

Cémentation gazeuse basse pression : quels modes opératoires pour limiter l'émission de produits toxiques ?

8 octobre 2025

Hubert Monnier, responsable d'études



© INRS – Mathieu Marchal

Sommaire

01

La cémentation gazeuse
basse pression

02

Evaluation de l'exposition

03

Modélisation des réactions

04

Validation expérimentale

05

Optimisation de la « recette »

06

Validation sur pilote
industriel

01

La cémentation gazeuse basse pression

Description, contexte et problématique



© INRS – Mathieu Marchal

Objectif, principe et cibles

Qu'est-ce que la cémentation et à quoi sert-elle ?



Objectif

Augmenter la dureté
surfactive des pièces en
acier



Principe

Introduction du carbone
dans un acier par craquage
d'un hydrocarbure vers
900°C et sous vide (8 kPa)



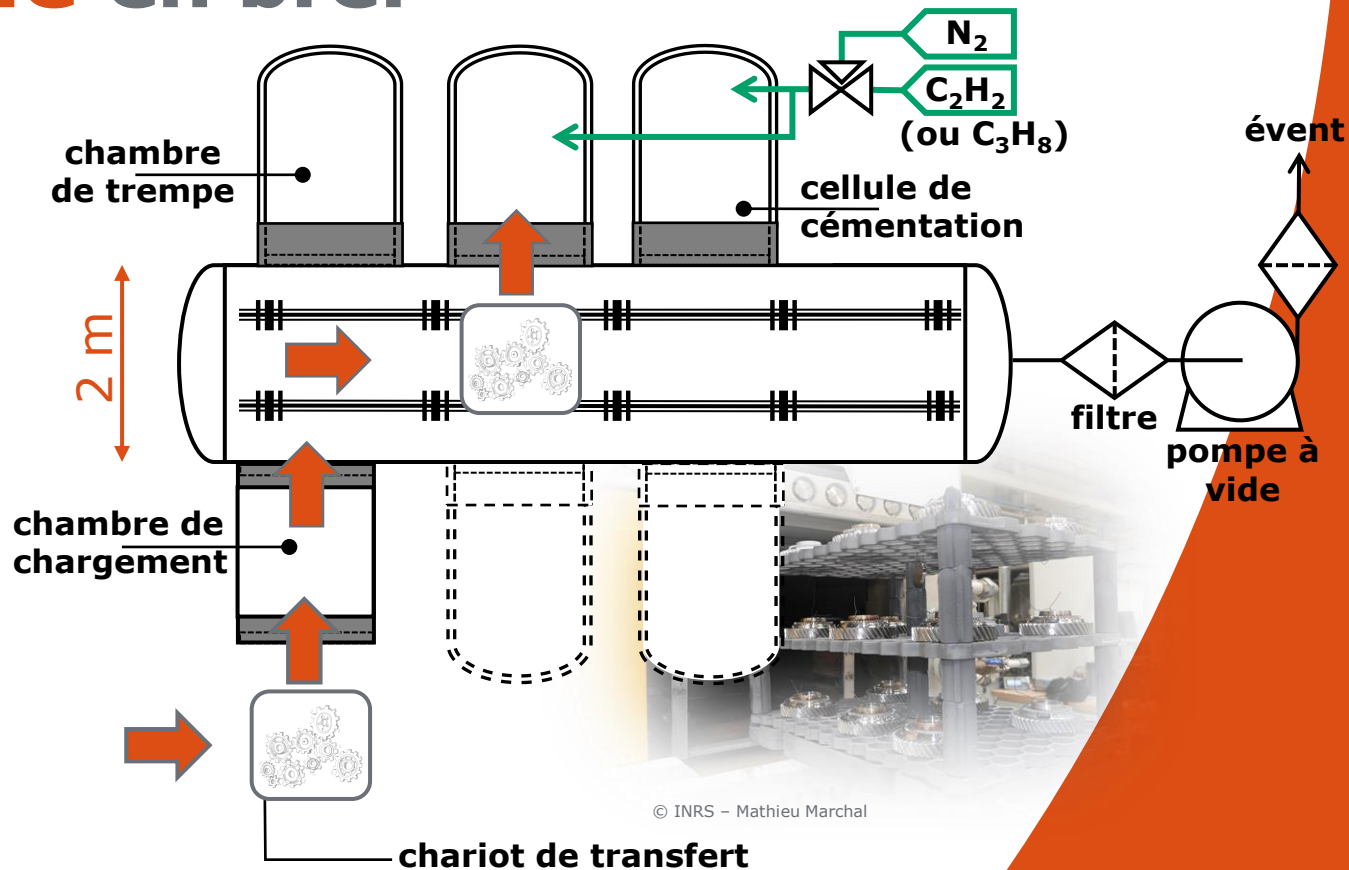
Le procédé en bref

Procédé continu :

- haute température
- basse pression
- hydrocarbure gazeux
- absence d'air



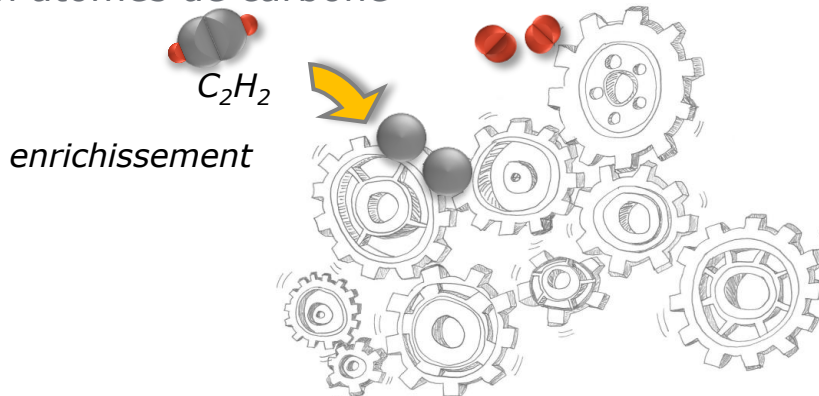
« zéro » CO₂



L'enrichissement en surface

Quatre étapes :

- Déposition de l'acétylène à la surface de l'acier à $\sim 900^{\circ}\text{C}$
- Adsorption de l'acétylène à la surface
- Décomposition de l'acétylène au contact de l'acier : $\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} + 2\text{C}$
- Enrichissement de la surface en atomes de carbone



