



# Nouvelle approche pour l'évaluation du risque d'exposition interne

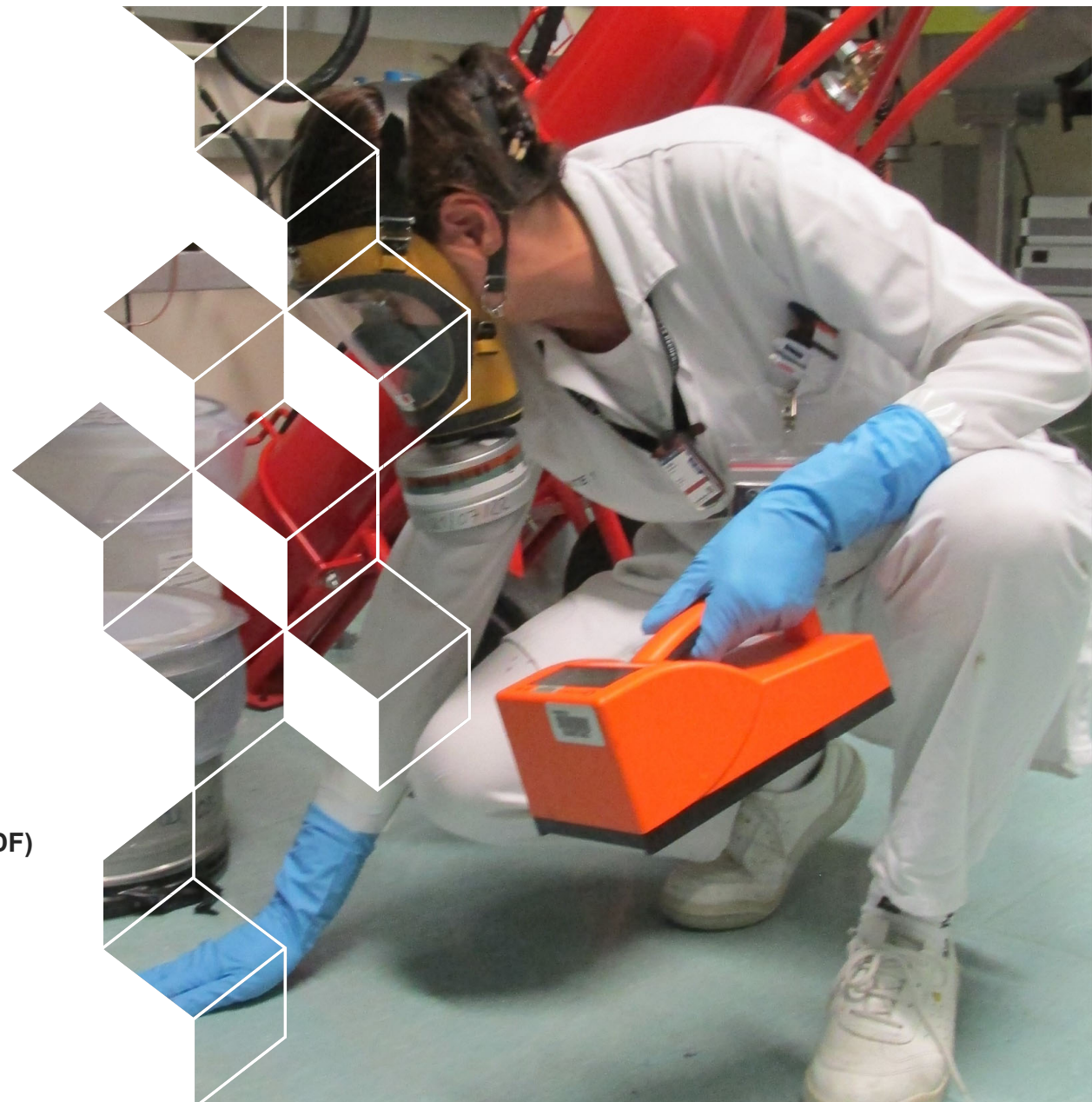
Optimisation du port des équipements de protection individuelle

Travaux de thèse de Pierrick AGULLO (partenariat CEA / EDF)

Présenté par Fabrice PETITOT

Pôles de compétence en radioprotection du CEA Marcoule

19 septembre 2024



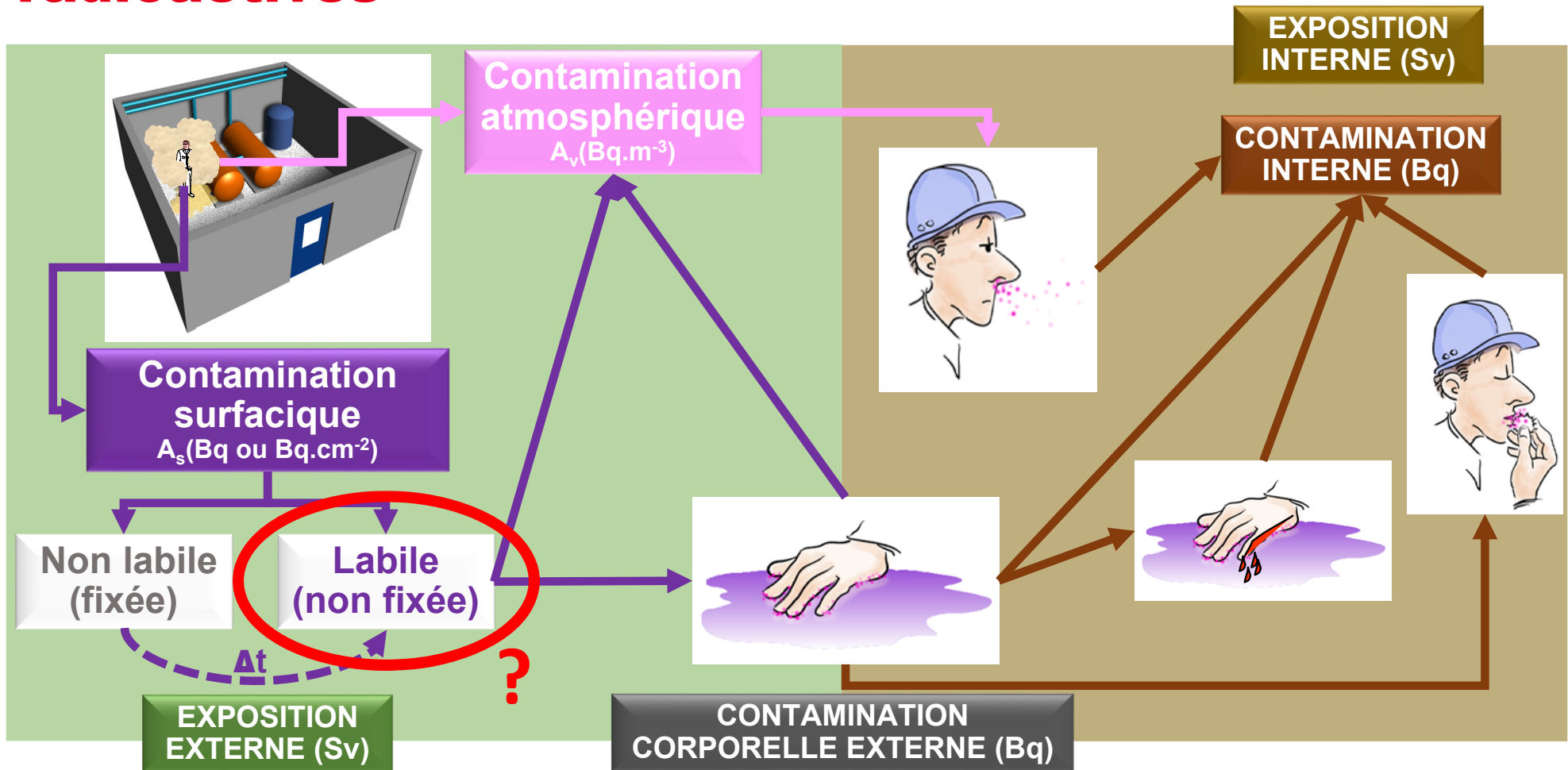


# 1 ■

# Protection contre le risque d'exposition interne

Contexte et limites de la méthode utilisée

# Voies de contamination par des substances radioactives



# Réglementation en radioprotection



## Les 3 grands principes de radioprotection :

- Justification
- **Optimisation (ALARA) :**  
**OBJECTIF : absence d'exposition interne significative**
- Limitation



### Mise en œuvre de moyens :

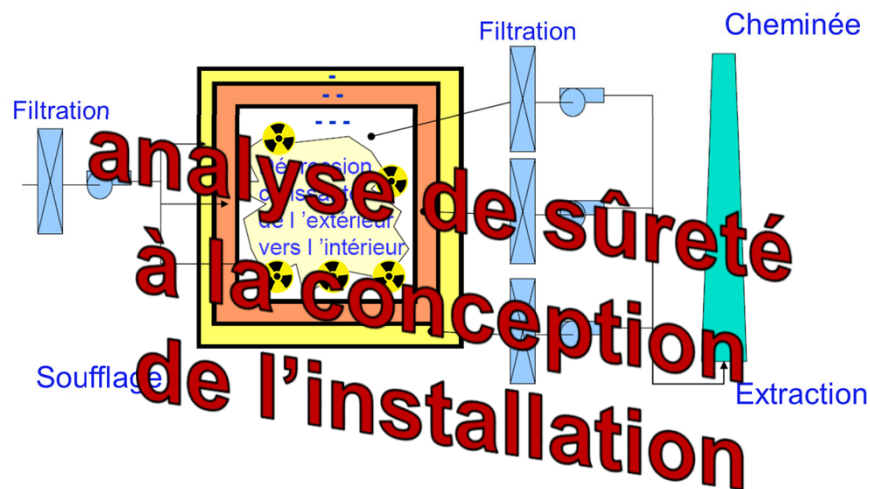
- de protection collective en priorité (article L.4121-2 du code du travail) ;
- de protection individuelle si nécessaire.

