



énergie atomique • énergies alternatives

Modélisation du comportement de la phase dispersée dans les colonnes pulsées

Travail réalisé au laboratoire de génie chimique et d'instrumentation (**LGCI**) de Marcoule en collaboration avec le **LTMF** et le **LEEF** du DM2S de Saclay

Tojonirina RANDRIAMANANTENA
Jean Paul MAGNAUD
Jean DUHAMET
Arnault MONAVON
Benjamin CARITEAU





➤ Contexte

- La colonne pulsée pour le retraitement du combustible nucléaire

➤ Introduction du modèle

- Le modèle de mélange
- Equation de transport de l'aire interfaciale volumique

➤ Mise en oeuvre d'un calcul de colonne pulsée

➤ Résultats et comparaison avec quelques résultats expérimentaux

➤ Conclusion

Contexte : La colonne pulsée et le retraitement du combustible



energie atomique • énergies alternatives



Retraitement du combustible nucléaire

Contexte

- La colonne pulsée
 - Enjeux de la modélisation
- Introduction du modèle
- Mise en œuvre du calcul
- Résultats et comparaison avec l'expérimental
- Conclusion



Dissolution

Solution d'acide nitrique



Animation explicative de l'extraction liquide-liquide



énergie atomique • énergies alternatives

Extraction par solvant : échange de matière entre deux liquides immiscibles

- Une phase aqueuse contenant la matière nucléaire énergétique à récupérer
- Une phase organique contenant une molécule extractante qui est sélectionnée en fonction de son affinité et de sa sélectivité pour le ou les éléments à extraire

➤ Contexte

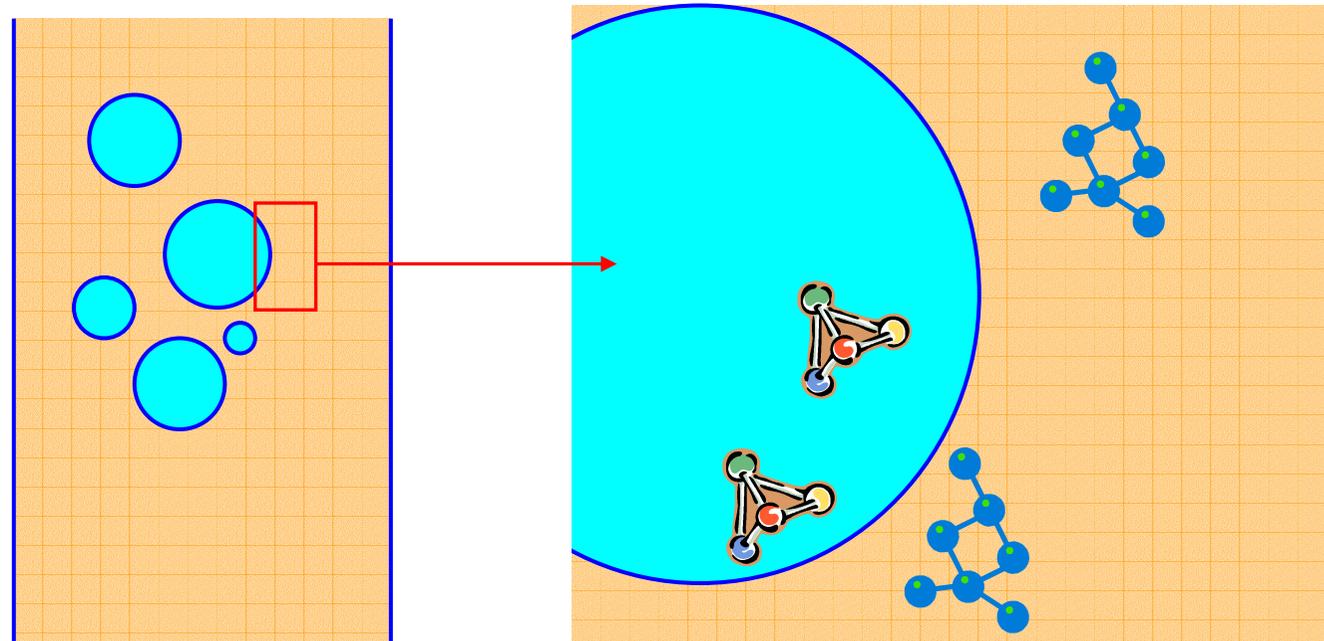
- La colonne pulsée
- Enjeux de la modélisation

