



Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Mise au Point de la Carbonitruration Gazeuse des Alliages 16NiCrMo13 et 23MnCrMo5 : Modélisation et Procédés

Walter Dal'Maz Silva
05 Mai 2015

Encadrants

Thierry Belmonte

Jacky Dulcy

Sommaire

1 Bilan Général d'Avancement

2 Mécanisme de Durcissement

3 La Réponse au Revenu

4 Résultats en Déploiement

5 Modélisation Cinétique

6 Prochaines Démarches



Institut Jean Lamour

PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Bilan Général d'Avancement

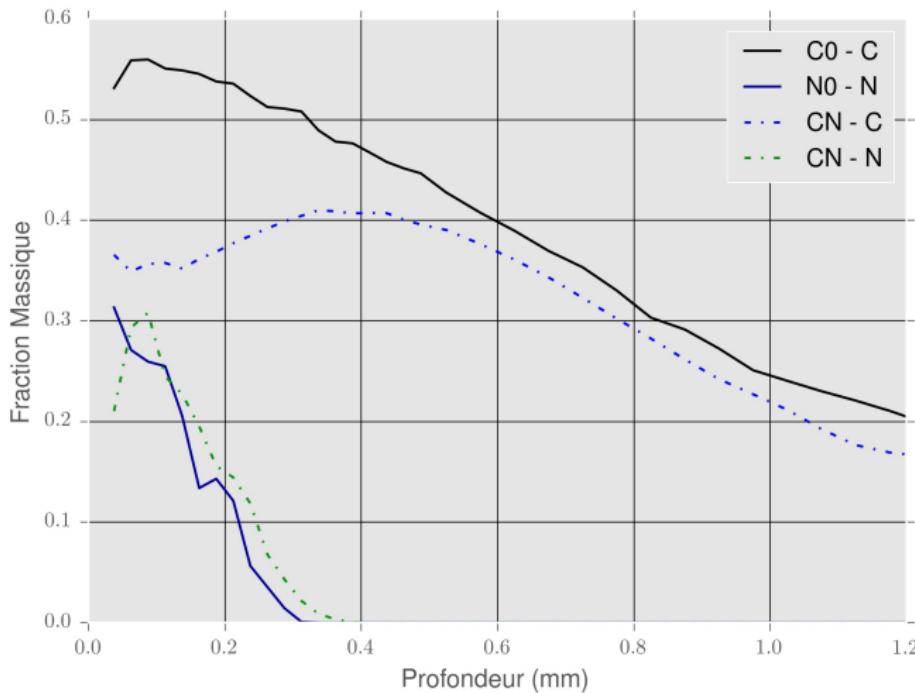
Méthode de traitement :

- ▶ Carbonitruration = Cémentation (2 heures) + diffusion à flux nul (1 heure) + Nitruration (3 heures).
- ▶ Traitement à 900 °C à la pression atmosphérique.
- ▶ Traitements suivis par trempe huile (20 °C) et passage par le froid (-196 °C).
- ▶ Caractérisation : filiations de dureté, microanalyse chimique et microstructure.

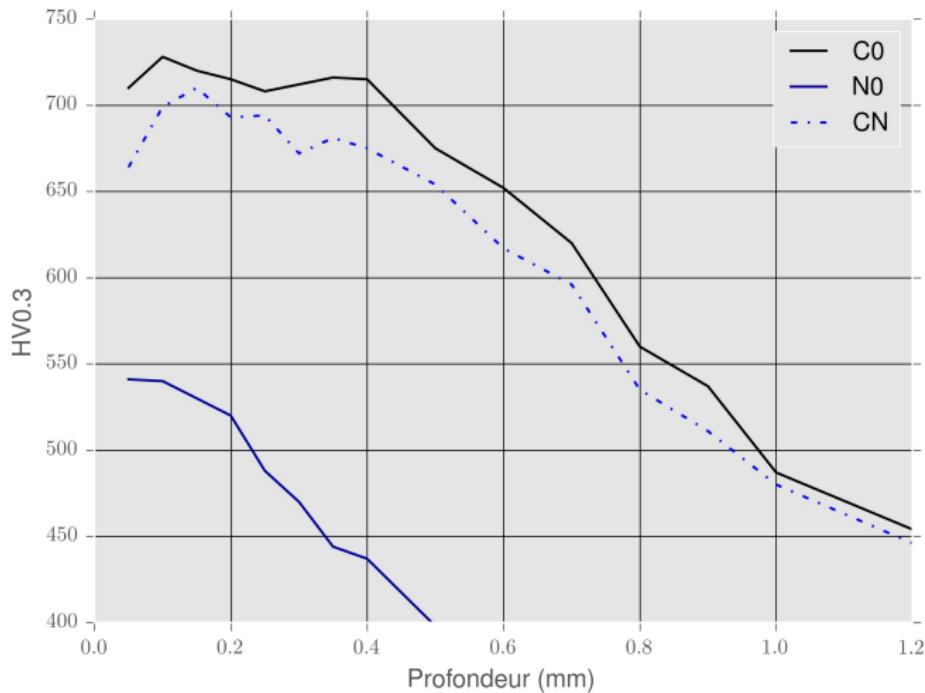
Bilan Général d'Avancement Démarches Métallurgiques

- ▶ Réponse en durcissement en fonction des fractions molaires des éléments interstitiels en solution solide mise en évidence.
- ▶ Étude de l'effet du revenu sur la chute de dureté en fonction de la composition locale.
- ▶ Précipitation secondaire produite lors du revenu après nitruration en domaine austénitique (16NiCrMo13).
- ▶ Durcissement supérieur lors de la carbonitruration avec forte teneur en azote (23MnCrMo5).