# Prévention du risque d'exposition interne



## Protection collective

Confinements statique et dynamique des substances radioactives



## Protection individuelle

Equipements de protection des voies respiratoires et tenues de protection contre la contamination



# Lorsque les protections collectives ne peuvent pas être mises en œuvre...



## Démantèlement des installations nucléaires :

- Opérations d'assainissement
- Opérations de démontage
- Opérations de découpe
- Opérations de manutention de déchets
- ...

## Chantiers sur des installations en exploitation :

- Maintenance
- Opérations spécifiques
- ...

**Prélèvement surfacique par frottis sec** (norme NF ISO 7503-2)



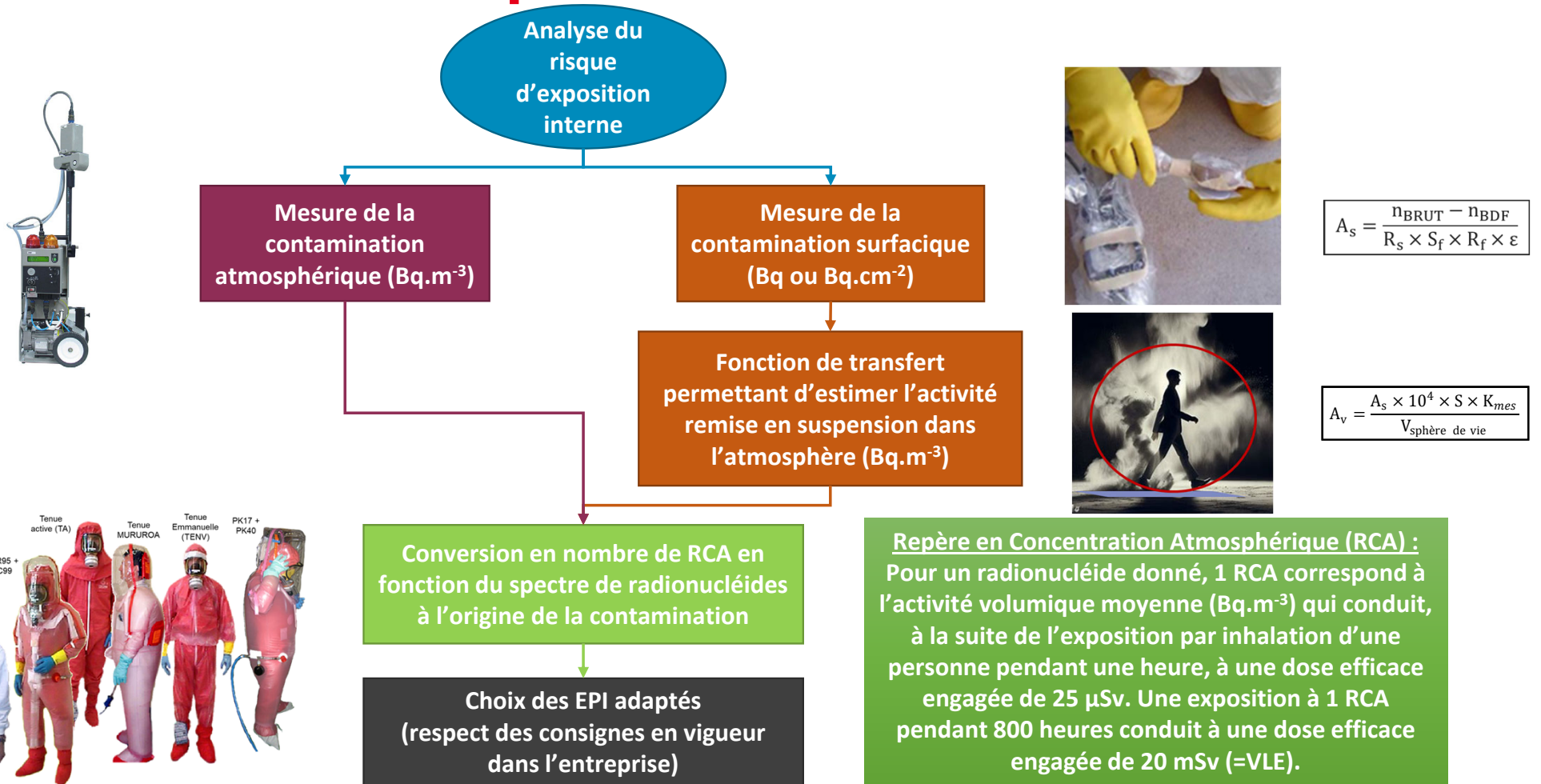
**Evaluation du risque d'exposition interne**



**Choix des EPI adaptés**



# Prévention individuelle des expositions internes liées à un risque de contamination par des substances radioactives



# Contexte

- Enjeu : **Adéquation entre EPI préconisés et risque réel de contamination**
- **Aujourd'hui**, estimer le risque de contamination ≈ prendre les hypothèses les plus pénalisantes
  - ↳ Surestimation récurrente du risque réel d'exposition interne
  - ↳ **Surdimensionnement des EPI**

## ➤ Conséquences



✓ **Génération de risques supplémentaires** physiologique, psychologique et de sécurité classique ;



✓ **Allongement de la durée des chantiers** lié :

- à des temps de port des tenues plus réduits sur une journée pour les tenues apportant un haut niveau de protection ;
- et pour les EPVR à adduction d'air ou les tenues étanches ventilées au nombre limité sur une même installation de lignes d'air respirable disponibles ;



✓ **Surcoût des chantiers.**





# Evaluation des incertitudes sur les données d'entrée



Paramètres physiques d'entrée  
Bibliographie et REX



Borne de variation et probabilité  
Bibliographie et REX



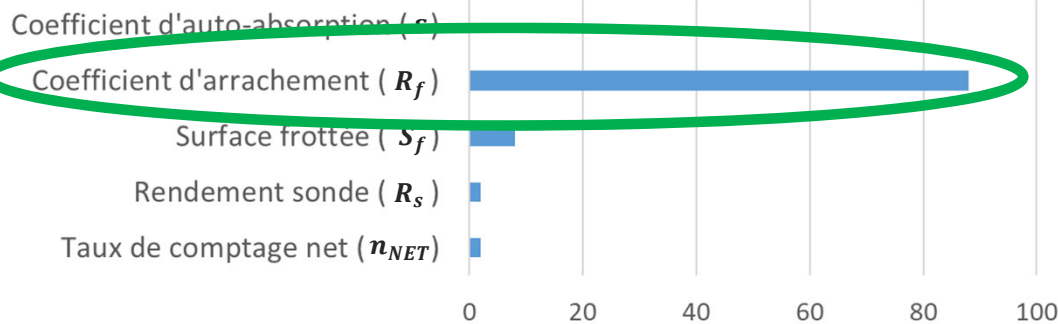
Incertitude absolue de  $A_s$  et  $A_v$

Incertitude absolue de  $A_s$  et  $A_v$  en fonction de chaque variable

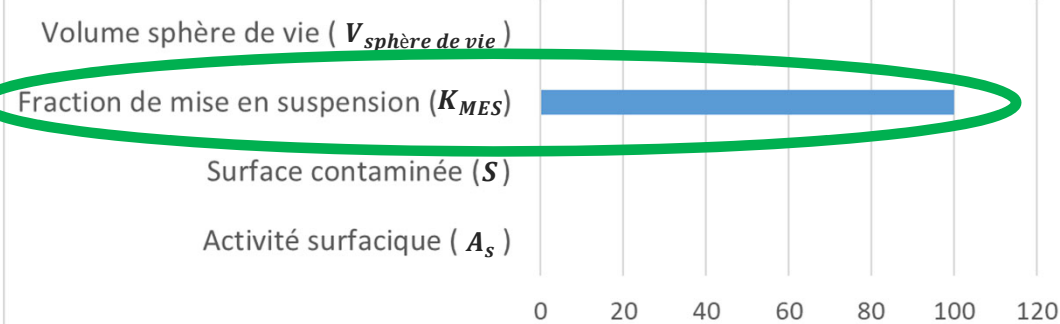


Poids relatif de chaque paramètre d'entrée sur l'incertitude de  $A_s$  et  $A_v$

Impact sur l'incertitude absolue de l'activité surfacique



Impact sur l'incertitude absolue de l'activité volumique



**Coefficient d'arrachement / Fraction de mise en suspension => Incertitude sur l'estimation de l' $A_s$  et de l' $A_v$**