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion



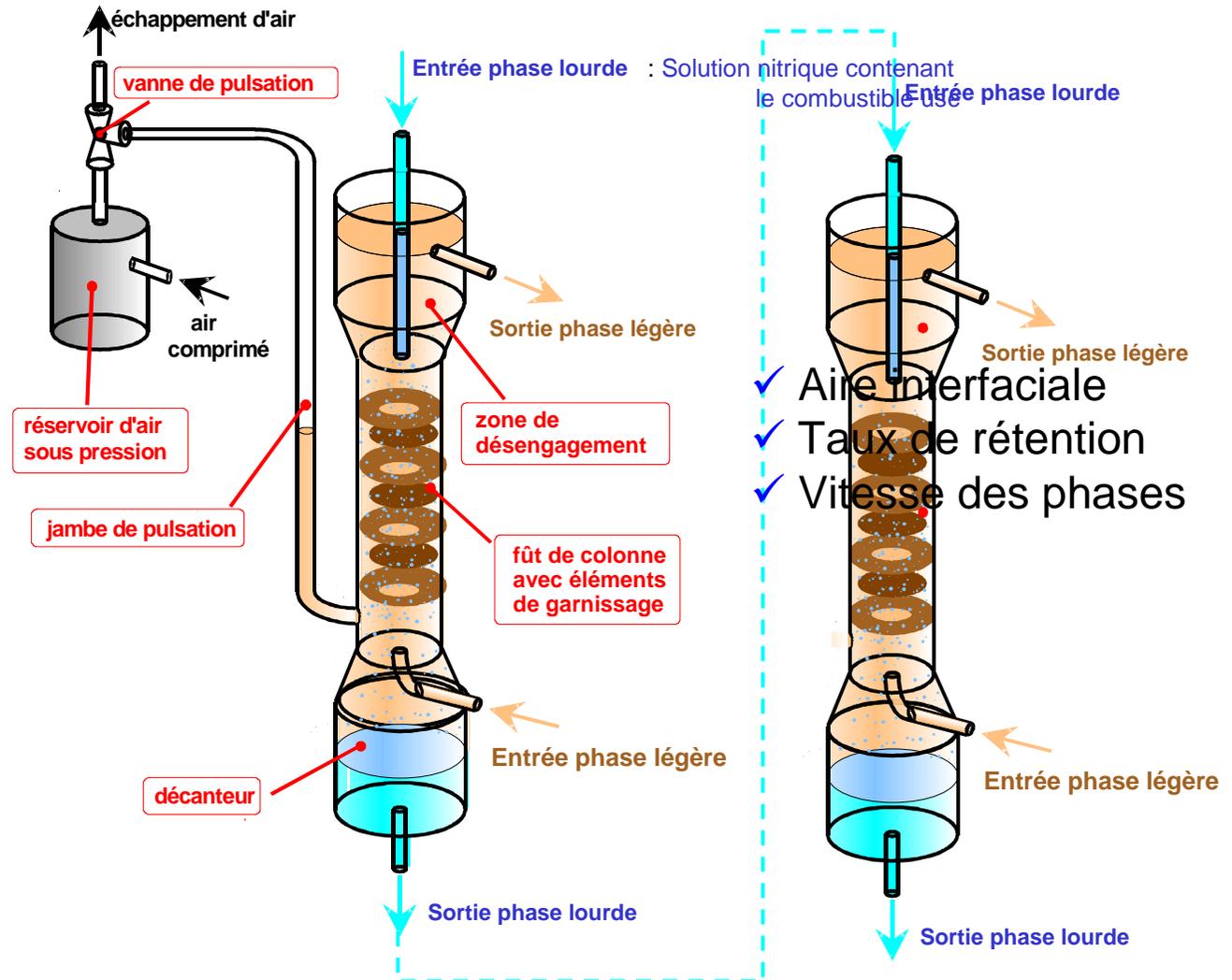
La colonne pulsée : paramètres importants



énergie atomique • énergies alternatives

Contexte

- La colonne pulsée
 - Enjeux de la modélisation
- Introduction du modèle
- Mise en œuvre du calcul
- Résultats et comparaison avec l'expérimental
- Conclusion



Le modèle d'émulsion de D. LHUILLIER



energie atomique • énergies alternatives

➤ L'émulsion est considérée comme étant une phase unique *pseudo continue*. On parle alors de **mélange**.

■ Application d'un opérateur de moyenne d'ensemble aux équations de conservation pour en assurer la validité sur tout le domaine de calcul.

