Procédés de Fabrication I - IGI
Chapitre 1. Introduction

15 septembre 2026

Programme : Introduction

1. Généralités
2. Définitions, classification
3. Objectifs et structures
4. Historique
5. Défis pour l'ingénieur

1.1.1 Motivation - société

Importance et rôle de la production dans la société

- *'To live well, a nation must **produce** well'*

  Dertouzos et al., 1989

- *'Unless, we as a nation consider **manufacturing** as important as fundamental science, health, social programs, and national security, we will not be able to generate the resources necessary to pay for our investments in these factors which contribute to our standard of living'* *J. Finnie, Chairman of the Unit Manufacturing Process Research Committee, US National Research Council, 1995*

- *There are only three means to generate wealth in the economy agriculture, mining and **manufacturing**. Everything else is just promoting good conditions for theses activities and redistributing the money in some way'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

- *'Advanced **manufacturing**, the idea of optimizing the way we are producting things, seems to be the only way to maintain the sustainability of the economy and of the lifestyle in our industrialized countries'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

1.1.1 Motivation - société

Importance et rôle de la production dans la société

- *'To live well, a nation must **produce** well'*

  Dertouzos et al., 1989

- *'Unless, we as a nation consider **manufacturing** as important as fundamental science, health, social programs, and national security, we will not be able to generate the resources necessary to pay for our investments in these factors which contribute to our standard of living'* *J. Finnie, Chairman of the Unit Manufacturing Process Research Committee, US National Research Council, 1995*

- *There are only three means to generate wealth in the economy agriculture, mining and **manufacturing**. Everything else is just promoting good conditions for theses activities and redistributing the money in some way'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

- *'Advanced **manufacturing**, the idea of optimizing the way we are producting things, seems to be the only way to maintain the sustainability of the economy and of the lifestyle in our industrialized countries'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

▸ Secteurs d'activités

1.1.1 Motivation - société

Importance et rôle de la production dans la société

- *'To live well, a nation must **produce** well'*

  Dertouzos et al., 1989

- *'Unless, we as a nation consider **manufacturing** as important as fundamental science, health, social programs, and national security, we will not be able to generate the resources necessary to pay for our investments in these factors which contribute to our standard of living'* *J. Finnie, Chairman of the Unit Manufacturing Process Research Committee, US National Research Council, 1995*

- *There are only three means to generate wealth in the economy agriculture, mining and **manufacturing**. Everything else is just promoting good conditions for theses activities and redistributing the money in some way'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

- *'Advanced **manufacturing**, the idea of optimizing the way we are producting things, seems to be the only way to maintain the sustainability of the economy and of the lifestyle in our industrialized countries'* *David Dornfeld, speech on innovation and sustainability*

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

En réduisant à 0 Frs les coûts de production, on diminue presque de moitié les prix de revient de tous les produits !

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

Importance concurrentielle de la production :

- *Plus que les innovations apportées au produit lui-même, les améliorations des technologies de production sont difficiles à détecter et longues à imiter. On appelle cela l'innovation par la technique de production*

1.1.2 Motivation - économie

Importance économique de la production :

- *La production reste la colonne vertébrale des pays industrialisés :*
  - *elle représente environ 25% du produit intérieur brut (PIB) des pays industrialisés (PIB),*
  - *elle représente environ 40% du prix de revient d'un produit, les autres 60% correspondent essentiellement aux coûts de matière, de développement et de marketing.*

Importance concurrentielle de la production :

- *Plus que les innovations apportées au produit lui-même, les améliorations des technologies de production sont difficiles à détecter et longues à imiter. On appelle cela l'**innovation par la technique de production***

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

1.2.1 Définition : Procédé de Production

Définition

Un procédé de production est une opération de transformation qui permet de passer de la matière brute à une pièce plus complexe à l'aide d'outils et d'énergie.

Mat. brute :	*Outils :*	*Energie :*	*Pièces compl. :*
- métal	*- moule d'injection*	*- mécanique*	*- clavier d'ordinateur*
- polymère	*- électrode EDM*	*- électrique*	*- tasse à café*
- céramique	*- plaqu. de coupe*	*- chimique*	*- prothèse osseuse*
- . . .	*- . . .*	*- pneumatique*	*- moule d'injection*
- . . .	*- . . .*	*- thermique*	*- électrode EDM*

Attention

- *Les opérations d'assemblage (vissage, rivetage, sertissage, clipage, soudage, brasage, collage ...) ne sont pas considérées comme des procédés de production.*
- *Les traitements thermiques, les revêtements ... sont considérés comme des opérations de transformations mais pas comme des procédés de production.*

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  Injection plastique, la fonderie,
  Le forgeage, l'extrusion,
  Formage des métaux
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  - i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  - ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  - i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  - ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  - iii) *l'emboutissage ....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  iii) *l'emboutissage .....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*
  Impression 3D, SLA, FDM, SLS

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  iii) *l'emboutissage .....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*
  i) *l'impression 3d (SLA,FDM,SLS).*

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  iii) *l'emboutissage .....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*
  i) *l'impression 3d (SLA,FDM,SLS).*

1.2.2 Classification des procédés de production

Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  iii) *l'emboutissage .....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*
  i) *l'impression 3d (SLA,FDM,SLS).*

1.2.2 Classification des procédés de production

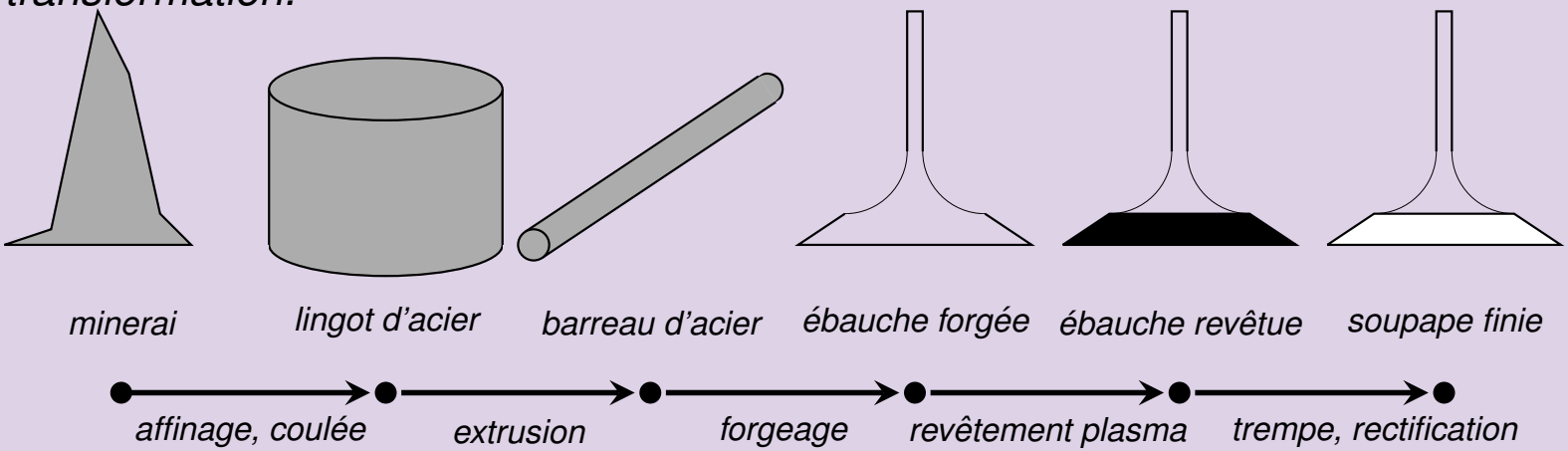
Les proc. de prod. se répartissent en trois classes essentielles :

- *Les procédés de production **ablatifs** où la pièce est fabriquée par **enlèvement** de matière :*
  i) *le fraisage, l'élecro-érosion,*
  ii) *l' usinage électro-chimique.....*
- *Les procédés. de production **replicatifs** où la pièce est fabriquée par **ajout/déformation** de matière dans/sur un **outil de forme** qui a une **forme dédiée** et qui entre en contact avec la pièce.*
  i) *l'injection plastique, la fonderie.*
  ii) *le forgeage, l'extrusion.*
  iii) *l'emboutissage .....*
- *Les procédés de production **additifs** où la pièce est fabriquée par un **ajout** de matière **sans utilisation d'outil de forme**.*
  i) *l'impression 3d (SLA,FDM,SLS).*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