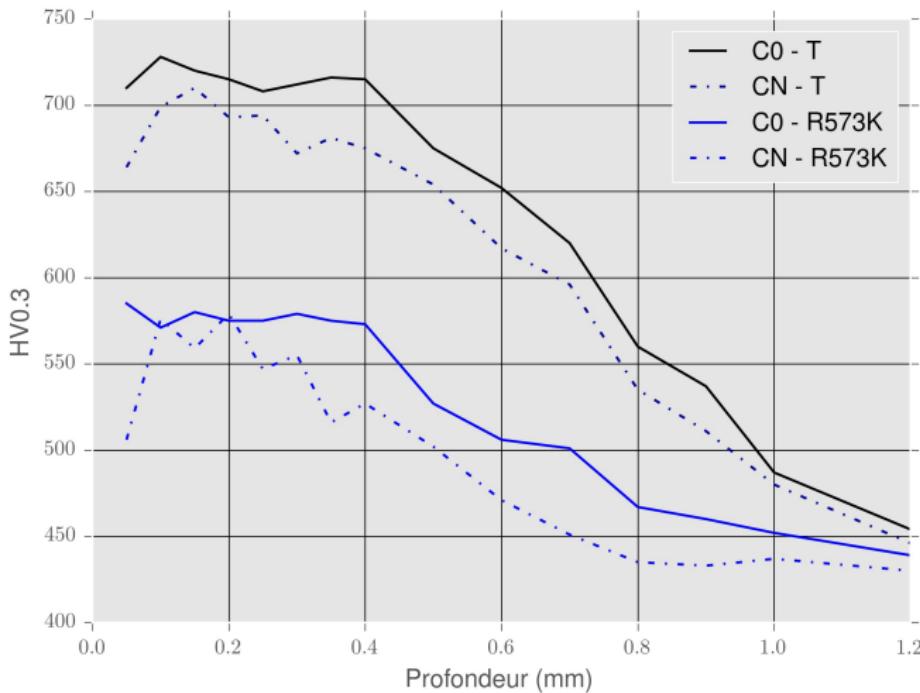
Profils de Diffusion Alliage 16NiCrMo13



Dureté Après Trempe Alliage 16NiCrMo13

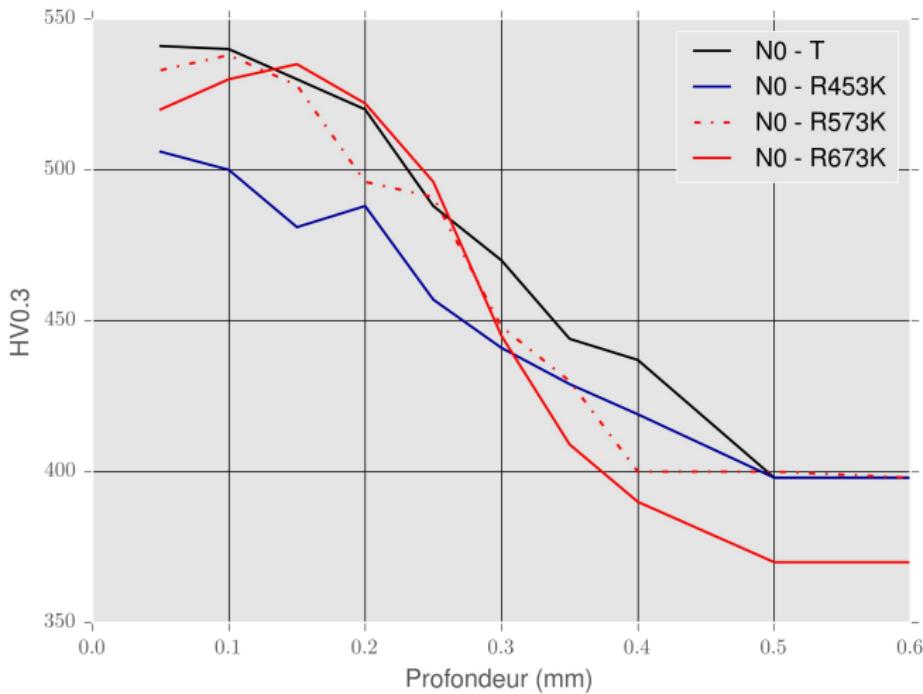


Réponses au Revenu Alliage 16NiCrMo13



Réponses à la Nitruration

Alliage 16NiCrMo13

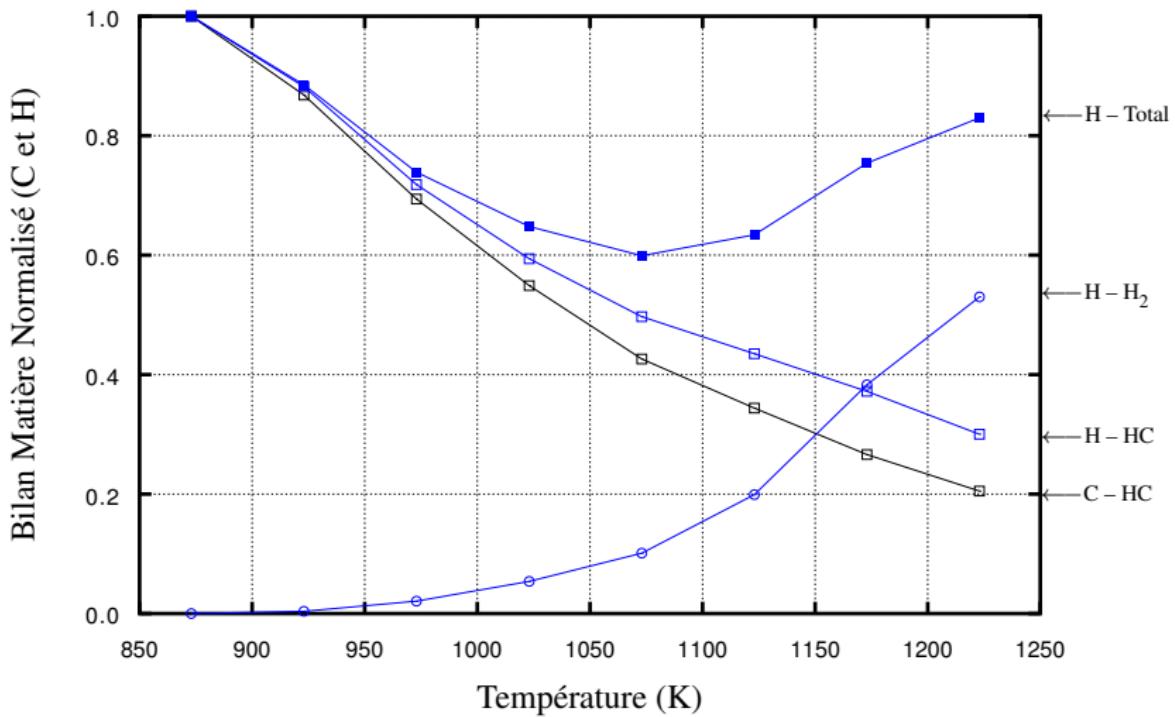


Bilan Général d'Avancement Démarches en Phase Gazeuse

- ▶ Étude à la pression atmosphérique de la pyrolyse de l'acétylène sur faible fraction partielle.
- ▶ Bilan de matière permettant l'estimation des espèces non-mesurées à la sortie du réacteur.
- ▶ Intégration des équations cinétiques pour la décomposition du C_2H_2 : modèle réduit (Graf) et élémentaire (Norinaga).
- ▶ Estimation de la décarburation lors de l'étape de nitruration à partir des mesures par chromatographie de la formation de CH_4 .