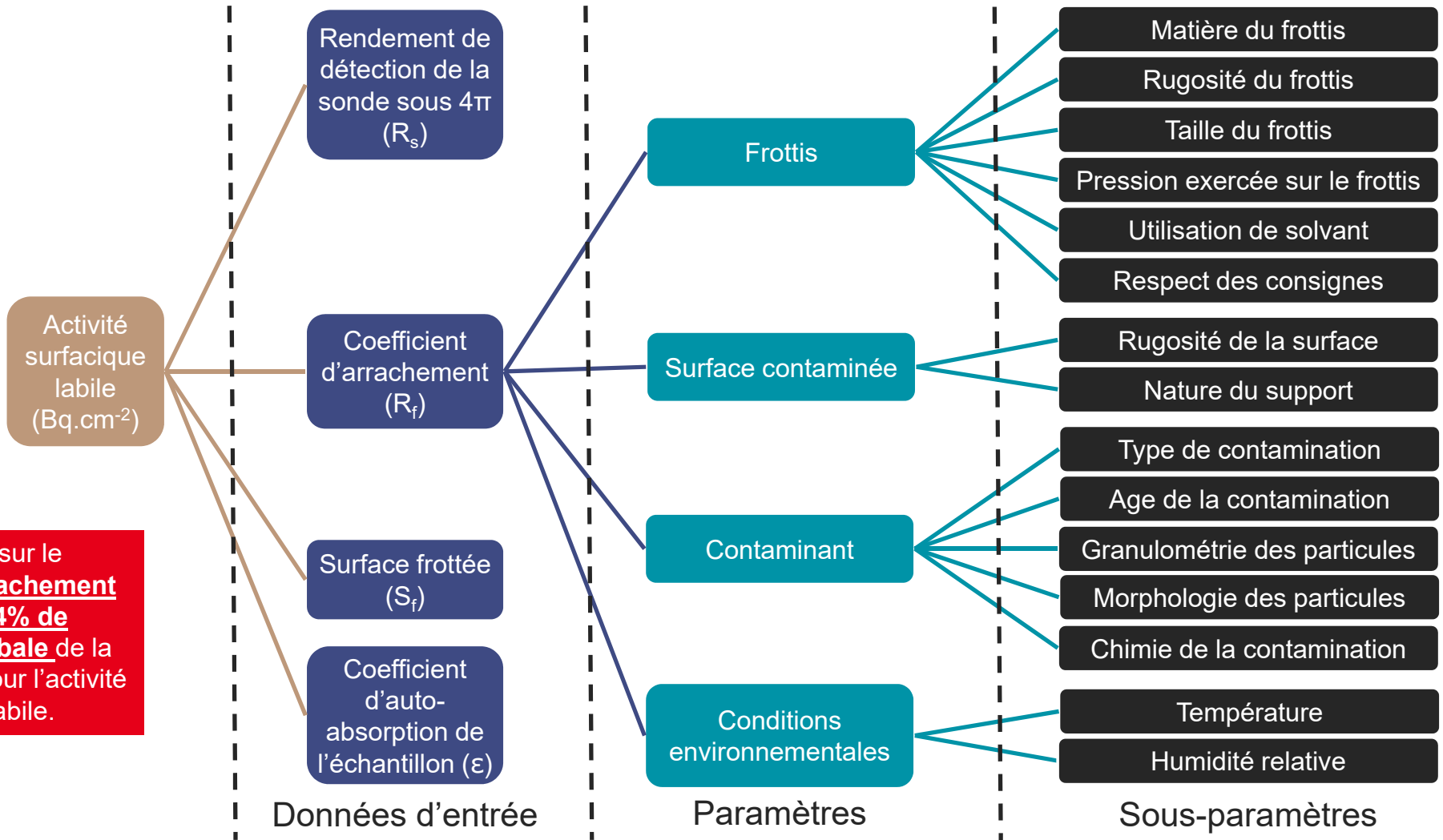
# 2. Le coefficient d'arrachement ( $R_f$ )

Quels paramètres influent sur  $R_f$  ?

# Quels paramètres influent sur l'évaluation de l'activité surfacique labile ?



$$A_s = \frac{n_{BRUT} - n_{BDF}}{R_s \times S_f \times R_f \times \epsilon}$$

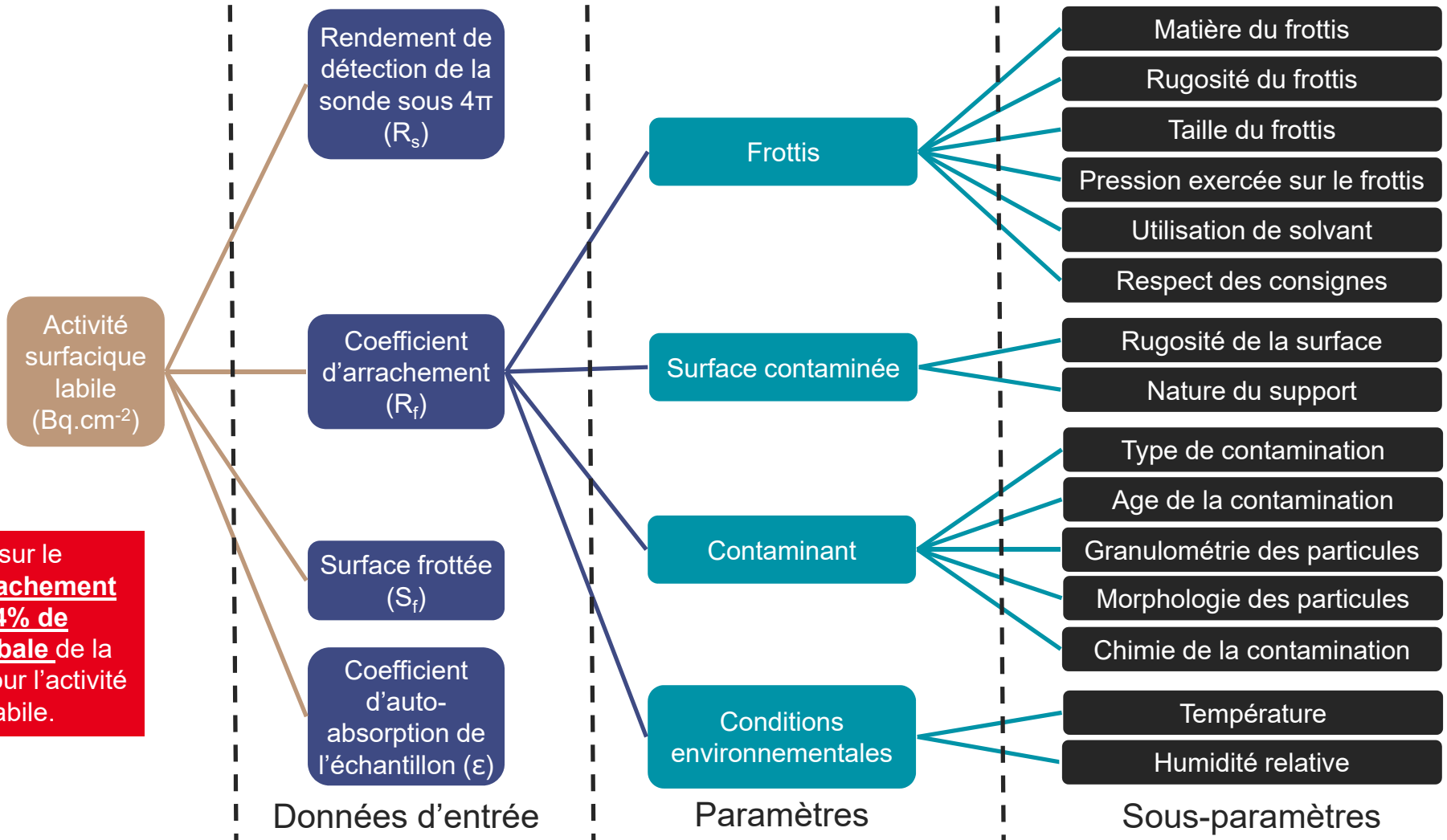


L'incertitude sur le **coefficient d'arrachement** représente **94% de l'incertitude globale** de la valeur mesurée pour l'activité surfacique labile.

# Quels paramètres influent sur l'évaluation de l'activité surfacique labile ?



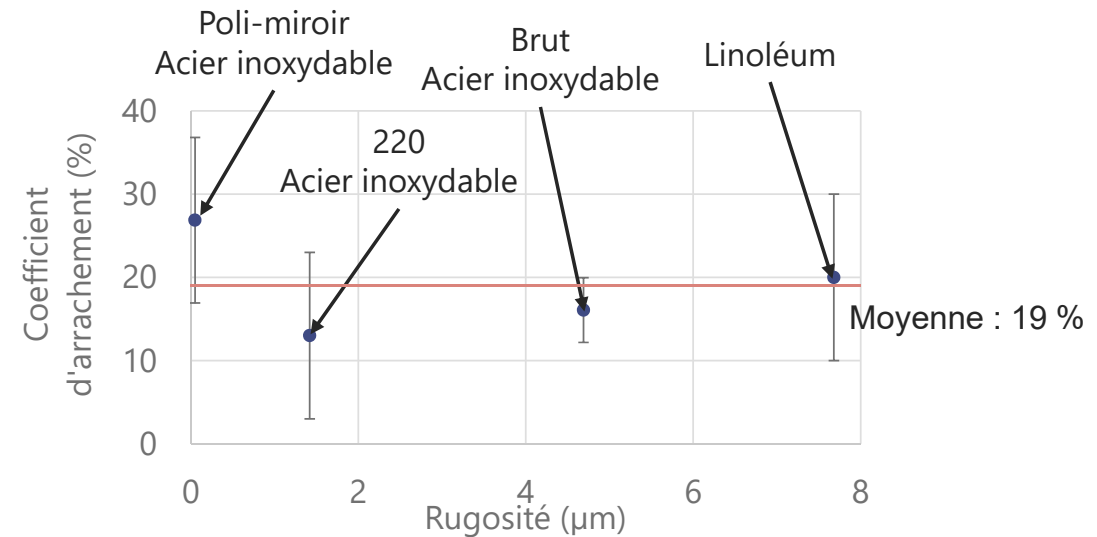
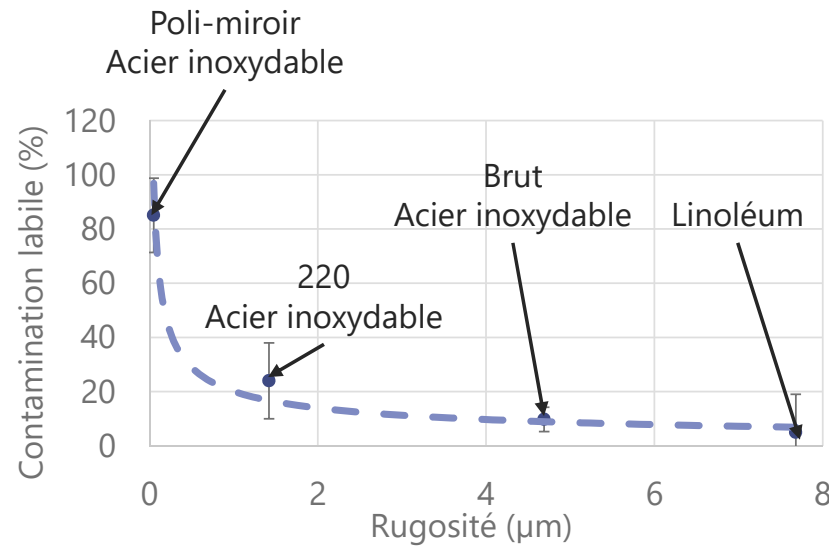
$$A_s = \frac{n_{BRUT} - n_{BDF}}{R_s \times S_f \times R_f \times \epsilon}$$



L'incertitude sur le **coefficient d'arrachement** représente **94% de l'incertitude globale** de la valeur mesurée pour l'activité surfacique labile.