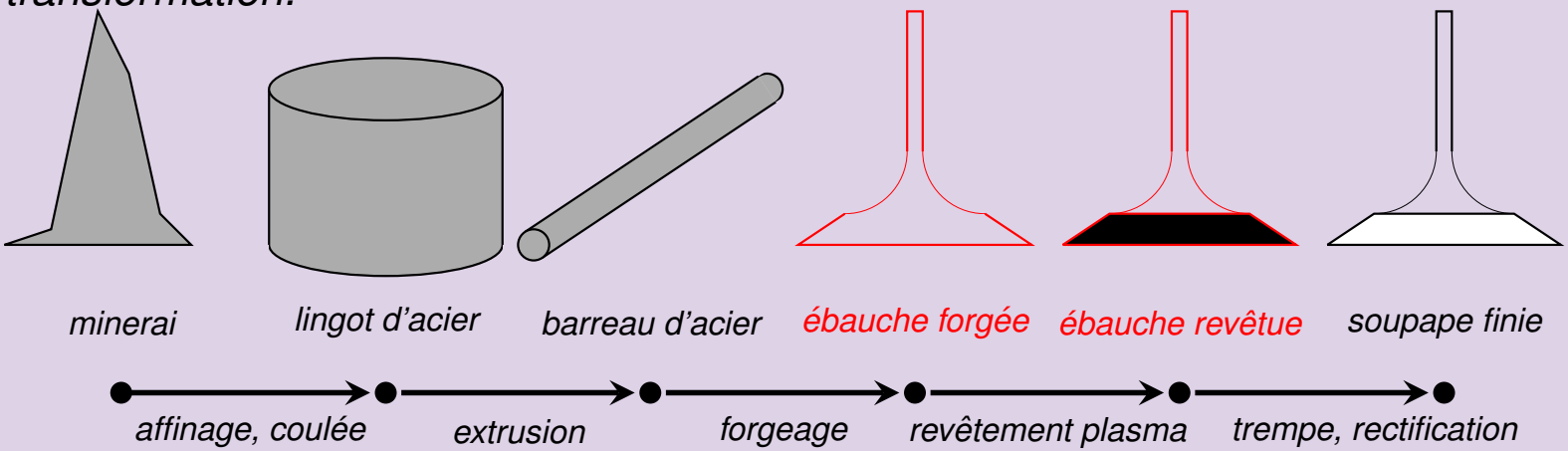


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

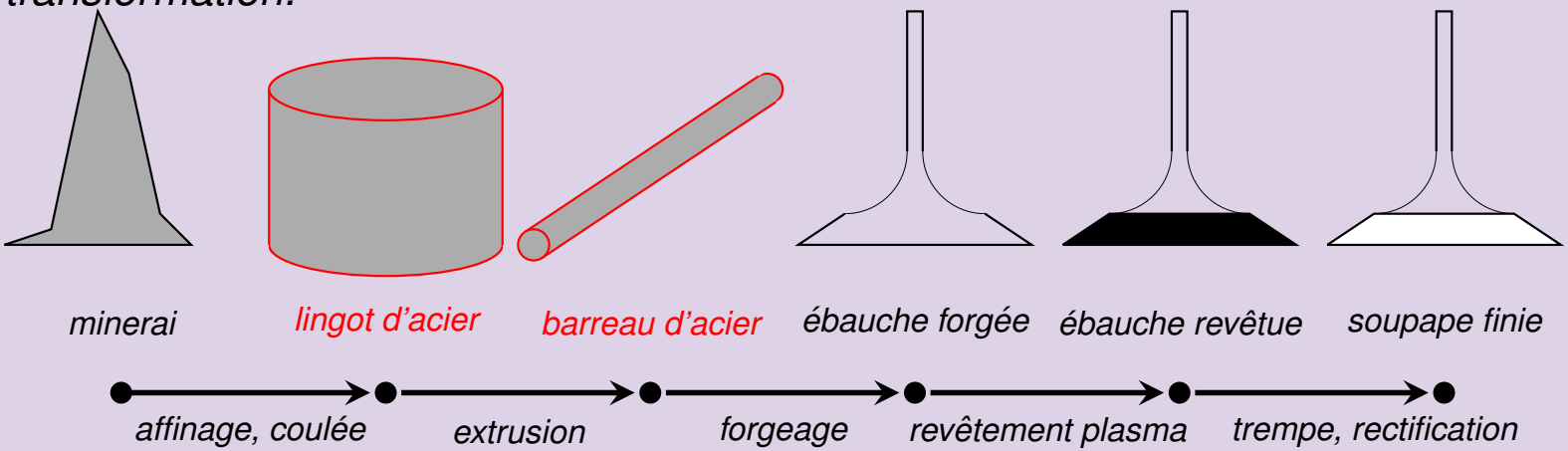


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

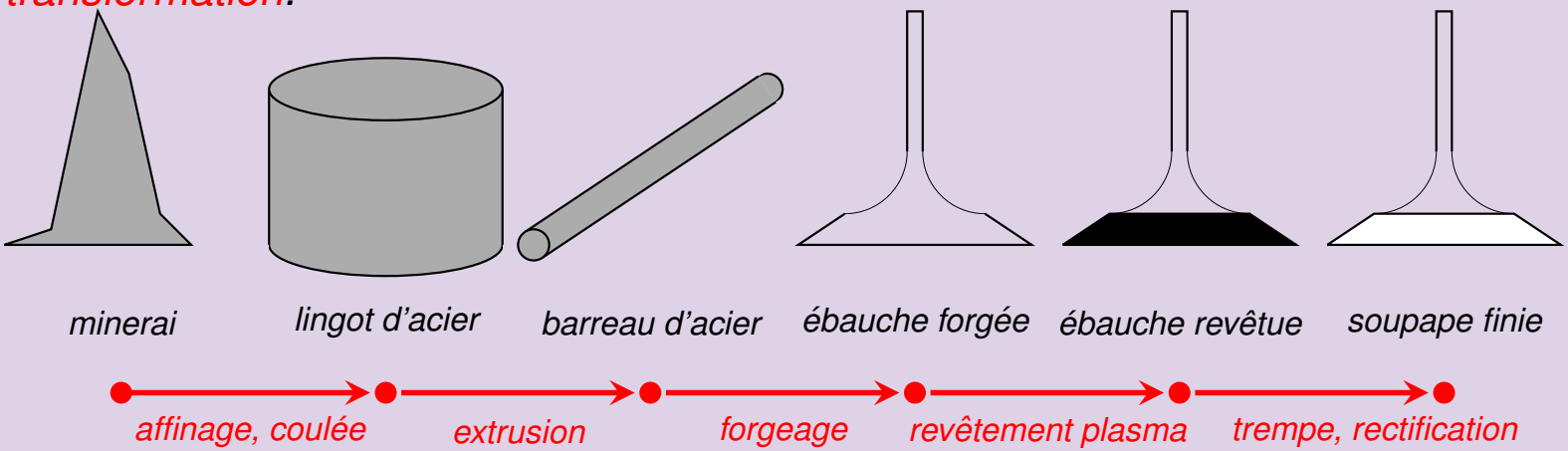


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

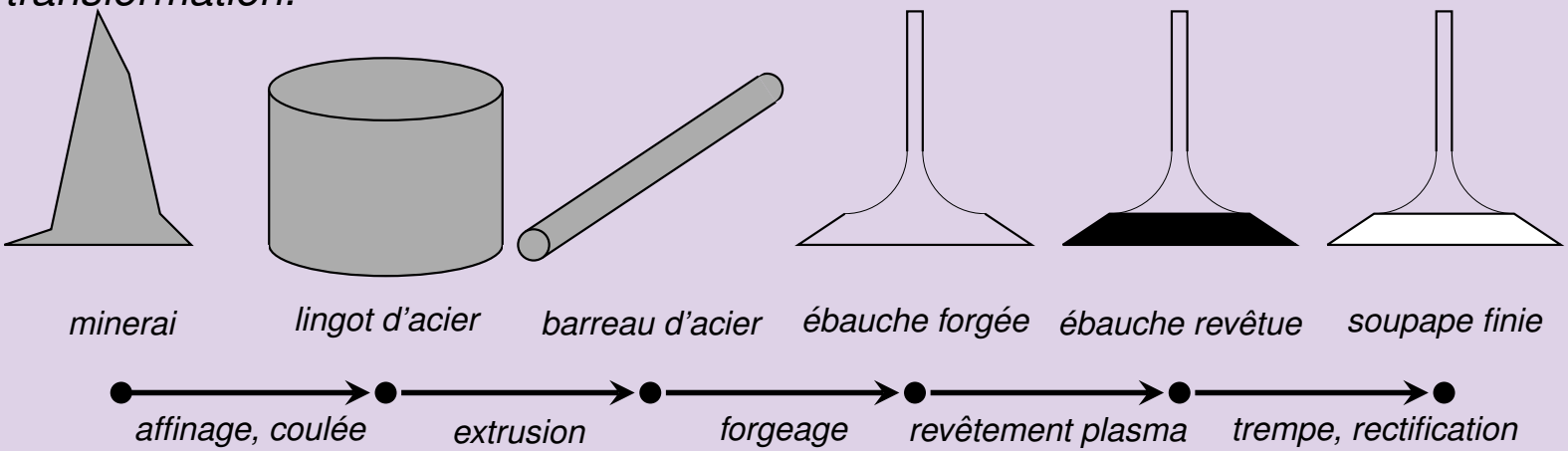


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

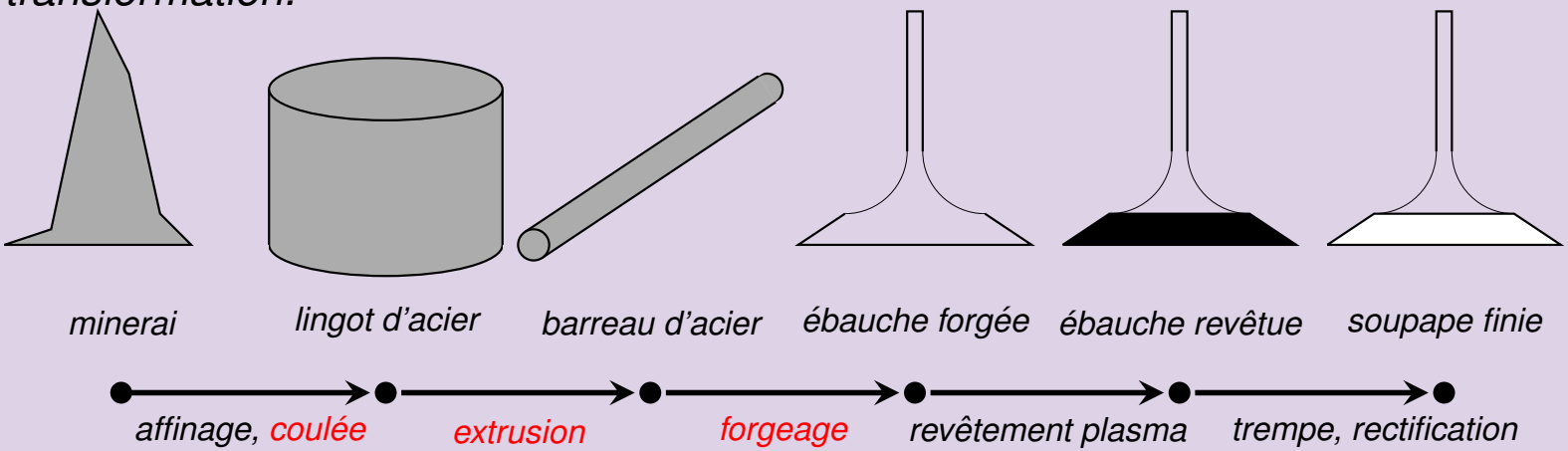


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

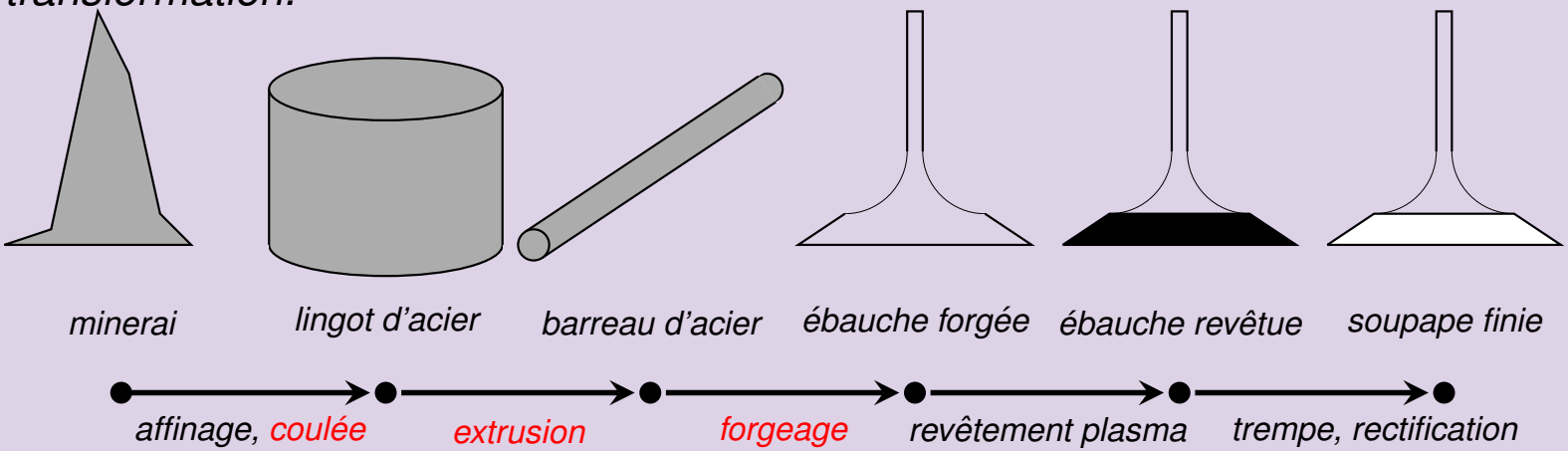


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

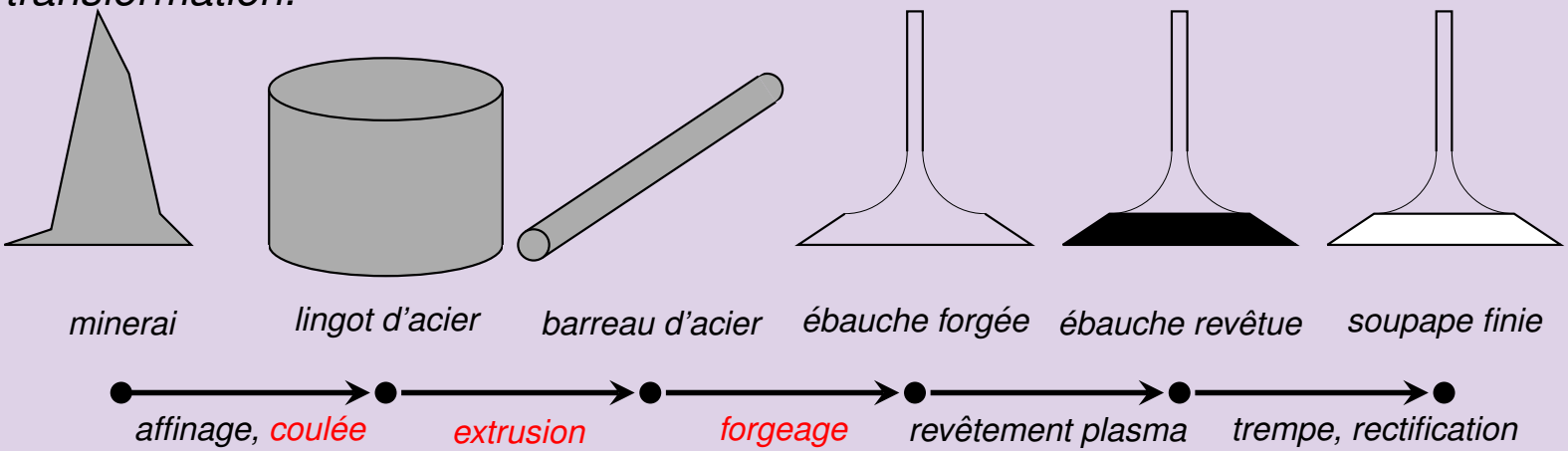


