



Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN



Modélisation de la Carbonitruration des Alliages **16NiCrMo13 et 23MnCrMo5**



Walter Dal'Maz Silva
10 décembre 2014

Encadrement



Jacky DULCY

Ingénieur de Recherche, IJL, Nancy

Co-directeur de Thèse

Thierry BELMONTE

Directeur de Recherche, IJL, Nancy

Directeur de Thèse



- 1 Introduction
- 2 Démarche à la Pression Atmosphérique
- 3 Pyrolyse des Atmosphères à Base d'Hydrocarbures
- 4 Prochaines Démarches
- 5 Références



Introduction



Institut Jean Lamour
PENSER LES MÉTALLURGIES DE DEMAIN

Introduction

Défi

Développement de matériaux d'ingénierie combinant ténacité et résistance à l'usure.

Introduction

Défi

Développement de matériaux d'ingénierie combinant ténacité et résistance à l'usure.

But

Contribuer à la compréhension des phénomènes régissant la carbonitruration à partir d'hydrocarbures et d'ammoniac des aciers faiblement alliés.

Introduction

Défi

Développement de matériaux d'ingénierie combinant ténacité et résistance à l'usure.

But

Contribuer à la compréhension des phénomènes régissant la carbonitruration à partir d'hydrocarbures et d'ammoniac des aciers faiblement alliés.

Carbonitruration

Traitement thermochimique par diffusion de carbone et d'azote en phase austénitique. Le procédé de carbonitruration des alliages 23Mn-CrMo5 et 16NiCrMo13 est étudié dans son ensemble (phase gazeuse, interface, phase solide).

Description de la Problématique

- ▶ Compréhension des effets de l'hydrodynamique et de la cinétique chimique (homogène et hétérogène) dans le transfert de masse gaz-solide lors de la carbonitruration employant des hydrocarbures comme source de carbone et de l'ammoniac pour l'azote, visant établir des conditions de traitement où l'étape limitante du procédé soit le transport à l'état solide.

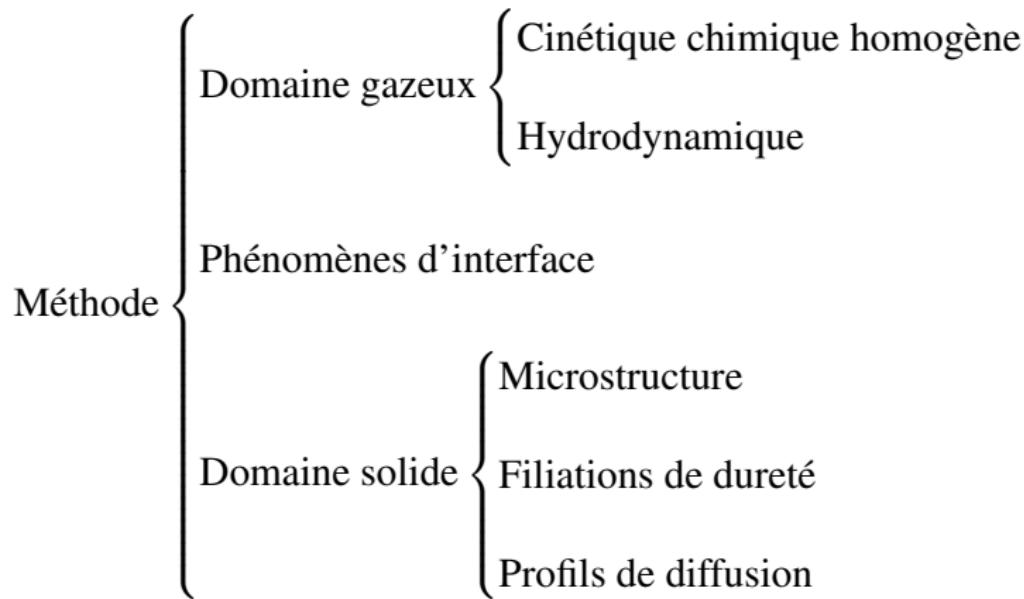
Description de la Problématique

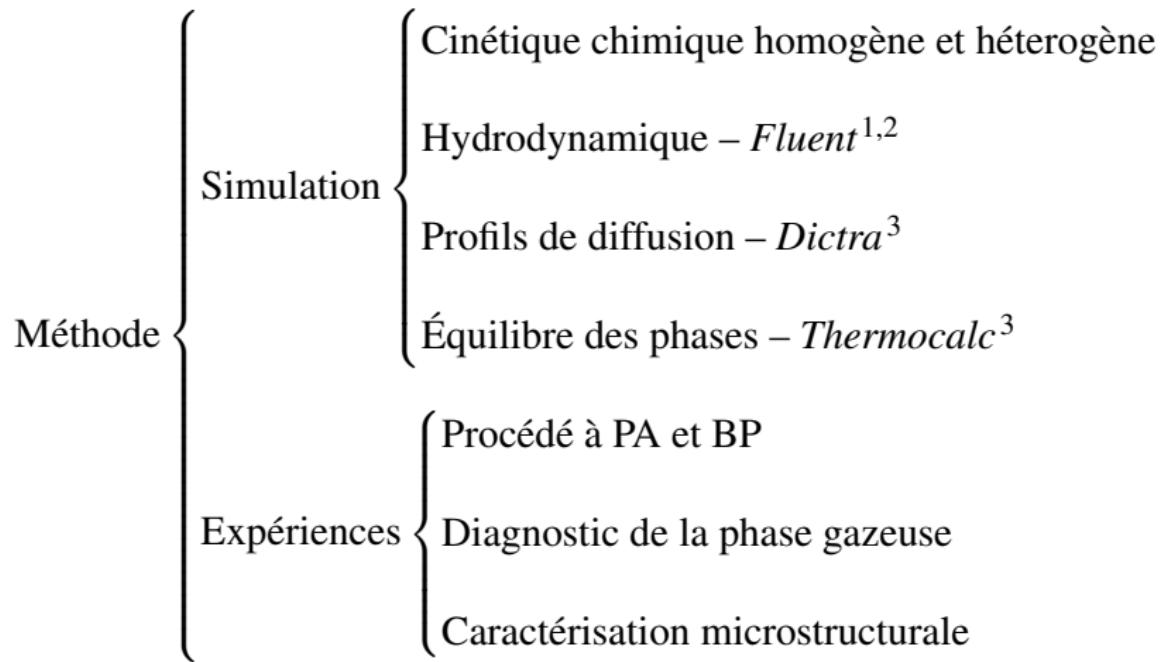
- ▶ Compréhension des effets de l'hydrodynamique et de la cinétique chimique (homogène et hétérogène) dans le transfert de masse gaz-solide lors de la carbonitruration employant des hydrocarbures comme source de carbone et de l'ammoniac pour l'azote, visant établir des conditions de traitement où l'étape limitante du procédé soit le transport à l'état solide.

- ▶ Les résultats des calculs et expériences doivent être tels qu'ils rendent possible le transfert de connaissances de la recherche vers l'industrie.

Description de la Problématique

- ▶ Compréhension des effets de l'hydrodynamique et de la cinétique chimique (homogène et hétérogène) dans le transfert de masse gaz-solide lors de la carbonitruration employant des hydrocarbures comme source de carbone et de l'ammoniac pour l'azote, visant établir des conditions de traitement où l'étape limitante du procédé soit le transport à l'état solide.
- ▶ Les résultats des calculs et expériences doivent être tels qu'ils rendent possible le transfert de connaissances de la recherche vers l'industrie.
- ▶ Le procédé adopté doit permettre l'obtention d'une qualité métallurgique propre aux études de base à réaliser et donc, aux applications attendues.







Démarche à la Pression Atmosphérique



PENSER LES MATERIAUX DE DEMAIN

Le système expérimental employé est composé de :

- ▶ un réacteur tubulaire avec une zone chaude d'environ 100 mm présentant un rapport surface-volume de $s/v = 0,8 \text{ cm}^{-1}$;

Le système expérimental employé est composé de :

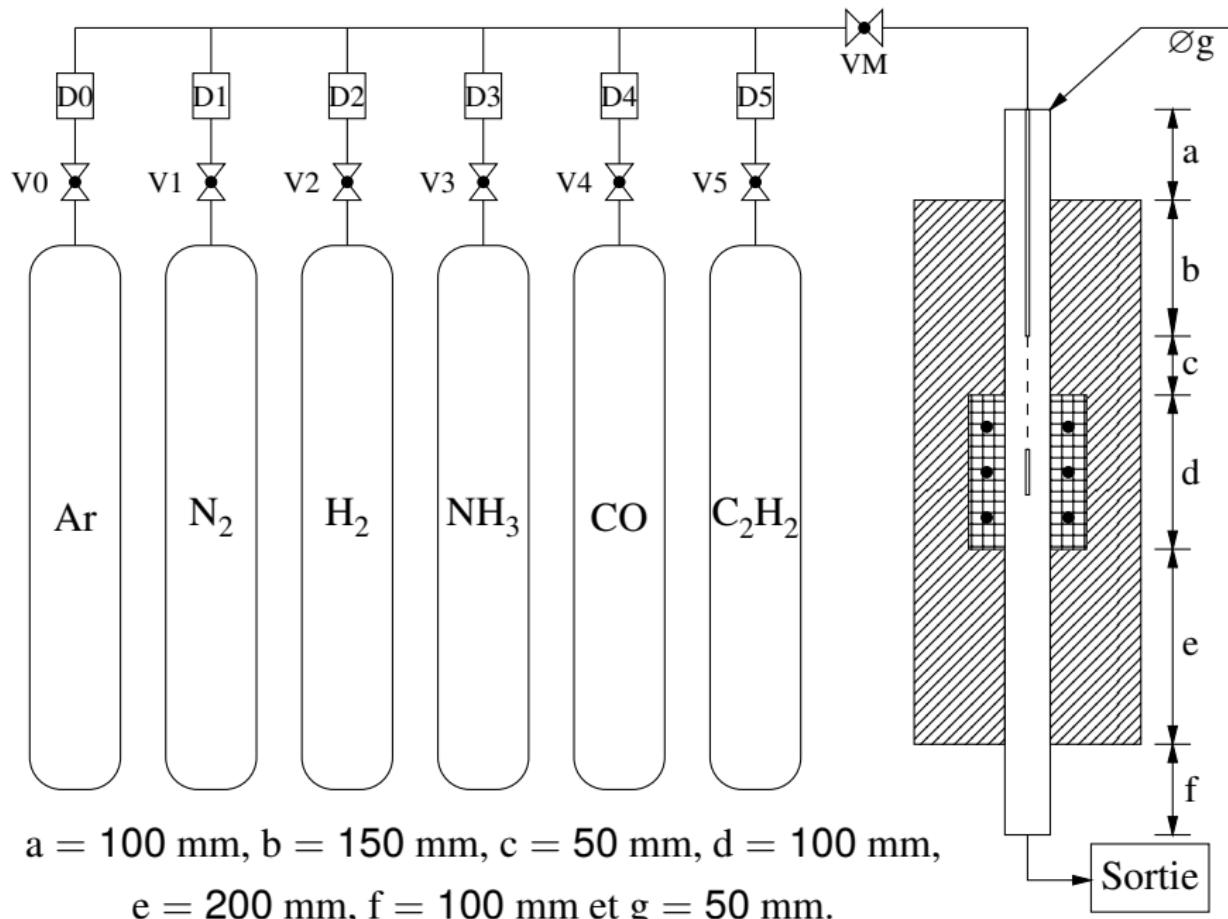
- ▶ un réacteur tubulaire avec une zone chaude d'environ 100 mm présentant un rapport surface-volume de $s/v = 0,8 \text{ cm}^{-1}$,
- ▶ un système d'alimentation de gaz permettant l'obtention des atmosphères requises,

Le système expérimental employé est composé de :

- ▶ un réacteur tubulaire avec une zone chaude d'environ 100 mm présentant un rapport surface-volume de $s/v = 0,8 \text{ cm}^{-1}$,
- ▶ un système d'alimentation de gaz permettant l'obtention des atmosphères requises,
- ▶ une thermobalance couplée au réacteur pour le suivi de prise de masse des échantillons et

Le système expérimental employé est composé de :

- ▶ un réacteur tubulaire avec une zone chaude d'environ 100 mm présentant un rapport surface-volume de $s/v = 0,8 \text{ cm}^{-1}$,
- ▶ un système d'alimentation de gaz permettant l'obtention des atmosphères requises,
- ▶ une thermobalance couplée au réacteur pour le suivi de prise de masse des échantillons et
- ▶ un système de chromatographie gazeuse pour le diagnostic des atmosphères pendant les traitements.





Démarche à la Pression Atmosphérique: Traitements Thermochimiques



Institut Jean Lamour
PENSER LES MATERIAUX DE DEMAIN

Traitements Thermochimiques

Objectif et Conditions Employées

Objectif

Investigation du rôle de l'azote dans le matériau et de l'additivité des étapes de cémentation et nitruration pendant la carbonitruration.

Objectif

Investigation du rôle de l'azote dans le matériau et de l'additivité des étapes de cémentation et nitruration pendant la carbonitruration.

Atmosphères :

- ▶ cémentation : $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$

Traitements Thermochimiques

Objectif et Conditions Employées

Objectif

Investigation du rôle de l'azote dans le matériau et de l'additivité des étapes de cémentation et nitruration pendant la carbonitruration.

Atmosphères :

- ▶ cémentation : $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$
- ▶ nitruration : $\text{NH}_3 + \text{H}_2 + \text{N}_2$

Traitements Thermochimiques

Objectif et Conditions Employées

Objectif

Investigation du rôle de l'azote dans le matériau et de l'additivité des étapes de cémentation et nitruration pendant la carbonitruration.

Atmosphères :

- ▶ cémentation : $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$
- ▶ nitruration : $\text{NH}_3 + \text{H}_2 + \text{N}_2$

Enrichissement :

- ▶ en carbone pendant 2 heures

Objectif

Investigation du rôle de l'azote dans le matériau et de l'additivité des étapes de cémentation et nitruration pendant la carbonitruration.

