

AEMP: Bereit sein für Veränderungen

17.–18. Juni 2026 im Kongresshaus Biel/Bienne

SRDM: adapter pour adopter

17–18 juin 2026 au Palais des Congrès à Biel/Bienne

La détermination expérimentale et numérique du volume de vapeur dans des creux longs et fins

grâce à la spectroscopie d'absorption et la mécanique des fluides numérique (MFN)

Simon Pletzer | Simulation & Consulting Pletzer | TU Graz

Contenu

I. Contexte

II. Méthodes

- La spectroscopie d'absorption
- La mécanique des fluides numériques (MFN)

III. Pénétration de vapeur dans des tubes métalliques à paroi mince

- Géométrie – tube
- Résultats – cycle de stérilisation traditionnel à 134 °C
- Résultats – cycle de stérilisation adapté à 134 °C

IV. Pénétration de vapeur dans des creux de DMx

- Géométrie – dispositif médical (DM) simplifié
- Résultats

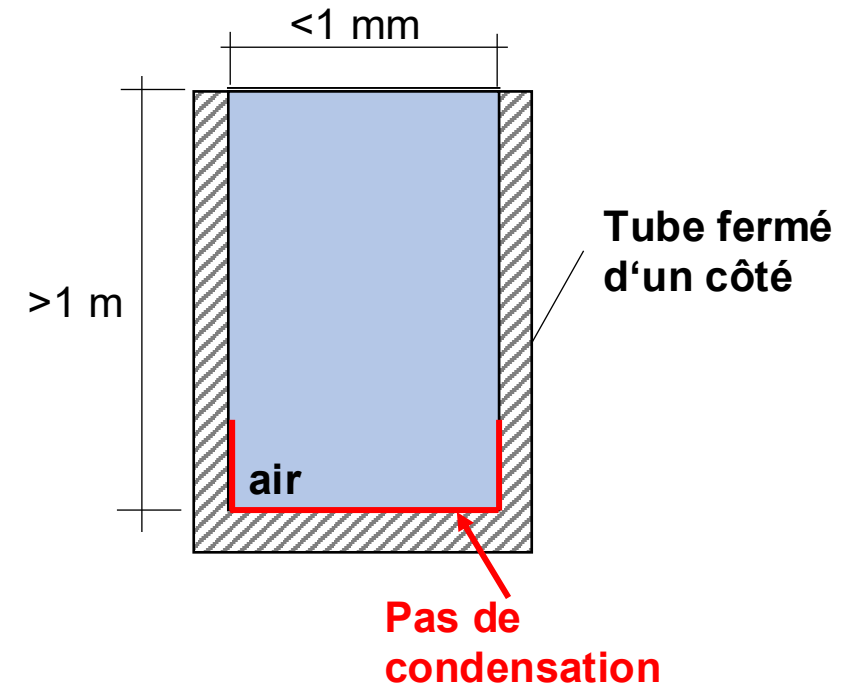
IV. Conclusions

Défis de la stérilisation à la vapeur

- **La pénétration de vapeur dans des creux n'est pas encore comprise**
 - Influence de la géométrie et du matériel du DM
 - Influence de la condensation et de la réévaporation sur la pénétration
 - Influence du cycle de stérilisation (courbe de pression)

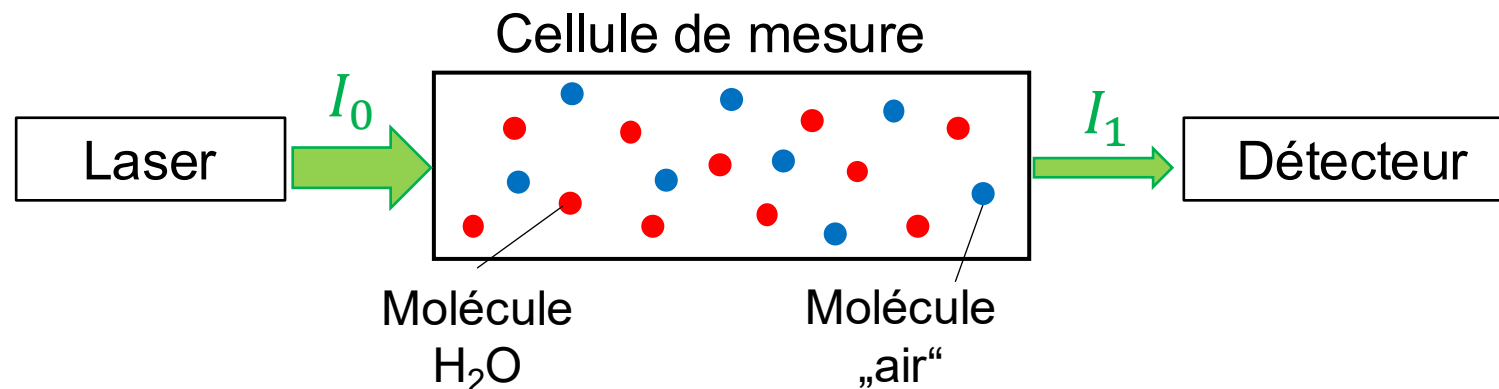
- **La surveillance se base actuellement sur IC/IB**
 - Information disponible qu'à la fin du cycle
 - Pas de données quantitatives précises disponibles
 - → **Nécessité d'une nouvelle méthode**

- **Objectif : améliorer la compréhension générale**
 - Optimiser les cycles de stérilisation
 - Soutenir les fabricants lors du développement des DMx



La spectroscopie d'absorption

- **La vapeur d'eau interagit avec la lumière à certaines longueurs d'onde**
 - il se produit une absorption → l'intensité I est réduite ($I_1 < I_0$)
- **Une diode laser ajustable a été utilisée comme source lumineuse**
 - à une longueur d'onde de 1364 nm
 - La longueur d'onde est réglée (modifiée) par le courant et la température
- **Un photodétecteur mesure l'intensité lumineuse réduite I_1**



Mécanique des fluides numériques (MFN)

C'est quoi ?

