

## CONTEXTE

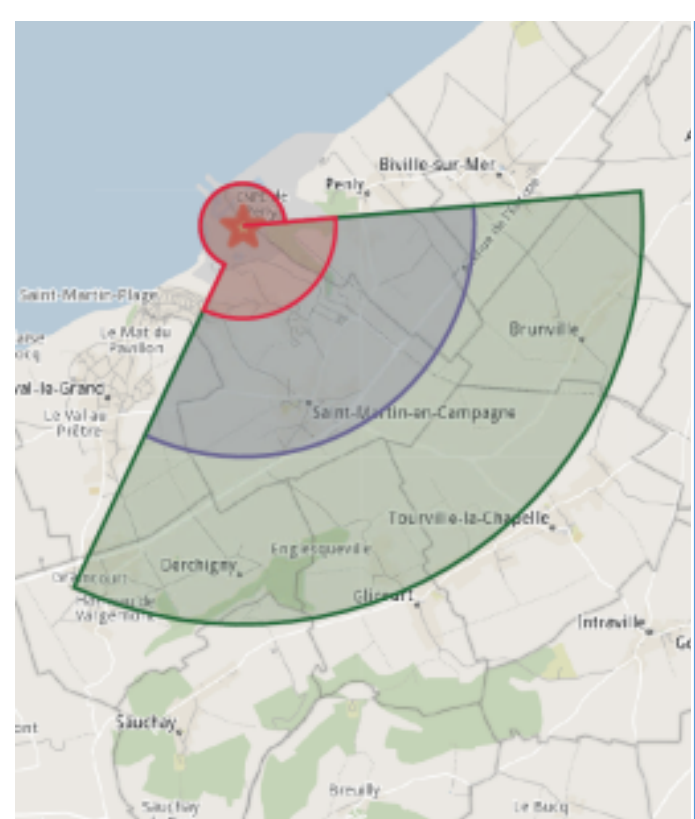
En cas de rejets accidentels de radioactivité dans l'atmosphère, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) recommande des mesures de protection en fonction d'estimations de distances maximales de dépassement de seuils de dose, ainsi que des ouvertures angulaires sur le territoire susceptible d'être concernée. Ces valeurs sont estimées sur la base de la situation météorologique actuelle et d'une évaluation du terme source. À cet effet, l'IRSN développe et utilise un modèle gaussien à bouffées, pX, pour effectuer ces calculs. Ce modèle est embarqué dans la plateforme opérationnelle de réponse d'urgence C3X de l'IRSN. Pour l'ensemble de la chaîne de calcul (y compris les pré et post-traitements), cinq à dix minutes peuvent être nécessaires, selon la configuration.

### Fiches pré-calculées pour les scénarios d'accident

La première réponse de l'IRSN s'appuie généralement sur des scénarios pré-calculés rassemblés dans des "Fiches Accidents Types" (FAT). Cette base de données a été pré-construite et elle repose sur des calculs effectués pour des scénarios accidentels et des situations météorologiques simples, décrits par quelques paramètres supposés constants et homogènes sur le domaine de simulation.

Cependant, toutes les situations météorologiques possibles ne peuvent être couvertes par une seule fiche opérationnelle. D'autres paramètres de rejet et de dispersion peuvent également varier par rapport aux hypothèses de calcul faites dans la FAT. Ainsi, des calculs peuvent être nécessaires pour ajuster ces paramètres à la situation actuelle.

### Zones de protection d'urgence après un accident nucléaire



Trois zones de protection sont considérées dans cette étude :

- Une **zone de mise à l'abri**, où la dose efficace totale simulée sur 24 heures est supérieure à 10 mSv,
- Une **zone d'évacuation**, où la dose efficace totale simulée sur 24 heures est supérieure à 50 mSv,
- Une **zone de prophylaxie à l'iode stable**, où la dose équivalente simulée à la thyroïde due à l'inhalation sur 24 heures est supérieure à 50 mSv.

### Méta-modèles

Les **méta-modèles** sont des modèles de substitution pour le modèle de calcul original, utilisés pour approximer certaines de ses réponses scalaires. Ce sont des fonctions statistiques construites à partir d'un grand nombre de simulations, dans le but de prédire de nouvelles réponses avec un temps d'évaluation négligeable. L'objectif de cette étude est d'utiliser des méta-modèles pour pouvoir prédire rapidement les trois zones de protection d'urgence dans un contexte opérationnel.