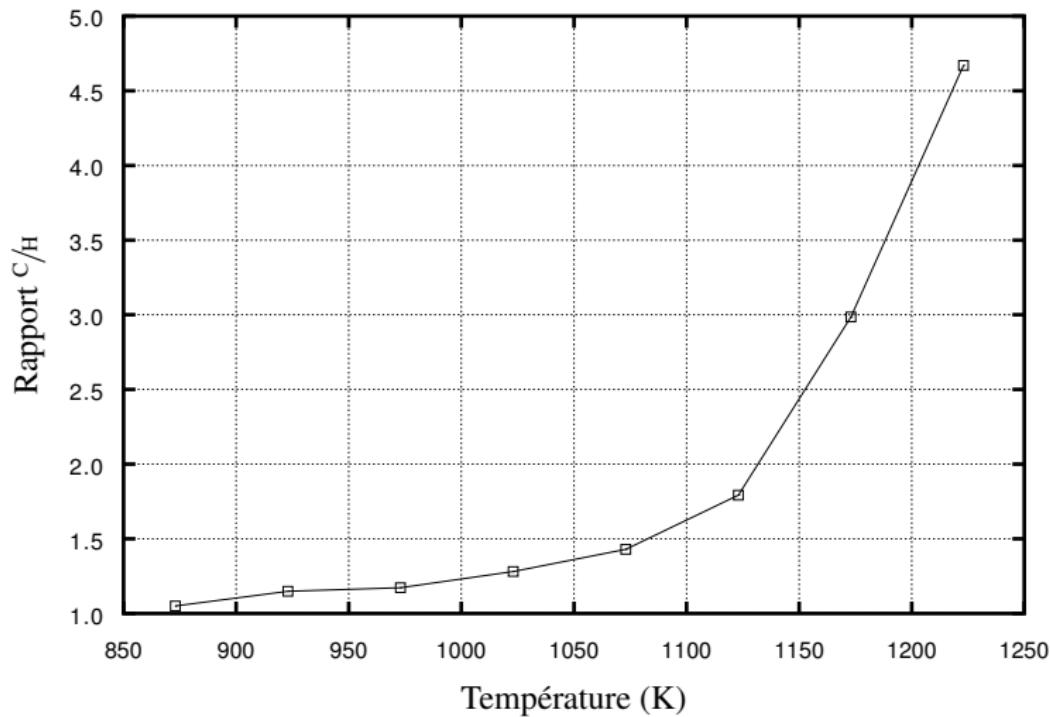
Pyrolyse de l'Acétylène

Apport en Carbone et Hydrogène



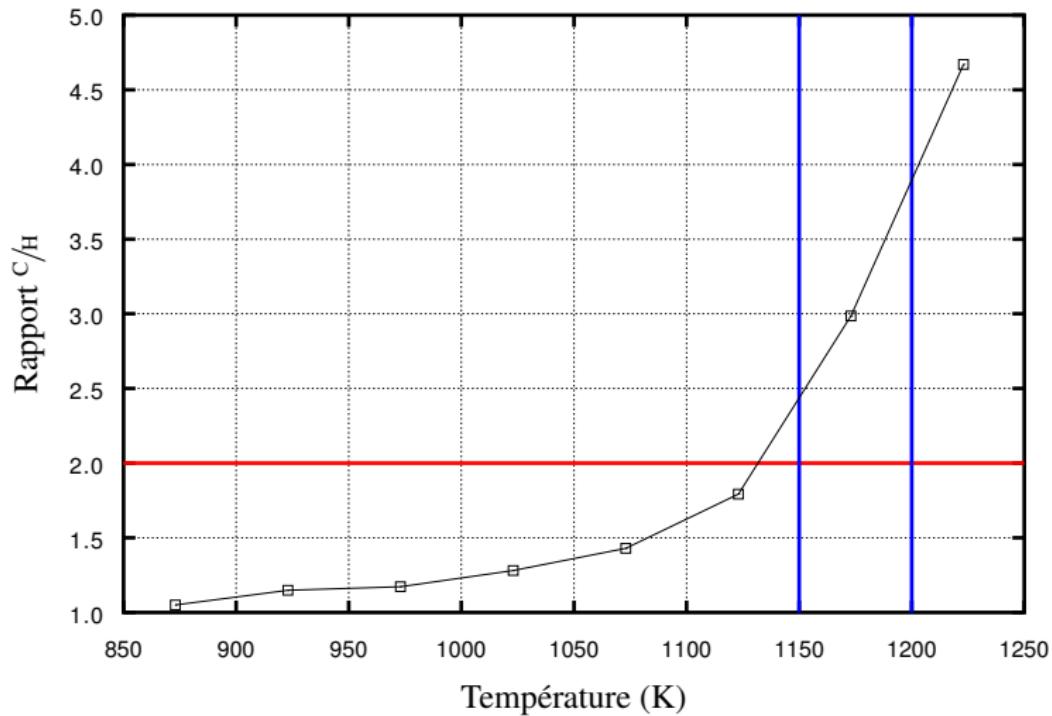
Pyrolyse de l'Acétylène

Rapport C/H des Espèces Non-mesurées



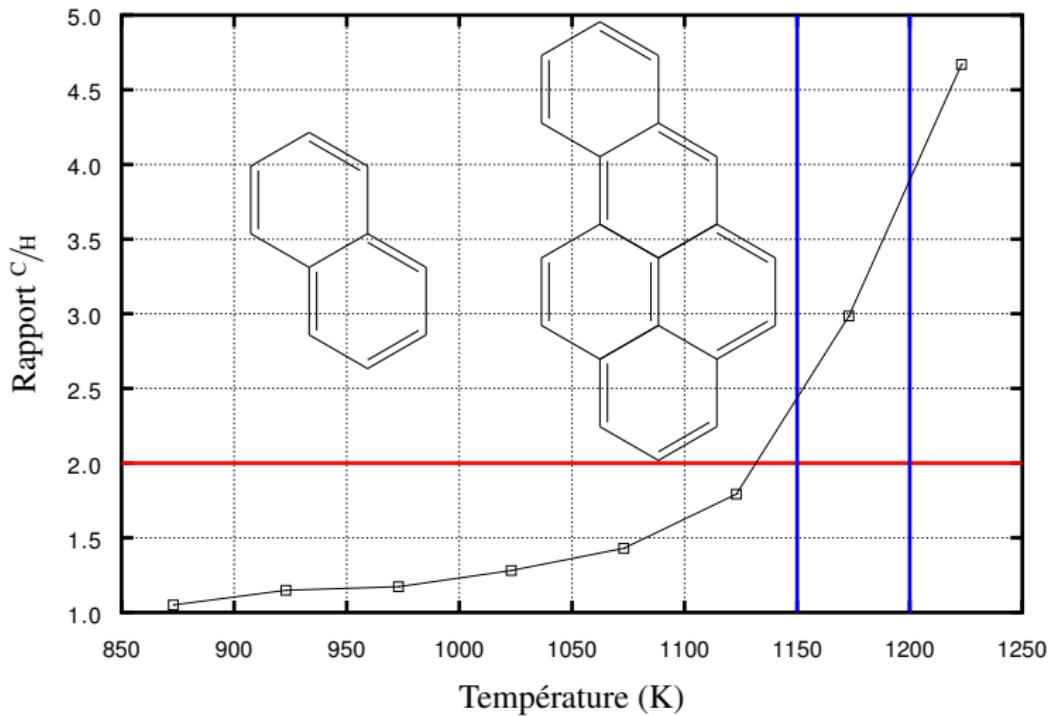
Pyrolyse de l'Acétylène

Rapport C/H des Espèces Non-mesurées



Pyrolyse de l'Acétylène

Rapport C/H des Espèces Non-mesurées





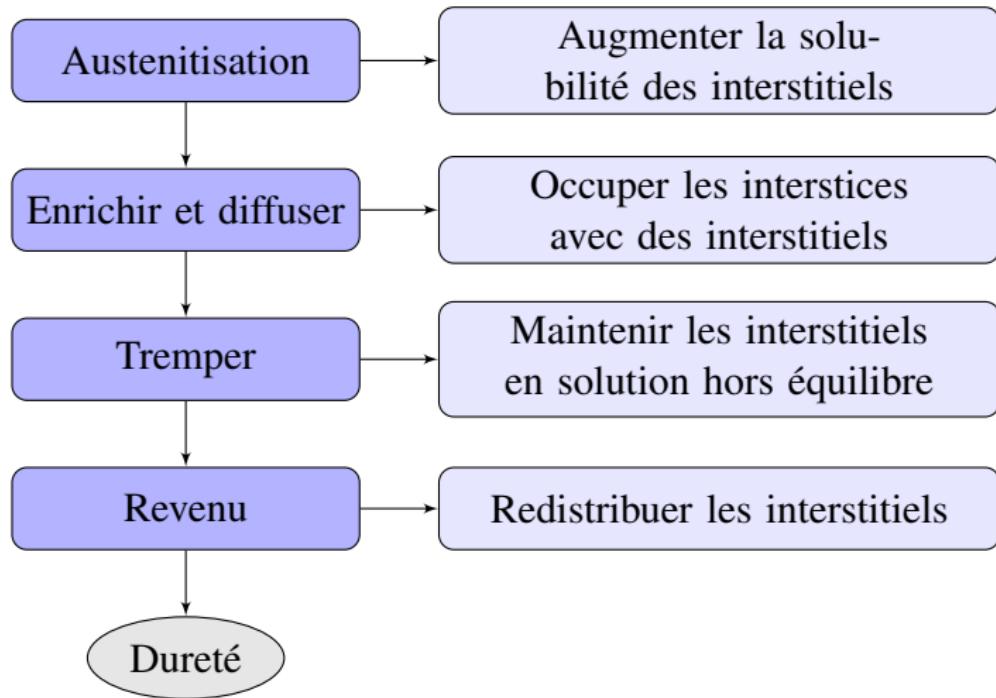
Institut Jean Lamour

PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

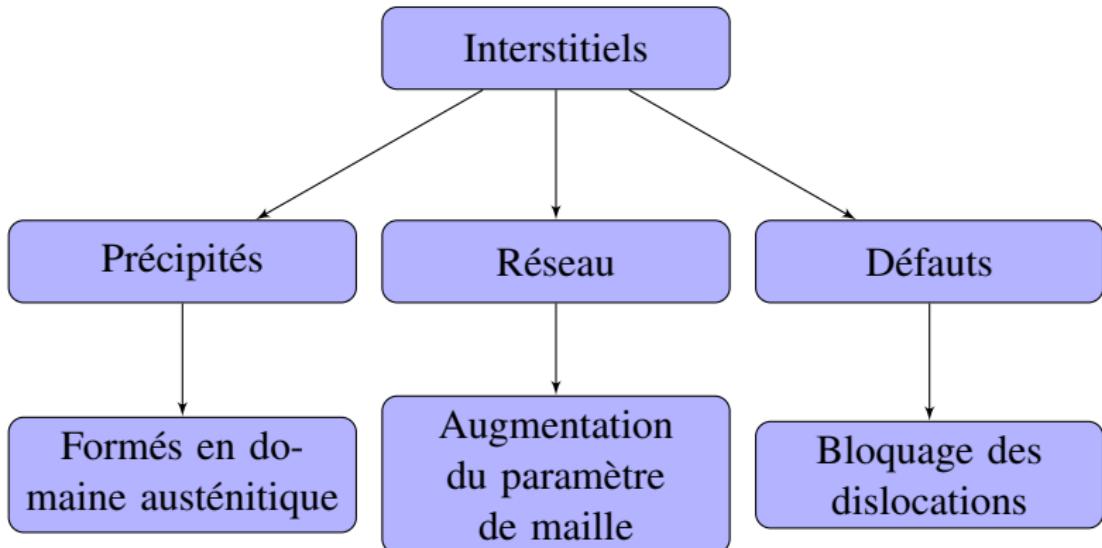
Mécanisme de Durcissement

