



HAL
open science

Construction de fonctions de sensibilité spatiales et prédictions rapides de diagraphies nucléaires en environnement de puits tubés

Geoffrey Varignier

► **To cite this version:**

Geoffrey Varignier. Construction de fonctions de sensibilité spatiales et prédictions rapides de diagraphies nucléaires en environnement de puits tubés. Physique [physics]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2024. Français. NNT : 2024GRALY026 . tel-04728536

HAL Id: tel-04728536

<https://theses.hal.science/tel-04728536v1>

Submitted on 9 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : PHYS - Physique

Spécialité : Physique appliquée

Unité de recherche : CEA Cadarache - fusion (IRFM pour ED 352)

Construction de fonctions de sensibilité spatiales et prédictions rapides de diagraphies nucléaires en environnement de puits tubés

Construction of spatial sensitivity functions and fast forward modeling of nuclear logs in cased hole environment

Présentée par :

Geoffrey VARIGNIER

Direction de thèse :

CEDRIC CARASCO

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CEA - CENTRE DE CADARACHE

Directeur de thèse

JOHANN COLLOT

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Co-directeur de thèse

MAI-LINH DOAN

MAITRESSE DE CONFERENCES HDR, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Co-directrice de thèse

Rapporteurs :

PIERRE HENRY

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS DELEGATION PROVENCE ET CORSE

JEAN-CLAUDE ANGELIQUE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSI CAEN

Thèse soutenue publiquement le 18 juin 2024, devant le jury composé de :

ELSA MERLE,

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, GRENOBLE INP

Présidente

PIERRE HENRY,

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS DELEGATION PROVENCE ET CORSE

Rapporteur

JEAN-CLAUDE ANGELIQUE,

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSI CAEN

Rapporteur

BENOIT GALL,

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE STRASBOURG

Examineur

PHILIPPE PEZARD,

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS DELEGATION OCCITANIE EST

Examineur

Invités :

BERTRAND PEROT

DIRECTEUR DE RECHERCHE, CEA - CENTRE DE CADARACHE

THOMAS MARCHAIS

DOCTEUR, INGENIEUR-CHERCHEUR, CEA - CENTRE DE CADARACHE

PIERRE CHUILON

INGENIEUR DE RECHERCHE, CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE JEAN FEGER (CSTJF), TOTALENERGIES

EMMANUEL CAROLI

INGENIEUR DE RECHERCHE, CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE JEAN FEGER (CSTJF), TOTALENERGIES



Remerciement

Cette thèse CIFRE a été effectuée sous la direction de Cédric CARASCO, Johann COLLOT et Mai Linh DOAN. Elle s'est déroulée à la fois au sein du LMN (Laboratoire de Mesures Nucléaires) au CEA de Cadarache et au sein du département WAI (*Well Acquisition and Interpretation*) au CSTJF de TotalEnergies sous la supervision de Pierre CHUILON et Emmanuel CAROLI.

Je remercie Elsa MERLE d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je tiens également à remercier Jean-Claude ANGELIQUE et Pierre HENRY pour leur lecture approfondie du manuscrit en tant que rapporteurs, ainsi que pour leurs questions et remarques pertinentes. Je remercie Benoit GALL et Philippe PEZARD, non seulement pour avoir accepté de faire partie de mon Comité de Suivi Individuel (CSI) durant ces trois années, mais aussi pour leur participation à mon jury de thèse en tant qu'examinateurs. Leurs remarques et conseils ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mes encadrants, Cédric CARASCO, Bertrand PEROT, et Thomas MARCHAIS, du CEA. Ils ont su m'enseigner, avec passion et, surtout, avec patience, la mesure et la simulation nucléaire. Je souhaite saluer ici le dévouement avec lequel ils partagent sans réserve leurs connaissances scientifiques avec les stagiaires et les doctorants du laboratoire.

Je tiens à exprimer ma gratitude sincère envers mes encadrants, Pierre CHUILON et Emmanuel CAROLI, de TotalEnergies. Pendant près de cinq années, j'ai eu le privilège de travailler à leurs côtés. Ils ont toujours pris soin de m'enseigner, avec énergie et détermination, toutes les subtilités de la pétrophysique et de la mesure diagraphique en forage.

Merci également à Johann COLLOT et Mai Linh DOAN de l'Université Grenoble Alpes pour avoir été de bon conseil, à la fois sur les publications scientifiques et sur l'orientation des travaux de thèse.

Je remercie aussi à cette occasion, les équipes du LMN (CEA) et les équipe de WAI (TotalEnergies), avec qui j'ai eu des échanges scientifiques et techniques toujours très constructifs. Ils ont contribué également à l'aboutissement de ce travail.

Pour finir je souhaiterais exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille, qui a été un pilier essentiel tout au long de ces trois années de thèse. Je remercie ma compagne Audrey, qui a su être un soutien sans faille durant cette période exigeante. Tes encouragements et ta patience m'ont été indispensables.

Je remercie mes parents, Patricia et Christian, pour leur aide inconditionnel et leur encouragement constant. Votre soutien moral et votre support logistique exceptionnel m'ont permis d'aller de l'avant avec sérénité. Depuis toujours vous êtes un modèle d'exemplarité pour moi. Je tiens aussi à remercier mon frère Lucas et sa compagne Sarah, pour leur présence bienveillante et leur humour subtil qui m'ont été précieux dans les moments de travail intense.

Un grand merci à mes oncles Stéphane et Yvan, pour leur soutien et leurs conseils avisés. Ils sont une grande source d'inspiration pour moi. Je remercie également tous les autres membres de ma famille et notamment ma grand-mère Blanche, qui m'a encouragé pendant cette période. Enfin, je remercie mes amis Jordan et Loïc, qui ont su être là pour moi, m'offrant leur soutien tout au long de mon parcours ainsi que de précieux moments de détente.

Sommaire

Introduction	1
1. État de l'art du calcul des fonctions de sensibilité des outils de diagraphies nucléaires	5
1.1 La simulation Monte-Carlo des outils de diagraphies nucléaires	7
1.1.1 Généralités sur la simulation numérique Monte-Carlo	7
1.1.2 Les modèles génériques des outils diagraphiques	8
1.1.3 Outils gamma-gamma de litho-densité et du facteur photoélectrique (PEF)	9
1.1.4 Outils neutron-neutron de porosité hydrogène (PHI)	10
1.1.5 Outils neutron-gamma basés sur l'analyse de la décroissance temporelle du signal neutronique post-impulsion (Sigma)	12
1.1.6 Outils neutron-gamma basés l'analyse spectrale du signal neutronique pendant l'impulsion ou post-impulsion (C/O et spectroscopie)	13
1.2 Introduction aux fonctions de sensibilité	16
1.2.1 Les techniques de réduction de variance utilisées dans le calcul des fonctions de sensibilité	16
1.2.2 Les fonctions de sensibilité des outils diagraphiques nucléaires	18
1.2.3 Calcul des fonctions de sensibilité de flux avec la méthode du WW	19
1.2.4 Projection des fonctions de sensibilité en 2D puis en profils 1D	22
1.2.5 Algorithmes de prédiction rapide des diagraphies nucléaires (algorithmes de FFM)	25
1.3 Paramètre de formation spécifique à la mesure neutron-neutron de porosité	28
1.3.1 Non-linéarité de la longueur de migration	28
1.3.2 Implémentation du paramètre de formation composite Fp	30
1.3.3 Prédiction des diagraphies de porosité	32
1.4 Fonctions de sensibilité de l'outil Sigma	36
1.4.1 Calcul de la fonction de sensibilité de flux de l'outil neutron-gamma Sigma	36
1.4.2 Prédiction des diagraphies Sigma	38
1.5 Conclusion et apport de la thèse	41
2. Comparaison entre MCNP et GEANT4 pour des applications de géosciences	43
2.1 La simulation Monte-Carlo des outils de diagraphies nucléaires	45
2.1.1 Introduction	45
2.1.2 Les codes de transport MCNP et GEANT4	45
2.1.3 Paramétrage des simulations	46
2.1.4 Modèles géométriques	47
2.2 Comparaison MCNP et GEANT4	50
2.2.1 Simulation des mesures gamma-gamma de litho-densité	50
2.2.2 Simulation de mesures neutron-neutron de porosité	53
2.2.3 Simulation des mesures neutron-gamma du ratio C/O	54
2.3 Conclusions	61

3.	Validation des fonctions de sensibilité et algorithmes de prédiction rapide pour l'outil de porosité	63
3.1	Méthodes de calcul des fonctions de sensibilité	65
3.1.1	Introduction	65
3.1.2	Méthode des fenêtres de poids	66
3.1.3	Méthode du suivi de particule	67
3.1.4	Géométrie de la sonde neutron-neutron de porosité	68
3.2	Expérience de perturbation axiale et radiale	72
3.2.1	Présentation du dispositif expérimental	72
3.2.2	Résultats des expériences de perturbation	75
3.3	Comparaison des taux de comptages mesurés et simulés	79
3.3.1	Corrections des pertes électroniques	79
3.3.2	Comparaison des profils simulés et mesurés	80
3.4	Validation expérimentale de la fonction de sensibilité d'un outil de porosité	83
3.4.1	Comparaison des méthodes de calcul des fonctions de sensibilité	83
3.4.2	Validation expérimentale du concept de fonction de sensibilité	86
3.5	Prédiction rapide des diagraphies de porosité	89
3.5.1	Sélection de la fonction de sensibilité adaptée aux puits tubés	89
3.5.2	Modèles de prédiction rapide des diagraphies de porosité hydrogène neutron-neutron	91
3.6	Conclusion	99
4.	Validation des fonctions de sensibilité et algorithmes de prédiction rapide pour l'outil Sigma	101
4.1	Résumé en Français	103
4.2	Abstract	103
4.3	Introduction	104
4.4	Neutron-gamma Sigma measurements	105
4.5	Methods to calculate sensitivity functions	108
4.5.1	Weight Window method	108
4.5.2	Particle Tracking method	108
4.6	Axial and radial heterogeneity experiments	110
4.6.1	Experimental setups	110
4.6.2	Measurements results	112
4.7	Comparison between experimental results and simulations	115
4.8	Comparison between sensitivity function methods	119
4.9	Experimental validation of sensitivity functions	121
4.10	Cased hole sensitivity functions based on particle interactions or flux	126
4.11	Calibration of Fast Forward Modeling	128
4.12	Experimental validation of Sigma log predictions	130
4.12.1	Calibration facility measurements	130
4.12.2	Production well measurements	131

Sommaire

4.13 Conclusion	133
Conclusion générale	135
Perspectives	139
Bibliographie	143

Glossaire

<i>Open hole</i>	Puits ouvert
<i>Cased hole</i>	Puits tubé
WL	<i>Wireline</i>
LWD	<i>Logging While Drilling</i>
NMR	<i>Nuclear Magnetic Resonance</i>
<i>Casing</i>	Tubage (ou cuvelage) en acier
<i>Standoff</i>	Espace entre l'outil diagraphique et le puits pétrolier
<i>Mudcake</i>	Épaisseur de la gangue de boue qui se forme sur la paroi du puits
PU	<i>Porosity Units</i>
Φ	Porosité intrinsèque
PHI	<i>Porosity Hydrogen Index</i>
BPHI	<i>Best Porosity Hydrogen Index</i>
Rhoe	Masse volumique électronique (g.cm^{-3})
ρ_e	Masse volumique électronique (g.cm^{-3})
Rhob	Masse volumique <i>bulk</i> (g.cm^{-3}), i.e. de grain équivalent à Rho
ρ_b	Masse volumique <i>bulk</i> (g.cm^{-3}), i.e. de grain équivalent à ρ
PEF	<i>PhotoElectric Factor</i> (barns/e-), appelé aussi indice photoélectrique
CU	<i>Capture Unit</i>
σ	Section efficace microscopique (cm^2)
Sigma	Section efficace macroscopique totale (cm^{-1}) ou (CU)
Σ	Section efficace macroscopique totale (cm^{-1}) ou (CU)
C/O	Carbone/Oxygène
CPS	<i>Counts Per Second</i>
FFM	<i>Fast Forward Modeling</i>
UTAPWeLS	Nom du logiciel de pétrophysique
<i>Longhorn</i>	Nom de la série d'outils génériques
PNC	<i>Pulse Neutron Capture</i>
INS	<i>Inelastic Neutron Scattering</i>
TNC	<i>Thermal Neutron Capture</i>
GEANT4	<i>GEometry ANd Tracking</i> , logiciel de simulation Monte-Carlo
MCNP	<i>Monte-Carlo N-Particle</i> , logiciel de simulation Monte-Carlo
<i>Tally</i>	Score ou estimateur d'une grandeur d'intérêt dans MCNP basé sur des tirages
<i>Tally F4</i>	Estimateur de flux volumique sur une cellule
<i>Tally F8</i>	Histogramme des dépôts d'énergie dans une cellule comme un détecteur
FSF	<i>Flux Sensitivity Function</i>
ISF	<i>Interaction Sensitivity Function</i>
Ls	Longueur de ralentissement (cm) appelée <i>slowing-down length</i>
Ld	Longueur de diffusion (cm) appelée <i>diffusion length</i>
Lm	Longueur de migration (cm) appelée <i>migration length</i>
R	Vecteur position radiale
Z	Vecteur position axiale (ou profondeur, <i>depth</i>)
Ω	Vecteur position azimutale
PEHD	Polyéthylène haute densité
PVC	Polychlorure de vinyle
<i>Cuttings</i>	Copeaux de roche
WWG	<i>Weight Window Generator</i>
WW	Méthode du <i>Weight Window</i>
PT	Méthode du <i>Particle Tracking</i>

Introduction

Dans les puits pétroliers, de nombreux outils fonctionnant sur différents principes physiques sont couramment utilisés pour l'acquisition de données. Ces outils appelés sondes diagraphiques fonctionnent sur des principes de physique acoustique (e.g. sonde sonique), électrique ou électromagnétique (e.g. sonde de résistivité) et résonance magnétique nucléaire (e.g. sonde NMR pour *Nuclear Magnetic Resonance*). D'autres sondes diagraphiques fonctionnent sur des principes de physique nucléaire comme la sonde neutron-neutron de porosité hydrogène (mesure de rétrodiffusion neutronique), la sonde gamma-gamma de litho-densité (rétrodiffusion gamma), la sonde neutron-gamma Sigma (mesure de la section efficace d'absorption neutronique par activation pulsée ou PNC pour *Pulsed Neutron Capture*) ou la sonde C/O (ratio Carbone/Oxygène par activation neutronique également).

Les outils de diagraphies nucléaires sont utilisés dans l'industrie pétrolière depuis plus de soixante-dix ans, principalement pour caractériser les réservoirs géologiques pétroliers et pour quantifier les hydrocarbures à proximité du puits. L'interprétation des données mesurées permet d'appréhender des grandeurs physiques des réservoirs rocheux tels que la porosité, la masse volumique, la lithologie, etc. Les sondes diagraphiques nucléaires ont d'abord été développées pour réaliser des mesures quantitatives en conditions de puits ouvert (i.e. la sonde est en contact direct avec la formation rocheuse), plutôt dans le domaine de l'exploration. Mais une fois le puits pétrolier foré, un tube en acier (ou *casing*), de diamètre inférieur à celui du forage, est installé afin de le sécuriser en évitant les effondrements des parois et/ou des invasions¹ de fluides de la formation rocheuse sous pression. Dès que le tubage est descendu et cimenté dans le puits pétrolier, les sondes ne sont plus en contact avec la formation rocheuse et on parle de conditions de puits tubé. Les mesures en puits tubé sont considérées comme étant plus qualitatives que quantitatives en raison de la complexité de la géométrie et de l'atténuation du signal liée aux différents éléments situés entre le réservoir d'hydrocarbures et l'outil diagraphique, comme le tubage en acier, le ciment et le fluide du puits.

Dans les conditions de puits ouvert, les données pétrophysiques fournies par les sociétés de service chargées des diagraphies (e.g. Baker Hughes, Schlumberger, Halliburton, etc.) sont suffisamment bonnes pour être directement intégrées dans les logiciels d'interprétation. Dans ces logiciels, seules de simples corrections environnementales (effet du diamètre du puits, effet de la salinité de la boue et du fluide de formation) sont appliquées aux données pétrophysiques (porosité hydrogène, densité bulk, Sigma, ratio C/O etc.) avant les calculs finaux de saturation en hydrocarbures des réservoirs.

Dans les conditions de puits tubé, les données sont dédiées à la surveillance des puits, notamment du mouvement ascendant du contact huile/eau dans les réservoirs. Ce mouvement ascendant traduit une diminution de la quantité d'hydrocarbures au cours du temps. L'huile étant plus légère que l'eau, plus le niveau d'eau monte, moins la quantité d'hydrocarbures disponible dans le réservoir est importante. Les calculs pétrophysiques basés sur ces données en puits tubé sont encore considérés comme très incertains (e.g. incertitude sur la saturation en eau et en hydrocarbures de l'ordre de 30%).

¹ Lors du forage pétrolier, de la boue est constamment injectée depuis la tête de forage (i.e. depuis le fond du puits) et pompée au sommet. Cela permet de faire circuler un fluide afin d'une part d'évacuer les copeaux de roche (*cuttings*) et d'autre part de maintenir une pression hydrostatique entre le fluide du puits (la boue) et les fluides des différentes formations (hydrocarbures ou eau). Quand la pression hydrostatique du fluide de forage est supérieure à la pression des fluides de formation, la boue s'introduit dans les pores de la roche, ce phénomène non désiré appelé « invasion » a comme conséquence de polluer une zone réservoir vierge (i.e. remplacer en partie le fluide de la formation sur les premières dizaines de centimètres).

Avec la raréfaction des ressources en hydrocarbures, le nombre de projets d'exploration (i.e. campagnes de prospection géophysique et forages de nouveaux puits) diminue chaque année. Les compagnies pétrolières ont de plus en plus de puits dont il faut maintenir les capacités de production, mais aussi de plus en plus de puits en fin de vie qu'il faut abandonner en s'assurant de leur parfaite étanchéité. Au stade de production, les puits sont toujours tubés et cimentés, seules les zones d'intérêts des réservoirs sont perforées (tubage avec crépine ou perforation à l'explosif) afin de produire des hydrocarbures. Le suivi des puits durant la phase de production et leur abandon ensuite passe systématiquement par des mesures diagraphiques en présence de tubage et de ciment. Ainsi, la quantité de diagraphies en configuration de puits tubé tend à fortement augmenter, alors qu'initialement elles étaient réalisées essentiellement en puits ouvert lors de l'exploration.

C'est la raison pour laquelle les compagnies pétrolières souhaitent développer l'exploitation des données de diagraphie en puits tubé. Elles souhaitent pouvoir accéder aux caractéristiques des réservoirs d'hydrocarbures à travers le tubage et le ciment, mais aussi mieux quantifier et caractériser l'architecture du puits. Dès lors, le problème industriel n'est plus seulement de caractériser les grandeurs pétrophysiques de la formation rocheuse, mais tous les éléments du puits, y compris les fluides, le tubage et le ciment. En raison du grand nombre de variables, une inversion multi-physique considérant simultanément différentes mesures de sondes diagraphiques est nécessaire.

Un certain nombre de sondes sont déjà utilisées en configuration de puits tubé, comme les sondes soniques ou électromagnétiques qui permettent de quantifier l'épaisseur et l'intégrité du tubage, par exemple la corrosion. Cependant, de manière générale, les outils fonctionnant sur des principes de physique acoustique, électrique ou électromagnétique, et de résonance magnétique nucléaire, sont très sensibles au tubage et au ciment et ne sont pas utilisables seuls en configuration de puits tubé pour mesurer les caractéristiques de la formation rocheuse et de l'architecture du puits. De plus, ces outils nécessitent un bon couplage entre la sonde et la formation rocheuse, ce qui n'est pas toujours possible en cas de mauvaise cimentation, entraînant la présence de lamelles d'eau entre le tubage et le ciment, ou bien entre le ciment et la paroi rocheuse.

Le travail de thèse décrit ici se concentre sur les outils actifs de diagraphies nucléaires, i.e. possédant une source radioactive ou un générateur de neutrons. Ces outils de porosité hydrogène neutron-neutron, de litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma, de décroissance temporelle du signal post impulsion (Sigma) ou du ratio C/O neutron-gamma sont capables de mesurer une information sur la formation rocheuse à travers le tubage et le ciment. L'objectif de la thèse est de mettre au point une méthode de calcul des fonctions de sensibilité spatiale de ces outils pour les puits tubés, avec des codes de transport de particules basés sur la méthode de Monte-Carlo comme MCNP et GEANT4, puis d'implémenter ces fonctions de dans des algorithmes de prédiction rapide des diagraphies. La qualité des diagraphies prédites sera évaluée expérimentalement.

Les algorithmes de prédiction rapide (appelés *Fast Forward Modeling algorithms* ou algorithmes de FFM) ont été développés par l'Université du Texas (Austin, USA) et sont contenus dans le logiciel de simulation de diagraphies UTAPWeLS (UTAPWeLS, 2020). Ils permettent de multiplier (ou convoluer) des fonctions de sensibilité en 3D par des modèles numériques de terrain contenant les caractéristiques physico-chimiques de la roche et du puits, également en 3D, dans le but de faire des prédictions de diagraphies. Il existe des bibliothèques de fonctions de sensibilité 3D pour chaque famille d'outils nucléaires (gamma-gamma, neutron-neutron, neutron-gamma), et par ailleurs UTAPWeLS permet de construire des modèles numériques de terrain 3D avec des données de densité ou des paramètres de transport neutroniques (comme les longueurs de ralentissement et de diffusion) en tous points de la formation rocheuse. Le puits lui-même n'est pas inclus dans la version délivrée par l'Université du Texas.

Les algorithmes du logiciel UTAPWeLS permettent de prédire des diagraphies nucléaires en configuration de puits ouvert, que ce soit les profils de taux de comptages des détecteurs ou ceux de grandeurs d'intérêt comme la masse volumique ou la porosité hydrogène. L'objectif de cette thèse est de les adapter pour prédire des diagraphies en configuration de puits tubé, d'abord pour la porosité hydrogène puis la section efficace macroscopique d'absorption des neutrons thermiques (Sigma). Afin de valider l'approche étudiée, les taux de comptages simulés avec les codes MCNP et GEANT4 seront confrontés à ceux mesurés dans un centre d'étalonnage, de même que les prédictions des diagraphies des grandeurs d'intérêt.

Au-delà de cette thèse, la finalité ultime est de réaliser, grâce aux fonctions de sensibilité et aux algorithmes de prédiction rapide étendus aux puits tubés, une inversion multi-physique pour reconstruire en 3D, à partir des mesures et des prédictions rapides, une architecture du puits (fluide, ciment et tubage) et une formation rocheuse (masse volumique, porosité, lithologie). Ce travail de thèse sera donc étendu à d'autres outils de litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma et de mesure du ratio C/O neutron-gamma.

Les grandes étapes de la thèse, exposées dans ce manuscrit, sont les suivantes.

- Chapitre 1: un état de l'art sur la simulation Monte-Carlo des outils actifs de diagraphies nucléaires, sur les fonctions de sensibilité spatiale et les moyens de les calculer par simulation numérique Monte-Carlo, sur les algorithmes de prédiction rapide (de FFM).
- Chapitre 2: une comparaison des codes MCNP et GEANT4 de transport de particules par la méthode de Monte-Carlo, pour trois outils nucléaires gamma-gamma, neutron-neutron et neutron-gamma utilisés dans l'industrie pétrolière.
- Chapitre 3 et chapitre 4: une validation des modèles d'outils numériques MCNP et GEANT4 ainsi que des fonctions de sensibilité grâce à des mesures de perturbation spatiale dans un centre d'étalonnage avec un outil neutron-neutron de porosité et un outil neutron-gamma Sigma du commerce, la comparaison de différentes approches de calcul Monte-Carlo des fonctions de sensibilité, la construction par simulation d'une bibliothèque d'étalonnage pour différentes sondes de diagraphies nucléaires actives (porosité, Sigma) et diverses configurations de puits tubés (diamètres de puits et tubage, épaisseurs de ciment, salinités, porosités), l'implémentation des fonctions de sensibilité dans des algorithmes de prédiction rapide étendus aux puits tubés, et enfin la validation de ces prédictions rapides par comparaison aux données expérimentales acquises en centre d'étalonnage. Toutes ces étapes sont présentées au chapitre 3 pour l'outil neutron-neutron de porosité et au chapitre 4 pour l'outil neutron-gamma Sigma.

1. État de l'art du calcul des fonctions de sensibilité des outils de diagraphies nucléaires

1.1 La simulation Monte-Carlo des outils de diagraphies nucléaires

1.1.1 Généralités sur la simulation numérique Monte-Carlo

Le transport des neutrons et des rayonnements gamma dans la matière peut être résolu de manière déterministe en utilisant des méthodes numériques pour des problématiques avec des géométries simples (Bertozzi *et al.*, 1981; Lewis *et al.*, 1984) ou des hypothèses simplifiées comme l'approximation de diffusion pour les neutrons thermiques (Tittle *et al.*, 1961). Cependant, dans le cas de géométries 3D complexes, une modélisation précise nécessite l'utilisation de codes de transport basés sur la méthode de Monte-Carlo. Le transport de millions de particules est simulé individuellement sur la base de leurs probabilités d'interaction dans les éléments de la géométrie modélisée. En se basant sur la loi des grands nombres, cette modélisation constitue une évaluation statistique de la réponse du détecteur. Ainsi, il est possible de modéliser les sondes diagraphiques nucléaires couramment utilisées dans l'industrie pétrolière, fonctionnant sur le principe des physiques neutron-neutron (rétrodiffusion neutronique), gamma-gamma (rétrodiffusion gamma) ou neutron-gamma (activation neutronique).

Les sociétés pétrolières et parapétrolières utilisent essentiellement le code de simulation MCNP (*Monte-Carlo N-Particle*, Kulesza, *et al.*, 2022) qui permet de modéliser la réponse des outils de diagraphies nucléaires dans divers environnements géologiques. MCNP est développé aux USA par le LANL (*Los Alamos National Laboratory*). Ce logiciel est considéré comme un standard dans l'industrie pétrolière et nucléaire. Une alternative à MCNP est GEANT4 (*GEometry ANd Tracking*, Agostinelli *et al.*, 2003) développé par le CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire). Initialement développé pour la physique des hautes énergies, il a été étendu à des applications de physique des « basses énergies » (i.e. moins de 20 MeV), et de ce fait il convient de vérifier ses prédictions dans ce domaine avant utilisation, car de nombreux modèles sont utilisés dans GEANT4, alors que les sections efficaces utilisées par MCNP sont essentiellement des évaluations basées sur des validations expérimentales.

Bien que la simulation Monte-Carlo soit précise, elle est très couteuse en temps de calcul et impraticable dans une routine d'inversion multi-physique pour le traitement des données issues des mesures diagraphiques. Un certain nombre de publications de ces dix dernières années (Mendoza *et al.*, 2007; Mendoza *et al.*, 2010a; Mendoza *et al.*, 2010b; Ijasa *et al.*, 2011; Ijasa *et al.*, 2012; Ijasa *et al.*, 2013a; Ijasa *et al.*, 2013b; Luyx *et al.*, 2020), notamment de l'Université du Texas (Austin, USA), ont cependant montré qu'il est possible de bâtir, à partir de simulations Monte-Carlo, des modèles numériques prédictifs des outils nucléaires pétroliers permettant le calcul direct et rapide de diagraphies.

Ces modèles de prédiction rapides, appelés algorithmes de *Fast Forward Modeling* ou algorithmes de FFM, utilisent un nombre restreint de fonctions qui décrivent la sensibilité de l'outil en 3D pour différentes configurations géologiques, appelées fonctions de sensibilité. Elles sont calculées préalablement par simulation Monte-Carlo avec MCNP. Couplées aux algorithmes de FFM, elles permettent de faire des prédictions rapides de mesures diagraphiques (i.e. générer des mesures de grandeurs pétrophysiques en fonction de la profondeur le long du puits pétrolier). Les résultats des prédictions sont des diagraphies de grandeurs pétrophysiques (comme la porosité hydrogène ou PHI pour *Porosity Hydrogen Index*, la masse volumique bulk notée ρ_b pour *bulk density*, le PEF *PhotoElectric Factor* sensible au numéro atomique apparent de la formation et donc à sa composition élémentaire, le ratio C/O et la section efficace d'absorption macroscopique des neutrons thermiques appelés Sigma), ou des diagraphies de taux de comptages en coups par second ou CPS (*Counts Per Second*), pour l'ensemble des configurations de puits et de formations géologiques. Néanmoins, ces simulations Monte-Carlo nécessitent de disposer des géométries exactes des outils diagraphiques nucléaires. Ces informations sont sensibles pour les

fabricants d'outils, qui réalisent aussi généralement les diagraphies et leur interprétation, et elles sont en général confidentielles. Il est difficile pour les compagnies pétrolières et parapétrolières utilisatrices des données de diagraphies d'y avoir accès.

1.1.2 Les modèles génériques des outils diagraphiques

Mendoza *et al.*, 2007 ont proposé des modèles d'outils génériques de type porosité hydrogène neutron-neutron et litho-densité et facteur photoélectrique gamma-gamma afin de bâtir des fonctions de sensibilité et de les utiliser couplées à des algorithmes de prédiction rapide des diagraphies. Ces outils, appelés *longhorn nuclear logging tool* (Mendoza *et al.*, 2005; Mendoza *et al.*, 2006), ont été conçus afin de reproduire au mieux la réponse des outils des sociétés de services. Le but de ces modèles de sondes génériques est de synthétiser les propriétés les plus importantes des systèmes d'acquisitions des mesures nucléaires appliquées au domaine pétrolier (e.g. distance source-détecteurs, volumes de détection, etc.).

Mendoza *et al.*, 2006 ont validé la pertinence de ces modèles génériques en simulant des mesures de porosité hydrogène et de masse volumique dans un modèle de puits vertical et un modèle de puits dévié avec un fort pendage². Même si ces outils sont simplifiés du point de vue des géométries et des matériaux, ils reproduisent le comportement des outils du commerce et sont pertinents pour simuler des diagraphies pétrolières dans des environnements de puits complexes. Désormais, l'Université du Texas propose des géométries d'outils WL pour *Wireline*³ et LWD pour *Logging While Drilling*⁴ de type litho-densité et facteur photoélectrique gamma-gamma, porosité hydrogène neutron-neutron, neutron-gamma Sigma et C/O et mesure gamma passive (*natural gamma-ray*) sous forme de fichiers MCNP.

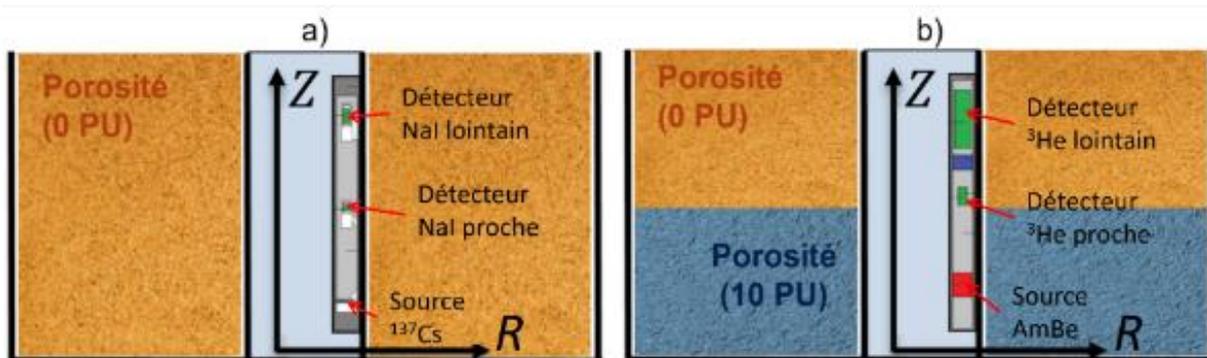


Figure 1: Représentation schématique (a) d'un outil de litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma longhorn WL avec une source gamma de ^{137}Cs et deux détecteurs NaI, dans une formation rocheuse homogène; (b) d'un outil de porosité hydrogène neutron-neutron longhorn WL composé d'une source neutron AmBe et deux détecteurs à ^3He , dans une formation rocheuse hétérogène (PU pour Porosity Unit).