## MÉTHODE

### Méta-modélisation par Krigeage

La construction des méta-modèles repose sur la simulation de milliers de cas pour couvrir un large éventail d'hypothèses. Pour chaque variable d'entrée, un tirage est effectué sur sa plage de variation (cf. tableau ci-dessous), afin de rendre les méta-modèles fiables sur l'ensemble de l'espace des possibles. Ici, 2048 points ont été utilisés dans un espace à cinq dimensions. Pour chaque point, une simulation a été effectuée. Ces 2048 simulations ont été utilisées comme échantillon d'entraînement pour construire des méta-modèles par la méthode du Krigeage.

La principale limite des méta-modèles est qu'ils ne permettent que d'estimer la réponse de sorties scalaires. Or, dans notre étude, les sorties de modèle sont des cartes de dose projetées sur un maillage de 36 x 62 points. Il est donc nécessaire de réduire la dimension de nos sorties.

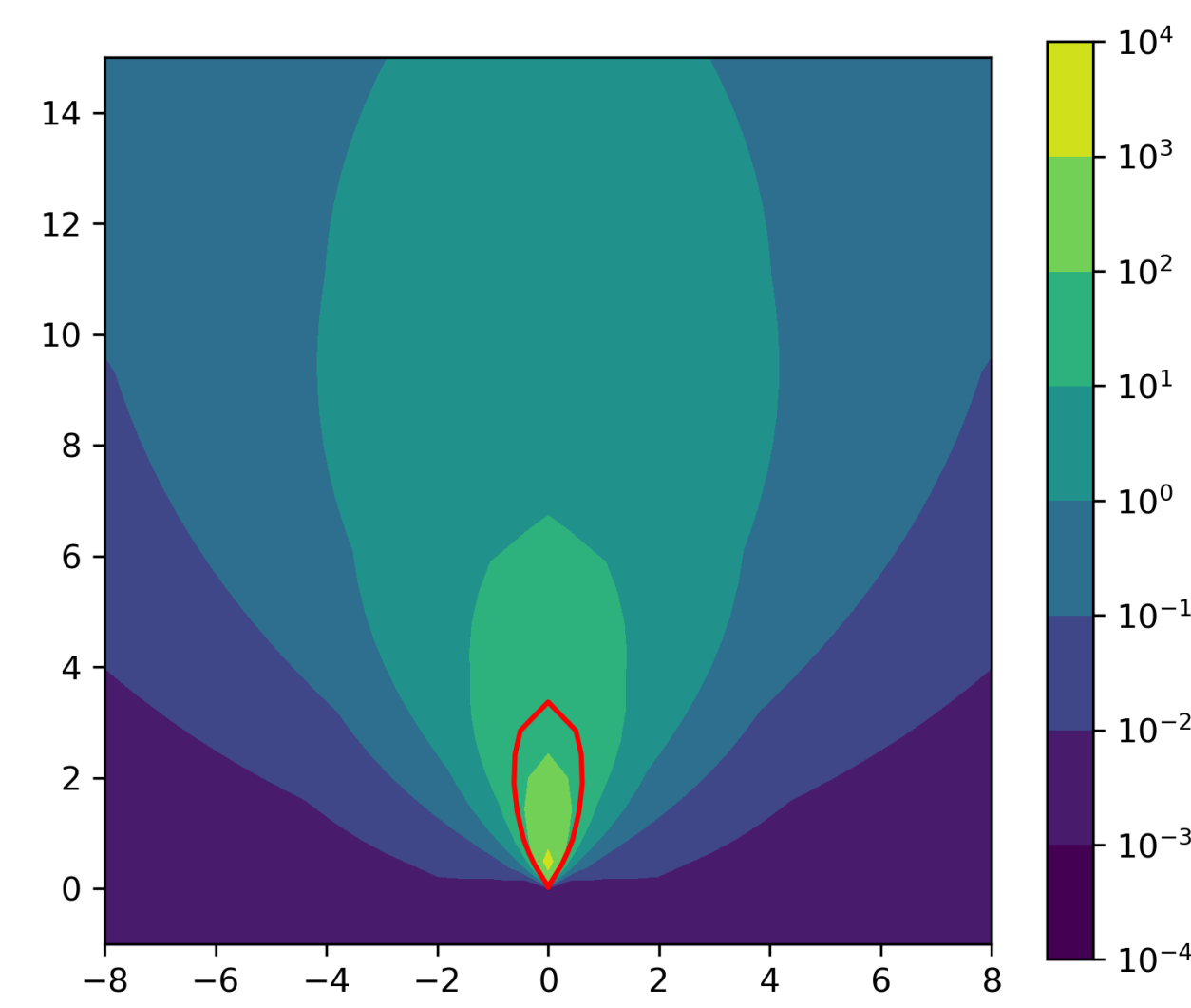


Figure 1 - Exemple de carte de dose inhalation (mSv) obtenue par simulation. L'isoligne rouge correspond au dépassement du seuil de 50 mSv qui nous intéresse.

Variable d'entrée	Plage de variation	Unité
Hauteur de rejet	[0, 100]	m
Module du vent	[0, 10]	m/s
Direction du vent	[0, 360]	deg
Intensité de la pluie	[0, 10]	mm/h
Facteur de battement de vent	[1, 3]	
Amplitude du terme source	[10, 100]	%

### Modèles Auto-Associatifs (MAA)

Les **modèles auto-associatifs (MAA)** sont une extension non-linéaire de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) basée sur des approximations successives d'ensembles de points par des variétés différentiables de dimension croissante (Stephane Girard 2000). Une variété, au sens mathématique du terme, peut être vue comme un ensemble de l'espace, potentiellement courbé. De la même manière que les droites et les plans sont des espaces vectoriels de dimension 1 et 2 respectivement, les courbes et les surfaces sont des variétés de dimension 1 et 2 respectivement. Là où l'ACP travaille de manière linéaire, les MAA travaillent de manière non-linéaire en faisant appel à des variétés pour paramétrer les données.

En utilisant ces modèles auto-associatifs sur une grille 2D de données de dose, il est donc possible de définir plusieurs variétés mathématiques, mais surtout un ensemble de scores, faisant office de coordonnées, associés à ces variétés, qui permettent ensuite de caractériser chaque carte de dose. Dans notre étude, nous nous sommes limités à 8 scores scalaires.