Concepts de Base

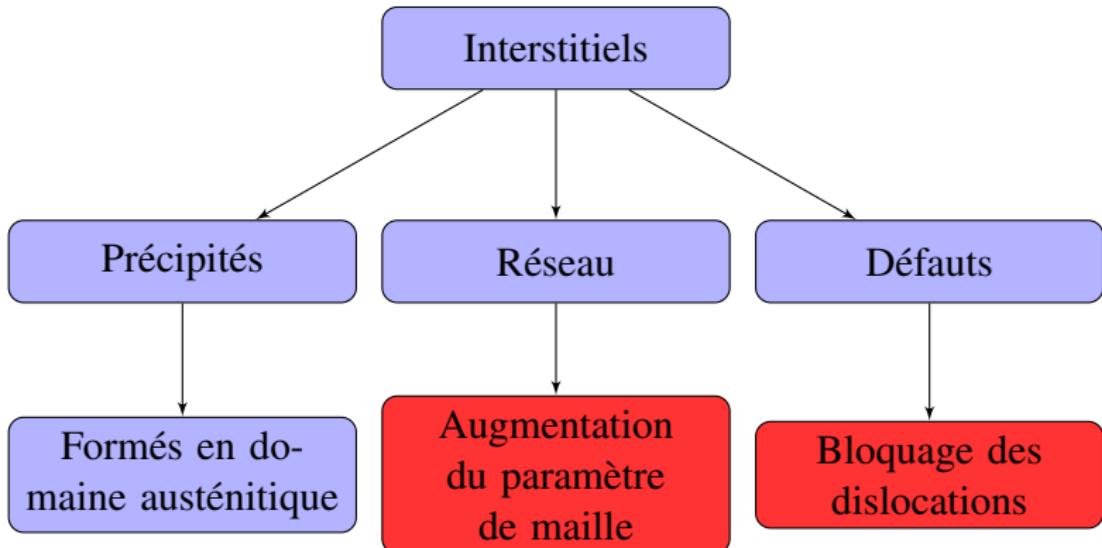
Durcissement par Traitement Thermochimique



Localisations Possibles des Interstitiels Après Trempe



Localisations Possibles des Interstitiels Après Trempe



Développement des Microstructures

La microstructure obtenue dans une couche produite par un traitement thermochimique en domaine austénitique est donc une fonction de :

- ▶ la composition chimique locale obtenue par diffusion des éléments interstitiels,
- ▶ le taux de transfert thermique en surface et la conductivité thermique dans le profil de diffusion.