➔ Problème

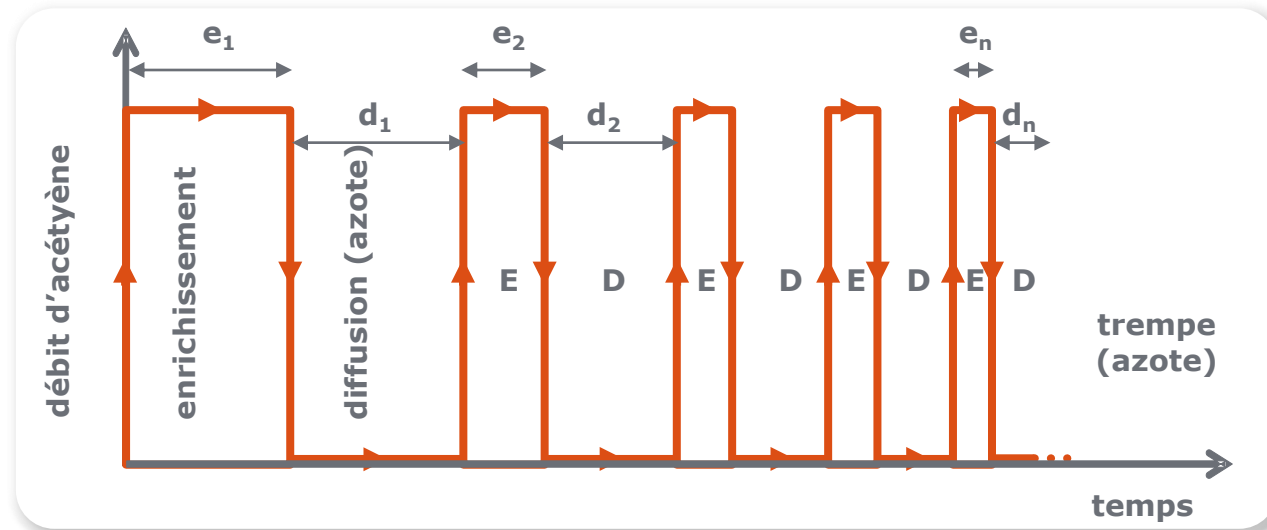
- Accumulation des atomes de carbone à la surface
- « Saturation » de la surface en atomes de carbone
- Arrêt de la décomposition de l'acétylène à la surface

Les « recettes » industrielles

- Le problème : saturation de la surface en carbone
- La solution : alimentation cyclique de l'acétylène

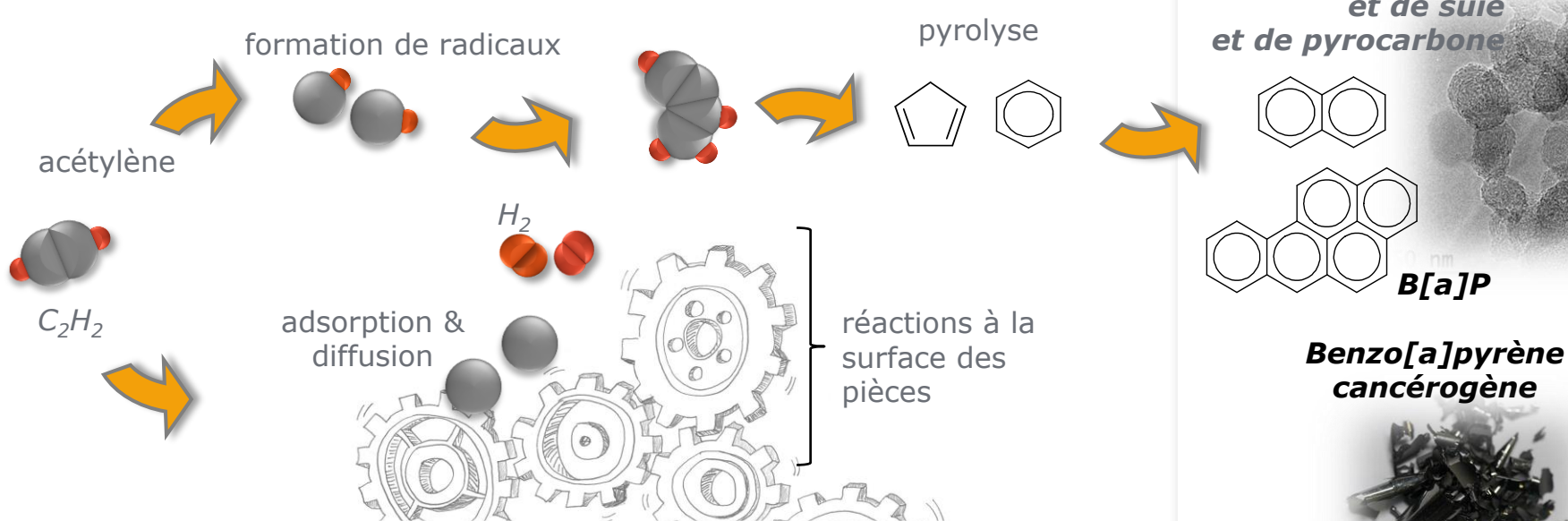
e : phases d'enrichissement, C_2H_2
d : phases de diffusion, N_2

Objectif :
Laisser le temps au carbone de diffuser dans l'acier



Contexte & problématique

- Réactions de surface 😊
- Réactions en phase gazeuse ☹️



16 HAP ciblés (US-EPA¹ et Ademe)

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

naphthalène
acénaphthylène
acénaphthène
fluorène
phénanthrène
anthracène
fluoranthène

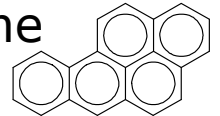
≤ 3 cycles

pyrène
benzo[*a*]anthracène
chrysène
benzo[*b*]fluoranthène
benzo[*k*]fluoranthène

4 cycles

dibenzo[*a,h*]anthracène

benzo[*a*]pyrène



groupe 1 (CIRC)²

indéno[1,2,3-*cd*]pyrène

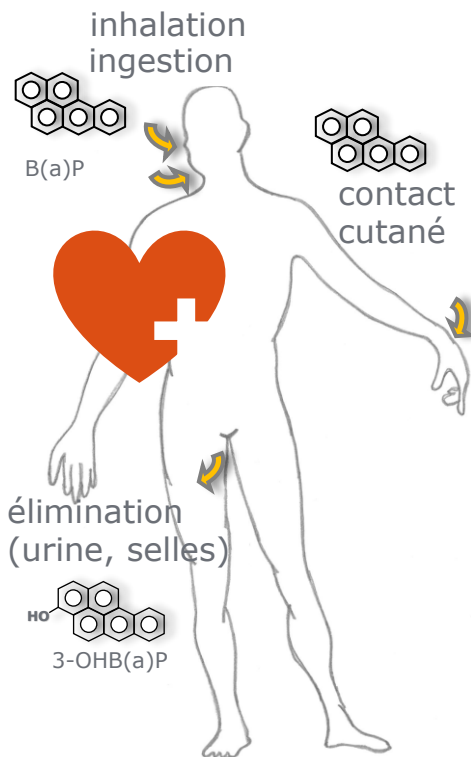
benzo[*ghi*]perylène

≥ 5 cycles

¹United States Environmental Protection Agency

² « cancérogène avéré pour l'homme », Centre International de Recherche sur le Cancer

Exposition professionnelle



Exposition

- Maintenance des fours
- Inhalation
- Ingestion
- Contact cutané

Élimination

Urines & selles
3-OHBaP

Effets sur la santé

- Irritation cutanée
- Cancers : vessie, poumon, peau, scrotum*
- Perturbation endocrinienne

