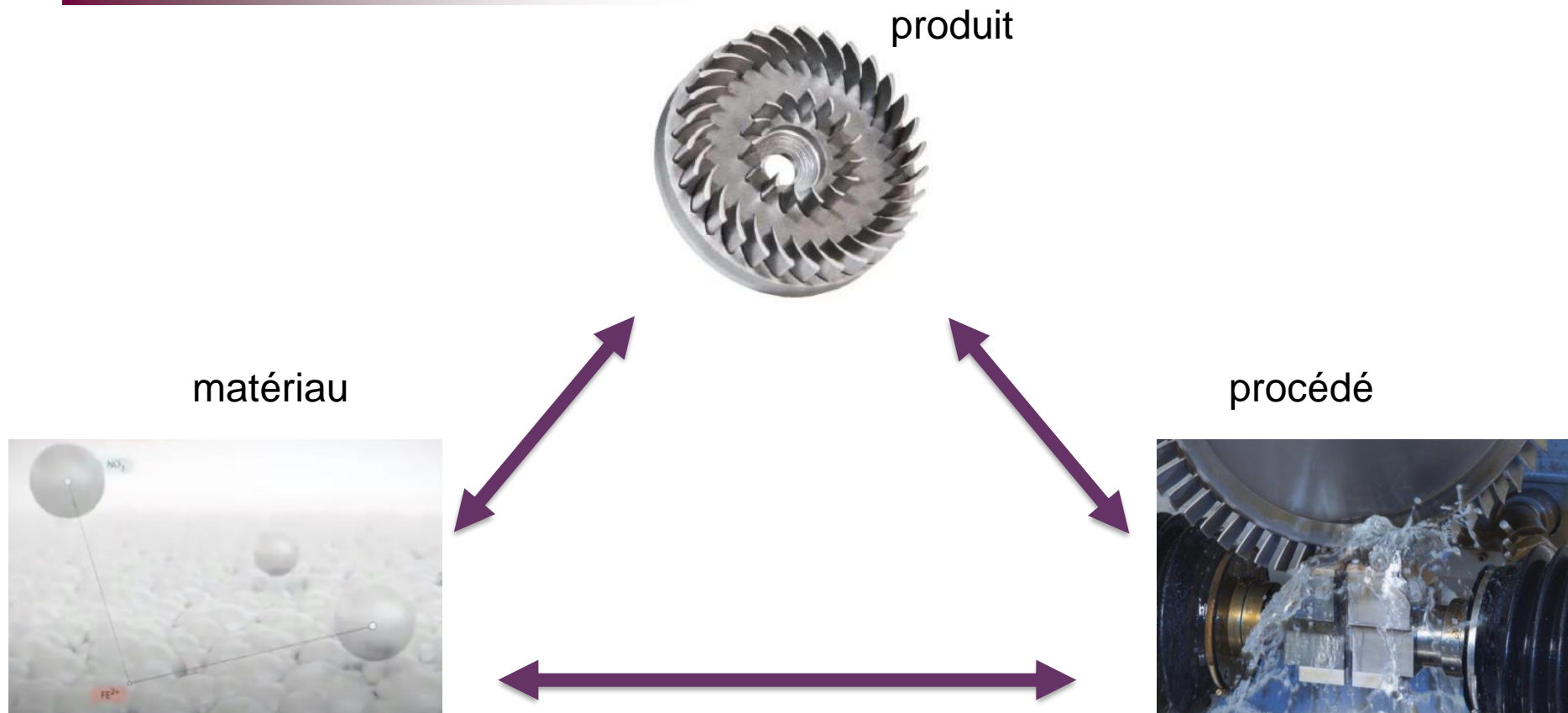


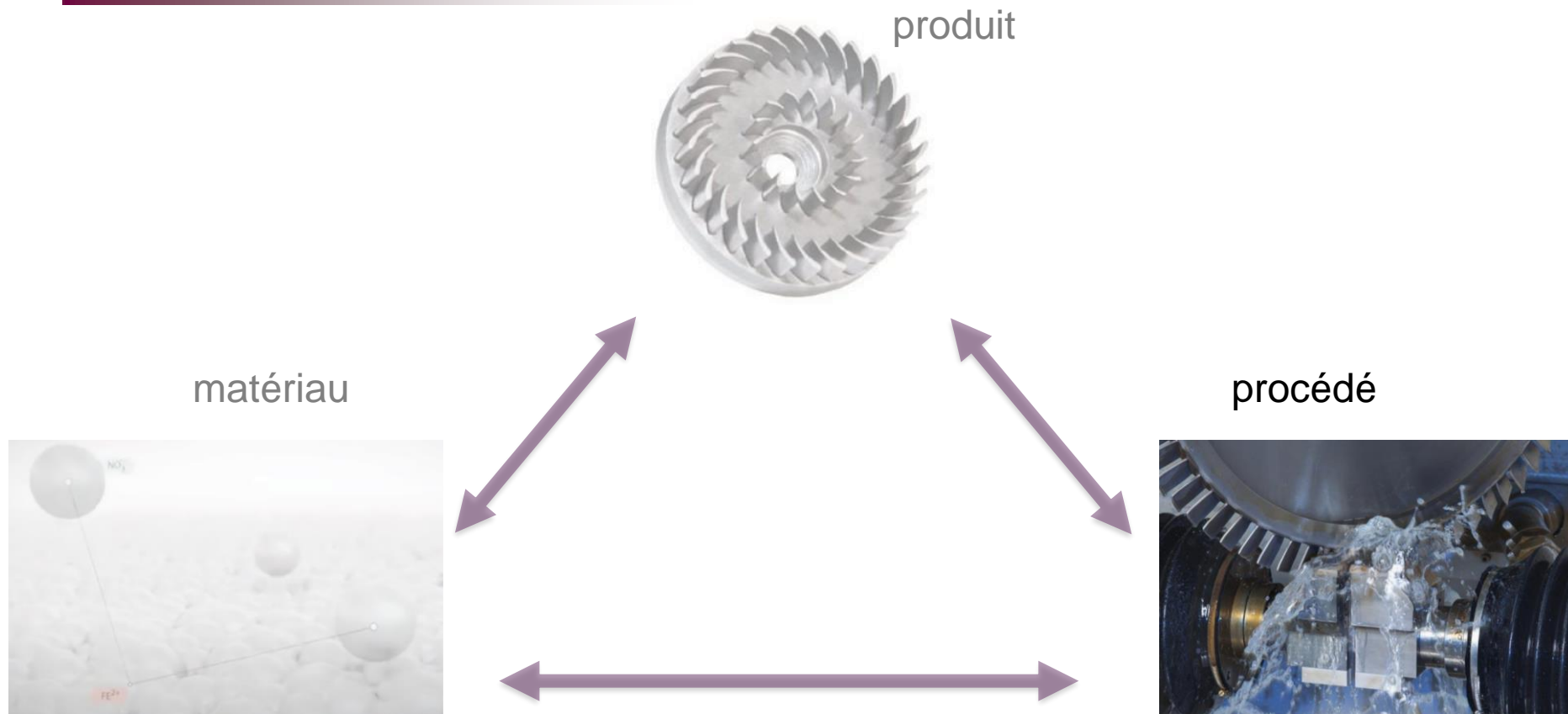


Procédé d'usinage électro-chimique

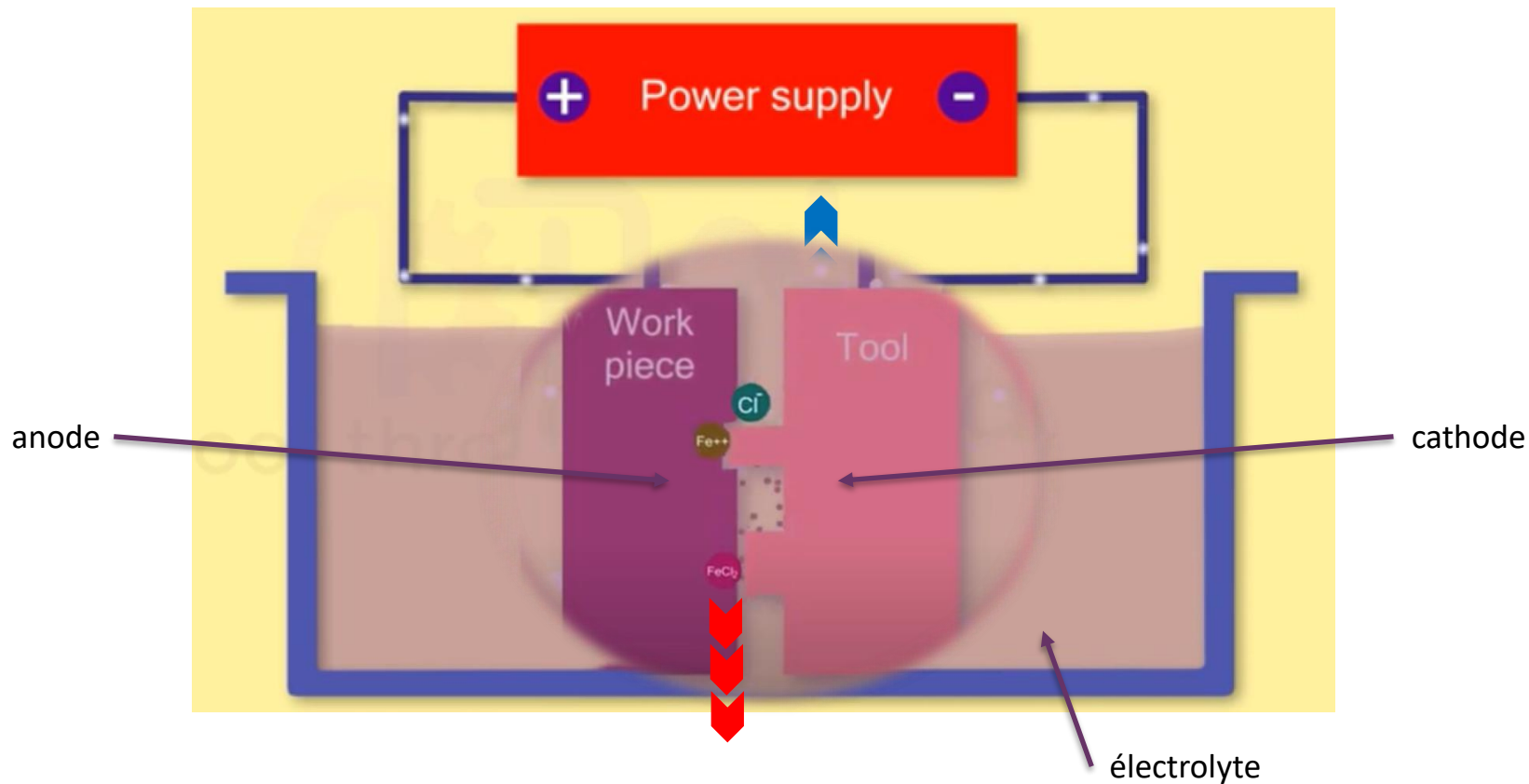
Usinage électrochimique



Usinage électrochimique

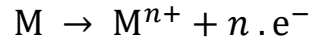


Principe du procédé

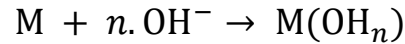


Principe du procédé 2

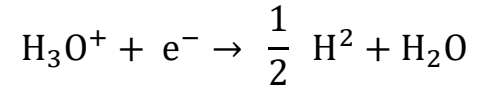