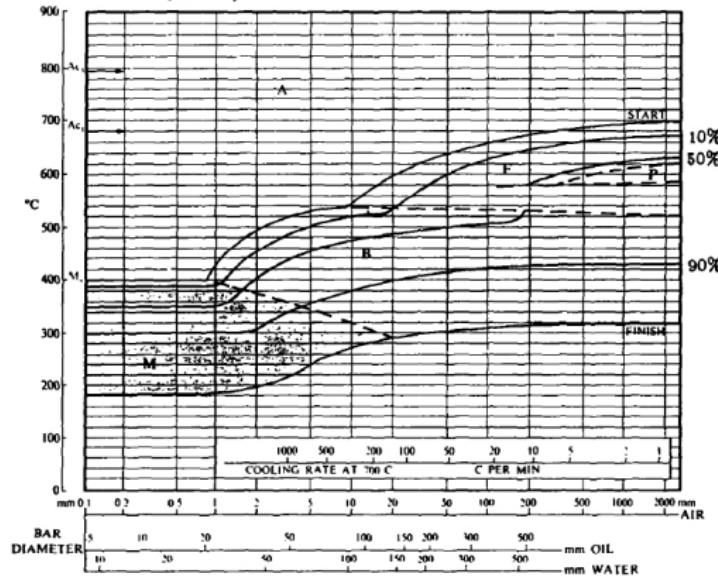
Microstructure

L'alliage 16NiCrMo13 produit en extrême surface une couche martensitique avec une fraction considérable d'austénite résiduelle suivie d'un gradient décroissant de martensite remplacée par la bainite.

Diagrammes CCT

3-1/4 Ni Cr

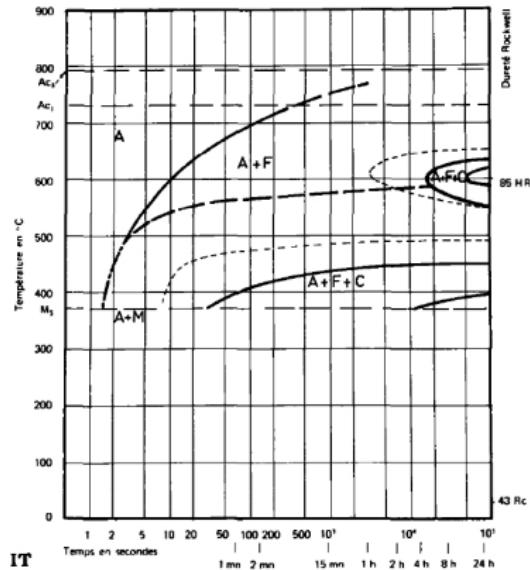
Composition: 0.12% C - 0.50% Mn - 0.20% Si - 0.020% P -
0.020% S - 0.90% Cr - 3.25% Ni Grain size: 8-9 Austenitized at
830°C (1526°F)



Diagrammes CCT

14 NC 12 Steel

Composition: 0.15% C - 0.32% Mn - 0.35% Si - 0.005% S -
 0.016% P - 3.09% Ni - 0.84% Cr - 0.14% Mo - 0.12% Cu
 Grain size: 8-9 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



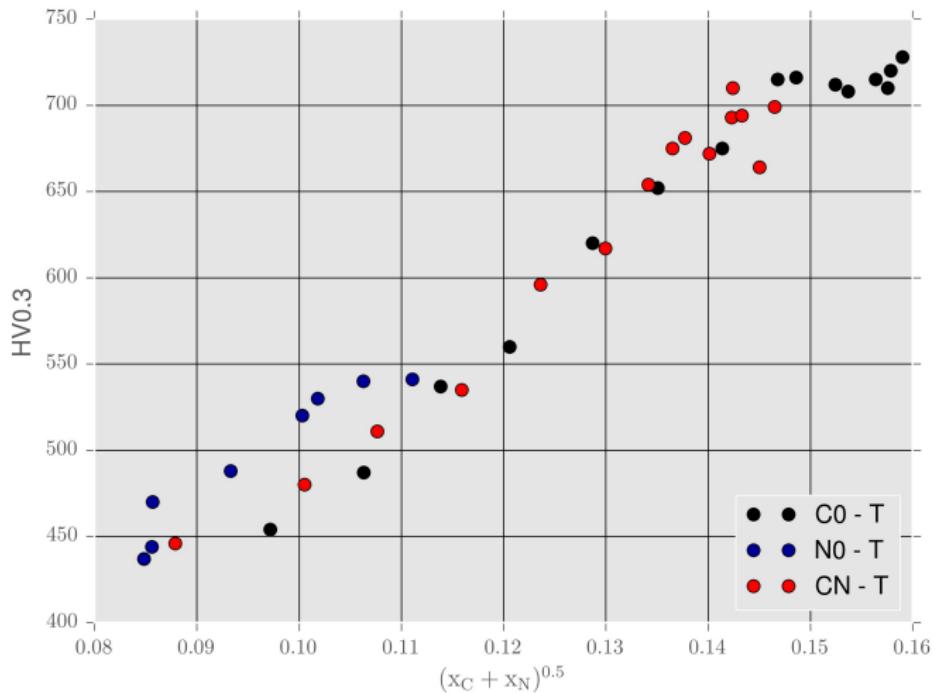
Équation de Norstrom

- ▶ Contrainte de frottement dans le fer pur σ_0 .
- ▶ Effet de solution solide des éléments d'alliage σ_1 .
- ▶ Taille des lattes de martensite d et des paquets D .
- ▶ Densité de dislocations dans le fer pur martensitique ρ_0 .

$$\sigma_y = \sigma_0 + \sigma_1 + k_y D^{-0.5} + k_s d^{-0.5} + \alpha G b (\rho_0 + K_{C+N})^{0.5}$$