■ L'émulsion et les grandeurs interfaciales transportées par la vitesse de mélange:

$$\vec{U} = \sum_k \phi_k \vec{v}_k \quad \text{et} \quad \text{div} \vec{U} = 0$$

➤ Modélisation d'une émulsion



Grandeurs interfaciales → Recours à quelques fermetures

B_i
 A_i
 v_i

➤ Contexte

■ La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion





energie atomique • energies alternatives

Tenseur gradient de vitesse interfaciale $\longrightarrow \nabla v_i = \frac{1}{3} \text{div } v_i \mathbf{I} + D_i + \Omega_i$

$$A_1 \longrightarrow B_1$$

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion

- ✓ Forte dilution
- ✓ Faible anisotropie
- ✓ Absence de changement d'état

$\phi_d \longrightarrow 0$ et $\underline{v}_i = \underline{v}_d$

$$\underline{v}_i = \underline{U} + (\phi_1 - \phi_2)(\underline{v}_2 - \underline{v}_1)$$

$$= \phi_1 \underline{v}_2 + \phi_2 \underline{v}_1$$

$$\text{div } \underline{v}_i = \text{div } \underline{U} + F(\phi)(\text{div } \underline{v}_2 - \text{div } \underline{v}_1)$$

$$D_i = D + H(\phi)(D_2 - D_1)$$

$$\Omega_i = \Omega$$



Transport des grandeurs interfaciales



energie atomique • énergies alternatives

➤ Conservation de la masse et QDM du mélange

➤ **Hypothèse 1** : Grandeurs interfaciales transportées par la vitesse du mélange

$$\frac{dA}{dt} = - \left(1 + H(\varphi_d) \frac{(\mu_c^0 - \mu_d^0)}{\mu} \right) B:D - \left(\frac{\gamma H^2(\varphi_d)}{2\mu\varphi_c\varphi_d} \right) B:B - V_{coa} P_{coa} A^2 + v_{fr} P_{fr} A$$

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

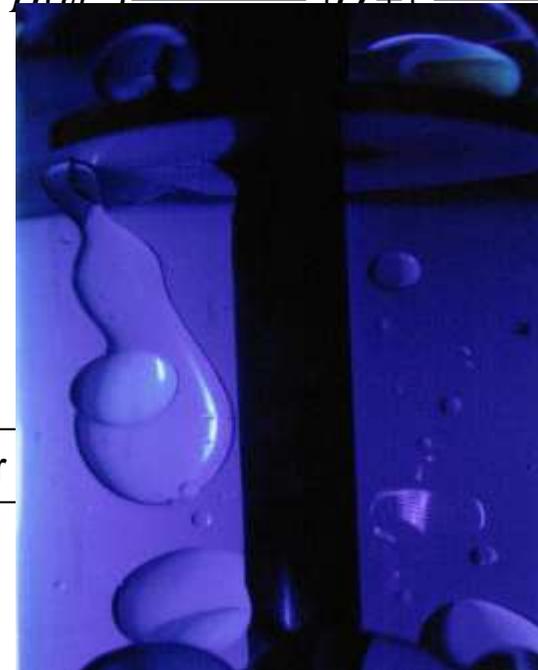
➤ Conclusion

~~$$\frac{dB}{dt} + B S_2 - Q B = - \frac{8}{15} A \left[\left(1 + H(\varphi_d) \frac{(\mu_c^0 - \mu_d^0)}{\mu} \right) D + \left(\frac{\gamma H^2(\varphi_d)}{2\mu\varphi_c\varphi_d} \right) B \right]$$~~