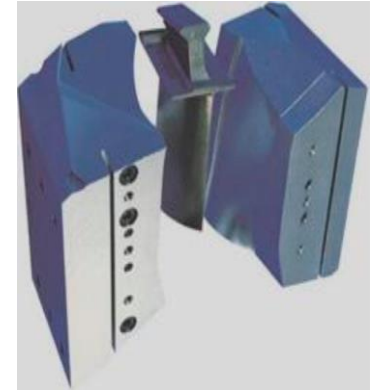
- Dissolution électrochimique (oxydation) du matériau de la pièce (anode).



- Réaction chimique dans l'électrolyte : stabilisation des ions métalliques.



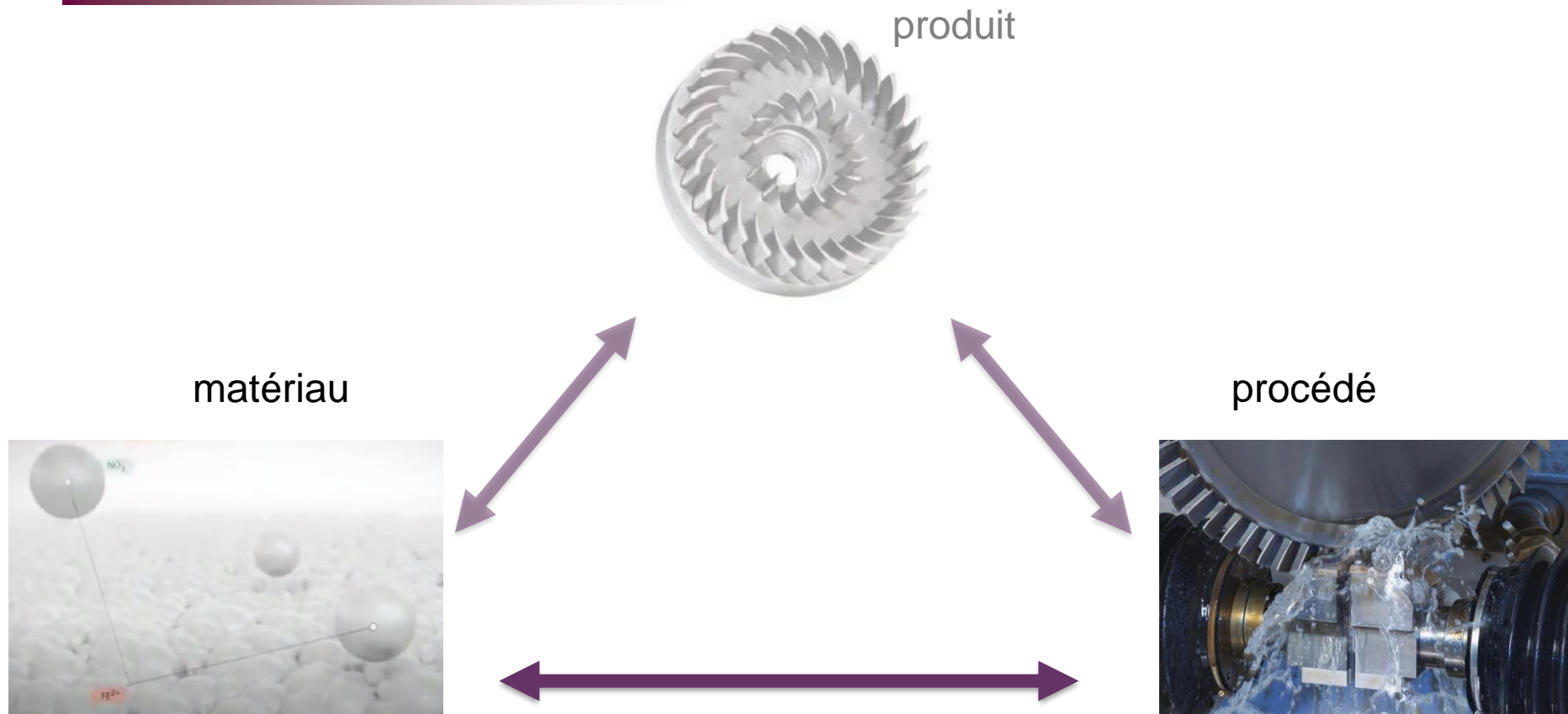
- Complémentarité géométrique outil-pièce



Principe du procédé 3

- Bilan :
 - Processus électrochimique (électrolyse) : transformation atomes métal \Leftrightarrow ions –
 - Processus purement chimique : piégeage des ions métallique sous forme d'hydroxydes métalliques
 - Complémentarité géométrique outil/pièce.
- « Produit » de l'usinage (= copeaux) :
 - Bulles de H₂ à la surface de l'outil.
 - Boues d'hydroxydes métalliques proches de la surface de la pièce (insolubles, inertes, isolantes).
- Circulation de l'électrolyte pour évacuer les boues de la surface de la pièce.