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production. Elles constituent (une partie de) la **chaîne de procédés** nécessaires à fabriquer le produit.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

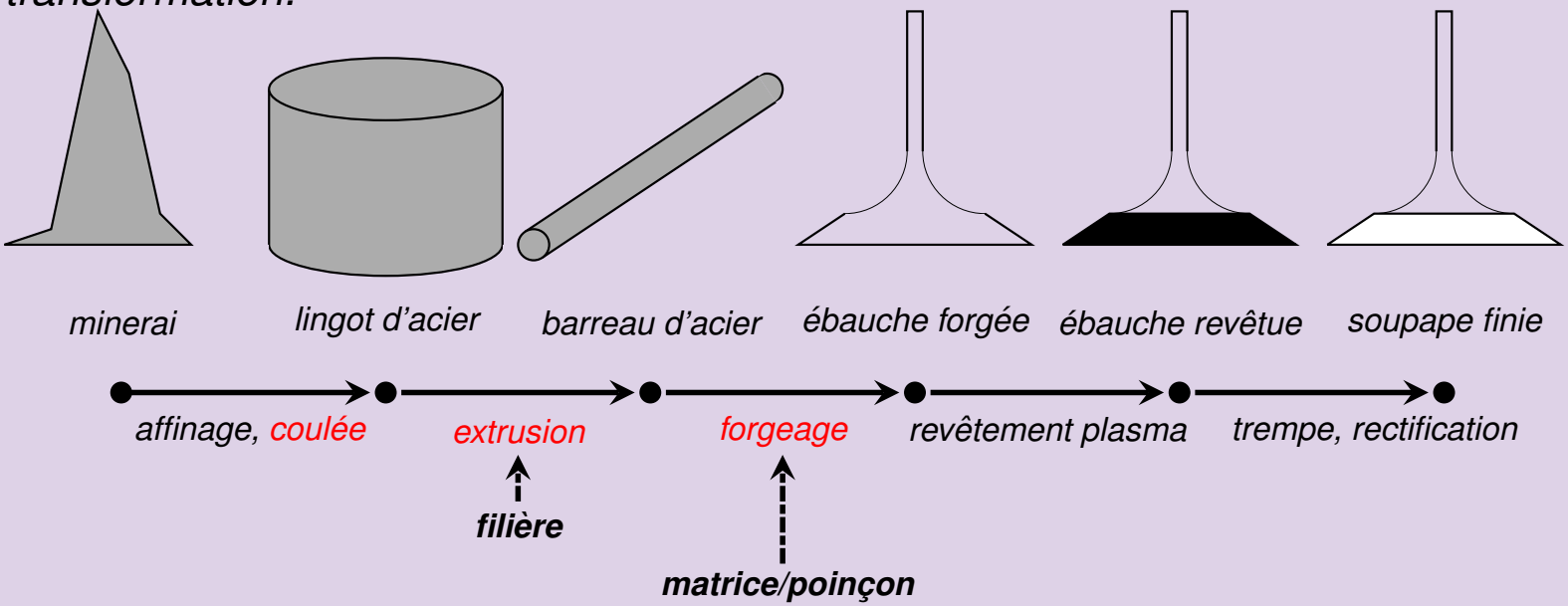


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production. Elles constituent (une partie de) la **chaîne de procédés** nécessaires à fabriquer le produit.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

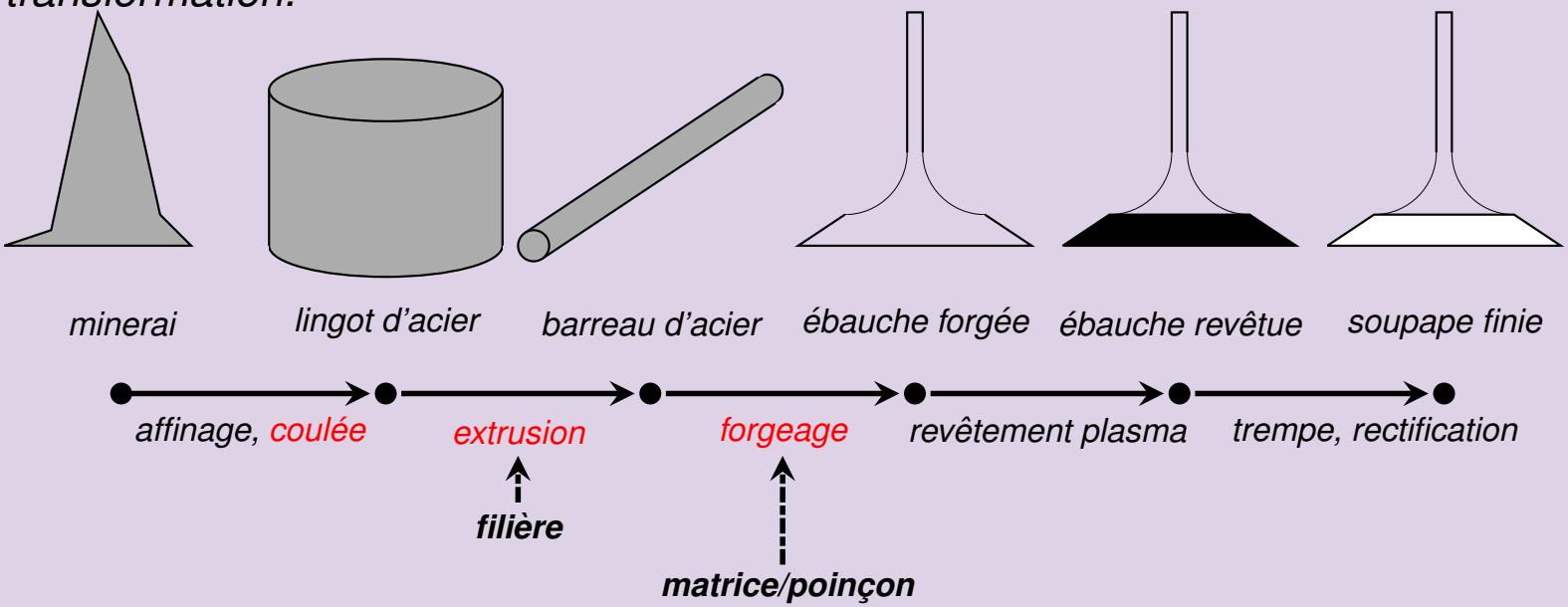


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production. Elles constituent (une partie de) la **chaîne de procédés** nécessaires à fabriquer le produit.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*