² Dans le domaine de la stratigraphie, le pendage est une mesure qui donne l'inclinaison des couches géologiques sédimentaires. Il est différent de la pente topographique.

³ Une acquisition WL est une série de mesures nucléaires diagraphiques réalisées après la phase de forage. Les outils constituent un ensemble suspendu à un câble *logging*.

⁴ Une acquisition LWD est une série de mesures nucléaires diagraphiques réalisées pendant la phase de forage. Les outils se situent au-dessus de la tête de forage avec lequel ils constituent un ensemble. Ces mesures sont en général moins précises que les mesures WL. Elles sont plutôt destinées à aiguiller les géologues d'opération pendant le forage.

1.1.3 Outils gamma-gamma de litho-densité et du facteur photoélectrique (PEF)

L'outil gamma-gamma de litho-densité et du facteur photoélectrique (cf. Figure 1 a) permet à la fois la mesure de la masse volumique bulk notée ρ_b (pour *bulk density*) et la mesure de l'absorption photoélectrique appelée PEF (pour *PhotoElectric Factor*). Cet outil dispose d'une source de ^{137}Cs émettant des rayonnements gamma mono-énergétiques de 661.7 keV qui subissent des diffusions Compton successives dans la formation et dont une partie est rétrodiffusée vers deux scintillateurs NaI(Tl), l'un proche et l'autre plus lointain pour les outils de première génération, trois ou quatre scintillateurs LaBr₃(Ce) pour ceux de dernière génération. Seule une faible partie des rayonnements gamma émis par la source de ^{137}Cs retourne à l'un des deux détecteurs et y dépose une partie ou la totalité de leur énergie résiduelle.

Les deux masses volumiques bulk (ρ_b) mesurées sur le détecteur proche et lointain sont proportionnelles à l'intégration de leurs taux de comptages dans une fenêtre énergétique comprise typiquement entre 140 et 540 keV (appelée fenêtre *hard*) de leurs spectres gamma respectifs. Le coefficient de proportionnalité entre la masse volumique bulk recherchée et les valeurs de taux de comptages est établi par étalonnage dans une roche calcaire⁵ (appelé *limestone calibration*) avec des modélisations Monte-Carlo et des mesures en centre d'étalonnage⁶ (Chuilon *et al.*, 2019). Le choix de cette fenêtre *hard* s'explique par le fait que dans la bande en énergie des 140 et 540 keV, les interactions Compton dominent. Ainsi il existe une proportionnalité entre ρ_b et le taux de comptages mesuré.

La mesure de masse volumique bulk (ρ_b) est utilisée par les géologues pétroliers comme une mesure complémentaire de la porosité hydrogène ou PHI (pour *Porosity Hydrogen Index*, cette mesure est présentée plus spécifiquement en 1.1.4). L'avantage des mesures gamma-gamma de litho-densité est qu'elles sont assez peu sensibles à la lithologie dans la fenêtre en énergie *hard*, contrairement aux mesures neutron-neutron porosité hydrogène (PHI) qui sont sensibles à la teneur en hydrogène et aux absorbants neutroniques (comme Cl, Gd, B, etc.)

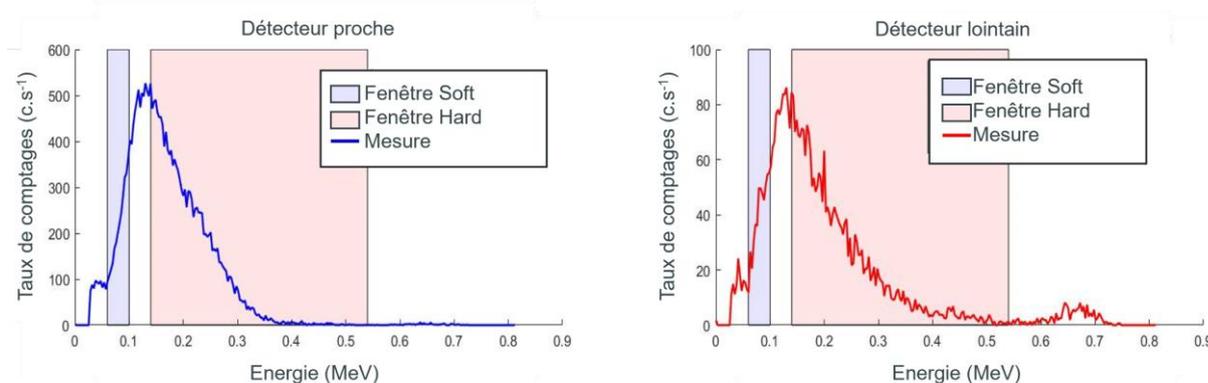


Figure 2: Mesure du spectre en énergie des rayonnements gamma rétrodiffusés mesuré sur le détecteur proche (à gauche) et sur le détecteur lointain (à droite) d'un outil de litho-densité.

⁵ Les étalonnages des mesures nucléaires destinées à la pétrophysique sont généralement faits dans des roches calcaires (CaCO₃). C'est une convention des interpréteurs de diagraphies que sont les géologues pétroliers, car les roches calcaires constituent une large partie des lithologies des réservoirs d'hydrocarbures, au même titre que les grès par exemple.

⁶ Un centre d'étalonnage pétrolier permet de caractériser des outils diagraphiques dans des blocs étalons présentant des caractéristiques standards de géologie (lithologie, porosité, masse volumique, etc.) et de configurations de puits (diamètre du puits, fluide de forage, etc.).

L'outil gamma-gamma de litho-densité donne également une autre donnée sur chaque détecteur. Cette donnée est appelée facteur photoélectrique ou PEF (*PhotoElectric Factor*, parfois appelé aussi *Pe*), qui correspond au ratio des taux de comptages dans deux fenêtres d'intégration, e.g. de 60 à 100 keV (fenêtre *soft*) et de 140 à 540 keV (même fenêtre *hard* que précédemment). La relation entre le PEF et ce ratio (*soft* sur *hard*) est aussi apprise au travers d'un étalonnage par simulation, validé par des mesures dans des blocs de référence, e.g. aluminium et magnésium. Le choix de cette fenêtre *soft* s'explique par le fait que dans la bande en énergie des 60 à 100 keV, les interactions photoélectriques interviennent conjointement avec les interactions Compton. Le ratio *soft* sur *hard* permet de minimiser les effets Compton et de lier le ratio des taux de comptages avec le PEF.

La mesure du PEF permet d'avoir une information sur la lithologie de la formation rocheuse. Plus le numéro atomique moyen de la formation est élevé, plus l'absorption gamma est forte et le PEF est élevé (Bertozzi *et al.*, 1985). Par exemple, dans un ordre décroissant des propriétés d'absorption gamma, le PEF d'une formation calcaire CaCO_3 est d'environ ≈ 5.5 (barn par électron, 1 barn = 10^{-24} cm²), celui d'une dolomie $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ est ≈ 2.5 et celui du grès SiO_2 vaut ≈ 1.5 (Serra, 2004).

1.1.4 Outils neutron-neutron de porosité hydrogène (PHI)

L'outil de mesure de la porosité hydrogène neutron-neutron (cf. Figure 1 b) permet la mesure de la porosité hydrogène aussi appelée mesure de l'index hydrogène de porosité ou PHI (pour *Porosity Hydrogen Index*). Cet outil dispose d'une source spectrale d'AmBe générant des neutrons avec énergie comprise entre 0 MeV et environ 10 MeV. Les neutrons sont émis au niveau de la source, située en bas de l'outil. En fonction de leur énergie d'émission, les neutrons peuvent interagir par diffusion élastique (n,n) ou inélastique ($n,n'\gamma$) dans la formation. Une fois suffisamment ralentis, les neutrons peuvent être absorbés par les noyaux du milieu, notamment par capture radiative (n,γ).

Lors d'une diffusion élastique (n,n), un neutron rentre en collision avec un noyau et lui transfère une partie de son énergie tout en repartant dans une direction différente. Les noyaux légers sont de bons ralentisseurs des neutrons rapides, avec un effet maximal lors d'une interaction frontale entre un neutron et un noyau d'hydrogène, car le proton a une masse très proche de celle du neutron (analogie avec le carreau à la pétanque). Les matières riches en hydrogène, comme l'eau et le polyéthylène CH_2 par exemple, ou dans une moindre mesure le ciment, sont de bons ralentisseurs de neutrons. En revanche, lorsqu'un neutron heurte un noyau beaucoup plus lourd que lui comme du fer ($A = 56$), il rebondit en communiquant peu d'énergie au noyau du fait de la grande différence de masse.

Lors d'une diffusion inélastique ($n,n'\gamma$), un neutron rapide entre en collision avec un noyau et, contrairement à la diffusion élastique (n,n), le neutron est absorbé momentanément. Le noyau excité impliqué dans l'interaction se désexcite en émettant un nouveau neutron, moins énergétique, et un rayonnement gamma.

Enfin la capture radiative (n,γ), se produit entre un neutron lent et un noyau. Cette interaction se produit généralement lorsque le neutron a perdu la majeure partie de son énergie initiale et possède une énergie résiduelle liée à l'agitation thermique des noyaux du milieu (on parle de neutrons thermiques). Le noyau excité par l'absorption du neutron (noyau composé) se désexcite en émettant un ou plusieurs rayonnements gamma.

Lors d'une diffusion inélastique ($n,n'\gamma$) ou d'une capture radiative (n,γ), chaque type de noyau produit des rayons gamma d'une énergie caractéristique permettant de l'identifier. Le spectre gamma résultant, mesuré avec un scintillateur NaI(Tl) ou LaBr dans un outil de type neutron-gamma C/O, peut ainsi permettre la détermination des teneurs en éléments (Kavetskiy *et al.*, 2015).

La porosité hydrogène mesurée est en fait un index hydrogène. Cet élément, caractéristique des hydrocarbures ou de l'eau, est responsable de l'essentiel des diffusions élastiques des neutrons quand il est présent. La porosité hydrogène apporte une information relative sur la porosité intrinsèque, à savoir la teneur en vide de la formation (fraction du volume occupée par les pores) saturée par l'eau ou les hydrocarbures. L'étalonnage standard des outils de mesure de porosité hydrogène est généralement réalisé dans une lithologie de type calcaire (*limestone calibration*) saturée avec de l'eau douce. La valeur de porosité hydrogène lue par un outil étalonné dans ces conditions est égale à la porosité intrinsèque de la roche uniquement si cette dernière est bien de type calcaire et ses pores saturés à 100 % en eau douce, mais pas si le fluide de saturation est différent de la configuration d'étalonnage (e.g. de la saumure riche en chlore) ou si la saturation n'est pas de 100 % (e.g. 50 % d'air et 50 % d'eau).

Ainsi, un réservoir pétrolier de type calcaire de 20 PU (PU pour *Porosity Units*) saturé en CO₂ présente une porosité hydrogène mesurée égale à 0 PU. La porosité hydrogène est considérée comme une porosité apparente lue par l'outil. De la même manière, pour une roche saturée à 100 % en eau douce, si la lithologie diffère de la lithologie d'étalonnage calcaire, comme une lithologie de type grès ou dolomie, la porosité hydrogène mesurée n'est plus égale à la porosité intrinsèque de la roche. La section efficace macroscopique de capture des neutrons thermiques étant plus faible dans une roche de type grès SiO₂ que dans du calcaire CaCO₃ (comme nous le verrons dans le chapitre 2), si la porosité intrinsèque du grès est de 0 PU, l'outil diagraphique mesure un nombre de coups supérieur à celui d'un calcaire de 0 PU et donc la porosité hydrogène lue (ou porosité apparente) devient négative. Dans ce cas, les géologues doivent utiliser des courbes d'étalonnage spécifiques pour les deux autres principales lithologies que sont le grès SiO₂ et la dolomie CaMg(CO₃)₂, afin de déterminer la porosité intrinsèque de la roche.

Ellis *et al.*, 2007 ont montré qu'il existe une relation linéaire entre le ratio des taux de comptages des deux détecteurs (proche sur lointain) et l'inverse de la longueur de migration des neutrons dans le milieu (1/Lm). La longueur de migration est la somme quadratique de la longueur de ralentissement Ls (Ls étant l'acronyme de *slowing down length*) et de la longueur de diffusion Ld (Ld étant l'acronyme de *diffusion length*). La longueur de ralentissement Ls, est la racine carrée du 1/6^{ème} du carré moyen du trajet rectiligne parcouru par un neutron depuis son point d'émission (pour une source ponctuelle), jusqu'au lieu où son énergie devient thermique (rayon de la sphère de ralentissement autour d'une source ponctuelle isotrope par exemple). La longueur de diffusion Ld est la racine carrée du 1/6^{ème} du carré moyen du trajet rectiligne parcouru par un neutron depuis le point où son énergie devient thermique jusqu'au point où il est capturé par un noyau. Ces deux notions (Ls et Ld) sont statistiques et correspondent à des moyennes, un neutron pouvant être thermalisé sur une distance bien plus courte que Ls, par exemple en un seul choc frontal sur un noyau d'hydrogène, puis absorbé de la même façon sur une distance bien plus courte que Ld.

En plus des deux mesures de porosité hydrogène des deux détecteurs, l'outil donne une troisième porosité dite compensée (appelée *compensated porosity*) obtenue par le ratio de leurs taux de comptage. Elle permet de s'affranchir en partie des effets⁷ de puits comme l'écartement de l'outil par rapport à la paroi ou la présence de cavités où s'interposent des fluides entre la sonde et la formation (phénomène connu sous le nom de *standoff*), ou la présence de gangue de boue qui se forme le long de la paroi du puits (*mudcake*). C'est souvent cette porosité compensée qui est utilisée par les géologues pétroliers (car plus fiables et plus représentatives des propriétés de la roche) pour évaluer les réserves d'hydrocarbures dans un réservoir pétrolier.

⁷ Si les effets de puits (*standoff*, *mudcake*, diamètre du puits, salinité, etc.) affectent dans les mêmes proportions les taux de comptages sur les deux détecteurs, la valeur de porosité compensée délivrée par l'outil est proche de la valeur intrinsèque de la roche, car faiblement impactée par l'architecture du puits. Cependant quand les effets de puits affectent de préférence un détecteur plutôt que l'autre, e.g. dans le cas d'un phénomène de cave où le détecteur proche est parfois plus impacté que le détecteur lointain, la valeur de porosité compensée est alors fortement éloignée de la valeur intrinsèque de la roche.

1.1.5 Outils neutron-gamma basés sur l'analyse de la décroissance temporelle du signal neutronique post-impulsion (Sigma)

L'outil de mesure neutron-gamma Sigma appelé aussi outil PNC (pour *Pulse Neutron Capture*) permet la mesure de la section efficace macroscopique d'absorption des neutrons thermiques. Cet outil dispose d'un générateur pulsé de neutrons mono-énergétiques de 14 MeV. Les neutrons sont émis à intervalle régulier pendant des impulsions (*neutron burst* ou *neutron pulse*) de quelques dizaines de μs , puis ils ralentissent par diffusions élastiques (n,n) et inélastiques ($n,n'\gamma$), puis ils sont finalement capturés par les noyaux des atomes qui composent les éléments du milieu: ensemble de l'outil incluant les détecteurs, fluide du puits, ciment, tubage et formation rocheuse incluant le fluide qui la sature. Des rayonnements gamma induits par diffusion inélastique ($n,n'\gamma$) et capture radiative (n,γ) sont générés au cours du parcours des neutrons. Une partie de ces rayonnements gamma parviennent aux détecteurs (proche ou lointain) et y déposent une partie ou la totalité de leur énergie.

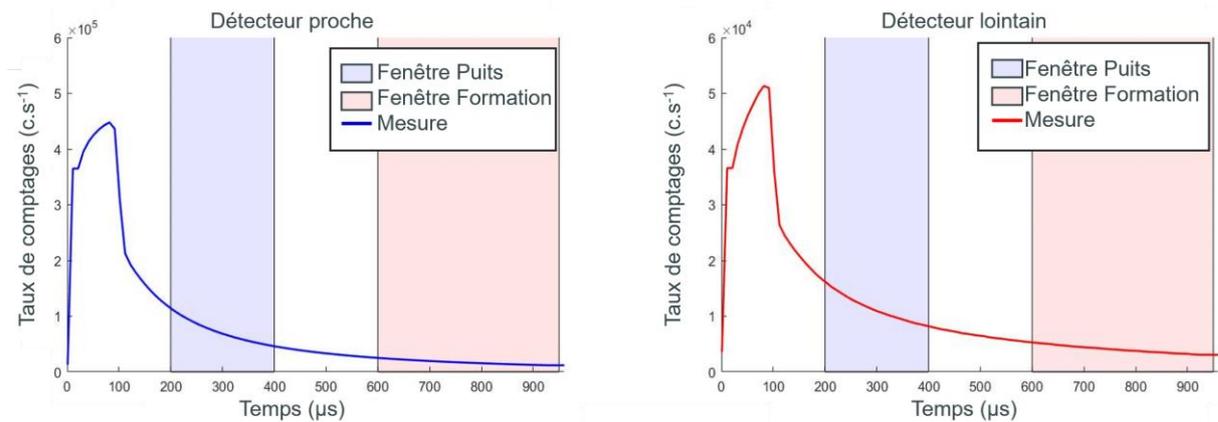


Figure 3: Mesure du spectre temporel de la décroissance du nombre de coups dû aux rayonnements gamma sur le détecteur proche (à gauche) et sur le détecteur lointain (à droite) pendant et après une impulsion du générateur de neutrons d'un outil Sigma.

La Figure 3 présente deux spectres de décroissance temporelle pour le détecteur proche et lointain d'un outil neutron-gamma Sigma. Ces outils sont équipés de détecteurs NaI(Tl) pour les modèles anciens ou LaBr₃(Ce) pour les plus récents⁸. Les interactions de diffusion inélastique ($n,n'\gamma$) avec les neutrons rapides ont lieu principalement pendant l'impulsion, d'une durée typique d'environ 60 à 100 μs suivant les modèles de générateur, et les captures radiatives avec les neutrons thermalisés après l'impulsion, typiquement entre 100 et environ 1500 μs , ensuite le flux de neutrons thermique devient négligeable et le générateur délivre une nouvelle impulsion.

La section efficace de capture radiative étant plus sensible à la lithologie (présence potentielle d'absorbants neutroniques dans la formation) que celle de diffusion inélastique, on choisit des fenêtres temporelles situées entre les impulsions neutroniques, typiquement de 200 μs à 300 ou 400 μs pour la fenêtre sensible au puits et de 500 ou 600 μs à 1000 μs pour celle sensible à la formation. C'est la raison pour laquelle la mesure est appelée PNC pour *Pulsed Neutron Capture*. Une acquisition PNC diagraphique est un enregistrement temporel de la décroissance du nombre de rayonnements gamma mesuré après chaque impulsion du générateur. L'acquisition se faisant en fonction de la profondeur (i.e.

⁸ L'évolution des détecteurs NaI(Tl) vers des détecteurs de type LaBr₃(Ce) pour les outils neutron-gamma disposant d'un générateur de neutrons pulsé, est motivée par la volonté des compagnies parapétrolières de réaliser des mesures quantitatives de spectroscopie gamma (i.e. les teneurs en éléments) en plus des traditionnelles mesures Sigma et ratio carbone sur oxygène.

depuis le fond du puits jusqu'en surface), chaque mesure est associée à une profondeur sur l'axe Z. Cette mesure permet de calculer, grâce aux pentes de décroissance visibles dans la Figure 3, une grandeur liée à la section efficace macroscopique de capture radiative notée Σ (cm^{-1}), appelée Sigma dans le domaine des diagraphies pétrolières. Le Sigma est exprimé en CU (pour *Capture Unit*). Cette unité est utilisée en pétrophysique pour caractériser les roches et le type de fluide qui sature la porosité. La valeur théorique de la section efficace macroscopique d'absorption d'un matériau quelconque se calcule de la manière suivante:

$$\Sigma_{\text{absorption}} = Na \times 10^{24} \times \frac{\rho b}{A} \times \sum_{i=1}^{92} Nb_i \times \sigma_i \quad (1)$$

Na est la constante d'Avogadro (6.02214×10^{23} en mol^{-1}), ρb la masse volumique du matériau (g.cm^{-3}), A sa masse molaire (g.mol^{-1}), Nb_i le nombre d'éléments i dans le matériau et σ_i sa section efficace microscopique (cm^2) et Σ la section efficace macroscopique d'absorption (cm^{-1}). Pour obtenir Sigma (CU, *Capture Unit*), on utilise par convention dans le domaine pétrolier la relation: Sigma = $1000 \times \Sigma$.

La grandeur Sigma caractérise la capacité d'un matériau à capturer les neutrons thermiques. Elle est obtenue à partir des pentes de décroissance du signal gamma (Schmid *et al.*, 2018) dans plusieurs fenêtres temporelles (e.g. de 200 à 500 μs environ pour la fenêtre du puits, dite fenêtres *borehole*, et de 500 à 1000 μs environ pour celle de la formation, cf. Figure 3). Plus la section efficace de capture des neutrons thermiques dans le milieu est grande, plus la valeur absolue de la pente (négative) mesurée sur le spectre temporel de décroissance du signal gamma total est grande.

En géologie, un fort Sigma indique une forte capacité de la formation rocheuse (i.e. de la roche elle-même et du ou des fluides qui saturent ses pores) à capturer les neutrons thermiques. C'est une signature des roches saturées saumure (i.e. de l'eau avec du sel, NaCl) ou des arilles (minéraux hydratés). Cet outil va, par contraste, permettre de distinguer des zones saturées eau hydrocarbures (faibles Sigma) et des zones saturées en saumure (fort Sigma). Il est conseillé de l'utiliser plutôt dans les réservoirs à eau salée et non à eau douce (contraste Sigma faible).

1.1.6 Outils neutron-gamma basés l'analyse spectrale du signal neutronique pendant l'impulsion ou post-impulsion (C/O et spectroscopie)

Les outils moderne disposant d'un générateur pulsé de neutrons mono-énergétiques de 14 MeV ont la capacité de mesurer deux spectres en énergie différents, pendant ou entre les impulsions. Discriminer en temps l'enregistrement des spectres en énergie des gammas induits permet de favoriser la contribution de certains éléments qui émettent des rayonnements par capture radiative (entre les impulsions) et/ou par interaction inélastique (pendant les impulsions). Dans ces deux types d'interactions, les rayonnements sont émis quasiment instantanément, contrairement aux rayonnements retardés d'activation qui peuvent être émis jusqu'à plusieurs minutes après l'irradiation, à la suite de désintégrations radioactives. Chaque type de noyau et d'interaction produit des pics caractéristiques dans le spectre gamma mesuré (cf. Figure 4) permettant d'identifier les éléments investigués dans la formation rocheuse ou dans le puits.

Les outils neutron-gamma du ratio carbone sur oxygène (appelé aussi ratio C/O) sont des outils disposant d'un générateur pulsé de neutrons et sont basés sur l'analyse des rayonnements gamma émis par certains noyaux lors d'une diffusion inélastique ($n, n'\gamma$), ou d'une capture radiative (n, γ). Cette mesure consiste à comptabiliser les taux de comptages gamma dans deux fenêtres en énergie focalisées sur l'émission du carbone et de l'oxygène (e.g. 3.2 à 4.7 MeV pour la fenêtre carbone et 4.8 à 7.4 MeV pour

la fenêtre oxygène). Du fait de la raie d'émission du carbone à 4.44 MeV, les outils C/O enregistrent des gammas induits pendant l'impulsion du générateur (i.e. très largement issus d'interactions inélastiques).

Les diagraphies C/O sont ensuite utilisées pour déterminer la saturation en huile ou en gaz de la formation rocheuse. Une saturation en hydrocarbures augmente les gammas inélastiques induits provenant des interactions entre des neutrons et des noyaux de carbone et par conséquent augmente la ratio C/O. Du fait de l'acquisition pendant l'impulsion du générateur et de l'utilisation de fenêtres d'intégration en énergie focalisées sur les raies de diffusion inélastique du carbone et de l'oxygène (réactions avec des neutrons rapides), les diagraphies C/O sont peu sensibles à la salinité de la formation rocheuse, car les captures radiatives par le chlore du sel se produisent essentiellement avec les neutrons thermiques, mais elles sont très sensibles à l'environnement de puits (i.e. à la présence d'une boue riche en huile contenant du carbone et peu d'oxygène), à la qualité de la cimentation et à la composition chimique du ciment.

Les neutrons ont en effet les mêmes interactions avec les noyaux de carbone présents dans les fluides, la roche ou les hydrocarbures, on ne peut distinguer si les rayonnements gamma induits à 4.44 MeV par diffusion inélastique proviennent de la formation rocheuse, du fluide de saturation ou du fluide de forage (voire du tubage et du ciment, si ces derniers contiennent du carbone). Ces effets doivent être compensés par des corrections d'environnement⁹ avant de faire une interprétation quantitative de la saturation en huile ou en gaz.

La Figure 4 présente deux simulations avec MCNP de spectres gamma en énergie (pour les détecteurs proche et lointain), d'un outil générique longhorn WL disposant d'un générateur de neutrons pulsé. Sur les spectres de la Figure 4, il n'y a pas de distinction entre les gammas induits mesurés pendant et après l'impulsion du générateur. Les deux spectres simulés ci-dessous contiennent donc la totalité des rayonnements gamma induits, de diffusion inélastique et de capture radiative, parvenus aux détecteurs.

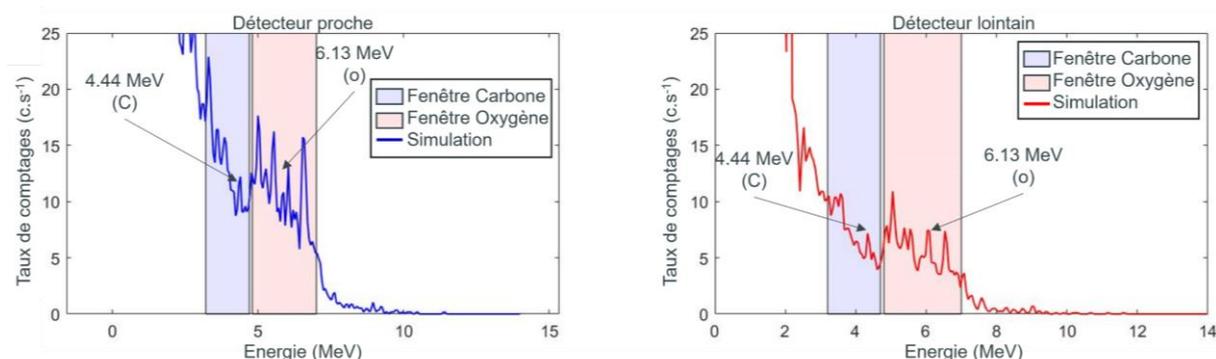


Figure 4: Modélisation avec MCNP du spectre en énergie des rayonnements gamma induits sur le détecteur proche (à gauche) et sur le détecteur lointain (à droite), intégré pendant tout le cycle de mesure (que ce soit pendant et entre les impulsions du générateur de neutrons) d'un outil avec un générateur de neutrons pulsé (de type C/O ou de spectroscopie).

Les outils de dernière génération sont des outils de spectroscopie (Freedman *et al.*, 2015). Ils permettent, en plus de calculer un ratio C/O, de déterminer des teneurs en élément par déconvolution spectral. Ils font l'acquisition de spectres gamma en énergie pendant et entre les impulsions du générateur. Les

⁹ Une correction d'environnement consiste à ajouter ou soustraire une valeur numérique à une grandeur pétrophysique mesurée par un outil, comme la porosité, la masse volumique, etc. Les grandeurs pétrophysiques délivrées par les contracteurs sont en effet des valeurs apparentes valables uniquement en configuration d'étalonnage (e.g. puits ouvert avec un diamètre de 200 mm rempli d'eau douce en lithologie calcaire). Réaliser une correction d'environnement permet d'éliminer en partie certains effets de puits sur les mesures et de transformer une grandeur pétrophysique apparente en grandeur pétrophysique plus réaliste.

teneurs en éléments, calculer en post traitement, servent à estimer la minéralogie de la formation rocheuse. Il existe aussi un autre type de mesure sur ces outils modernes communément appelée mesures des ratios *burst* et *capture*. Il s'agit de calculer les ratios des taux de comptages gamma totaux entre les détecteurs lointain et proche, pendant (*burst ratio*) ou entre (*capture ratio*) les impulsions, pour estimer la saturation en huile, gaz ou eau (Zhou *et al.*, 2018).

1.2 Introduction aux fonctions de sensibilité

1.2.1 Les techniques de réduction de variance utilisées dans le calcul des fonctions de sensibilité

La réduction de variance est utilisée dans les simulations Monte-Carlo afin de réduire le temps de calcul tout en conservant une incertitude statistique suffisante sur l'estimation des grandeurs comme les flux, les spectres énergétiques ou les taux de comptages des détecteurs. L'incertitude, dans une simulation Monte-Carlo, varie comme la racine carrée du nombre d'évènements (traces, interactions, nombre de particules, etc.) qui contribuent à l'observable recherché, selon une loi de Poisson. Un évènement utile correspond à une partie de l'histoire d'une particule source, depuis son lieu d'émission jusqu'à son absorption ou sa fuite hors du modèle.

Dans la géométrie des outils de diagraphie nucléaire, une très faible proportion des particules tirées est mesurée par l'un des détecteurs. À titre d'exemple, pour l'outil de porosité hydrogène neutron-neutron, on enregistre expérimentalement des taux de comptages de l'ordre de quelques milliers de neutrons par seconde pour une émission de la source AmBe de l'ordre de $3 \cdot 10^7$ n.s⁻¹. Il existe plusieurs méthodes de réduction de variance (aussi appelées méthodes de *biasing*) qui permettent de réduire le temps de simulation en limitant le nombre de particules sources tirées, mais en favorisant leur probabilité d'être détectées. Ceci se fait en multipliant les particules quand elles se dirigent vers la zone d'intérêt ou en les éliminant quand elles s'en éloignent, par un jeu d'importances dans un maillage cylindrique tel que celui représenté dans la Figure 5 (*superimposed* ou *overimposed mesh* dans MCNP, car il est surimposé à la géométrie réelle et est donc à distinguer des cellules correspondant aux éléments de la sonde, du puits et de la formation rocheuse) et de poids des particules, comme expliqué ci-dessous.

La Figure 5 et la Figure 6 montrent les modèles MCNP et les maillages cylindriques des outils *longhorn* WL neutron-neutron de porosité hydrogène et gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique, respectivement. L'importance d'une maille géométrique est définie comme étant l'inverse du poids de cette même maille. Le poids de la maille est calculé dans MCNP en faisant la somme des poids des particules qui traversent en interagissant ou non dans la maille. Les mailles sont des voxels en forme de portion de cylindre. Plus les éléments de volume du maillage (voxels) sont éloignés du centre du puits, plus leur volume est grand. Pour chaque voxel, l'importance est calculée par le *Weight Window Generator* de MCNP (WWG pour *Weight Window Generator*), de façon à maximiser la contribution au signal d'un seul détecteur (proche et lointain).