Analyse des Résultats Précédents

Alliage 16NiCrMo13





Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

La Réponse au Revenu

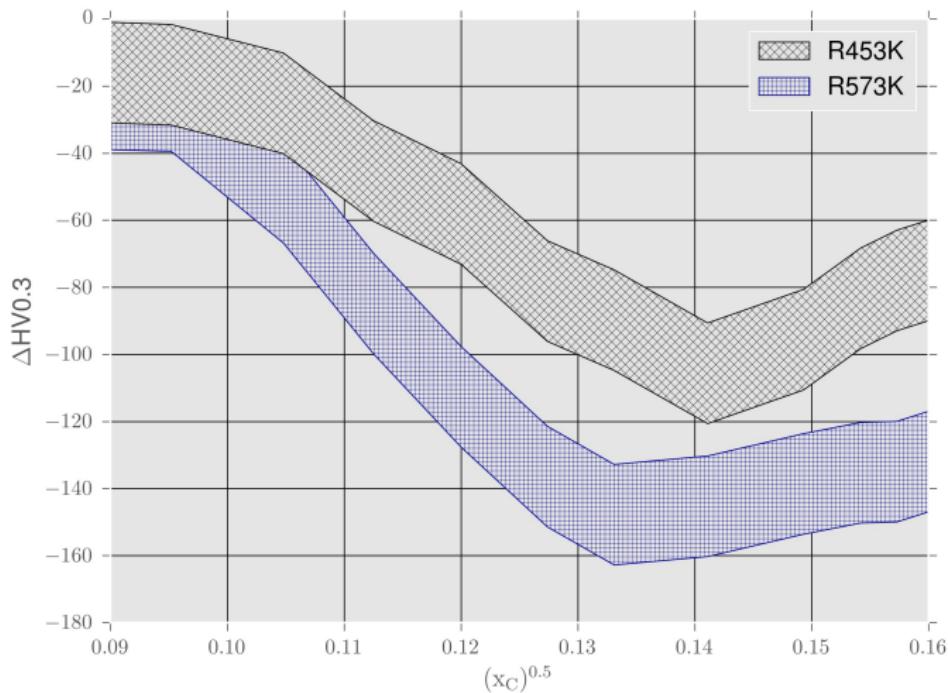
Réponse au Revenu

La réponse au revenu d'un acier faiblement allié trempé est fonction :

- ▶ de la microstructure obtenue lors de la trempe,
- ▶ de la composition en interstitiels et éléments d'alliage,
- ▶ de la durée et température de traitement :

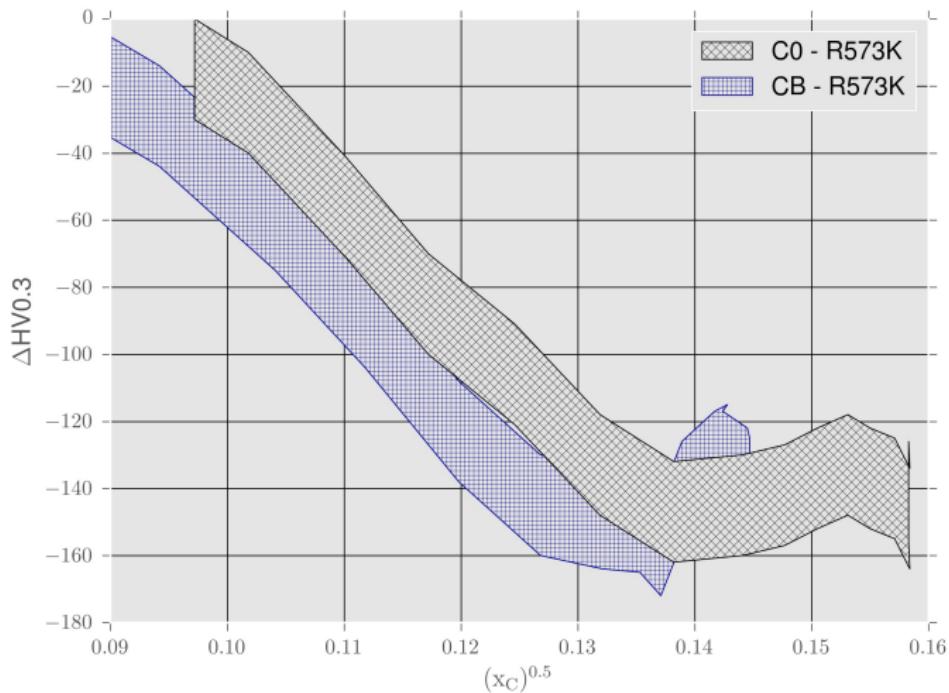
$$P = T(C + \log(\tau))$$

Effet de la Composition Locale – Revenu Rôle du Carbone dans l'Alliage 16NiCrMo13