- **Outil performant pour simuler les fluides** (liquides & gaz) dans des **applications réelles**
 - Aérodynamique de véhicules, processus de combustion, transfert thermique, etc.
 - Pénétration de vapeur dans des creux, y compris les effets de condensation et d'évaporation

Pourquoi nous utilisons la MFN en plus de nos expériences



Expérience

- Livre données réelles
- MAIS uniquement pour des points isolés

MFN

- Information pour tout le périmètre
- Possible d'examiner des géométries complexes

Combinées : données expérimentales assurent que MFN est fiable

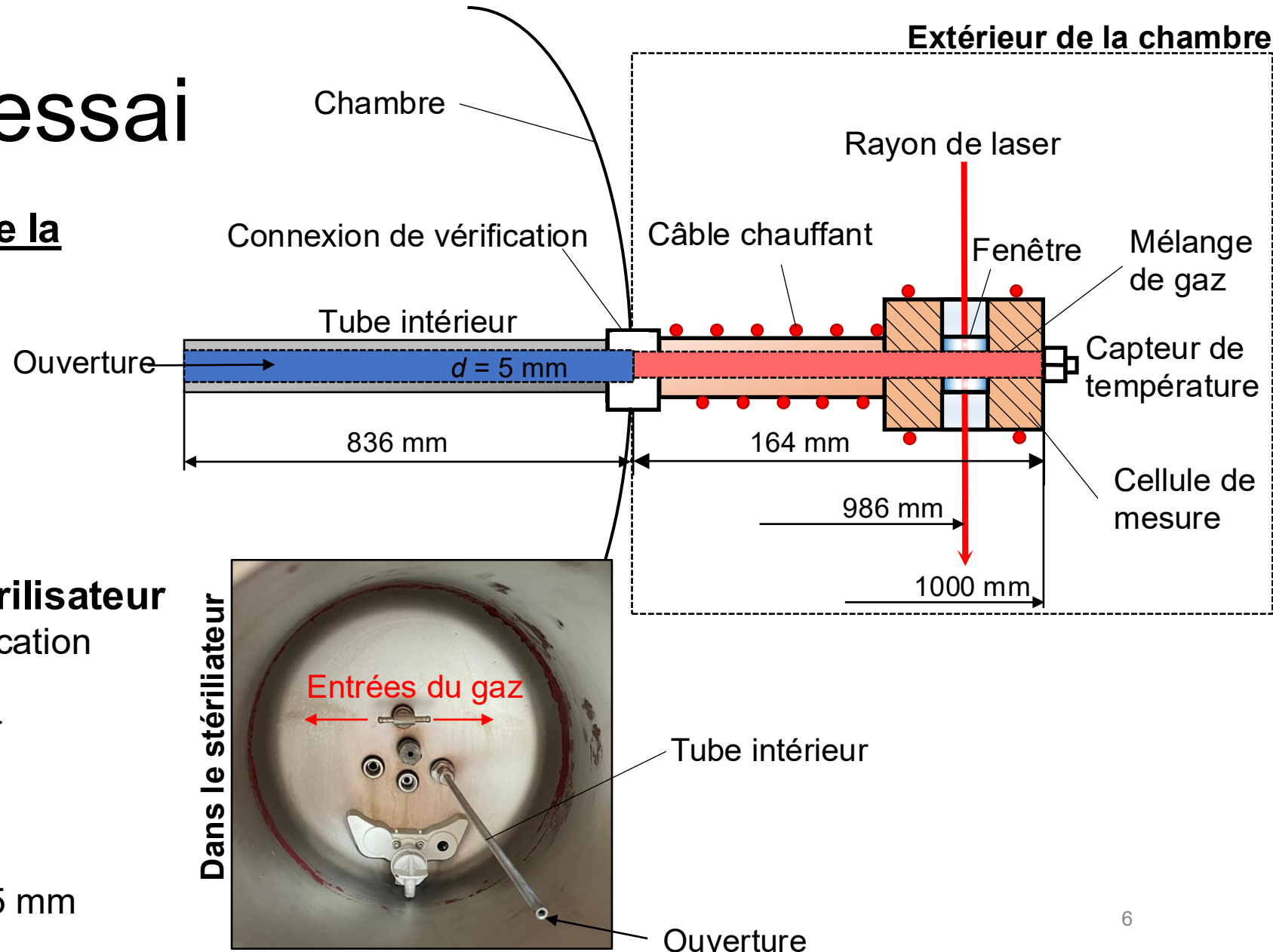
Conception d'essai

Construction visuelle hors de la chambre

- Chauffé à 140 °C
(pour éviter la condensation)
- „Tube“ chauffé à l'extérieur
 - Aluminium
 - Longueur 164 mm
 - Diamètre intérieur 4 mm
- **Montable sur chaque stérilisateur**
grâce à la connexion de vérification

Au total : tube d'un mètre

- Tube non chauffé à l'intérieur
 - Acier inoxydable
 - Longueur 836 mm
 - Diamètre intérieur 5 mm
 - Épaisseur de la paroi 0.5 mm



Résultats : cycle d'origine 134 °C

Comparaison au début du plateau de stérilisation

- EXP : 0,43
- MFN : 0,42

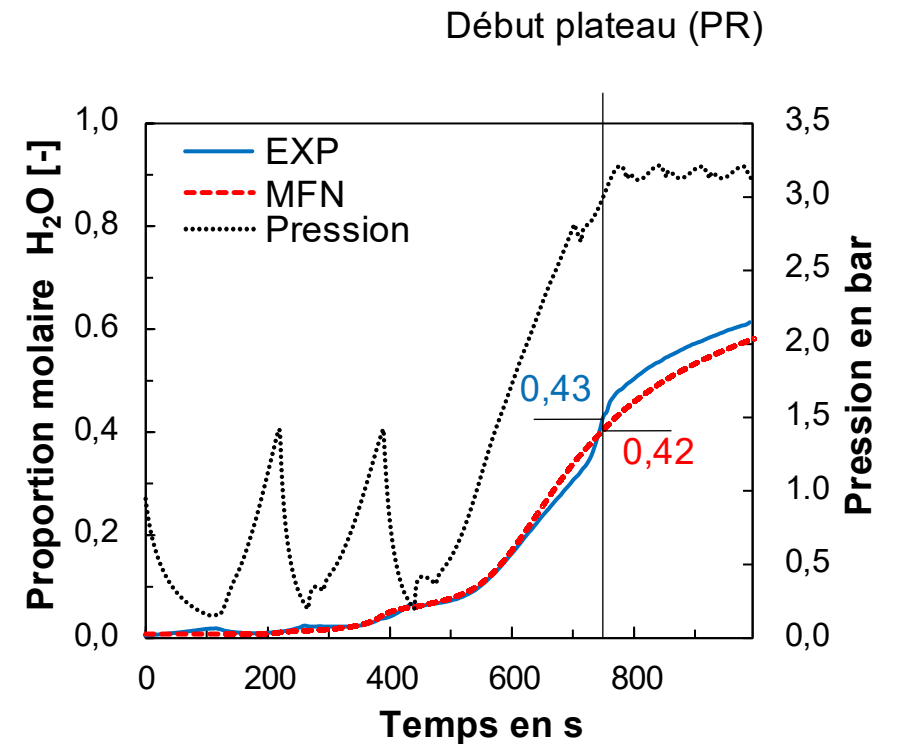
Concordance excellente entre expérience et simulation

- Sur toute la durée

Valeurs basses comparables aussi selon :