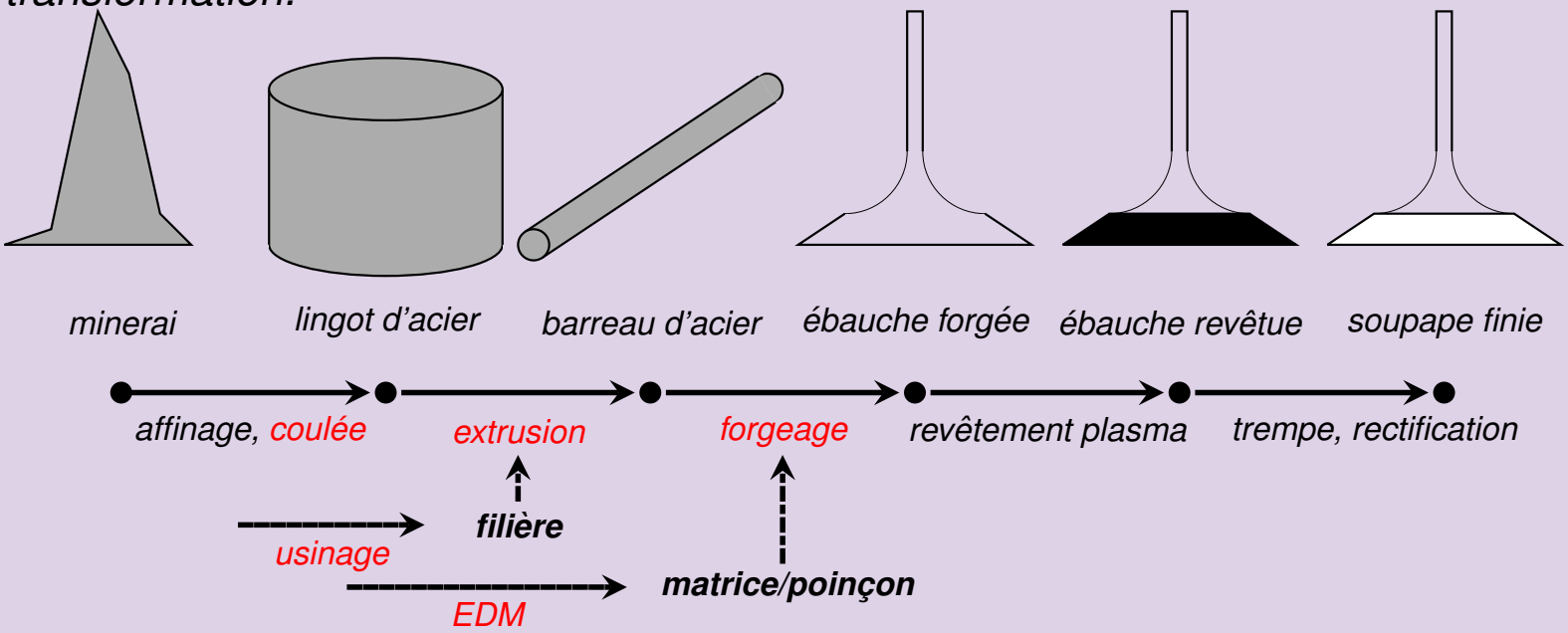


- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production. Elles constituent (une partie de) la **chaîne de procédés** nécessaires à fabriquer le produit.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.2.3 Combinaison des procédés

Chaînes de transformations et chaînes de procédés

- *La fabrication d'une pièce finie requiert généralement une séquence d'opérations de transformation.*



- *Cette séquence est la **chaîne de transformations** pour le produit considéré.*
- *Parmi ces opérations certaines sont des proc. de production. Elles constituent (une partie de) la **chaîne de procédés** nécessaires à fabriquer le produit.*
- *On considère les procédés nécessaires à fabriquer l'outillage **spécifique** comme des parties intégrantes de la chaîne de procédés pour une pièce donnée.*

1.3.1 Objectifs du cours

L'étudiant devra :

- *posséder une vue d'ensemble des principaux procédés de production*
- *connaître les caractéristiques et limites des procédés les plus courants*
- *comprendre la relation étroite entre conception du produit, choix des matériaux et choix des procédés de production*

1.3.1 Objectifs du cours

L'étudiant devra :

- *posséder une vue d'ensemble des principaux procédés de production*
- *connaître les caractéristiques et limites des procédés les plus courants*
- *comprendre la relation étroite entre conception du produit, choix des matériaux et choix des procédés de production*

1.3.2 Procédés de fabrication - IGI II

Programme du cours :

Chap.	*Sujet*	*périodes*
1 :	*Introduction*	*1*
2 :	*Comportement mécanique des matériaux*	*12*
	Travail écrit	*2*
3 :	*Procédés de formage*	*5*
4 :	*Procédés de fonderie*	*5*
	Travail écrit	*2*
5 :	*Usinage conventionnel et non conventionnel*	*5*
Total		*32*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

▸ Sidérurgie

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

- La guerre de cent ans, Jeanne d'Arc, les canons et les boulets en fonte

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*1ère révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*2ème révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*3ème révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*4ème révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

▸ $1^{ère}$ et $2^{ème}$ révolutions industrielles

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

▸ Eli Whitney

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel,**)*

1.4.1 Historique

Bref historique :

5 à 4000 B.C.	*martelage or, cuivre, fer météoritique*
4 à 3000 B.C.	*découpage, brasage argent, bronze, plomb, étain*
2 à 1000 B.C.	*forgeage fer, laiton*
600 à 800	*forgeage, soudage par forgeage, acier*
≈ 1450	*nouvelles technologies de fonderie*
≈ 1750	*$1^{ère}$ révolution industrielle (**machine à vapeur**, textiles)*
≈ 1801	*concept de pièces interchangeables (Eli Whitney)*
≈ 1870	*$2^{ème}$ révolution industrielle (**électricité**)*
≈ 1930	*outils en carbures de tungstène*
≈ 1950	*électroérosion*
≈ 1960	*solidification orientée, monocristaux*
≈ 1970	*soudage plasma, faisceau électrons, découpage laser*
≈ 1970	*$3^{ème}$ révolution industrielle (**électronique/informatique**)*
≈ 1990	*prototypage rapide, fabrication additive*
≈ 2015	*$4^{ème}$ révolution industrielle ? (**internet, monde virtuel, intell. artif.**)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

Solutions possibles -

Elles sont à chercher dans

- *la* ***conception*** *: simplification et standardisation des pièces*
- *la* ***production*** *: diminution des opérations, sélection du meilleur procédé.*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

Solutions possibles -

Elles sont à chercher dans

- *la* ***conception*** *: simplification et standardisation des pièces*
- *la* ***production*** *: diminution des opérations, sélection du meilleur procédé.*

1.5.1 Défis à relever par les entreprises

Problématique actuelle

- ***Economiser*** *l'énergie et les ressources,*
  - *limiter la pollution et assurer la durabilité,*
- ***Accélérer*** *le développement*
  - *réduire le temps de mise sur le marché afin de compenser la réduction de la durée de vie des produits et affronter la globalisation des marchés,*
- ***Maintenir (augmenter)*** *la qualité et la fiabilité du produit*
  - *pour maintenir sa compétitivité*
- ***Proposer*** *des produits personnalisés*
  - *pour répondre aux souhaits/besoins des clients (domaine du luxe, domaine médical)*

Solutions possibles - innovations par la production

Elles sont à chercher dans

- *la* ***conception*** *: simplification et standardisation des pièces*
- *la* ***production*** *: diminution des opérations, sélection du meilleur procédé.*

ANNEXES, TABLES ET BIBLIOGRAPHIE

Secteurs d'activités

Primaire	*Secondaire*	*Tertiaire*
		

Secteurs d'activités

Primaire	*Secondaire*	*Tertiaire*
		

Le $3^{\text{ème}}$ secteur sert à assurer la perennité et le bon fonctionnement des deux premiers, mais ne produit rien !

