décision 2007/589/CE
gaz de cokerie	31,5	ETS + OMINEA	38,7	Décision 2007/589/CE
gaz d'aciérie	6,9	ETS + OMINEA		

PCI des combustibles fossiles gazeux

Combustibles liquides	Recommandation France		Recommandation Europe	
	GJ/T	Source	GJ/T	Source
Pétrole Brut	42	OMINEA	42,3	Décision 2007/589/CE
Fioul domestique	42	ETS + OMINEA	43	Directive 2009/28 CE
Fioul lourd	40	ETS + OMINEA	40	OMINEA
Combustible haute viscosité (CHV)	39,2	ETS + OMINEA		
Essence	44	OMINEA	43	OMINEA / CITEPA 2021
Gasoil	42,6	OMINEA	43	OMINEA / CITEPA 2021
Butane	45,6	CFBP ¹¹⁴	47,3	Décision 2007/589/CE
Propane	46	CFBP	47,3	Décision 2007/589/CE
GPL	46	ETS + OMINEA		
Carbureacteur Jet B et essence aviation (AvGas)	44	OMINEA	44,3	Décision 2009/339/CE
Essence aviation	44	OMINEA	44,3	Décision 2009/339/CE
Kérosène (Jet A et A1)	44	OMINEA	44,1	Décision 2009/339/CE
Naphta	45	ETS + OMINEA	44,5	Décision 2007/589/CE
Huiles de schistes	36	ETS + OMINEA	38,1	Décision 2007/589/CE
Bitumes	40,2	OMINEA	40,2	Décision 2007/589/CE
Lubrifiants	40,2	ETS + OMINEA		
White-spirit	41,9	ETS + OMINEA		
Autres produits pétroliers	40,2	ETS + OMINEA		

PCI des combustibles fossiles liquides

<https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-carbone>

4

Aspect Economique et Environnemental

Arts Sciences et
Technologies
et Métiers

L45¹

Aspect Environnemental

Energie Gaz France

Gaz	Mix considéré pour 2020
Gaz conventionnel Norvège	43,52%
Gaz conventionnel Russie	16,70%
Gaz conventionnel Algérie	9,45%
Gaz conventionnel Nigéria	9,23%
Gaz conventionnel Pays-Bas	8,99%
Gaz conventionnel Qatar	4,17%
Gaz de schiste US	4,11%
Gaz conventionnel US	1,60%
Gaz conventionnel Trinité & Tobago	1,10%
Biométhane France	0,47%
Gaz conventionnel Angola	0,44%
Gaz conventionnel Pérou	0,22%

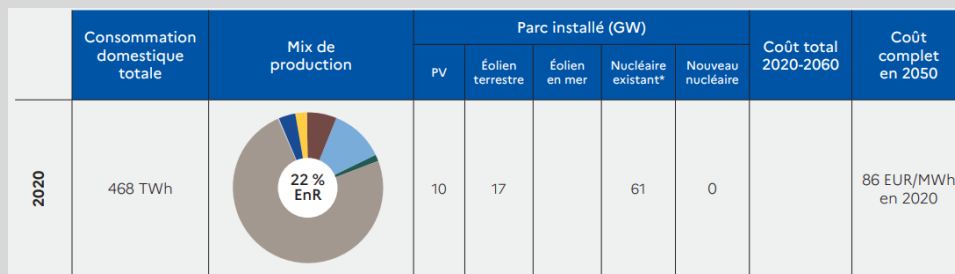
Pays	% via pipeline	% via GNL
Algérie	0,0%	100,0%
Angola	0,0%	100,0%
Autres Europe	100,0%	0,0%
Nigéria	0,0%	100,0%
Norvège	95,7%	4,3%
Pays-Bas	100,0%	0,0%
Pérou	0,0%	100,0%
Qatar	0,0%	100,0%
Russie	34,2%	65,8%
Trinidad & Tobago	0,0%	100,0%
USA	0,0%	100,0%

Aspect Environnemental

Energie Electricité France

Centrale nucléaire	Centrale à gaz	Centrale à Charbon	Centrale fioul-vapeur
6	418	1058	730

FE de l'électricité pour les moyen de production en France exprimés en gCO₂e/kWh



■ Nucléaire
 ■ Turbines gaz
 ■ Autres thermiques
 ■ Photovoltaïques
 ■ Éolien terrestre
 ■ Éolien en mer
 ■ Hydraulique
 ■ Autres renouvelables

* Les capacités installées de nucléaire existant tiennent compte de l'EPR de Flamanville.