- “*Steam Penetration in Penetration Channels and Helix Shaked Profess Challenge Devices*”, van Doornmalen et al. (2015)
- Autre stérilisateur et cycle

Les stérilisateurs actuellement disponibles sur le marché sont conformes aux normes de stérilisation applicables (EN 13060, ST 55 et EN 285), qui définissent les conditions validées pour l'inactivation microbienne



Au point de mesure
(profondeur de 986 mm)

Résultats

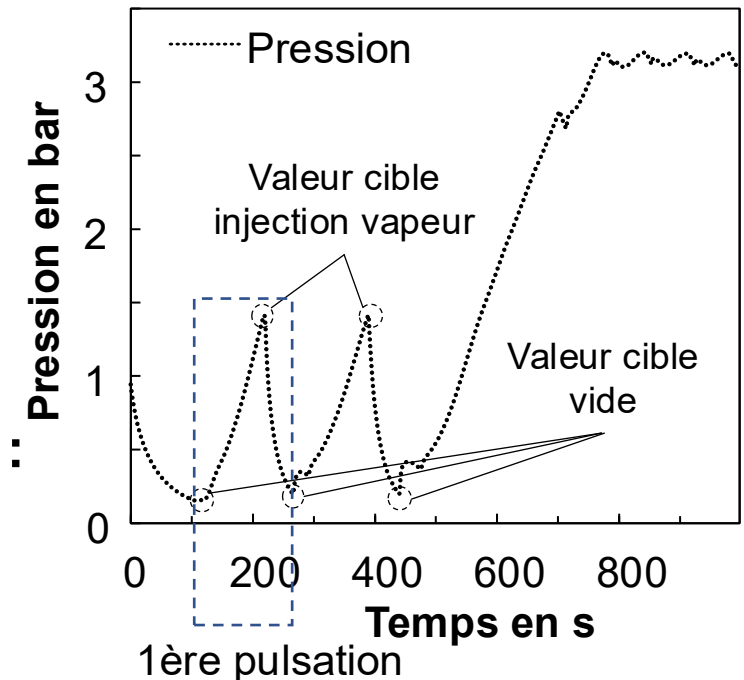
Amélioration de la pénétration vapeur :

- Approches actuelles :

- **Réduire les valeurs cibles du vide :**
- actuellement 0,18 bar → p.ex. 0,1 bar
- **Augmenter le nombre de pulsations :**
- actuellement 2 → p.ex. 3
- **Augmenter les valeurs cibles d'injection de vapeur :**
- actuellement 1,4 bar → p.ex. 2 bar

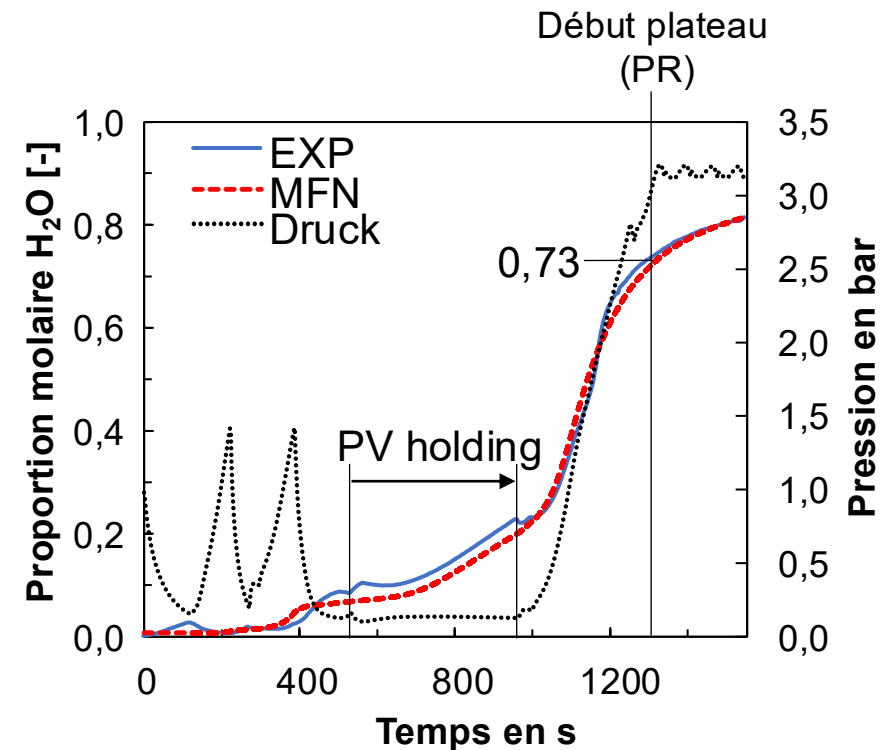
- Nouvelle approche :

- Utiliser les effets de diffusion de masse
- Moins de pression, plus d'effet
- Comparable à la stérilisation VH_2O_2



Résultats : cycle 134 °C adapté

- **Nouvelle phase plateau (PV holding) :**
 - Pression moyenne de 0,13 bar pendant 400 s
- **Mesure (EXP) :** (début PR)
 - Cycle adapté : 0,73 ↗ +70%
 - Cycle d'origine : 0,43
- **MFN :** (début PR)
 - Cycle adapté : 0,73 ↗ +74%
 - Cycle d'origine : 0,42



Au point de mesure
(profondeur de 986 mm)

Conclusion : tubes métalliques à paroi fine

Teneur en vapeur d'eau mesurée au bout d'un creux de 1m avec succès

- Haute résolution temporelle (ce qui se passe quand)
- Saisie quantitative

MFN concorde parfaitement avec les données expérimentales

- Cycles alternatifs peuvent être testés virtuellement

Pénétration de vapeur s'améliore par plateaux de vide

- Proportion molaire vapeur augmenté de 0,43 à 0,73
- Presque pas besoin d'eau ou d'énergie supplémentaire
- Concession : temps de cycle plus long → "Mode Eco"

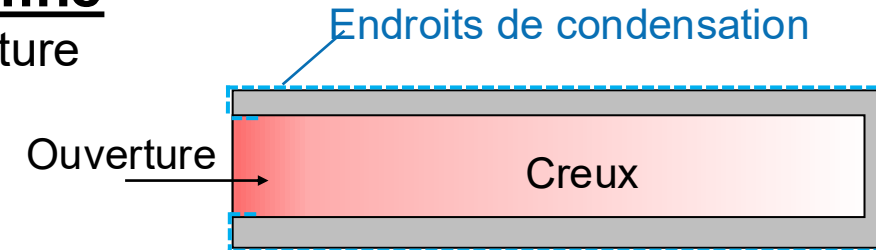
Question ouverte : Combien de vapeur d'eau nécessaires dans les creux ?

- Mission future : combinaison des méthodes présentées avec IB (indicateur biologique) en utilisant les stérilisateurs certifiés sur le marché.