➤ Simplification

$$B = k D$$

➤ Splitting d'opérateur



Retour

ation



La colonne pulsée, domaine de calcul



energie atomique • énergies alternatives

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion

➤ Garnissage de type disques couronnes

➤ Rayon du fût : **25mm**

➤ Rayon des disques : **21,75mm**

➤ Rayon intérieur couronne : **12,5mm**

➤ Épaisseur des disques et couronnes : **1mm**

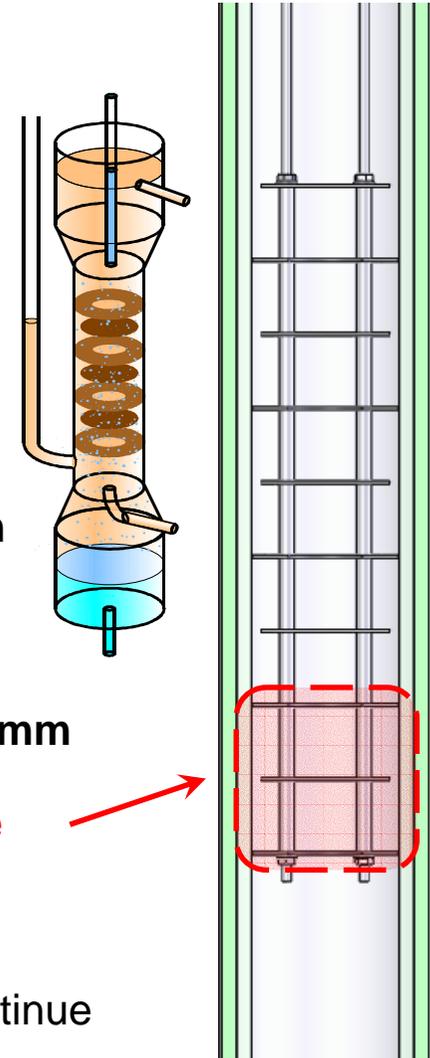
➤ Hauteur entretoise : **24mm**

➤ Jeu entre couronne et fût : **1mm**

➤ Distance injecteur au premier plateau : **243mm**

➤ Garnissage amovible

➤ Système réversible pour permettre un fonctionnement avec phase organique continue Ou phase aqueuse continue



Systemes de phase et conditions operatoires



energie atomique • energies alternatives

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modele

➤ Mise en oeuvre du calcul

➤ Resultats et comparaison avec l'experimental

➤ Conclusion

➤ Phase continue : un alcane, le TPH

- densité 0,76
- viscosité $1,26 \cdot 10^{-3}$ Pa.s

➤ Phase dispersée : H₂O + bleu de méthylène

- densité 1,00
- viscosité $1,00 \cdot 10^{-3}$ Pa.s

➤ Tension interfaciale du systeme : $43 \cdot 10^{-3}$ N.m⁻¹

➤ Rapports de densité et de viscosité proches des conditions industrielles

Fréquence	Amplitude	Pression de réglage du pulseur
0,5Hz	3,52cm	170mBar
1Hz	1,28cm	170mBar
2Hz	3,2mm	200mBar

➤ 3 conditions de pulsations

➤ Débit en phase dispersée : **12l/h**

➤ Pas de contre-courant : l'écoulement n'est du qu'à la pulse





énergie atomique • énergies alternatives

$$\frac{dA}{dt} = - \left(1 + H(\varphi_d) \frac{(\mu_c^0 - \mu_d^0)}{\mu} \right) B:D - \left(\frac{\gamma H^2(\varphi_d)}{2\mu\varphi_c\varphi_d} \right) B:B + v_{fr} P_{fr} A$$

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion

- La vitesse du mélange est utilisée comme vitesse de convection de l'aire interfaciale volumique
- Le taux de rétention à l'équilibre est pris égal à la valeur mesurée en amont
- Le tenseur d'anisotropie est évalué à partir de $B = k D$
- L'aire interfaciale volumique mesurée en amont du garnissage est utilisée comme condition aux limite de départ du calcul.
- La fonction $H(\varphi)$ a été déterminée en utilisant des données de la littérature
- Les coefficients du terme de fragmentation ont été calés en Utilisant les données expérimentales du cas à $0,5Hz$





énergie atomique • énergies alternatives

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion

➤ Divers types de fragmentation existent :

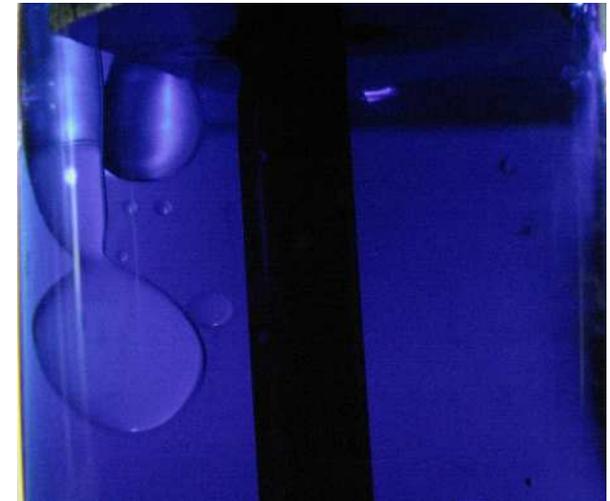
- La fragmentation visqueuse rencontrée à faible REYNOLDS
- La fragmentation inertielle rencontrée à plus fort REYNOLDS
- La fragmentation par instabilités capillaires
- La fragmentation d'origine vibratoire