La particule est divisée (*splitting*) en un nombre de particules correspondant au ratio des importances des mailles quand elle passe d'une maille de faible à plus grande importance, tout en affectant un moindre poids aux particules divisées pour obtenir *in fine* le bon résultat. Le nombre de particules poursuivies dans la bonne direction et la précision statistique sur le résultat (appelé *tally* pour score) sont ainsi améliorés. À l'inverse, la particule peut être tuée selon un jeu de « roulette Russe » avec une probabilité dépendante de ce même ratio des importances, si elle passe d'une région de forte à moindre importance.

Une première simulation longue permet de construire le fichier des importances (carte des importances) dans chaque maille, appelé aussi carte de poids (*Weight Window map*), à distinguer des poids des particules mentionné précédemment. Nous conserverons les appellations d'importances pour les mailles et de poids pour les particules, même si elles sont souvent confondues dans la littérature. Grâce à cette carte d'importances, il est ensuite possible de faire une série de simulations généralement beaucoup plus rapides.

Dans le cas d'un outil de porosité hydrogène neutron-neutron (cf. Figure 5), la discrétisation utilisée par le *Weight Window Generator* est uniquement spatiale. Pour l'outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique (cf. Figure 6), la discrétisation est à la fois spatiale et énergétique. Les importances sont calculées dans deux cartes différentes, une première pour les particules déposant dans le détecteur une énergie comprise entre 140 et 540 keV (fenêtre *hard*) et une deuxième pour la fenêtre entre 60 et 100 keV (*soft*). Pour l'outil neutron-gamma Sigma qui mesure une pente sensible à la section efficace macroscopique d'absorption totale sur des fenêtres en temps différentes (par exemple de 200 à 500 μs pour la fenêtre sensible au puits et de 500 à 1000 μs pour la formation), la discrétisation utilisée par le *Weight Window Generator* est spatiale et temporelle. Pour l'outil neutron-gamma C/O qui mesure un ratio de taux de comptages sur des fenêtres en énergie (fenêtre carbone d'environ 3.2 à 4.7 MeV et oxygène d'environ 4.8 à 7.4 MeV) et en temps (pendant l'impulsion du générateur de 0 à 100 μs typiquement pour la mesure des rayonnements gamma de diffusion inélastique, de 700 à 1000 μs pour ceux de capture radiative), la discrétisation utilisée est alors spatiale, temporelle et énergétique.

Au-delà de la réduction de variance, ces cartes d'importances MCNP peuvent être utilisées pour calculer des fonctions de sensibilité de flux destinées à faire des prédictions rapides de diagraphies nucléaires, comme détaillé dans la partie 1.2.2. Leur intérêt est en effet de représenter en 3D l'importance de chaque zone du modèle pour le signal des détecteurs (i.e. représenté en 3D le volume investigué par un des deux détecteurs, soit le proche soit le lointain). Ces fonctions de sensibilité de flux des outils nucléaires sont la base des modèles de prédictions rapides avec les algorithmes de FFM. Le système de réduction de variance de MCNP est ainsi détourné de son utilisation première (i.e. réduire le temps de simulation) pour extraire les informations nécessaires (i.e. la carte d'importance) à la construction des fonctions de sensibilité de flux 3D.

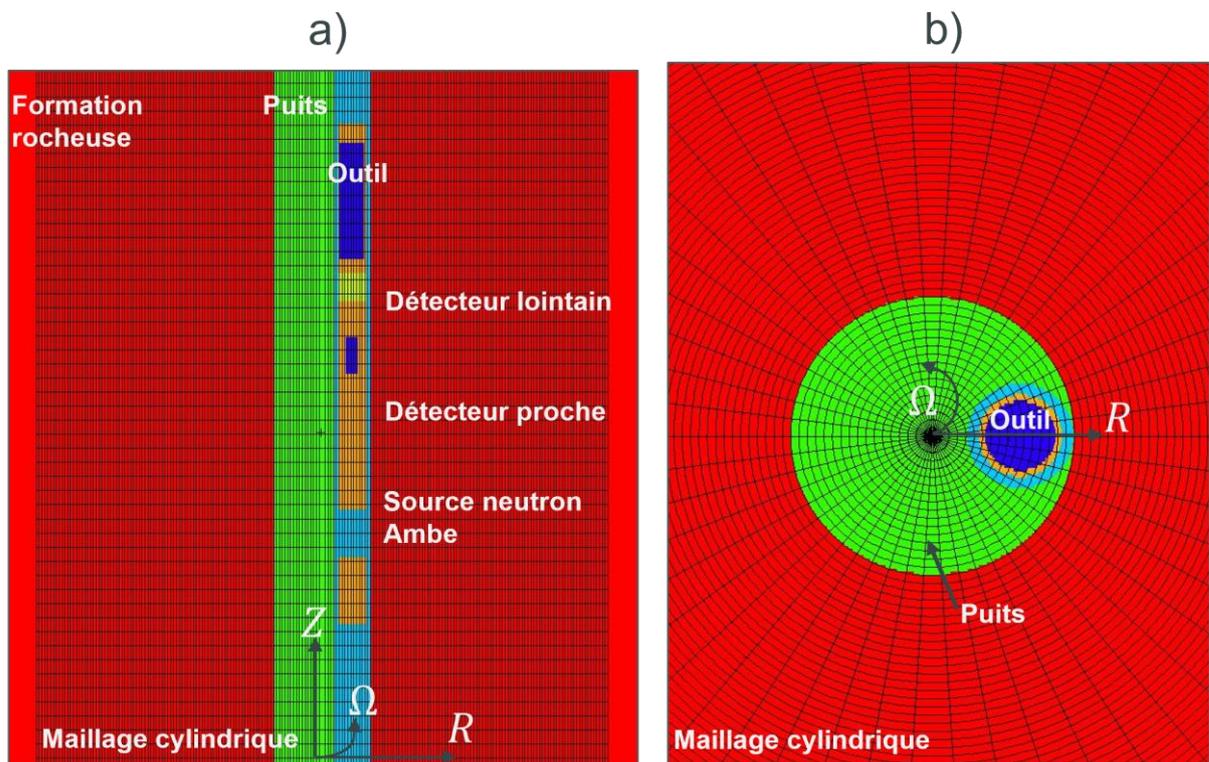


Figure 5: Modèle MCNP d'un outil de porosité hydrogène neutron-neutron (longhorn WL) dans un puits avec un maillage cylindrique surimposé à la géométrie réelle, destiné à l'établissement d'une carte d'importances (cf. détails dans le texte); coupe verticale à gauche et horizontale à droite. L'outil est équipé d'une source de neutrons AmBe et de deux détecteurs ^3He : proche à 38.10 cm de la source et lointain à 71.12 cm. Le diamètre externe l'outil est de 7.62 cm.

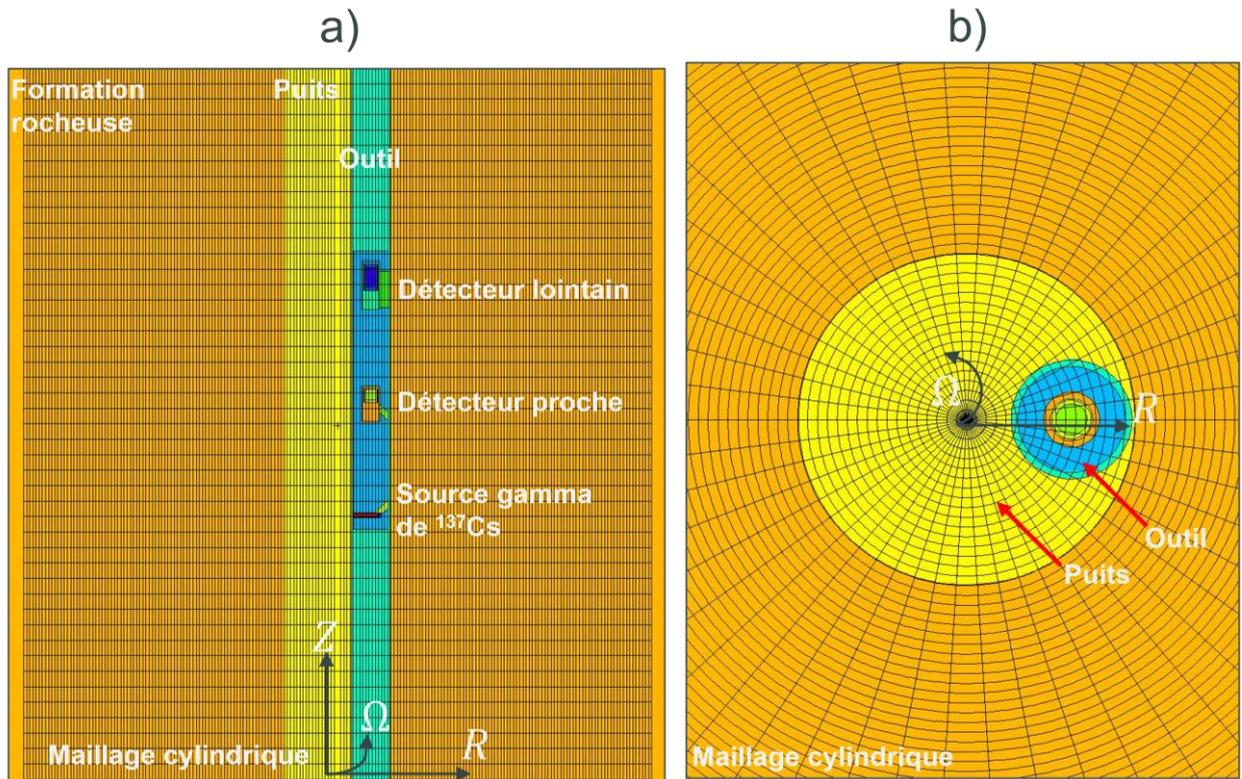


Figure 6: Modèle MCNP d'un outil de litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma (longhorn WL) dans un puits avec un maillage cylindrique surimposé destiné à l'établissement d'une carte d'importances (cf. détails dans le texte); coupe verticale à gauche et horizontale à droite. L'outil est équipé d'une source gamma mono-énergétique de ^{137}Cs (661,7 keV) et de deux détecteurs NaI(Tl): proche à 23.05 cm de la source et lointain à 46.03 cm. Le diamètre externe de la sonde est de 7.30 cm.

1.2.2 Les fonctions de sensibilité des outils diagraphiques nucléaires

La fonction de sensibilité de flux (ou FSF pour Fonction de Sensibilité de Flux, ou *Flux Sensitivity Function*) est une combinaison de la fonction de réponse du détecteur et du flux total de particules émis depuis une source. Mendoza *et al.*, 2007 définissent la fonction de sensibilité d'une sonde nucléaire pétrolière comme la représentation en 3D du volume investigué dans la formation rocheuse et de l'importance de chaque zone, i.e. sa contribution au signal détecté par l'un des deux détecteurs, proche ou lointain. La distribution 3D que constitue la fonction de sensibilité vise à reproduire le flux de particules dites « utiles » émises par la source et qui reviennent au détecteur (Madicken *et al.*, 2017).

On distingue ici le calcul Monte-Carlo de la fonction de sensibilité de flux (FSF), avec la méthode du *Weight Window* (technique de *biasing*) qui peut être long, de la prédiction rapide des diagraphies nucléaires (produit d'Hadamard terme à terme de la FSF 3D avec un modèle numérique de terrain 3D ou EM pour *Earth Model*, contenant des paramètres physiques caractéristiques de la formation rocheuse, comme nous le verrons plus loin dans la partie 1.3).

Les techniques de réduction de variance ont largement amélioré l'efficacité de calcul des fonctions de sensibilité (Booth *et al.*, 1984; Mickael *et al.*, 1992). Watson *et al.*, 1984 introduisent le concept de fonction de sensibilité calculée par la méthode de Monte-Carlo afin de prédire rapidement la réponse d'un outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique. Ces premières fonctions de sensibilité ont fourni des informations sur le comportement des détecteurs et permis les premiers essais de calcul rapide des diagraphies nucléaires (Watson *et al.*, 1992; Couët *et al.*, 1993; Case *et al.*, 1994). Les premières

fonctions de sensibilité ont été utilisées pour quantifier les variations d'une mesure de porosité hydrogène neutron-neutron dans un cas d'invasion de boue de forage dans la formation (Parsons *et al.*, 1983). Elles ont également permis de déterminer la profondeur d'investigation radiale d'un outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique ainsi que la provenance des rayonnements gamma mesurés par un outil passif en comptage total (appelé *Natural gamma ray*) utilisé pour identifier les bancs argileux¹⁰ et recalculer en profondeur les différentes acquisitions diagraphiques. Dans le cas d'une spectrométrie passive, avec des fenêtres d'intégration (e.g. uranium, potassium et thorium) ou une déconvolution de l'ensemble du spectre, cet outil est aussi utilisé pour faire des calculs de minéralogie¹¹.

1.2.3 Calcul des fonctions de sensibilité de flux avec la méthode du WW

Le but des fonctions de sensibilité est de donner une approximation de la réponse du détecteur, quelle que soit la formation rocheuse, sans refaire de simulation Monte-Carlo pour chaque cas de terrain rencontré (i.e. faire des prédictions rapides de diagraphies de taux de comptages ou de grandeurs pétrophysiques). Mendoza *et al.*, 2007 décrivent une méthode permettant de calculer les fonctions de sensibilité pour des outils de porosité hydrogène neutron-neutron et litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma *longhorn* WL et LWD. Cette méthode utilise une version modifiée du code source de simulation MCNPX-5 afin d'extraire deux types de fichiers de données suivant un même maillage cylindrique en 3D. Avec les dernières fonctionnalités de MCNP6.2, Luyckx *et al.*, 2020 ont proposé une nouvelle approche équivalente qui permet de récupérer les données utiles dans deux fichiers de sortie. La version compilée de MCNP6.2 est désormais suffisante pour calculer les fonctions de sensibilité selon cette méthode.

$$FSF_B(r_R, r, E) = \int d\Omega \left(\frac{1}{N_B(r_R)} \right) \times \psi_B(r_S, r, E, \Omega) \times S_B^+(r_R, r, E, \Omega) \quad (2)$$

L'équation (2) présente la définition générale de la fonction de sensibilité comme explicitée dans la littérature (Mendoza *et al.*, 2010a), où $FSF_B(r_R, r, E)$ (cm^{-2}) est la fonction de sensibilité de flux pour un cas standard (avec l'indice B pour *Base case*, i.e. un cas de base contenu dans une bibliothèque de FSF précalculées). $\psi_B(r_S, r, E, \Omega)$ (cm^{-2}) est le flux total de particules et $S_B^+(r_R, r, E, \Omega)$ (sans dimension) est l'importance. r_S (coordonnée cylindrique) est la position de la source, r_R (coordonnée cylindrique) est la position du détecteur, r (coordonnée cylindrique) est la position de la maille, Ω représente la direction vers laquelle est réémise la particule et E (eV ou MeV selon les codes et les bases de données) l'énergie des particules qui compose le flux.

Dans l'équation (2), $N_B(r_R)$ représente le taux de comptages sur un seul détecteur obtenu par simulation avec MCNP (i.e. avec les méthodes Monte-Carlo traditionnelles et un *tally* F4). Dans cette formulation, la sensibilité $FSF_B(r_R, r, E)$ à la position r représente une fraction du taux de comptages total mesuré au détecteur $N_B(r_R)$. Les premières prédictions avec les algorithmes de FFM utilisant cette formulation

¹⁰ La radioactivité naturelle rencontrée en géosciences pétrolières vient principalement de l'uranium, du potassium et du thorium contenus dans la matière organique présente dans les roches mères argileuses. Une mesure de comptage total de cette radioactivité permet d'identifier ces bancs argileux.

¹¹ Les calculs de la minéralogie à partir d'une mesure de spectrométrie de la radioactivité naturelle permettent de faire des corrections de l'effet matrice sur les mesures nucléaires diagraphiques dans les zones réservoirs. Certaines roches réservoirs peuvent contenir des éléments radioactifs (e.g. sable uranifère) qui apportent des incertitudes sur les grandeurs pétrophysiques estimées en condition d'étalonnage, avec seulement quelques ppm d'uranium. Plus la roche réservoir présente une chimie complexe, plus il est difficile de transformer une porosité apparente en porosité vraie ou intrinsèque. Une estimation de la minéralogie permet de minimiser les incertitudes lors de l'interprétation quantitative de la saturation en hydrocarbures ou en eau.

(Mendoza *et al.*, 2007 ; Mendoza *et al.*, 2010a ; Mendoza *et al.*, 2010b) ont montré de bons résultats pour des prédictions de diagraphies de taux de comptages ou de grandeurs pétrophysiques (e.g. porosité hydrogène ou masse volumique) faites dans des modèles de terrain (en dehors des cas de bases présents de la bibliothèque de FSF précalculées) homogènes et simples.

Cependant, pour approximer des taux de comptages ou des grandeurs pétrophysiques avec les algorithmes de FFM pour des cas plus complexes comme des modèles de terrain stratifiés¹² avec des couches fines sans ou avec pendage ou pour des cas de formation rocheuse saturée avec du gaz, la formulation de l'équation (2) a montré des limitations avec des écarts importants entre les taux de comptages prédits et ceux simulés avec MCNP et les méthodes Monte-Carlo traditionnelles (Ijasa *et al.*, 2012; Ijasa *et al.*, 2013c).

De fait, ce n'est plus aujourd'hui rigoureusement cette formulation implémentée dans les algorithmes de FFM pour lier la fonction de sensibilité aux taux de comptages simulés et prédire des diagraphies rapidement avec les algorithmes de FFM. Elle reste cependant la formulation générale retrouvée dans la littérature.

Par ailleurs, la formulation précédente considère la géométrie de la sonde (r_s et r_R) ainsi que la direction de réémission des particules (Ω) comme des variables. Cette formulation générique donne la définition de la fonction de sensibilité de flux pour l'ensemble des sondes (i.e. différentes géométries, différents types de sources radioactives et de générateur de neutrons pulsé, différentes physiques nucléaires, etc.).

Nous simplifions la formulation de la FSF de l'équation (2) comme suit:

$$FSF^j = \psi^j \times S^{+j} \quad (3)$$

L'équation (3) présente la définition de la fonction de sensibilité comme nous la redéfinissons. Nous supprimons Ω , r_s , r_R , r et E pour une formulation simplifiée qui soit cohérente avec les fichiers de sortie fournis par MCNP (i.e. la carte des importances S^+ et la carte du flux total de particules ψ après la simulation Monte-Carlo). Cette nouvelle formulation dépend uniquement de la position de la maille j (i.e. de la position du voxel 3D du maillage cylindrique). Dans l'équation (3), FSF^j (cm^{-2}) est la valeur de la sensibilité de flux, S^{+j} (sans dimension) est l'importance et ψ_j (cm^{-2}) est le flux total de particules dans la maille j . FSF , S^+ et ψ sont des matrices 3D de même dimension.

j est l'indice de la maille dans le maillage cylindrique 3D. La position de la maille j est donnée en coordonnées cylindriques (R , Z , Ω) suivant le maillage surimposé présenté dans la Figure 5 et la Figure 6. R (cm) est l'axe radial, Z (cm) est l'axe vertical aussi appelé axial dans le chapitre 3 (i.e. l'axe en profondeur le long de l'outil), Ω est l'angle azimutal de révolution autour du puits (rad), et non plus la direction vers laquelle est réémise la particule comme c'était le cas dans l'équation (2).

La Figure 7 présente la méthode de construction des fonctions de sensibilité suivant la méthode des fenêtres de poids (*Weight Window*), comme décrit dans la littérature et dans l'équation (2) et l'équation (3). Elle montre une fonction de sensibilité en (a), une fonction de réponse du détecteur (carte d'importance) en (c) et fonction de flux total de particules en (b).

Le premier fichier de résultats MCNP (appelé *mesh tally* dans MCNP) fournit une cartographie (sous la forme d'une matrice 3D), appelée *background particle flux* et notée ψ ou ψ_B (pour *Base case*), qui contient dans chaque maille le flux calculé à partir de tous les trajets d'un type de particule (neutron ou gamma,

¹² Une stratification indique un empilement, i.e. une superposition de roches sédimentaires. Les différentes couches, d'épaisseur plus ou moins importante, sont appelées des strates.

selon l'outil simulé et la physique impliquée). Le calcul se fait à partir d'un *tally* F4 qui calcule la trace des particules dans chaque maille (*track-length estimator*). Cette cartographie est uniquement liée à la source.

Le deuxième fichier calculé avec le *Weight Window Generator* de MCNP (appelé *wwout* dans MCNP) fournit une cartographie (également sous la forme d'une matrice 3D) appelée fonction de réponse du détecteur et noté S^+ ou S_B^+ qui contient, dans chaque maille, une importance représentative de la contribution de la maille au signal mesuré au détecteur (proche ou lointain). Cette cartographie est propre à chacun des deux détecteurs et donc, une simulation est nécessaire pour chacun. La multiplication de ces deux matrices 3D, ψ et S^+ donne une fonction de sensibilité de flux en 3D noté FSF dans l'équation (3) ou FSF_B dans l'équation (2) et dans la Figure 7 pour chacun des détecteurs (cf. Figure 7, Figure 8 et Figure 9).

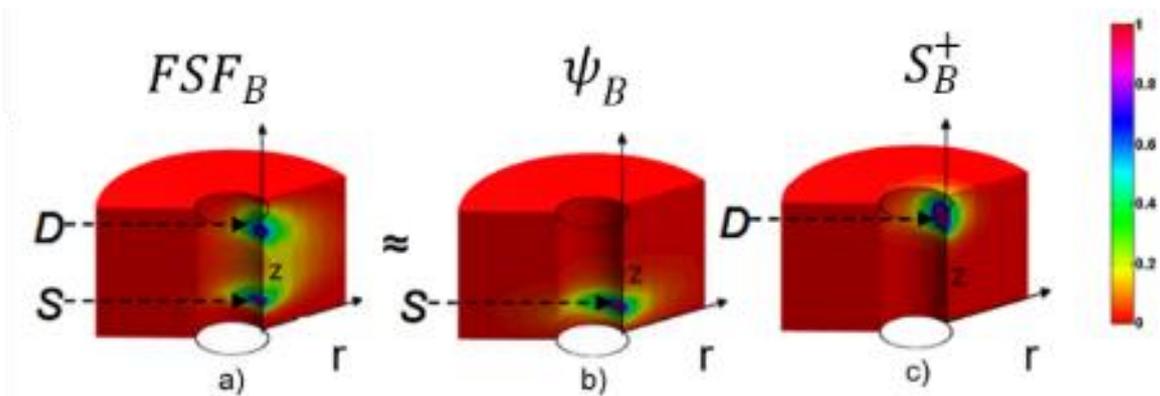


Figure 7: Calcul de la fonction de sensibilité de flux (FSF) du détecteur lointain d'un outil générique de porosité hydrogène neutron-neutron longhorn WL: (a) représentation 3D de la FSF_B ; (b) représentation 3D du flux de neutron total ψ_B (maximum autour de la source notée S); (c) fonction de réponse S_B^+ du détecteur lointain (maximale près de ce dernier, noté D). Les couleurs sont normalisées à 1 sur la valeur maximale de chaque représentation 3D. D'après Mendoza et al., 2007.

Le terme E dans l'équation (2) fait référence aux énergies des particules qui ont contribué aux importances dans les mailles du deuxième fichier MCNP (*wwout*) et de celles qui ont contribué au flux dans les mailles du premier fichier MCNP (*mesh tally*). Pour la FSF d'un outil de porosité hydrogène neutron-neutron, il n'y a pas de filtrage en énergie, mais pour les FSF d'un outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique ou celles des outils neutron-gamma Sigma et C/O, le terme E correspond à des bandes d'énergie. Pour un outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique, la carte d'option « WWGE:P 60E-3 100E-3 140E-3 661.7E-3 » est utilisée dans MCNP pour le calcul de S^+ et « EMESH 60E-3 100E-3 140E-3 661.7E-3 » est utilisée pour ψ .

Dans l'exemple de l'outil gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique présenté ci-dessus, ces cartes d'options subdivisent les cartographies de flux et d'importances en quatre fenêtres d'énergies de façon à ne prendre en compte dans les calculs de S^+ ou ψ que les rayonnements gamma ayant une énergie comprise entre 60 et 100 keV pour la mesure du PEF, ou entre 140 et 661.7 keV pour la mesure de pb. On note que MCNP fournit aussi un résultat dans les fenêtres de 0 à 60 keV et de 100 à 140 keV, mais ils ne sont pas exploités.

Cette subdivision nous est imposée par la méthode du *Weight Window* (WW pour *Weight Window*) et correspond déjà une limitation dans le calcul des fonctions de sensibilité. La fonction de sensibilité de flux correspondant à la mesure de masse volumique bulk doit être la cartographie du flux des gammas contribuant à cette même mesure. Elle doit retranscrire le flux des gammas depuis l'émission par la source de ^{137}Cs jusqu'à la détection par le scintillateur NaI(Tl) dans la fenêtre en énergie *hard*. Normalement, il

devrait donc y avoir dans la FSF de pb, la cartographie du flux uniquement des gammas qui contribuent au signal au détecteur, depuis leur émission à 661.7 keV jusqu'à leur détection (avec un dépôt d'énergie compris entre 140 et 540 keV).

Or ce n'est pas le cas, car la FSF de pb est calculée en utilisant des rayonnements gamma dont l'énergie est comprise entre 140 et 661.7 keV (zone où les interactions Compton dominant). Cette fenêtre en énergie est plus large que la fenêtre *hard* du spectre gamma utilisée pour la mesure de pb, entre 140 et 540 keV. Avec la méthode du WW, si des gammas rentrent dans le détecteur avec une énergie supérieure à 540 KeV et déposent la totalité de leur énergie, alors ces gammas seront aussi comptés dans la FSF de pb.

La méthode du WW montre des limitations à ce stade, car elle intègre le flux des gammas qui déposent entre 140 et 661.7 KeV dans le détecteur et non entre 140 et 540 KeV. Cette limitation reste faible pour la mesure de pb et peut être considérée comme une approximation raisonnable.

Dans la littérature (Mendoza *et al.*, 2007), une seule simulation permet de calculer à la fois les fonctions de sensibilité du PEF et de pb, la première étant calculée avec les rayonnements gammas d'énergie comprise dans la fenêtre *soft* entre 60 et 100 keV (zone où les interactions photoélectriques dominant). La fonction de sensibilité de flux correspondant à la mesure du PEF doit être la cartographie du flux des gammas contribuant à cette même mesure. Elle doit retranscrire le flux des gammas depuis l'émission par la source de ^{137}Cs jusqu'à la détection par le scintillateur NaI(Tl) dans la fenêtre en énergie *soft*. Or, avec la méthode du WW, le flux gamma est extrêmement faible aux alentours de la source pour la mesure du PEF, cf. Figure 9 (d). Avec la méthode du WW, la FSF du PEF ne retranscrit que le flux des gammas dont l'énergie est comprise entre 60 et 100 KeV et non entre 60 et 661.7 KeV. Ainsi la zone aux alentours (i.e. de 0 à 10 cm autour de la source de ^{137}Cs) de la source apparaît comme très peu sensible.

Un calcul séparé dédié à la FSF de la mesure du PEF pourrait être une solution, avec les cartes d'options « WWGE:P 60E-3 661.7E-3 » pour le calcul de S^+ et « EMESH 60E-3 661.7E-3 » pour celui de ψ . Ces cartes d'options permettraient de subdiviser les cartographies de flux et d'importances en deux fenêtres d'énergies, de 0 à 60 keV et de 60 à 661.7 keV. Cela permettrait de contenir le flux gamma depuis l'émission par la source de ^{137}Cs jusqu'à la détection dans la fenêtre *soft* entre 60 et 100 KeV. Cependant cela impliquerait que la fonction de sensibilité du PEF résultante contienne aussi la contribution des gammas en dehors de la fenêtre *soft* (i.e. avec un dépôt d'énergie < 100 KeV). Cette contrainte imposée par la méthode du WW avec MCNP et le *Weight Window Generator* est une de nos motivations pour développer une autre méthode de calcul des fonctions de sensibilité.

La pertinence de la méthode du *Weight Window* avec MCNP, détournée de son utilité première (i.e. le *biasing*) pour faire des calculs des fonctions de sensibilité, sera investiguée dans le chapitre 3 au travers d'une comparaison avec des mesures de perturbation en centre d'étalonnage pour un outil neutron-neutron de porosité hydrogène, et au travers d'une comparaison avec une autre méthode de calcul utilisant le code GEANT4. Cette nouvelle méthode de calcul des fonctions de sensibilité est basée sur les nombres de particules (*Particle Tracking*) qui contribuent au signal, dans les différentes mailles de l'espace, au lieu de l'estimateur de flux basé sur leurs traces (*track-length estimator*). La méthode du *Particle Tracking* (PT pour *Particle Tracking*) dans GEANT4 n'est pas une méthode de *biasing* détournée contrairement à la méthode du *Weight Window* (WW) dans MCNP.

1.2.4 Projection des fonctions de sensibilité en 2D puis en profils 1D

La FSF calculée avec la méthode du WW vise à reproduire la cartographie en 3D du flux de particules contribuant au signal mesuré au détecteur (proche ou lointain). Pour être utilisée, la FSF dans chaque maille j est normalisée à la somme des sensibilités dans tout le volume (normalisation à l'unité,

cf. équation (4)). Cette somme discrète est généralement notée sous forme d'intégrale dans la littérature. Du fait de la non-continuité sur les axes R et Z et sur l'angle Ω des valeurs de flux total de particules et d'importance contenues dans les fichiers de sortie MCNP, nous préférons utiliser une notation équivalente à l'équation (3), i.e. sous forme d'une somme discrète de l'ensemble des mailles:

$$FSF_{norm}^j = \frac{FSF^j}{\sum_{j=1}^n FSF^j} \quad (4)$$

Une fois normalisée avec l'équation (4), la somme des valeurs de sensibilité contenues dans la fonction de sensibilité de flux 3D FSF_{norm} est égale à 1:

$$\sum_{j=1}^n FSF_{norm}^j = 1 \quad (5)$$

FSF_{norm}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité dans la maille j de la fonction de sensibilité de flux 3D FSF_{norm} . FSF_{norm} est une matrice 3D (dont la somme des termes est normalisé à l'unité) qui est utilisée comme un outil mathématique dans les algorithmes de FFM pour faire des prédictions rapides de diagraphies (cf. partie 1.3 et chapitre 3).

j est l'indice de la maille et n est le nombre total de mailles dans le maillage cylindrique 3D. La position de la maille j est donnée en coordonnées cylindriques (R, Z, Ω) suivant le maillage surimposé présenté dans la Figure 5 et la Figure 6. R (cm) est l'axe radial avec R_{min} et R_{max} les rayons minimums et maximum (par exemple 0 au centre du puits et 60 cm la distance radiale maximum du maillage surimposé dans MCNP), Z (cm) est la profondeur le long de l'outil et Ω (rad) est l'angle azimutal de $\Omega_{min} = 0$ et $\Omega_{max} = 2\pi$.