Atmosphères :

- ▶ cémentation : $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$
- ▶ nitruration : $\text{NH}_3 + \text{H}_2 + \text{N}_2$

Enrichissement :

- ▶ en carbone pendant 2 heures
- ▶ en azote pendant 3 heures

Diagramme Pseudo-Binaire – 16NiCrMo13

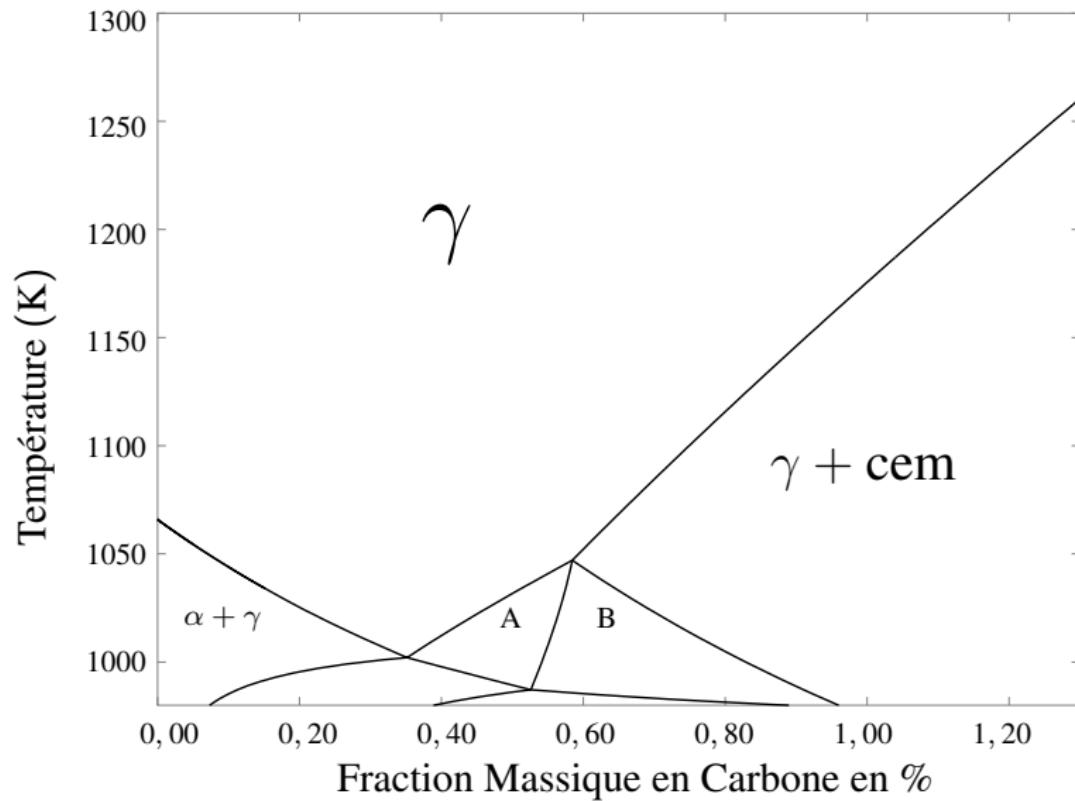
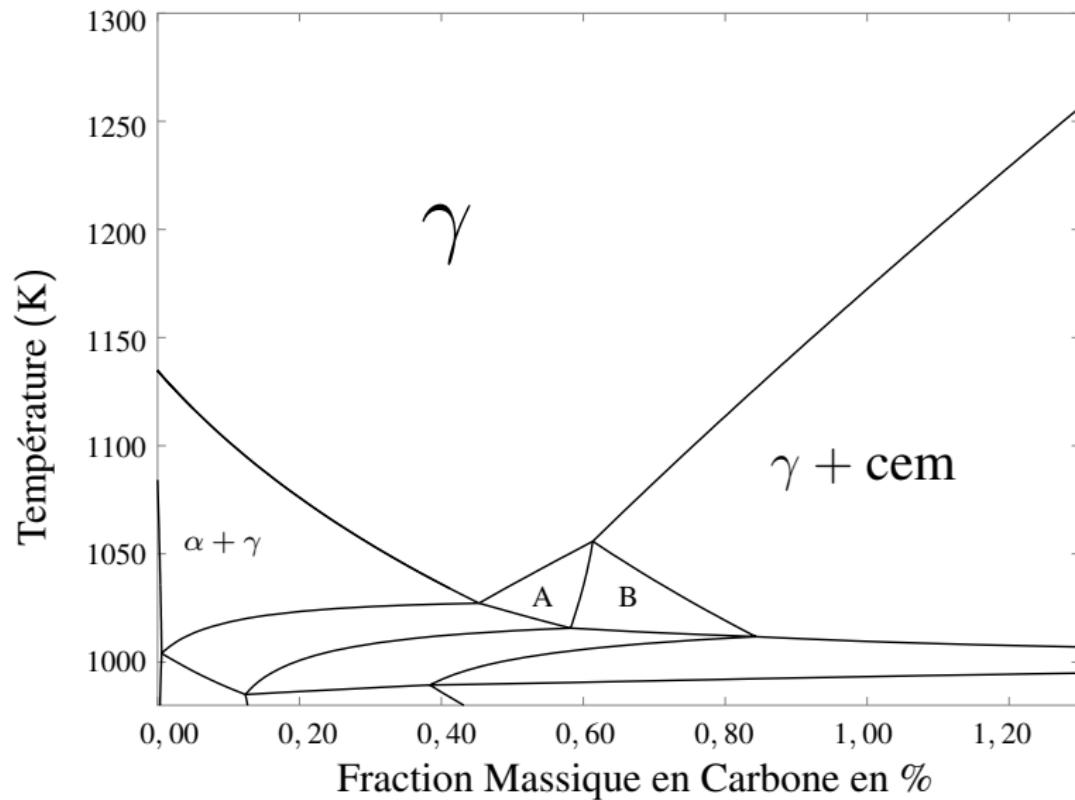
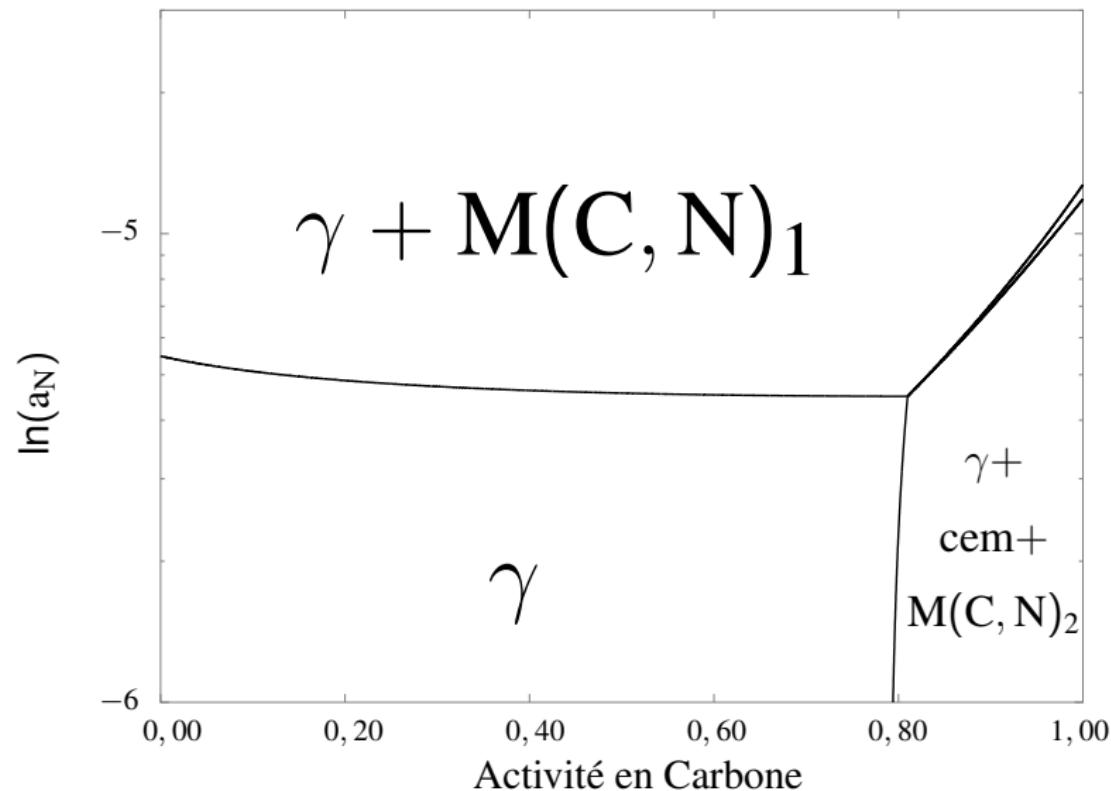


Diagramme Pseudo-Binaire – 23MnCrMo5



Coupe Isophlète – 16NiCrMo13 à 1143K



N0 Nitruration

C0 Cémentation

CB Carbonitruration

T Trempé

R180 Revenu à 180°C pendant 69 heures

R300 Revenu à 300°C pendant 18 heures

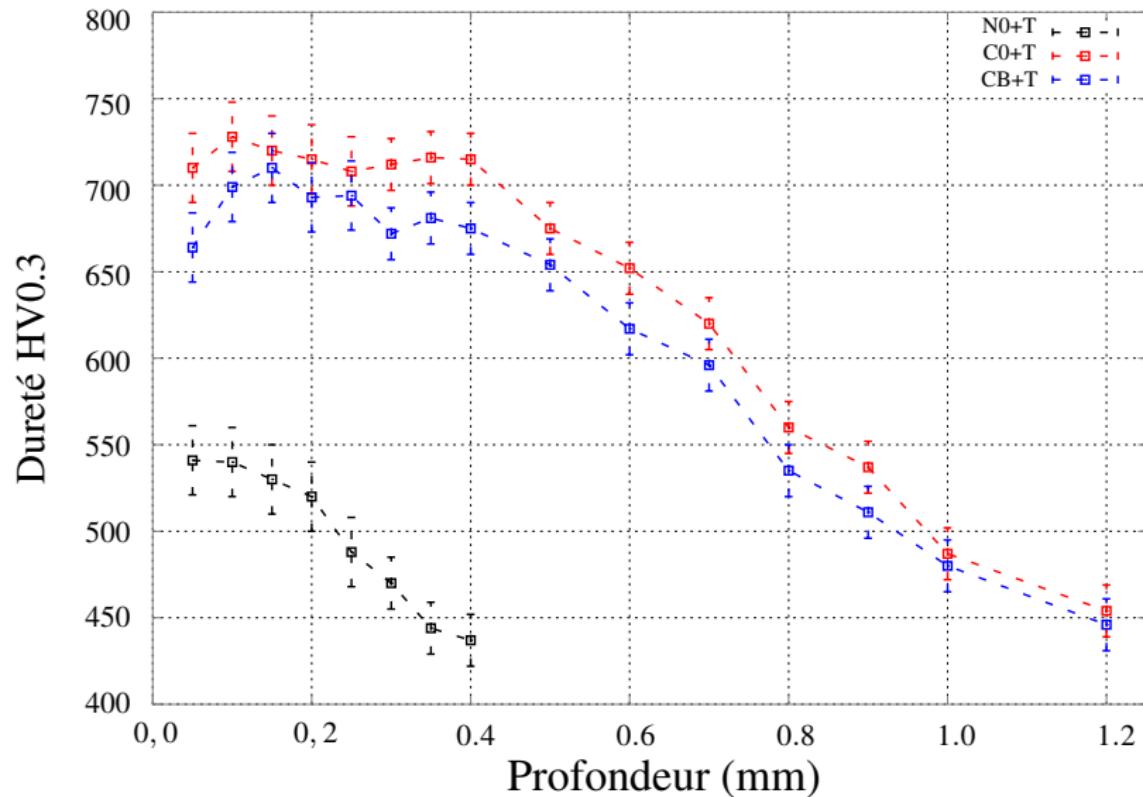


Démarche à la Pression Atmosphérique: Réponse Métallurgique de l'Alliage 16NiCrMo13