## RÉSULTATS

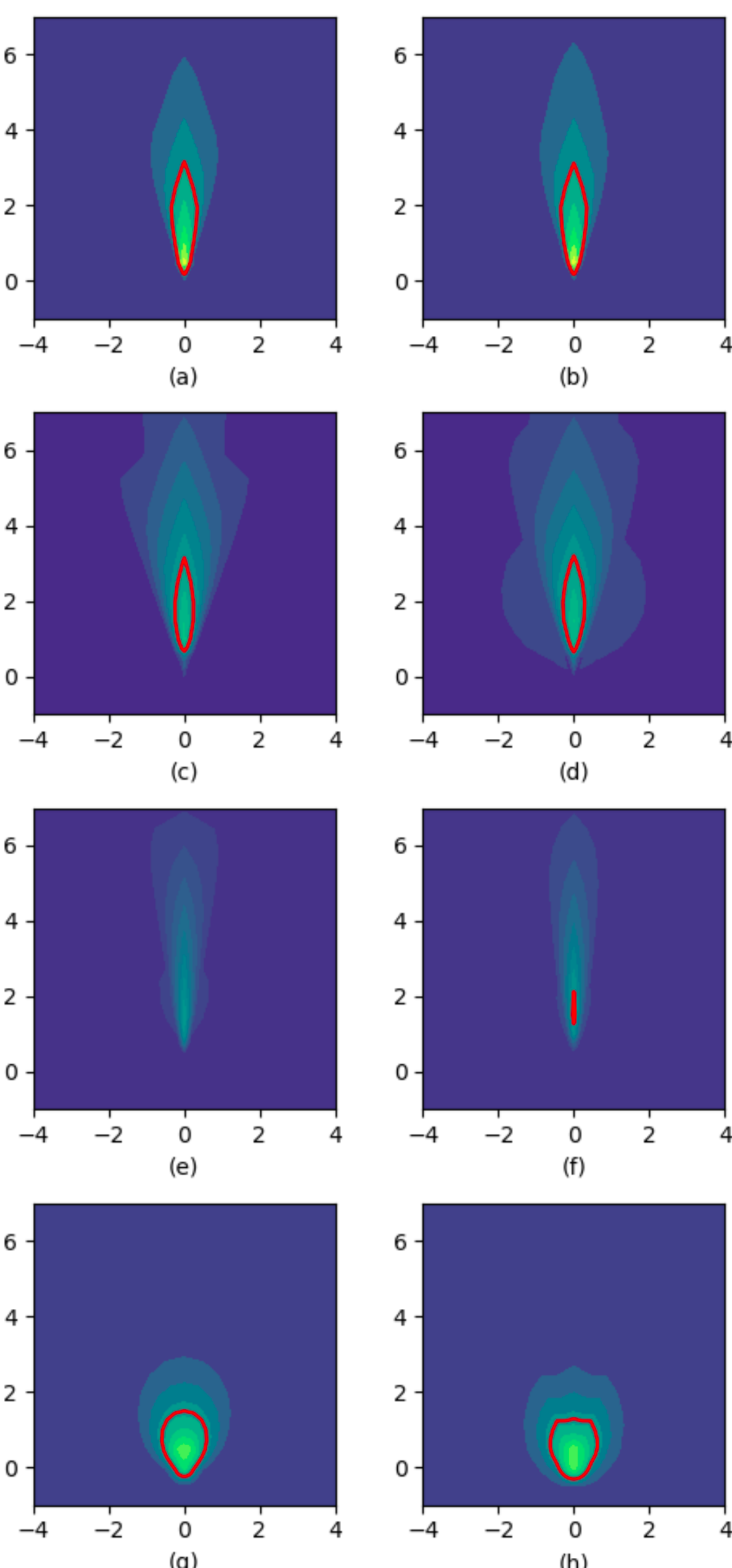


Figure 2 - Exemples de cartes de dose inhalation, pour des résultats simulés à gauche et des résultats prédits par méta-modèle à droite. La plupart des isolignes de dépassement de seuil sont bien reconstruites (comme (b) et (d)), tandis que d'autres le sont moins (comme (f) et (h)).

Grâce à du Krigeage, il est possible d'obtenir une prédiction des 8 scalaires des MAA à partir d'un choix de valeurs pour les entrées du modèle. Avec les MAA, cette prédiction des 8 scalaires peut être transformée ensuite en une carte 2D de dose, qui nous permet également de trouver une isoligne de dépassement de seuil. La succession des deux méthodes permet donc de passer des entrées du modèle à une carte de décision, définie par une isoligne, pour estimer si oui ou non un seuil de référence a été dépassé.

Nous avons évalué l'adéquation de ces surfaces prédites avec celles simulées en calculant la FMS des simulations de notre échantillon de test en figure 3. La grande majorité des FMS sont proches de 1, ce qui implique que les isolignes prédites sont souvent similaires à celles obtenues par simulation.

### Comparaison des différentes méthodes d'estimation

Dans une étude précédente, un méta-modèle a été créé pour prédire directement, sans utiliser les MAA, la distance maximale de la zone de dépassement de seuil donnée par le modèle, ainsi que l'ouverture angulaire réelle de cette zone. Afin d'observer si notre méta-modèle donne des