Technologie	Caractéristiques (Capacité, configuration, ...)	Estimation basse (1) (gCO ₂ e/KWh)	Estimation haute (2) (gCO ₂ e/KWh)	Estimation moyenne (3) à partir du graphique ci-dessus (gCO ₂ e/KWh)
Charbon	Combustion	675	1689	1 038
Charbon	Centrales électriques au charbon « modernes » et « avancées »	710	950	
Charbon	Centrales à charbon pulvérisé (PC)			815,2
Charbon	Centrales à cycle combiné à gazéification intégrée (IGCC)			788
Charbon	Avec utilisation de CCS (capture et stockage de CO ₂)	70	290	
Charbon	Centrale charbon avec oxycombustion et CCS			161
Charbon	Centrale PC avec CCS			217,4
Charbon	Centrale IGCC avec CCS			201
Pétrole	Pour différents types de générateurs et de turbines	510	1170	
Gaz	Diverses turbines à cycle combiné	290	930	
Gaz	Centrales à cycle combiné au gaz naturel	410	650	
Gaz	Avec CCS et hypothèse de fuite en gaz naturel <1%	90	370	
Gaz	Moyenne mondiale			598
Gaz	Cycle combiné gaz avec CCS			168,5
Biomasse	Bois de forêt en co-combustion avec de la houille			206,5
Biomasse	Dédiés et résidus de cultures			228,3
Biogaz	Mais et fumier			342,4
Solaire thermique	80MW, parabolique (creux)	7	89	
Solaire Photovoltaïque	Silicone polycristallin	5	217	
Energie solaire	Energie solaire concentrée			27,2
Solaire Photovoltaïque	En toiture			43,5
Solaire Photovoltaïque	Hors toiture (ex : champs, ...)			49
Nucléaire	Différents types de réacteurs	1	220	
Géothermie	80MW, roche sèche chaude	6	79	
Eolien	/	7	56	
Eolien	Onshore			8,7
Eolien	Offshore			10,9
Energie marine	Barrages marémoteurs, hydroliennes et énergie des vagues	10	30	
Hydroélectricité	Vagues maritimes et marées			16,3
Hydroélectricité	Centrale hydroélectrique	40	70	

(1) et (2) : extraction de valeurs dans le corps du rapport AR5 (GIEC 2014)
 (3) : lecture de la valeur moyenne à partir du graphique dans le rapport AR5 (2014)

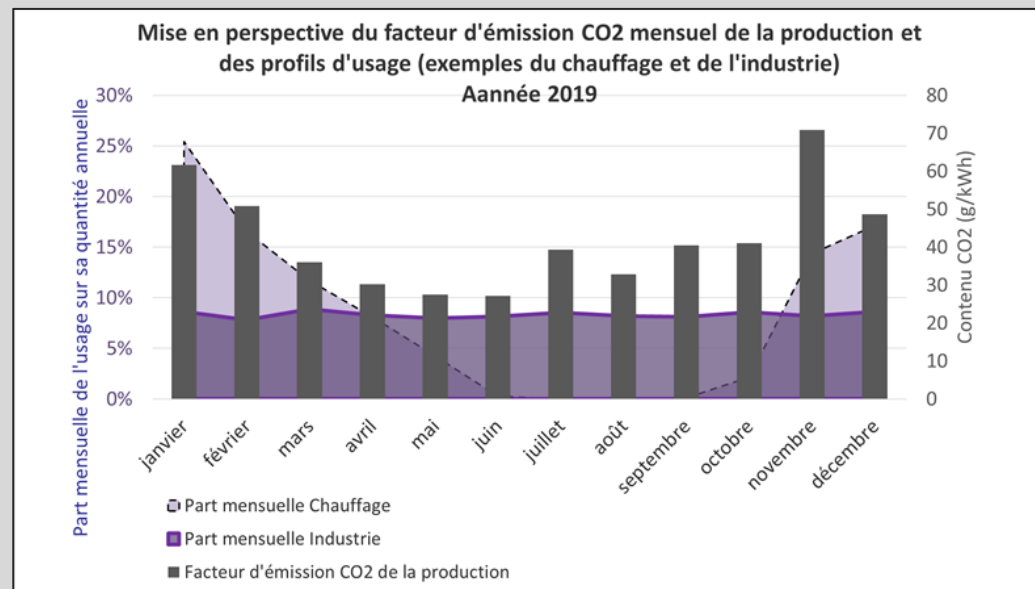
<https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-carbone>