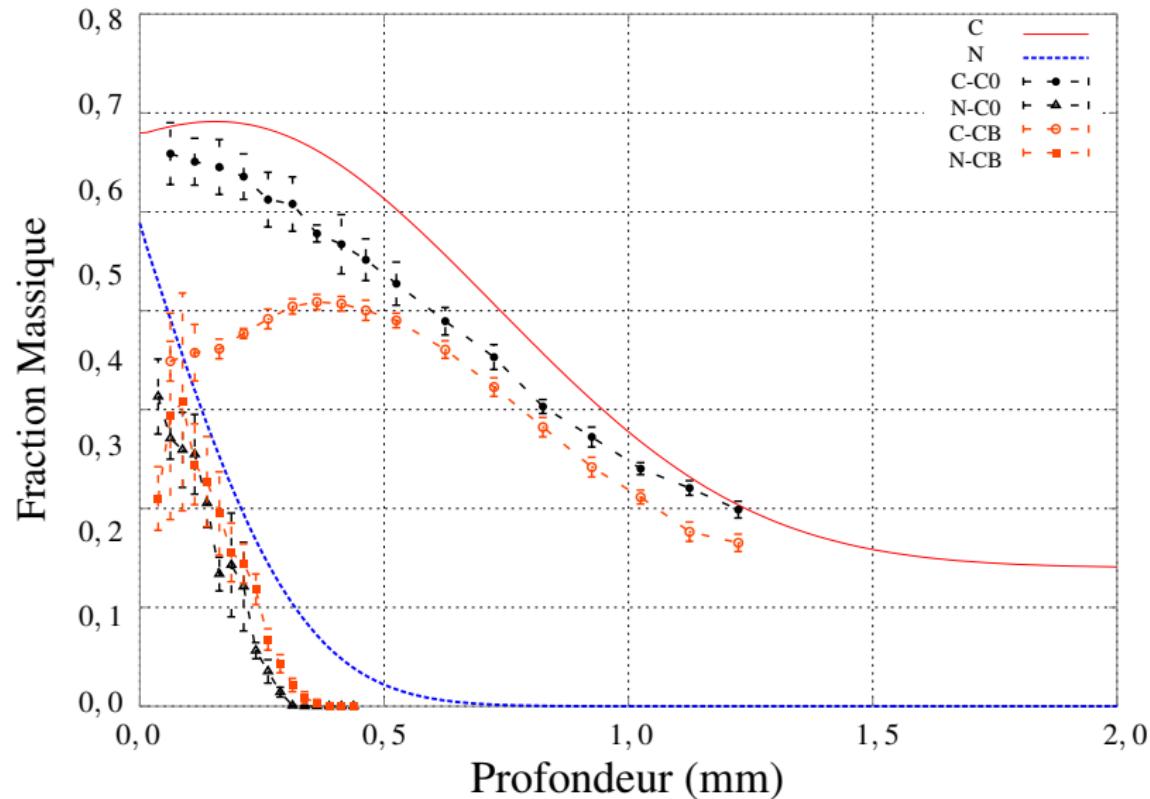
Traitements Thermochimiques

Filiations de Dureté après trempe – 16NiCrMo13



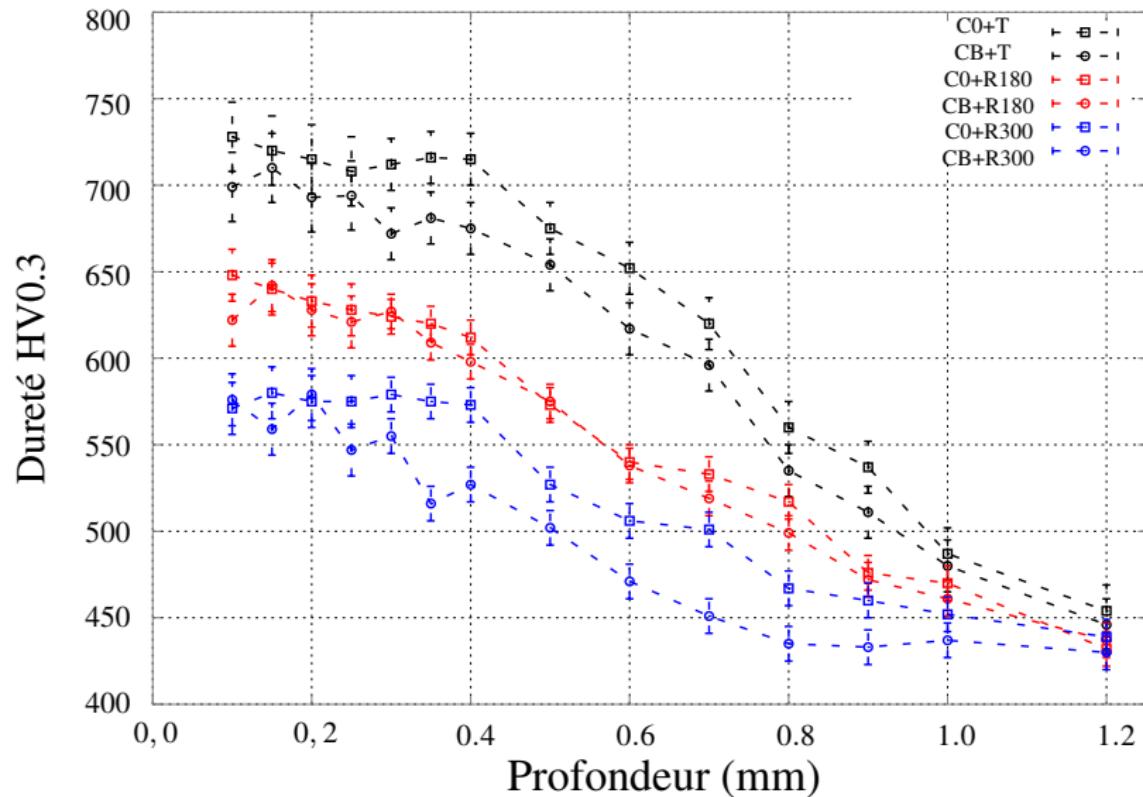
Traitements Thermochimiques

Profils de Diffusion Obtenus – 16NiCrMo13



Traitements Thermochimiques

Comparaison Cémentation/Carbonitruration – 16NiCrMo13



Traitements Thermochimiques

Couches de Diffusion-Précipitation – 16NiCrMo13

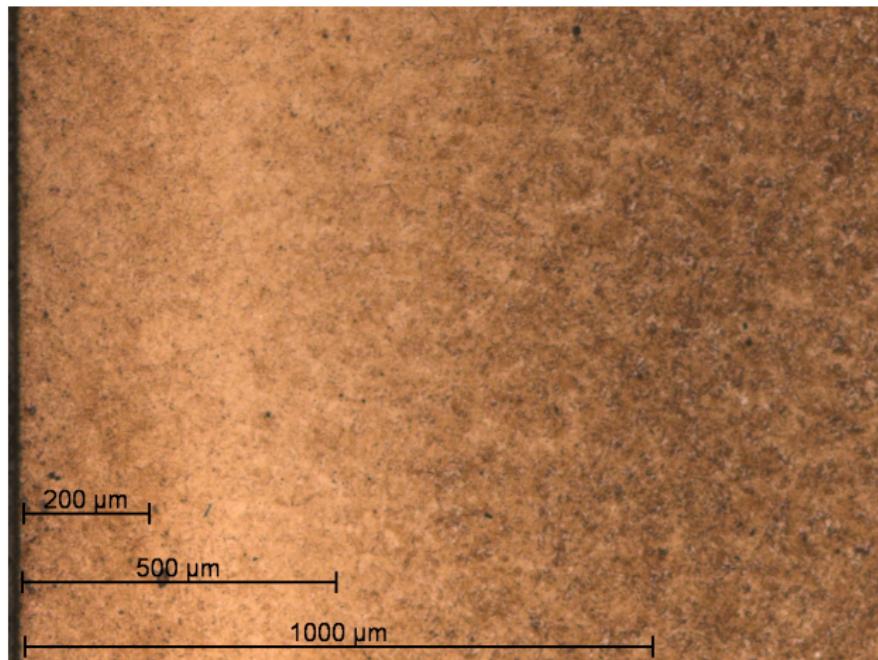


FIGURE : Augmentation de 100×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 16NiCrMo13

Évolution de la microstructure en fonction de la position après carbonitruration suivi de trempe à l'huile, passage par le froid et revenu à 300°C pendant 18 heures.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 16NiCrMo13

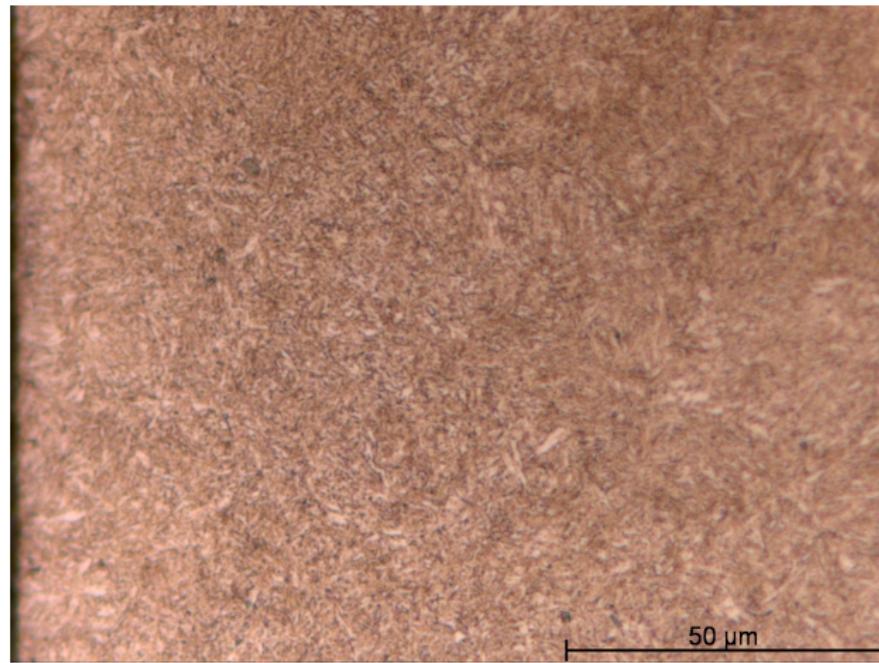


FIGURE : Surface. Augmentation de 1000×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 16NiCrMo13

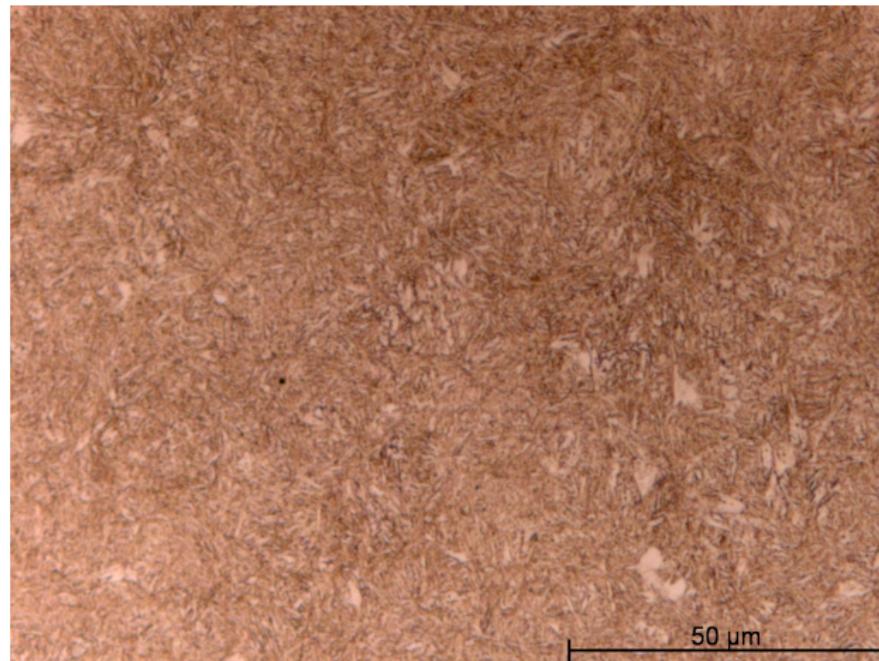


FIGURE : À 0,2 mm .Augmentation de 1000×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 16NiCrMo13

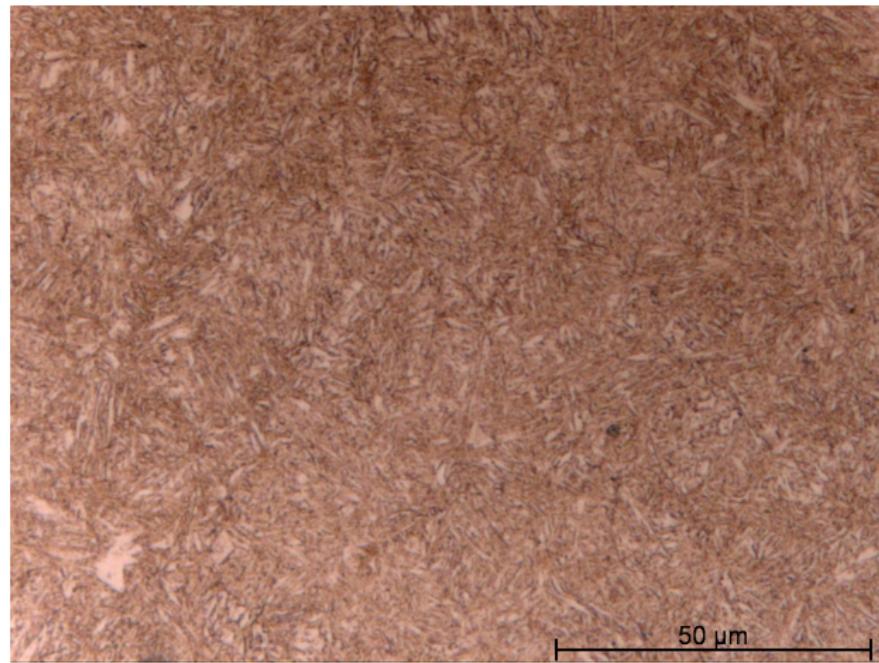


FIGURE : À 0,4 mm. Augmentation de 1000×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 16NiCrMo13

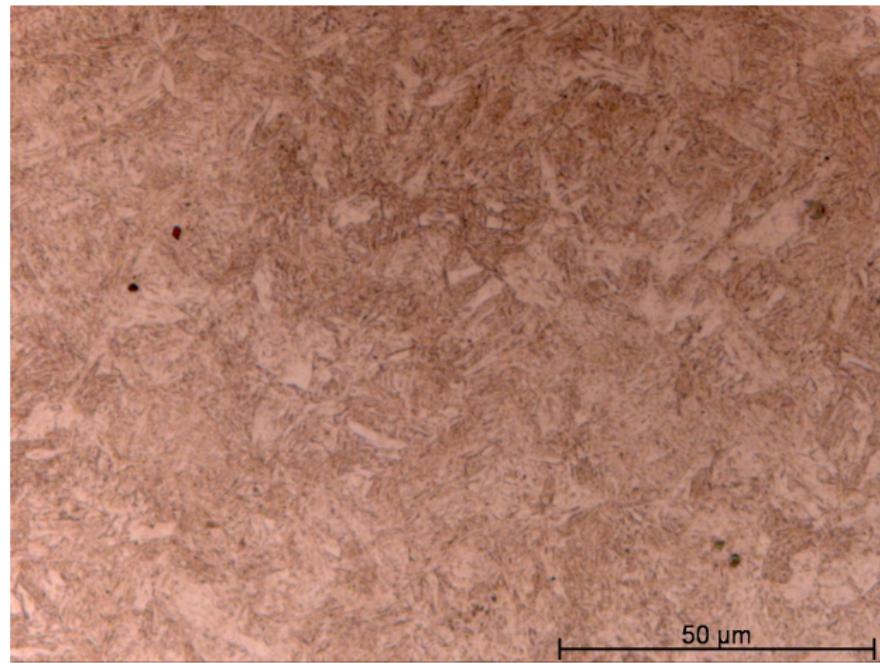
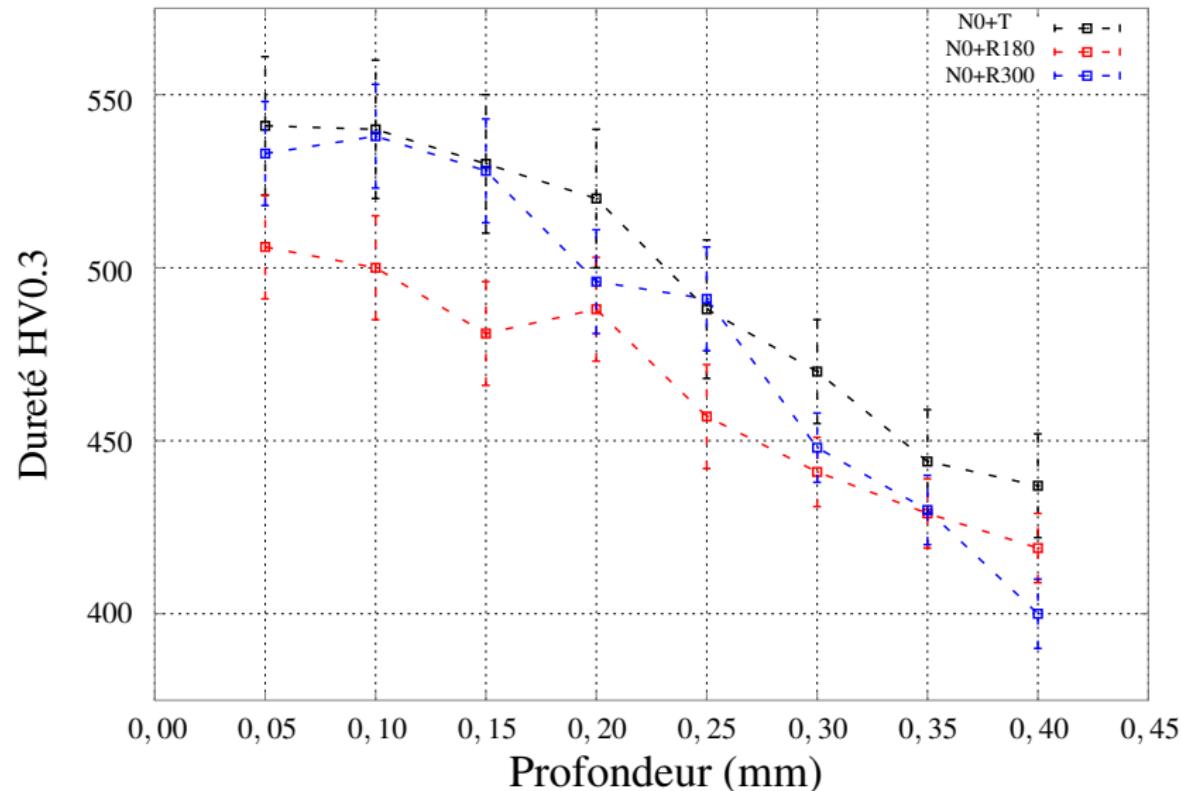


FIGURE : À 1,0 mm. Augmentation de 1000×.