Creux complexes

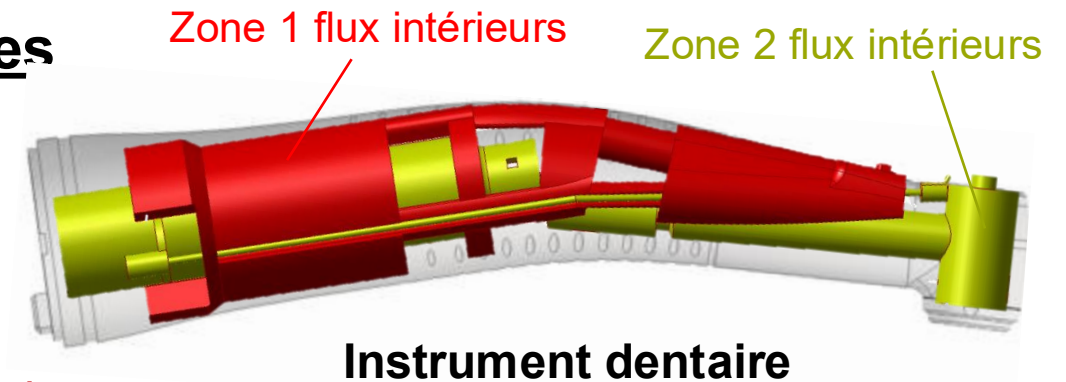
Pénétration de vapeur dans tubes métalliques à paroi fine

- **Condensation essentiellement à l'extérieur** et légère vers l'ouverture (pendant la phase de pré-stérilisation)
- **Surfaces internes chauffent rapidement** car parois fines (et conductibilité haute de la chaleur)
- **Pénétration de vapeur à peine** influencée par le **changement de phases**



Pénétration de vapeur dans des creux complexes

- **Nombreuses surfaces internes** à atteindre rapidement
- **Parois externes** chauffent rapidement
- **Parois internes** restent plus froides jusqu'à la pénétration de la vapeur
- **Pénétration de vapeur décisive** pour tout chauffer
- **GNC + condensation/reévaporation** influencent fortement la pénétration



Conception de l'instrument test

DMx réels pas idoines pour premiers tests :

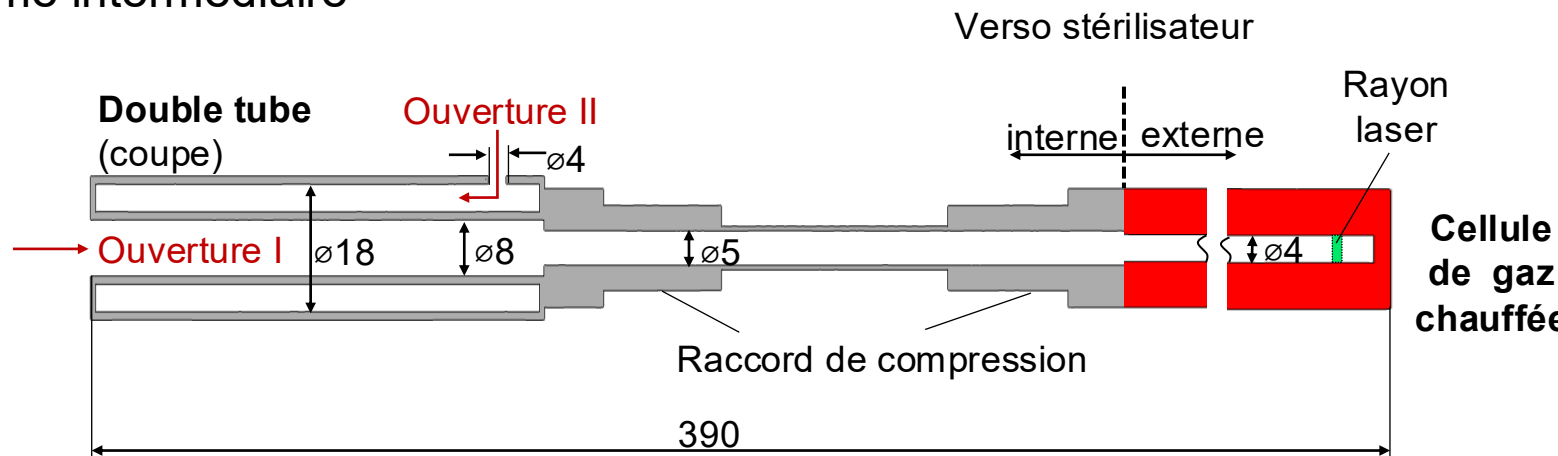
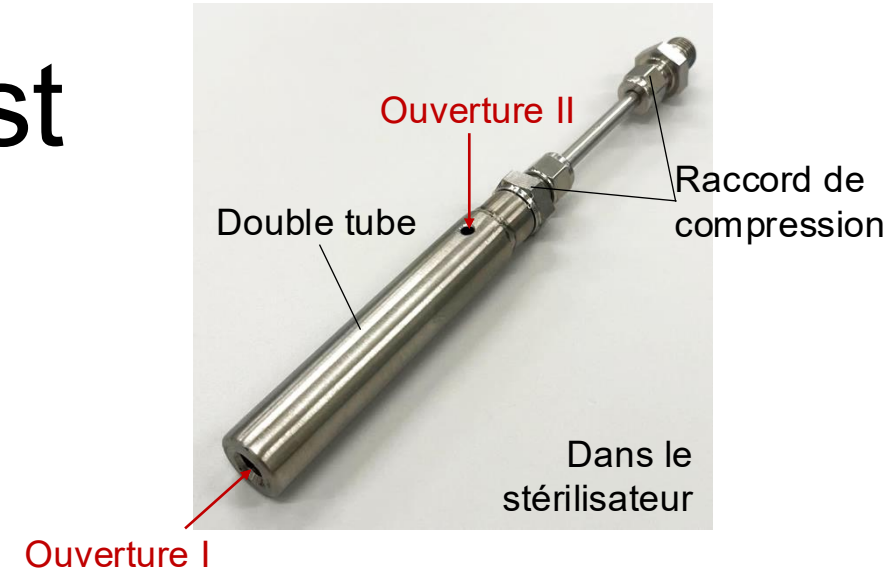
- Difficile de mesurer correctement la pénétration de vapeur
- Alésages influenceraient la pénétration
- Structures internes trop complexes (p.ex. roulements)

Système à double tube :

- Ouverture I : parcours de pénétration principal
- Ouverture II : seul accès au volume intermédiaire

Système de mesure externe :