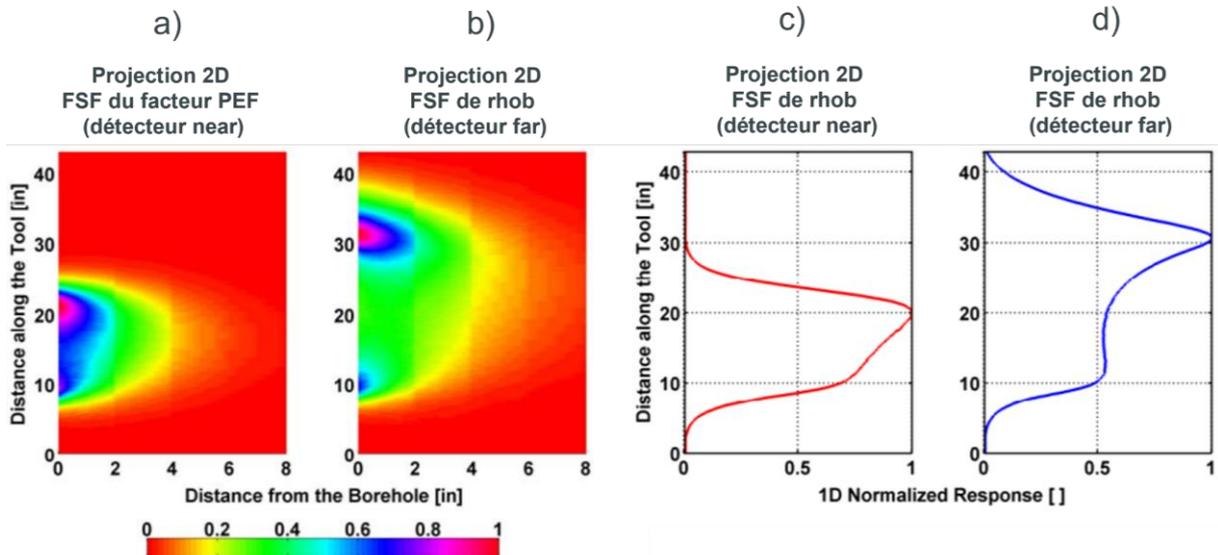


Figure 8: Projections 2D (graphiques a et b) et profils 1D (c et d) des fonctions de sensibilité de flux d'un outil neutron-neutron de porosité hydrogène longhorn WL pour les détecteurs proche et lointain. L'échelle des couleurs des figures (a) et (b) est normalisée à 1 sur leurs sensibilités maximales respectives, l'axe des ordonnées représente la profondeur le long de la sonde et l'axe des abscisses représente le rayon vers la formation. Les sommes des valeurs de sensibilité des figures (c) et (d) sont normalisées à 1. L'axe des ordonnées représente la profondeur le long de la sonde et l'axe des abscisses représente ici ces valeurs de FSF normalisées. D'après Mendoza et al., 2007.

Les FSF de la Figure 8 (a et b) et de la Figure 9 (a, b et c) sont des projections en 2D de la fonction de sensibilité de flux 3D de l'outil en fonction de la profondeur Z et en fonction du rayon R, obtenues en intégrant les FSF sur l'angle Ω .

Afin de mieux apprécier la résolution verticale et radiale des FSF, il est préférable de réaliser une projection 1D. Pour obtenir le profil 1D de sensibilité en fonction de Z comme en Figure 8 (c et d) et en Figure 9 (d, e et f), on intègre les projections 2D précédentes sur l'axe R.

Pour obtenir le profil 1D de sensibilité en fonction de R, il faut intégrer les projections 2D sur l'axe Z. La projection 1D suivant R n'est pas présentée sur la Figure 8 et la Figure 9. Les fonctions 1D suivant Z ou R, appelées profils de sensibilité axiaux ou radiaux dans le chapitre 3, sont normalisées à l'unité (normalisation équivalente à l'équation (4)) à des fins de visualisation et de comparaison.

Il existe d'autres types de projections dans la littérature comme les *J-functions* qui sont des fonctions 1D suivant R. Elles sont normalisées de manière cumulative et sont croissantes de manière monotone de 0 à 1 depuis le bord du puits jusqu'à la profondeur d'investigation maximale de l'outil. Les valeurs clés généralement utilisées pour apprécier la pénétration radiale d'un outil sont les distances R qui correspondent à 50 % et 90 % du signal intégré. Cette dernière limite de 90 % est considérée comme la longueur radiale d'investigation (Sherman *et al.*, 1975).

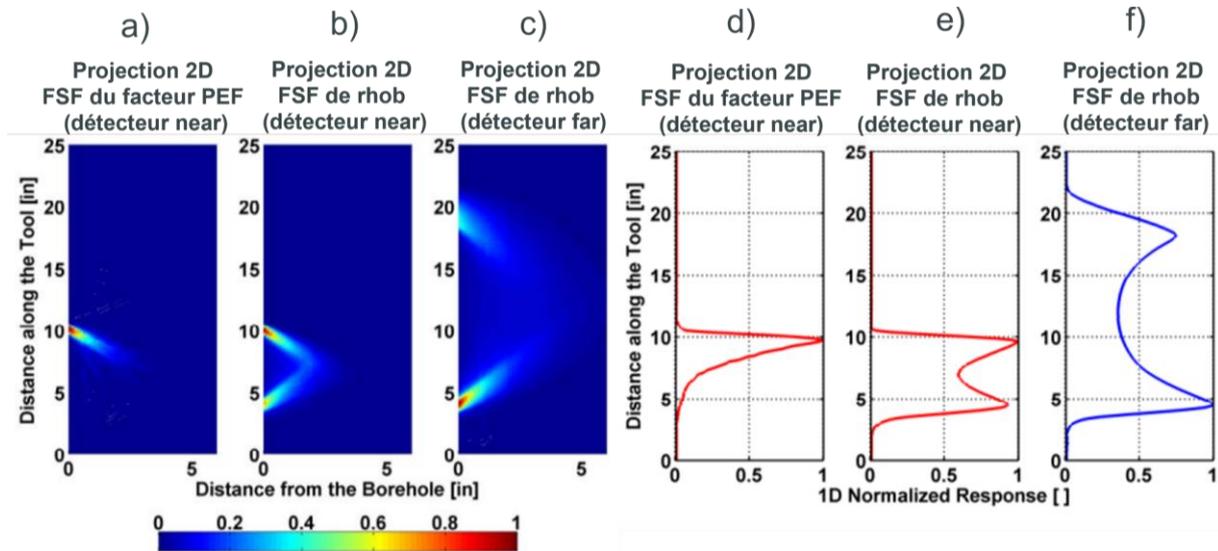


Figure 9: Projections 2D (graphiques a, b et c) et 1D (d, e, f) des FSF d'un outil gamma-gamma de litho-densité longhorn WL: (a) et (d) sont les FSF 2D et 1D de la mesure du PEF du détecteur proche, (b) et (e) celles de la mesure de masse volumique; (c) et (f) sont les FSF 2D et 1D de la mesure de masse volumique du détecteur lointain. L'échelle des couleurs des figures (a), (b) et (c) est normalisée à 1 sur leurs sensibilités maximales respectives, de même que les courbes (d), (e) et (f). D'après Mendoza *et al.*, 2007.

Dans le calcul des FSF, la simulation Monte-Carlo tient compte de la géométrie de la sonde, du puits et de la formation rocheuse, les mailles surimposées englobant tout le puits avec l'outil et la formation rocheuse. Pourtant, Mendoza *et al.*, 2007 réduisent la FSF à la formation rocheuse uniquement et les FSF présentées en Figure 8 et Figure 9 ne reflètent pas la sensibilité dans le puits. Les FSF utilisées par les algorithmes de FFM contiennent l'importance S^+ et le flux ψ seulement au-delà du bord du puits. La somme de la sensibilité des mailles contenue dans la formation rocheuse est normalisée à la valeur 1, avec pour R_{\min} dans l'équation (4) le rayon du puits, par exemple 10 cm. Les mailles du puits sont supprimées des matrices 3D correspondant à la fonction sensibilité de flux.

La raison de la suppression des mailles du puits dans la fonction de sensibilité s'explique par le fait que les algorithmes de FFM ont été initialement développés uniquement pour faire des prédictions de diagraphies nucléaires en configuration de puits ouvert. Dans l'ensemble des publications qui traitent du sujet, il est considéré que les variations de porosité hydrogène, de masse volumique bulk, de PEF ou de paramètre Sigma sont liées uniquement aux variations des propriétés pétrophysiques de la formation rocheuse. Le puits est considéré comme constant, sans variations de fluides ou de géométries suivant l'axe Z, et peut donc être retiré de la fonction de sensibilité.

Cette simplification est pertinente en conditions de puits ouvert et a été validée dans les références Mendoza *et al.*, 2010a et Mendoza *et al.*, 2010b, mais nécessite d'être revisitée en conditions de puits tubé avec de fortes hétérogénéités radiales entre l'outil diagraphique et la formation rocheuse. Dans cette configuration plus complexe, en plus de la formation rocheuse, la fonction de sensibilité calculée en puits tubé doit inclure le tubage en acier, le ciment et le puits.

Pour évaluer la pertinence des fonctions de sensibilité et la capacité des algorithmes de FFM à prédire la réponse des outils en conditions de puits tubé, des mesures ont été réalisées et seront présentées dans le chapitre 3 et le chapitre 4. Les fonctions de sensibilité de flux calculées avec deux méthodes (*Weight Window* et *Particle Tracking*) sont comparées à des expériences de perturbation et les diagraphies nucléaires prédites par les algorithmes de FFM sont comparées avec des mesures en environnement contrôlé dans un centre d'étalonnage.

1.2.5 Algorithmes de prédiction rapide des diagraphies nucléaires (algorithmes de FFM)

Pour prédire avec les algorithmes de FFM, une diagraphie de masse volumique bulk, de facteur photoélectrique, de porosité hydrogène ou de paramètre d'absorption neutronique Sigma (grandeur proportionnelle à la section efficace d'absorptions macroscopique), il faut disposer d'une FSF et d'un modèle numérique de terrain (noté EM pour *Earth Model*). La FSF et le EM sont des matrices 3D de mêmes dimensions.

La FSF contient dans chaque maille, des valeurs de sensibilité normalisée suivant l'équation (4). Le EM quant à lui, contient dans chaque maille, des grandeurs pétrophysiques nucléaires intrinsèques. Pour l'outil gamma-gamma, le EM contient des valeurs de masse volumique bulk (ρb) ou de facteur photoélectrique (PEF). Pour l'outil neutron-neutron, le EM contient des valeurs de longueur de ralentissement des neutrons rapides (L_s pour *Slowing down Length*), de longueur de diffusion des neutrons thermiques (L_d pour *Diffusion Length*) et de masse volumique bulk (ρb), cf. partie 1.3. Pour l'outil neutron-gamma, le EM contient des valeurs de paramètre d'absorption neutronique Sigma, cf. partie 1.4. Les grandeurs ρb , PEF, L_s , L_d et Sigma sont calculées avec le logiciel UTNuPro (Montgomery *et al.*, 2016).

Une fois le EM bâti avec le ou les grandeurs pétrophysiques nucléaires intrinsèques, il est multiplié terme à terme (produit d'Hadamard) par la FSF pour obtenir une grandeur pétrophysique apparente, cf. équation (6) pour la prédiction de la masse volumique bulk.

$$\rho b_{apparent} = \sum_{j=1}^n FSF_{norm}^j \times EM_{\rho b_j} \quad (6)$$

$\rho b_{apparent}$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) est la masse volumique bulk apparente. FSF_{norm}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité contenue la maille j de la fonction de sensibilité de flux FSF_{norm} , normalisée selon l'équation

(4), de l'outil gamma-gamma de litho-densité. EM_pb^j ($g.cm^{-3}$) est la masse volumique bulk intrinsèque contenue la maille j du modèle numérique de terrain EM_pb .

La multiplication selon équation (6), d'une FSF d'un outil gamma-gamma de litho-densité et d'un EM homogène sur Z , R et Ω (i.e. composé d'une seule couche géologique avec une masse volumique (pb) unique), donne une valeur de masse volumique bulk apparente ($pb_{apparent}$) égale à la valeur intrinsèque (pb) de la formation rocheuse. En revanche, dans un EM hétérogène sur Z , R et Ω (i.e. avec plusieurs couches géologiques présentant des masses volumiques (pb) différentes), on obtient avec l'équation (6), une masse volumique bulk apparente ($pb_{apparent}$) qui est une moyenne pondérée des valeurs de masses volumiques bulk intrinsèques (pb). En d'autres termes, l'équation (6) donne une moyenne pondérée des masses volumiques des roches présentes dans le volume investigué par l'outil gamma-gamma de litho-densité à une profondeur donnée. Ce principe est le même pour une diagraphie du PEF, de porosité hydrogène ou Sigma.

La méthode de prédiction des diagraphies avec les algorithmes de FFM consiste à prédire une nouvelle grandeur pétrophysique mesurée par le détecteur proche ou lointain, en déplaçant progressivement l'outil dans le puits (l'outil se déplace suivant l'axe Z et passe par des interfaces géologiques entre plusieurs formations rocheuses de propriétés pétrophysiques différentes). On a donc une moyenne pondérée glissante le long du puits de grandeurs pétrophysiques intrinsèques (e.g. pb , Φ , PEF, Sigma, etc.).

La valeur de la moyenne pondérée glissante dépend d'une part du modèle numérique de terrain (homogène ou hétérogène) et d'autre part du volume d'investigation de l'outil. Le volume d'investigation est retranscrit en 3D par la FSF. Elle utilisée ici comme un outil mathématique après normalisation à l'unité selon l'équation (4). Ainsi, à chaque nouvelle cote en profondeur (e.g. centimétrique ou pluricentimétrique suivant la résolution souhaitée), une FSF est sélectionnée pour sa pertinence à représenter le volume d'investigation de l'outil dans un EM donné, parmi un nombre restreint de FSF précalculées dans une bibliothèque (les cas de bases).

L'équation (7) est une formulation analogue à l'équation (6), mais destinée à prédire les diagraphies de porosités hydrogène (appelée aussi porosités apparentes) et notée PHI pour *Porosity Hydrogen Index*.

$$PHI = \sum_{j=1}^n FSF_{norm}^j \times EM_Phi^j \quad (7)$$

PHI (PU) est la porosité hydrogène. FSF_{norm}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité contenue la maille j de la fonction de sensibilité de flux FSF_{norm} , normalisée selon l'équation (4), de l'outil neutron-neutron de porosité hydrogène. EM_Phi^j (PU) est la porosité intrinsèque contenue la maille j du modèle numérique de terrain EM_Phi .

Contrairement à la masse volumique bulk (pb) ou au facteur photoélectrique (PEF) obtenus avec une mesure gamma-gamma, la porosité hydrogène (PHI) obtenus avec une mesure neutron-neutron, est plus complexe à prédire, car elle est très sensible aux effets de matrice.

À porosité intrinsèque constante de la roche, un changement de lithologie ou de fluide de saturation (e.g. de la saumure ou des hydrocarbures composés d'huile ou de gaz) peut réduire ou augmenter significativement le taux de comptages et peut par conséquent induire une porosité hydrogène mesurée plus grande ou plus faible que celle réelle de la roche. À l'inverse, la porosité hydrogène mesurée peut être inférieure à la porosité intrinsèque, et même négative si la porosité intrinsèque est proche de 0 PU et la lithologie moins absorbante que la roche calcaire utilisée pour étalonner les taux de comptages (e.g. une roche gréseuse).

De ce fait, Mendoza *et al.*, 2010a ont montré que l'équation (7) (où EM_{Φ} est le modèle numérique de terrain contenant des porosités intrinsèques) ne peut pas être utilisée comme l'équation (6) (où EM_{pb} est le modèle numérique de terrain contenant des masses volumiques bulk intrinsèques) pour prédire des diagraphies justes de porosités hydrogène.

Pour résoudre ce problème, il faut bâtir un paramètre pétrophysique spécifique à la mesure neutron-neutron de porosité hydrogène qui soit plus représentatif des variations de taux de comptages des détecteurs (i.e. plus représentatif des variations de section efficace de diffusion élastique, de diffusion inélastique et de capture radiative). Cela sera également le cas pour la mesure Sigma. Nous proposerons un paramètre de formation spécifique pour la mesure Sigma dans le chapitre 4 dédiée cet outil.

1.3 Paramètre de formation spécifique à la mesure neutron-neutron de porosité

1.3.1 Non-linéarité de la longueur de migration

La mesure neutron-neutron de porosité hydrogène est sensible à la teneur en hydrogène dans l'environnement, mais aussi à la lithologie, i.e. aux autres composants comme C, O, Ca, Mg, Si, etc. (Ellis *et al.*, 2003, Ellis *et al.*, 2004). Si la lithologie varie, les sections efficaces de diffusion élastique, de diffusion inélastique et de capture radiative de la formation rocheuse varient également (Ellis *et al.*, 2007).

Il existe des formations rocheuses peu poreuses, mais présentant une longueur de migration faible, comme les argiles qui contiennent une forte quantité d'hydrogène dans leurs minéraux hydratés et peu de pores. Dans ce cas, la porosité intrinsèque est nulle, mais la porosité hydrogène lue par l'outil est grande.

Mendoza *et al.*, 2010a ont proposé initialement d'utiliser la longueur de migration pour remplacer dans l'équation (7), la porosité intrinsèque utilisée pour construire EM_{Φ} . La longueur de migration noté L_m (cm) est la somme quadratique de la longueur de ralentissement (*scattering length*) noté L_s (cm) et de la longueur de diffusion (*diffusion length*) noté L_d (cm). La longueur de migration des neutrons diminue avec la porosité intrinsèque de la formation rocheuse, quand celle-ci est remplie d'eau, selon une fonction polynomiale d'ordre deux (cf. Figure 10, McKeon *et al.*, 1989).

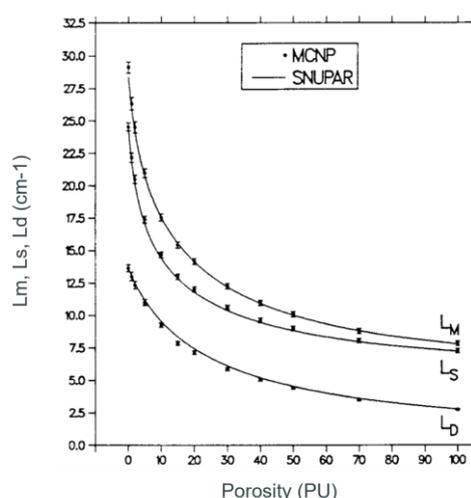


Figure 10: Évolution des longueurs de migration, de ralentissement et de diffusion avec la porosité dans une comparaison entre SNUPAR (logiciel de calcul de propriétés nucléaires de Schlumberger) et MCNP. D'après McKeon *et al.*, 1989.

La longueur de migration est donc plus représentative des variations de taux de comptages des détecteurs que la porosité intrinsèque de la formation rocheuse. En utilisant les fonctions polynomiales de la Figure 10, il est possible de déterminer pour chaque matériau même dépourvu de porosité (tubage, ciment ou formation argileuse sans pore), une longueur de migration et donc une porosité apparente (ou équivalente).

L'utilisation de la longueur de migration présente des inconvénients pour faire des prédictions rapides de diagraphies avec les algorithmes de FFM. La Figure 11 montre deux fonctions d'étalonnage (détecteur proche et lointain) d'un outil neutron-neutron de porosité hydrogène permettant de convertir l'inverse de

la longueur de migration apparente ($L_{m\text{apparent}}$) en taux de comptages. Les taux de comptages sont obtenus par simulation Monte-Carlo avec MCNP (*tally* F4 avec la *FM card* N°103 pour la réaction nucléaire ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$). Les longueurs de migrations apparentes sont obtenues avec relation analogue à l'équation (7) en remplaçant $\text{PHI}_{\text{apparent}}$ et EM_Φ par $L_{m\text{apparent}}$ et EM_{Lm} .

Ces deux fonctions polynomiales d'ordre deux de régression (cf. Figure 11) constituent le modèle prédictif. Chaque valeur sur l'axe des ordonnées correspond à une simulation Monte-Carlo (un taux de comptage) avec MCNP et chaque valeur sur l'axe des abscisses correspond à l'inverse d'une longueur de migration apparente ($L_{m\text{apparent}}$) i.e. à la multiplication d'une FSF et d'un EM homogène. L'ensemble des points sont appelés les cas de base contenus dans la bibliothèque.

À partir de ces fonctions étalonnage (cf. Figure 11), pour un nouveau modèle de terrain numérique hors cas de base donné (constitué de longueurs de migration intrinsèques), il est désormais possible d'estimer rapidement, un taux de comptages théorique délivré par chacun des deux détecteurs (proche et lointain) de l'outil neutron-neutron de porosité hydrogène, équivalent à ce que l'on aurait obtenu en faisant la longue simulation Monte-Carlo avec MCNP.

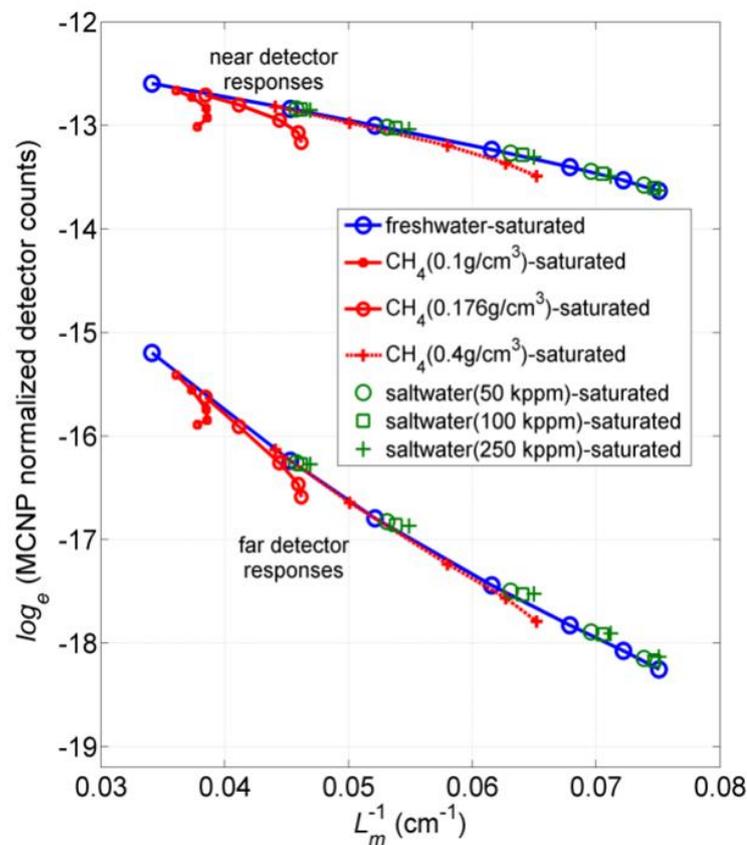


Figure 11: Courbes d'étalonnage des diagraphies de taux de comptages des détecteurs, proche et lointain, en fonction de l'inverse de la longueur de migration pour une formation de lithologie calcaire CaCO_3 (limestone). Les points rouges représentent les cas d'une formation saturée en gaz pour trois pressions différentes. Les points verts représentent les cas d'une formation saturée en eau salée pour trois teneurs en sel différentes. Le point bleu représente le cas d'une formation saturée en eau douce. D'après Ijasan et al., 2013c.

Toutefois, ces premières fonctions d'étalonnage des algorithmes de FFM, utilisant la longueur de migration pour prédire des taux de comptages d'un outil neutron-neutron de porosité hydrogène, ne sont pas suffisantes.

Dans la Figure 11, Ijasaan *et al.*, 2013c font varier sur l'axe des abscisses l'inverse de la longueur de migration apparente en changeant la porosité et les fluides de saturation du modèle numérique de terrain. Sur l'axe des ordonnées sont reportés les logarithmes des taux de comptages simulés dans les modèles numériques homogènes de lithologie calcaire pour ces différentes porosités et fluides de saturation: eau douce, saumure avec différentes salinités, hydrocarbures (gaz de méthane CH₄) avec différentes pressions.

Pour des formations saturées en gaz (cf. Figure 11 courbes rouges), on observe une forte « non-linéarité » (échelle semi-logarithmique) aux faibles pressions, à savoir les densités de gaz de 0.1 et 0.176 g.cm⁻³. La Figure 11 montre que la longueur de migration est insuffisante comme paramètre pétrophysique pour caractériser ces formations, interprétées comme ayant une faible porosité (faible concentration en noyaux d'hydrogène). Quand la pression du gaz de méthane augmente (densité 0.4), on se rapproche de l'eau en termes de concentration en noyaux d'hydrogène et par suite de la « linéarité » des courbes des formations saturées en eau.

Cette non-linéarité nous montre que si l'utilisateur des algorithmes de FFM cherche à prédire les deux taux de comptages mesurés sur les détecteurs proche et lointain pour un cas de formation rocheuse poreuse saturée en gaz avec les fonctions d'étalonnage de la Figure 11 (cf. point rouge), les résultats prédits seront différents des taux de comptages simulés avec MCNP. En d'autres termes, ces fonctions d'étalonnage ne marchent pas pour tous les cas que l'on peut rencontrer en géologie pétrolière.

Par ailleurs, dans le cadre de l'extension des algorithmes de FFM aux puits tubés présenté au chapitre 3 (i.e. des cas radialement hétérogènes avec casing, ciment, etc.), la longueur de migration n'est pas utilisée directement, comme cela est suggéré par Ijasaan *et al.*, 2013c. Un paramètre de formation composite noté Fp (cf. 1.3.2) est utilisé à la place pour bâtir un modèle prédictif (cf. Figure 46) liant les taux de comptages simulés avec MCNP au modèle numérique de terrain.

1.3.2 Implémentation du paramètre de formation composite Fp

Ijasaan *et al.*, 2013c introduisent un nouveau paramètre de formation composite appelé Fp (pour *Formation Parameter*, et exprimé en cm⁻¹) qui prend en compte les propriétés neutroniques Ls et Ld ainsi que la masse volumique bulk de la formation rocheuse, cf. équation (8).

$$Fp = \sum_{j=1}^N \frac{a}{\sqrt{(FSF_{norm}^j \times EM_{Ls}^j)^2 + \alpha \times (FSF_{norm}^j \times EM_{Ld}^j)^2}} + b \times FSF_{norm}^j \times EM_{pb}^j \quad (8)$$

Fp (cm⁻¹) est le paramètre de formation composite. FSF_{norm}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité contenue la maille j de la fonction de sensibilité de flux FSF_{norm}, normalisée selon l'équation (4), de l'outil neutron-neutron de porosité hydrogène. EM_{Ls}^j (cm) et EM_{Ld}^j (cm) sont les longueurs de ralentissement et de diffusion et EM_{pb}^j (g.cm⁻³) est la masse volumique bulk. Ces trois grandeurs sont contenues dans la maille j des modèles numériques de terrain EM_{Ls}, EM_{Ld} et EM_{pb}. α et a (sans dimension) et b (cm².g⁻¹) sont des coefficients empiriques obtenus par optimisation.

Contrairement à l'équation (6) ou l'équation (7), utilisant un seul modèle numérique de terrain EM_{pb} ou EM_Φ (composé respectivement de la grandeur pétrophysique intrinsèque pb ou Φ), l'équation (8) utilise trois modèles numériques de terrain différents EM_{Ls}, EM_{Ld} et EM_{pb} (respectivement composés des grandeurs pétrophysiques intrinsèques Ls, Ld et pb).

La Figure 12 (a) montre des points verts, bleus et rouges dont les valeurs sur l'axe des ordonnées sont les taux de comptages qui sont obtenus par simulation Monte-Carlo avec MCNP et dont les valeurs sur l'axe des abscisses sont les F_p obtenus avec l'équation (8).

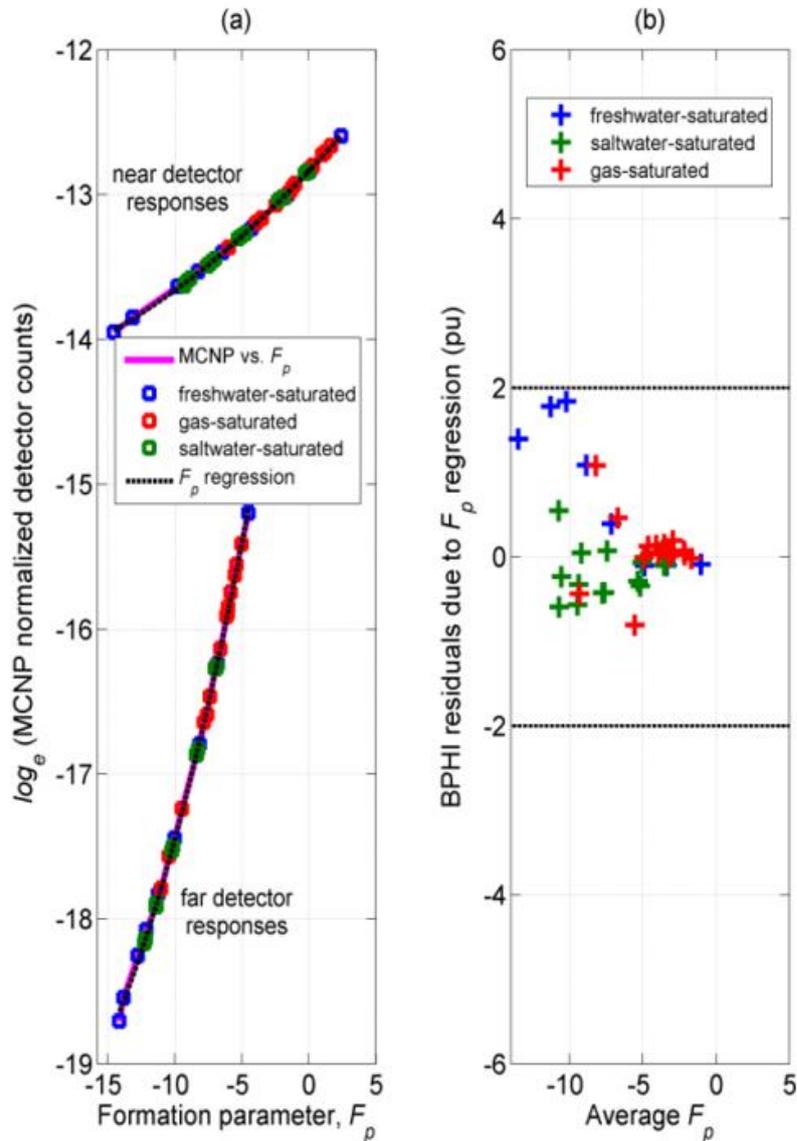


Figure 12: (a) Fonctions polynomiales d'ordre deux de régression liant les taux de comptages obtenus par simulation Monte-Carlo avec MCNP aux paramètres composites F_p pour les deux détecteurs proche (*near*) et lointain (*far*) d'un outil de porosité hydrogène neutron-neutron longhorn LWD. L'ensemble des points représente une formation de lithologie calcaire (limestone) de plusieurs porosités, saturée avec trois fluides différents. Les points rouges représentent les cas d'une formation saturée en gaz, les verts en eau salée et les bleus en eau douce. (b) Écarts entre les porosités compensées simulées avec MCNP (valeurs cibles, ou « vraies ») et les porosités compensées BPHI obtenues par les algorithmes de FFM (Fast Forward Modeling), cf. détails dans le texte. D'après Ijasa et al., 2013c.