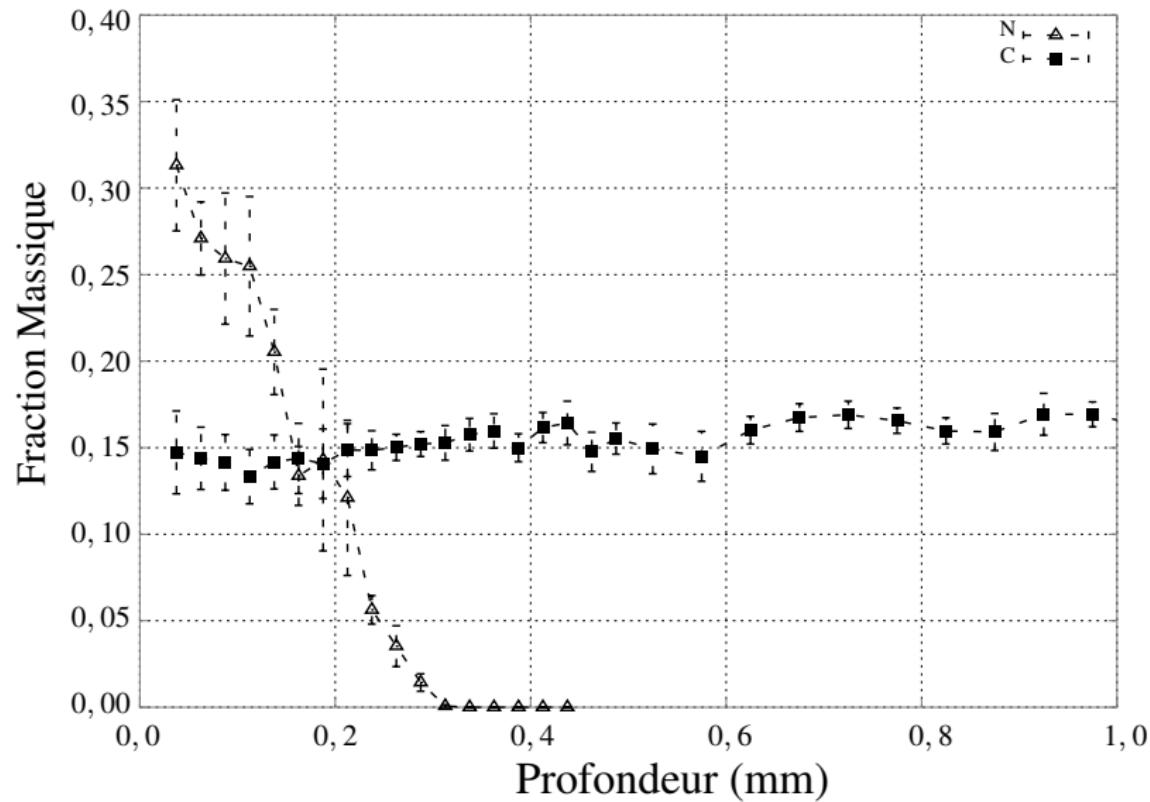
Traitements Thermochimiques

Filiations de Dureté – Nitruration – 16NiCrMo13



Traitements Thermochimiques

Profil de Diffusion Obtenus – Nitruration – 16NiCrMo13



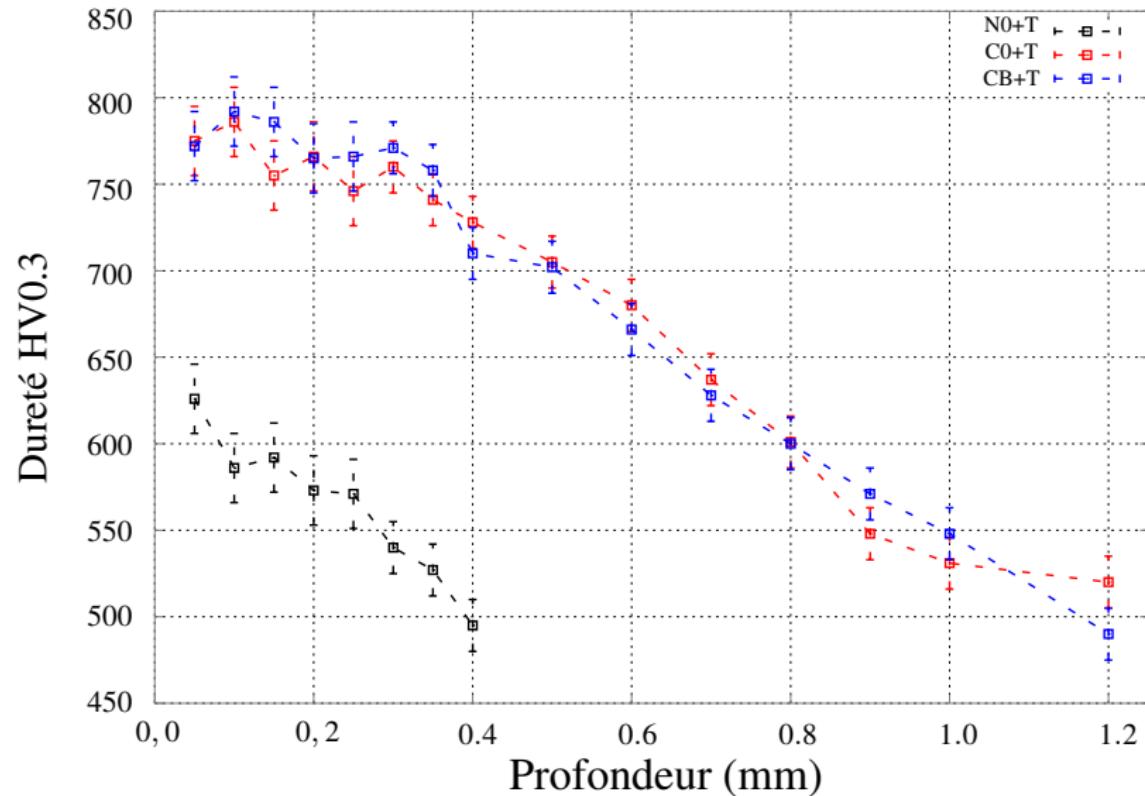


Démarche à la Pression Atmosphérique: Réponse Métallurgique de l'Alliage 23MnCrMo5



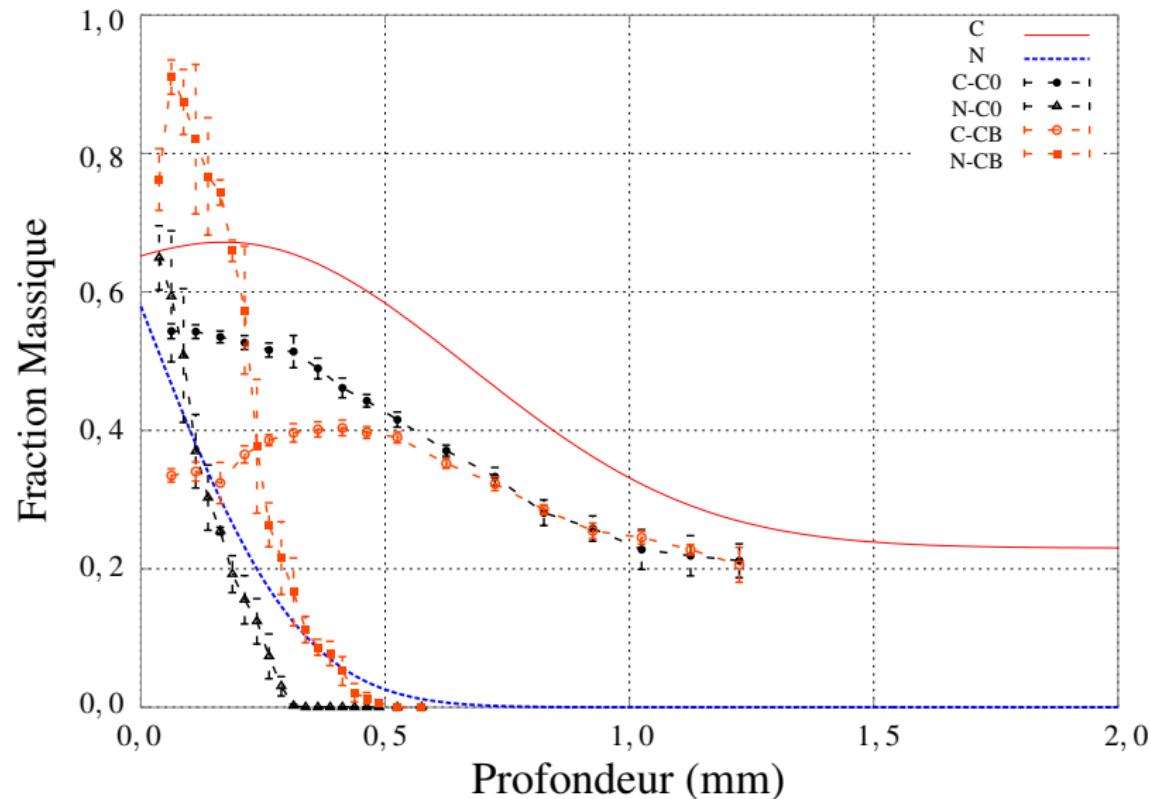
Traitements Thermochimiques

Filiations de Dureté après trempe – 23MnCrMo5



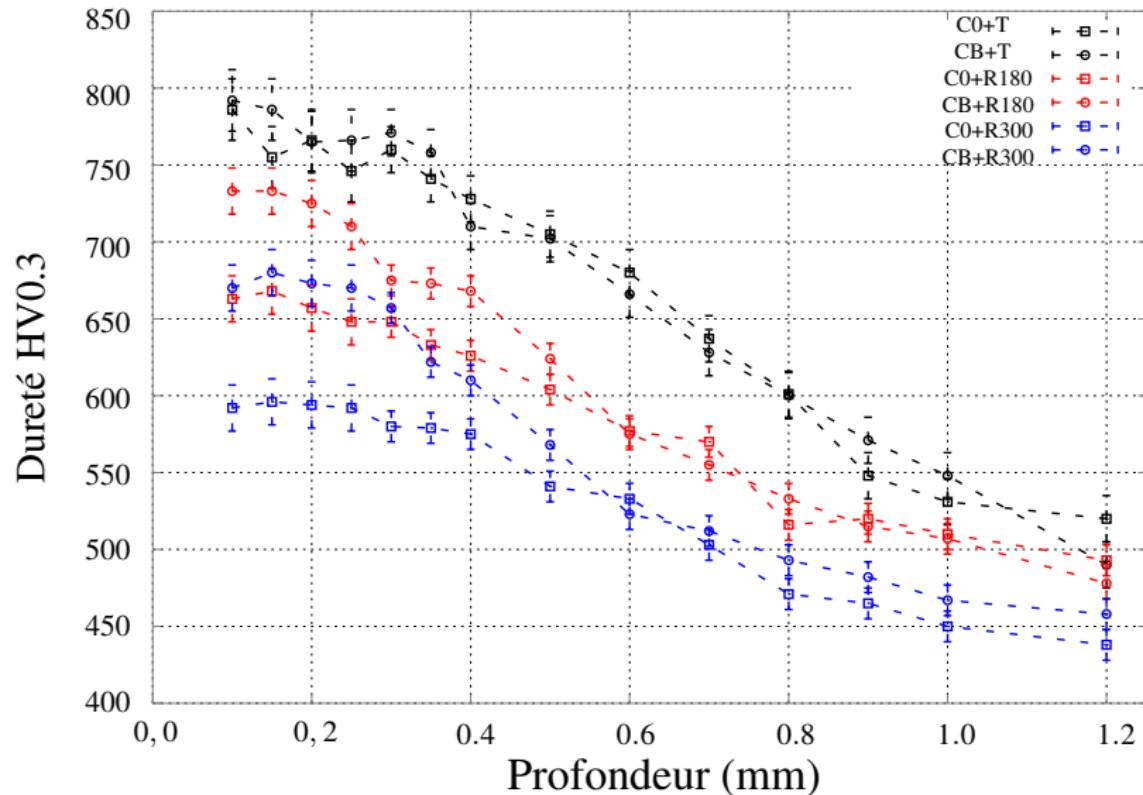
Traitements Thermochimiques

Profils de Diffusion Obtenus – 23MnCrMo5



Traitements Thermochimiques

Comparaison Cémentation/Carbonitruration – 23MnCrMo5



Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 23MnCrMo5

**Évolution de la microstructure en fonction de la position
après carbonitruration suivi de trempe à l'huile.**

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 23MnCrMo5

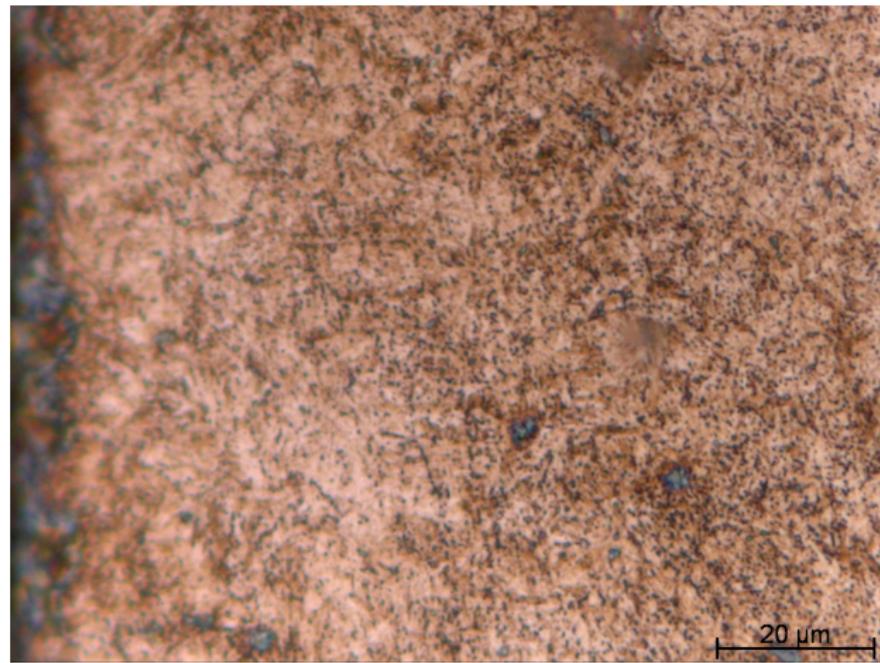


FIGURE : Surface. Augmentation de 1250×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 23MnCrMo5