# Rugosité de la surface contaminée<sup>‡</sup> ...



Acier poli-miroir



Acier brut



Linoléum

**Peu d'influence sur la quantité de contamination labile mesurée et le coefficient d'arrachement pour :**

- La pression appliquée par l'opérateur sur le frottis
- La température et l'humidité relative ambiantes du laboratoire

**La rugosité de la surface contaminée :**

- **Influe sur la quantité de contamination labile mesurée**
- **N'a pas d'impact sur le  $R_f$  stable ~ 19 %**

<sup>‡</sup> contaminant = fluorescéine liquide séchée

P. Agullo, A. Gossard, G. Ranchoux, F. Petitot et E. Porcheron, 2023. « Main parameters influencing the level of labile contamination and the removal factor ». Journal of Nuclear Engineering and radiation science. 9 (4):1-53. DOI : 10.1115/1.4062550

# Rugosité de la surface contaminée : comparaison entre fluorescéine et Cs-137

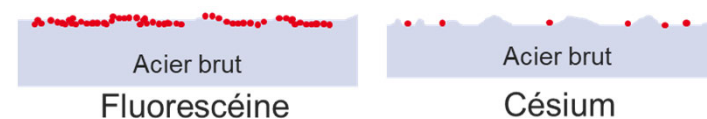
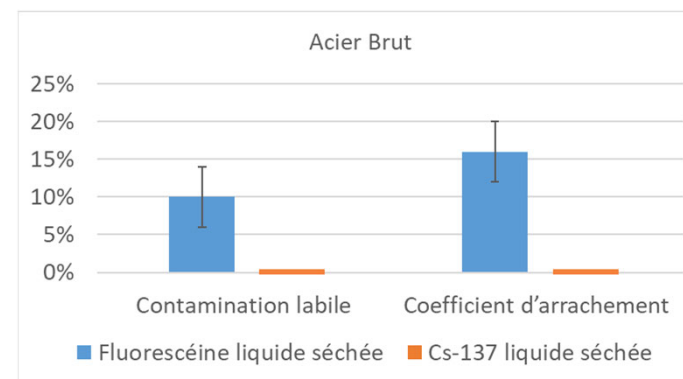
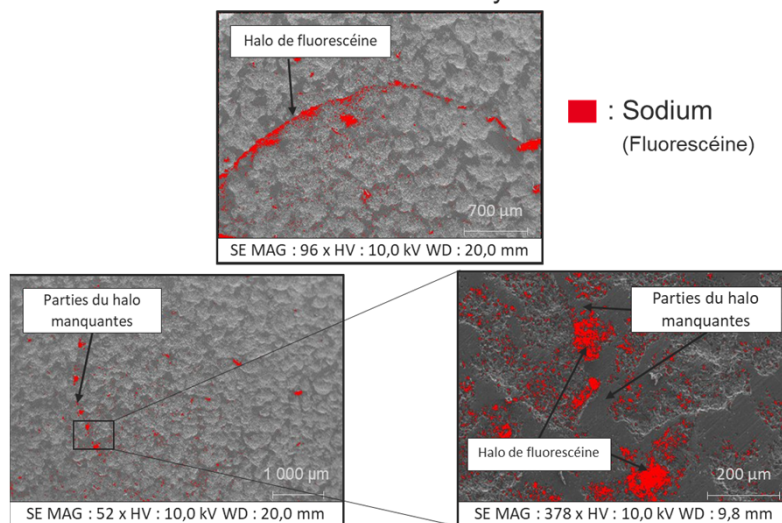


**Surface lisse (acier poli-miroir) :** comportement comparable entre fluorescéine et Cs-137  
 $R_f \sim 19 \%$



Dépôt de 70  $\mu$ L de Cs-137

Observation MEB avec analyse EDX



**Surface rugueuse (acier brut) :** Rugosité  $\Rightarrow$  Sites de concentration de la contamination  
 Toute la contamination se retrouve dans les interstices. Elle n'est plus accessible avec un frottis.



# Surface poreuse et réactive, le béton : comparaison entre fluorescéine et Cs-137



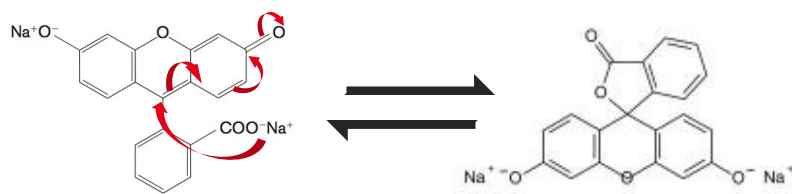
Béton

	Contamination labile (%)	Coefficient d'arrachement (%)
Béton (Fluorescéine liquide séchée)	(0,1 +/- 0,2) %	0 %
Béton (Cs-137 liquide séchée)	(9 +/- 7) % CV = 33 %	(1 +/- 1) % CV = 17 %

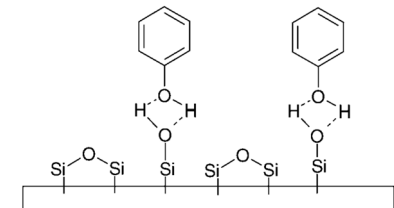
**Contamination non radioactive à contamination radioactive ⇒ Augmentation de la proportion en contamination labile. Le coefficient d'arrachement est aux alentours de 0 %.**

1 : Rétention du césium par les sites silanols (SiOH) (échange de Cs<sup>+</sup> avec H<sup>+</sup>).

2 : Phénomène de précipitation du césium : CsOH et Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(H<sub>2</sub>O).



Deux phénolates. Ils ne peuvent pas faire de liaisons hydrogènes contrairement aux phénols

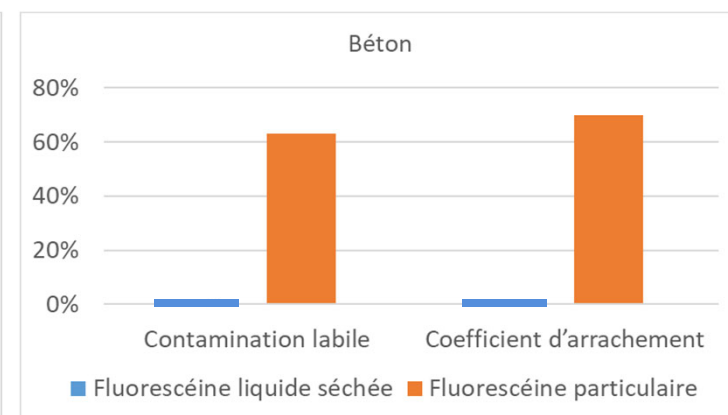
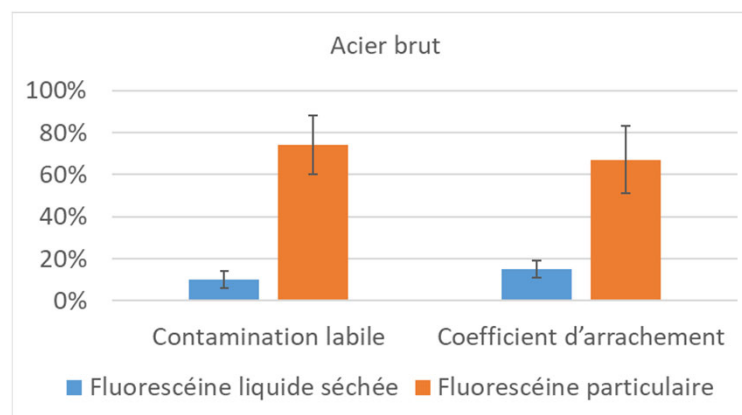
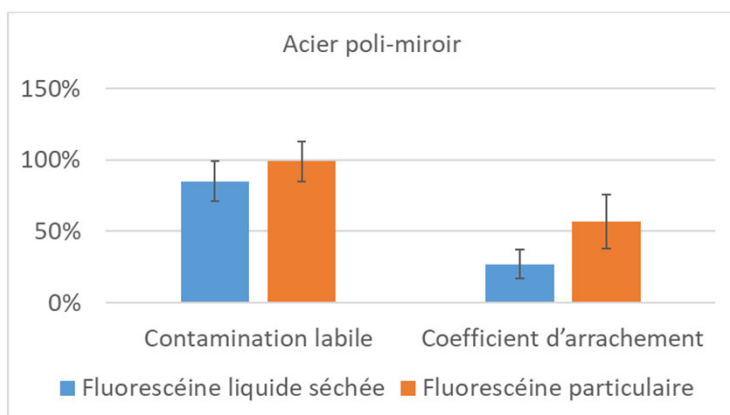