- Pareil qu'avant
- Profondeur totale : 390 mm



Résultats

Résultats : pénétration de vapeur

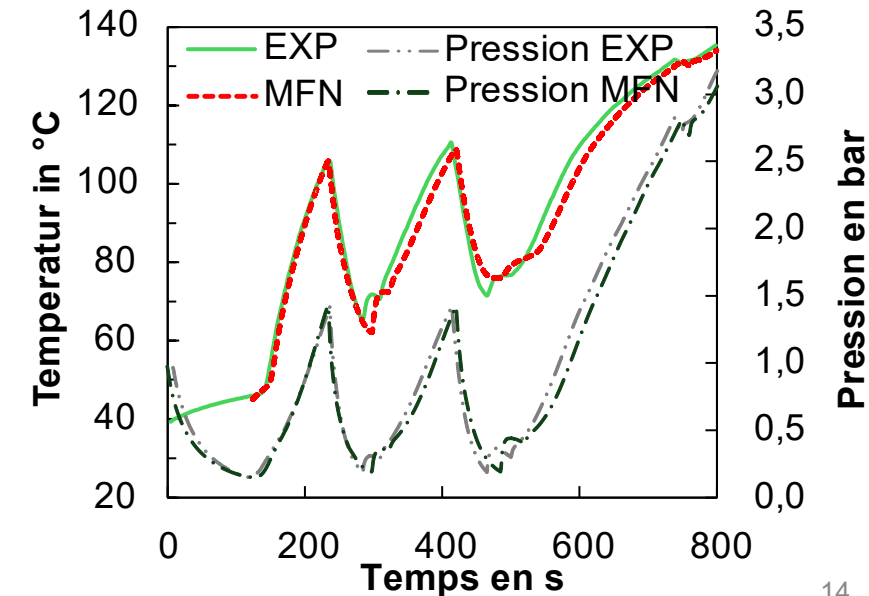
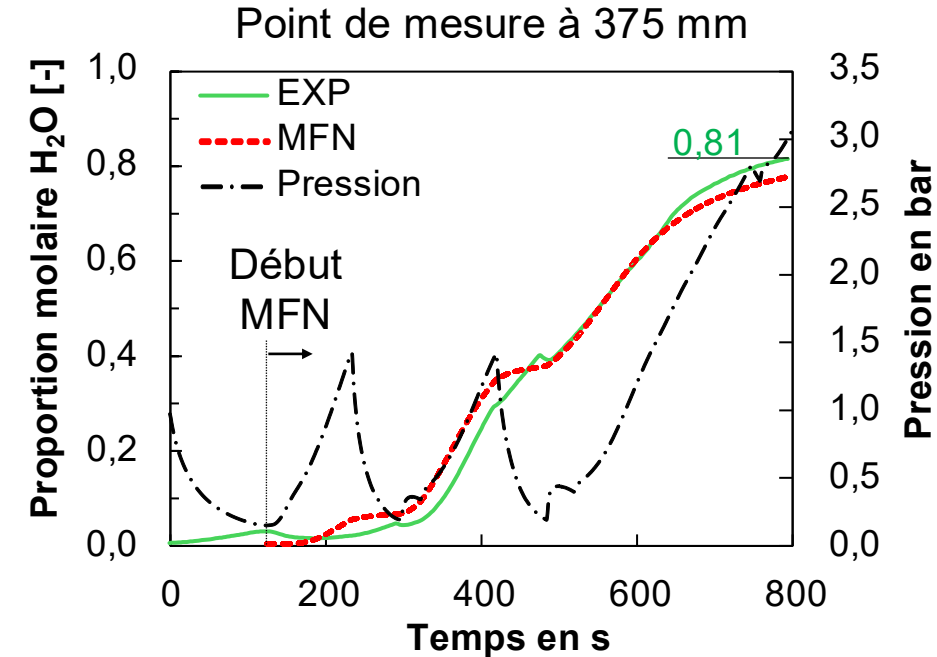
- Au début du plateau de stérilisation la proportion vapeur est de **0,81**.
- **Excellente concordance** entre **MFN** et **mesure** sur toute la durée
- Début du plateau de stérilisation (800 s) : différence de proportion molaire H₂O **uniquement** de **0,03**

Résultats : température

- **Mesure pendant cycle séparé**
 - À l'extérieur du double tube
- **Excellente concordance**
 - Réchauffement par condensation
 - Refroidissement par évaporation



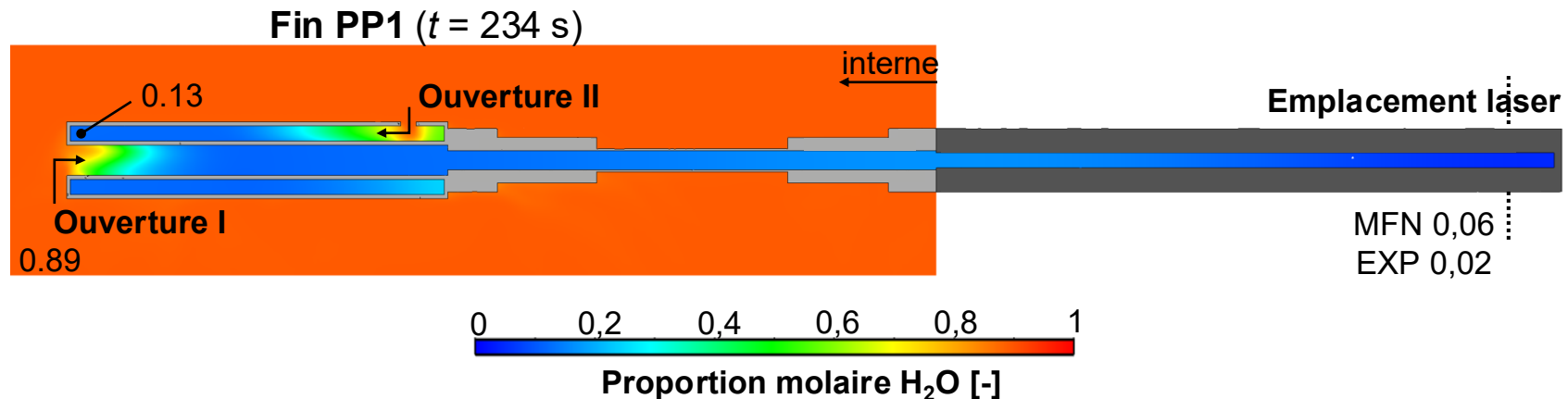
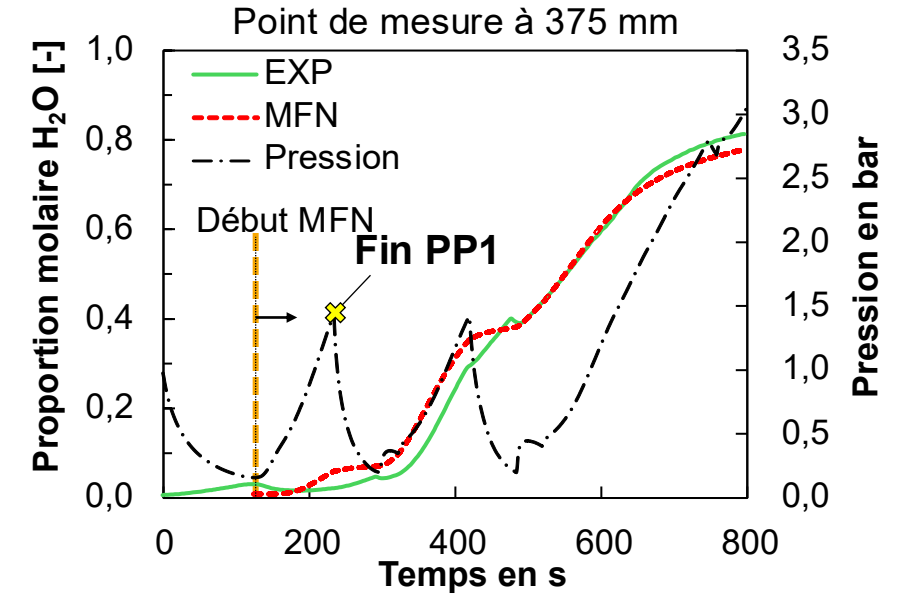
Validation réussie