Réglementation française

150 ng de B[a]P par m³ d'air sur 8h00
(Recommandation Cnam)



*Meyer M. Melicow, Percivall Pott (1713–1788) 200th Anniversary of First Report of Occupation-Induced Cancer of Scrotum in Chimney Sweepers (1775), *Urology*, 6, 1975, 745-749

Notre approche

02

Evaluation
de
l'exposition

03

Modélisation
des réactions

04

Validation
expérimentale

05

Optimisation
de la "recette"

06

Validation
sur pilote
industriel

© INRS - Serge Morillon

02

Evaluation de l'exposition

Prélèvements atmosphériques
et biométrie

© INRS – Hubert Monnier

Deux types de **prélèvements**

Atmosphériques¹ et biométries²

Entreprises

- Quatre usines
- 37 opérateurs
- Maintenance et nettoyage
- De 2008 à 2012



© INRS – Hubert Monnier

Atmosphérique

- Sur la personne
- Particules sur filtre
- Gaz sur résine



© INRS – Serge Morillon

Biométrie

- Prélèvement urinaire
- Mesure de la concentration en 3-OHB[a]P



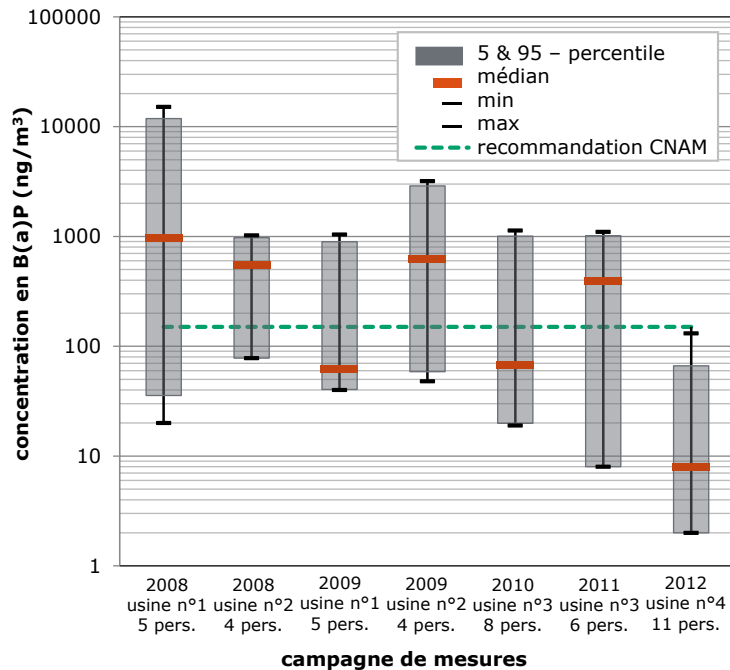
© INRS - Serge Morillon

¹Méthode METROPOL M-332, INRS

²Base de données BIOTOX, INRS

Prélèvements atmosphériques

Concentration en benzo[a]pyrène, min, max et médian par usine



Exposition



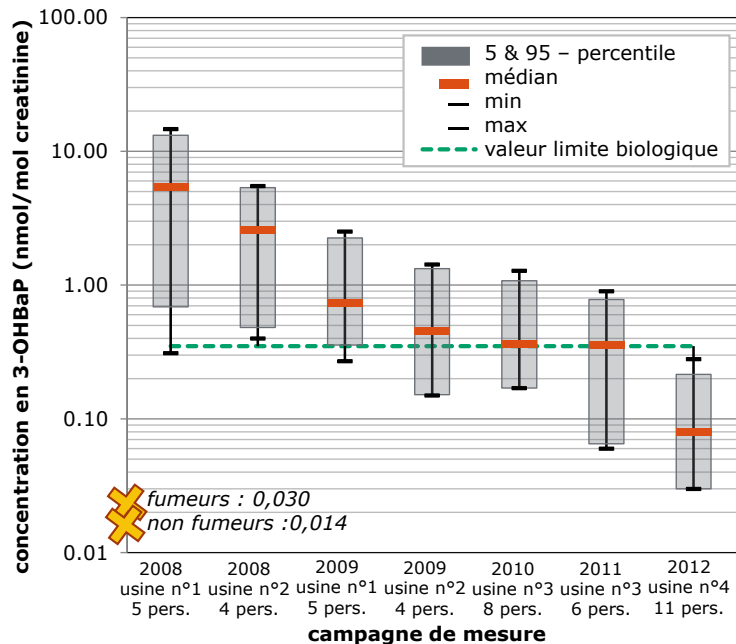
- $[BaP]_{max} > 100 \times Reco.$
- pas de décroissance au cours des années
- grande variation en fonction de la tâche



Pompe, filtre et résine XAD2

Prélèvements biologiques

Concentration en 3-hydroxybenzo[a]pyrène, min, max et médian par usine



Exposition

- décroissance de [3-OHBaP] avec le temps
- 2012 : en dessous de la VLB* INRS

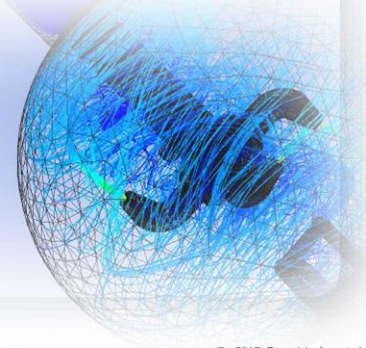


VLB* : Valeur Limite Biologique proposition de l'INRS

03

Modélisation des réactions

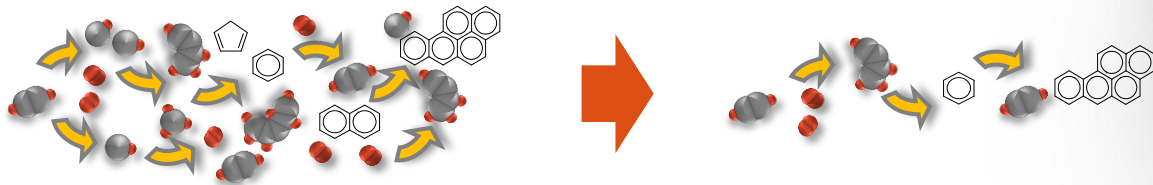
Le gaz, la suie et le **pyrocarbone**



Réduction du modèle

Problématique

- Trop de réactions chimiques, trop de substances
- Importante durée de calcul pour une optimisation ou de la CFD*



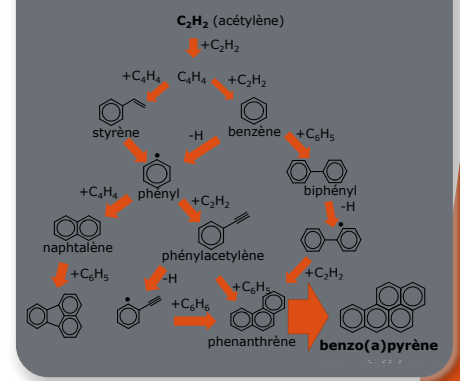
Comment ?