➤ REYNOLDS < 1000

➤ Fragmentation déclenchée sur un seuil basé sur des capillaires critiques

$$Ca = \frac{\mu_0 (\gamma + \sigma r)}{\sigma}$$

➤ Les cartes de capillaire critique Issues des travaux de WINDHAB



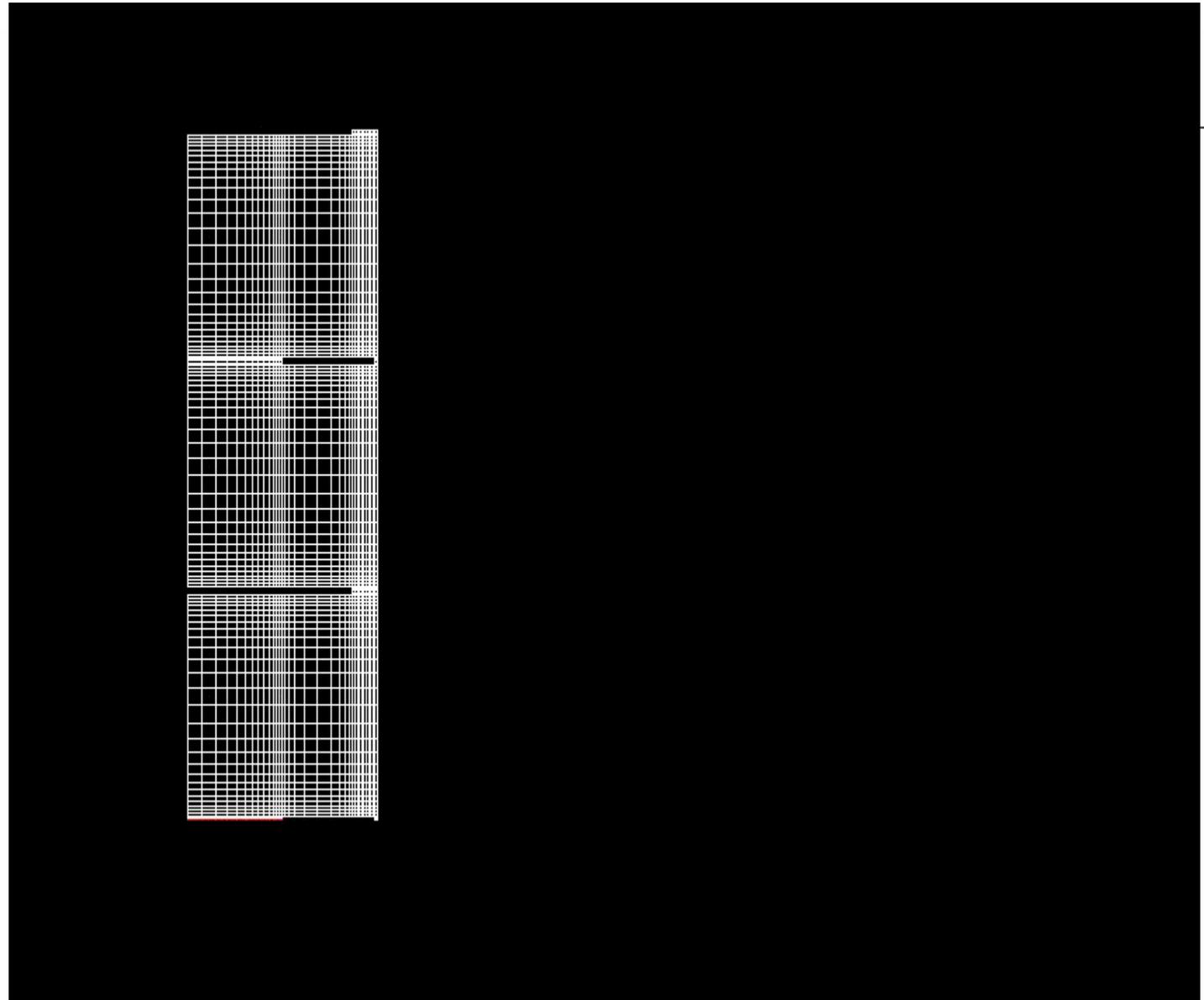
$$\frac{dA}{dt} = - \left(1 + H(\varphi_d) \frac{(\mu_c^0 - \mu_d^0)}{\mu} \right) B:D - \left(\frac{\gamma H^2(\varphi_d)}{2\mu\varphi_c\varphi_d} \right) B:B + v_{fr} P_{fr} A$$