Résultats : MFN – 1ère montée pression (PP1)

MFN : Fin PP1

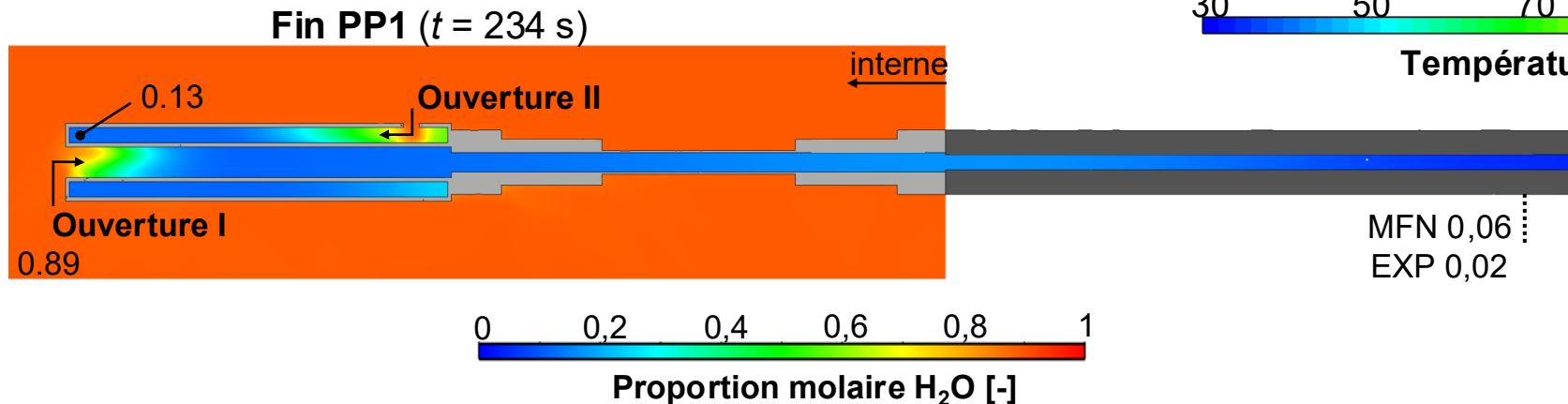
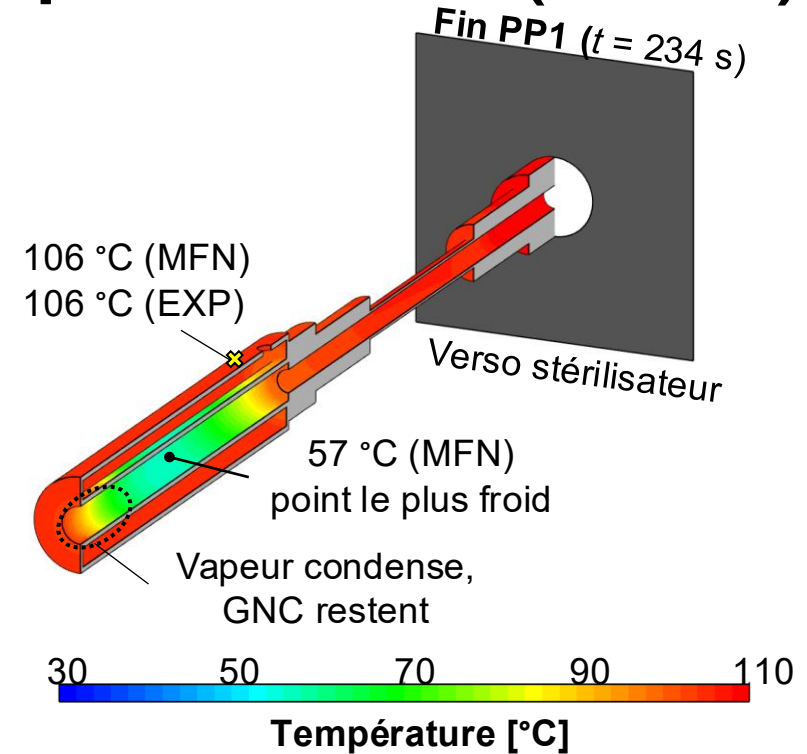
- Presque pas de pénétration de vapeur
- Vapeur condense presque totalement à l'intérieur des 30 à 40 mm
- Malgré que l'atmosphère de la chambre se compose à 89% de vapeur



Résultats : MFN – 1ère montée pression (PP1)