- Ansys Chemkin Pro®
- Validation expérimentale en laboratoire
- Conditions industrielles (T, P) de cémentation gazeuse basse pression

*Calculs de mécanique des fluides numériques

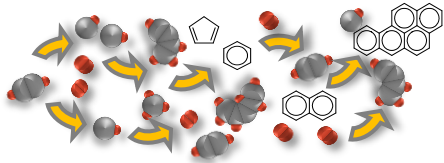
Modèle réduit

- Analyse des flux des espèces + analyse de sensibilité
- Regroupement des réactions du même type



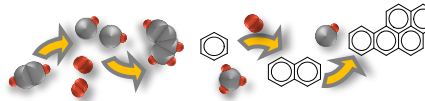
Intérêt : utilisation plus aisée lors d'une modélisation globale d'un procédé ou d'une optimisation

Modèle détaillé



363 espèces
1 255 réactions

Analyse des flux, et de sensibilité



140 espèces
444 réactions

Regroupement de réactions



14 espèces
18 réactions

04

Validation expérimentale

Banc d'essais **et réacteurs**

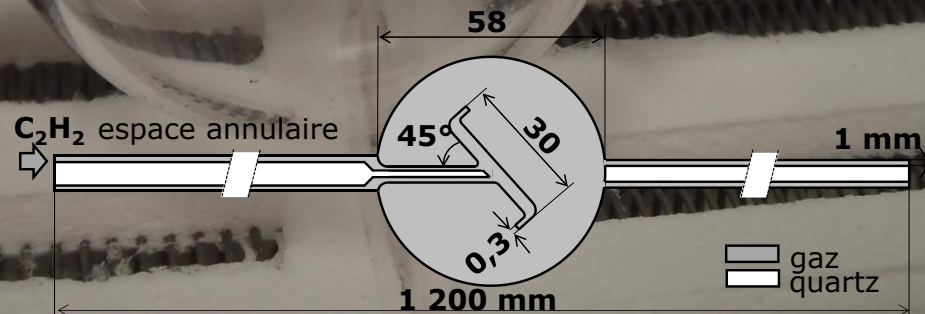
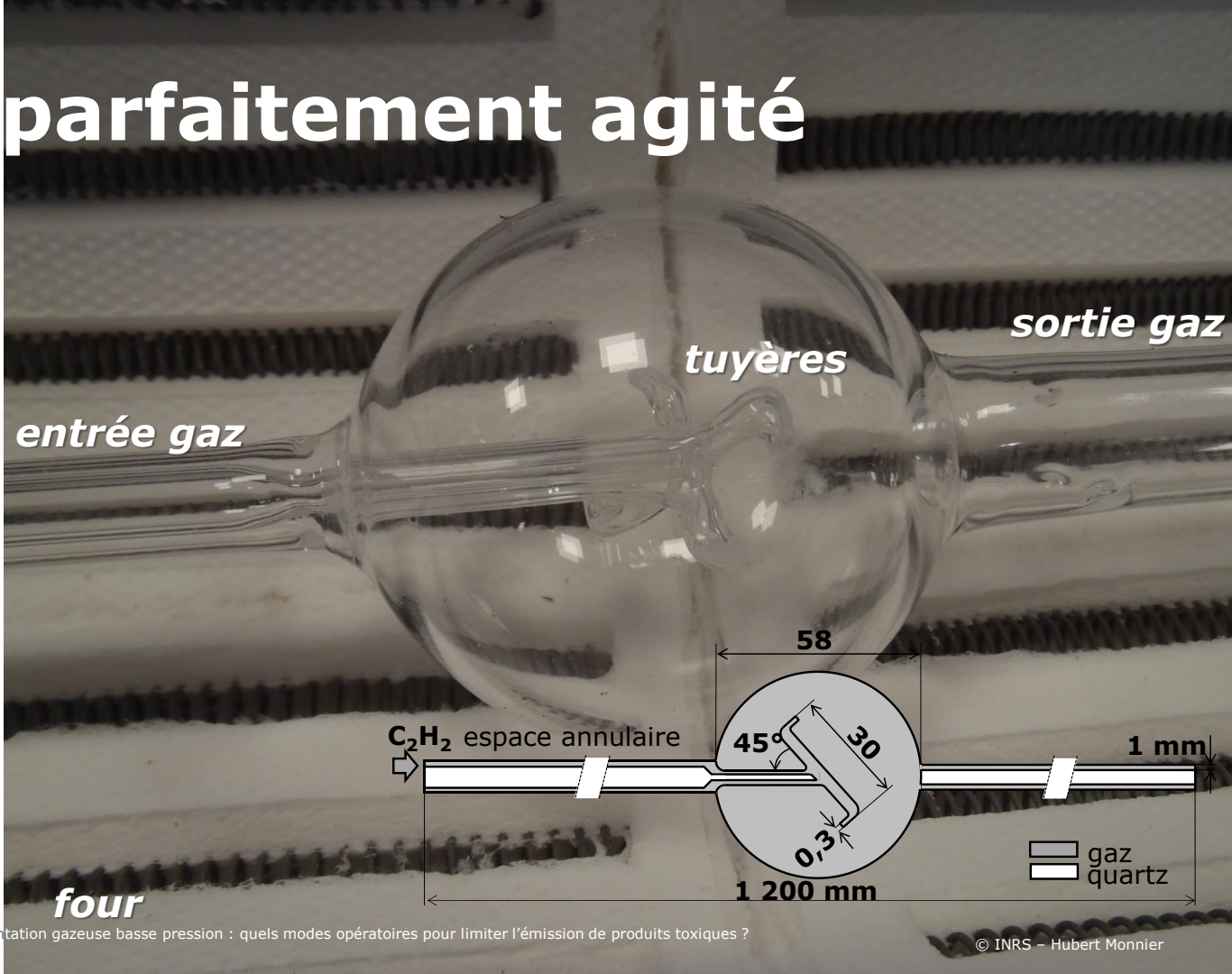