Calcul de la vitesse du mélange : conditions aux limites



energie atomique • energies alternatives

- Contexte
 - La colonne pulsée
- Introduction du modèle
- **Mise en œuvre du calcul**
- Résultats et comparaison avec l'expérimental
- Conclusion

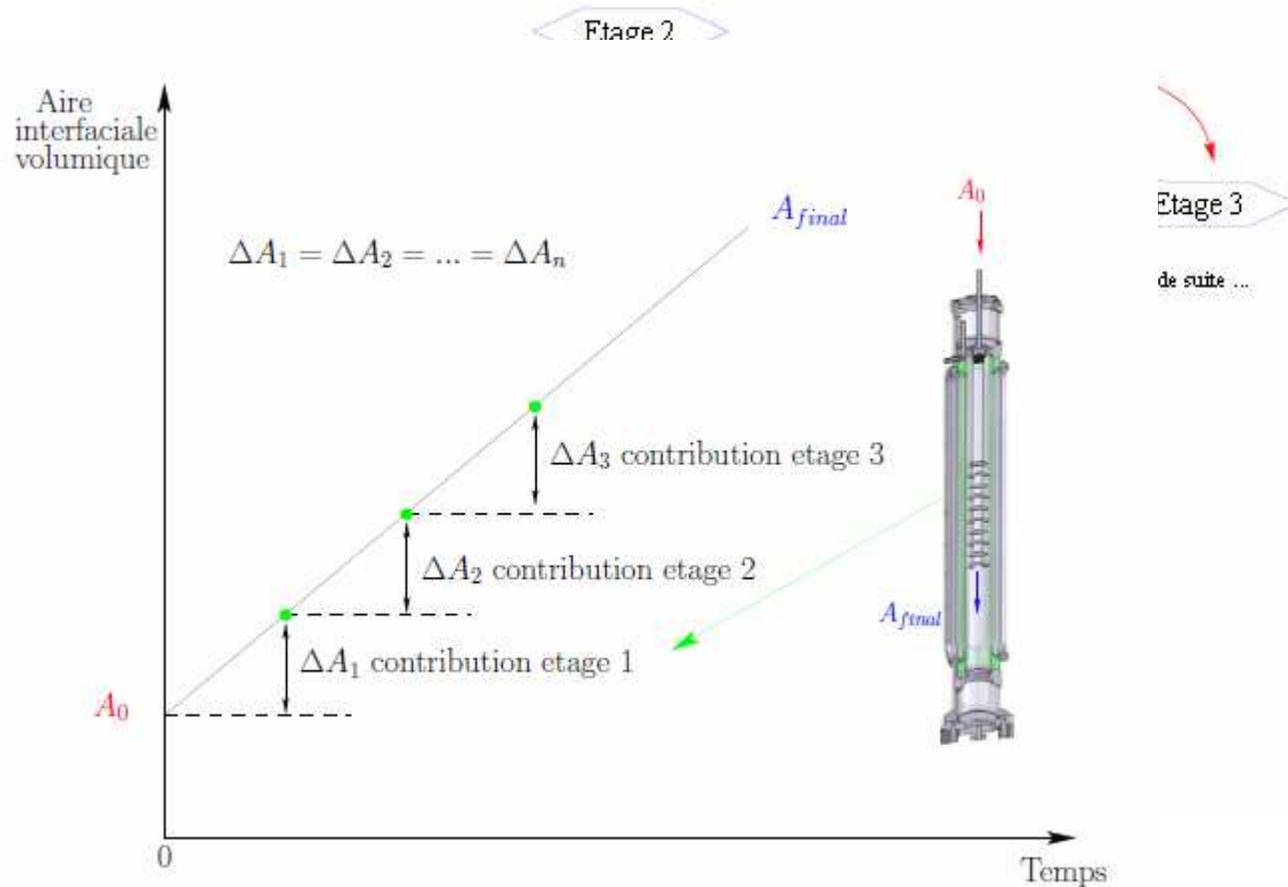


Conduite du calcul : transport de l'aire interfaciale volumique



energie atomique • energies alternatives

➤ Traversée des étages successifs : cartes d'aire interfaciale volumique



➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

- Ce qu
- d'un étaq
- injecté à
- du suiv

➤ Conclusion

➤ Condi

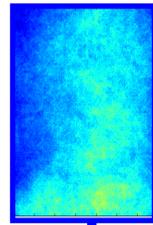
- Maîtrise de l'injection et de l'aspiration de matière par mise à jour au cours du temps des conditions aux limites d'aire interfaciale volumique.