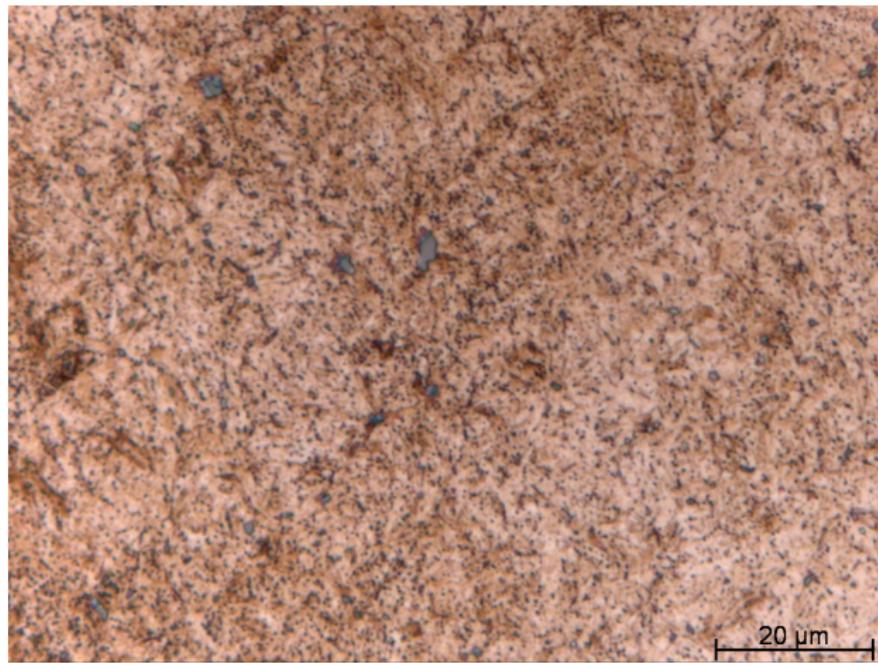


FIGURE : À 0,1 mm. Augmentation de 1250×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 23MnCrMo5

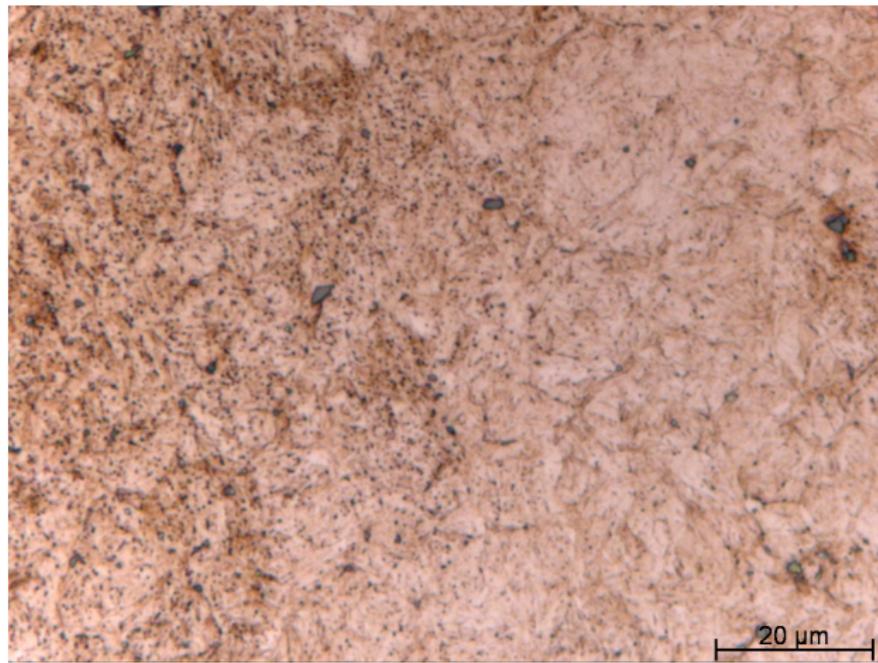


FIGURE : À 0,2 mm. Augmentation de 1250×.

Traitements Thermochimiques

Évolution Microstructurale – 23MnCrMo5

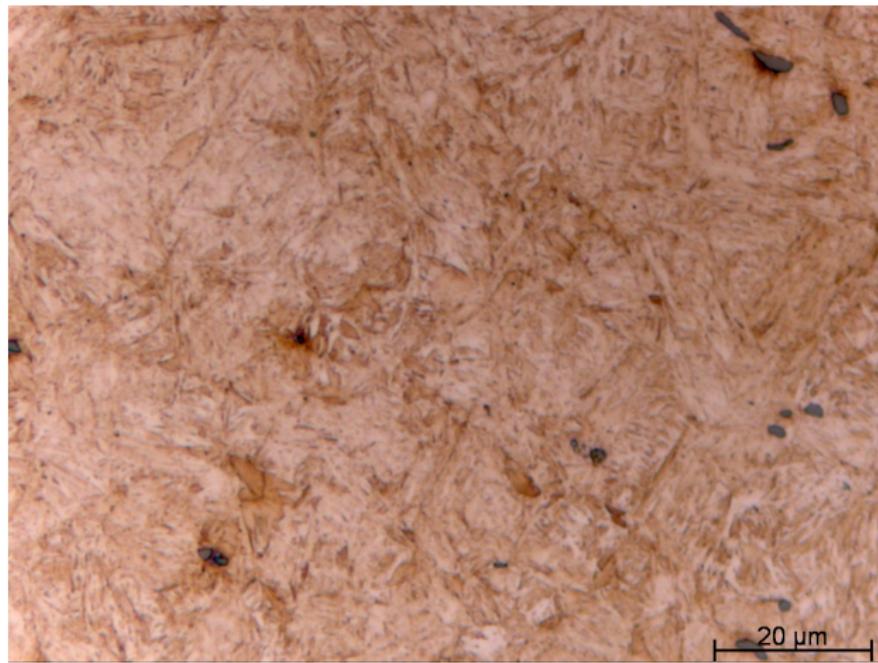
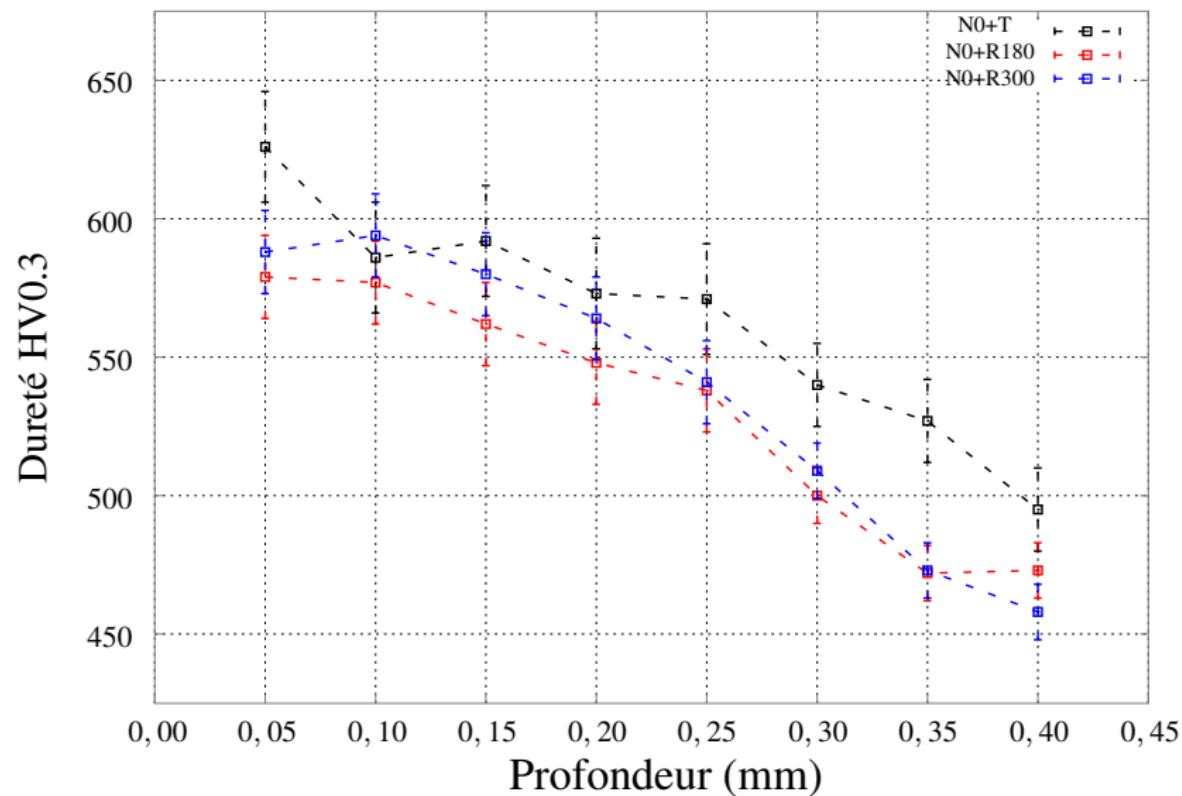


FIGURE : À 0,4. Augmentation de 1250×.

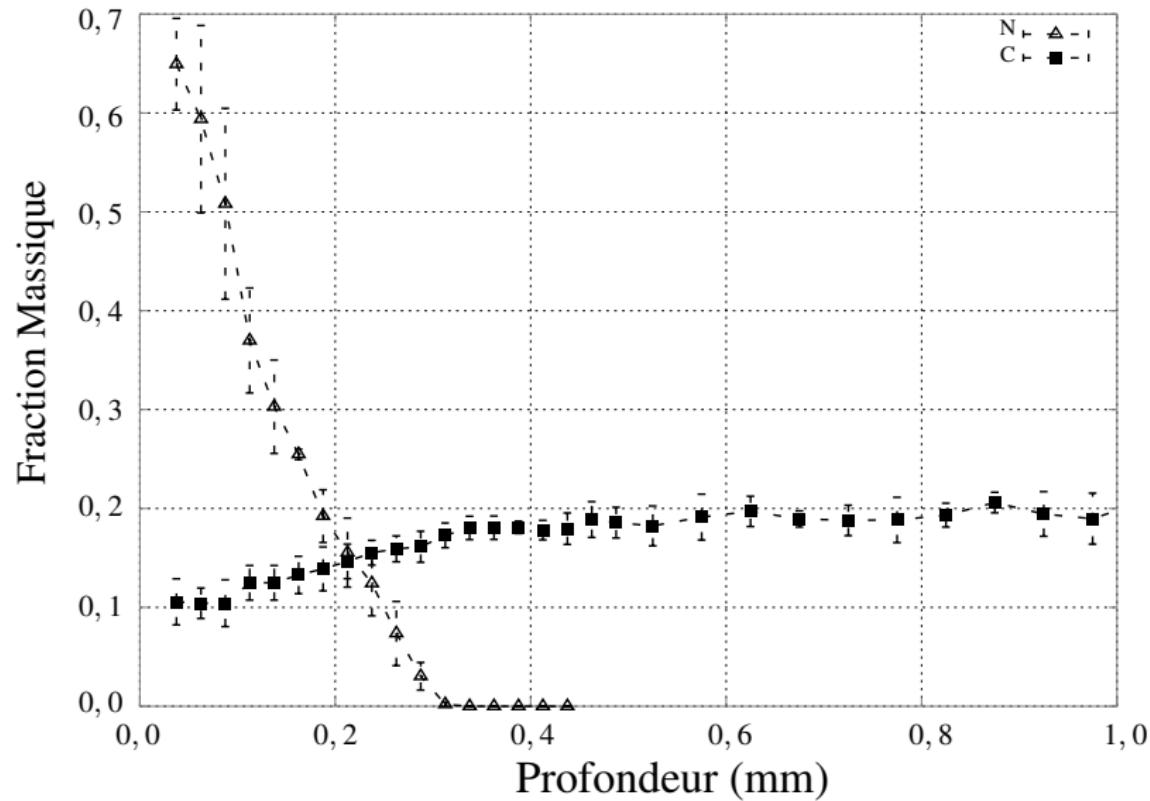
Traitements Thermochimiques

Filiations de Dureté – Nitruration – 23MnCrMo5



Traitements Thermochimiques

Profil de Diffusion Obtenus – Nitruration – 23MnCrMo5





Démarche à la Pression Atmosphérique: Prise de Masse



Institut Jean Lamour
PENSER LES MÉTALLURGIES DE DEMAIN

Traitements Thermochimiques

Prise de Masse – 16NiCrMo13

Traitement	Prise de masse Mesurée $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Prise de masse Microsonde $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Prise de masse Simulée $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
Carbonitruration	22,1	19,7	32,8
Cémentation	28,8	21,0	25,1
Nitruration	6,3	4,3	7,7

Traitements Thermochimiques

Prise de Masse – 23MnCrMo5

Traitement	Prise de masse	Prise de masse	Prise de masse
	Mesurée $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Microsonde $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	Simulée $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
Carbonitruration	29,0	31,8	36,3
Cémentation	20,5	15,3	27,1
Nitruration	8,5	7,8	9,2