Réacteur parfaitement agité

Une sphère
Quatre jets

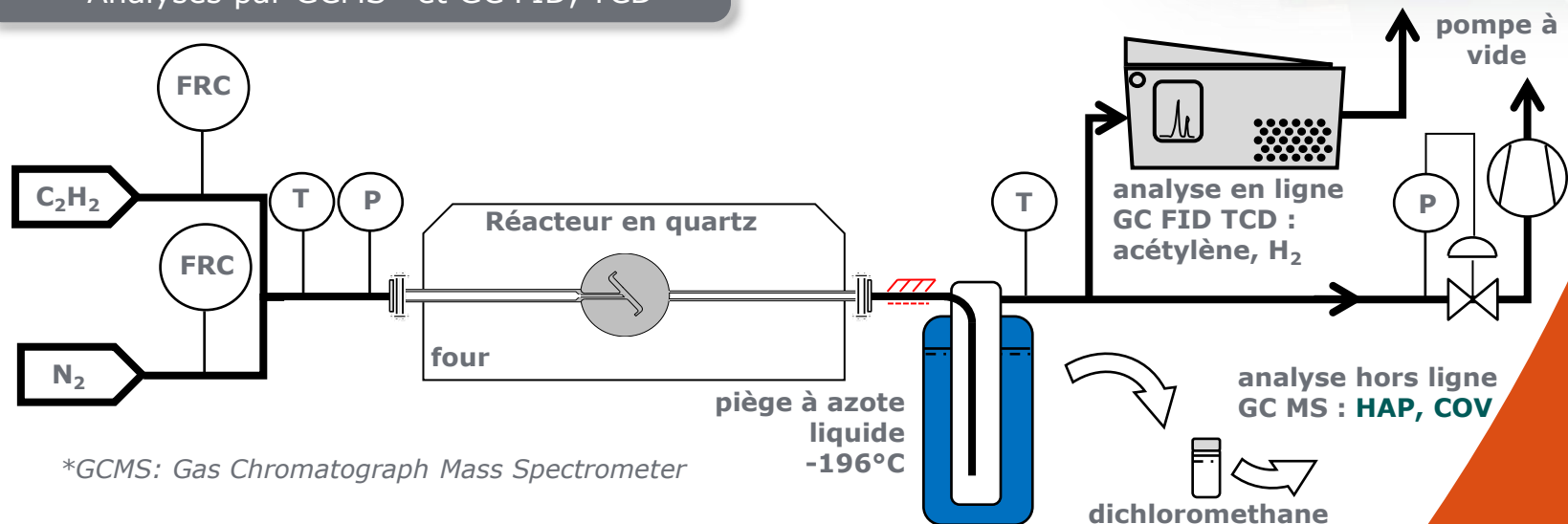
$$V_{\text{sphère}} = 100 \text{ mL}$$

$$d_{\text{tuyères}} = 300 \mu\text{m}$$

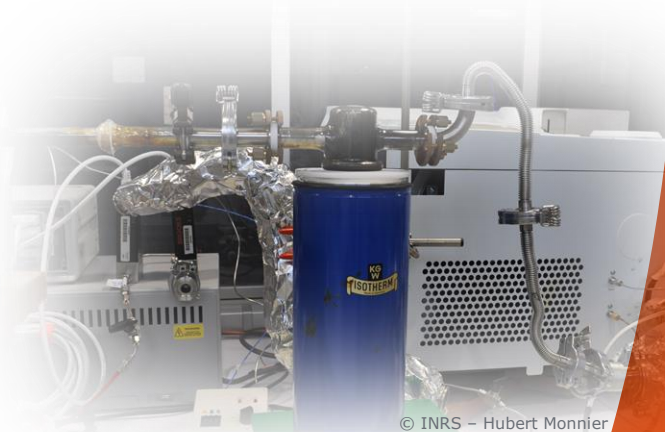


Montage expérimental

- Pyrolyse d'acétylène en continu
- Réacteur à jets *en quartz*
- $T = 900^{\circ}\text{C}$ & 950°C , $P = 8 \text{ kPa}$
- Temps de séjour : 0,5 à 2 s
- Analyses par GCMS* et GC FID, TCD

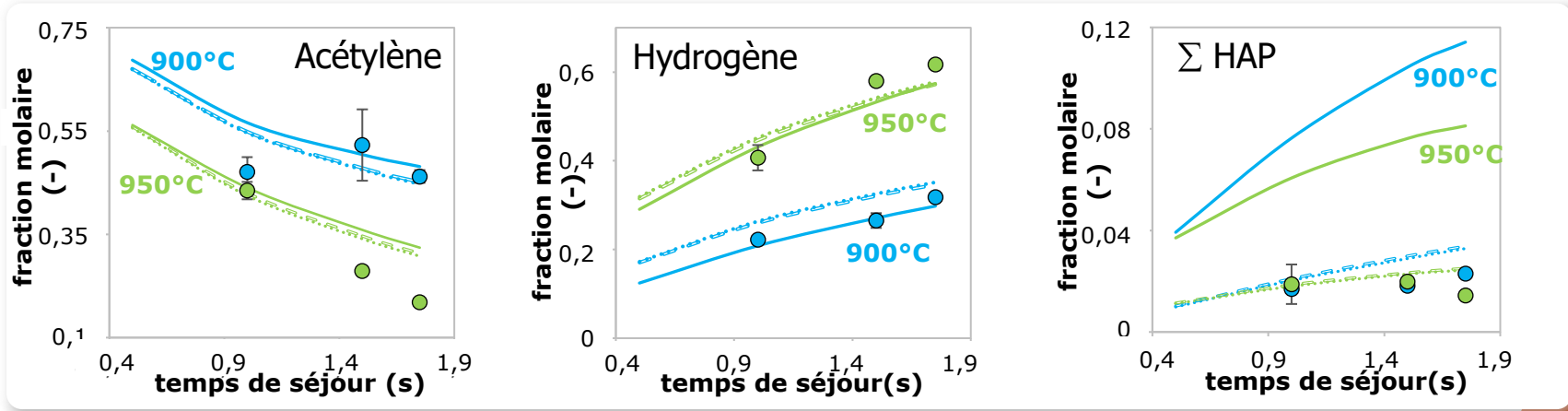
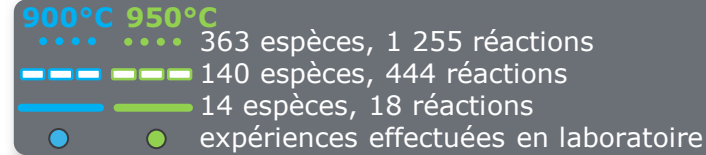


*GCMS: Gas Chromatograph Mass Spectrometer



© INRS – Hubert Monnier

Modèles vs expériences



Conclusion

- Surestimation des HAP avec le mécanisme final (14 espèces & 18 réactions)
- Utilisation du modèle à 140 espèces et 444 réactions pour la suite de la modélisation et de l'optimisation

05

Optimisation de la « recette »