MFN : Fin PP1

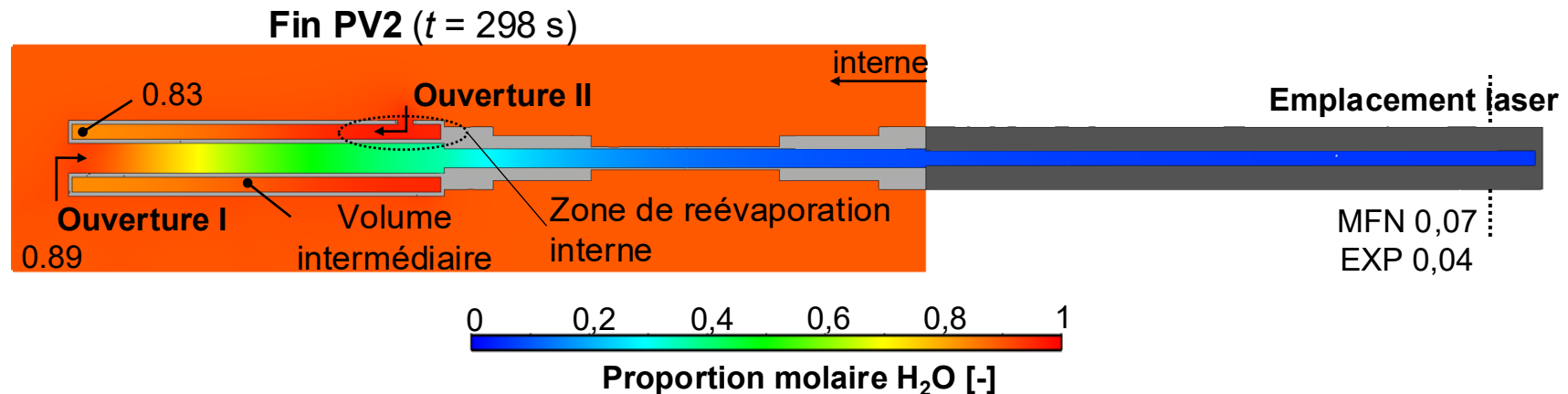
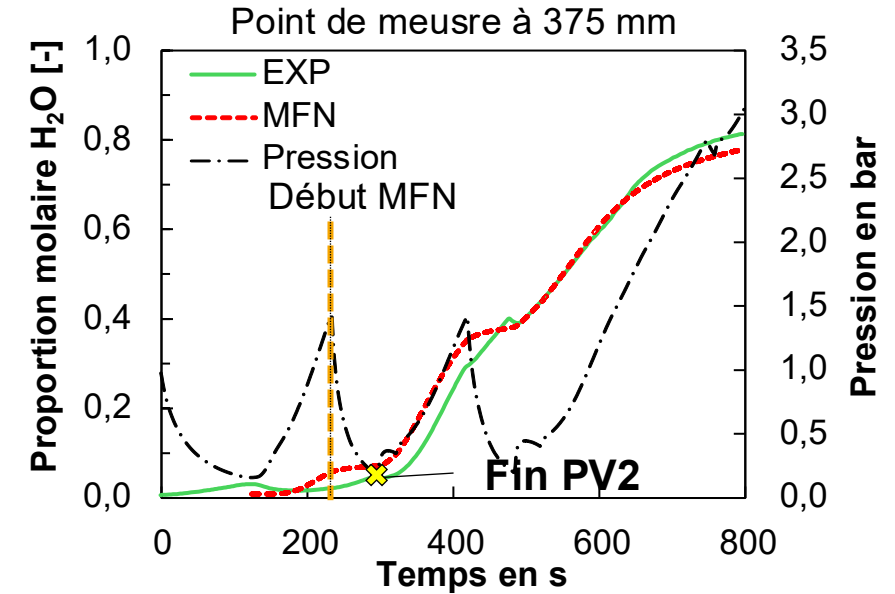
- Presque pas de pénétration de vapeur
- Vapeur condense presque totalement à l'intérieur des 30 à 40 mm
- Malgré que l'atmosphère de la chambre se compose à 89% de vapeur
- Intérieur mal chauffé (point le plus froid : 57 °C)



Résultats : MFN – 2ème phase de vide (PV2)

MFN : fin PV2

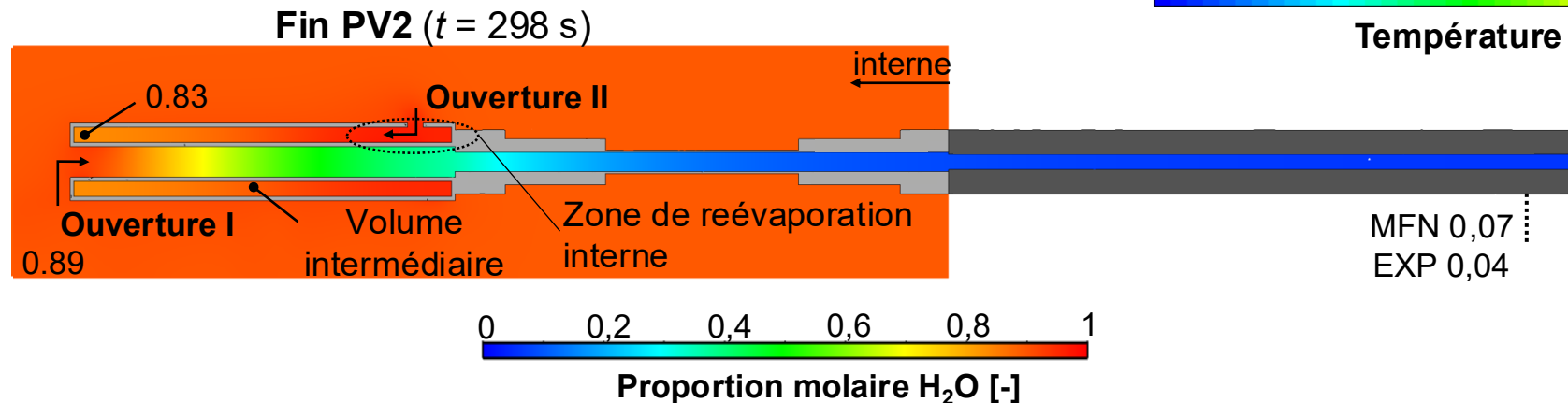
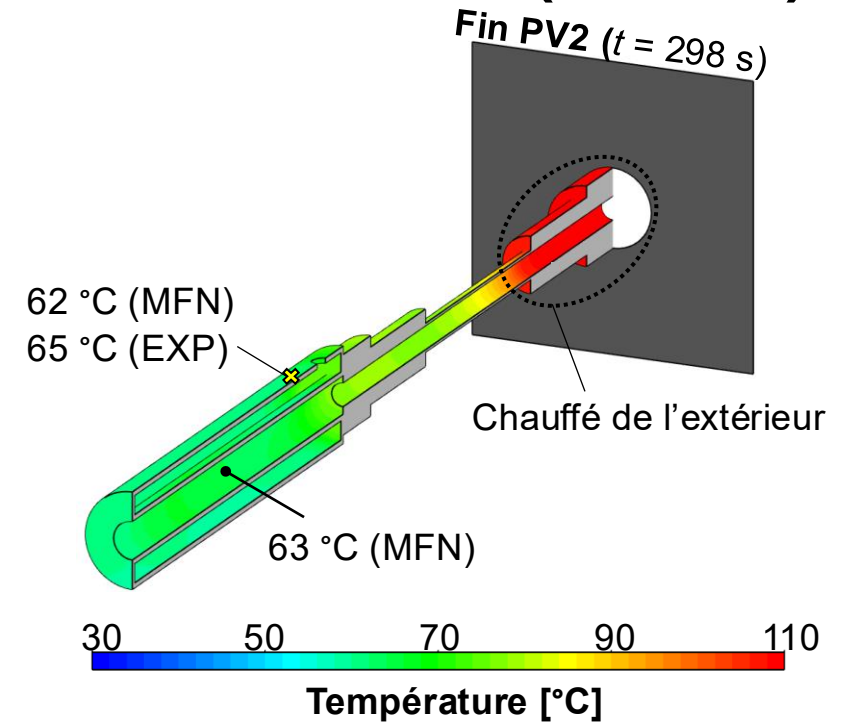
- Augmentation significative de la teneur de vapeur d'eau dans le volume intermédiaire
- 0,13 (fin de PP1) → 0,83 (fin de PV2)
- Résulte de la diffusion de masse et de la réévaporation proche de l'ouverture II