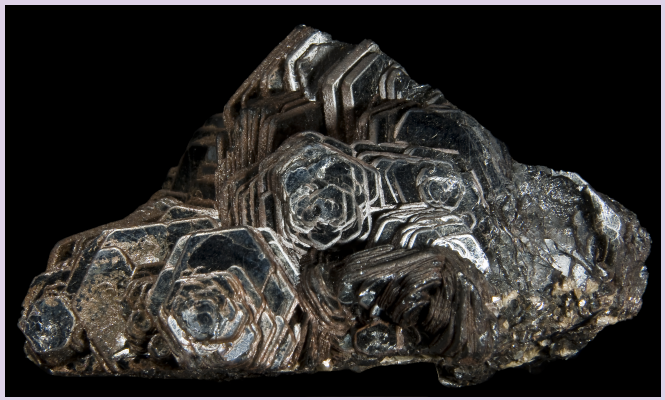
Secteurs d'activités

Primaire	*Secondaire*	*Tertiaire*
		

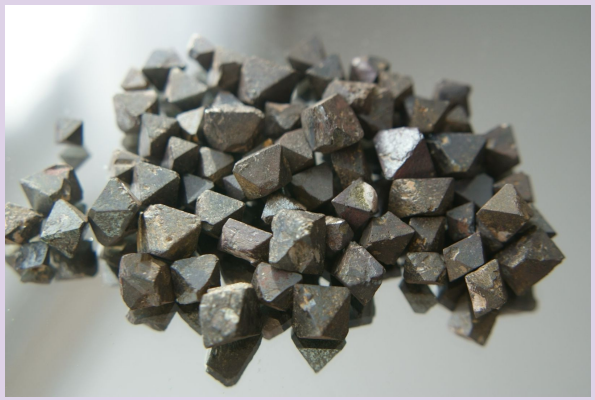
retour

Eléments de sidérurgie

Minerai de fer : hématite, magnétite, pyrite et sidérite



Hématite Fe_2O_3



magnétite Fe_2O_3



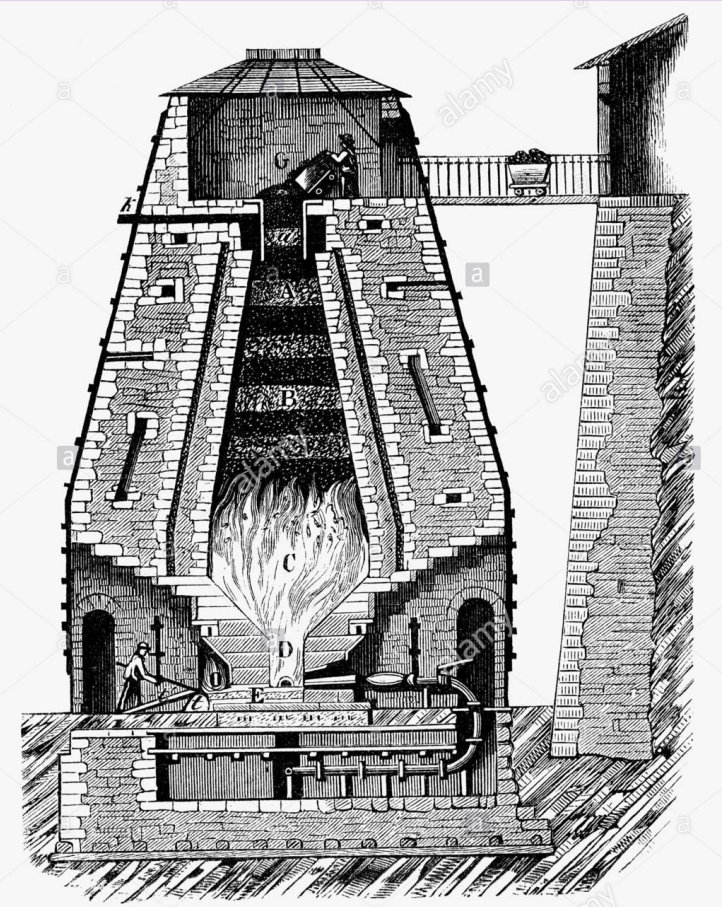
Pyrite Fe_2S



Sidérite $FeCO_3$

Elements de sidérurgie (suite)

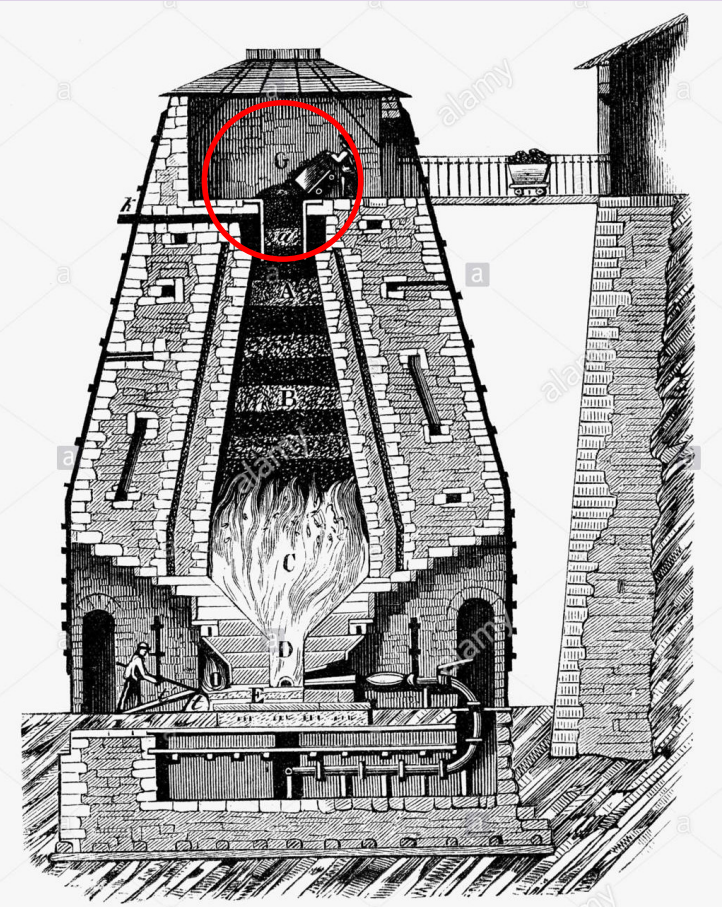
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°C$:*
  $$Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

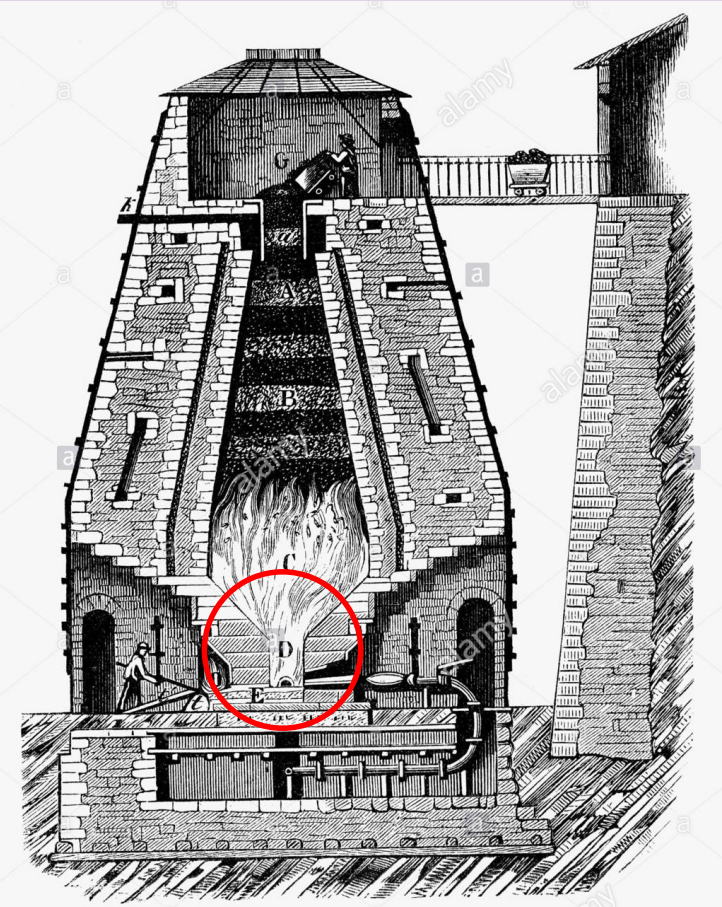
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°C$:*
  $$Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

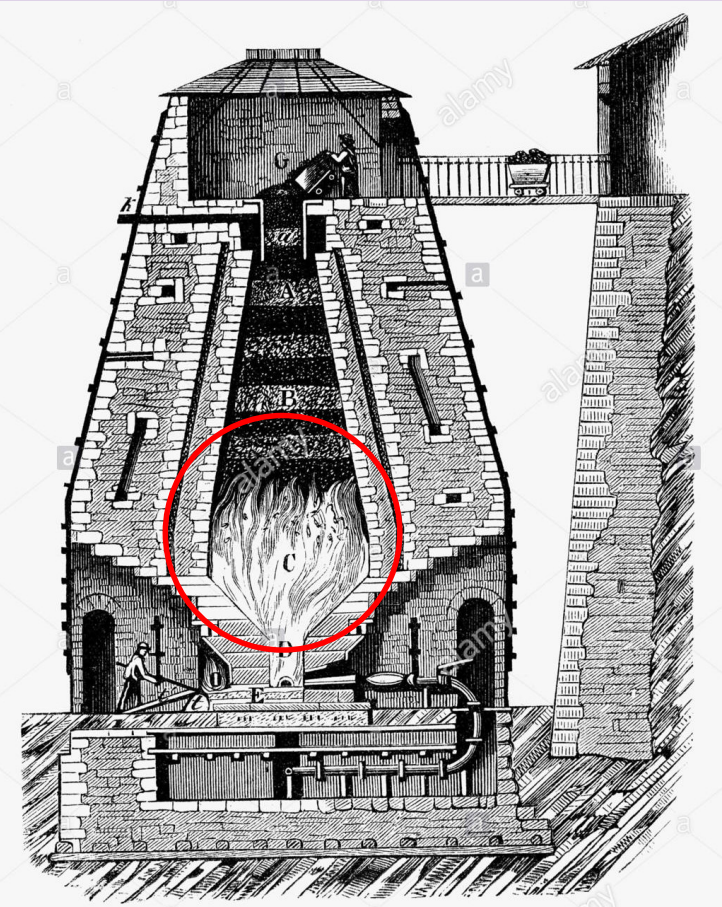
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°C$ dans la cuve :*
  $$Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



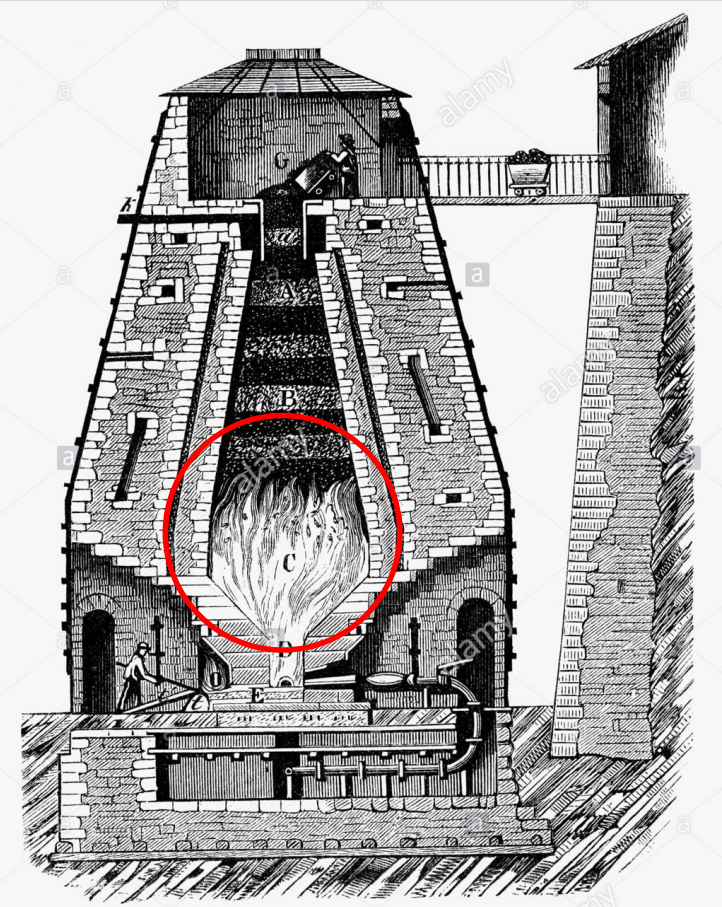
- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°C$ (croissant de zone B) :*