résultats pertinents, il peut être utile aussi de le comparer aux résultats de cet autre méta-modèle, ainsi qu'aux résultats qui seraient obtenus en crise par la FAT et qui seraient utilisés pour prendre des décisions. Nous faisons cette comparaison sur la figure 4, avec l'ajout d'une quatrième méthode : l'utilisation des méta-modèles couplés aux MAA, mais avec un seuil de dose légèrement plus faible (logarithme du seuil de dose divisé par 1,1). L'objectif est de prendre une marge sur les résultats obtenus par le méta-modèle, afin de diminuer les mauvaises décisions.

Deux types de mauvaises décisions sont à prendre en compte : les faux-positifs, qui correspondent aux régions où le méta-modèle prédit un dépassement de seuil de dose alors que le modèle numérique prédit le contraire, et les faux-négatifs où c'est l'inverse. Ces deux surfaces d'erreurs peuvent s'observer sur un échantillon de test pour estimer la pertinence des méta-modèles pour la décision. En pratique, on essaye d'aboutir à des méthodes qui minimisent principalement les faux-négatifs, car ils impliquent souvent une absence de décision dans une région de l'espace où le modèle numérique initial affirme que ce serait nécessaire. La figure 4 montre que les méta-modèles construits par MAA et avec une marge permettent d'obtenir un taux de faux-négatifs aussi faible que celui des FAT, tout en ayant un taux de faux-positifs moins élevé, ce qui permet d'éviter une prise de décision qui ne serait pas nécessaire.