La Figure 12 (a) montre également deux fonctions d'étalonnages qui sont des fonctions polynomiales d'ordre deux de régression (cf. les courbes noires pour les détecteurs proche noté *near* et lointain noté *far*). Elles sont bijectives (en échelle semi-logarithmique) et lient les paramètres de formation composites F_p calculés avec l'équation (8) aux taux de comptages prédits grâce à l'équation (9). Ces fonctions sont obtenues en minimisant les écarts entre les taux de comptages prédits avec l'équation (9) et les taux de comptages simulés avec MCNP.

$$\log(\text{taux de comptages}) = \sum_{n=0}^N m_n \times Fp^n \quad (9)$$

Log(taux de comptages) (c.s⁻¹) est le logarithme du taux de comptages prédit. Fp (cm⁻¹) est le paramètre de formation composite, obtenu avec l'équation (8). m_n (m₁, m₂ et m₃) sont les coefficients de la fonction polynomiale d'ordre deux de régression obtenue par optimisation.

α, a et b de l'équation (8) ainsi que les coefficients de la fonction polynomiale d'ordre deux de régression m₁, m₂ et m₃ de l'équation (9) sont obtenus au travers d'une optimisation unique (i.e. une seule série d'itérations). L'optimisation consiste à déterminer les meilleures valeurs de α, a, b, m₁, m₂ et m₃ qui permettent de minimiser les écarts (minimisation d'une fonction coup) entre les taux de comptages prédits avec l'équation (9) et les taux de comptages simulés par méthode Monte-Carlo traditionnelle avec MCNP (les valeurs sur l'axe des ordonnées, cf. Figure 12 (a)). Les coefficients obtenus α, a, b, m₁, m₂ et m₃ sont uniques pour chaque détecteur (proche ou lointain) et pour chaque géométrie d'outil.

La Figure 12 (b) montre des résidus qui sont très faibles sur la porosité hydrogène prédite avec l'équation (9) appelée ici porosité compensée et notée BPHI (pour *Best Porosity Hydrogen Index*) obtenue avec l'outil LWD EcoScope de Schlumberger. Les écarts résiduels sont inférieurs à 2 PU entre les prédictions et les simulations Monte-Carlo (valeurs cibles). Le paramètre de formation composite s'avère donc plus pertinent que la longueur de migration utilisée dans le modèle de la Figure 11 pour prédire de façon univoque les diagraphies grâce aux algorithmes de FFM.

1.3.3 Prédiction des diagraphies de porosité

Cette partie résume le fonctionnement des algorithmes de FFM, en prenant l'exemple de la prédiction rapide de diagraphies délivrées par un outil neutron-neutron de porosité hydrogène.

- Prédiction du paramètre de formation composite Fp: les algorithmes de FFM calculent une diagraphie de Fp à partir de trois modèles numériques de terrain (EM_Ls, EM_Ld et EM_pb) et d'une fonction de sensibilité de flux (FSF_{norm}), normalisée selon l'équation (4). Les modèles numériques de terrain 3D sont modifiés en fonction de la lithologie rencontrée à chaque nouvelle cote en profondeur et une fonction de sensibilité de flux est sélectionnée, dans une bibliothèque restreinte de cas de base, pour sa pertinence à représenter le volume d'investigation de l'outil à cette profondeur donnée.
- Prédiction des taux de comptages: les algorithmes de FFM transforment la diagraphie de paramètres de formation composites (Fp) calculés avec l'équation (8) en taux de comptages prédits grâce à l'équation (9). L'équation (9) est une fonction polynomiale d'ordre deux de régression qui peut être considérée comme une fonction d'étalonnage. Une fois optimisée on dispose de deux séries de coefficients α, a, b, m₁, m₂ et m₃ (une série par détecteur, proche et lointain).
- Prédiction des porosités PHI: les algorithmes de FFM transforment la diagraphie de taux de comptages prédits en paramètres physiques recherchés, comme ici la porosité hydrogène, à partir des taux de comptages et des fonctions d'étalonnage comme celles des Figure 13 et Figure 14. Cette étape est détaillée dans ma partie suivante.

Dans le cas de l'outil de porosité hydrogène neutron-neutron, la porosité hydrogène est estimée pour chaque détecteur (proche ou lointain), ainsi qu'une porosité dite « compensée » avec le ratio de leurs taux de comptage.

Ceci se fait au travers de trois fonctions d'étalonnage reliant la porosité intrinsèque à CPS_{proche} et CPS_{lointain} (i.e. respectivement les taux de comptages prédits pour le détecteur proche et taux de comptages prédits pour le détecteur lointain, cf. Figure 13) et aussi à $CPS_{\text{proche}} / CPS_{\text{lointain}}$ (i.e. le ratio des taux de comptages prédits, cf. Figure 14). Ces trois fonctions d'étalonnage sont établies grâce aux cas de lithologie calcaire saturés en eau douce, simulés dans la bibliothèque de cas de base (de 0 Pu à 40 PU).

La Figure 13 présente les courbes d'étalonnage des deux détecteurs proche et lointain qui permettent de transformer les taux de comptages prédits en porosité hydrogène. Ces courbes sont obtenues par simulation Monte-Carlo (Ellis *et al.*, 2003) et ajustées avec des mesures en centre d'étalonnage (Chuilon *et al.*, 2019).

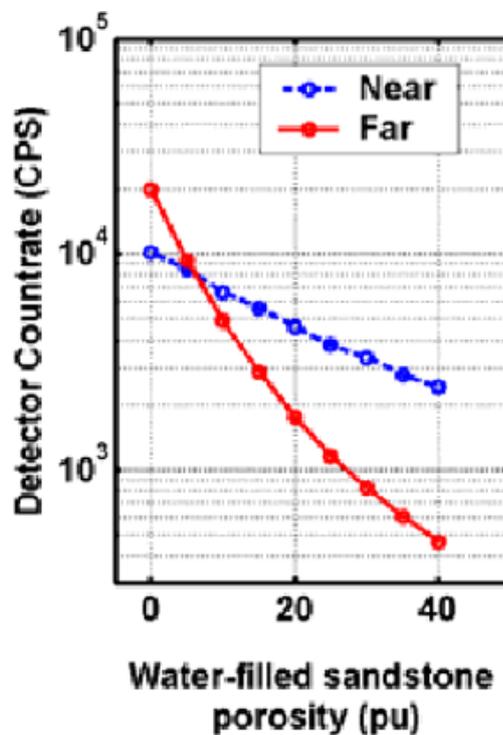


Figure 13: Courbes d'étalonnage de la porosité hydrogène pour les deux détecteurs proche et lointain dans une lithologie de type calcaire. D'après Mendoza *et al.*, 2005.

Ces fonctions d'étalonnage (cf. Figure 13) relient les deux porosités hydrogène délivrées par l'outil neutron-neutron aux taux de comptages mesurés. Les porosités hydrogène sont équivalentes à la porosité intrinsèque si et uniquement si la mesure des deux taux de comptages est faite dans une roche de type calcaire saturée en eau douce et un puits en configuration de trou ouvert rempli d'eau douce (sans *standoff* ni *mudcake*) et dont le diamètre est de 200 mm. Si la configuration de mesure est différente de la configuration d'étalonnage (celle explicitée précédemment) alors la porosité mesurée (i.e. la porosité hydrogène notée PHI) est différente de la porosité intrinsèque de la roche.

En pratique les configurations de mesures sont quasiment toujours différentes des configurations d'étalonnage. Le travail du géologue pétrolier est de corriger la porosité hydrogène mesurée, délivrée par l'outil, par des corrections d'environnement et/ou d'interpréter correctement la porosité hydrogène mesurée (i.e. non pas comme une porosité vraie ou intrinsèque, mais comme apparente).

La Figure 14 présente les courbes d'étalonnage des ratios de taux de comptages des deux détecteurs proche et lointain, pour déterminer une porosité compensée qui permet de s'affranchir en partie des effets de puits.

Si une atténuation du signal est visible sur les deux détecteurs, comme c'est le cas lors d'un décalage en l'outil par rapport à la paroi du puits (appelé *standoff* dans l'industrie pétrolière) ou de la présence d'une gangue de boue sur les parois du puits (*mudcake*), alors le ratio permet de compenser en partie ces effets, car ils se répercutent sur les deux détecteurs. Leurs taux de comptages respectifs sont impactés dans le même sens par ces effets et de ce fait le ratio l'est beaucoup moins. Les courbes d'étalonnage de la Figure 14 donnent une porosité généralement plus proche de la valeur intrinsèque de la roche que les courbes précédentes de la Figure 13, pour chaque détecteur.

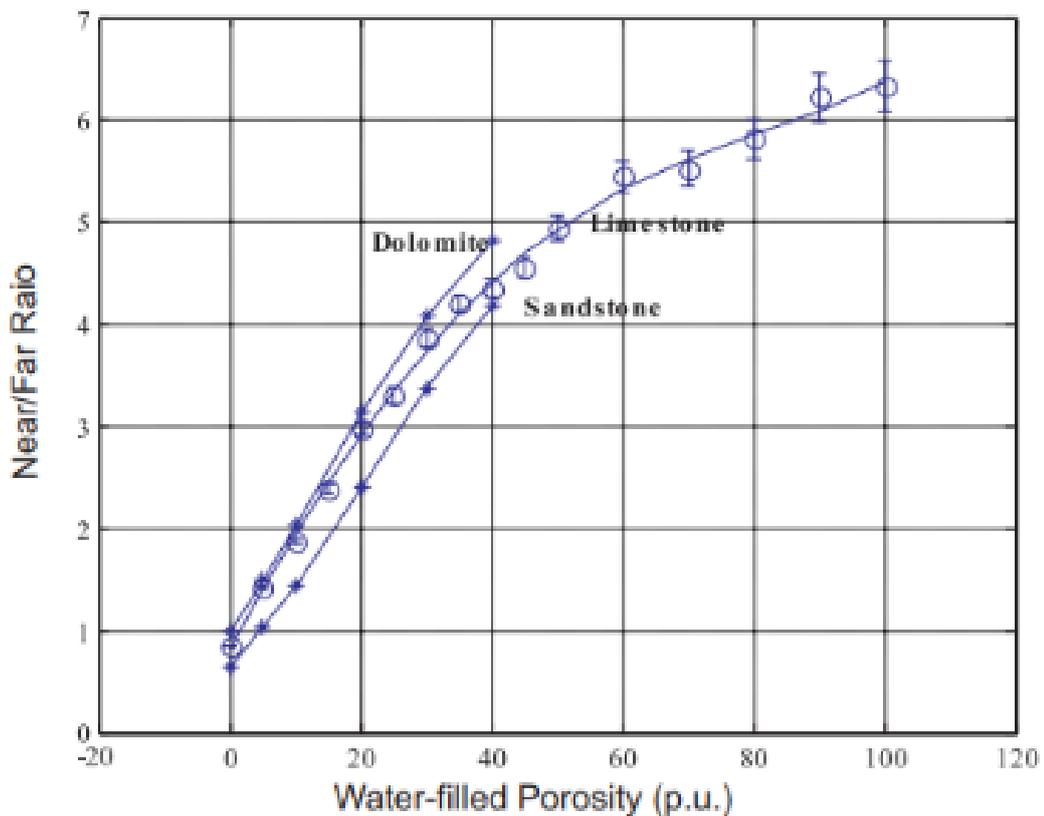


Figure 14: Courbes d'étalonnage de la porosité compensée pour trois lithologies: calcaire (limestone), dolomie (dolomite) et grès (sandstone). D'après Ellis et al., 2003.

Les algorithmes de FFM permettent donc de prédire des diagraphies des grandeurs physiques apparentes d'intérêt (PHI, pb, PEF, Sigma) ou des taux de comptages. La valeur de la grandeur physique apparente prédite est conditionnée par le modèle numérique de terrain implémenté par l'utilisateur dans les algorithmes de FFM.

L'objectif à long terme, au-delà même de cette thèse, est de retrouver par inversion multi-physique un modèle numérique de puits et de formation rocheuse proche de la réalité. Au début de ce processus d'inversion multi-physique, l'utilisateur définit un premier modèle numérique de terrain, qu'il estime proche de la réalité (appelé *first guess*). L'inversion prédit alors une série de diagraphies nucléaires (PHI, pb, PEF, Sigma) et les compare aux mesures en puits. Le résidu (l'écart entre les mesures et les prédictions) indique la pertinence du modèle initial. Par itérations, l'inversion va déterminer le modèle numérique de terrain qui minimise ce résidu, délivrant ainsi une solution globale. La solution globale de l'inversion multi-

physique est un modèle numérique de terrain 3D qui est une juxtaposition en profondeur des cas sélectionnés par les algorithmes de FFM dans la bibliothèque d'étalonnage.

Dans le cadre de la thèse, les prédictions seront confrontées aux données expérimentales mesurées en centre d'étalonnage pour valider l'approche globale (modèle Monte-Carlo, étalonnage numérique, algorithmes de prédiction rapide), mais nous n'irons pas jusqu'au stade de l'inversion multi-physique car ceci représente un vrai travail qui pourra faire l'objet d'une autre thèse spécifique.

1.4 Fonctions de sensibilité de l'outil Sigma

1.4.1 Calcul de la fonction de sensibilité de flux de l'outil neutron-gamma Sigma

Les outils Sigma ont historiquement été inventés pour déterminer la saturation en hydrocarbures dans des environnements salés (i.e. riche en chlore). Ils sont utiles pour compenser les mesures imprécises de résistivité, en particulier en configuration de puits tubé (Morris *et al.*, 2005). Aujourd'hui les outils de dernière génération neutron-gamma font indifféremment des acquisitions Sigma et C/O. Ces nouveaux outils sont sensibles à la formation rocheuse derrière le tubage et une couche de ciment. L'Université du Texas a proposé un outil générique neutron-gamma Sigma de type *longhorn WL*, cf. Figure 15. L'outil se compose d'une source de neutrons pulsée et de deux scintillateurs NaI(Tl), l'un proche à 35.6 cm de la source et l'autre lointain à 60.0 cm. Le diamètre externe de la sonde est de 4.34 cm.

Mimoun *et al.*, 2010 proposent de définir la fonction de sensibilité d'un outil neutron-gamma Sigma comme étant le flux de neutrons thermiques donnant lieu à une capture radiative puis à un dépôt d'énergie gamma dans un des deux détecteurs dans l'intervalle de temps d'intérêt (i.e. après l'impulsion du générateur, dans une fenêtre en temps spécifique). La FSF neutron-gamma Sigma se calcule de manière analogue à une FSF neutron-neutron de porosité ou à une FSF gamma-gamma de litho-densité. Elle est obtenue par la multiplication de la carte d'importance et du flux de neutrons thermiques définis ici comme ayant une énergie inférieure à 414 meV (seuil arbitraire fixé par McKeon *et al.*, 1989) afin d'englober l'intégralité des neutrons thermiques donnant lieu à une capture radiative (cf. Figure 16).

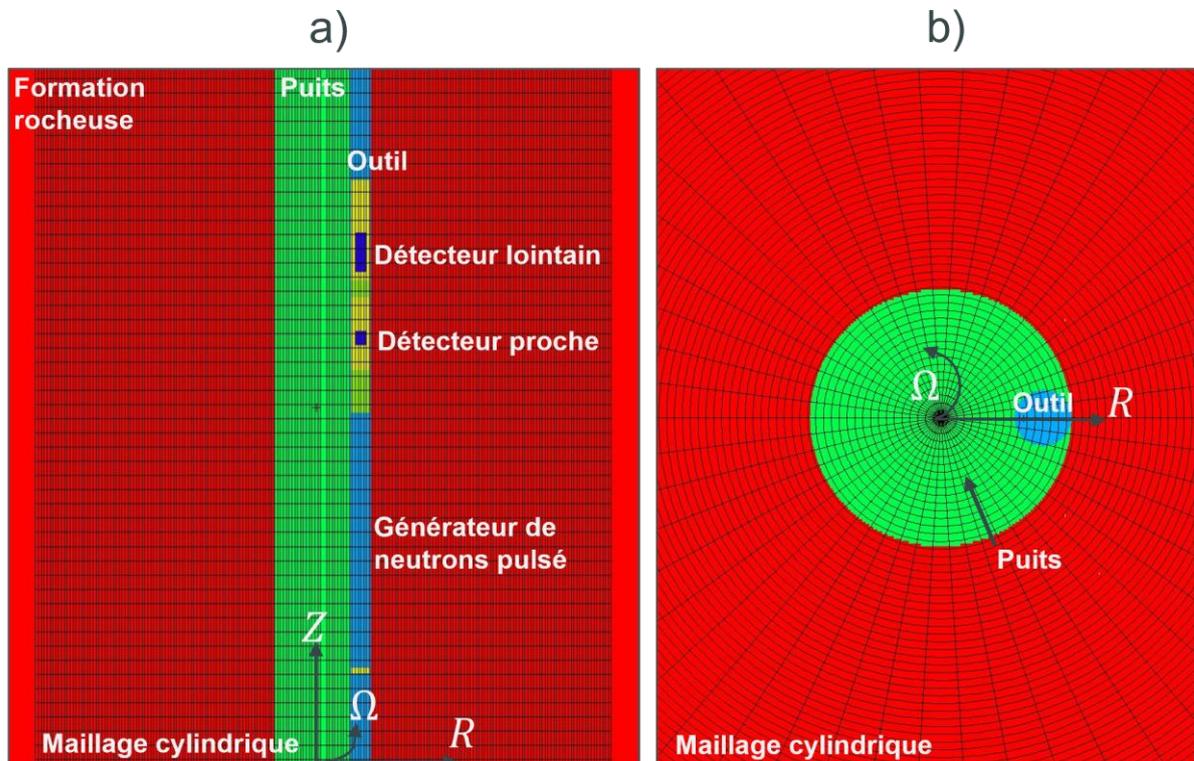


Figure 15: Modèle MCNP d'une sonde Sigma neutron-gamma longhorn WL dans un puits avec un maillage cylindrique surimposé destiné à l'établissement de la carte d'importances et de la carte du flux total de particules (cf. détails dans la partie 1.2.3); coupe verticale à gauche et horizontale à droite.

La Figure 16 présente les projections 2D puis 1D de la fonction de sensibilité de flux (des neutrons thermiques) pour un outil neutron-gamma Sigma calculée avec la méthode du WW de MCNP, telles qu'expliquées au niveau de la Figure 7. La projection 2D de la Figure 16 (a) correspond à l'intégrale angulaire de la FSF pour chaque rayon (axe des abscisses) et profondeur Z (axe des ordonnées). Le profil axial 1D de la Figure 16 (b) correspond à la projection sur Z (intégration radiale de la sensibilité) du flux de neutrons thermiques donnant lieu à une capture radiative puis un dépôt d'énergie par un gamma induit dans le détecteur (exemple du détecteur proche). Ces projections sont normalisées à leur valeur maximale respective.

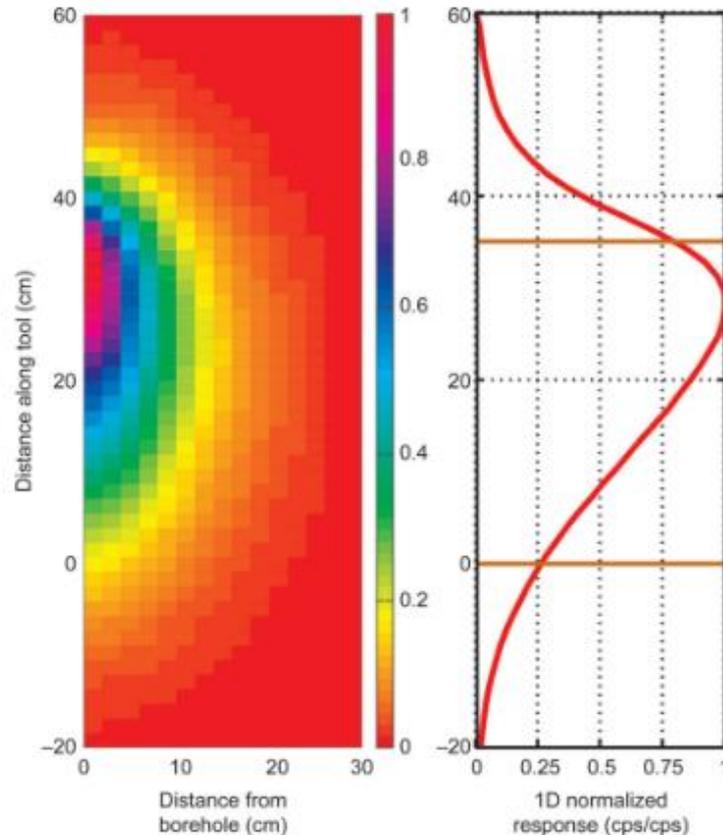


Figure 16: Projections 2D (à gauche) et 1D (à droite) de la FSF du détecteur proche d'un outil neutron-gamma Sigma longhorn WL. La FSF est calculée dans une formation rocheuse de type grès SiO_2 de porosité 25 PU saturée en eau douce. (a) L'axe des ordonnées représente la profondeur le long de la sonde et celui des abscisses le rayon depuis l'outil vers la formation. Les couleurs décrivent la sensibilité normalisée du détecteur proche dans la formation. (b) L'axe des abscisses représente ici l'amplitude de la FSF normalisée et les deux traits orange représentent la position de la source (en bas) et du centre du détecteur (en haut), d'après Mimoun et al., 2011.

Lors d'une simulation MCNP avec réduction de variance, il est possible de spécifier les options du WWG de manière à favoriser des particules (neutron ou gamma) dans des gammes spécifiques en énergie.

Une simulation MCNP avec un générateur de neutrons pulsé de 14 MeV avec l'option WWGE:P (E pour l'énergie des particules et P pour photon ici) et un tally F4:P gamma produit une carte d'importance qui favorise la statistique des rayonnements gamma induits par diffusion inélastique ($n, n'\gamma$) ou capture radiative (n, γ) donnant lieu à un dépôt d'énergie dans le détecteur. Dans la littérature (Mimoun et al., 2010, Luycx et al., 2020), cette option n'est pas utilisée pour le calcul de la FSF de la mesure Sigma. En revanche c'est celle qui est utilisée pour le calcul de la FSF de la mesure de masse volumique bulk ou du facteur photoélectrique. Cette option produit une cartographie du flux gamma dans une bande

d'énergie spécifique (i.e. entre un seuil haut et un seuil bas en énergie). Nous avons vu précédemment qu'elle présente des limitations, en particulier pour la mesure du facteur photoélectrique (cf. Figure 9 (d)).

Une simulation avec l'option WWGE:N 0.414E-6 et un tally F4:P gamma produit une carte d'importances qui favorise la statistique des neutrons donnant lieu à un dépôt d'énergie dans le détecteur par un rayonnement gamma induit par diffusion inélastique ($n, n'\gamma$) ou capture radiative (n, γ). C'est cette option qui est utilisée pour le calcul de la FSF de la mesure Sigma. Ce calcul produit une cartographie du flux de neutrons thermiques dans une bande d'énergie spécifique, de 0 à 414 meV.

Cependant avec cette option dans MCNP, il n'y a pas de discrimination des gammas qui déposent de l'énergie dans le scintillateur en fonction de leur temps d'arrivée lors du calcul de la carte d'importance et du flux total des neutrons thermiques.

Or, on sait que la FSF de l'outil Sigma est également dépendante du temps d'arrivée des rayonnements gamma dans le détecteur (cf. partie 1.4.1 et partie 1.1.5). Notons que l'option WWGT:P (où T est le temps des particules) n'est pas utilisé dans le calcul de la FSF Sigma, car l'optimisation faite par le WWG consiste à favoriser le transport des neutrons et non celui des rayonnements gamma (i.e. en utilisant « :N » et non « :P »). En d'autres termes on ne peut pas coupler WWGT:P et WWG:N (cf. chapitre 4).

Le calcul de la carte d'importance est donc conditionné par une limite en temps appelé *cutoff* dans MCNP qui permet de stopper le transport des particules neutron ou gamma au-delà d'un certain temps après le début de l'impulsion du générateur. La limite en temps est fixée soit à la fin d'une fenêtre temporelle tardive (1000 μ s pour la fenêtre formation) soit à la fin d'une fenêtre temporelle plus précoce (300 μ s pour la fenêtre puits). Ceci dépend du choix de la FSF à bâtir (i.e. soit la FSF puits ou soit la FSF formation, car ce sont bien deux fonctions de sensibilité de flux différentes).

La méthode du WW nous impose ici aussi (comme déjà explicité dans la partie 1.2.3) de prendre en compte dans le calcul de la FSF le flux des neutrons thermiques (dont l'énergie est $<$ à 414 meV) qui ont généré un gamma, après interaction de capture radiative, qui dépose de l'énergie dans le détecteur avant la fenêtre temporelle d'intérêt (formation ou puits).

La limitation est la même pour la mesure du ratio C/O avec en plus d'une discrimination en temporelle, une discrimination en énergie cumulée (fenêtres d'intégration des taux de comptages temporels et en énergie, cf. partie 1.1.6). Ces limitations lors des calculs des FSF puits et formation de l'outil Sigma seront détaillées dans le chapitre 4.

La pertinence des options utilisées dans MCNP (détaillée dans la partie 1.2.4 et la partie 1.4.1) pour la construction des fonctions de sensibilité Sigma (puits et formation) sera investiguée dans le chapitre 4 au travers d'une comparaison entre la méthode du *Weight Window* et la méthode du suivi des nombres de particules (*Particle Tracking*) pour un outil neutron-gamma Sigma.

1.4.2 Prédiction des diagraphies Sigma

Pour valider la pertinence des fonctions de sensibilité Sigma et la capacité des algorithmes de FFM à prédire des diagraphies Sigma réalistes en condition de puits ouvert, les auteurs prennent l'exemple d'une formation rocheuse stratifiée. Cette formation présente des variations de faciès¹³ rocheux

¹³ Un faciès rocheux ou pétrographique désigne l'ensemble des caractères lithologiques comme la composition chimique, la composition minéralogique, la structure sédimentaire, la géométrie ou son apparence de manière générale.

avec des alternances entre des roches calcaires et des niveaux argileux, ce qui entraîne des fortes variations de Sigma (e.g. plusieurs dizaines de CU).

De manière équivalente à la masse volumique apparente de l'équation (6) pour l'outil gamma-gamma de litho-densité et du paramètre de formation composite Fp de l'équation (8) pour l'outil neutron-neutron de porosité, les algorithmes de FFM prédisent un Sigma apparent $\Sigma_{apparent}$ (unité arbitraire de capture, CU) selon l'équation (10), qui est une moyenne pondérée par FSF normalisée des valeurs de Sigma (CU) dans chaque maille j de la formation rocheuse.

$$\Sigma_{apparent} = \sum_{j=1}^n FSF_{norm}^j \times EM_Sigma^j \quad (10)$$

$\Sigma_{apparent}$ ($g.cm^{-3}$) est la section efficace d'absorption macroscopique apparente. FSF_{norm}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité contenue la maille j de la fonction de sensibilité de flux FSF_{norm} , normalisée selon l'équation (4), de l'outil neutron-gamma Sigma. EM_Sigma^j (CU) est la section efficace d'absorption macroscopique intrinsèque contenue la maille j du modèle numérique de terrain EM_Sigma .

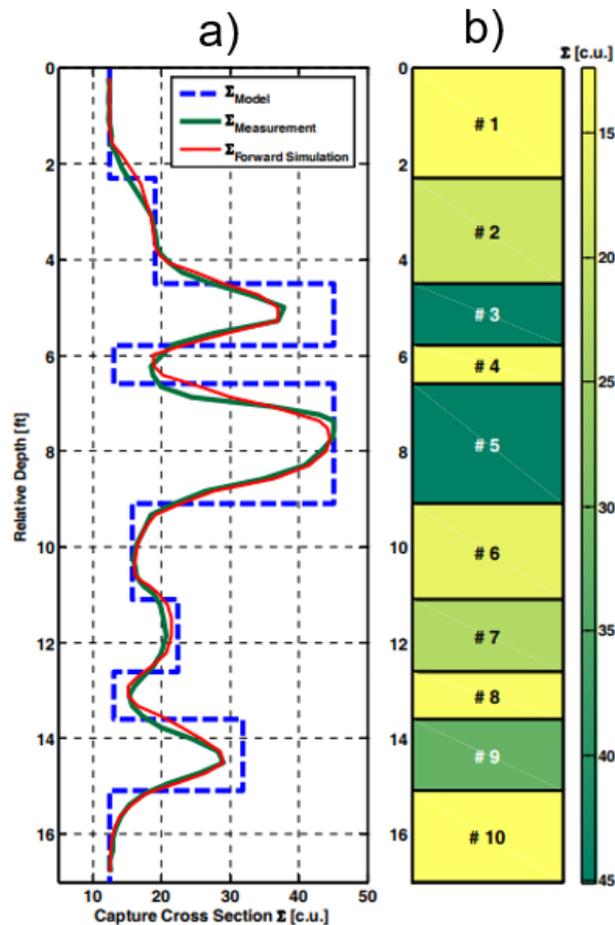


Figure 17: À gauche, comparaison entre une diagraphie Sigma prédite avec les algorithmes de prédiction rapide (FFM) des diagraphies (courbe rouge) et la diagraphie Sigma simulée avec MCNP (courbe verte), dite « mesurée », car issue d'un calcul avec le modèle numérique de terrain représenté à droite. Celui-ci présente des variations importantes de Sigma représentées par les nuances de couleurs jaunes et vertes (ainsi que par la courbe en pointillés bleus dans la figure de gauche). D'après Mimoun et al., 2010.

Mimoun et al., 2010 ont comparé des diagraphies simulées par Monte-Carlo MCNP et des diagraphies prédites avec les FSF (cf. Figure 17) dans une configuration de puits ouvert avec de fortes variations de

Sigma, avec des formations géologiques à forte absorption (argileuses) et à faible absorption (peu poreuses et de type calcaire, grès ou dolomie). Les auteurs ont montré que les algorithmes de FFM permettent de reproduire des diagraphies de Sigma en configuration de puits ouvert avec un écart inférieur à 2 CU entre les valeurs prédites et simulées (valeurs cibles), sur une gamme de Sigma allant environ de 12 à 45 CU.

Avec l'extension des algorithmes de FFM à l'environnement de puits tubé, le Sigma comme paramètre pétrophysique n'est cependant pas suffisant pour prédire des diagraphies. De manière équivalente à la prédiction des diagraphies de porosité hydrogène, la prédiction des diagraphies de Sigma nécessite d'introduire un paramètre pétrophysique composite F_p qui mélange ici Sigma avec la longueur de diffusion et la masse volumique. Ce paramètre F_p spécifique est présenté dans le chapitre 4 avec la validation expérimentale des prédictions rapides pour l'outil Sigma.

1.5 Conclusion et apport de la thèse

Les fonctions de sensibilité de flux (FSF) et les algorithmes de prédiction rapide (FFM) implémentés dans le logiciel UTAPWeLS ont prouvé leur efficacité pour prédire des diagraphies nucléaires en configuration de puits ouvert et non tubé. Ils doivent cependant être étendus à la prédiction de diagraphies en configuration de puits tubé et la validité de leurs prédictions doit être démontrée dans cette nouvelle configuration à forte hétérogénéité radiale.

Le chapitre suivant de cette thèse sera consacré à une comparaison des simulations Monte-Carlo obtenues avec les logiciels de transport de particules MCNP et GEANT4 dans des cas très simples (sphères) puis plus représentatifs des puits pétroliers (outils génériques de diagraphies nucléaires). Cette comparaison permettra de valider la physique du transport des neutrons, des rayonnements gamma et de la production des rayonnements gamma induits lors des interactions neutroniques, pour des applications de géosciences.