Conduite du calcul : exploitation des résultats expérimentaux

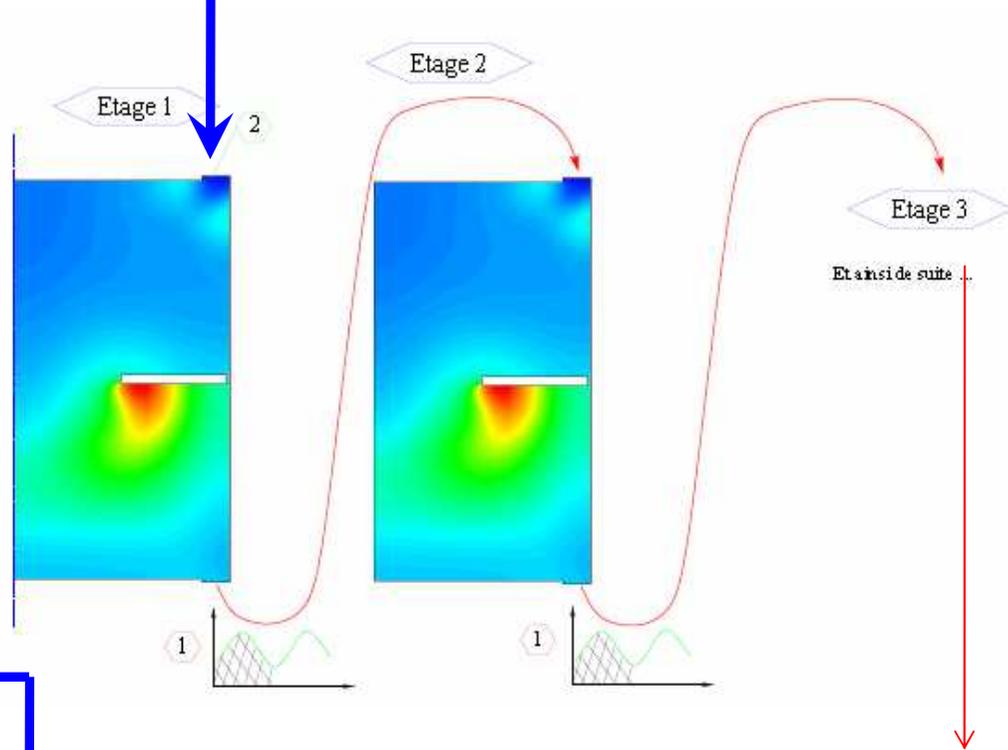


energie atomique • énergies alternatives



Injection en entrée du 1^{er} étage de la moyenne d'aire interfaciale mesurée

Aire interfaciale
Volumique
Mesurée en
Amont du
garnissage



- Contexte
 - La colonne pulsée
- Introduction du modèle
- **Mise en œuvre du calcul**
- Résultats et comparaison avec l'expérimental
- Conclusion

$$\text{Production}_{\text{exp}} = 100 \frac{|\bar{A}_e/\bar{\phi}_e - \bar{A}_s/\bar{\phi}_s|}{\bar{A}_e/\bar{\phi}_e} \leftarrow \text{Sortie étage 4}$$