Aspect Environnemental

Energie

Facteur Emission

Electricité



Gaz

Année	Production (kg CO2e/kWh PCI)	Transmission (kg CO2e/kWh PCI)	Transport (kg CO2e/kWh PCI)	Distribution (kg CO2e/kWh PCI)	Combustion (kg CO2e/kWh PCI)	Total (kg CO2e/kWh PCI)
2015	0,0153	0,0206	0,00277	0,00148	0,187	0,227
2022	0,015	0,020	0,001	0,003	0,201	0,240

Poids carbone par étape de Cycle de Vie du "gaz naturel - Mix France 2015" ¹²⁴ et "gaz naturel - Mix France 2022" ¹²⁵

<https://base-empreinte.ademe.fr/documentation/base-carbone>

Ouverture : Technologie des fours

(*EN – Furnace*)

Transformation une énergie en chaleur



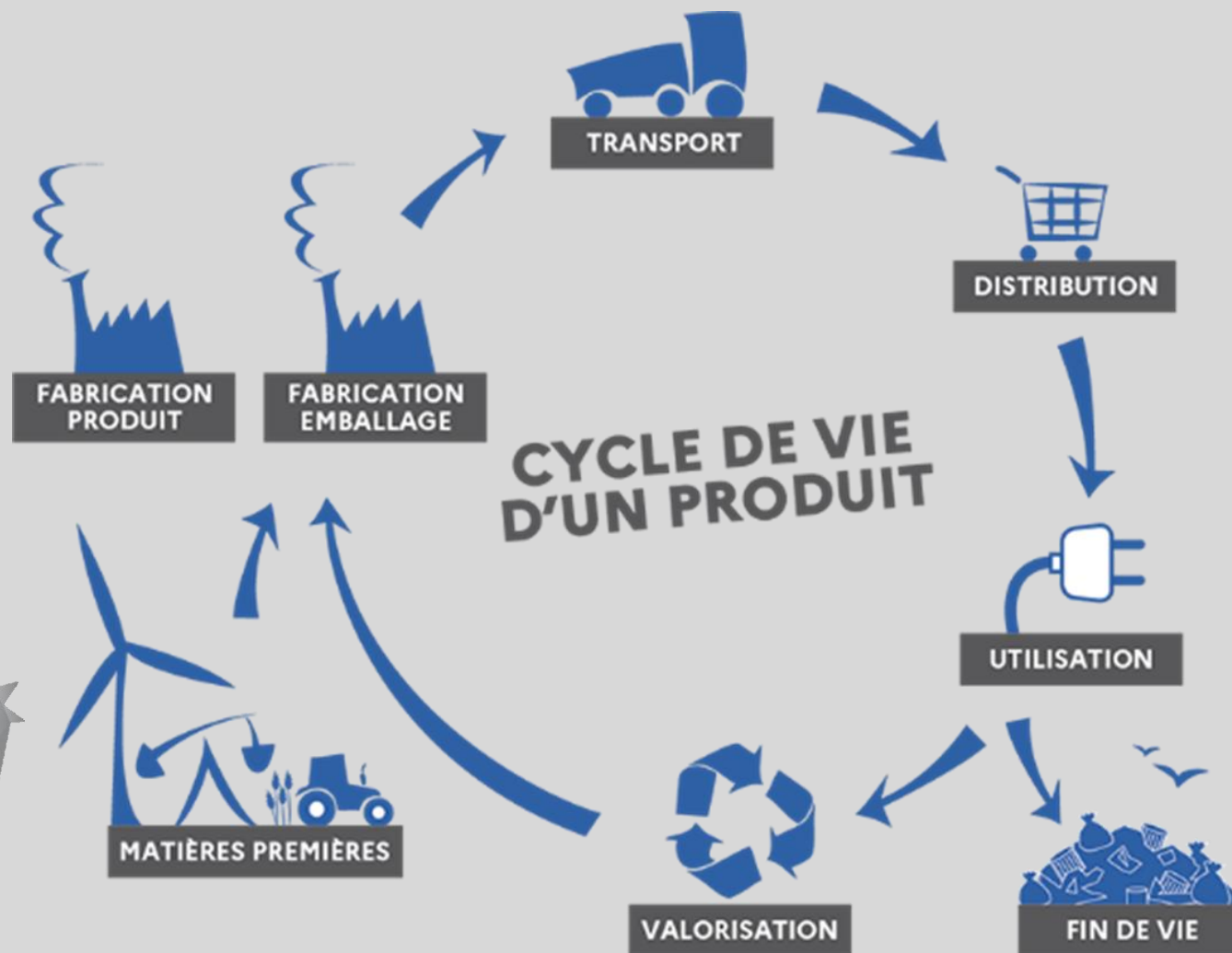
Four Electrique

Four à Gaz

Four à induction



Ouverture : ACV



Merci de votre attention.

