

5 : Les gaz dans l'acier

Les principaux gaz susceptibles de se dissoudre dans l'acier liquide sont :

- l'**hydrogène (H)**
- l'**azote (N)**
- (et l'**oxygène O**, déjà étudié dans la désulfuration/oxydation)

Ces gaz ont un **impact majeur** sur la qualité du métal : porosités, fissures, fragilisation, soufflures, vieillissement, diminution de la ductilité, etc.

Les deux gaz les plus critiques en électrométallurgie sont **H** et **N**.

5.1 L'hydrogène dans l'acier

Dans l'acier liquide, H provient principalement de :

- l'**humidité** du métal chargé (ferrailles humides, oxydes hydratés)
- l'**eau** (H_2O) dissociée dans le four à arc (plasma + vapeur)
- l'hydrogène des **hydrocarbures** dans les réfractaires ou électrodes
- l'**humidité du gaz d'argon** (mauvaise qualité)
- réaction : $H_2O + Fe \rightarrow FeO + H_2$

La dissolution suit la **loi de Sieverts** : $[H] = k_H \cdot \sqrt{P_{H_2}}$

Donc :

- Plus P_{H_2} est élevé, plus l'acier absorbe H.
- Plus **T augmente**, plus la **solubilité augmente**.

5.1.1 Effets néfastes de l'hydrogène

- **Soufflures** dans les lingots/produits.
- **Flocons** (flakes) dans les aciers haute résistance.
- **Fragilisation retardée**.
- Pertes de ductilité.
- Rejets lors de la coulée

Effet	Cause	Conséquence principale
Soufflures	Dégagement H_2 lors solidification	Porosité interne
Flocons	Recombinaison $H \rightarrow$ microfissures	Rupture interne
Fragilisation retardée	Diffusion de H sous contrainte	Rupture tardive
Perte de ductilité	H affaiblit liaisons métalliques	Déformation difficile
Rejets lors de coulée	H dégazé en surface	Défauts de surface

5.1.2 Élimination de l'hydrogène (dégazage par raffinage secondaire)

1) Vide (VD, VOD) : méthode la plus efficace

VD (Vacuum Degassing) et VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) sont des procédés où l'acier liquide est exposé à un **vide partiel ou total**. L'effet principal : **élimination rapide et efficace des gaz dissous**, surtout l'hydrogène (H) et l'oxygène (O).

Le vide réduit la pression partielle des gaz au-dessus du métal, ce qui favorise leur **diffusion hors de l'acier** et permet de réduire l'hydrogène à des niveaux très faibles, limitant ainsi les **soufflures et flocons**.

Applications typiques : aciers pour applications critiques (aéronautique, tubes haute résistance, inox de qualité).

En résumé : le vide crée un environnement où les gaz dissous n'ont presque aucune pression au-dessus d'eux pour rester dans l'acier, donc ils sortent très efficacement.

2) Barbotage argon (Ar stirring)

Le barbotage consiste à injecter de **petites bulles d'argon** dans le bain d'acier liquide.

- Les bulles **remuent** le métal (stirring).
- En remontant, elles **captent l'hydrogène dissous** dans l'acier.
- L'hydrogène passe alors **du métal vers les bulles**, puis s'échappe dans l'atmosphère du convertisseur ou de la poche.

Le barbotage augmente **l'échange métal–gaz**, ce qui facilite l'**évacuation de l'hydrogène** dissous dans l'acier.

3) Dessiccation des gaz injectés (Ar sec)

Lorsque l'on injecte de l'argon dans l'acier, il peut contenir de l'humidité (H₂O). **Si le gaz est humide :**

- La vapeur d'eau peut **libérer de l'hydrogène** en se décomposant dans le métal chaud.
- Cela **augmente la teneur en H** dans l'acier, ce qu'on veut éviter.

Solution :

- On utilise de l'argon **séché (Ar sec)** avant injection.
- Cela réduit l'apport d'humidité et donc **la dissolution d'hydrogène** dans l'acier.

4) Réduire l'humidité des ferrailles

Les ferrailles (ferrailles d'acier, ferrailles recyclées) contiennent souvent **de l'eau ou de l'humidité**. Le problème :

- Lorsqu'elles sont ajoutées à l'acier fondu, l'eau se décompose et **libère de l'hydrogène** :



- Cela augmente la teneur en **hydrogène dissous** dans l'acier.

Solution :

- Sécher les ferrailles avant leur ajout (chauffage, stockage à l'abri de l'humidité).
- Cela réduit l'apport d'hydrogène dans le métal liquide.

5) Utilisation de laitier sec

Le laitier est le mélange de oxydes (CaO, SiO₂, etc.) qui flotte à la surface de l'acier liquide.

Si le laitier est humide :

- L'eau présente dans le laitier peut se décomposer à haute température :
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$$
- Cela **introduit de l'hydrogène** dans l'acier.

Solution :

- On utilise un **laitier sec**, sans humidité résiduelle.

5.2 L'azote dans l'acier

➤ Origine de l'azote

Dans l'électrométallurgie :

- Air du four électrique (uranage, fuites).
- Injection d'azote (carburation, soufflage).
- Réaction du plasma dans l'arc électrique.
- N₂ de la décomposition de nitrides dans la ferraille.

➤ Dissolution dans l'acier

Comme H, la dissolution suit la **loi de Sieverts** :

$$[N] = k_N \cdot \sqrt{P_{N_2}}$$

➤ Particularité :

La solubilité de N **augmente fortement** si l'acier contient des éléments comme :

- **Cr, Mn, V, Al** → formation de nitrides
- Les aciers inox (Cr élevé) absorbent **plus** d'azote.

➤ Effets néfastes

- **Durcissement** (dans certains aciers)
- **Vieillissement (strain aging)** : apparition de Cottrell atmospheres
- Diminution de la ductilité
- Formation de **bulles** si sursaturation
- Formation de nitrides gênants

Chapitre 5 : Les gaz dans l'acier

Pour certains aciers (inox austénitiques), l'azote peut être **avantageux** (augmentation de la résistance en solution solide).

➤ Conditions favorisant l'absorption de N

- **T haute** → solubilité élevée
- **P_{N₂}** élevé (présence d'air, fuites)
- Métaux très réactifs vis-à-vis de N :
 - Cr, Ti, Al, V
 - Forment des nitrures

➤ Élimination (dénitruration) : Beaucoup plus **difficile** que pour H. Les méthodes :

1) Dégazage sous vide (VD/VOD)

- Le vide favorise la réaction inverse : [N] → 1/2N₂(g)
- Mais TRÈS lent si présence de fortes teneurs en Cr.

2) Barbotage argon

- Aide à libérer le N du métal
- Bien moins efficace que pour l'hydrogène

3) Laitiers oxydants

- Les oxydes basiques (CaO, MgO), en éliminant l'O, stabilisent moins le N.

4) Éviter l'azote

- Utiliser des **gaz inertes (Ar)** plutôt que N₂
- Réduire les entrées d'air
- Contrôler l'état du four (étanchéité)

➤ Comparaison H vs N dans l'acier

Aspect	Hydrogène	Azote
Solubilité	Faible mais augmente avec T	Plus élevée, surtout avec Cr
Mécanisme	Sieverts	Sieverts
Effets	Flocons, soufflures, fragilisation	Vieillissement, nitrures
Élimination	Facile (vide + Ar)	Difficile
Origine	Humidité	Air, N ₂
Aciérie électrique	H très critique	N augmente si fuites d'air