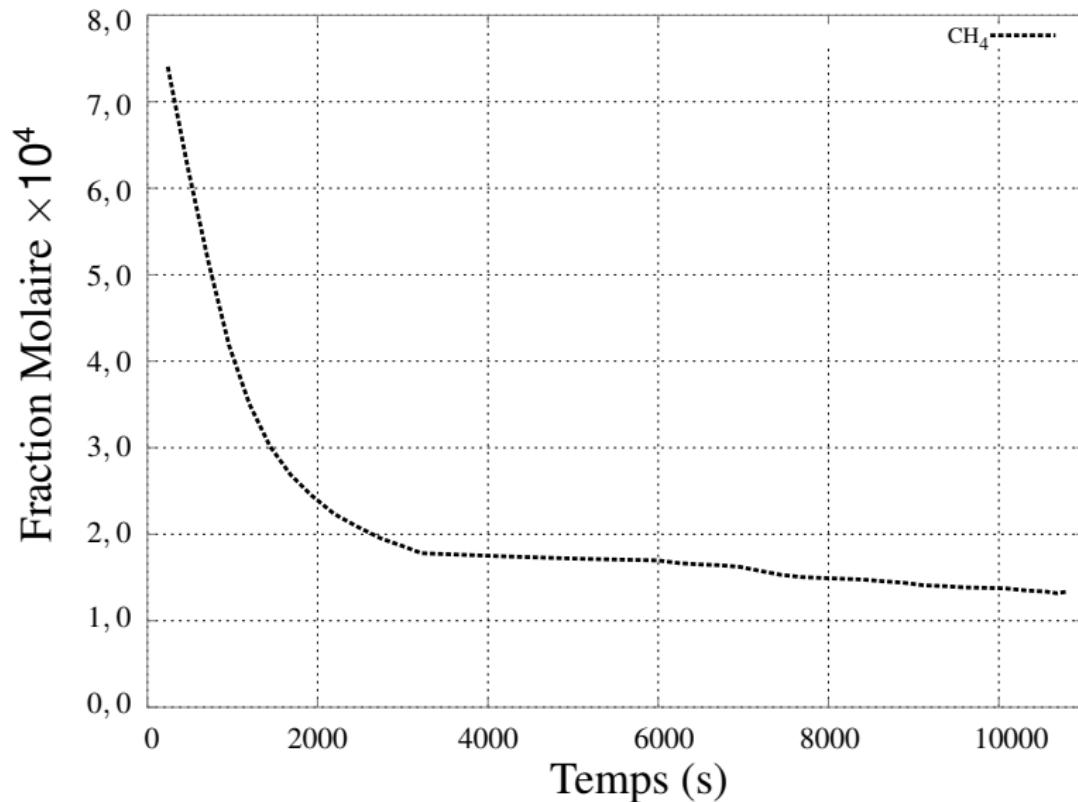


Démarche à la Pression Atmosphérique: Décarburation Pendant la Nitruration



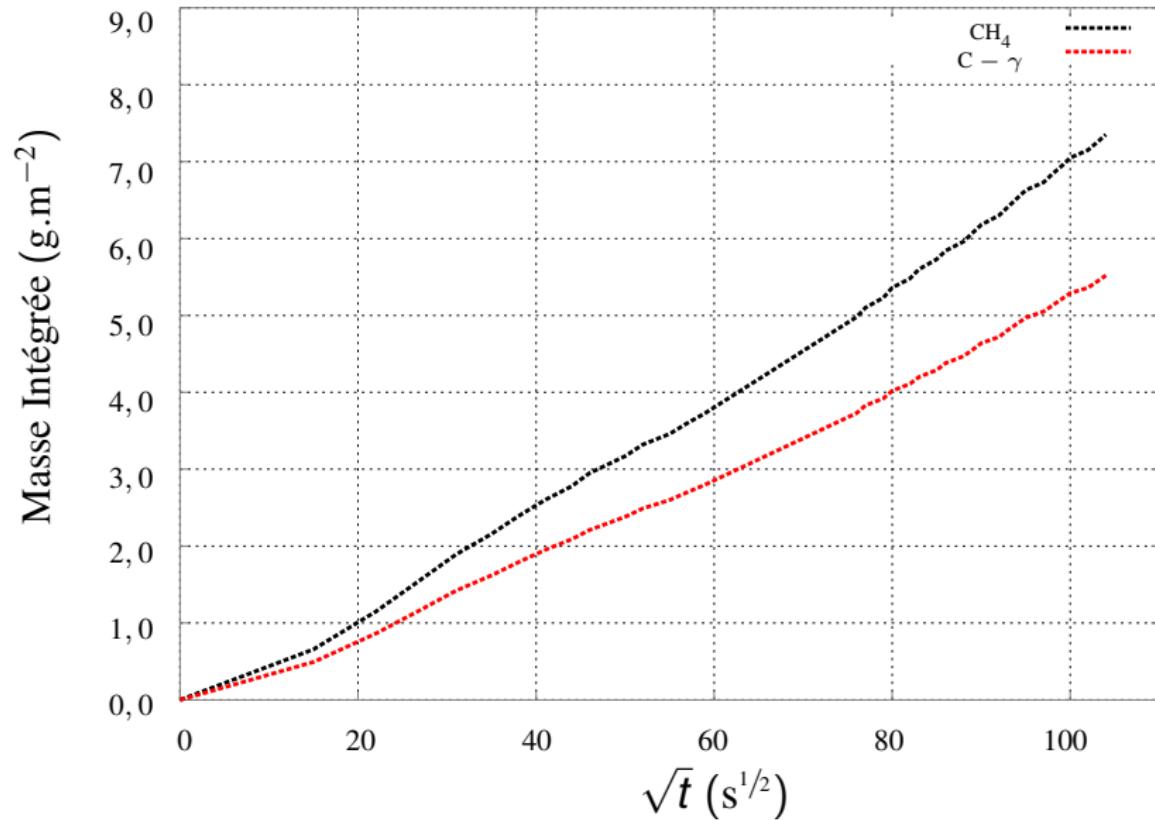
Traitements Thermochimiques

Production de Méthane – 16NiCrMo13



Traitements Thermochimiques

Intégration de la Masse – 16NiCrMo13





Démarche à la Pression Atmosphérique: Hydrodynamique du Réacteur



Définition de DTS

Comme les différentes portions de gaz restent pendant des durées différentes dans l'intérieur du réacteur, on définit la distribution de temps de séjour (*DTS*) comme « **la densité de probabilité qu'un volume de gaz reste dans le réacteur dans un intervalle compris entre les temps de séjour t et $t + dt$** ».

Définition de DTS

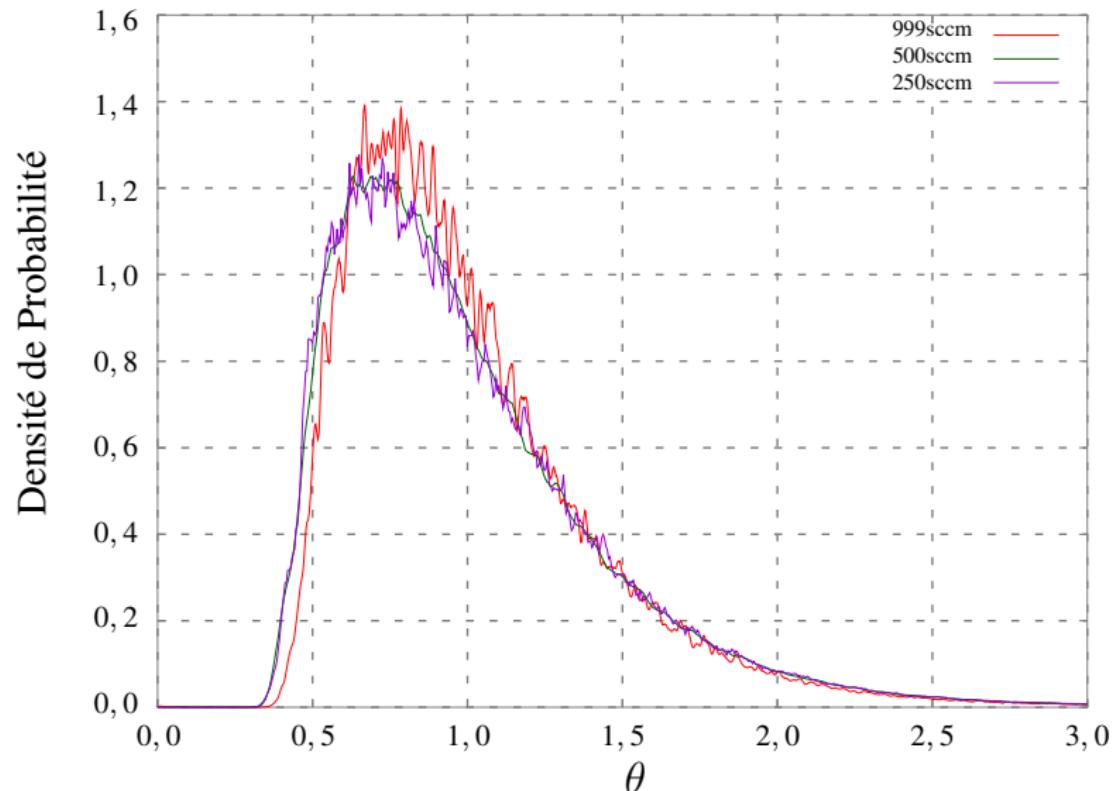
Comme les différentes portions de gaz restent pendant des durées différentes dans l'intérieur du réacteur, on définit la distribution de temps de séjour (*DTS*) comme « **la densité de probabilité qu'un volume de gaz reste dans le réacteur dans un intervalle compris entre les temps de séjour t et $t + dt$** ».

Mesure de la DTS

La *DTS* est mesurée en suivant la réponse en tension $I(t_s)$ d'un détecteur FID après l'injection dans un intervalle de temps court d'un volume connu d'un traceur stable. Nous avons utilisé le méthane pour cela.

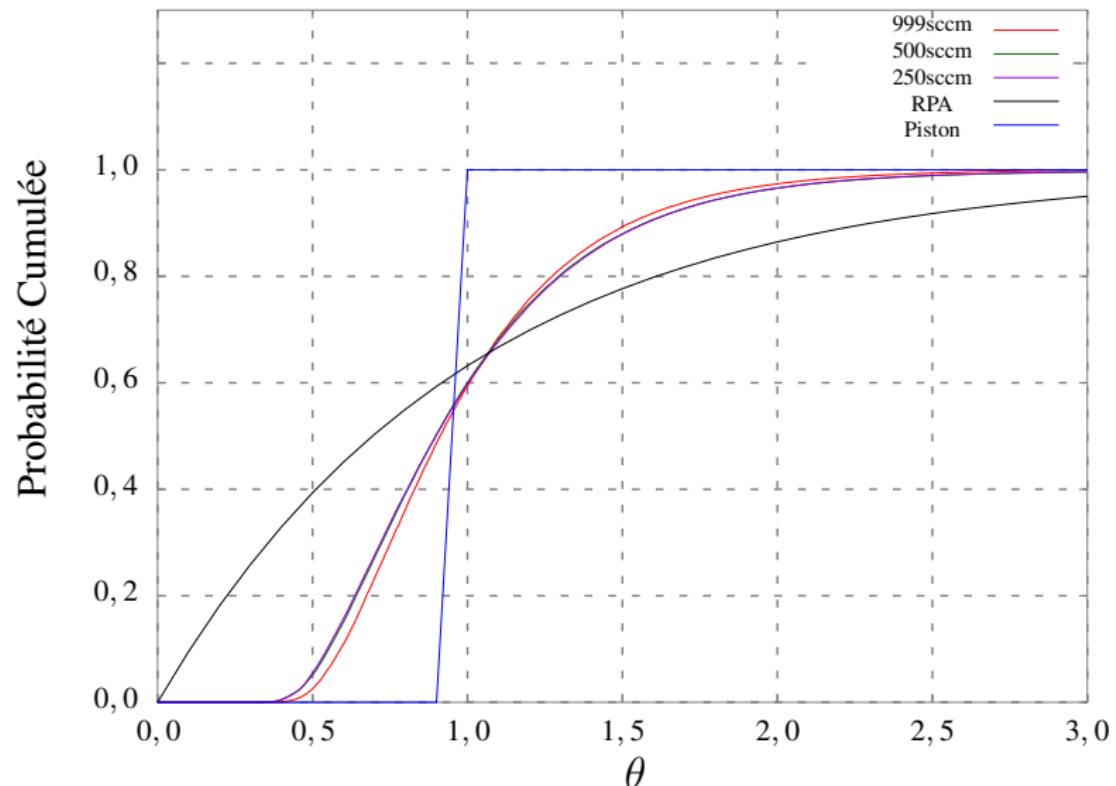
Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour



Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour intégrée



Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour

Condition	T (K)	Débit ($\text{cm}^3.\text{mn}^{-1}$)	t_m (s)	σ (s)	τ_{rpa} (s)
Non-chargé	1173	250	466	187	330
Non-chargé	1023	500	250	112	165
Non-chargé	1173	500	217	98	165
Non-chargé	1173	1000	136	61	83
Chargé	1023	500	254	109	165
Chargé	1173	500	241	103	165
Chargé	1173	1000	127	62	83

Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour

Condition	T (K)	Débit ($\text{cm}^3.\text{mn}^{-1}$)	t_m (s)	σ (s)	τ_{rpa} (s)
Non-chargé	1173	250	466	187	330
Non-chargé	1023	500	250	112	165
Non-chargé	1173	500	217	98	165
Non-chargé	1173	1000	136	61	83
Chargé	1023	500	254	109	165
Chargé	1173	500	241	103	165
Chargé	1173	1000	127	62	83

Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour

Condition	T (K)	Débit ($\text{cm}^3.\text{mn}^{-1}$)	t_m (s)	σ (s)	τ_{rpa} (s)
Non-chargé	1173	250	466	187	330
Non-chargé	1023	500	250	112	165
Non-chargé	1173	500	217	98	165
Non-chargé	1173	1000	136	61	83
Chargé	1023	500	254	109	165
Chargé	1173	500	241	103	165
Chargé	1173	1000	127	62	83

Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour

Condition	T (K)	Débit ($\text{cm}^3.\text{mn}^{-1}$)	t_m (s)	σ (s)	τ_{rpa} (s)
Non-chargé	1173	250	466	187	330
Non-chargé	1023	500	250	112	165
Non-chargé	1173	500	217	98	165
Non-chargé	1173	1000	136	61	83
Chargé	1023	500	254	109	165
Chargé	1173	500	241	103	165
Chargé	1173	1000	127	62	83

Comportement Hydrodynamique du Réacteur

Distribution du temps de séjour

Condition	T (K)	Débit ($\text{cm}^3.\text{mn}^{-1}$)	t_m (s)	σ (s)	τ_{rpa} (s)
Non-chargé	1173	250	466	187	330
Non-chargé	1023	500	250	112	165
Non-chargé	1173	500	217	98	165
Non-chargé	1173	1000	136	61	83
Chargé	1023	500	254	109	165
Chargé	1173	500	241	103	165
Chargé	1173	1000	127	62	83



Démarche à la Pression Atmosphérique: Chromatographie en Phase Gazeuse



Chromatographie en Phase Gazeuse

Principes de la Technique

L'emploi de la méthode vise

- ▶ premièrement, à fournir des résultats pour la validation des modèles développés et

Chromatographie en Phase Gazeuse

Principes de la Technique

L'emploi de la méthode vise

- ▶ premièrement, à fournir des résultats pour la validation des modèles développés et
- ▶ deuxièmement, à fournir des indications sur les mécanismes de surface régissant les traitements évalués.