Le chapitre 3 de la thèse sera consacré à une comparaison des fonctions de sensibilité, pour un outil neutron-neutron de porosité, calculées avec deux méthodes (*Weight Window* de MCNP et *Particle Tracking* avec GEANT4). Cette comparaison permettra de valider la méthode de création des bibliothèques de fonctions de sensibilité dans divers contextes. Les fonctions de sensibilité calculées avec chaque méthode seront comparées aux fonctions de sensibilités expérimentales obtenues par des mesures diagraphiques dans des étalons rocheux spécifiques. Ces données expérimentales permettront aussi de valider quantitativement les modèles numériques MCNP et GEANT4, au travers d'une comparaison directe des taux de comptages mesurés et simulés, puis l'ensemble de l'approche (calcul des fonctions de sensibilité, étalonnage numérique par simulation d'un grand nombre de configurations de puits, algorithmes de prédiction) par une confrontation de diagraphies de porosité prédites et expérimentales.

Un travail similaire consacré à l'outil neutron-gamma Sigma sera présenté dans le chapitre 4. Des différences importantes par rapport au chapitre 3 seront mises en lumière sur la physique et par suite sur les approches de calcul des fonctions de sensibilité, ainsi que sur l'implémentation des algorithmes de FFM. Ces derniers seront adaptés et étendus à la prédiction des diagraphies Sigma en configuration de puits tubé puis un cas d'application dans un puits pétrolier tubé sera présenté succinctement, comparant des diagraphies Sigma mesurées et prédites.

2. Comparaison entre MCNP et GEANT4 pour des applications de géosciences

2.1 La simulation Monte-Carlo des outils de diagraphies nucléaires

2.1.1 Introduction

Pour comprendre la sensibilité des mesures nucléaires en forage aux propriétés pétrophysiques des formations rocheuses et les convertir en grandeurs quantitatives, l'industrie pétrolière a commencé à utiliser de manière récurrente les simulations nucléaires Monte-Carlo (Goodyear *et al.*, 2018). MCNP et GEANT4 sont deux codes de transport de référence utilisés pour les simulations nucléaires. Les sociétés de services pétroliers et les sociétés pétrolières utilisent généralement le code de simulation MCNP (*Monte-Carlo N-Particle*) pour modéliser la réponse des outils diagraphiques nucléaires dans divers contextes de puits. L'objectif des simulations nucléaires est de caractériser la relation entre la réponse des outils lors d'une mesure en forage et les composants du puits: les propriétés du réservoir (comme la saturation en hydrocarbures, la lithologie, la porosité, la masse volumique), le tubage en acier et le ciment, ainsi que les fluides de production dans le cas où le puits est tubé.

Dans la configuration de puits tubé, le nombre d'inconnues est bien plus grand qu'en puits ouvert (épaisseur du tubage, épaisseur du ciment, centrage du tubage dans le puits, état de cimentation, propriétés pétrophysiques du réservoir), ce qui nécessite la combinaison de plusieurs outils de diagraphies nucléaires avec des niveaux d'investigation différents: sondes gamma-gamma de litho-densité, neutron-neutron de porosité, neutron-gamma d'absorption neutronique Sigma, neutron-gamma de ratio C/O, etc. L'objectif ultime, qui dépasse même le cadre de cette thèse, est de converger vers une géométrie de puits permettant de concilier les observations de différente nature faites avec ces divers outils, voire même avec les sondes acoustiques, électromagnétiques, RMN, etc. dans le cadre plus global d'une « inversion multi-physique ».

À cette fin, la connaissance de la sensibilité en 3D des détecteurs (i.e. des fonctions de sensibilité) pour chaque sonde nucléaire est essentielle. Ces fonctions de sensibilité, présentées dans le chapitre 1, sont obtenues à partir de simulations Monte-Carlo. Comme on l'a vu, les industriels utilisent couramment MCNP avec des techniques de réduction de variance (Mendoza *et al.*, 2007; Mendoza *et al.*, 2010a; Mendoza *et al.*, 2010b), mais les principes fondamentaux de cette méthode doivent être validés lorsqu'elle est appliquée à l'environnement de puits tubé.

La validation du concept de fonction de sensibilité et la validation de la méthode de calcul des fonctions de sensibilité dans un domaine radialement hétérogène sont présentées dans le chapitre 3. Dans le chapitre 2, nous réalisons au préalable une comparaison entre les codes MCNP et GEANT4 qui seront utilisés, en particulier GEANT4 dont l'usage n'est pas courant dans ce domaine. Les écarts entre les deux codes de transport sont évalués ici sans techniques de réduction de la variance (i.e. sans *biasing*), d'abord dans un modèle très simplifié avec uniquement des sphères concentriques contenant les matériaux interrogés et ceux des détecteurs, puis dans un environnement plus réaliste de puits ouvert avec des outils de diagraphiques génériques (Mendoza *et al.*, 2005).

2.1.2 Les codes de transport MCNP et GEANT4

La simulation Monte-Carlo avec ces codes consiste à réaliser un grand nombre de tirages aléatoires pour décrire le comportement moyen des particules, depuis leur émission jusqu'à leur absorption ou fuite hors du milieu modélisé, en utilisant leurs sections efficaces d'interaction. Cette

méthode est bien adaptée aux processus stochastiques comme le transport de neutrons ou des rayonnements gamma. Les résultats sont des estimateurs statistiques entachés d'une incertitude qui varie comme l'inverse de la racine carrée du nombre de particules tirées.

MCNP (Rising *et al.*, 2023) est un code écrit en Fortran 90 et en C, développé par le Los Alamos National Laboratory (USA). Ce code est la référence des outils de simulations numériques nucléaires dans l'industrie pétrolière. Il présente l'avantage de fournir des résultats rapidement, de manière fiable. Il est validé par une très large communauté d'utilisateurs. Cependant, l'accès aux informations sur les histoires de chaque particule (avec l'option *ptrack*) telles que les coordonnées et les temps des interactions (après émission), ou les processus d'interaction impliqués (e.g. diffusion élastique ou inélastique, capture radiative pour les neutrons, effet photoélectrique, création de paires ou interaction Compton pour les rayonnements gamma) est assez complexe à mettre en œuvre (simulation impossible en multithreading, absence de paramétrage permettant de filtrer les informations pertinentes, fichiers de sortie volumineux, etc.).

GEANT4 (Agostinelli *et al.*, 2003) est une boîte à outils de simulation nucléaire Monte-Carlo écrite en C++ et développée par le CERN depuis 1998. Bien qu'initialement développé pour la physique des hautes énergies, il a été étendu pour des applications « basses énergies », typiquement en dessous de 20 MeV. C'est un code de transport en accès libre orienté objet¹⁴. Il fonctionne sur le principe du suivi de particule (appelé *Particle Tracking*) ce qui permet de suivre indépendamment chaque particule et de recueillir des informations sur chaque interaction.

Une simulation avec GEANT4 est généralement plus longue, mais donne accès plus facilement aux informations utiles à la compréhension des processus physiques lors des mesures nucléaires en forage. Cette spécificité permet dans les cas d'architectures de puits complexes, comme les puits tubés, d'appréhender l'impact de chaque élément constituant le modèle numérique (formation rocheuse, tubage, ciment, fluide dans le puits) sur les taux de comptages mesurés aux différents détecteurs. Cet impact, interprété comme une contribution aux taux de comptages mesurés, peut se calculer, entre autres, avec le nombre d'interactions dans chaque élément du modèle numérique (cf. chapitre 3).

2.1.3 Paramétrage des simulations

La version 6.2 de MCNP (Werner *et al.*, 2017 et 2018) a été utilisée. Avec MCNP, l'utilisateur construit un fichier d'entrée qui permet au code de transport de lire la géométrie en 3D et les matériaux qui composent le problème. La bibliothèque de sections efficaces utilisée dans cette comparaison est ENDF/B-VII.1 (Chadwick *et al.*, 2011). Pour utiliser cette version, il faut renseigner les éléments chimiques qui constituent les matériaux du modèle numérique avec l'extension « .80c ».

Il existe une préconisation de l'emploi de la bibliothèque $S(\alpha,\beta)$ pour le traitement des interactions de diffusion des neutrons d'énergie inférieure à 5 eV, car le transport des neutrons devient sensible aux liaisons chimiques, à la température, aux effets moléculaires, etc. qui jouent un rôle significatif sur la valeur des sections efficaces. Par exemple, la molécule d'eau ne peut plus être considérée comme un simple mélange de noyaux d'hydrogène et d'oxygène. La bibliothèque $S(\alpha,\beta)$ fournit donc, pour un certain nombre de modérateurs courants (graphite, eau légère ou lourde, polyéthylène, etc.), des sections efficaces pour les neutrons thermiques tenant compte de ces effets et dépendantes de la température. La version 10.07.p01 de GEANT4 a été utilisée pour la comparaison avec MCNP, en utilisant la même bibliothèque de sections efficaces ENDF/B-VII.1 que dans MCNP (Mendoza *et al.*, 2012, Mendoza *et al.*,

¹⁴ Une programmation orientée objet est une structure de programmation informatique couramment utilisée qui repose sur le concept de classes et d'objets. Il existe de nombreux langages de programmation orientés objet, notamment JavaScript, C++, Java et Python.

2014, Mendoza *et al.*, 2018). GEANT4 utilise de façon standard la bibliothèque G4NDL4.6, mais plusieurs conversions de bibliothèques sont disponibles sur <https://www-nds.iaea.org/geant4/>: JEFF-3.3; JEFF-3.2; ENDF/B-VIII.0; ENDF/B-VII.1; BROND-3.1; JENDL-4.0u.

Mendoza *et al.*, 2018 ont réalisé une comparaison entre MCNP et GEANT4 sur la physique neutron-neutron et neutron-gamma et ont montré certaines différences, notamment à basse énergie. Pour cette raison il est nécessaire d'implémenter dans GEANT4, moyennant un temps de simulation plus long, des options (i.e. des modèles physiques spécifiques) permettant de modéliser plus fidèlement le transport des neutrons.

Le modèle « G4NeutronHPElastic » est recommandé pour simuler les interactions de diffusion élastique des neutrons ayant une énergie inférieure à 20 MeV et supérieure à 4 eV. Pour les diffusions inélastiques, on utilisera le modèle « G4ParticleHPInelastic » et pour les interactions de capture « G4ParticleHPCapture ». Pour toutes les autres interactions, les modèles standard de GEANT4 (appelés *physics lists*) seront utilisés avec l'option: QGSP_BIC_HP_PEN. Pour les neutrons dont l'énergie est inférieure à 4 eV, de manière équivalente aux bibliothèques S(α,β) dans MCNP, le modèle spécifique « G4NeutronHPThermalScattering » est recommandé pour les interactions des neutrons thermiques.

Aujourd'hui le modèle « G4NeutronHPElastic » comprend vingt éléments couramment utilisés en physique des réacteurs. Ces éléments peuvent être trouvés dans la classe « G4NeutronHPThermalScatteringNames.cc ». Pour les autres matériaux standards déjà implémentés dans GEANT4, ils peuvent être trouvés dans la liste des matériaux NIST sur <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/Appendix/materialNames.html>.

2.1.4 Modèles géométriques

Les premiers calculs sont effectués avec un modèle sphérique théorique très simple pour limiter les problèmes de convergence statistique (cf. Figure 18).

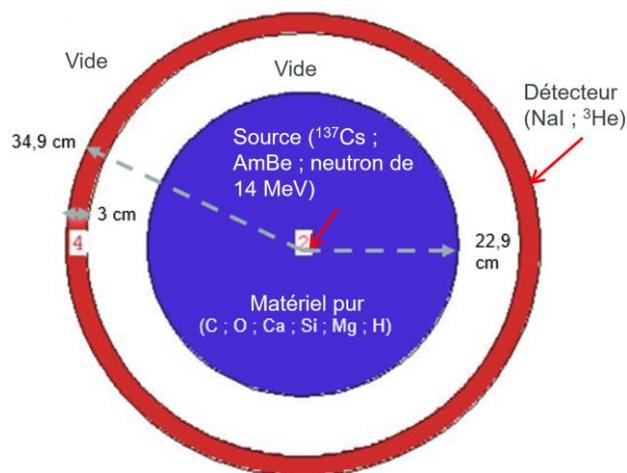


Figure 18: Représentation du modèle sphérique simplifié avec MCNP VISED (Schwarz *et al.*, 2018).

La Figure 18 présente ce modèle sphérique simplifié. Il est composé d'une sphère de rayon 22.9 cm contenant la source neutron ou gamma en son centre et différents éléments d'intérêt, et d'une coquille sphérique entourant cette sphère, remplie du milieu de détection (scintillateur solide NaI ou gaz d' ^3He), de rayon extérieur 34.9 cm et d'épaisseur 3 cm. Ces dimensions ont été choisies arbitrairement en

s'inspirant néanmoins des distances source-détecteur des outils génériques du commerce. Une coquille vide sépare ces deux éléments (cf. Figure 18). La sphère centrale contient un matériau virtuel de masse volumique 2.71 g.cm^{-3} (i.e. la masse volumique d'une roche calcaire sans porosité) avec un seul élément naturel parmi ceux d'intérêt dans les problématiques de géosciences (carbone, oxygène, calcium, magnésium, silicium et hydrogène, mais pour ce dernier on abaisse la densité à 0.5 g.cm^{-3} du fait de ses fortes capacités de thermalisation et de capture neutroniques, sinon les neutrons ne peuvent s'échapper de la sphère et on n'obtient pas de résultat exploitable pour les calculs impliquant ces neutrons sortants).

Les seconds calculs sont effectués avec un modèle numérique de puits ouvert plus réaliste, contenant des outils diagraphiques dits « génériques » de litho-densité et de facteur photoélectrique gamma-gamma, de porosité hydrogène neutron-neutron et de ratio carbone/oxygène neutron-gamma (cf. Figure 19). Ces modèles génériques sont très simplifiés, mais suffisamment représentatifs de la réponse des outils du commerce utilisés par les sociétés de services pétrolières. Les paramètres clés tels que les distances source-détecteurs, les géométries de ces derniers et des blindages, le diamètre externe des sondes, sont proches des outils diagraphiques réels. Des modèles MCNP d'outils diagraphiques génériques (Luycx *et al.*, 2020; Mendoza *et al.*, 2005) ont été développés par l'Université du Texas (Austin, USA) et sont disponibles en libre téléchargement sur <https://utexas.app.box.com/v/MCNP-LongHorn-Nuclear-Tools>.

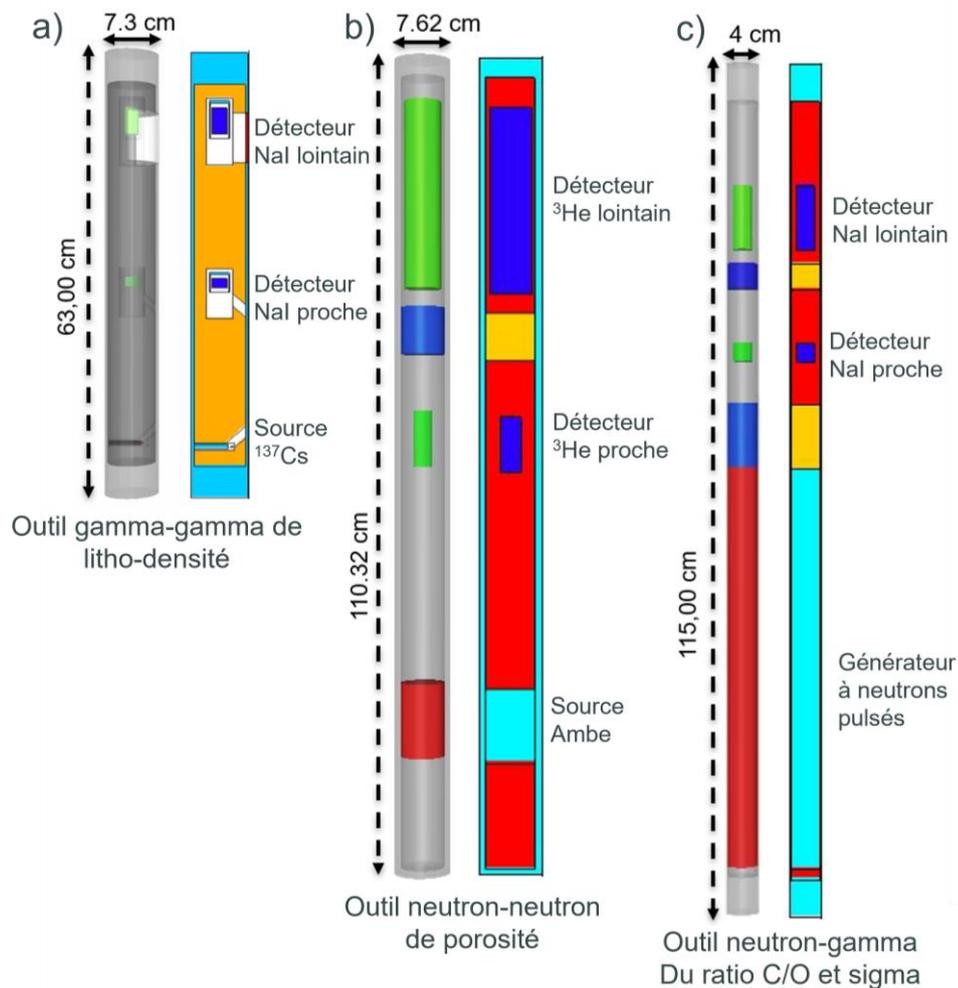


Figure 19: Modèles d'outils diagraphiques nucléaires génériques (a) gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique, (b) neutron-neutron de porosité et (c) neutron-gamma de ratio C/O, affichés à l'aide des outils de visualisation EDGE, Trouche *et al.*, 2019 (à gauche) et MCNP VISED, Schwarz *et al.*, 2018 (à droite).

Une conversion de ces modèles génériques au format GDML, lisible par GEANT4 a été réalisée. Le format GDML est utilisé par GEANT4 pour lire des fichiers d'entrée externe qui ne sont pas directement décrits dans la fonction C++ « DetectorConstruction.cc ». Cela permet de créer des géométries complexes, de les visualiser et de corriger les erreurs de construction des volumes appelées « chevauchements ». Il existe des logiciels comme EDGE (<https://www.space-suite.com/edge/>) qui peuvent être utilisés pour construire des géométries et les exporter au format GDML (Trouche *et al.*, 2019; EDGE, 2019). EDGE présente aussi l'avantage de visualiser les volume en 3D (cf. Figure 19 et Figure 20).

La Figure 20 montre un modèle 3D d'un outil de diagraphie neutron-gamma C/O dans un puits de 200 mm de diamètre. Le puits est rempli d'eau douce, le modèle numérique de terrain est composé d'une formation rocheuse homogène avec une porosité de 20 PU et une lithologie pure de grès (SiO_2), de calcaire (CaCO_3) ou de dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La porosité des roches est entièrement saturée d'eau douce.

En Géosciences pétrolières, les puits sont toujours saturés soit en eau douce soit en saumure (eau salée). La formation rocheuse est, quant à elle, aussi saturée soit en eau (douce ou salée en fonction des régions) soit en hydrocarbures (gaz ou huile). En pratique s'il y a présence d'hydrocarbures dans la porosité, il y a aussi présence d'eau. En d'autres termes, il s'agit toujours d'un mélange.

Nous prenons ici le parti pris de simuler le puits et la formation rocheuse avec de l'eau douce (i.e. sans ajouter du chlorure de sodium). Ces configurations à eau douce correspondent aux configurations d'étalonnage des outils diagraphiques. Ce choix s'explique aussi par la volonté de simplifier la comparaison entre MCNP et GEANT4. Des simulations avec saumure seront faites dans le chapitre 3 et le chapitre 4.

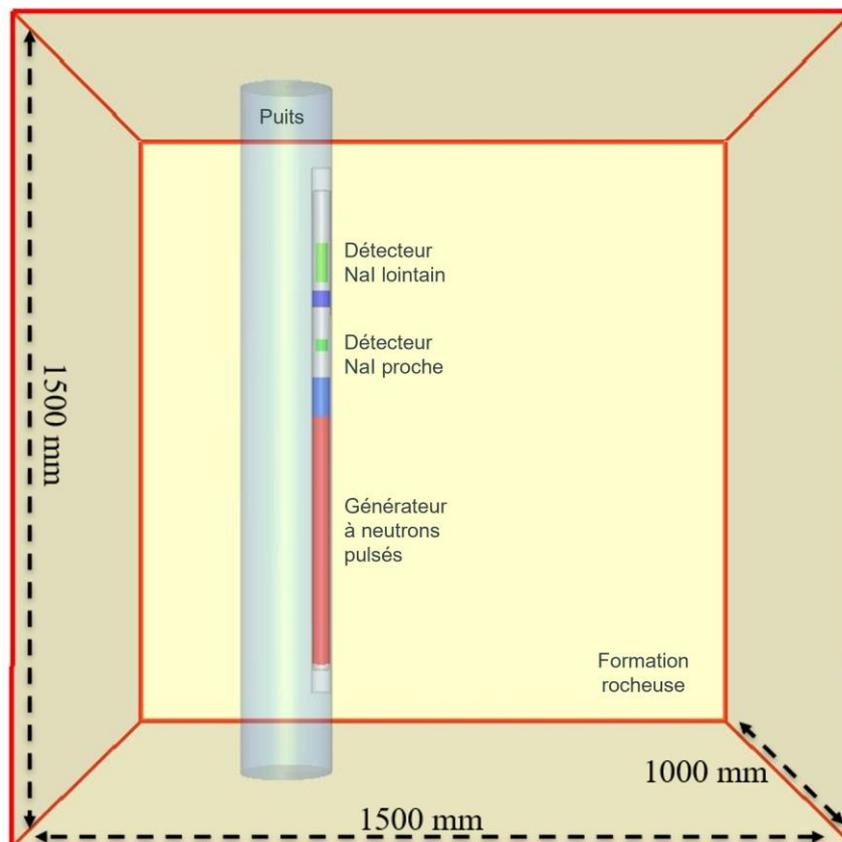


Figure 20: Modèle générique d'un outil neutron-gamma C/O utilisés pour la comparaison entre MCNP et GEANT4 et affiché avec EDGE.

2.2 Comparaison MCNP et GEANT4

2.2.1 Simulation des mesures gamma-gamma de litho-densité

La mesure gamma-gamma de litho-densité consiste à mesurer avec deux détecteurs NaI(Tl) le spectre en énergie provenant d'une source radioactive de ^{137}Cs émettant des rayonnements gamma mono-énergétiques de 661,7 keV. Des rayonnements rétrodiffusés par la formation, de plus basse énergie, sont mesurés dans deux fenêtres en énergie, l'une de 540 à 150 keV (fenêtre *hard*) où l'interaction Compton domine, l'autre entre 60 et 100 keV (fenêtre *soft*) dans le domaine de l'effet photoélectrique (PEF). En géosciences, la première est utilisée pour déterminer la masse volumique de la formation rocheuse et la seconde contient des informations sur la minéralogie des roches. Pour compenser l'apport photoélectrique dans la fenêtre *hard*, une correction lithologique (appelée aussi correction d'effet matrice) est effectuée sur la base du PEF (cf. chapitre 1 pour plus de détails).

Les mesures gamma-gamma sont simulées dans MCNP avec un *tally* F8, qui fournit l'histogramme des dépôts d'énergie dans un détecteur par particule source. Le spectre gamma est mis à l'échelle avec le nombre de particules tirées dans GEANT4 (96 millions) pour permettre une comparaison quantitative des deux codes. Pour simuler la mesure gamma-gamma dans GEANT4, il faut créer un détecteur NaI et sommer les énergies déposées lors de ses interactions éventuelles à l'intérieur du détecteur.

Le Tableau 1 compare les taux de comptages intégrés dans les fenêtres *hard* et *soft* entre MCNP et GEANT4 et montre un écart maximum de 4.02 % pour le calcium. Les incertitudes sont présentées également et varient en 1 sur racine N (N étant le nombre de coups mesurés). La Figure 21 représente les spectres des mesures gamma dans le modèle sphérique simplifié pour les six éléments chimiques purs, montrant un très bon accord visuel sur l'ensemble des spectres. À ce stade, on peut conclure que MCNP et GEANT4 sont en très bon accord pour le transport des rayonnements gamma.

La Figure 22 montre les spectres des mesures gamma-gamma de litho-densité d'un outil diagraphique nucléaire générique (avec une source gamma ^{137}Cs et deux scintillateurs NaI proche et lointain). Un élargissement d'énergie gaussien (GEB) a été réalisé sur chaque spectre pour tenir compte de la résolution en énergie typique des scintillateurs NaI.

Le Tableau 2 donne les comptages totaux intégrés dans les fenêtres *hard* et *soft*, montrant des écarts maximums de 4.29 % pour le détecteur proche et de 11.27 % pour le détecteur lointain. À nouveau, l'accord global est très satisfaisant entre GEANT4 et MCNP.

On note tout de même des écarts un peu plus importants entre MCNP et GEANT4 que pour le modèle simplifié sphérique, certainement en raison du plus grand nombre d'interactions tout au long du trajet des particules entre la source et le détecteur, qui accentue les écarts observés précédemment. De plus, les comptages sont beaucoup plus faibles pour l'outil générique, ce qui induit des incertitudes statistiques plus importantes. Les simulations avec MCNP et avec GEANT4 ont été réalisées sans techniques de réduction de variance pour comparer le transport gamma en mode « analogue » (à la réalité), mais elles seraient utiles pour améliorer la statistique des comptages, notamment pour le détecteur lointain.

L'accord global entre GEANT4 et MCNP est très satisfaisant pour la physique gamma-gamma et montre des écarts inférieurs à 12 % sur le taux de comptages total intégré dans la fenêtre *soft* et *hard*. Cet ordre de grandeur avait déjà été rapporté lors d'une précédente comparaison (Velker *et al.*, 2012).

Tableau 1. Comptages pour la mesure gamma-gamma avec le modèle sphérique.

		C	O	Ca	Mg	Si	H
Détecteur sphérique: fenêtre soft	Coups MCNP	147622	128578	14932	74436	50755	453733
	Coups GEANT4	151926	131276	14331	73381	48942	461870
	GEANT4/MCNP	2.92±0.26%	2.10±0.28%	4.02±0.83%	1.42±0.37%	3.57±0.45%	1.79±0.15%
Détecteur sphérique: fenêtre hard	Coups MCNP	192248	190119	150395	184011	177965	983344
	Coups GEANT4	194282	192895	152209	186786	180601	1002273
	GEANT4/MCNP	1.06±0.23%	1.46±0.23%	1.21±0.26%	1.51±0.23%	1.48±0.24%	1.92±0.10%

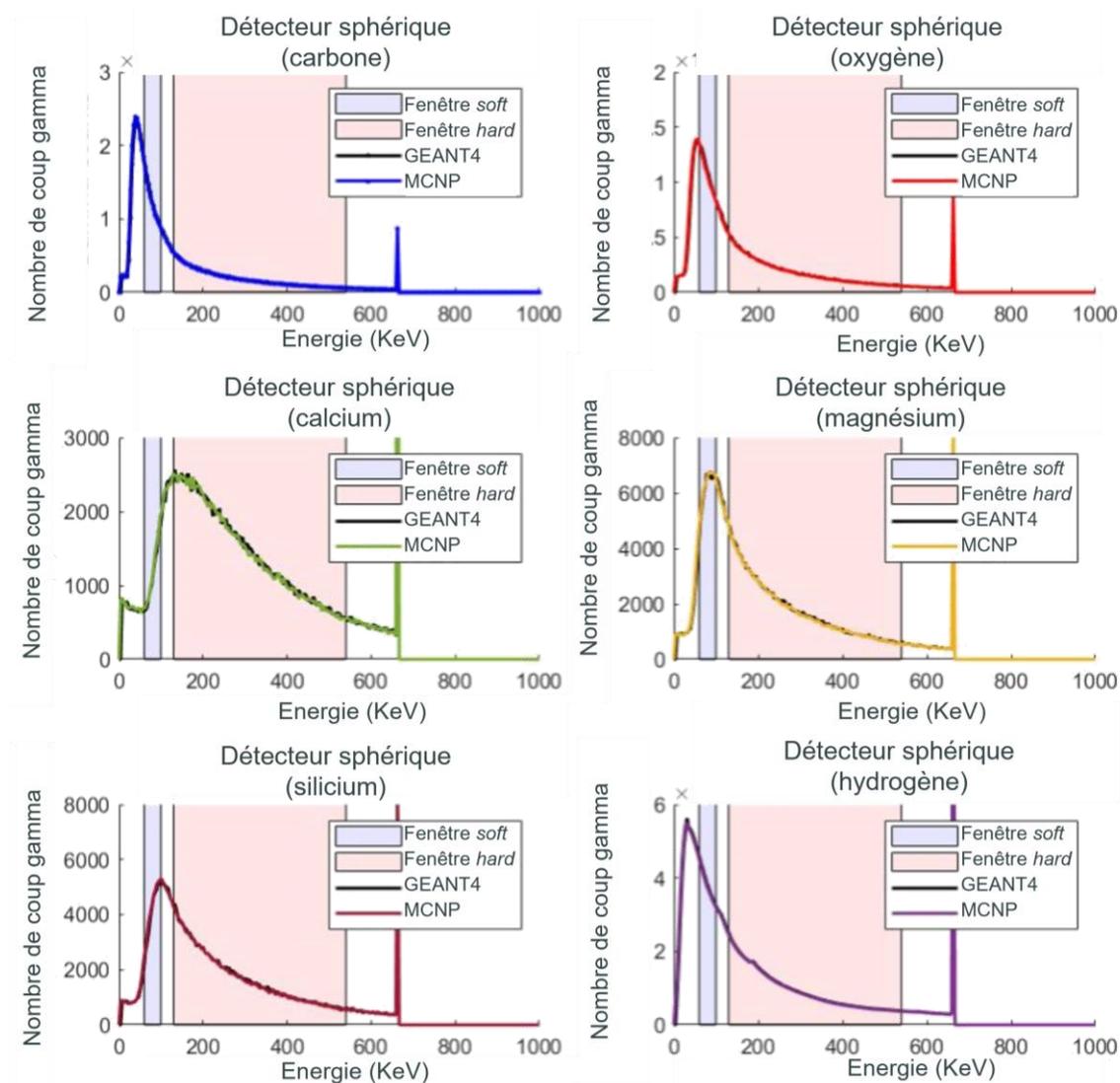
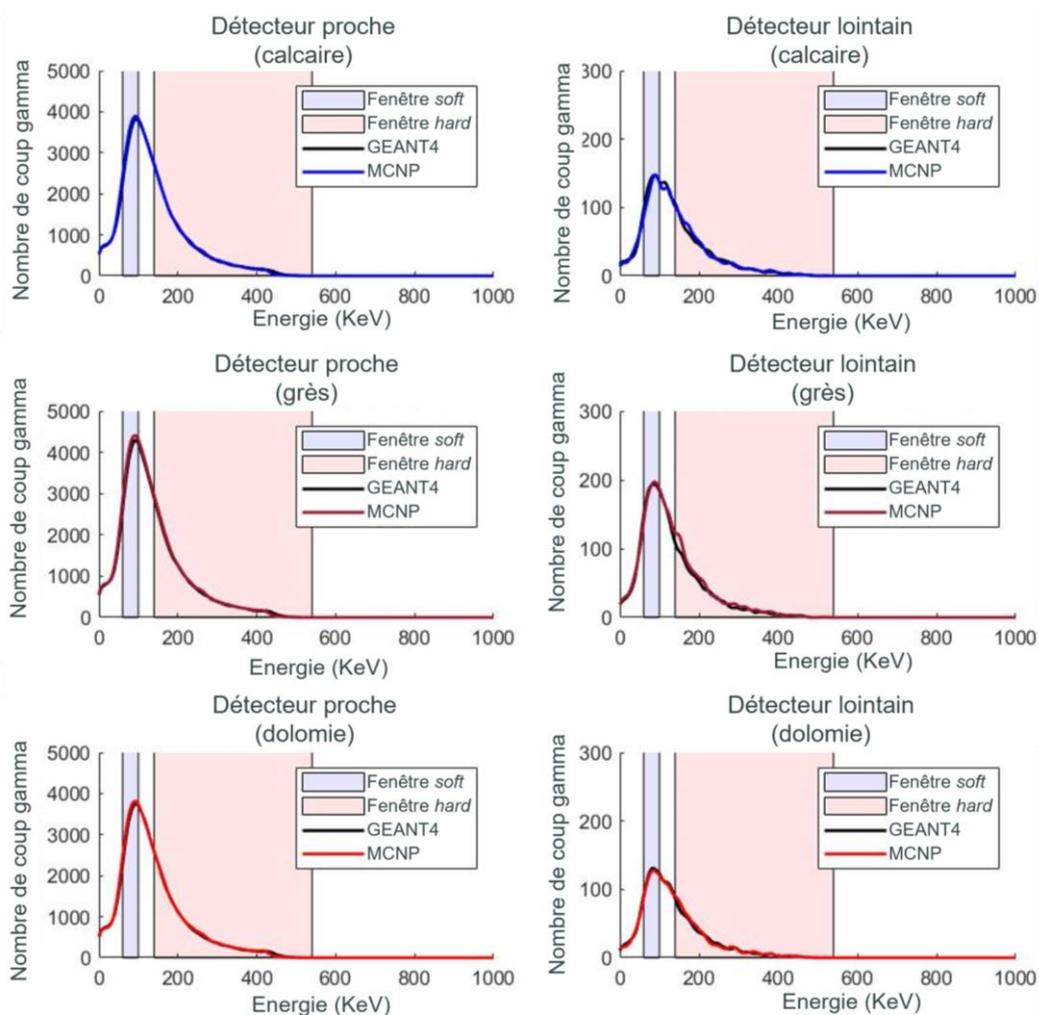


Figure 21: Spectres de mesures gamma simulés avec un modèle sphérique, une source gamma de ^{137}Cs , un détecteur NaI et six matériaux virtuels constitués chacun d'un seul élément: ceux avec C, O, Ca, Mg et Si ont une masse volumique de 2.71 g.cm^{-3} , celui de l'hydrogène 0.5 g.cm^{-3} .