  $$Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$$

- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

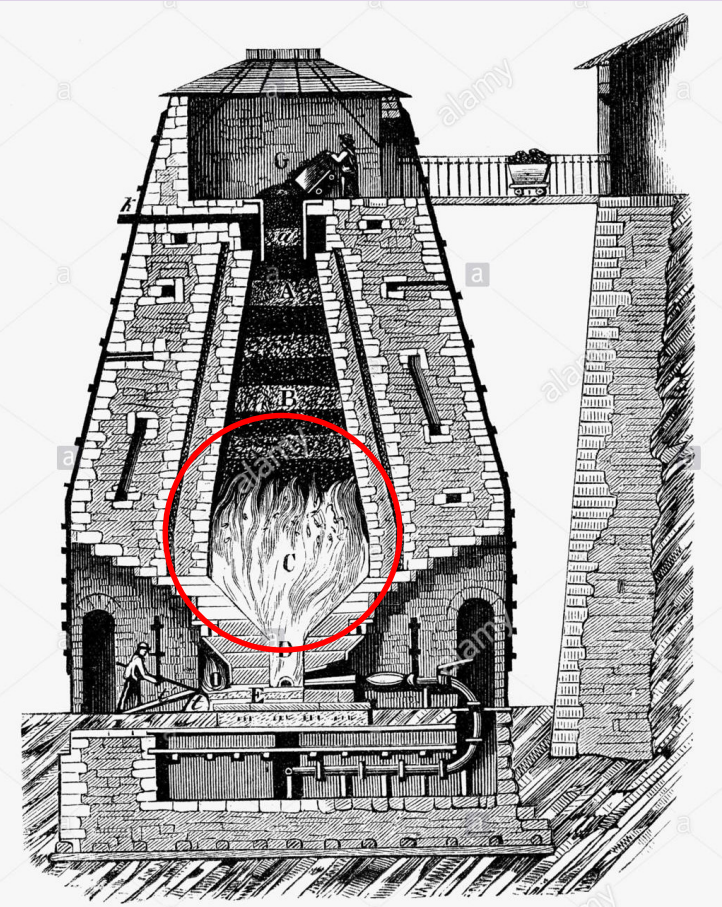
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°$ C (émission de CO_2 !) :*
  $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

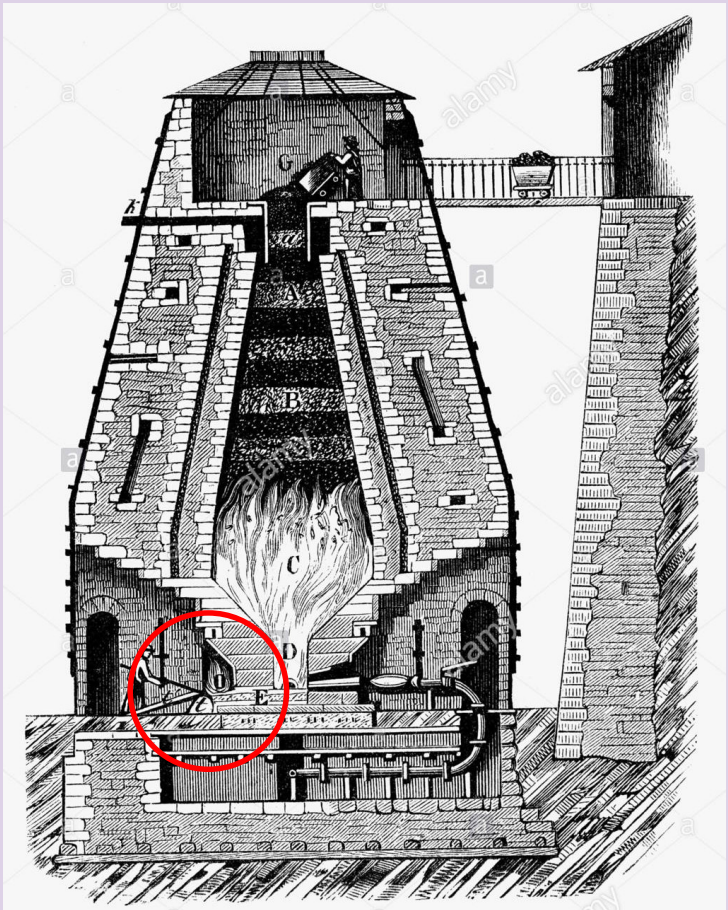
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°$ C (émission de CO_2 !) :*
  $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

Elements de sidérurgie (suite)

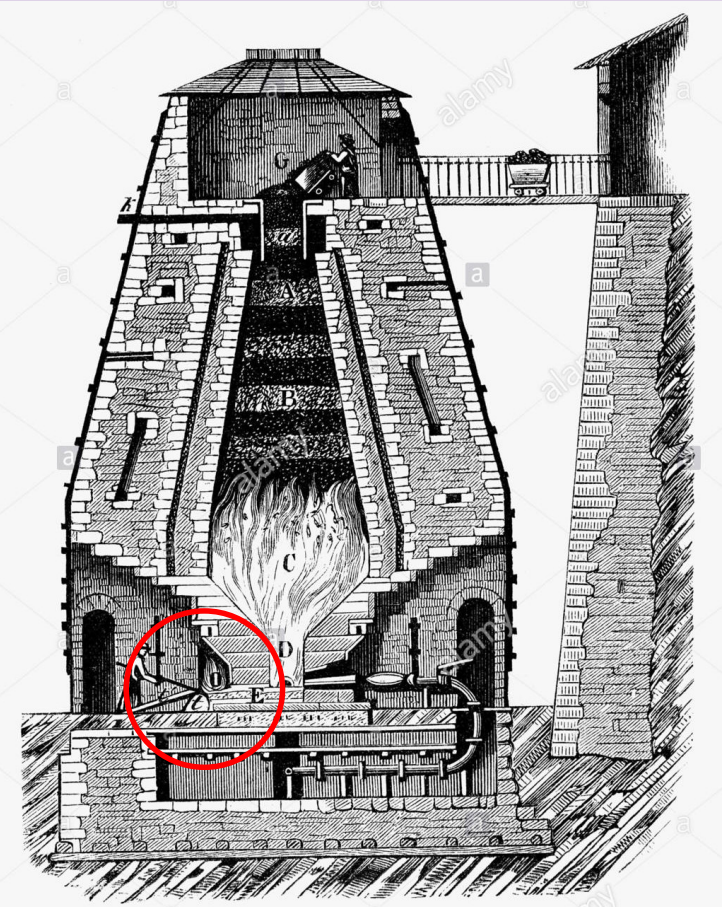
Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°$ C (émission de CO_2 !) :*
  $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le* ***laitier****.*

Elements de sidérurgie (suite)

Réduction du minerai (Fe_2O_3) : hauts fourneaux



- *Le minerai de fer et le coke : du charbon sans impuretés ($> 99.9\%$ C) sont introduits par le gueulard.*
- *De l'air chaud est soufflé par dessous.*
- *La combustion du coke produit du monoxyde de carbone CO et élève la température.*
- *La réaction de réduction a lieu à environ $1000°$ C (émission de CO_2 !) :*
  $Fe_2O_3 + 3\,CO \longrightarrow 2\,Fe + 3\,CO_2$
- *Le fer pur s'écoule du creuset par le trou de coulée*
- *L'ajout de chaux CaO permet de purifier la production en concentrant les impuretés dans le **laitier**.*

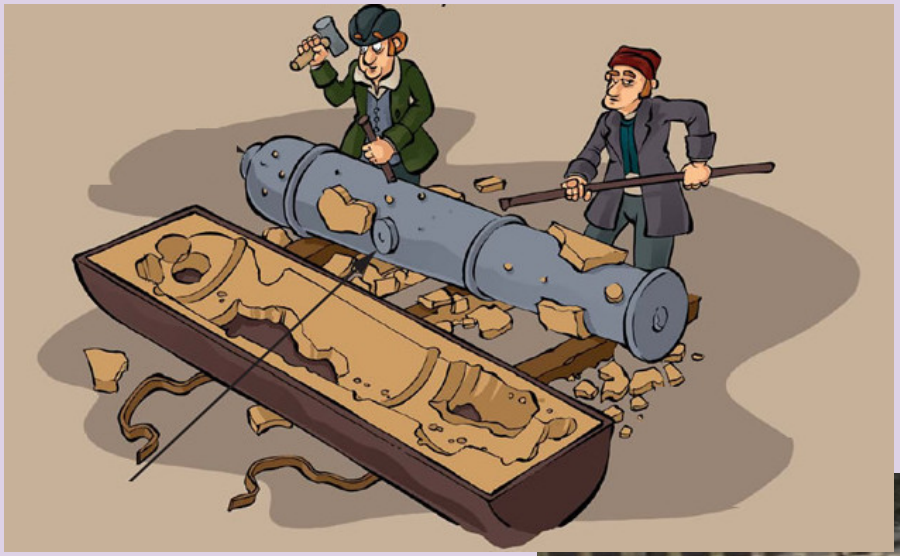
retour

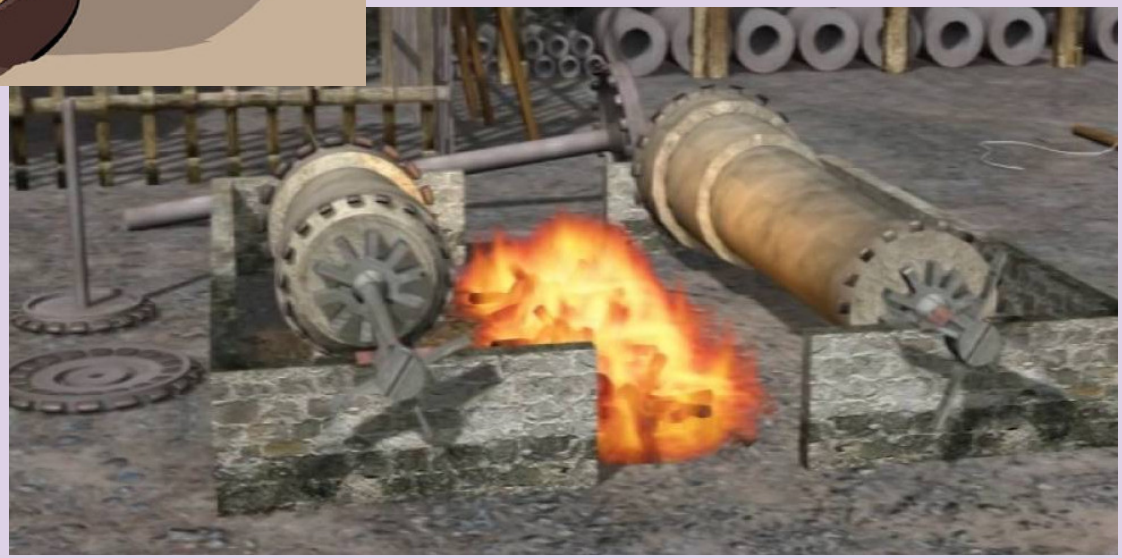
Maîtrise de la fonderie (suite)