Usinage électrochimique

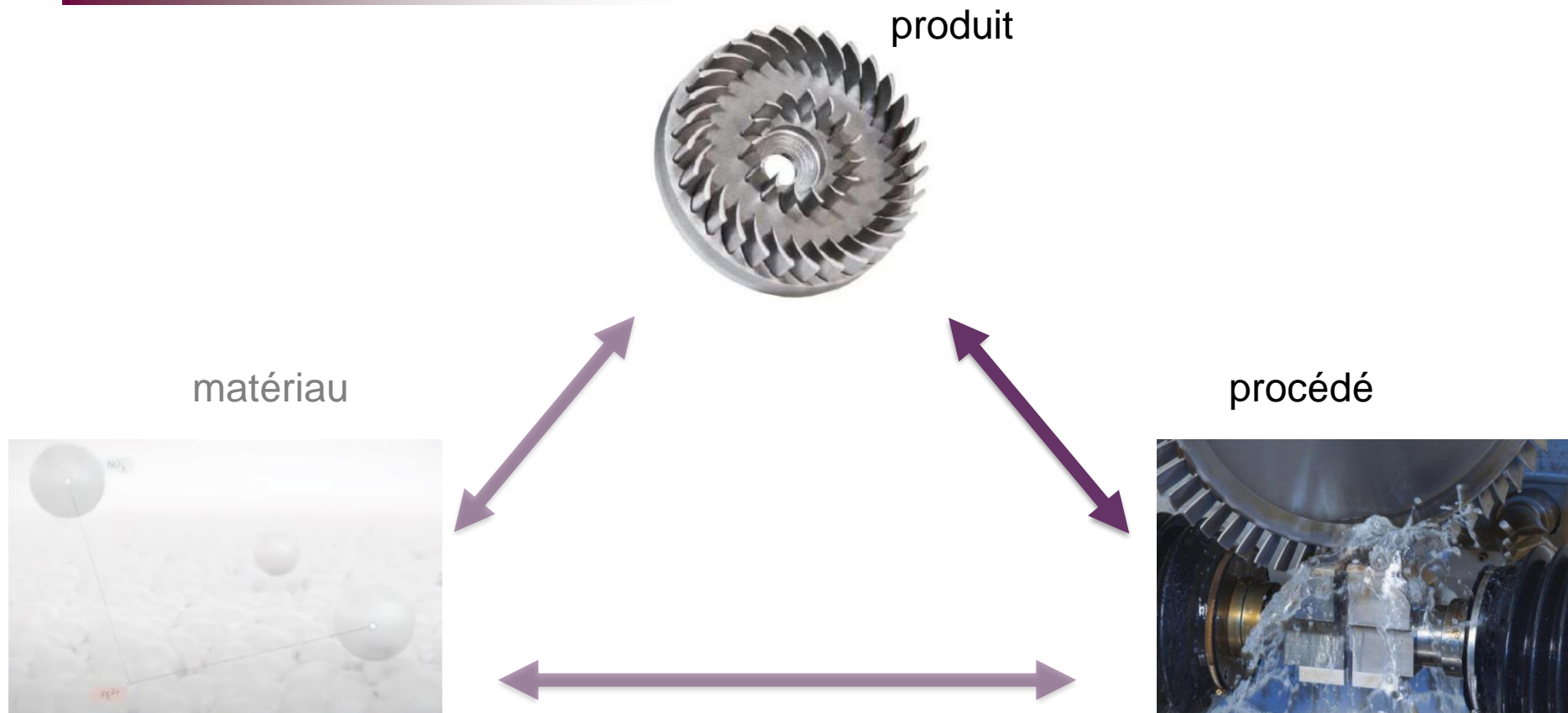


Matériau et procédé

- Caractéristique du matériau de la pièce :
 - Suffisamment conducteur électrique : acier, inox, alliages base nickel, titane, chrome-cobalt...
 - Oxydable avec l'électrolyte considéré.
 - Caractéristiques mécaniques sans importance.
- Caractéristiques du matériau d'outil :
 - Bon conducteur électrique.
 - Non oxydable dans l'électrolyte considéré.
- Caractéristiques de l'électrolyte :
 - Très bon conducteur électrique \Leftrightarrow forte concentration en sel, par exemple NaCl \sim 300g/L (mer = 30g/L).
 - Faible viscosité pour faciliter l'écoulement.
 - Grande capacité thermique et conductivité thermique pour évacuer la chaleur (effet Joule)
 - Température d'ébullition élevée
 - Pas de risque de toxicité

\Rightarrow Solution aqueuse le plus courant : NaCl, NaNO₃, NaNO₂...

Usinage électrochimique



Modélisation du procédé : loi globale de Faraday



Faraday, 1832

n : valence

A : masse atomique

T : durée de l'usinage

t : temps

$$\begin{array}{ccc} M & \longrightarrow & M^{n+} + n \cdot e^{-} \\ A \downarrow & & \downarrow n, F \\ m & = & \frac{A}{nF} \int_0^T i(t) \eta dt \end{array}$$