L'emploi de la méthode vise

- ▶ premièrement, à fournir des résultats pour la validation des modèles développés et
- ▶ deuxièmement, à fournir des indications sur les mécanismes de surface régissant les traitements évalués.

La première série d'expériences a été conduite avec :

- ▶ le réacteur non-chargé,

Chromatographie en Phase Gazeuse

Principes de la Technique

L'emploi de la méthode vise

- ▶ premièrement, à fournir des résultats pour la validation des modèles développés et
- ▶ deuxièmement, à fournir des indications sur les mécanismes de surface régissant les traitements évalués.

La première série d'expériences a été conduite avec :

- ▶ le réacteur non-chargé,
- ▶ en employant N₂ comme gaz porteur, et

L'emploi de la méthode vise

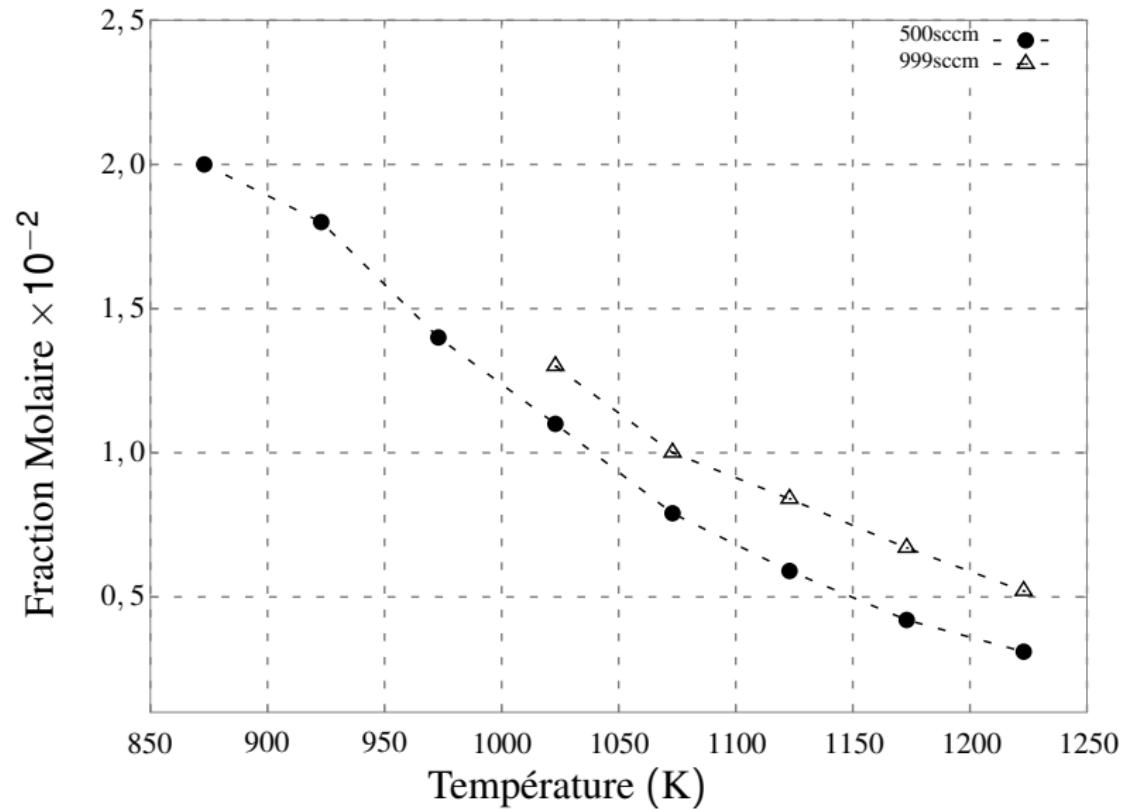
- ▶ premièrement, à fournir des résultats pour la validation des modèles développés et
- ▶ deuxièmement, à fournir des indications sur les mécanismes de surface régissant les traitements évalués.

La première série d'expériences a été conduite avec :

- ▶ le réacteur non-chargé,
- ▶ en employant N₂ comme gaz porteur, et
- ▶ une température de fonctionnement dans la plage [873 - 1223K]