Maîtrise de la fonderie (suite)

Vers 1420 : Amélioration des sables, masselottage





Maîtrise de la fonderie (suite)

Vers 1500 : le boulet en fonte



Maîtrise de la fonderie (suite)

Vers 1500 : le boulet en fonte



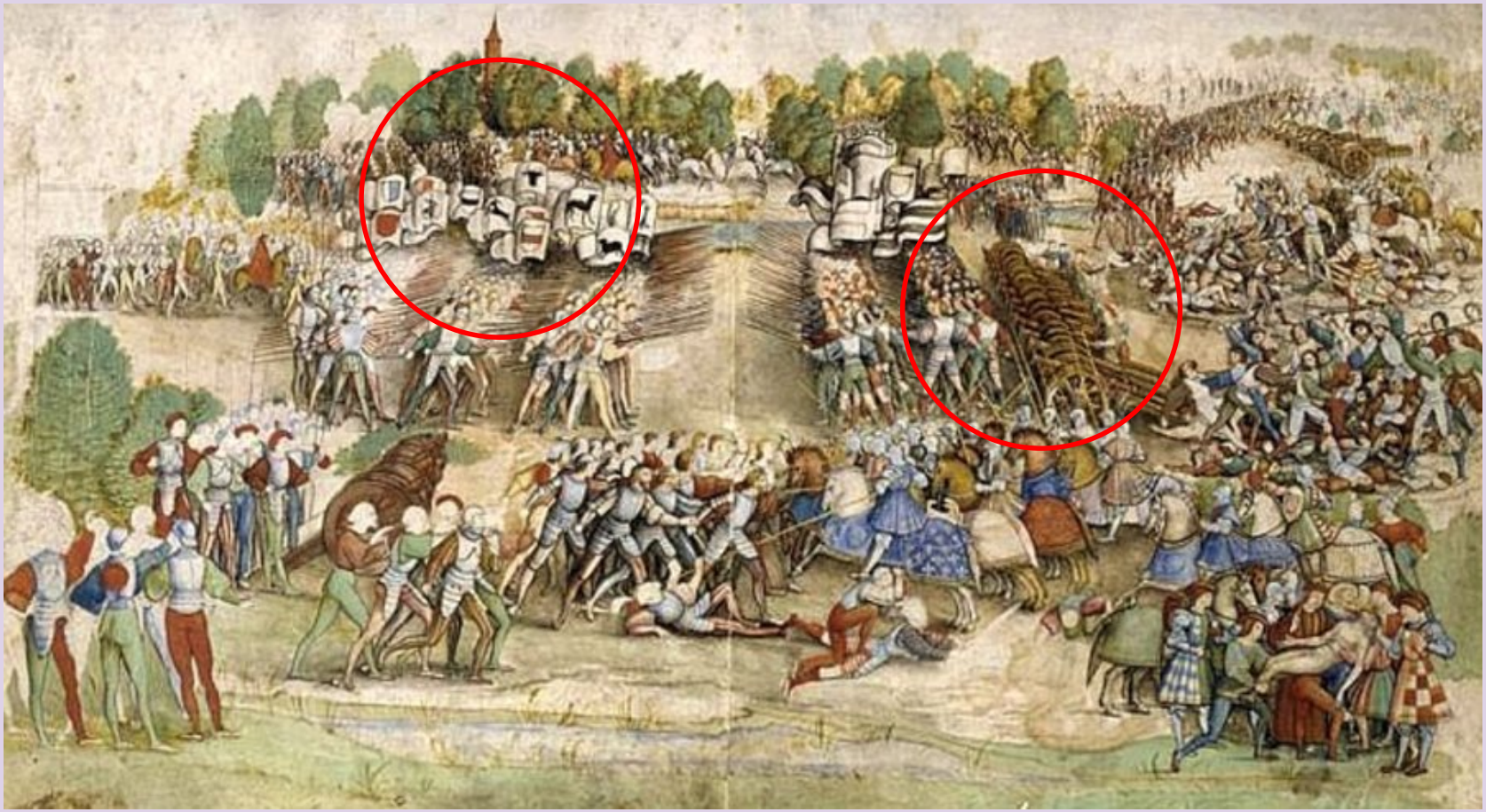


Maîtrise de la fonderie (suite)

1515 : Bataille de Marignan



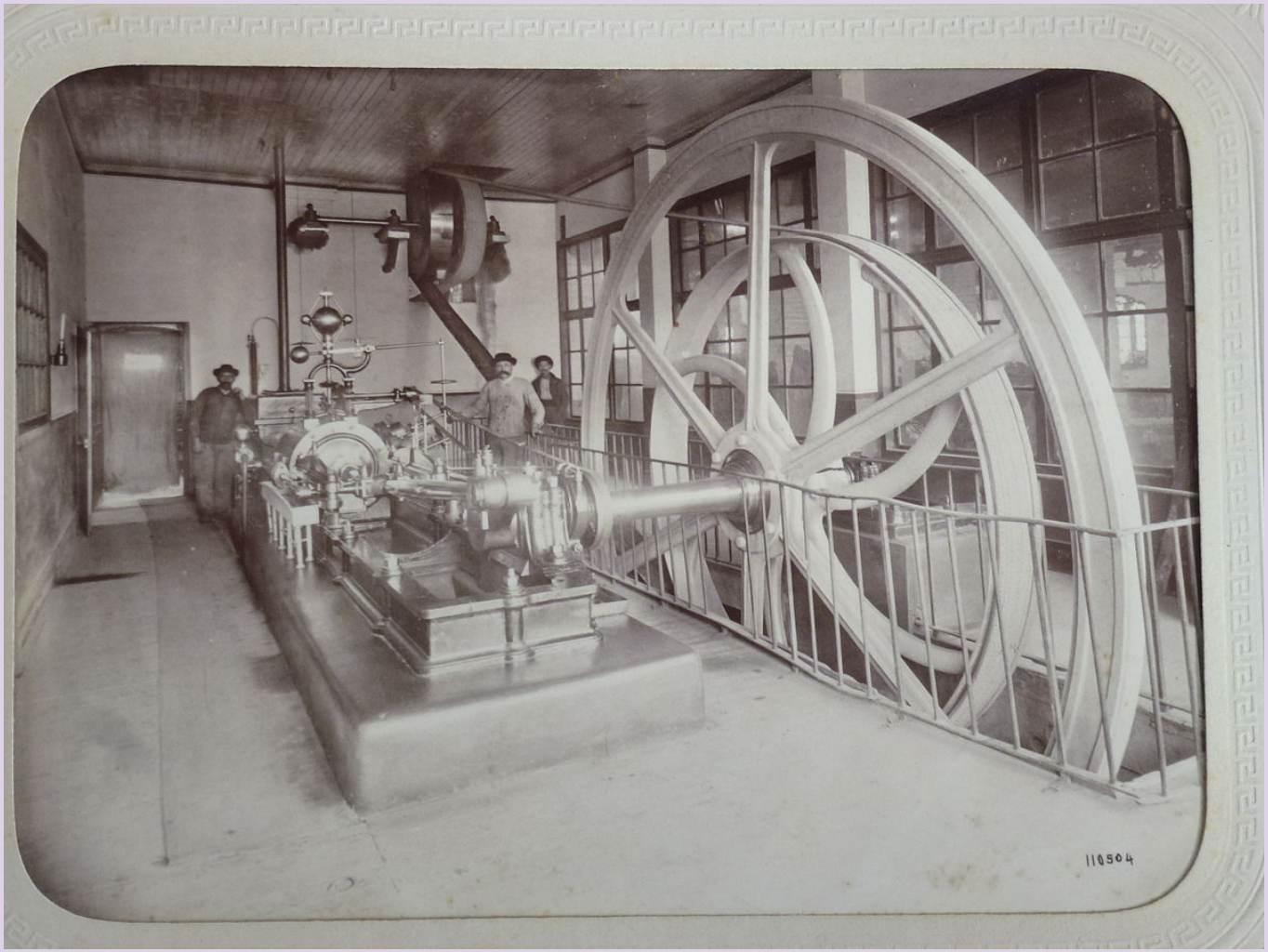
Maîtrise de la fonderie (suite)