Résultats : MFN – 2ème phase de vide (PV2)

MFN : fin PV2

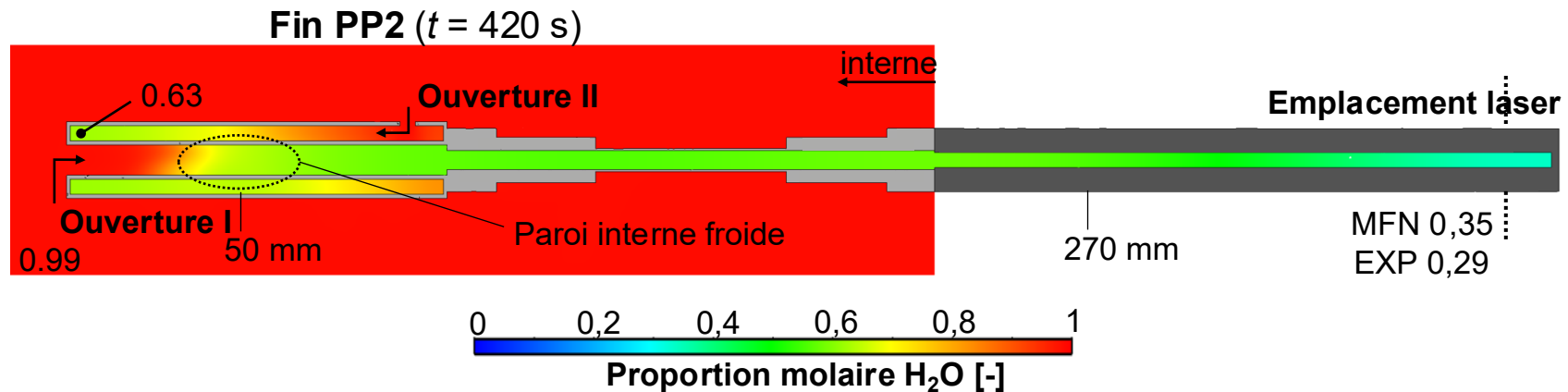
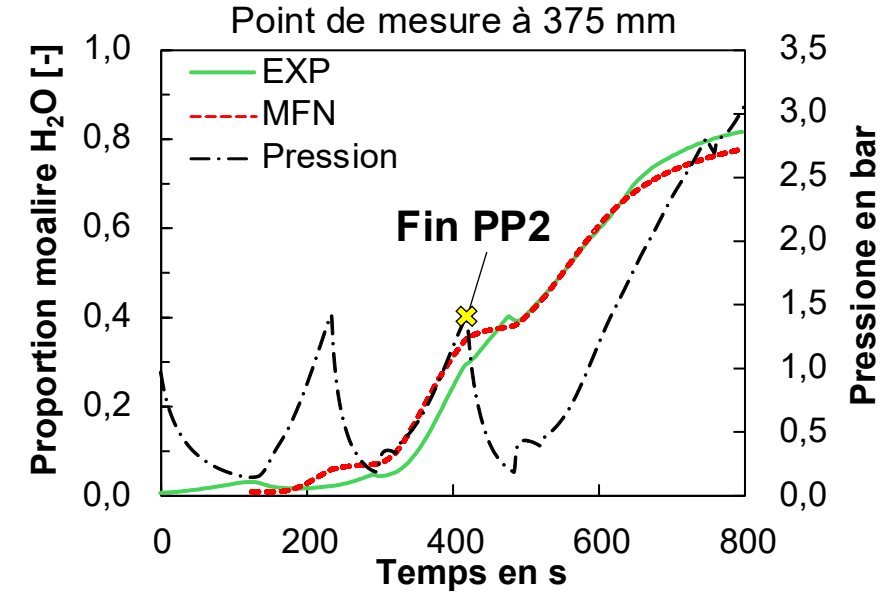
- Augmentation significative de la teneur de vapeur d'eau dans le volume intermédiaire
- 0,13 (fin de PP1) → 0,83 (fin de PV2)
- Résulte de la diffusion de masse et de la re évaporation proche de l'ouverture II
- Double tube refroidit à env. 63 °C



Résultats : MFN – 2ème montée pression (PP2)

MFN : Fin PP2

- **Paroi interne froide agit comme „filtre“ involontaire**
 - La teneur en vapeur se situe entre 50 mm et 270 mm à env. 0,55
- Causé par de petites quantités de GNC
 - Env. 1 % restent dans la chambre
- **Atteindre le plus rapidement possible 100% de vapeur d'eau !!!**



Conclusion : creux complexes

- **Expérience & MFN : air restante empêche fortement la pénétration de vapeur d'eau**
 - Même avec 99% de vapeur d'eau dans la chambre la pénétration dans le DM est limitée
 - Objectif : atteindre le **plus rapidement** possible **100% de vapeur d'eau** dans la chambre

- **MFN a été validée avec succès par des expériences**
 - Maintenant tests avec DMx réels possibles

- **Questions centrales auxquelles MFN donne réponses :**
 - Où est combien de vapeur d'eau présente ?
 - Quelles sont les emplacements les plus froids ?
 - La charge est-elle parfaitement sèche après le cycle ?

Question ouverte : Combien de vapeur d'eau nécessaire dans les creux ?

- Mission future : combiner les méthodes présentées avec IB en utilisant les stérilisateurs certifiés sur le marché.

Question et discussion

Simon Pletzer

Simulation & Consulting Pletzer

Technische Universität Graz (Institut für Wärmetechnik/institut de génie thermique)

8010 Graz, Autriche

simon@pletzer-consulting.com



Publications peer-reviewed pertinentes :

- **Publication I :** *Steam penetration in long, narrow channels during steam sterilization: A combined study using wavelength modulation spectroscopy and CFD.*
<https://doi.org/10.1002/cite.202200135>
- **Publication II :** *Modeling Steam Penetration into Hollow Devices: Effects of Phase Change and Non-Condensable Gases During Steam Sterilization.*
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124396>