Luu, V. N., et K. Nakajima. 2023. « Study on cesium compound formation by chemical interaction of CsOH and concrete at elevated temperatures ». *Journal of Nuclear Science and Technology* 60 (2): 153-64. DOI:10.1080/00223131.2022.2089263

S. Arellano, G. Osorio-Revilla, T. Gallardo-Velasquez, L. Cortez. 2008. « Preparation of a porous clay heterostructure and study of its adsorption capacity of phenol and chlorinated phenols from aqueous solutions ». *Water Environment Research* 80(1): 60-7. DOI:10.2175/106143007X220653



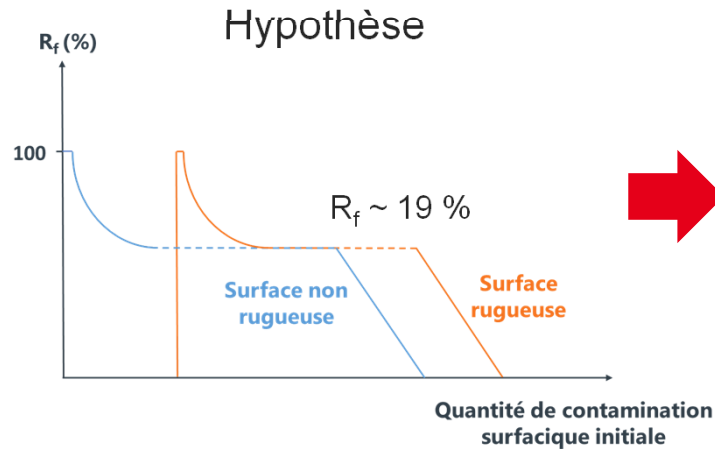
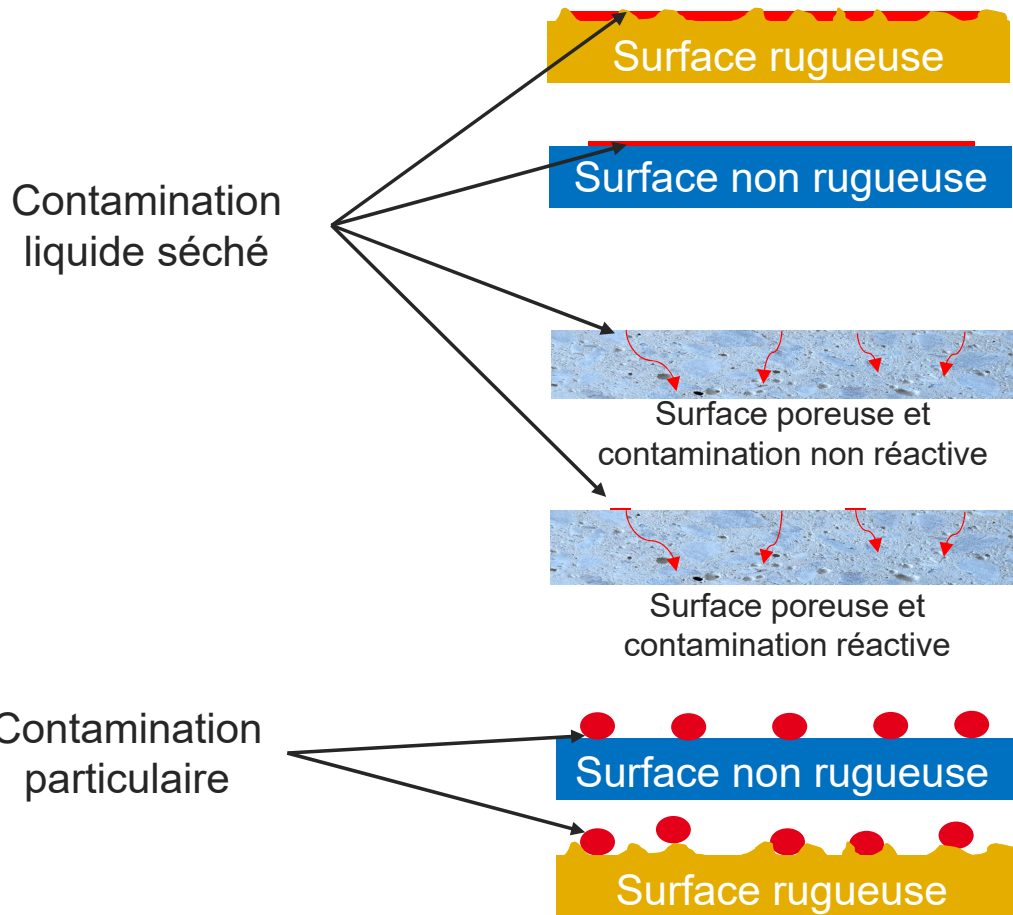
# Influence de la forme physico-chimique : contamination liquide séché vs contamination particulaire



Contamination particulaire ⇒ Augmentation de la contamination labile et du coefficient d'arrachement.

Coefficient d'arrachement contamination particulaire ~ 65 %.

# Conclusion pour le coefficient d'arrachement



$R_f \sim 0 \%$

$R_f \sim 9 \%$

$R_f \sim 65 \%$

Sensibilité du coefficient d'arrachement à la rugosité de surface

Sensibilité du coefficient d'arrachement au couple contaminant / surface

Sensibilité du coefficient d'arrachement au type de contaminant



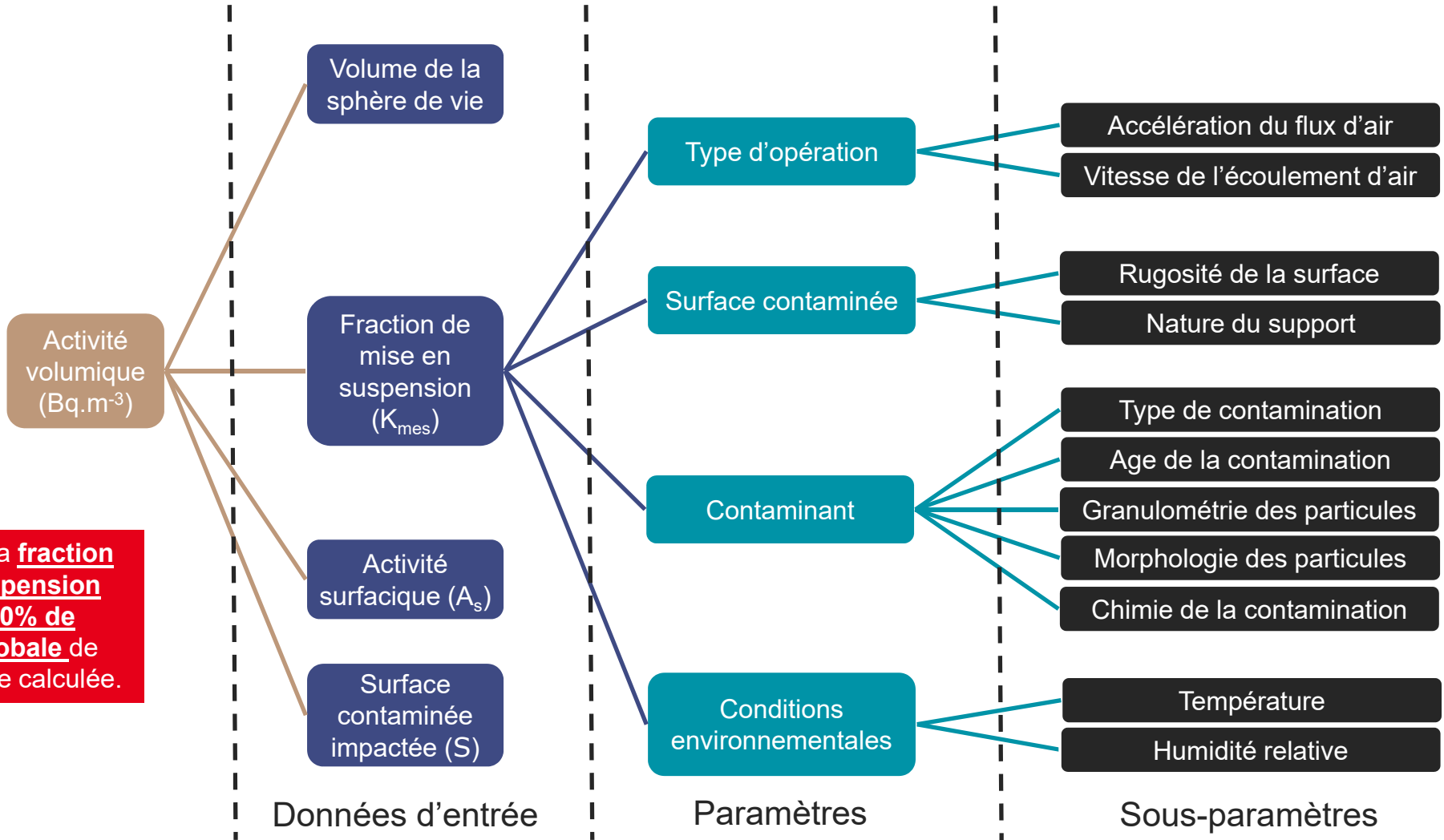
# 3 ■ Fraction de mise en suspension ( $K_{mes}$ )

Quels paramètres influent sur  $K_{mes}$  ?