retour

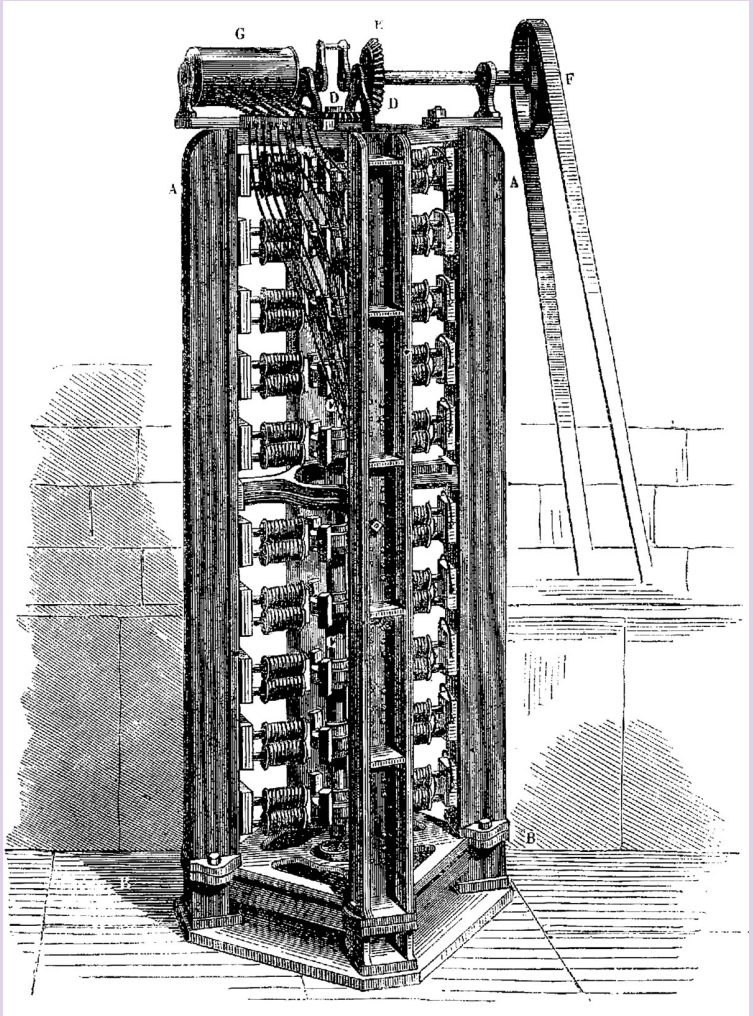
Révolutions industrielles

Première révolution : la machine à vapeur



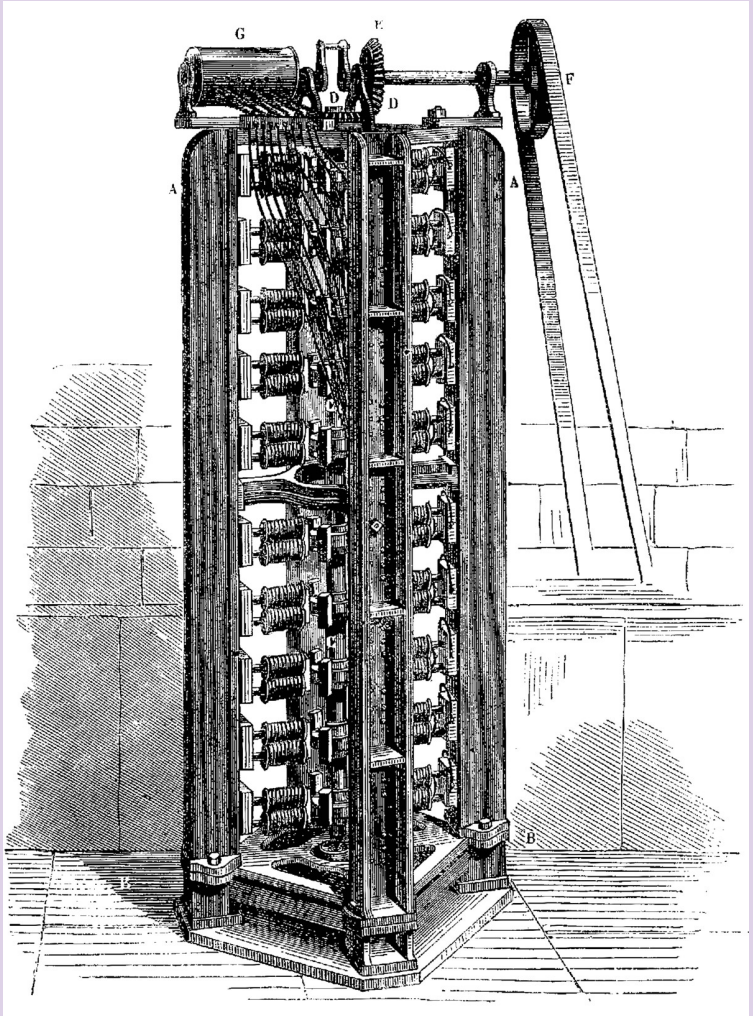
Révolutions industrielles (suite)

Seconde révolution : le moteur électrique



Révolutions industrielles (suite)

Seconde révolution : le moteur électrique

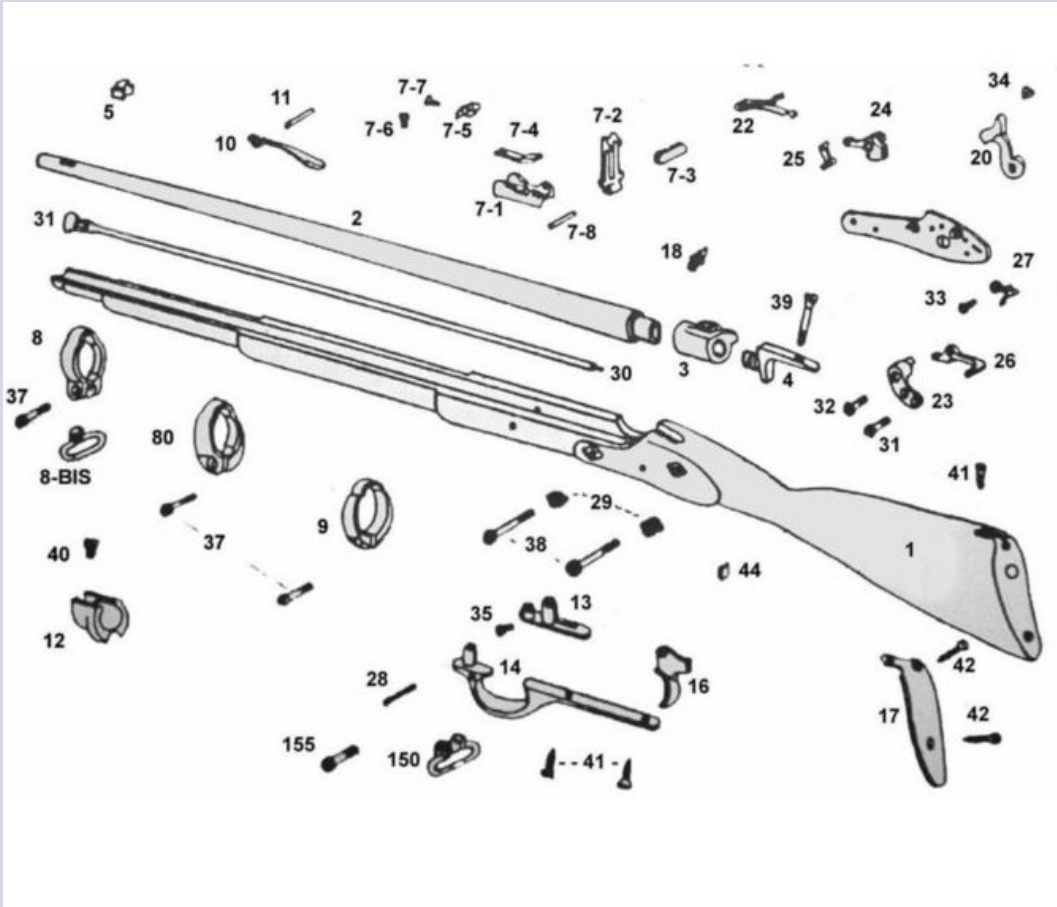


retour

Pièces interchangeables Eli Whitney (1765-1825)

Guerre civile américaine : 1801

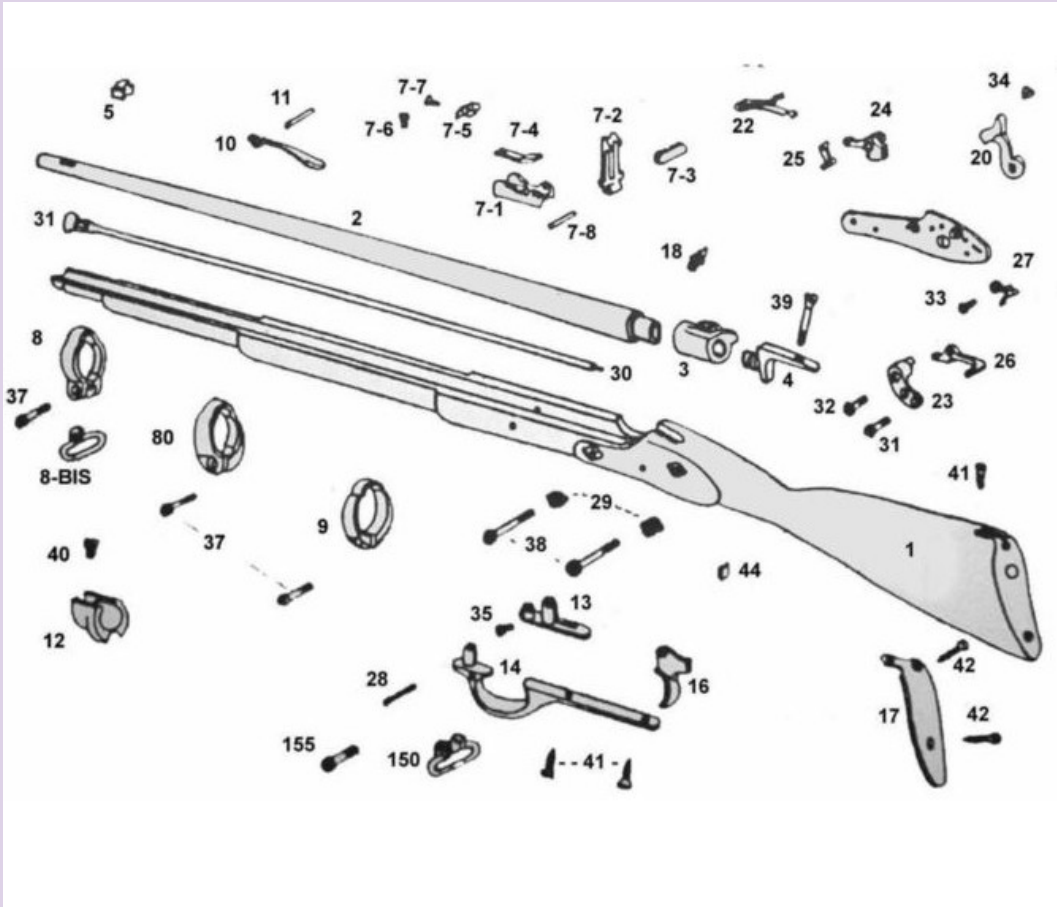




Pièces interchangeables Eli Whitney (1765-1825)

Guerre civile américaine : 1801





retour

Révolutions industrielles (suite)

Troisième révolution : l'informatique



Révolutions industrielles (suite)

Troisième révolution : l'informatique



retour

Révolutions industrielles (fin)

Quatrième révolution : internet



Révolutions industrielles (fin)

Quatrième révolution : internet



retour