### Utilisation opérationnelle

Dans un contexte opérationnel, les méta-modèles peuvent prédire les zones de protection d'urgence. Une interface graphique peut être utilisée qui permet aux utilisateurs de voir l'effet de chaque entrée sur les zones. Ils peuvent également être utilisés pour des approches probabilistes où des centaines de résultats doivent être obtenus rapidement.

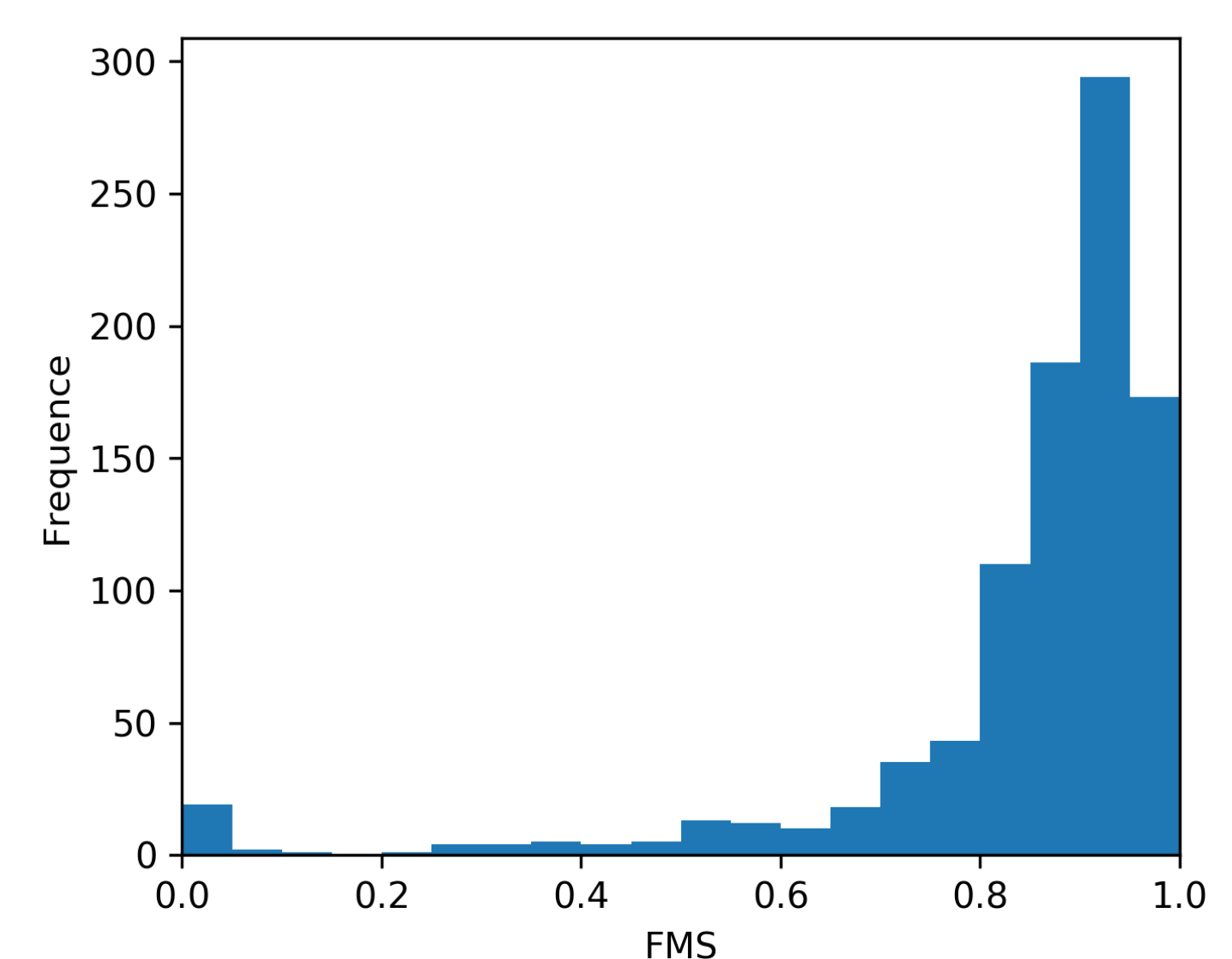


Figure 3 - Histogramme de la FMS qui compare les surfaces de dépassement de seuil pour les sorties de modèle avec les approximations par MAA, sur 1000 simulations de test. La majeure partie des résultats sont entre 0,80 et 1,00, ce qui témoigne d'une bonne reconstruction de ces surfaces.