# Quels paramètres influent sur l'évaluation de l'activité volumique ?



$$A_v = \frac{A_s \times 10^4 \times S \times K_{mes}}{V_{\text{sphère de vie}}}$$

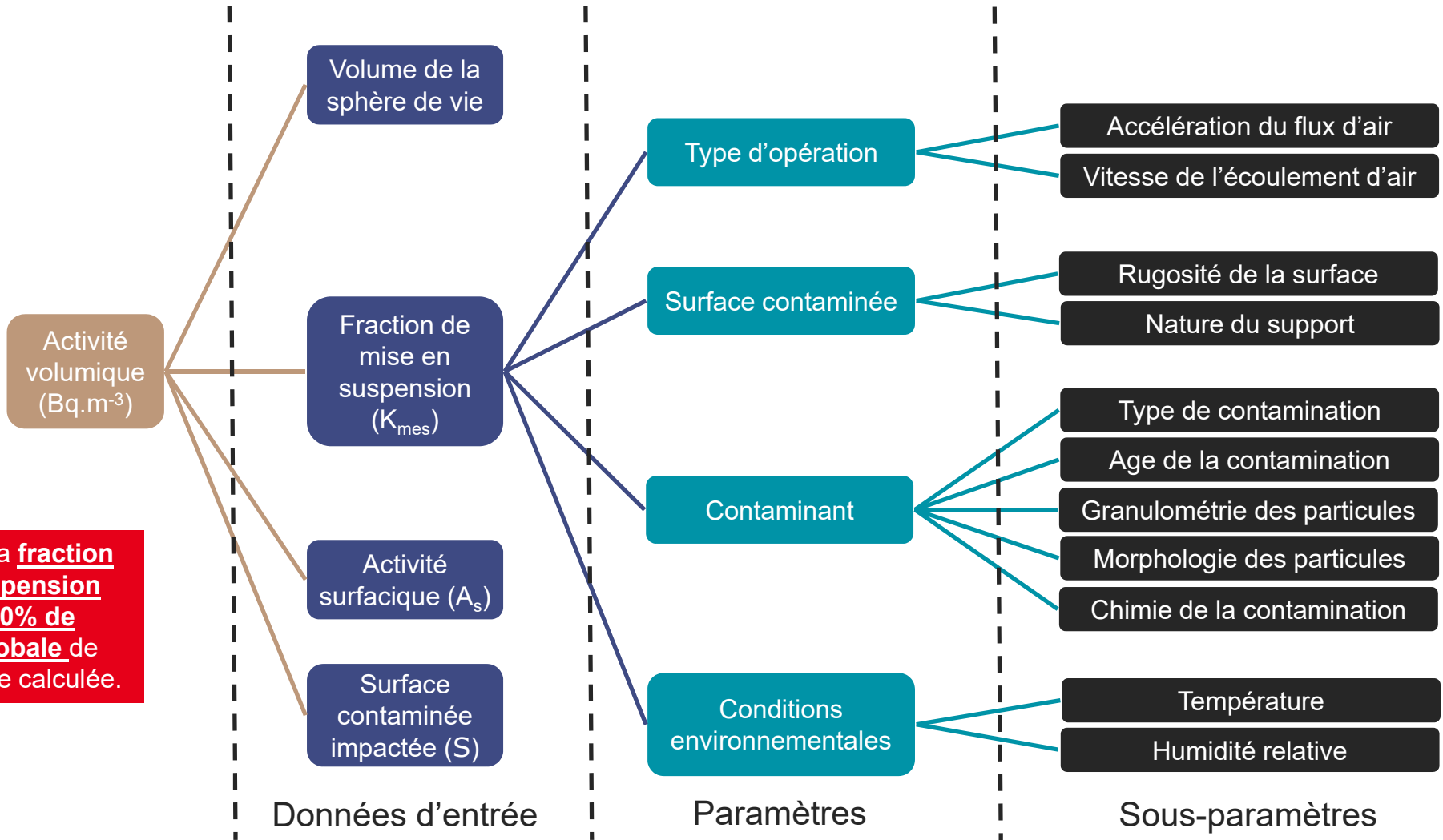


L'incertitude sur la **fraction de mise en suspension** représente **100% de l'incertitude globale** de l'activité volumique calculée.

# Quels paramètres influent sur l'évaluation de l'activité volumique ?



$$A_v = \frac{A_s \times 10^4 \times S \times K_{mes}}{V_{\text{sphère de vie}}}$$



L'incertitude sur la **fraction de mise en suspension** représente **100% de l'incertitude globale** de l'activité volumique calculée.





# Mise en suspension de particules de fluorescéine

$$K_{MES} = \frac{\text{Quantité mise en suspension}}{\text{Quantité initialement présente sur la surface}}$$

## Expériences en laboratoire (collaboration IRSN)

Méthode pour mesurer le  $K_{MES}$  :

- Contrôle du dépôt initial par dispersion en voie sèche
- Contrôle du dépôt restant par rinçage
- Contrôle de la mise en suspension par extraction

Application du système de mise en suspension



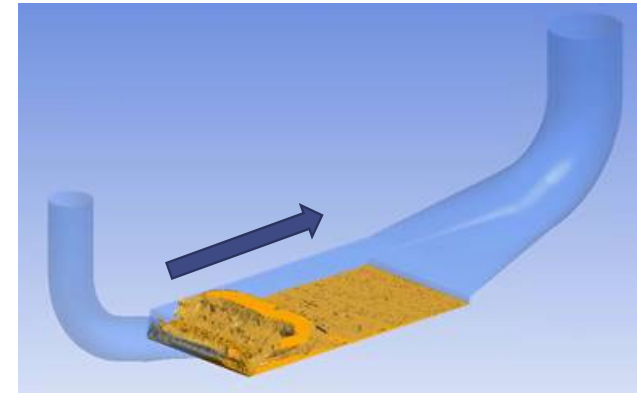
Rinçage



## Simulations numériques (collaboration IRSN)

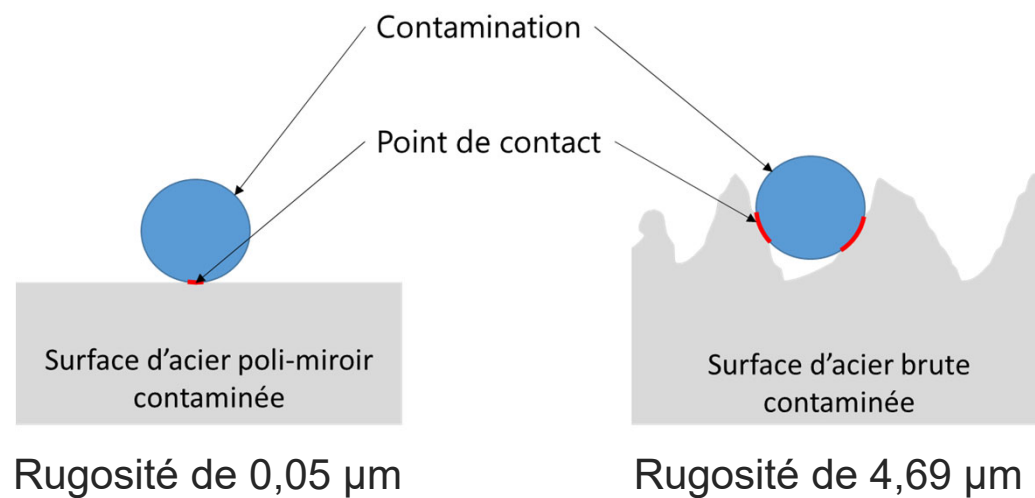
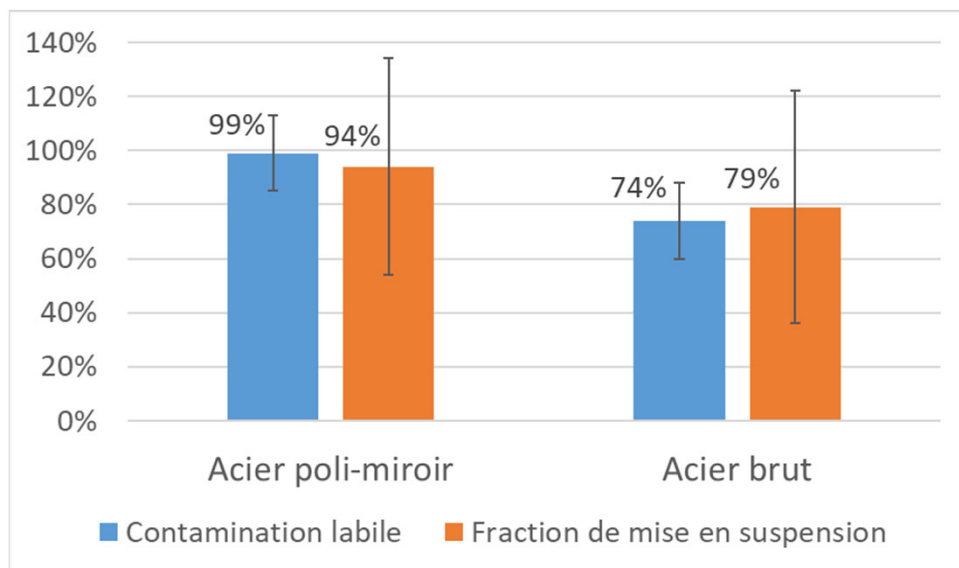
Conditions initiales :

- Particules de fluorescéine
- $D_{ae} = 1,5 \mu\text{m}$  et  $3,5 \mu\text{m}$
- Vitesse de frottement pariétale moyenne de  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$