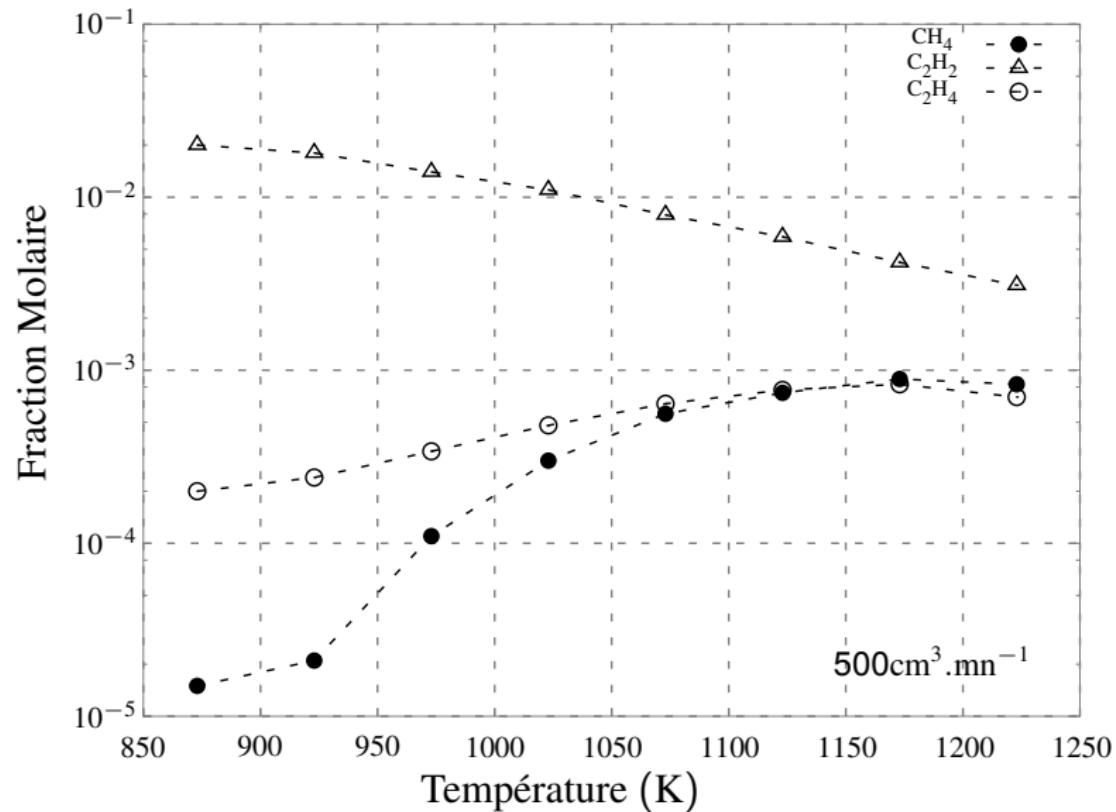
Chromatographie en Phase Gazeuse

Pyrolyse de l'Acétylène : Suivi du C₂H₂



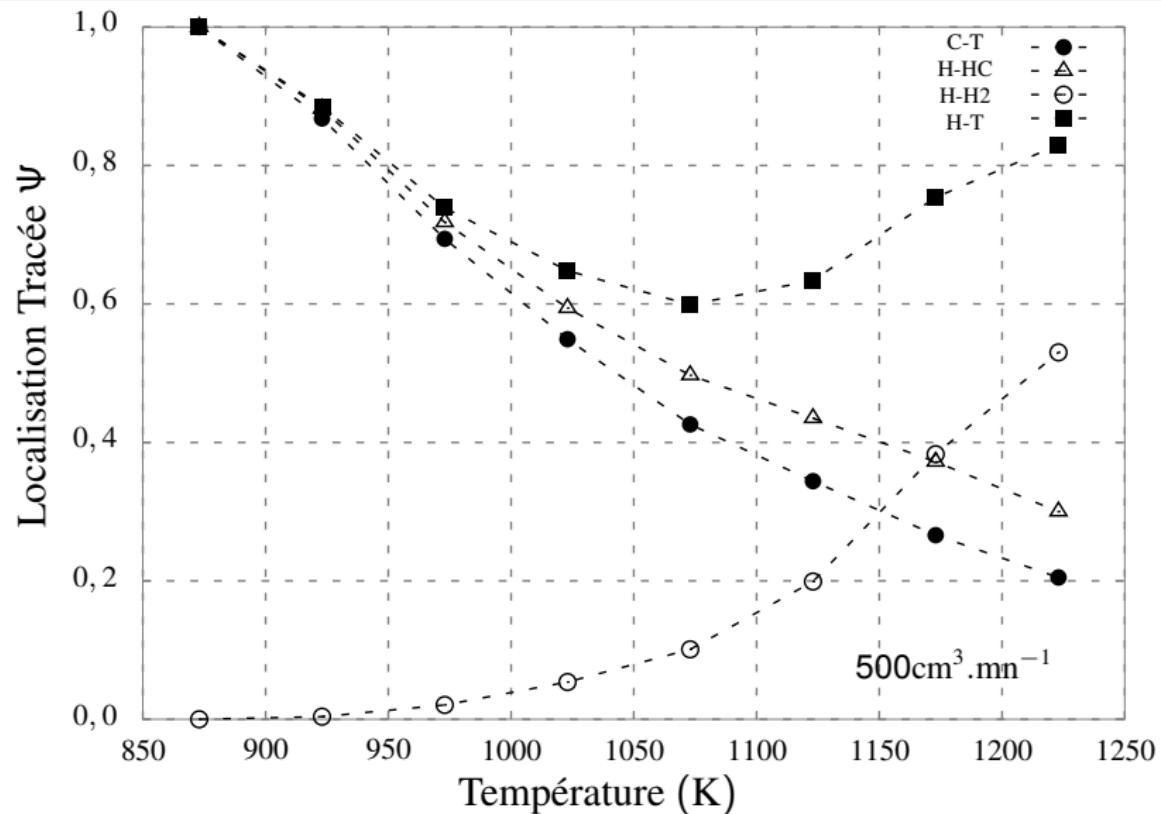
Chromatographie en Phase Gazeuse

Pyrolyse de l'Acétylène : Suivi des Produits



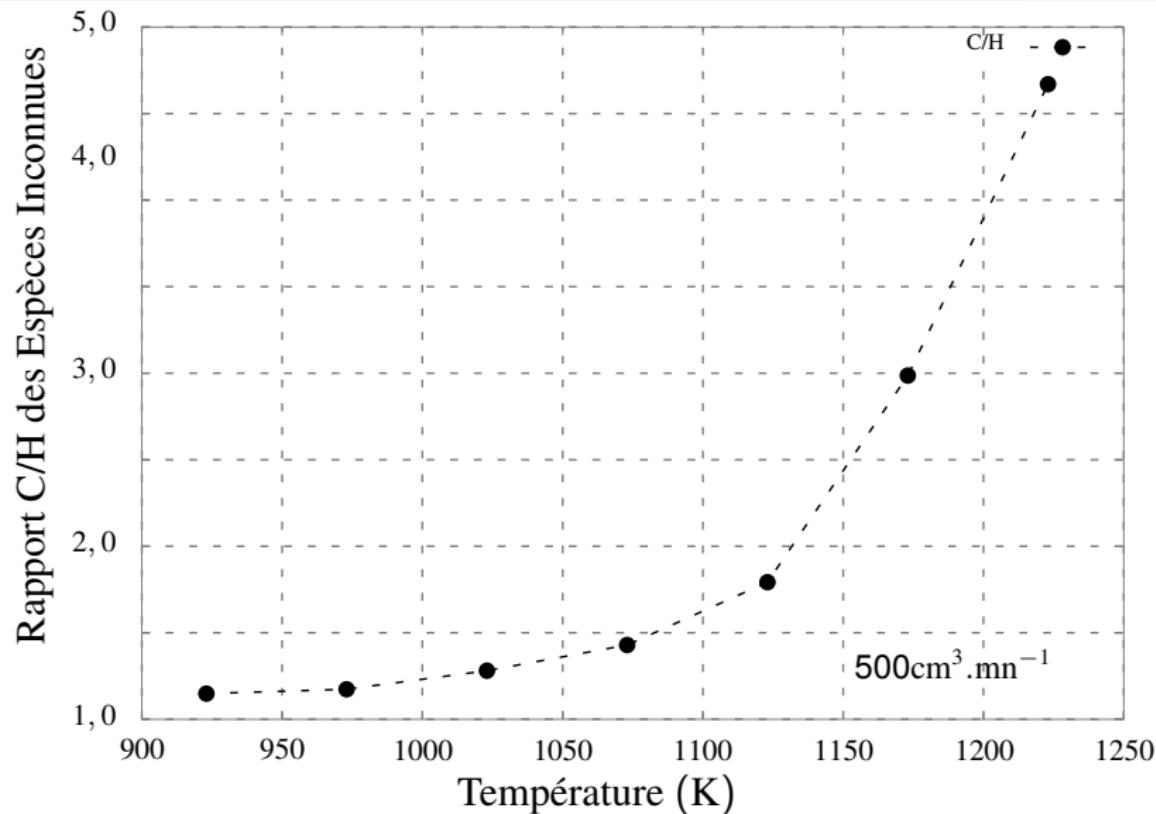
Chromatographie en Phase Gazeuse

Pyrolyse de l'Acétylène : Localisation du Carbone et de l'Hydrogène



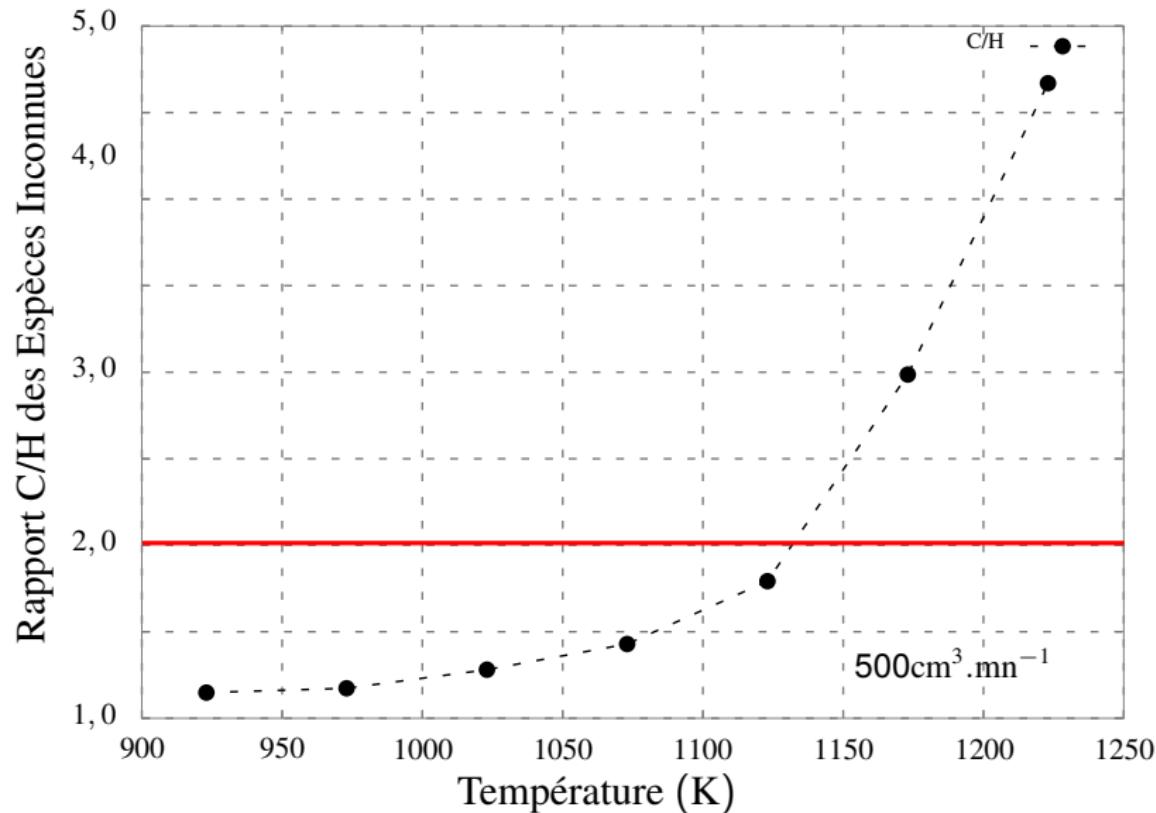
Chromatographie en Phase Gazeuse

Pyrolyse de l'Acétylène : Rapport C/H Libre



Chromatographie en Phase Gazeuse

Pyrolyse de l'Acétylène : Rapport C/H Libre





Pyrolyse des Atmosphères à Base d'Hydrocarbures





Pyrolyse des Atmosphères à Base d'Hydrocarbures: Modèle Cinétique Réduit



Modèle Cinétique Réduit

Tableau : Modèle cinétique simplifié de la pyrolyse de l'acétylène selon Graf⁵.

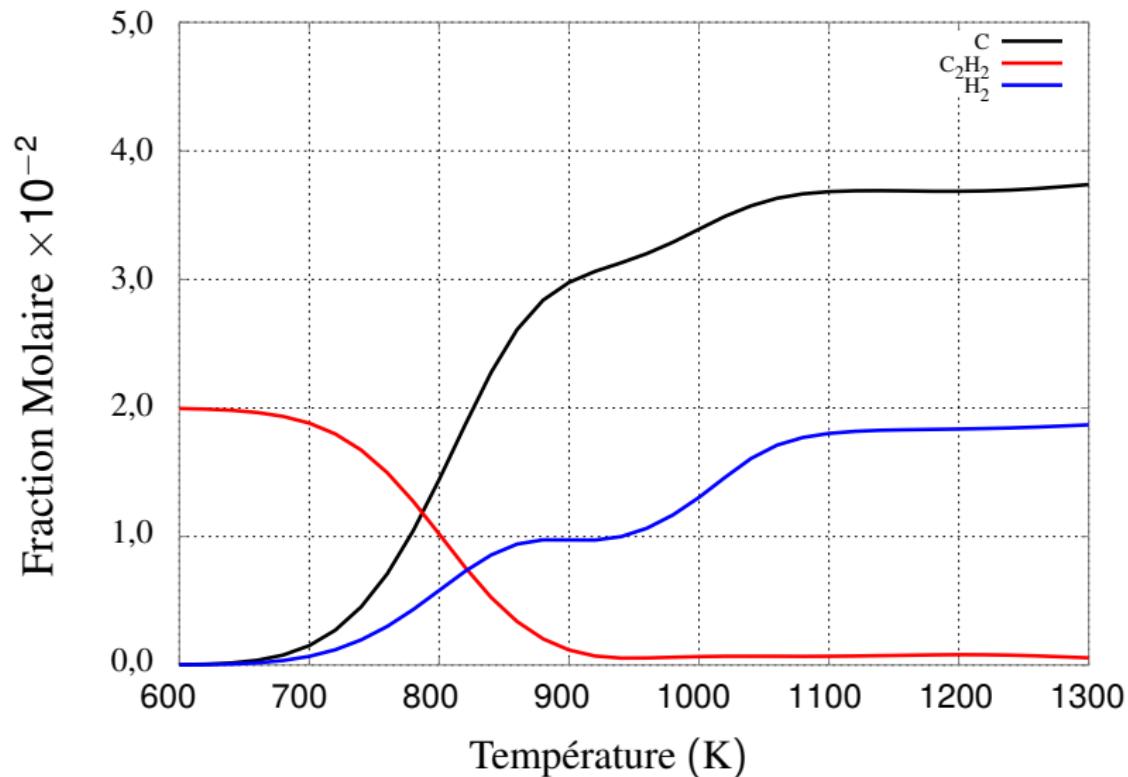
No.	Réaction	Taux de réaction	A _i	E _i
01	$1 \text{ C}_2\text{H}_2 + 1 \text{ H}_2 \longrightarrow 1 \text{ C}_2\text{H}_4$	$r_1 = k_1 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2] \cdot [\text{H}_2]^{0,36}$	$4.40 \times 10^{+03}$	103.0
02	$1 \text{ C}_2\text{H}_4 \longrightarrow 1 \text{ C}_2\text{H}_2 + 1 \text{ H}_2$	$r_2 = k_2 \cdot [\text{C}_2\text{H}_4]^{0,50}$	$3.80 \times 10^{+07}$	200.0
03	$1 \text{ C}_2\text{H}_2 + 3 \text{ H}_2 \longrightarrow 2 \text{ CH}_4$	$r_3 = k_3 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2]^{0,35} \cdot [\text{H}_2]^{0,22}$	$1.40 \times 10^{+05}$	150.0
04	$2 \text{ CH}_4 \longrightarrow 1 \text{ C}_2\text{H}_2 + 3 \text{ H}_2$	$r_4 = k_4 \cdot [\text{CH}_4]^{0,21}$	$8.60 \times 10^{+06}$	195.0
05	$1 \text{ C}_2\text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{ C} + 1 \text{ H}_2$	$r_5 = k_5 \cdot \frac{[\text{C}_2\text{H}_2]^{1,90}}{1 + 18 \cdot [\text{H}_2]}$	$5.50 \times 10^{+06}$	165.0
06	$2 \text{ C}_2\text{H}_2 \longrightarrow 1 \text{ C}_4\text{H}_4$	$r_6 = k_6 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2]^{1,60}$	$1.20 \times 10^{+05}$	120.7
07	$1 \text{ C}_4\text{H}_4 \longrightarrow 2 \text{ C}_2\text{H}_2$	$r_7 = k_7 \cdot [\text{C}_4\text{H}_4]^{0,75}$	$1.00 \times 10^{+15}$	335.2
08	$1 \text{ C}_4\text{H}_4 + 1 \text{ C}_2\text{H}_2 \longrightarrow 1 \text{ C}_6\text{H}_6$	$r_8 = k_8 \cdot [\text{C}_2\text{H}_2]^{1,30} \cdot [\text{C}_4\text{H}_4]^{0,60}$	$1.80 \times 10^{+03}$	64.5
09	$1 \text{ C}_6\text{H}_6 \longrightarrow 6 \text{ C} + 3 \text{ H}_2$	$r_9 = k_9 \cdot \frac{[\text{C}_6\text{H}_6]^{0,75}}{1 + 22 \cdot [\text{H}_2]}$	$1.00 \times 10^{+03}$	75.0

$$[A_i] = (\text{mol/m}^3)^\gamma \text{s}^{-1}$$

$$[E_i] = \text{kJ/mol}$$

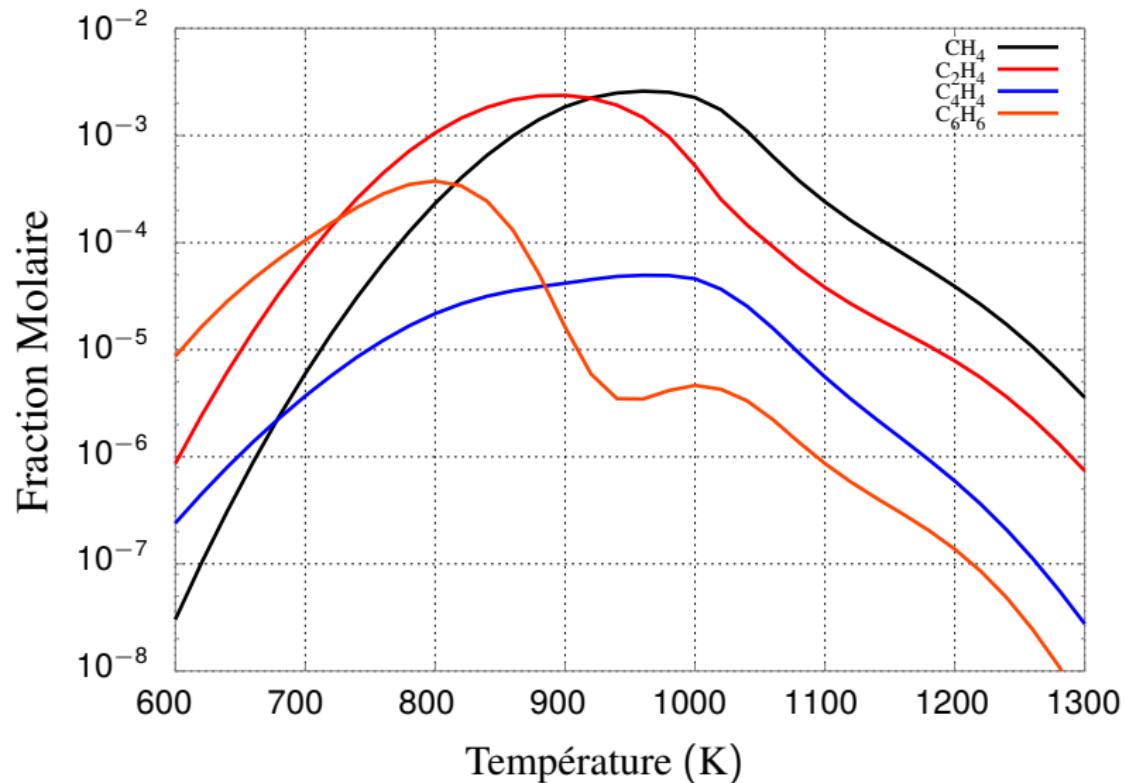
Rôle de la Température

Espèces Majoritaires



Rôle de la Température

Espèces Minoritaires





Pyrolyse des Atmosphères à Base d'Hydrocarbures: Modèles de Mélange



Prédiction de la Conversion⁴

Modèle de Mélange + *DTS* + Données Cinétiques

Prédiction de la Conversion⁴

Modèle de Mélange + *DTS* + Données Cinétiques

Micro-ségrégation complète

Chaque élément de gaz évolue indépendamment dans l'enceinte du réacteur et le produit en sortie est obtenu directement à partir d'une moyenne des évolutions cinétiques pondérées par la *DTS*.

Prédiction de la Conversion⁴

Modèle de Mélange + *DTS* + Données Cinétiques

Micro-ségrégation complète

Chaque élément de gaz évolue indépendamment dans l'enceinte du réacteur et le produit en sortie est obtenu directement à partir d'une moyenne des évolutions cinétiques pondérées par la *DTS*.

Micro-mélange complet

Le gaz qui arrive à chaque instant dilue tous les « volumes élémentaires » du réacteur comme dans un *RPA* et le produit en sortie doit être calculé en couplant les équations cinétiques à la *DTS*.

Utilisation des Données de DTS

Réacteur avec Profil de Température

Tableau : Comparaison entre mesures expérimentales et simulation cinétique intégrée à la *DTS* avec une distribution hypothétique de température pour un débit de $500\text{cm}^3 \cdot \text{mn}^{-1}$. Dans cette simulation $\Delta T = 20\text{K}$, $L_e = 50\text{mm}$, $L_c = 60\text{mm}$ et $L_d = 100\text{mm}$.

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄
Mesuré	$1,1 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{-4}$
S.D.	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-4}$



Prochaines Démarches



Institut Jean Lamour
PENSER LES MATERIAUX DE DEMAIN

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,
- ▶ étude expérimentale des mécanismes de surface de décomposition/formation des hydrocarbures à pression atmosphérique,

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,
- ▶ étude expérimentale des mécanismes de surface de décomposition/formation des hydrocarbures à pression atmosphérique,
- ▶ étude des atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,
- ▶ étude expérimentale des mécanismes de surface de décomposition/formation des hydrocarbures à pression atmosphérique,
- ▶ étude des atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,
- ▶ suivi de prise de masse des échantillons métalliques avec différentes atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,
- ▶ étude expérimentale des mécanismes de surface de décomposition/formation des hydrocarbures à pression atmosphérique,
- ▶ étude des atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,
- ▶ suivi de prise de masse des échantillons métalliques avec différentes atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,
- ▶ étude de la réponse métallurgique des alliages choisis,

Prochaines Démarches

- ▶ Solution du modèle cinétique détaillé de pyrolyse de l'acétylène et de l'ammoniac,
- ▶ étude expérimentale des mécanismes de surface de décomposition/formation des hydrocarbures à pression atmosphérique,
- ▶ étude des atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,
- ▶ suivi de prise de masse des échantillons métalliques avec différentes atmosphères à base d'hydrocarbures et d'ammoniac à basse pression,
- ▶ étude de la réponse métallurgique des alliages choisis,
- ▶ mise au point du modèle cinétique-hydrodynamique avec *Fluent*^{1,2}.

Remerciements

**MERCI DE VOTRE
ATTENTION !**



Références



Institut Jean Lamour
PENSER LES MÉTALLURGIES DE DEMAIN

Références I

1. 2012, *ANSYS FLUENT Theory Guide*, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
2. 2012, *ANSYS FLUENT User's Guide*, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
3. ANDERSSON, J.-O., T. HELANDER, L. HÖGLUND, P. SHI et B. SUNDMAN. 2002, « Thermo-calc & dictra, computational tools for materials science », *CALPHAD*, vol. 26, n° 2, p. 273–312.
4. FOGLER, H. S. 1999, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Prentice Hall International Series in Physical and Chemical Engineering Sciences.
5. GRAF, F. 2007, *Pyrolyse- und Aufkohlungsverhalten von C₂H₂ bei der Vakuumaufkohlung von Stahl*, thèse de doctorat, Universität Karlsruhe (TH).