Carbonitruration vs. Cémentation

Rôle du Carbone dans l'Alliage 16NiCrMo13

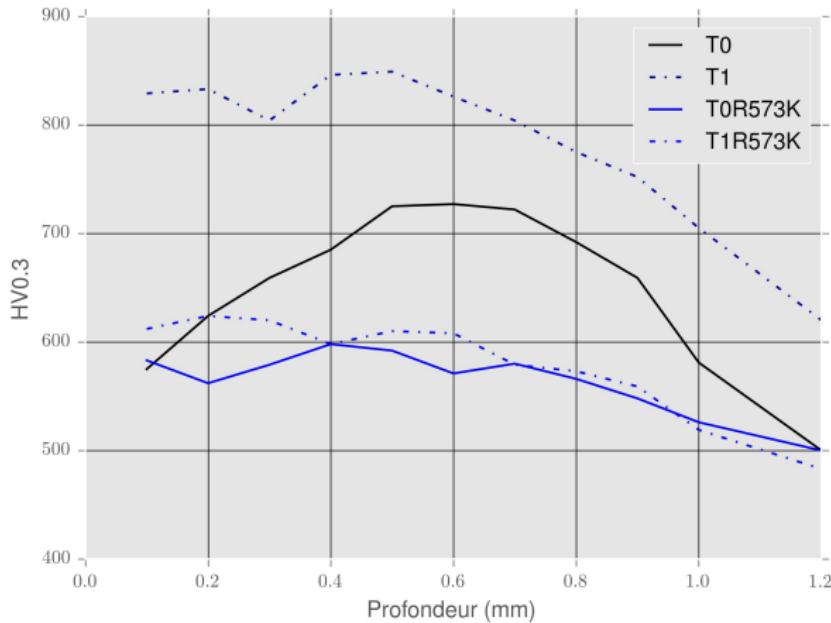




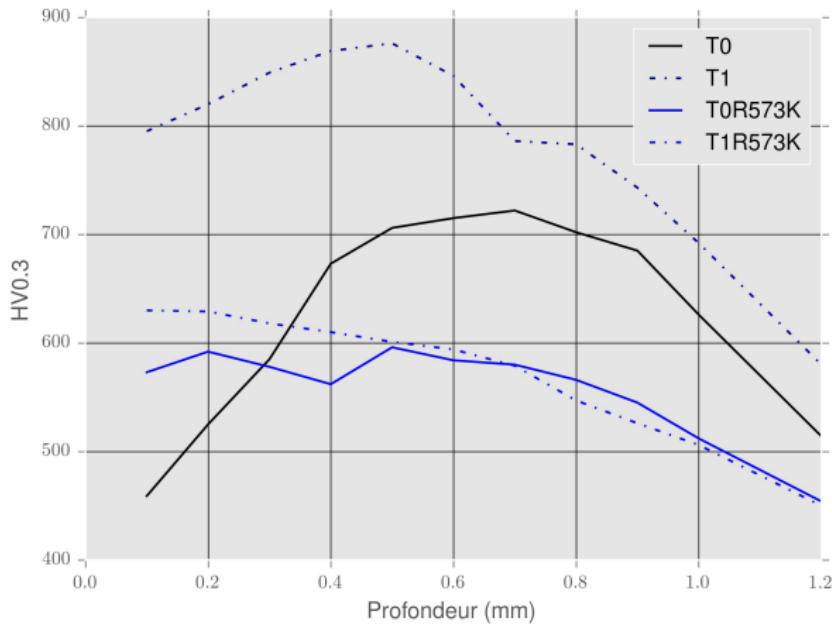
Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Résultats en Déploiement

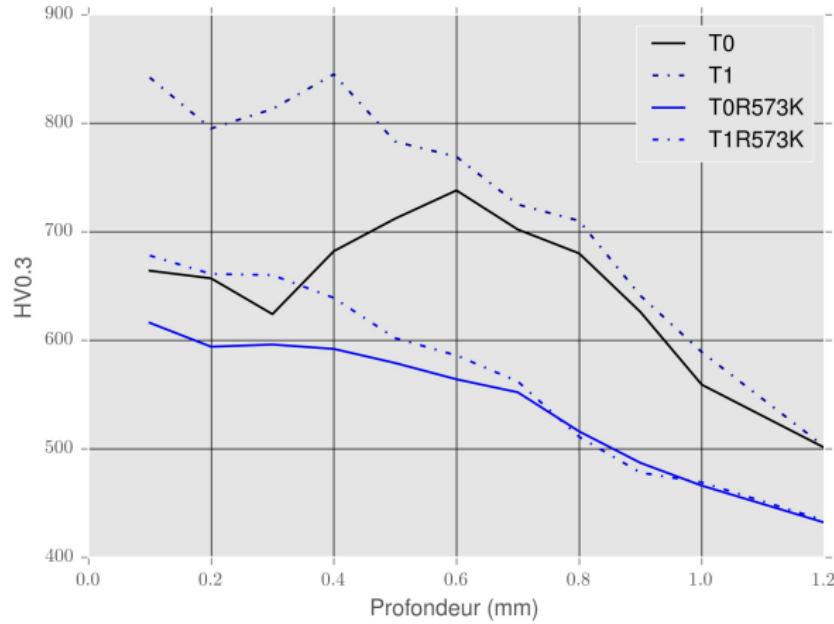
Décarburation Pendant la Nitruration Cémentation de Référence



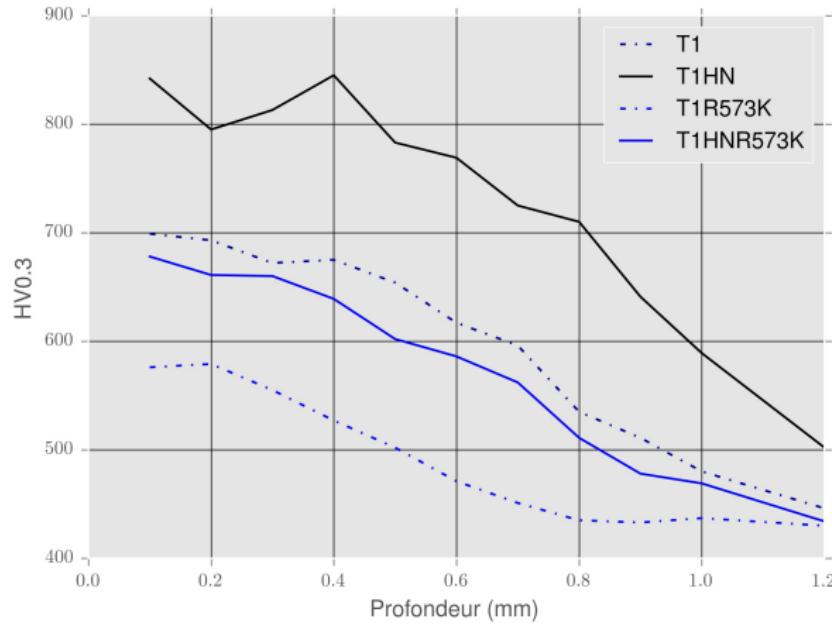
Décarburation Pendant la Nitruration Décarburation lors de la Carbonitruration