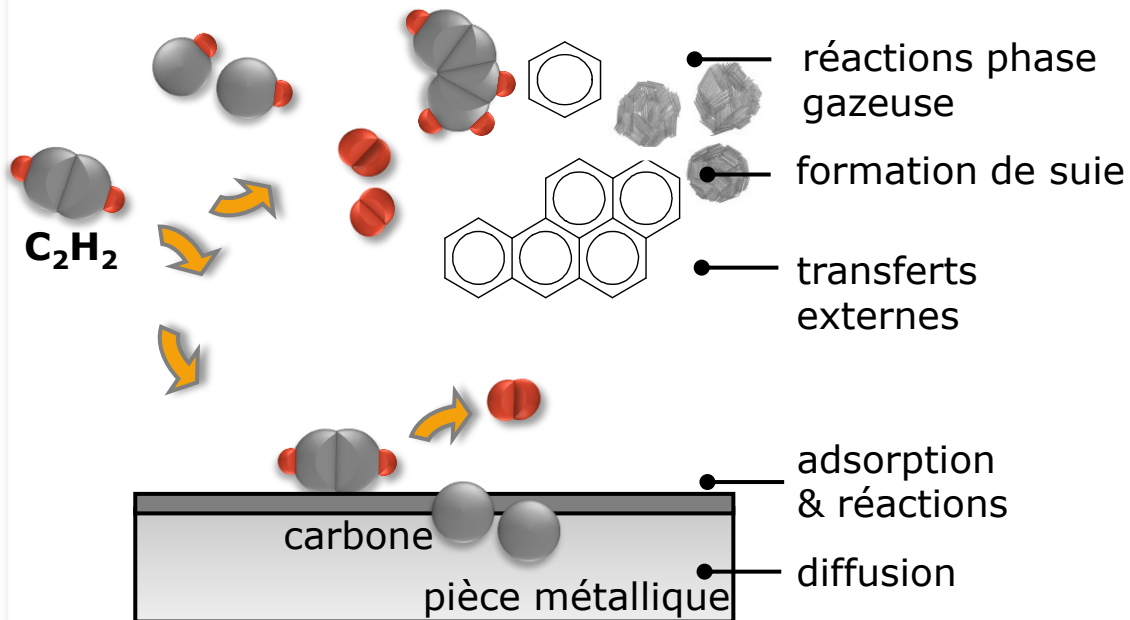
Modélisation de la **cémentation**
Optimisation du protocole



Modélisation de la cémentation

Phase gazeuse, phase solide, procédé cyclique avec phases d'enrichissement (C_2H_2) et de diffusion (N_2)

Enrichissement



Diffusion



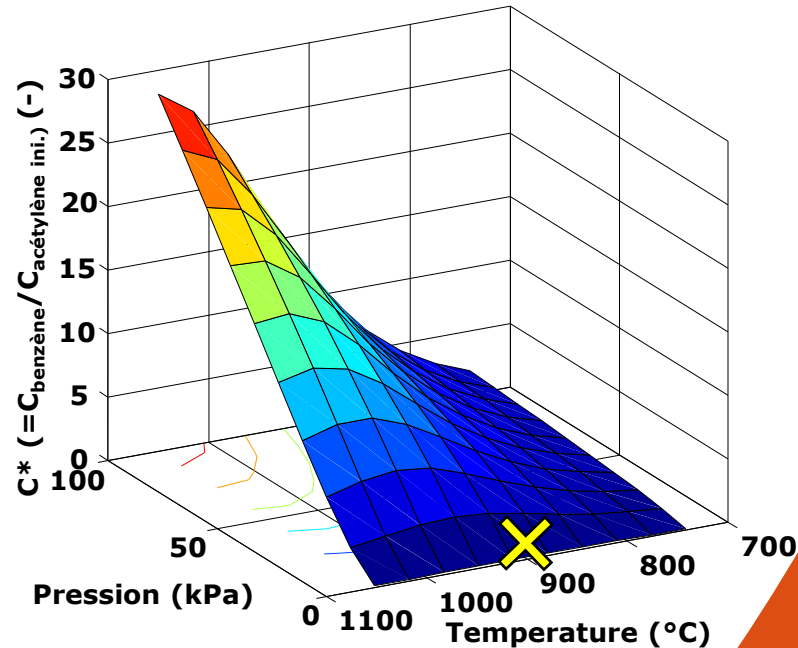
Simulation de la phase gazeuse

- Evolution de la concentration en **benzène** (marqueur) en fonction de $T(^{\circ}\text{C})$ et $P(\text{kPa})$
- Préférable de travailler à basse pression et basse température
- Les diagrammes de phase de l'acier pour la cémentation demandent de travailler entre 800°C et 1000°C



Moins de
benzène, pour
moins de HAP

Température ↘
Pression ↘



Optimisation de la recette

Un objectif, des variables de décision et des contraintes pour certifier la qualité des pièces
Un choix : la surface n'est pas saturée en carbone, jamais

Objectif

$$\text{Min}\{m_{\text{HAP}} + m_{\text{suies}}\}$$

...sur l'ensemble de la cémentation

Variables de décision

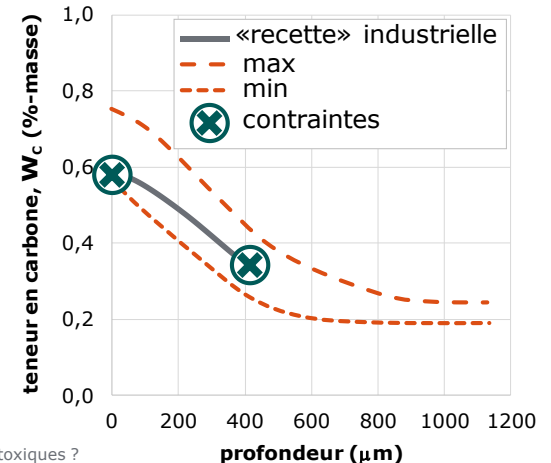
- température, pression
- nombre de cycles *enrichissement diffusion*
- durée des étapes
- débit d'acétylène

Contraintes

$$\omega_c^{\text{surf}}(t_{\text{final}}) = 0,6 \%$$

$$\omega_c^{0,4 \text{ mm}}(t_{\text{final}}) = 0,34 \%$$

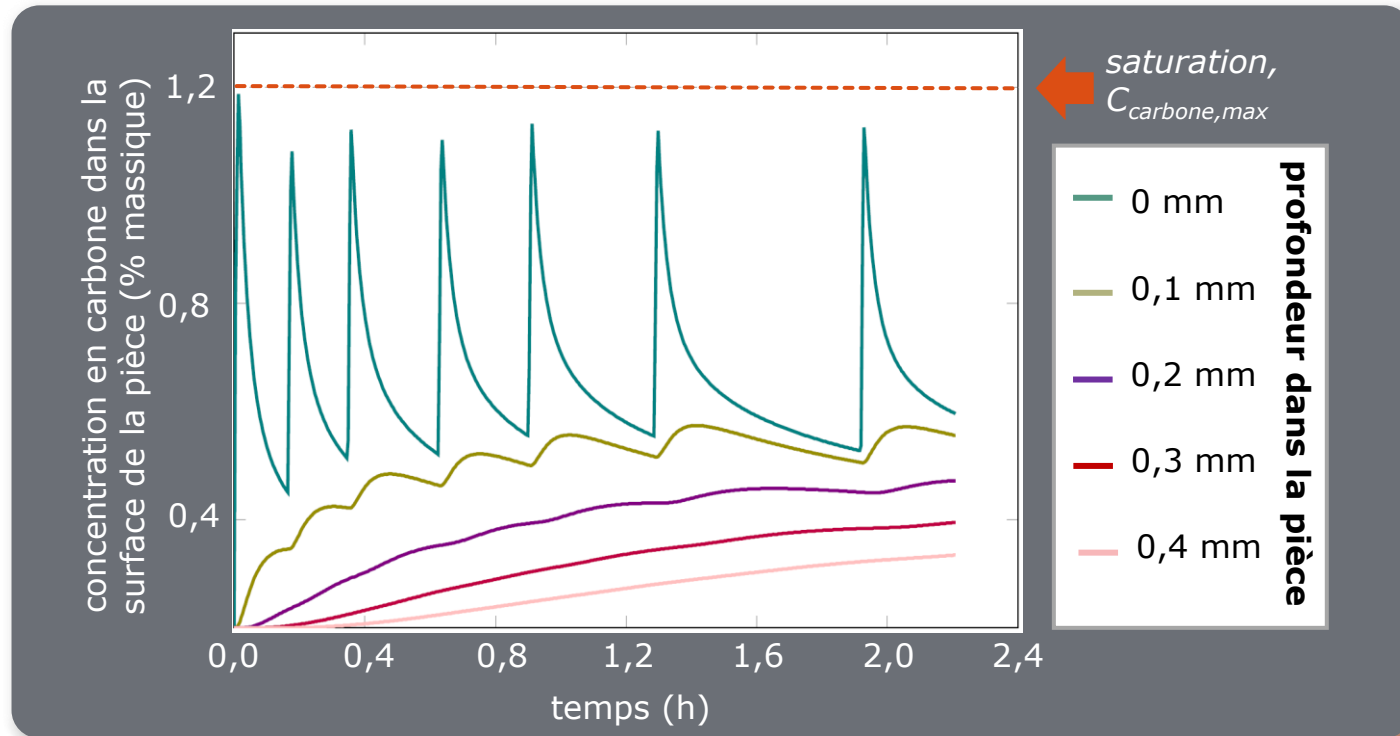
$$\omega_c^{\text{surf}}(t) \leq 1,2 \%, t_0 \leq t \leq t_f$$