Résultats de calculs : évolution de la production d'aire interfaciale par étage



énergie atomique • énergies alternatives

➤ Contexte

- La colonne pulsée

➤ Introduction du modèle

➤ Mise en œuvre du calcul

➤ Résultats et comparaison avec l'expérimental

➤ Conclusion

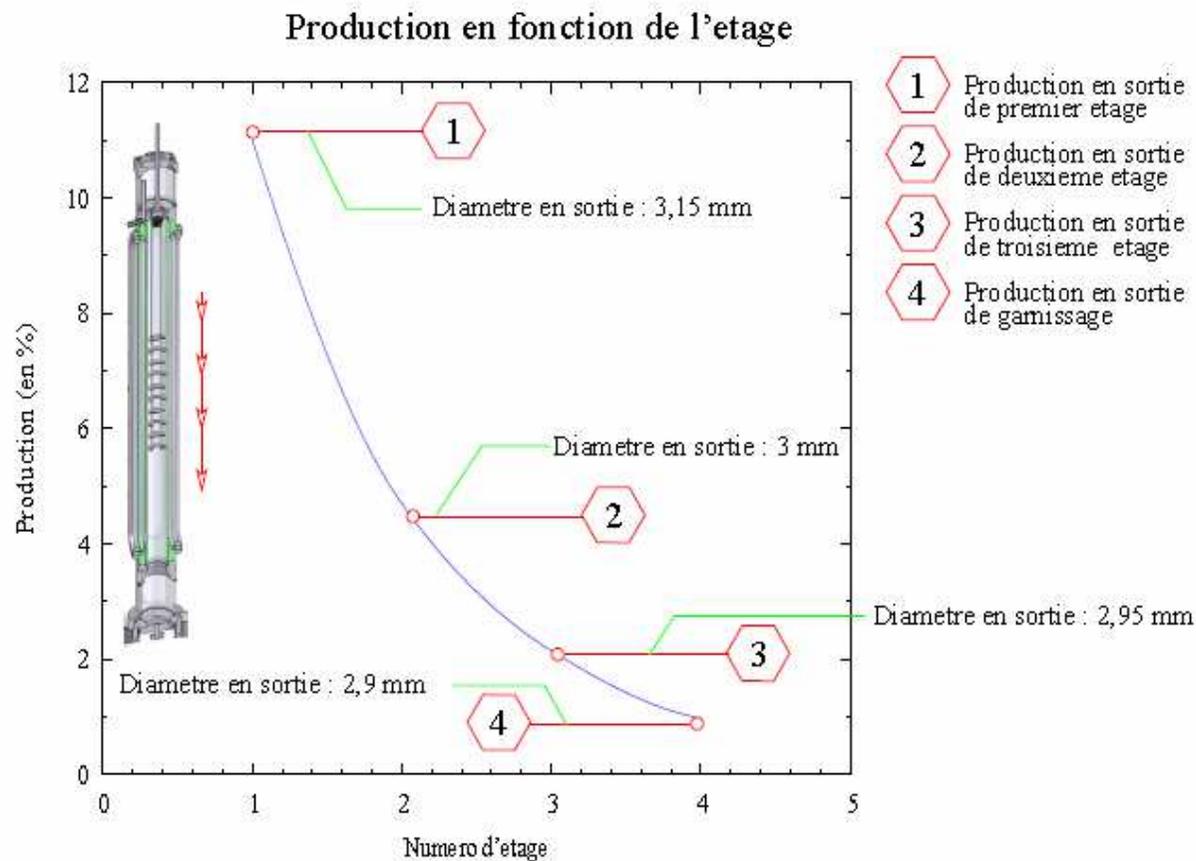


Fig. 7.2 – Évolution de la production en sortie les étages successifs à 0,5 Hz.



Comparaison mesures-calcul



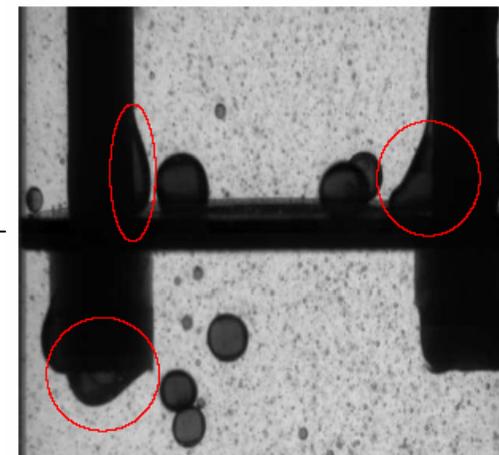
energie atomique • energies alternatives

- Contexte
 - La colonne pulsée
- Introduction du modèle
- Mise en œuvre du calcul
- **Résultats et comparaison avec l'expérimental**
- Conclusion

Fréquence	Production mesurée	Production calculée
0,5 Hz	20%	19,9%
1Hz	10%	12,4%
2Hz	8%	~1%



Sources parasites ←



Conclusion



energie atomique • énergies alternatives

- Première étape de qualification du modèle réalisée
- Résultats encourageants mais une validation plus systématique du code encore nécessaire
- Affiner, si possible, la modélisation de la compétition déformation-retour à l'isotropie en exploitant la notion de relaxation. Pour éviter le recours à un « splitting » d'opérateurs qui réduit la précision en temps.
- Implémenter une vitesse de glissement et tenir compte de l'inertie pour :
 - Améliorer le transport mais aussi la physique responsable de la fragmentation du modèle.
 - Affiner la répartition spatiale des résultats
 - Permettre au modèle de prévoir la capacité maximale d'un appareil en termes de débit entrants.
- Tenir compte de la coalescence





energie atomique • energies alternatives

Merci de votre attention