Carbonitration Avec Haute Teneur en Azote



Carbonitration Avec Haute Teneur en Azote

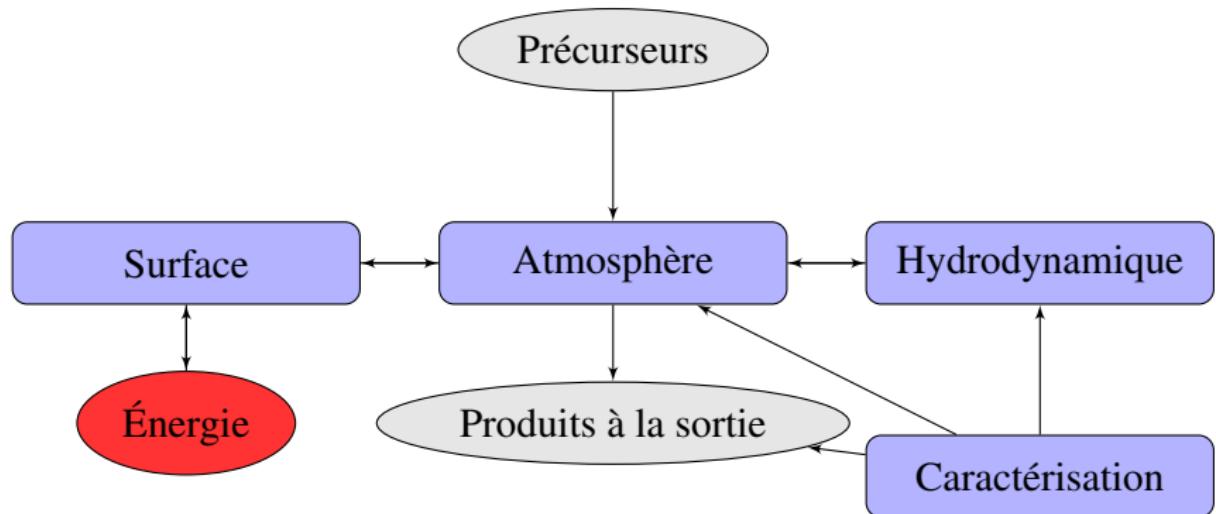




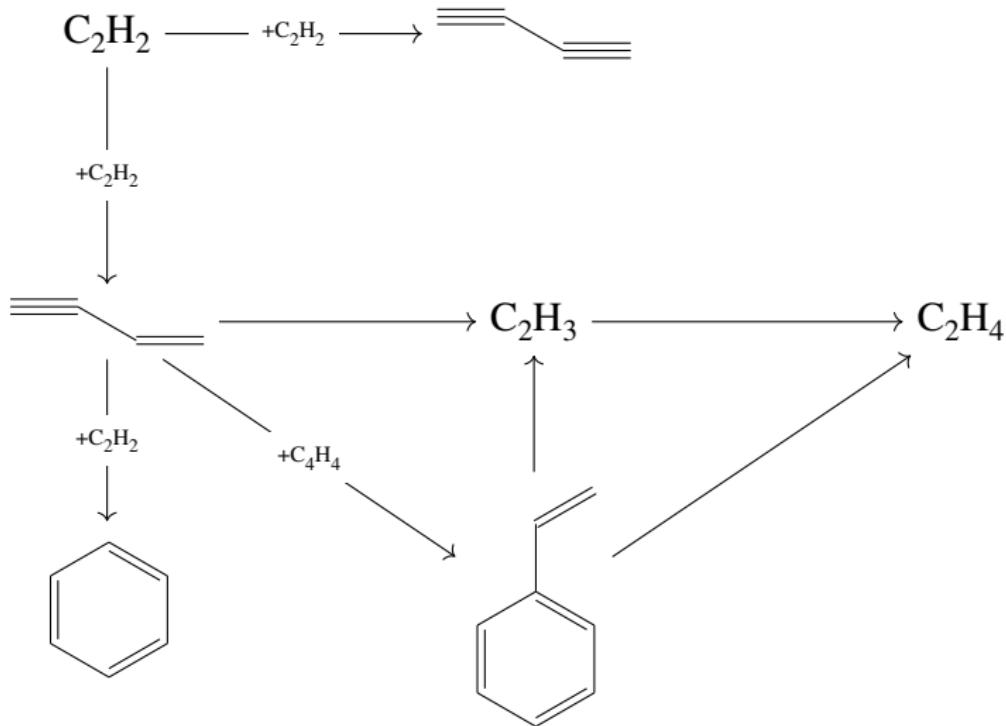
Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Modélisation Cinétique

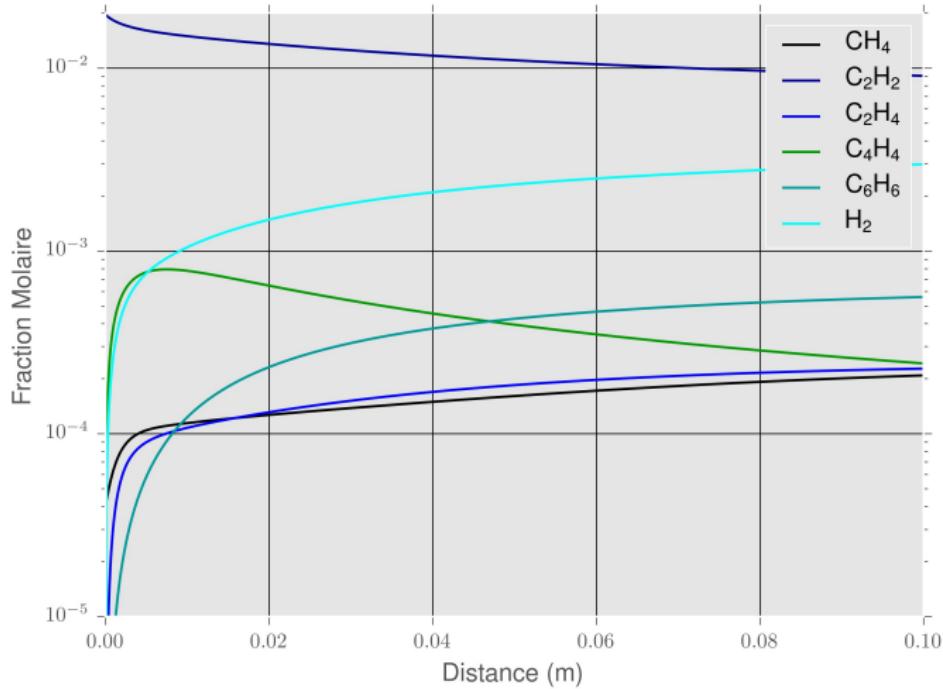
Processus en Phase Gaseuse et d'Interface



Comportement de l'Acétylène en Pyrolyse



Simulation Zéro-Dimensionnelle Acétylène



Perspectives

- ▶ Résultats expérimentaux qualitatifs obtenus avec de faibles quantités d'hydrogène à l'entrée du réacteur ont leur comportement reproduit dans des simulations.

**H₂ favorise les espèces légères et réduit
la perte du C₂H₂.**

- ▶ Lors de la mise en route de la chromatographie à basse pression les expériences pourront confirmer le comportement de pyrolyse dans le réacteur industriel. Les faibles temps de séjour doivent rapprocher les résultats des simulations 0-D des mesures expérimentales.

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		

Modélisation des Atmosphères

Étapes de la Modélisation

Étape	Code	Simulation
Solution zéro-dimensionnelle : homogène		
Analyse de sensibilité : homogène		
Solution zéro-dimensionnelle : homogène et hétérogène		
Simplification des modèles cinétiques		
Simulation 2-D avec Fluent		



Institut Jean Lamour
PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Prochaines Démarches

Prochaines Démarches

Activité	Durée Prévue
Modélisation des processus de surface.	03/2015 - 07/2015
Mesure par spectroscopie infrarouge des espèces formées avec et en absence d'un échantillon métallique.	05/2015 - 06/2015
Suivi de la pyrolyse du C ₂ H ₂ et du NH ₃ à basse pression par chromatographie.	07/2015 - 08/2015
Essais de carbonitruration à basse pression.	08/2015 - 10/2015

Prochaines Démarches

Activité	Durée Prévue
Analyse par microscopie électronique en transmission des précipités formés lors du revenu des échantillons nitrurés et carbonitrurés.	07/2015 - 12/2015
Simplification des modèles cinétiques pour emploi en simulation CFD.	08/2015 - 02/2016
Rédaction de publications à partir des résultats obtenus.	03/2015 - 04/2016



Institut Jean Lamour

PENSER LES MATÉRIAUX DE DEMAIN

Merci de Votre Attention!