$F = 1$ Faraday = 96500 Coulombs

m : masse de matière enlevée

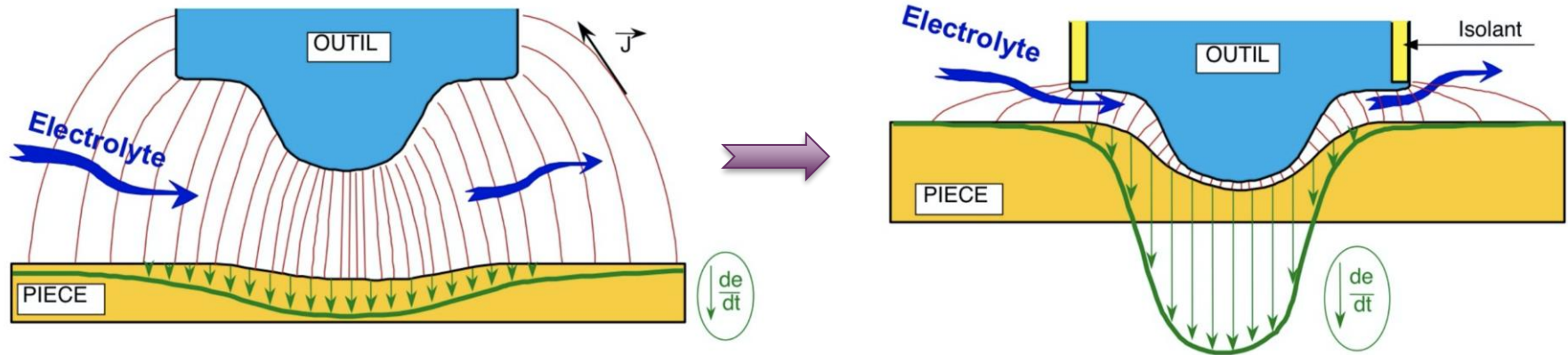
i : intensité du courant

η rendement de la dissolution

prend en compte les éventuelles oxydations parasites à l'anode.

Optimisation de la densité de courant

- La densité de courant $J = \frac{\partial i}{\partial s}$ pilote l'efficacité de l'usinage au niveau local.
- L'optimisation de J et donc de la répartition du champ électrique joue à l'ordre zéro sur l'efficacité du procédé!



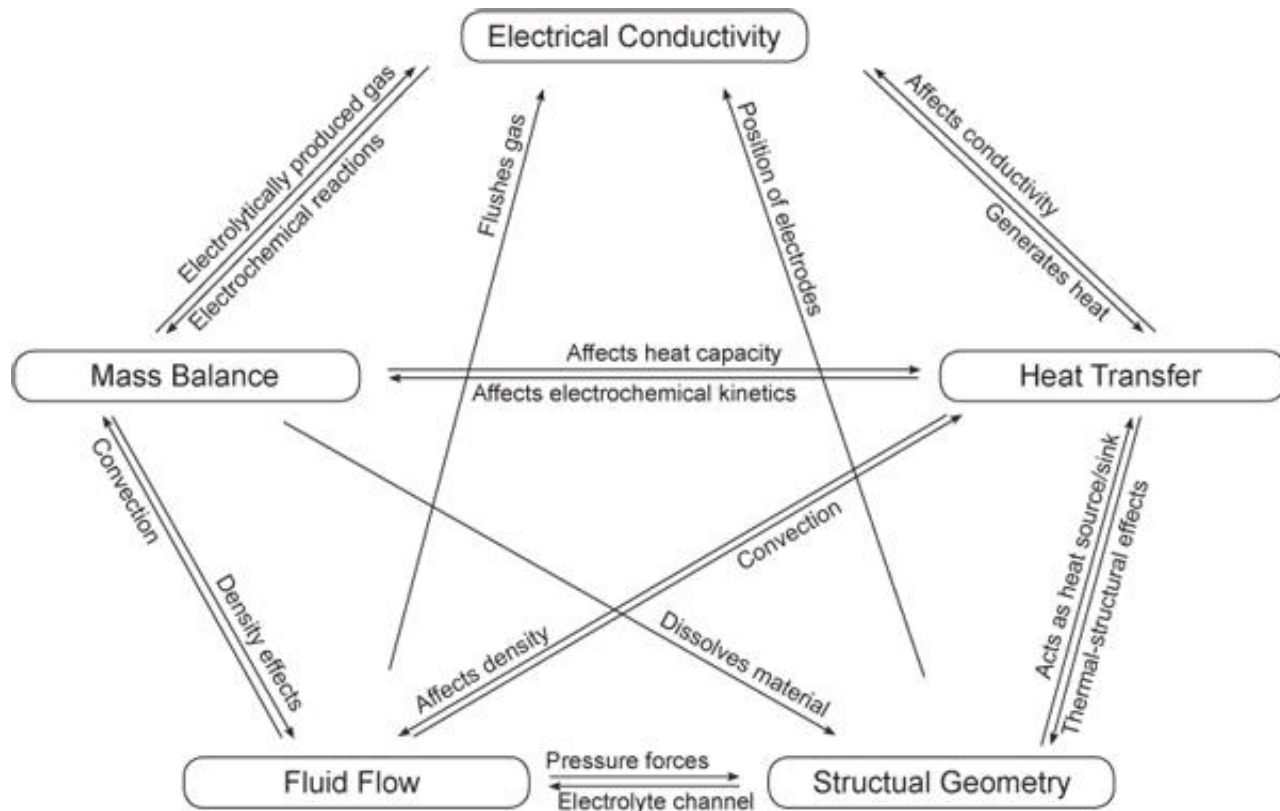
- Isolation des faces latérales de l'outil, distance outil-pièce faible (0.1mm – 1mm)

Modélisation : dimensionnement de l'usinage et de l'outil

Il faut décrire :