Nouvelle « recette »

La surface de la pièce n'est jamais saturée en carbone

Les durées des phases d'enrichissement et de diffusion changent au cours de la cémentation



06

Validation sur pilote industriel

« de la chimie à la mécanique »



Méthodologie

Utilisation d'un four de cémentation basse pression

Six cémentations de lots de 20 engrenages (23MnCrMo5) de 1,5 kg chacun



Expériences

- Six cémentations
- 880°C, 8 kPa
- « Recette » industrielle (avec 20 pièces)
- Protocole optimisé (avec 20 pièces)



Analyses chimiques

- **HAP & COV**
- Utilisation du piège à azote liquide de labo.
- Quantification par :
GCMS¹



Analyses mécaniques

- Pièces et éprouvettes en acier
- Test de dureté de Vickers
- Mesure du profil de carbone par microsonde de Castaing (EPMA²)

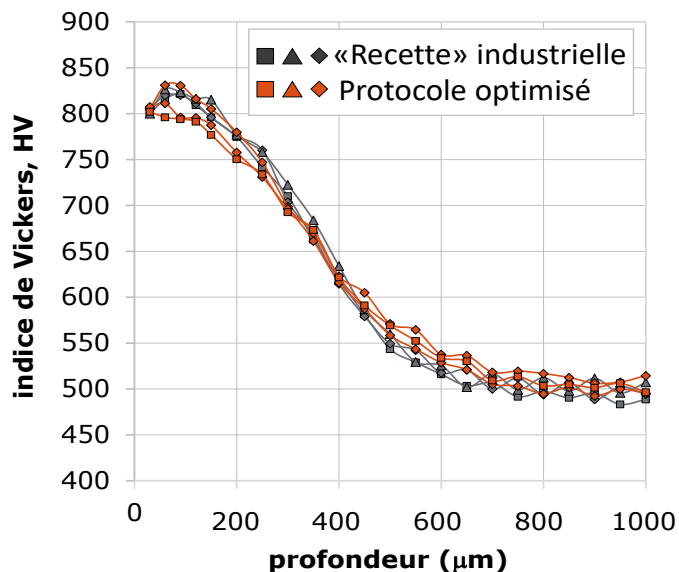
¹GCMS : Chromatographie en phase gazeuse, spectrométrie de masse

²EPMA : Electron Probe Micro Analysis (microsonde de Castaing)

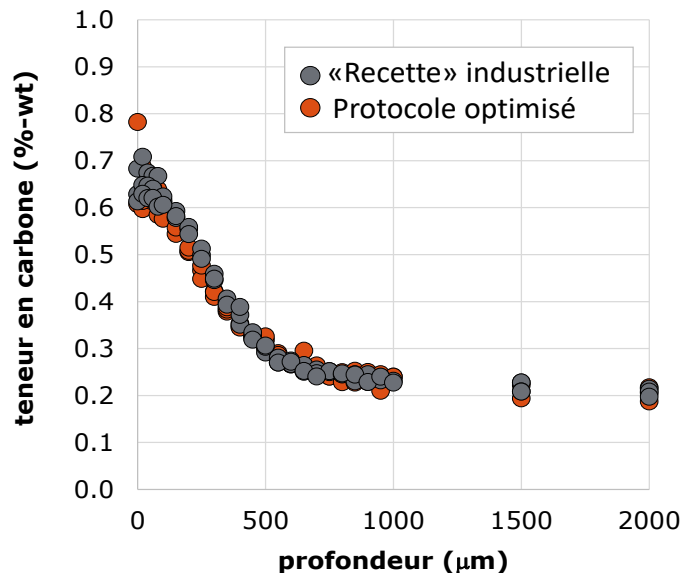
Indice de Vickers et **profil de carbone**

Analyses des pièces cémentées : indice de Vickers (HV 300g) pour la dureté et profil de carbone par EPMA*