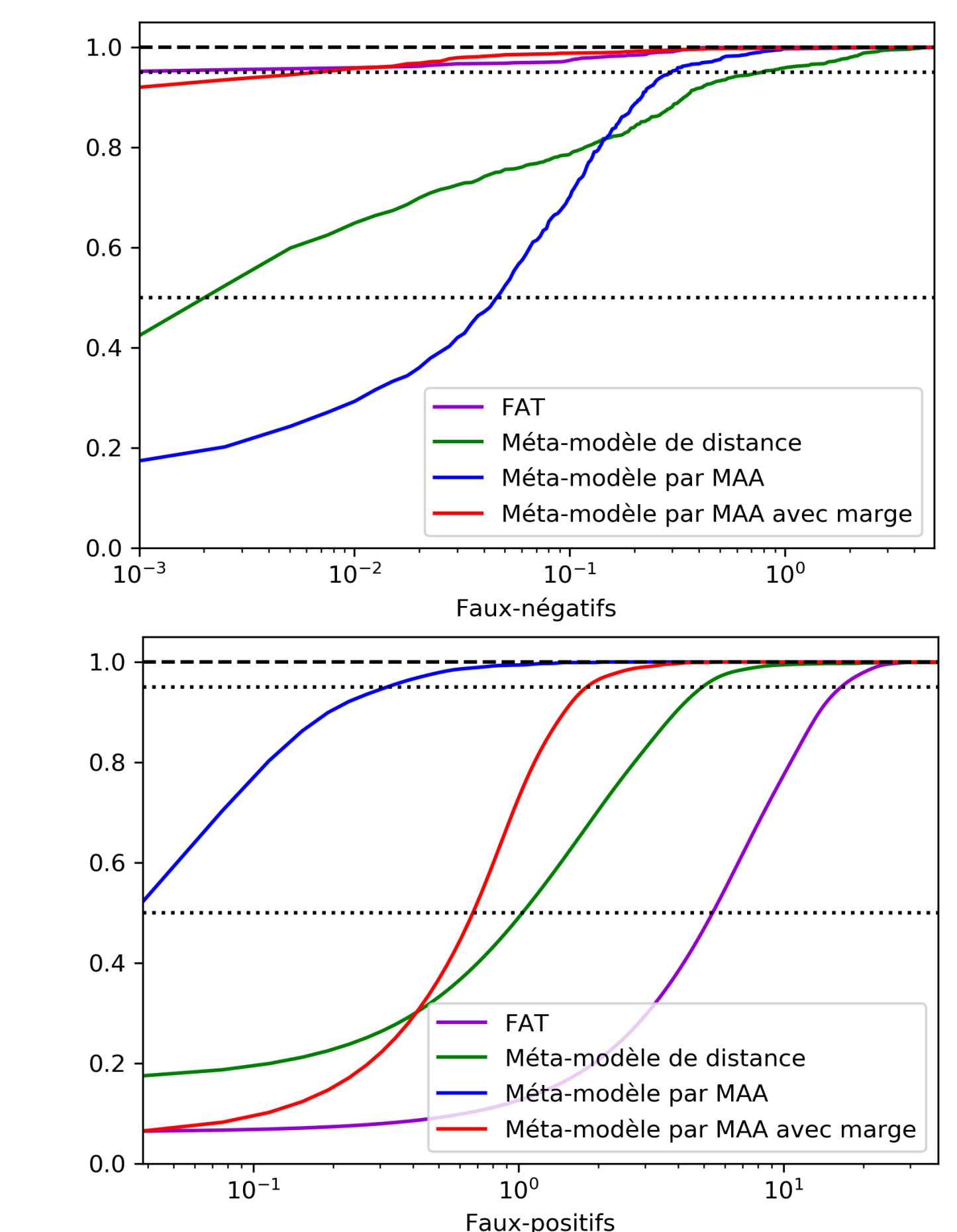


Figure 4 - Fonction de répartition de la probabilité d'obtenir des faux-négatifs et des faux-positifs pour les différentes méthodes de prévision utilisées et mises au point dans nos travaux. Plus les courbes sont proches de 1, plus la méthode associée a une forte probabilité d'obtenir des erreurs faibles.