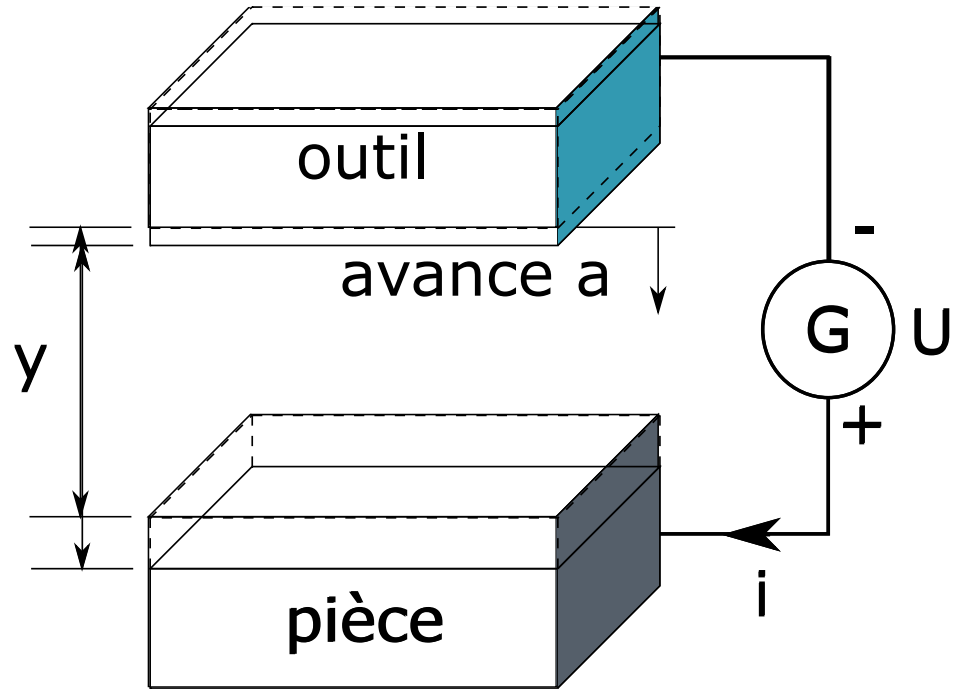
- L'enlèvement de matière par la loi de Faraday locale.
- La répartition du champ électrique $\vec{j} = -k \cdot \vec{E} = -k \cdot \overrightarrow{grad}v$ soit $\Delta v = 0$, avec les conditions aux limites, la géométrie et les polarisation réelles.
- Les perturbations de la conductivité k par les copeaux et l'échauffement
- L'écoulement turbulent de l'électrolyte
- Les transferts de chaleur
- L'influence de la température sur la cinétique de dissolution et sur les polarisations
- Le tout en 3D et en régime transitoire!

Modélisation : dimensionnement de l'usinage et de l'outil



Modélisation simplifiée

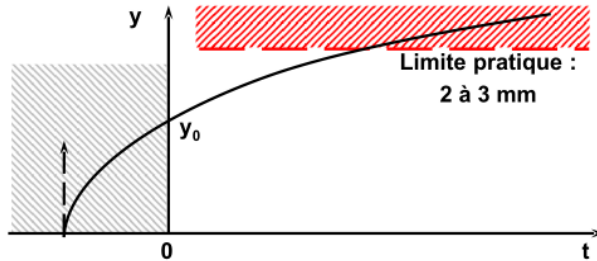
- Hypothèses :
 - Conductivité $k = \text{constante}$
 - Rendement $\eta = \text{constante}$
 - Répartition de J sans effets de bord
 - Alimentation $U = \text{constante}$
 - Polarisation constantes
 - Avance relative outil/pièce constante
- Modèle de 2 plans parallèles



Modélisation simplifiée 2

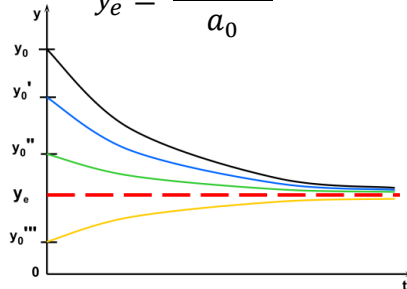
- Usinage statique $a = 0$
- Solution simple

$$y(t) = \sqrt{2E_m U k \eta t} + y_0$$

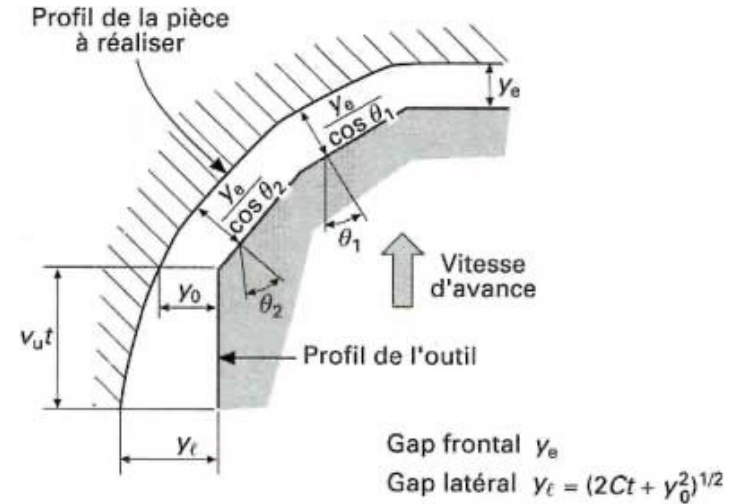


- Usinage à vitesse constante $a = a_0$
- Quelque soit la position de départ, on atteint un état d'équilibre (distance outil-pièce constante)

$$y_e = \frac{E_m U k \eta}{a_0}$$



- Extension à une surface inclinée par rapport à l'avance : dimensionnement de l'outil par facettes.



