

6 : Désoxydation de l'acier

La désoxydation constitue une étape essentielle de l'affinage de l'acier en métallurgie secondaire. Elle vise à réduire la teneur en oxygène dissous dans le bain métallique afin d'améliorer la propreté inclusionnaire, d'éviter la réoxydation du métal et de garantir des propriétés mécaniques reproductibles.

Dans un acier liquide, l'oxygène peut exister sous trois formes :

- **Oxygène dissous** [O] dans le métal.
- **Produits d'oxydation** : oxydes formés in situ (FeO, MnO, SiO₂...).
- **Oxygène combiné dans les inclusions non métalliques** (CaO·Al₂O₃, MnO-SiO₂...).

Plus la teneur en oxygène dissous est élevée, plus la formation d'inclusions est probable. La désoxydation a donc un double objectif :

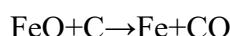
- Abaisser la concentration de [O] ;
- Stabiliser des inclusions contrôlées, faciles à éliminer ou à rendre inoffensives.

5.1. Les méthodes de désoxydation

La désoxydation peut être réalisée par plusieurs voies complémentaires.

5.1.1. Désoxydation thermique (« carbon deoxidation »)

Elle repose sur la réaction entre le carbone du bain et les oxydes de fer :



À haute température, la solubilité du CO augmente et la réaction élimine une partie de l'oxygène. C'est une méthode **faible**, insuffisante pour obtenir des teneurs en oxygène très basses. Elle est utilisée principalement dans le four à arc (EAF) comme pré-désoxydation.

5.1.2. Désoxydation par les éléments d'addition (Al, Si, Mn, Ca, Ti, Zr)

La méthode la plus importante. Le principe est d'ajouter dans le bain un élément ayant une affinité plus grande pour l'oxygène que le fer.

Critère thermodynamique de l'efficacité d'un désoxydant est ΔG° (formation oxyde) $\ll 0$.

Les principaux désoxydants :

Élément	Oxyde formé	Puissance désoxydante
Al	Al ₂ O ₃	Très forte
Si	SiO ₂	Forte
Ca	CaO	Très forte
Ti	TiO ₂	Très forte
Zr	ZrO ₂	Très forte
Mn	MnO	Faible

L'aluminium reste le désoxydant principal en métallurgie secondaire, car il combine :

- Forte affinité pour l'oxygène,

- Faible solubilité de l'alumine,
- Stabilité élevée de Al₂O₃.

5.1.3. Désoxydation par le laitier

Un laitier basique, riche en CaO, peut absorber les oxydes formés dans le métal.

Cependant, le laitier n'agit pas comme **désoxydant direct**, mais comme **réservoir d'oxygène** ou comme « capteur » d'inclusions.

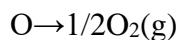
Le rôle du laitier :

- Absorber SiO₂, Al₂O₃ et MnO,
- Tamponner le potentiel d'oxygène du bain,
- Participer à la désoxydation si son FeO est faible.

L'exigence fondamentale : **Faible teneur en FeO et MnO**, sinon le laitier réoxyde l'acier.

5.1.4. Désoxydation sous vide

Le vide permet d'abaisser la pression partielle d'O₂ :



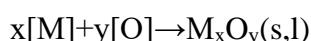
La relation thermodynamique :

$$[\text{O}] \propto \sqrt{P_{\text{O}_2}}$$

Sous vide, la concentration d'oxygène dissous diminue. Technique très efficace pour les aciers inox et aciers à haute propreté.

5.2. Interaction entre les éléments désoxydants et l'oxygène

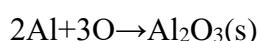
Les réactions de désoxydation suivent un schéma général :



Où M_xO_y est l'oxyde précipité.