Tableau 2. Comptages dans les fenêtres soft et hard pour un modèle d'outil générique gamma-gamma avec deux détecteurs, proche et lointain, dans trois roches de lithologies différentes avec 20 PU.

		Calcaire	Grès	Dolomie
Détecteur proche: fenêtre soft	Coups MCNP	37376	42976	37153
	Coups GEANT4	35981	41134	35903
	GEANT4/MCNP	3.73±0.52%	4.29±0.49%	3.36±0.52%
Détecteur lointain: fenêtre soft	Coups MCNP	1372	1975	1274
	Coups GEANT4	1446	1989	1308
	GEANT4/MCNP	5.39±2.66%	0.71±2.25%	2.67±2.78%
Détecteur proche: fenêtre hard	Coups MCNP	54709	57813	51890
	Coups GEANT4	54419	56674	51579
	GEANT4/MCNP	0.53±0.43%	1.97±0.42%	0.60±0.44%
Détecteur lointain: fenêtre hard	Coups MCNP	2068	2422	1706
	Coups GEANT4	2004	2149	1625
	GEANT4/MCNP	3.09±2.22%	11.27±2.09%	4.75±2.45%


 Figure 22: Spectres de mesures gamma-gamma simulés avec un modèle d'outil générique de litho-densité dans trois roches différentes à 20 PU: un calcaire à 2.368 g.cm^{-3} (a, b), un grès à 2.323 g.cm^{-3} (c, d) et une dolomie à 2.496 g.cm^{-3} (e, f).

2.2.2 Simulation de mesures neutron-neutron de porosité

La mesure neutron-neutron de porosité consiste à compter les neutrons rétrodiffusés provenant d'une source radioactive d'américium-béryllium (AmBe) avec un détecteur à ^3He . Cette mesure est principalement sensible à la teneur en hydrogène du milieu investigué par l'outil en raison des grandes sections efficaces de diffusion élastique et de capture radiative des noyaux d'hydrogène. La transformation de la teneur en hydrogène en porosité (étalonnage, cf. Figure 13 chapitre 1) est fortement liée à la nature physico-chimique des fluides ou gaz de saturation: eau douce, saumure, hydrocarbures liquide ou gazeux, CO_2 . Les autres éléments chimiques de la matrice géologique, comme C, O ou Ca, ont un impact au deuxième ordre sur le ralentissement et l'absorption des neutrons, sauf à faible porosité (entre 0 PU de 5 PU) où la nature physico-chimique de la formation rocheuse (composition chimique, mais aussi sa masse volumique) induit des variations significatives du nombre de coups mesuré (Ellis *et al.*, 2003; Ellis *et al.*, 2004). De manière générale, les outils sont étalonnés pour délivrer une mesure de porosité dans un environnement de puits ouvert de 200 mm de diamètre, rempli d'eau douce, avec une formation rocheuse de lithologie calcaire de 0 PU à 40 PU (i.e. de 0 % à 40 % de porosité intrinsèque, au-delà de cette dernière valeur, la roche n'est plus consolidée) saturée en eau douce. Dès que l'environnement change, la porosité délivrée par l'outil devient une porosité apparente qui est différente de la porosité réelle (ou intrinsèque) de la roche. Des corrections et/ou une courbe d'étalonnage (fonction reliant les taux de comptages à la porosité) plus adaptée deviennent nécessaires pour compenser ces effets d'environnement, par exemple une courbe d'étalonnage pour le grès ou la dolomie (cf. Figure 14 chapitre 1).

Les mesures neutron-neutron de porosité sont simulées dans MCNP avec un *tally* F4, qui calcule le flux moyen de particules neutroniques dans une cellule, toujours normalisé à un neutron source. Ce flux est multiplié par la section efficace microscopique (barn ou cm^2) de la réaction nucléaire n°103 correspondants à la réaction d'absorption $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ et par la concentration en noyaux de ^3He (cm^{-3}), ce qui convertit le flux par neutron source (cm^{-2}) en nombre de coups par unité de volume et par neutron source dans les compteurs ^3He . Le résultat obtenu avec MCNP est multiplié par le volume du détecteur et le nombre de particules simulées dans GEANT4 pour permettre une comparaison quantitative. La mesure neutron-neutron est simulée dans GEANT4 en comptant le nombre de réactions $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$.

Le Tableau 3 donne les comptages du nombre de réactions $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ pour les éléments purs dans le cas du modèle sphérique simplifié, montrant des écarts importants entre GEANT4 et MCNP pour l'hydrogène et le carbone, sans prise en compte des effets moléculaires (notés effets moléc. dans le Tableau 3). L'implémentation de ces derniers dans les simulations permet de réduire nettement ces écarts. Au-delà de ces deux éléments, l'écart maximum entre GEANT4 et MCNP ne dépasse pas 7.00 %, avec l'oxygène et 7.09 % avec le magnésium.

Tableau 3: Comptages pour la mesure neutron-neutron avec le modèle sphérique.

		C effets moléc.	C	H effet moléc.	H
Détecteur sphérique	Coups MCNP	17628283	18235366	14868	24662
	Coups GEANT4	17644604	20019134	14430	28766
	GEANT4/MCNP	0.09±0.02%	9.78±0.02%	2.95±0.83%	16.64±0.61%
		Si	O	Ca	Mg
Détecteur sphérique	Coups MCNP	26899	1178892	17635	81882
	Coups GEANT4	27472	1261444	18029	76080
	GEANT4/MCNP	2.13±0.61%	7.00±0.09%	2.23±0.75%	7.09±0.36%

Le Tableau 4 donne les comptages totaux pour l'outil générique neutron-neutron de porosité dans le cas de trois lithologies, montrant un écart inférieur à 4 % pour le détecteur proche, mais de 25 % pour le détecteur lointain, ce qui est investigué ci-après.

Tableau 4: Comptages pour un modèle d'outil générique neutron-neutron avec deux détecteurs, proche et lointain, dans trois roches de lithologies différentes avec 20 PU.

		Calcaire	Grès	Dolomie
Détecteur proche	Coups MCNP	19994	23399	21420
	Coups GEANT4	19227	23667	21164
	GEANT4/MCNP	3.84±0.71%	1.15±0.65%	1.20±0.69%
Détecteur lointain	Coups MCNP	3078	4521	3167
	Coups GEANT4	2311	3922	2518
	GEANT4/MCNP	24.93±1.93%	13.25±1.54%	20.49±1.88%

Grâce au suivi de particule de GEANT4, il est possible d'identifier les noyaux responsables des interactions avec les neutrons sur leur trajet depuis la source AmBe jusqu'aux détecteurs. Dans le modèle présenté ci-dessus avec un puits ouvert rempli d'eau douce de 200 mm de diamètre et une formation de 20 PU saturée en eau douce, pour la lithologie de type grès SiO₂, 77 % des coups dans le détecteur proche impliquent des interactions neutroniques sur des noyaux d'hydrogène et 80 % pour le détecteur lointain, les autres interactions se produisant sur des noyaux d'oxygène et de silicium. Pour la lithologie calcaire CaCO₃, ces fractions sont respectivement de 69 % et 66 %, pour la dolomie CaCO₃MgCO₃ de 72 % et 70 %, les autres interactions se produisant sur les noyaux d'oxygène, de carbone, de calcium et de magnésium.

Avec une formation de type grès SiO₂, les interactions sur l'hydrogène représentent donc une fraction plus importante, or la différence entre MCNP et GEANT4 est plus faible. Les écarts plus importants entre MCNP et GEANT4 dans du calcaire et de la dolomie, notamment pour le détecteur lointain, pourraient s'expliquer par des différences dans les sections efficaces d'interaction neutronique pour les éléments autres que l'hydrogène (magnésium, calcium, silicium, oxygène) ou par une mise en forme différente des sections efficaces de la base ENDF/B-VII.1 (Chadwick *et al.*, 2011) dans GEANT4 et MCNP.

L'accord global entre GEANT4 et MCNP pour la physique neutron-neutron reste néanmoins acceptable. Le taux de comptages mesuré (avec un vrai outil de porosité) sera bien inférieur aux taux de comptages simulés comme nous le verrons dans le chapitre 3 notamment à cause des pertes électroniques. Une fonction de correction polynomiale d'ordre deux, spécifique à chaque code de transport (MCNP et GEANT4), sera nécessaire pour transformer les CPS simulés en CPS « équivalent » mesurés.

2.2.3 Simulation des mesures neutron-gamma du ratio C/O

La mesure neutron-gamma C/O consiste à enregistrer le spectre des énergies déposées par les rayonnements gamma induits par interaction neutronique provenant d'un générateur de neutrons pulsé mono-énergétique de 14 MeV, avec un détecteur NaI(Tl) et à calculer le rapport des taux de comptages dans deux fenêtres d'intégration. La première, d'environ 3.2 à 4.7 MeV, est focalisée sur le rayon gamma de diffusion inélastique du carbone à 4.439 MeV (incluant ses pics d'échappement à 3.928 et 3.417 MeV) et la seconde, d'environ 4.8 MeV à 7.4 MeV, est focalisée sur le rayon gamma de diffusion inélastique de l'oxygène à 6.129 MeV (incluant ses pics d'échappement à 5.619 et 5.108 MeV).

Cette mesure du ratio C/O vise à mesurer les quantités respectives d'eau (O) et d'huile (C) dans la formation rocheuse. Ce ratio huile/eau est appelé saturation. On rappelle qu'il existe d'autres formes d'analyse de la mesure neutron-gamma comme celle de la décroissance temporelle du comptage des

rayonnements gamma de capture radiative, appelée mesure Sigma, car elle donne une estimation de la section efficace d'absorption macroscopique du milieu investigué par l'outil. Les outils de dernière génération permettent de faire ces deux analyses simultanément avec un générateur de neutrons pulsé, la première (C/O) pendant les impulsions voire sans filtre temporel, la seconde (Sigma) entre les impulsions.

La Figure 23 montre des spectres de la mesure neutron-gamma dans le modèle sphérique simplifié pour un matériau composé de carbone pur, en distinguant, en vue de l'analyse des écarts flagrants observés, les spectres des flux entrants dans le détecteur NaI des spectres gamma usuels, qui correspondent à leurs dépôts d'énergie. Les spectres de flux et d'énergie déposée simulés avec GEANT4 (courbes noires) sont de plus calculés avec et sans application d'un filtre en énergie décrit ci-dessous. Les spectres MCNP, que ce soit de flux (courbes rouges) ou d'énergie déposée (courbes bleues), sont réalisés sans ce filtre.

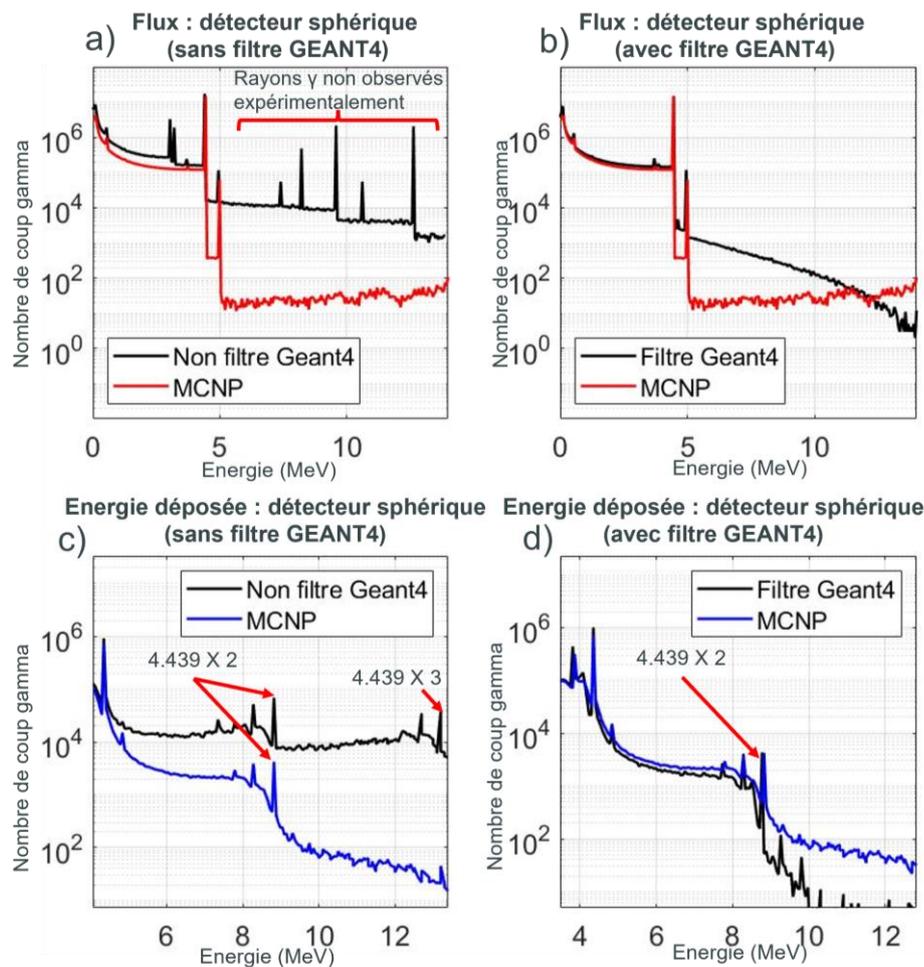


Figure 23: Spectres simulés neutron-gamma avec le modèle sphérique simplifié, une source de neutrons de 14 MeV, un détecteur NaI et un matériau en carbone pur. Les spectres (a) et (b) sont des courants gamma entrant dans le détecteur NaI tandis les spectres (c) et (d) sont des histogrammes des dépôts d'énergie par ces rayonnements gamma dans le détecteur NaI.

On constate tout d'abord en Figure 23 (c) et (d) que des pics somme sont présents dans les spectres gamma (dépôts d'énergie) de GEANT4 ou MCNP, à 2 ou 3 fois 4.439 MeV ($n, n'\gamma$) et 2 ou 3 fois 4.945 MeV (n, γ). On note aussi dans ces mêmes spectres (cf. Figure 23 (c) et (d)) des pics qui sont la somme des énergies de rayonnements gamma générés par capture radiative à 4.945 MeV et ceux générés par diffusion inélastique à 4.439 MeV. La géométrie sphérique étudiée, très simplifiée et théorique, conduit à ces artéfacts qui ne sont pas observés habituellement dans des simulations plus réalistes. Ceci provient

du fait que certains neutrons de 14 MeV peuvent subir 2 ou 3 diffusions inélastiques ($n, n'\gamma$) dans la sphère de carbone, dont les rayonnements gamma peuvent être tous détectés par le scintillateur NaI qui entoure entièrement la sphère. Dans une géométrie d'outil réaliste, avec des petits détecteurs éloignés de la source de neutrons, ceci ne se produit quasiment jamais, ou de façon exceptionnelle et non mesurable.

Pour simuler une mesure neutron-gamma C/O plus réaliste, un calcul MCNP en deux étapes est possible au lieu de celui avec le tally F8 en une seule étape. Dans un premier temps, un calcul du courant gamma sur la surface d'entrée du détecteur (intérieur de la coquille de détection en Figure 18) est réalisé avec le tally F1 de MCNP. La coquille correspondant au détecteur NaI est ici remplie de vide pour éviter la rétrodiffusion des rayonnements gamma vers la sphère interne de carbone. Dans un deuxième temps, le courant gamma précédent est utilisé comme source, sur cette même surface interne du détecteur NaI, pour estimer le spectre des dépôts d'énergies avec un tally F8, avec cette fois un temps de calcul bien plus court pour obtenir une bonne précision statistique. Le résultat de ce calcul en deux étapes est montré en Figure 25, avec la disparition des pics somme.

Cette même simulation en deux étapes est réalisée avec GEANT4, car on observe le même phénomène de pics somme pour cette configuration sphérique simplifiée. En ce qui concerne le flux GEANT4 de la Figure 23 (a), on observe de plus la présence de nombreuses raies gamma au-delà des deux raies bien connues à 4.439 MeV (diffusion inélastique) et 4.945 MeV (capture radiative) du carbone, non présents dans le flux MCNP ni expérimentalement (cf. Figure 25).

La Figure 24 présente une vue détaillée des spectres présentés en Figure 23 (a). Les raies d'émission principales sont présentées avec une flèche rouge et leur énergie (MeV) est affichée dans un rectangle.

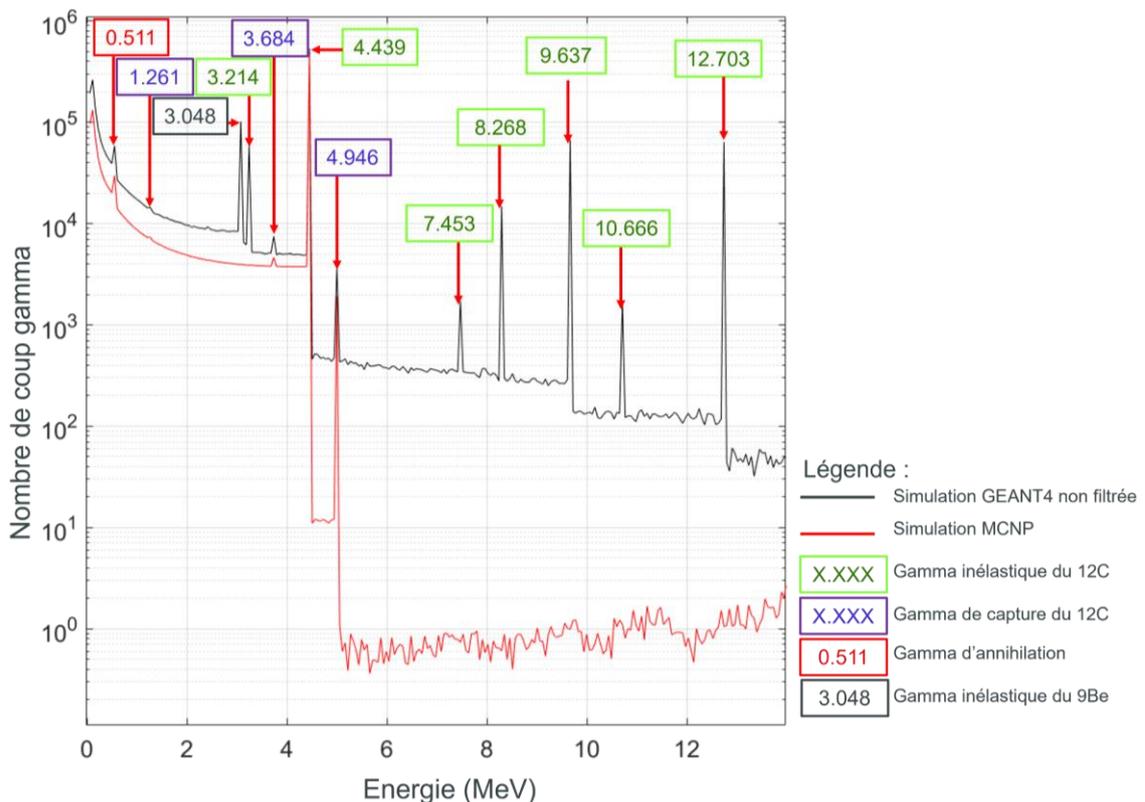


Figure 24: Spectres simulés neutron-gamma avec le modèle sphérique, une source de neutrons de 14 MeV, et un matériau en carbone. Les spectres (courbes rouges et noires) sont respectivement obtenus avec MCNP et GEANT4 et sont des courants gamma entrant dans le détecteur (une coquille remplie de vide).

En vert sont indiquées les émissions gamma correspondant à des transitions entre niveaux excités du noyau de ^{12}C (Table of Isotopes, 1996), en violet les émissions gamma après interaction de capture radiative (International Atomic Energy Agency, 2007), en noir une transition gamma du niveau 3.048 MeV vers le fondamental du ^9Be créée par la réaction $^{12}\text{C}(n,\alpha)$ (Table of Isotopes, 1996). Cette raie reproduite par GEANT4 ainsi que celle à 3.214 MeV et toutes celles au-dessus de 5 MeV ne sont cependant pas observées expérimentalement comme présenté en Figure 25 soit parce que leur probabilité de réaction pour atteindre le niveau excité est négligeable soit parce que la transition gamma n'est pas autorisée.

La suppression des émissions gamma présentes dans bibliothèque de GEANT4 (G4NDL4.6\Inelastic\Gammas\z6.a12), à l'exception de celle à 4.439 MeV, ne permet pas de résoudre complètement le problème, car GEANT4, au lieu de les générer (comme sur la Figure 24), produit alors un continuum entre 5 MeV et 14 MeV. Un filtre en énergie « passe-bande » a donc été ajouté dans la fonction C++ « SteppingAction.cc » pour filtrer les rayonnements gamma issus de diffusions inélastiques des neutrons sur les noyaux de carbone afin de ne conserver que ceux générés entre 4 et 5 MeV. L'ajout de ce filtre permet de « nettoyer » le flux GEANT4, cf. Figure 22 (b), mais il reste cependant très différent de celui de MCNP au-delà de 5 MeV.

La Figure 25 montre trois spectres de mesure neutron-gamma dans un modèle sphérique pour un matériau composé de carbone pur. La courbe noire obtenue avec GEANT4 et la bleue avec MCNP correspondent aux simulations en deux étapes. Le spectre marron provient de données expérimentales mesurées avec un générateur de neutrons de 14 MeV sur un échantillon de graphite (Perot *et al.*, 2007; Perot *et al.*, 2011).

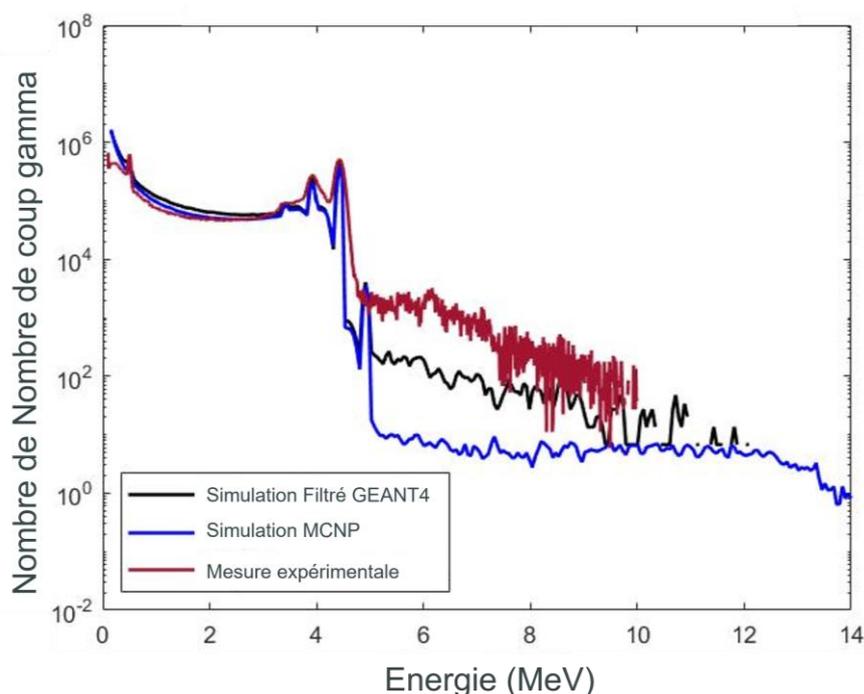


Figure 25: Spectres neutron-gamma simulés et mesurés avec une source de neutrons de 14 MeV, un détecteur NaI et un matériau en carbone pur. Les spectres simulés sont obtenus avec une simulation en deux étapes, le spectre expérimental a été normalisé à l'amplitude du pic principal de diffusion inélastique du carbone à 4.439 MeV obtenus avec MCNP pour faciliter cette comparaison qualitative.

La technique de la particule associée (TPA) utilisée pour acquérir ce spectre expérimental permet d'enregistrer uniquement les rayons gamma induits de 4.439 MeV sur les noyaux de carbone et les pics d'échappement sont également visibles sur le spectre. Les rayonnements gamma de capture radiative induits à 4.945 MeV par les neutrons thermiques ne sont pas mesurés avec cette méthode TPA, mais

pour le reste du spectre, les résultats obtenus avec MCNP et GEANT4 par la simulation en deux étapes sont en bon accord avec la mesure, sur le plan qualitatif du moins, car le spectre expérimental a été normalisé à l'amplitude des spectres simulés pour faciliter la comparaison et on note aussi que sa résolution énergétique est moins bonne. La résolution prise en compte dans les simulations s'apparente plutôt à celle d'un scintillateur LaBr₃(Ce), cf. Eleon *et al.*, 2010.

La Figure 26 montre les spectres de mesure neutron-gamma dans le modèle sphérique simplifié pour six matériaux purs. L'aspect pulsé de la mesure n'est pas pris en compte, les rayons gamma induits par la diffusion inélastique et par capture radiative sont donc présents dans le même spectre. Qualitativement, l'accord entre MCNP et GEANT4 est bon pour les éléments H, C, O et Si, mais on observe des différences significatives pour le calcium et le magnésium à haute énergie, dans la zone de mesure du ratio C/O.

Quantitativement, le Tableau 5 donne les coups intégrés dans les fenêtres oxygène et carbone et montrent effectivement des écarts maximums de 37 % avec le calcium dans la fenêtre carbone et de 43 % avec le magnésium dans la fenêtre oxygène, mais aussi des écarts significatifs pour l'élément carbone, avec 17 % ou 26 % selon que l'on utilise ou non le filtre en énergie dans GEANT4. Les résultats obtenus avec MCNP et avec GEANT4 pour le matériau composé à 100 % d'hydrogène sont en bon accord pour les énergies inférieures à 2.2 MeV, mais il n'y pas de signal dans les fenêtres d'intérêt carbone et oxygène, donc les comptages de cet élément ne figurent pas dans le Tableau 5. Il en est de même pour le comptage du matériau composé à 100 % de carbone, qui n'a pas de signal dans la fenêtre oxygène et est donc absent du Tableau 5.

La Figure 27 montre les spectres en énergie de la mesure neutron-gamma avec un outil de diagraphie générique C/O, où l'on constate qualitativement un bon accord dans la fenêtre oxygène, mais très mauvais dans la fenêtre carbone. Le Tableau 6 donne les coups intégrés dans les fenêtres carbone et oxygène, montrant en effet un assez bon accord quantitatif dans la fenêtre oxygène avec des écarts inférieurs à 12 %, mais des divergences très importantes entre MCNP et GEANT4 dans la fenêtre carbone, jusqu'à 65 % et 110 % pour les détecteurs proche et lointain dans le calcaire CaCO₃, ou respectivement 51 % et 79 % dans la dolomie CaMg(CO₃)₂. Pour le grès SiO₂, les écarts sont plus faibles avec 15 % et 6.4 %.

Les écarts plus importants entre MCNP et GEANT4 obtenus dans la fenêtre carbone pour des lithologies de type calcaire et dolomie, par rapport à une lithologie de type grès, sont cohérents avec les observations faites avec le modèle sphérique qui montraient que le calcium est l'élément présentant les plus grands écarts entre MCNP et GEANT4 (cf. Figure 26 et Tableau 5).

Tableau 5: Comptages dans les fenêtres C et O pour la mesure neutron-gamma avec le modèle sphérique.