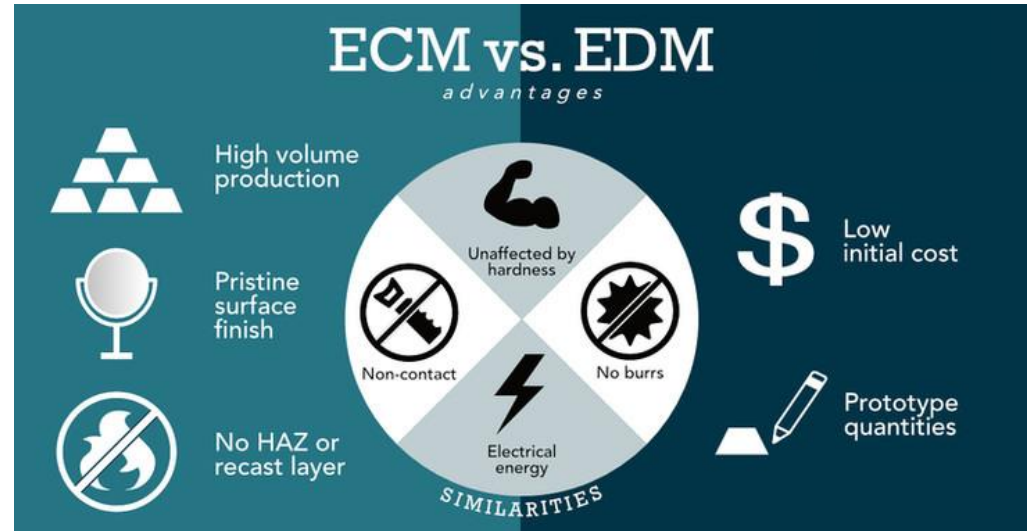
Bilan

■ Avantages

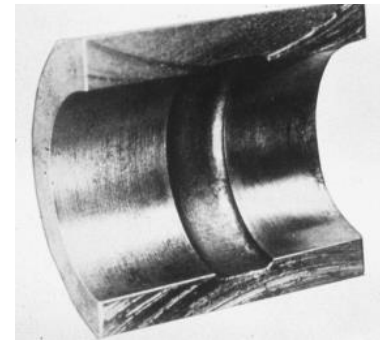
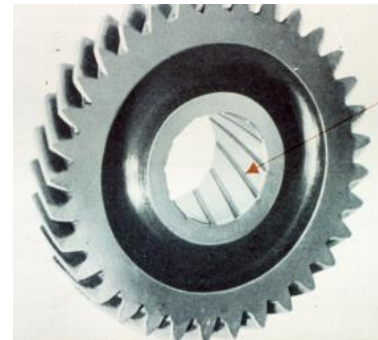
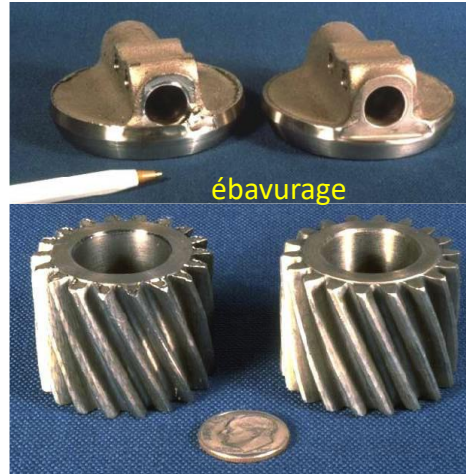
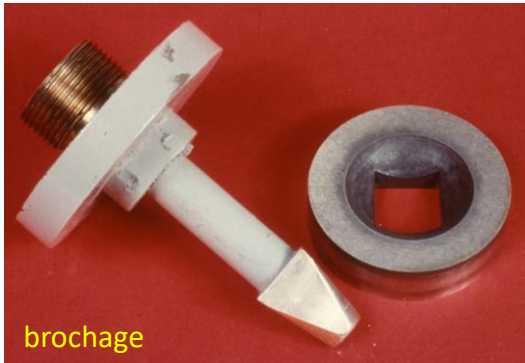
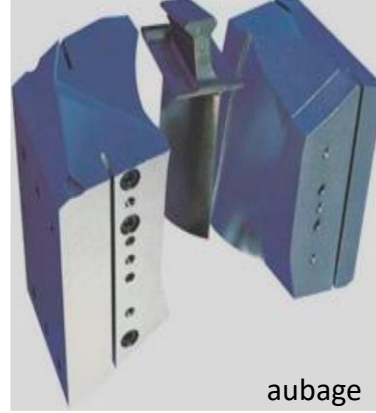
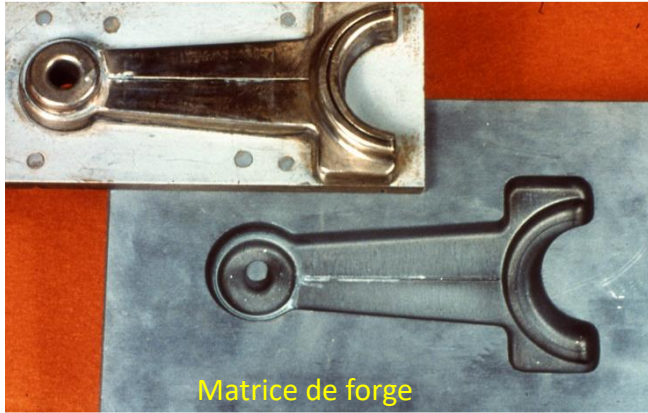
- formes complexes,
- précision mécanique courante,
- outil « inusable »,
- très bonne micro-géométrie,
- pas de dualité ébauche/ finition,
- pas d'angles vis,
- caractéristiques mécaniques du matériau sans influence,
- pas de contraintes résiduelles.