Dureté « identique » ☺



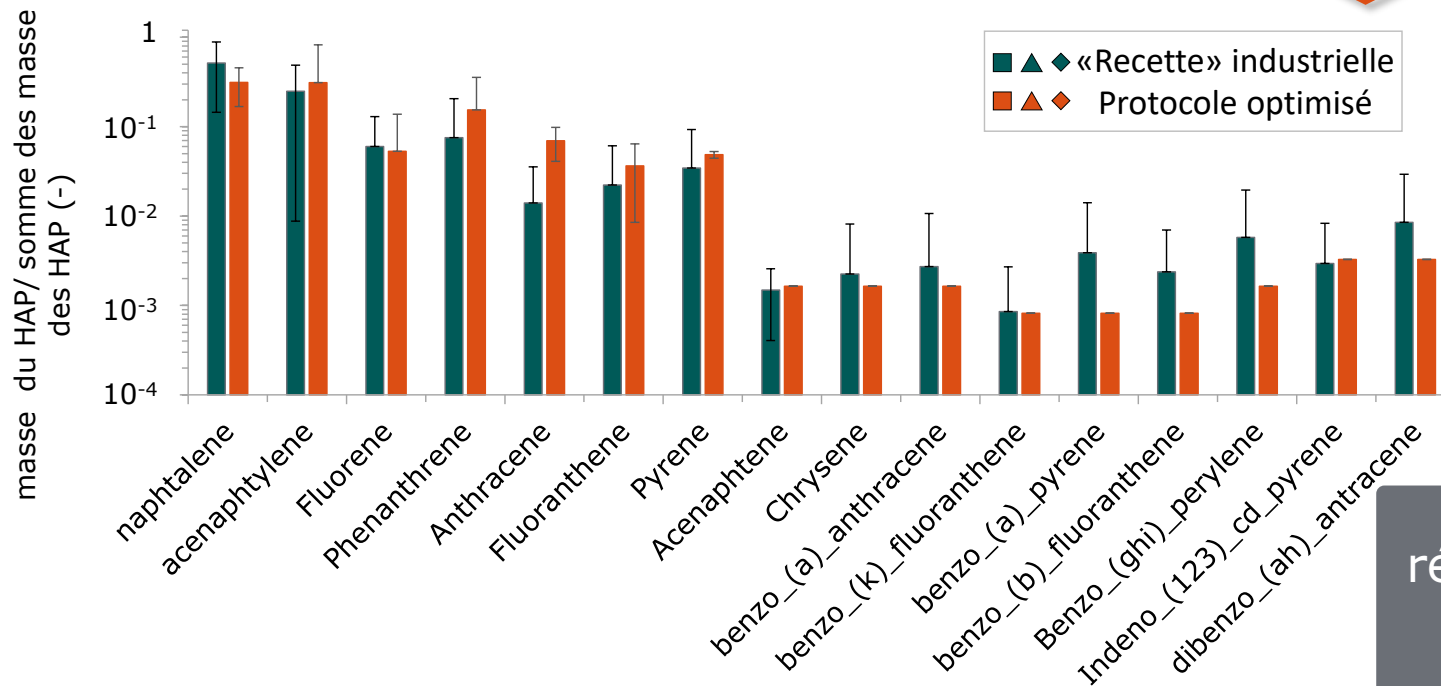
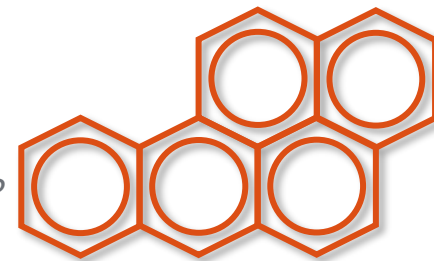
Profil de carbone ☺



Formation des HAP

Analyse des HAP durant six cémentations par GCMS

Réduction globale de la formation des HAP, notamment les gros, comme le B[a]P



réduction des gros HAP



Conclusion

« plus propre, plus sûr »

Réduction du risque à la « source »

Nécessité de tester davantage de situations, de « recettes » industrielles pour intégrer la modélisation et l'optimisation au sein des protocoles industriels



Conditions industrielles

Profils de carbone ✓
Dureté des pièces ✓
Durée process ↗ (+33%)

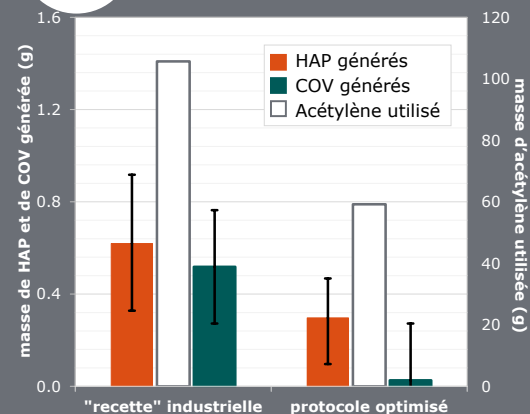
Moins de carbone
→ Intérieur du four
(casing) **préservé**



Prévention collective

Réduction des HAP & des COV ✓
Consommation réduite en acétylène ✓

Procédé « plus propre plus sûr » ✓



HAP ↘ -30%
B(a)P ↘ -88%
COV ↘ -95%
Acétylène ↘ -44%

Perspectives

s'approprier la méthodologie

Objectifs

Que les industriels s'approprient la méthodologie
Qu'ils optimisent leur « recette » avec le modèle proposé

Accompagnement

Présence de l'INRS
Savoir-faire des universitaires
Aide à la simulation et à la validation expérimentale



Pour en savoir plus

Thèses

- T1. Tsilla Bensabath, 2017, « Approche préventive pour une réduction des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans les fours à pyrolyse – Application à la cémentation gazeuse à basse pression ». Université de Lorraine
- T2. Fatima Matmoros Marin, 2022, « Modélisation et optimisation de la cémentation gazeuse basse pression ». Université de Lorraine

Publications internationales

- P1. Champmartin, C. et al., 2017, Maintenance of Low-Pressure Carburising Furnaces: A Source of PAH Exposure. Annals of Work Exposures and Health, 1–12. DOI: 10.1093/annweh/wxw024.
- P2. Bensabath, T. et al., 2019. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) formation during acetylene pyrolysis in tubular reactor under low pressure carburizing conditions. Chemical Engineering Science. Vol. 202, 20, 84-94. DOI.org/10.1016/j.ces.2019.03.030
- P3. Bensabath, T., et al., 2019. Acetylene pyrolysis in a jet-stirred-reactor for low pressure gas carburizing process - Experiments, kinetic modeling and mixing intensity investigations by CFD simulation. Chemical Engineering Science. Vol. 195, 810–819. DOI: 10.1016/j.ces.2018.10.028
- P4. Bensabath, T. et al., 2019 Study of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon formation during acetylene pyrolysis in a jet-stirred-reactor and numerical investigations of Residence Time Distribution using CFD simulations. Chemical Engineering Journal. Vol. 377, 120244, 120244. DOI: 10.1016/j.cej.2018.10.181
- P5. Matamoros Marin et al., 2023. Optimal operation of an industrial low pressure carburizing furnace. Computer Aided Chemical Engineering, 2023, 52, pp. 625–630. DOI.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50099
- P6. Matamoros Marin et al., 2020. Modelling and Simulation of Low Pressure Carburizing Furnaces. Computer Aided Chemical Engineering, Vol. 48, 361-366. DOI.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50061-6

Publications nationales

- P1. Champmartin, C. et coll., 2015, Traitements thermiques : recommandations pour limiter l'exposition aux HAP. HST n°239, 2015
- P2. Monnier, H. et coll., 2024, Réduction du risque HAP pour les procédés de traitement thermique : méthodologie pour un pilotage de la cémentation gazeuse basse pression. HST n°276, 2024
- P3. Matamoros Marin, et coll., 2022. Traitements thermiques et thermochimiques - Risque HAP en cémentation gazeuse basse pression : évaluation des expositions, modélisation et optimisation du procédé. Traitements & Matériaux 475 Mars-Avril 2022 | 39



Merci

Fatima Matamoros, Tsilla Bensabath, Nathalie Monnier, Roda Bounaceur, Pierre-Alexandre Glaude, Abderazak Latifi (*CNRS, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine*).

Duy Le, Catherine Champmartin, Fanny Jeandel, Mathieu Marchal, Juliette Kunz-Iffli (*INRS*)

Maria Rita Chini, Julien Valette, David Maréchal IRT M2P (*Institut de Recherche Technologique Matériaux Métallurgie et Procédés*)

© INRS - Hubert Monnier



Merci de votre attention



Notre métier,
rendre le vôtre plus sûr

www.inrs.fr