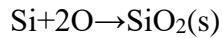
L'intensité de la désoxydation dépend de :

1. **La constante d'équilibre K:** $K = \frac{a_{\text{oxyde}}}{a_M^x \cdot a_O^y}$
2. **La valeur de ΔG° :** Plus elle est négative, plus la réaction est favorable.
3. **Les activités des éléments M et O** (elles dépendent des interactions métalliques).
➤ **Exemple : désoxydation par l'aluminium**



La courbe de Ellingham montre que l'oxyde Al₂O₃ est l'un des plus stables. ΔG°_{Al₂O₃} ≈ -1000 kJ/mol. L'aluminium abaisse fortement [O]. [O] < 10 ppm possible.

➤ Exemple : désoxydation par le silicium



Moins puissant que Al, mais produit des inclusions plus fluides (SiO_2 , $\text{MnO}-\text{SiO}_2$).

5.3. Formation et élimination des produits de désoxydation

5.3.1. Formation des produits de désoxydation

Les produits de désoxydation sont des **inclusions non métalliques**.

➤ Nature des inclusions produites

Selon le désoxydant utilisé :

- **Aluminium** → Al_2O_3 (solide, anguleux)
- **Silicium** → SiO_2 (solide), $\text{MnO}-\text{SiO}_2$ (liquide selon composition)
- **Calcium** → CaO , $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (liquides à haute T°)
- **Manganèse** → MnO (solide)

L'objectif industriel : Obtenir des inclusions **liquides**, sphériques, non adhésives, faciles à flotter.

➤ Mécanisme de précipitation

1. Formation atomique de l'oxyde au niveau local (réaction chimique).
2. Noyautage et croissance de particules solides ou liquides.
3. Agglomération en clusters plus gros.
4. Flottation vers le laitier (si densité suffisamment faible).

Si les inclusions sont solides et collantes (ex. Al_2O_3), elles peuvent :

- S'agglutiner,
- Bloquer les réfractaires,
- Provoquer des bouchages de buse.

5.3.2. Élimination des produits de désoxydation

L'élimination dépend de deux facteurs :

1) Propriétés des inclusions (densité, viscosité, état solide/liquide)

- Inclusions liquides (Aluminates de calcium) → migration facile.
- Inclusions solides (Al_2O_3) → élimination difficile.

2) Dynamique du bain métallique

- Agitation argon (bubbling Ar) → favorise la flottation.

- Homogénéisation → croissance des inclusions.
- Interaction avec le laitier → absorption des oxydes.

➤ Flottation vers le laitier

Les inclusions denses ou visqueuses montent lentement. Les inclusions liquides montent plus vite. La vitesse de flottation suit approximativement la loi de Stokes (pour des petites particules sphériques).

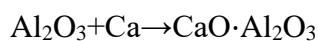
➤ Absorption dans le laitier

Un laitier efficace doit avoir :

- Faible FeO, MnO (sinon réoxydation).
- Basicité adéquate pour dissoudre Al₂O₃ et SiO₂.
- Viscosité raisonnable pour permettre la diffusion des inclusions.

➤ Stabilisation des inclusions par addition de calcium

L'injection Ca ou CaSi transforme les inclusions Al₂O₃ en aluminates de calcium liquides :



Avantages :

- Inclusions sphériques liquides ;
- Élimination facilitée ;
- Réduction du nozzle clogging.

5.4. Conclusion

La désoxydation de l'acier est une étape clé de l'affinage électrométallurgique, déterminante pour :

- La réduction de la teneur en oxygène dissous,
- La maîtrise de la propreté inclusionnaire,
- La formation et l'élimination efficace des produits de désoxydation.

La compréhension des interactions thermodynamiques et cinétiques entre les éléments désoxydants (Al, Si, Ca, Mn, etc.), l'oxygène dissous et le laitier permet :

- de choisir la séquence optimale des additions,
- de contrôler la nature et l'état des inclusions,
- et d'améliorer la qualité finale de l'acier, notamment sa fluidité, sa propreté et sa stabilité chimique.

Une maîtrise rigoureuse de ces paramètres est indispensable pour la production d'acières de haute pureté dans les fours électriques et les procédés de métallurgie secondaire.