■ Inconvénients

- mise au point des outils complexe,
- électrolyte corrosif,
- pas d'angles vis,
- élimination des déchets.



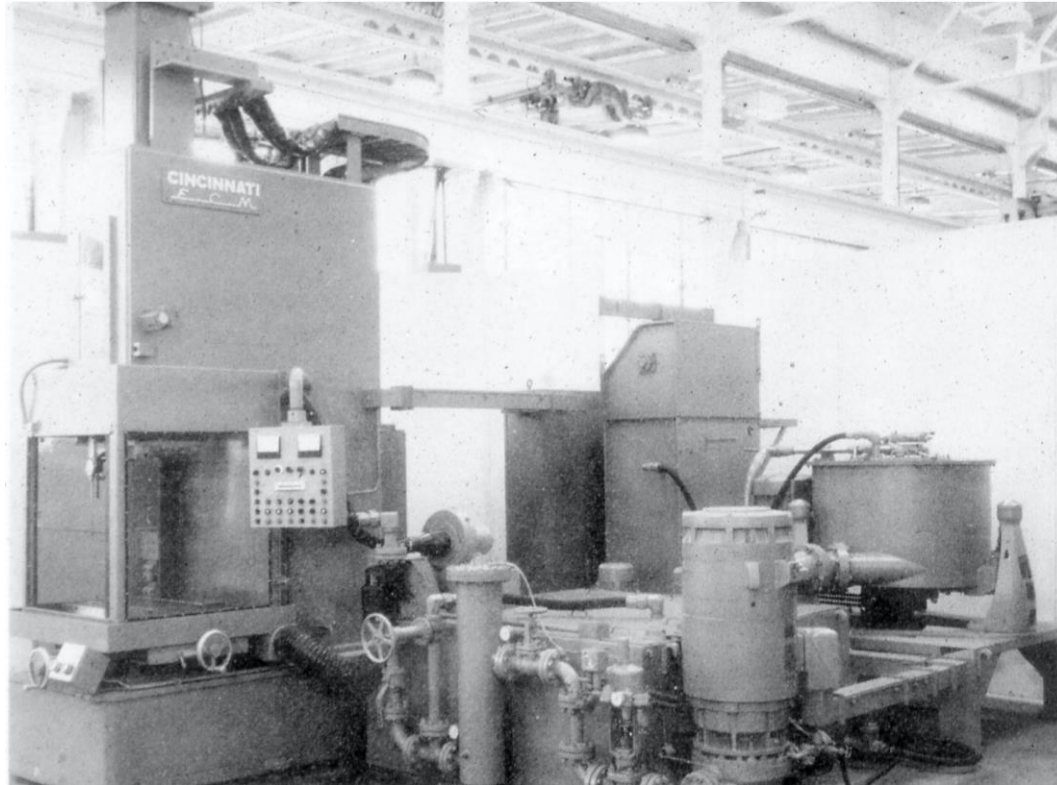
Exemples



usinage statique

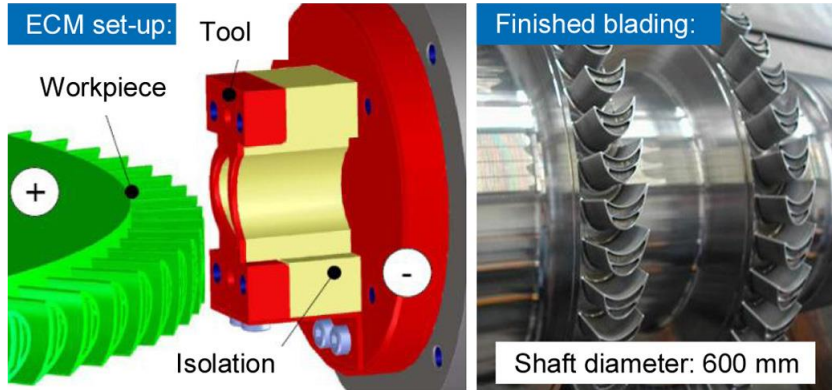
Exemples

- Machines forte capacité 1960-1970, 30 000A en courant continu sous 25V !



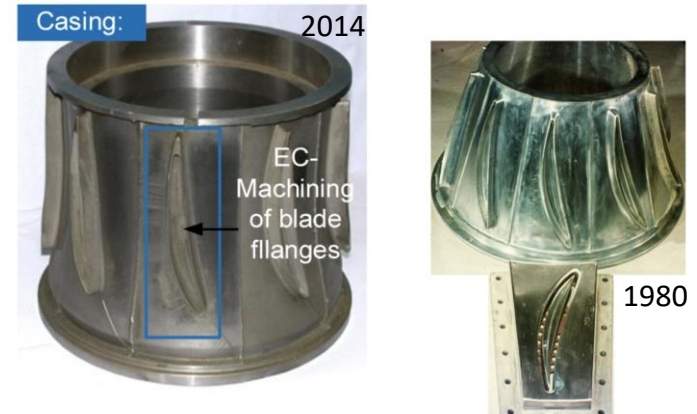
Usinage pulsé PECM

- Machines à générateur à courant pulsé : jusqu'à 40 000A, fréquence 10kHz.
- Machines à plusieurs axes, surface usinée jusqu'à 60cm², avance de 3mm/min.



La pièce fait 2.3m de long, 60cm de diamètre, et est composée de 120 aubes usinées dans la masse sur deux épaulement pré-usinés en tournage.

Redresseur de flux (aéro)



La pièce fait 35cm de diamètre et de hauteur, superalliage à base Ni, usinage sous 12V et 10000A.