Logiciel : ANSYS CFX; Modèle Rock'n Roll

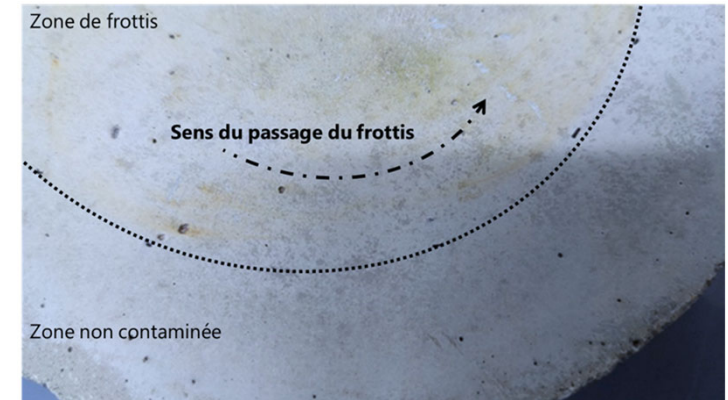
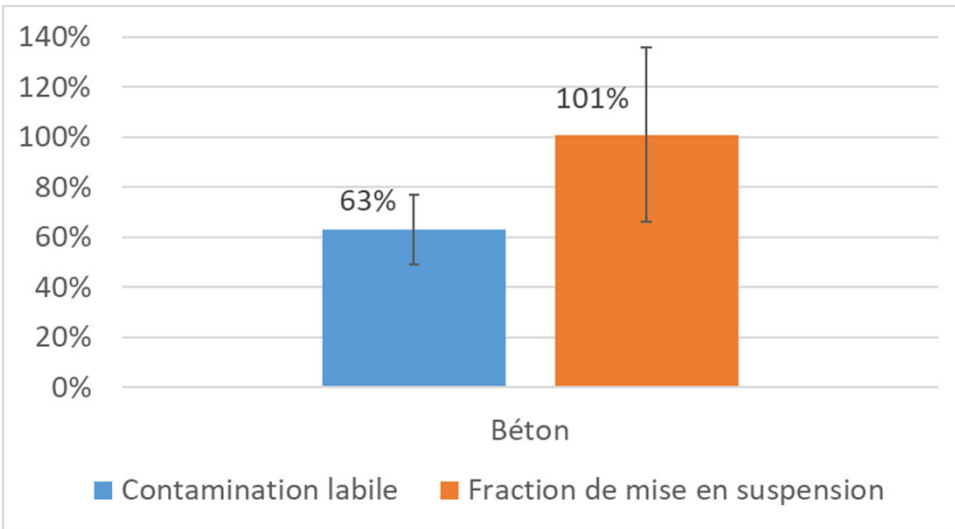
# Résultats de mise en suspension de la fluorescéine particulière : Surface en acier inoxydable



100 % contamination labile en suspension

Acier poli-miroir Vs Acier brut ⇒ Différence avec les forces d'adhésion

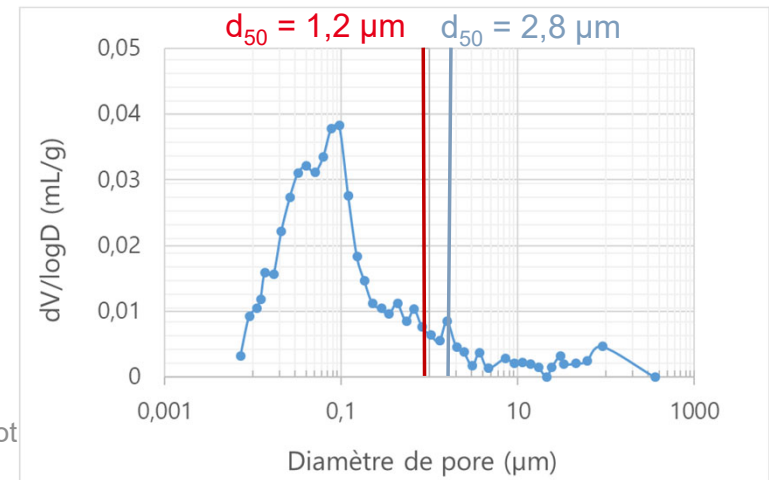
# Résultats de mise en suspension de la fluorescéine particulaire : Surface en béton



Contamination labile se fixe petit à petit lors du passage successif des frottis

Contamination labile :  
prélèvement par frottis ≠ prélèvement par stress aéraulique

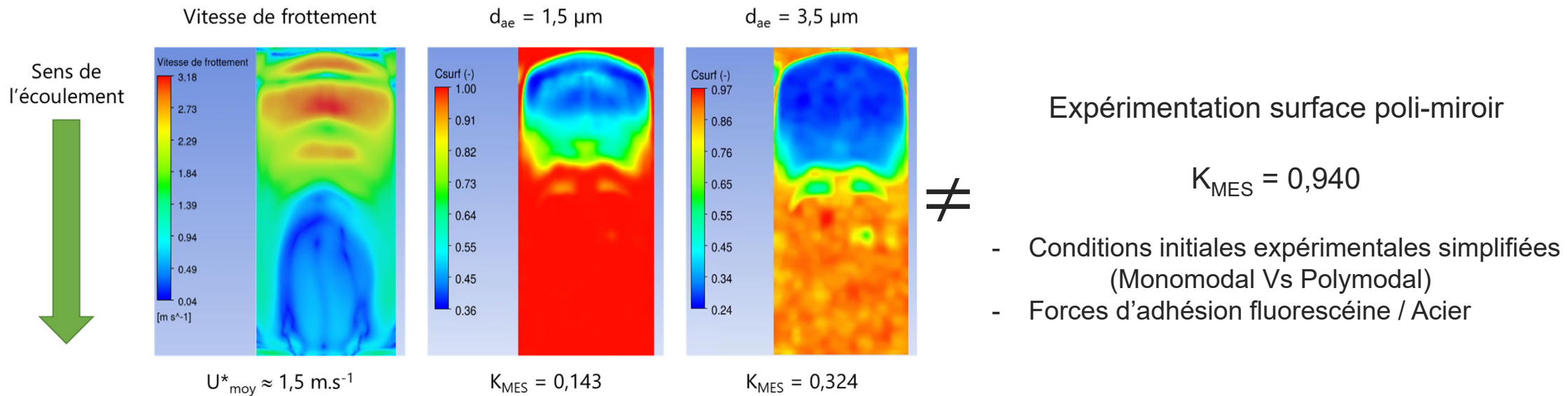
## Porosité du béton





# Simulation avec le modèle Rock'n roll

## Mise en suspension de fluorescéine particulaire



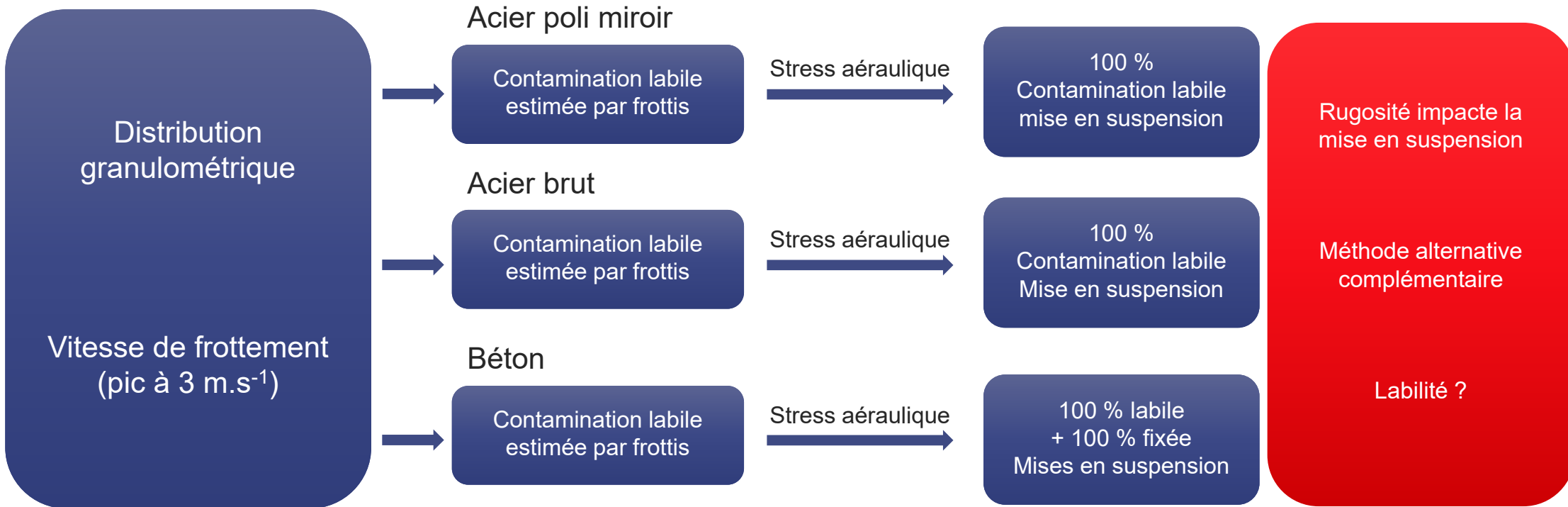
Dans les conditions de l'étude, le modèle numérique sous-estime le  $K_{\text{mes}}$ .

Les forces d'adhésion entre les particules et la surface ne sont pas prises en compte actuellement dans les modèles.



# Conclusion sur la mise en suspension

## Particules de fluorescéine





# 4. En conclusion ...

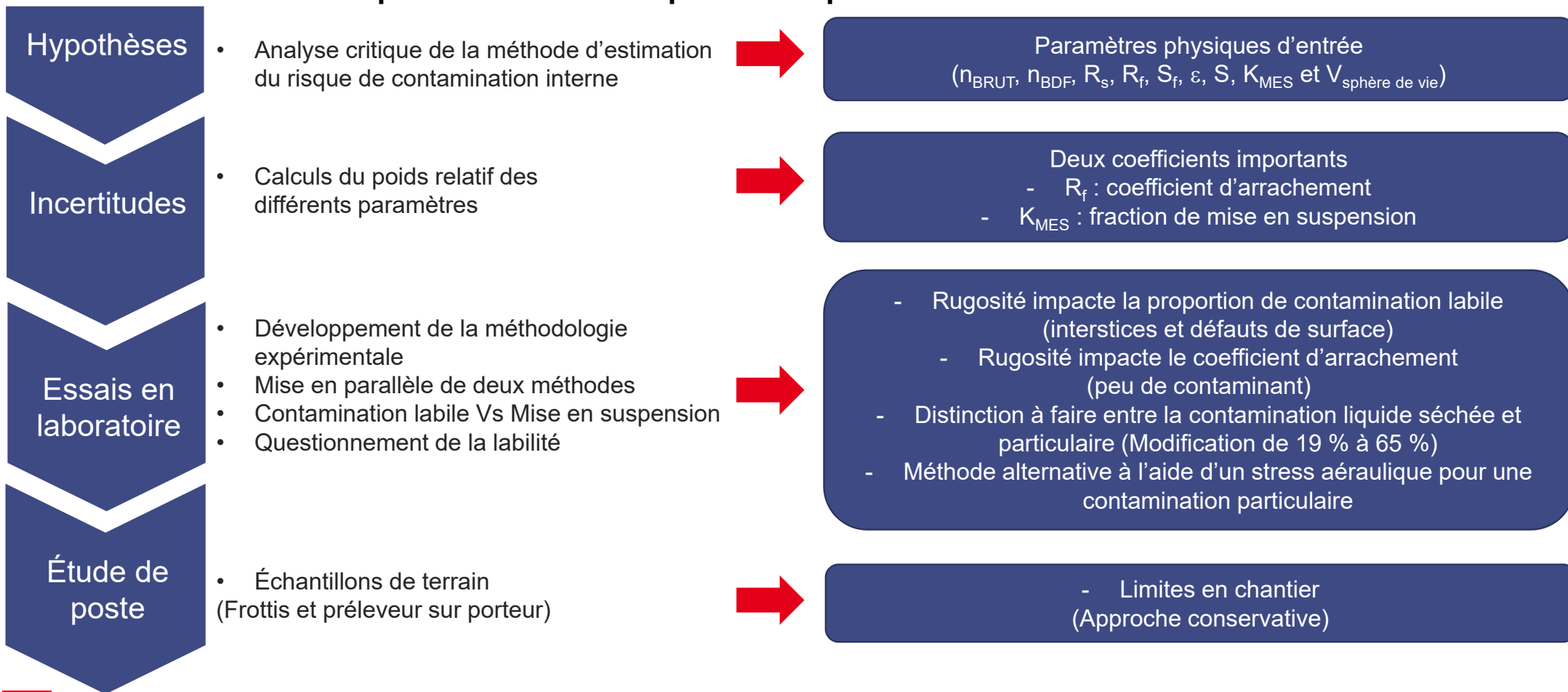
La méthode proposée



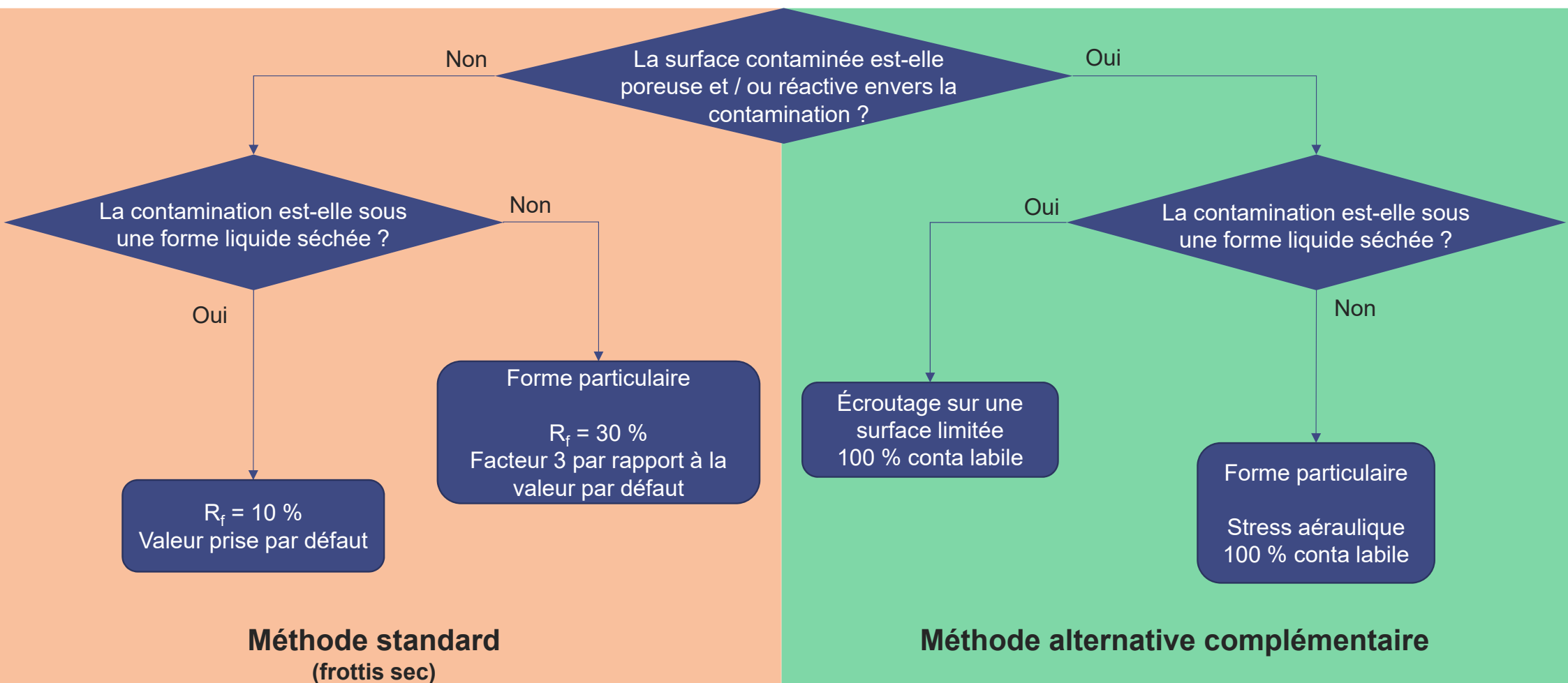


# Conclusion générale

## Proposer une méthode pour une optimisation du choix des EPI

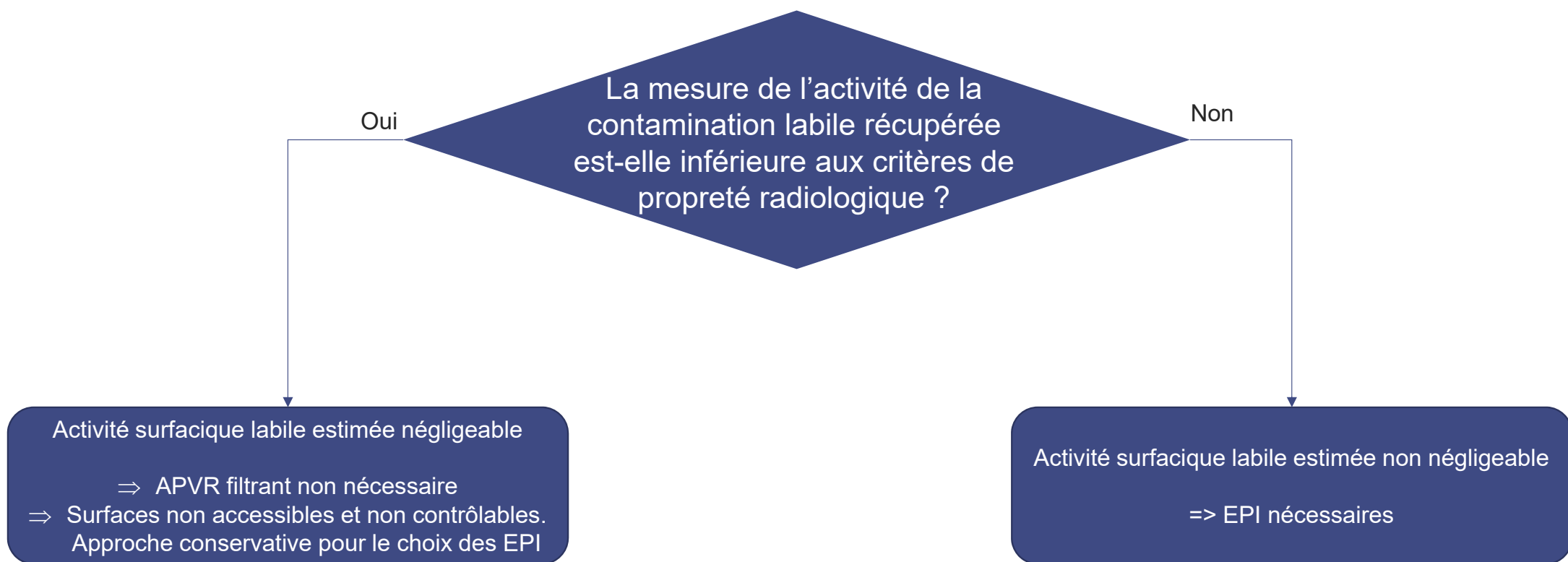


# Proposition d'une méthode d'estimation du risque de contamination interne pour l'optimisation du port des EPI (1/2)



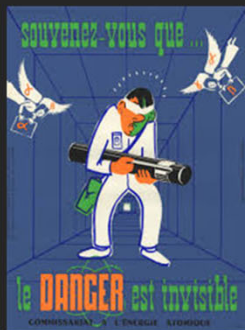


## Proposition d'une méthode d'estimation du risque de contamination interne pour l'optimisation du port des EPI (2/2)



The logo of the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), consisting of the lowercase letters 'cea' in white on a red square background, with a horizontal line underneath.

# Merci



**CEA MARCOULE**  
Pôles de compétence en radioprotection  
30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex  
France