		O	Ca	Mg	Si
Détecteur sphérique: fenêtre oxygène	Coups MCNP	2216955	426623	1365249	1221792
	Coups GEANT4	2281493	593007	783742	1061198
	GEANT4/MCNP	2.9±0.07%	39.0±0.14%	42.6±0.10%	13.1±0.09%
		O	Ca	Mg	Si
Détecteur sphérique: fenêtre carbone	Coups MCNP	1432222	1001319	1357499	1217088
	Coups GEANT4	1471031	1375929	1020289	1145298
	GEANT4/MCNP	2.7±0.08%	37.4±0.09%	24.8±0.09%	5.9±0.09%
		C filtré	C non filtré		
Détecteur sphérique: fenêtre carbone	Coups MCNP	2319258	2319258		
	Coups GEANT4	2705439	2917505		
	GEANT4/MCNP	16.7±0.06%	25.8±0.06%		

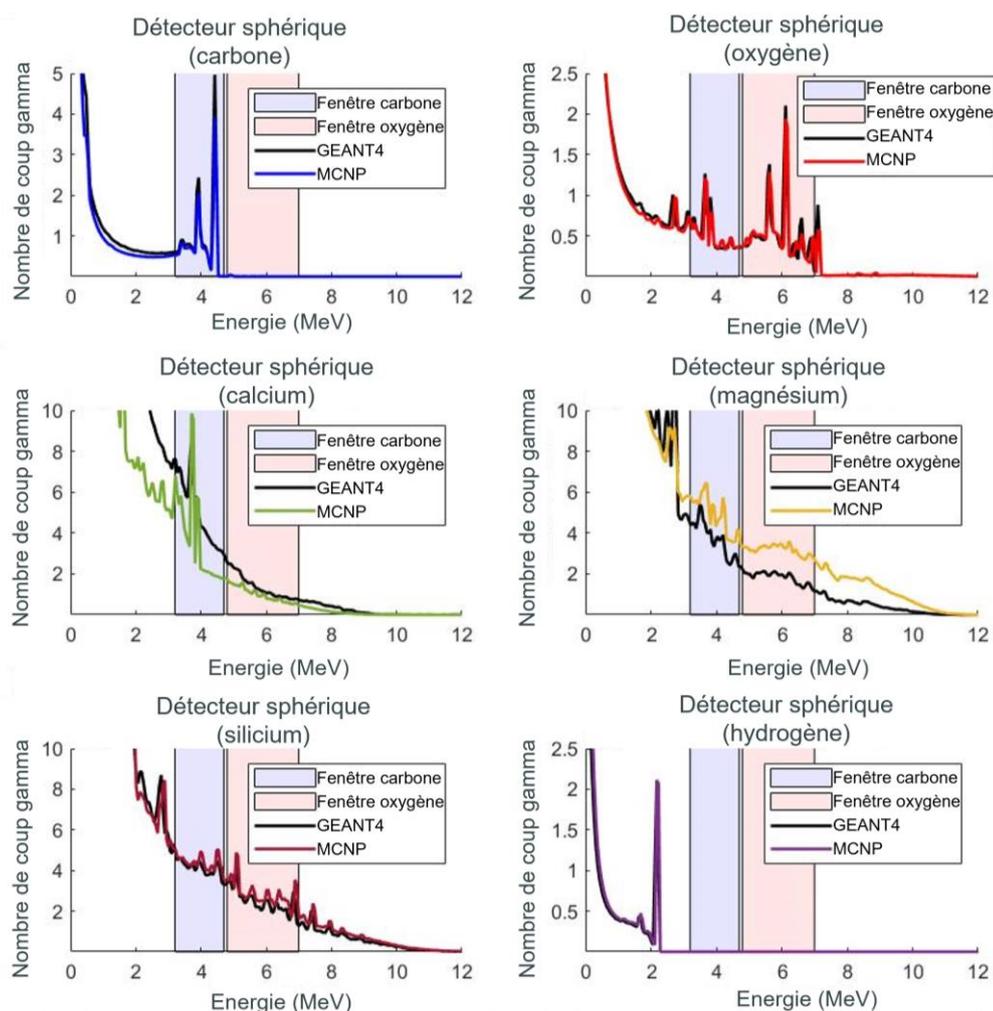


Figure 26: Spectres de mesure neutron-gamma simulés avec un modèle sphérique, une source de neutrons pulsée de 14 MeV, un détecteur NaI et six éléments chimiques purs. Cinq matériaux de masse volumique 2.71 g.cm^{-3} (carbone; oxygène; calcium; magnésium; silicium) ont été simulés, ou 0.5 g.cm^{-3} pour l'hydrogène en raison du plus grand nombre de noyaux par unité de volume.

Tableau 6: Comptages dans les fenêtres C et O pour un modèle d'outil générique neutron-gamma avec deux détecteurs, proche et lointain, dans trois roches de lithologies différentes avec 20 PU.

		Calcaire	Grès	Dolomie
Détecteur proche: fenêtre carbone	Coups MCNP	389	680	395
	Coups GEANT4	641	581	597
	GEANT4/MCNP	$64.8 \pm 4.41\%$	$14.7 \pm 3.98\%$	$51.0 \pm 4.49\%$
Détecteur lointain: fenêtre carbone	Coups MCNP	226	439	213
	Coups GEANT4	476	411	382
	GEANT4/MCNP	$110.3 \pm 5.34\%$	$6.4 \pm 4.85\%$	$79.1 \pm 5.80\%$
Détecteur proche: fenêtre oxygène	Coups MCNP	448	605	461
	Coups GEANT4	420	536	444
	GEANT4/MCNP	$6.2 \pm 4.80\%$	$11.5 \pm 4.19\%$	$3.7 \pm 4.70\%$
Détecteur lointain: fenêtre oxygène	Coups MCNP	239	352	242
	Coups GEANT4	260	322	236
	GEANT4/MCNP	$9.0 \pm 6.33\%$	$8.5 \pm 5.45\%$	$2.6 \pm 6.47\%$

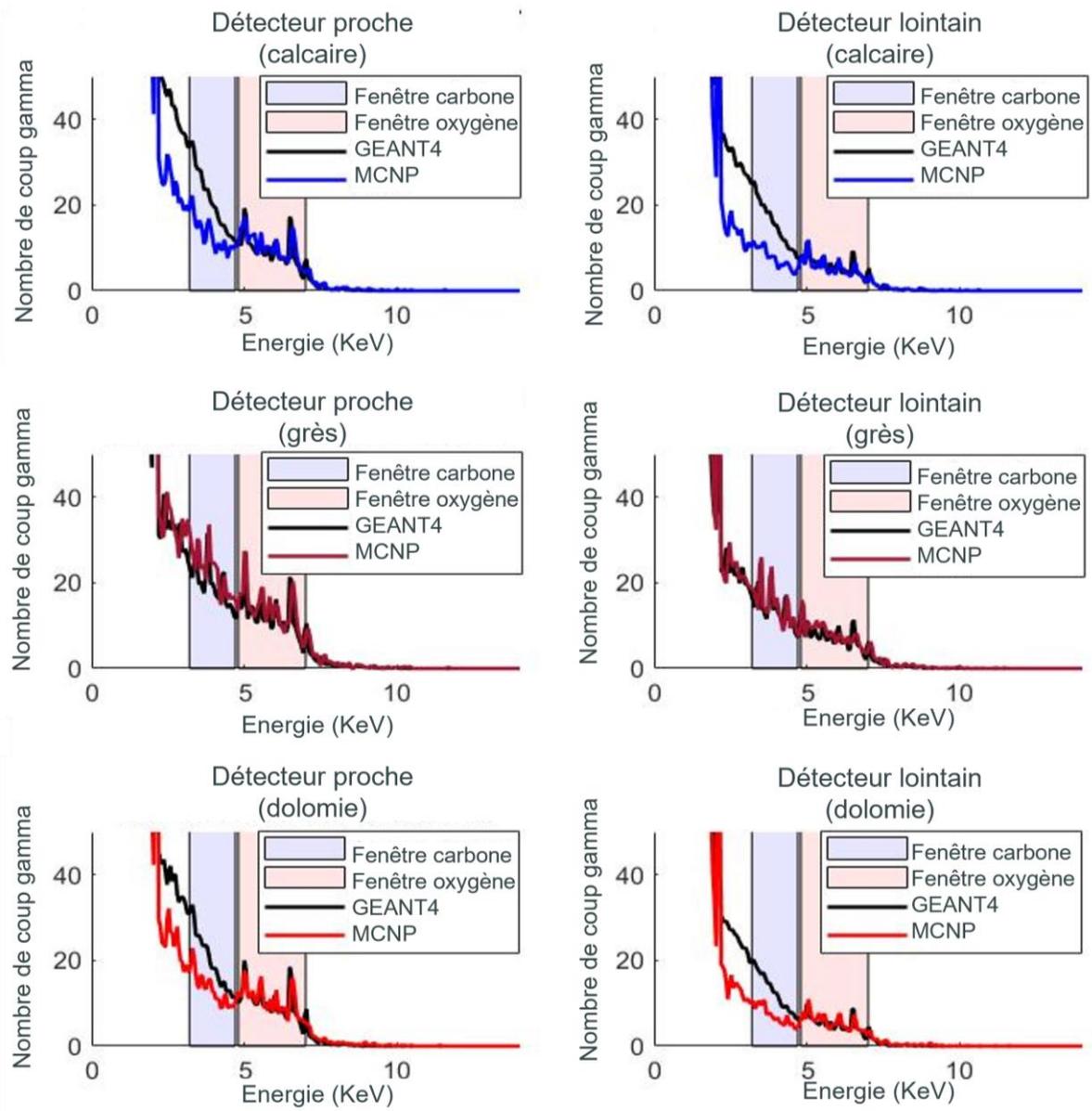


Figure 27: Spectres simulés de la mesure neutron-gamma avec un modèle d'outil de diaggraphie générique C/O, une source de neutrons de 14 MeV, deux détecteurs NaI (proche et lointain) et trois roches différentes à 20 PU (unité de porosité): un calcaire de 2.368 g.cm^{-3} (graphiques a et b), un grès à 2.323 g.cm^{-3} (graphiques c et d) et une dolomie à 2.496 g.cm^{-3} (graphiques e et f).

En conclusion, l'accord entre GEANT4 et MCNP pour l'outil neutron-gamma C/O dépend de la composition chimique de la roche et des gammes d'énergie d'intérêt. Il est plutôt correct pour une lithologie comme le grès, mais n'est pas acceptable pour le calcaire et la dolomie dans la fenêtré carbone.

2.3 Conclusions

La comparaison GEANT4 et MCNP pour simuler des mesures diagraphiques nucléaires montre un très bon accord pour les mesures gamma-gamma et satisfaisant en neutron-neutron lorsque les effets moléculaires sont pris en compte dans le transport des neutrons thermiques. Cependant, des différences importantes apparaissent pour les mesures neutron-gamma avec certaines compositions chimiques et certaines bandes d'énergie des spectres gamma. Des corrections dans GEANT4 sont nécessaires pour filtrer les rayonnements gamma simulés qui ne sont pas observés expérimentalement (comme pour le carbone), ce qui permet d'améliorer les spectres finaux, mais des écarts importants subsistent (notamment pour les rayonnements induits sur les noyaux de calcium).

Dans le cadre de la thèse, nous calculerons les fonctions de sensibilité d'un outil du commerce neutron-neutron de porosité (cf. chapitre 3) et d'un outil du commerce neutron-gamma « Sigma » qui mesure la section efficace macroscopique d'absorption neutronique (cf. chapitre 4). Ces fonctions normalisées retranscrivent la sensibilité en 3D des outils et ne sont donc pas utilisées de manière quantitative. Ces écarts importants entre MCNP et GEANT4, en particulier pour la physique neutron-gamma, ne sont pas bloquants, car le paramètre clé pour cet outil est la vitesse de disparition des neutrons thermiques (cf. chapitre 1), or GEANT4 et MCNP sont en bon accord pour le transport neutronique.

Néanmoins, les taux de comptages totaux et les spectres simulés avec le code de transport MCNP, pour l'ensemble des outils utilisés dans l'industrie pétrolière (gamma-gamma, neutron-neutron, neutron-gamma), seront privilégiés, car la statistique de calcul est bien meilleure, à temps de calcul égal, et ce code est la référence utilisée dans le domaine pétrolier, bénéficiant ainsi d'un retour d'expérience très vaste sur l'adéquation entre les mesures et les calculs.

Dans le chapitre 3, la comparaison GEANT4 vs. MCNP sera poussée plus loin avec des mesures expérimentales qui se focaliseront sur l'outil neutron-neutron de porosité. Cela permettra aussi de valider l'approche de simulation des fonctions de sensibilité et la prédiction des diagraphies avec les algorithmes de prédiction rapide (FFM, *Fast Forward Modeling*), notions introduites dans le chapitre 1.

Nous verrons également dans le chapitre 4, une comparaison des simulations MCNP et GEANT4 pour l'outil Sigma, basé sur la pente de décroissance temporelle du signal gamma induit par les neutrons thermalisés d'un générateur de neutrons pulsé, qui seront aussi comparées à des mesures expérimentales en centre d'étalonnage.

Pour la prédiction des diagraphies nucléaires étendue en environnement de puits tubé avec les algorithmes de FFM nous utiliserons:

- MCNP pour les calculs quantitatifs de taux de comptages et de spectres temporels ou énergétiques en raison de sa facilité d'utilisation (construction de la géométrie, estimateurs des grandeurs physiques existants, générateur automatique des importances, etc.), de temps de calcul nettement inférieurs à GEANT4 pour une statistique de calcul donnée, de la fiabilité des résultats quantitatifs pour la physique des basses énergies (< 20 MeV). MCNP sera également utilisé pour le calcul des fonctions de sensibilité de flux au chapitre 3 et au chapitre 4.
- GEANT4 comme alternative dans les calculs des fonctions de sensibilité, car il permet d'accéder aux coordonnées des interactions, énergies déposées, types d'interactions, particules impliquées et noyaux cibles, etc. Nous verrons que cela améliore la sensibilité aux composants du puits et par conséquent la qualité de la prédiction des diagraphies avec les algorithmes de FFM.

3. Validation des fonctions de sensibilité et algorithmes de prédiction rapide pour l'outil de porosité

3.1 Méthodes de calcul des fonctions de sensibilité

3.1.1 Introduction

Du fait de la raréfaction des ressources en hydrocarbures, le nombre de projets d'exploration tend à diminuer. Les sociétés pétrolières disposent de plus en plus de puits dont les capacités de production doivent être maintenues et de champs matures à abandonner tout en garantissant une bonne étanchéité. À cette fin, l'industrie tente d'améliorer l'interprétation des diagraphies en puits tubé et notamment des sondes nucléaires qui jouent un rôle clé. Les objectifs sont d'obtenir, à travers le ciment et le (ou les) tubage(s), une quantification de l'évolution de la saturation en eau et hydrocarbures, la reconnaissance et la caractérisation de nouvelles zones réservoirs et une évaluation quantitative de l'intégrité des puits pour des travaux de fermeture et d'abandon.

Par conséquent, l'enjeu industriel n'est pas seulement de mesurer les propriétés pétrophysiques des formations rocheuses (e.g. porosité, masse volumique, lithologie, saturation huile/gaz, etc.), mais également de caractériser les composants du forage (e.g. fluides du puits, tubage, ciment, etc.). En raison du grand nombre d'inconnues, une approche d'inversion multi-physique prenant en compte toutes les diagraphies nucléaires traditionnelles est nécessaire: densité et PEF (*PhotoElectric Factor*) avec des outils gamma-gamma, PHI (*Porosity Hydrogen Index*) en mesure neutron-neutron, rapport carbone/oxygène et section efficace d'absorption Sigma en neutron-gamma, etc.

La fiabilité d'un système d'inversion et la convergence vers une solution unique (i.e. un modèle numérique de terrain et une architecture de puits), reposent sur la précision des données prédites. Celles-ci doivent être aussi proches que possible des mesures brutes non corrigées (i.e. avant toute correction d'environnement liée au puits, au ciment et au tubage), de façon à obtenir le modèle numérique de terrain représentatif de la réalité. La modélisation traditionnelle utilisant les simulations nucléaires Monte-Carlo avec le code MCNP est une solution possible, mais présente des limites (principalement puissance et temps de calcul) pour couvrir l'ensemble des configurations possibles dans la section de puits considérée. Ces méthodes Monte-Carlo ne sont donc pas utilisées directement pour inverser le problème des puits tubés, mais pour calculer des bibliothèques de fonctions de sensibilité utilisées par les algorithmes de prédiction rapide.

L'Université du Texas (Austin) a développé un simulateur de diagraphies nucléaires rapide (UTAPWeLS, 2020) basé sur le concept de fonction de sensibilité de flux. Ces fonctions de sensibilité visent à reproduire le flux contribuant au signal mesuré au détecteur d'un outil de diagraphie nucléaire. Cette définition de la sensibilité est pertinente et a été testée avec succès en conditions de puits ouvert, mais doit être revisitée en puits tubé présentant des hétérogénéités radiales importantes. Pour garantir la capacité des algorithmes de FFM (*Fast Forward Modeling*) à prédire des diagraphies dans un environnement de puits tubé, le concept de fonction de sensibilité doit être validé avec des mesures expérimentales.

Ce chapitre 3 concerne l'outil de porosité hydrogène neutron-neutron qui consiste à mesurer les neutrons issus d'une source AmBe et rétrodiffusés, principalement par les noyaux d'hydrogène de la formation rocheuse, vers deux détecteurs ^3He , l'un proche et l'autre lointain (Ellis *et al.*, 2003 et 2004). Leurs taux de comptages (ou le rapport de ces taux de comptages dans les mesures dites compensées) donnent accès à la porosité. Une comparaison entre deux méthodes de calcul de fonction de sensibilité (*Particle Tracking* avec le code GEANT4 et *Weight Window* avec MCNP) est présentée ici, ainsi qu'une confrontation avec des mesures de perturbation afin de valider d'une part les modèles numériques de

l'outil, et d'autre part le concept global de fonction de sensibilité et de prédiction rapide. Ces mesures de perturbation seront donc modélisées avec les deux codes, en respectant le plus finement possible la géométrie du dispositif expérimental. Ensuite, les taux de comptages simulés et les fonctions de sensibilité calculées, ainsi que les diagraphies prédites, seront comparés à ceux mesurés dans un centre d'étalonnage.

3.1.2 Méthode des fenêtres de poids

Cette partie a pour but de formaliser mathématiquement le concept de fonction de sensibilité et de comparer deux méthodes de calcul différentes. La première méthode de calcul des fonctions de sensibilité, initialement publiée par l'Université du Texas (Mendoza *et al.*, 2007; Mendoza *et al.*, 2010a; Mendoza *et al.*, 2010b), consiste à calculer la cartographie du flux de neutrons dans les détecteurs à ^3He de la sonde (détecteurs proche et lointain) pour une source de neutrons de type AmBe. Luycx *et al.*, 2020 présentent la méthode avec MCNP6.2, où deux simulations différentes sont nécessaires pour obtenir les fonctions de sensibilité des deux détecteurs proche et lointain. Cette méthode combine, par multiplication, un premier fichier de sortie MCNP qui est la cartographie 3D des valeurs d'importance dans chaque maille (il est obtenu grâce au *Weight Window Generator* de MCNP), avec un deuxième fichier de sortie MCNP qui est la cartographie 3D du flux total de neutrons dans chaque maille. La cartographie du flux est obtenue grâce à un *tally* de type FMESH de MCNP (cf. partie 1.2 pour plus de détail).

$$FSF_{WW}^j = Importance^j \times Flux^j \quad (11)$$

FSF_{WW}^j (particules/cm²) est la valeur de la fonction de sensibilité du flux (FSF pour *Flux Sensitivity Function*) de l'outil de porosité hydrogène neutron-neutron dans la maille j , obtenue avec la méthode des fenêtres de poids (WW pour *Weight Window*). La discrétisation utilisée dans la simulation Monte-Carlo (avec le MESH de MCNP) est cylindrique. La maille j est virtuelle, elle ne correspond pas aux volumes constituant l'outil, le puits ou la formation (cf. plus loin en Figure 28). Ce maillage virtuel est dit « surimposé » dans MCNP (*superimposed mesh*).

Pour être utilisé dans les algorithmes de prédiction rapide (ou algorithmes de FFM pour *Fast Forward Modeling*) du logiciel UTAPWeLS (UTAPWeLS, 2020), la FSF_{WW} est normalisée à l'unité (i.e. la somme des valeurs de sensibilité dans les mailles de la matrice 3D est égale à 1) comme indiqué dans l'équation (12).

$$FSF_{WW_norm}^j = \frac{FSF_{WW}^j}{\sum_{j=1}^n FSF_{WW}^j} \quad (12)$$

$FSF_{WW_norm}^j$ est la valeur de la sensibilité de flux de la sonde de porosité hydrogène neutron-neutron dans la maille j obtenue avec la méthode des fenêtres de poids (WW). Ici $FSF_{WW_norm}^j$ est normalisée grâce à l'équation (12). Ainsi, la somme des sensibilité contenues dans l'ensembles des mailles de la fonction de sensibilité de flux FSF_{WW_norm} est égale à 1. Pour la suite, FSF_{WW_norm} est noté FSF_{WW} car elle est toujours utilisée après normalisation à l'unité grâce à l'équation (12).

Cette cartographie 3D normalisée (notée FSF_{WW}) est le modèle physique de sensibilité de l'outil. Elle n'est pas utilisée seule de manière quantitative, mais couplée à un modèle numérique de terrain contenant des grandeurs pétrophysiques nucléaires comme la longueur de ralentissement L_s (cm), la longueur de diffusion L_d (cm) et la masse volumique ρ_b (g.cm⁻³) avec b pour *bulk* qui signifie masse volumique globale ou de grain. Elle correspond à un mélange de grain et de fluide dans les pores. Ces

grandeurs pétrophysiques sont associées dans un paramètre de formation composite Fp (cf. partie 3.5 pour plus de détails).

Le modèle numérique de terrain est multiplié par la fonction de sensibilité pour prédire des diagraphies de puits. La méthode des fenêtres de poids (WW) est la plus couramment utilisée pour calculer les fonctions de sensibilité de flux 3D, mais elle n'a jamais été comparée à une autre méthode de calcul, comme celle présentée dans la partie suivante.

3.1.3 Méthode du suivi de particule

La deuxième méthode de calcul des fonctions de sensibilité proposée ici est le suivi de particule. Cette méthode n'a jamais été implémentée jusqu'à présent dans la littérature. L'avantage de cette méthode est de pouvoir sélectionner les particules qui sont détectées dans une fenêtre spécifique en temps (exemple de l'outil Sigma) ou en énergie (exemple de l'outil basé sur le ratio C/O), mais aussi de pouvoir rehausser le contraste de sensibilité au niveau des différents éléments (puits, tubage, ciment, formation rocheuse), en sélectionnant les lieux où se produisent les interactions et en supprimant la contribution de la sonde, comme nous le verrons plus loin dans la partie 3.4.1.

Cette méthode est plus simple à implémenter avec GEANT4 qu'avec MCNP, car GEANT4 fournit des estimateurs (de flux ou d'autres grandeurs) basés sur le suivi individuel des particules dans les volumes d'intérêt alors que MCNP calcule principalement des estimateurs statistiques (moyennes). Cette partie ne compare pas le transport des particules avec ces deux codes (cf. le précédent chapitre 2 et Varignier *et al.*, 2023 pour cet aspect), mais deux méthodes de calcul différentes des fonctions de sensibilité.

La méthode du suivi de particules consiste à calculer la cartographie des interactions des neutrons contribuant au signal (i.e. un neutron émis au niveau de la source AmBe qui finit par interagir avec un noyau d'hélium 3 du détecteur), et pour chacun de ces neutrons, à comptabiliser le nombre d'interactions de diffusion inélastique et élastique dans chaque maille, sur l'intégralité de son parcours.

La fonction de sensibilité définie par la cartographie des interactions peut s'exprimer ainsi:

$$ISF_{PT}^j = \sum_{k=1}^N N_{interaction\acute{e}lastique}_k^j + \sum_{k=1}^N N_{interactionin\acute{e}lastique}_k^j \quad (13)$$

ISF_{PT}^j (interactions) est la fonction de sensibilité des interactions (ISF pour *Interaction Sensitivity Function*) de l'outil de porosité hydrogène neutron-neutron dans la maille j , $N_{interaction\acute{e}lastique}_k^j$ et $N_{interactionin\acute{e}lastique}_k^j$ (interactions) sont respectivement les nombres de diffusions élastiques et inélastiques du neutron k (absorbé dans le détecteur) dans la maille j et N le nombre total de neutrons (absorbés dans le détecteur) interagissant dans la maille j .

Comme précédemment pour la fonction de sensibilité de flux FSF_{WW} , la fonction de sensibilité des interactions ISF_{PT} est normalisée à l'unité selon l'équation (12). Pour la suite, ISF_{PT_norm} est noté ISF_{PT} car elle est toujours utilisée après normalisation à l'unité grâce à l'équation (12).

Il est également possible de recalculer une FSF_{PT} en utilisant le suivi de particule avec GEANT4, en déterminant la trace de chaque neutron dans chaque maille selon l'équation (14) ci-dessous. Cela permet de comparer, avec deux codes indépendants, les deux méthodes de calcul des fonctions de sensibilité FSF_{PT} (i.e. fenêtres de poids avec MCNP et suivi de particules avec GEANT4).

$$FSF_{PT}^j = \frac{\sum_{k=1}^N T_k^j}{V^j} \quad (14)$$

FSF_{PT}^j (particules/cm²), T_k^j la distance (i.e. la trace) parcourue par le neutron k dans la maille j (cm) et V^j est le volume de la maille (cm³) et N le nombre total de neutrons traversant la maille j . L'équation (14) est similaire à celle utilisée pour l'estimateur de flux statistique dans MCNP (qui calcule la moyenne des traces pour les différentes histoires de chaque neutron source).

Ici aussi comme pour la fonction de sensibilité de flux FSF_{WW} ou la fonction de sensibilité des interactions FSF_{PT} , la fonction de sensibilité de flux FSF_{PT} est normalisée à l'unité selon l'équation (12). Pour la suite, FSF_{PT_norm} est noté FSF_{PT} car elle est toujours utilisée après normalisation à l'unité grâce à l'équation (12).

La cartographie des interactions (ISF_{PT}) peut être approximée à partir de la cartographie du flux contenu dans FSF_{PT} avec une relation analogue à un calcul de taux volumique de réaction (apparenté à ISF) à partir du flux (apparenté à FSF) et de la section efficace macroscopique.

$$ISF_{PT}^j \approx FSF_{PT}^j \times \Sigma_{diffusion}^j \times V^j \quad (15)$$

FSF_{PT}^j (particules/cm²), ISF_{PT}^j (interactions), V (cm³) et $\Sigma_{diffusion}^j$ (cm⁻¹) respectivement le flux et le nombre d'interactions des neutrons, le volume et la section efficace macroscopique de diffusion élastique et inélastique de la maille j . Il s'agit ici d'une présentation simplifiée pour montrer le lien physique entre FSF et ISF, mais en toute rigueur il faudrait écrire une intégrale de ce produit en fonction de l'énergie, car la section efficace et le flux en dépendent. Nous verrons en Figure 44 le bon accord entre une ISF calculée directement à partir des interactions et celle calculée avec l'équation (15).

L'environnement des puits tubés nécessite d'avoir une approche différente en termes de fonction de sensibilité que celui des puits ouverts. Les éléments constitutifs du puits apportent radialement un grand contraste de propriétés nucléaires (e.g. le tubage, le ciment, le fluide dans le puits et la formation rocheuse). Nous verrons qu'utiliser des fonctions de sensibilité basées sur les interactions plutôt que sur des flux de neutrons permet d'accentuer le contraste entre les contributions de ces éléments à la mesure de porosité et améliore la prédiction des diagraphies de porosité. Avant cela, les modèles numériques MCNP et GEANT4 ainsi que le concept de fonction de sensibilité doivent être validés expérimentalement. À cette fin, les FSF calculées avec les deux méthodes (PT et WW) seront comparées à des mesures de perturbation, dans le sens axial et radial, réalisées dans un centre d'étalonnage. Les parties suivantes décrivent d'abord les modèles numériques, puis ces expériences, et enfin ces comparaisons expérience-calcul.

3.1.4 Géométrie de la sonde neutron-neutron de porosité

La mesure de porosité hydrogène neutron-neutron consiste à comptabiliser le nombre de neutrons rétrodiffusés provenant d'une source radioactive d'américium-béryllium (AmBe) avec deux détecteurs ³He, l'un proche et l'autre lointain. La mesure est principalement sensible à la teneur en hydrogène de la roche en raison des grandes sections efficaces de diffusion élastique et de capture radiative des noyaux d'hydrogène.

La porosité est la fraction de volume de vide par rapport au volume de roche. Ce volume de vide est occupé par différents fluides liquides ou gazeux (eau douce, saumure, hydrocarbures liquide ou gazeux, CO₂, air) aux propriétés neutroniques très différentes. La conversion de la teneur en hydrogène en

porosité est fortement liée à la nature physico-chimique des fluides présents dans l'environnement proche de l'outil, ainsi qu'à l'architecture du puits (e.g. le diamètre du forage, la présence de tubage et de ciment). Les autres éléments comme C, O ou Ca n'ont un impact significatif sur le ralentissement et la capture des neutrons que quand il y a peu de noyaux d'hydrogène, c'est à dire pour des formations rocheuses de faibles porosités, saturées en fluides liquides (environ entre 0 et 5 PU), ou saturées en gaz. La variation du taux de comptages induit par ces éléments est appelée « effet matrice ». L'amplitude de cet effet dépend de la minéralogie et de la masse volumique de la roche (Ellis *et al.*, 2003; Ellis *et al.*, 2004).

Les simulations présentées ici sont réalisées avec la géométrie d'une sonde commerciale (i.e. une sonde d'un fabricant d'outils qui est sur le marché). Le modèle de sonde de porosité hydrogène neutron-neutron est d'un diamètre de 2.5'. La Figure 28 montre deux représentations 2D (XY et XZ) du modèle MCNP de l'outil en configuration de puits tubé. Le maillage cylindrique en noir est celui des fenêtres d'importance (WW) dans MCNP.

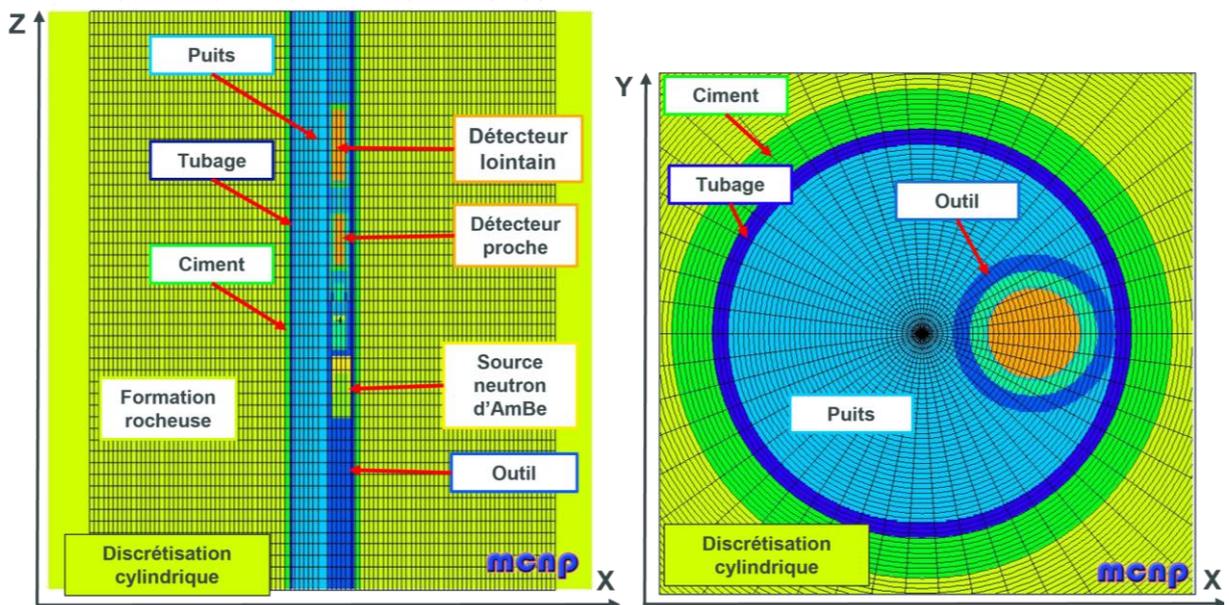


Figure 28: Projections 2D sur les plans YX et ZX du modèle MCNP de la sonde de porosité hydrogène neutron-neutron, vues réalisées avec l'éditeur visuel MCNP VISED (Schwarz *et al.*, 2018). Le maillage cylindrique « surimposé » (à la géométrie réelle du puits et de l'outil) est celui mis en place pour le Weight Window Generator (WWG) de MCNP et pour le mesh tally.

La Figure 29 est une représentation 3D de la sonde réelle modélisée dans GEANT4 et affichée avec EDGE (EDGE, 2019; Trouche *et al.*, 2019) en configuration de puits tubé. La même discrétisation cylindrique que dans MCNP (i.e. le maillage cylindrique généré par le WWG) est utilisée en post traitement dans GEANT4. Le résultat d'une simulation GEANT4 avec une dizaine de neutrons de la source AmBe est présenté sur la Figure 29, avec les trajectoires neutroniques en bleu.

La Figure 30 compare la géométrie du puits réelle (i.e. l'ensemble eau, tubage et ciment) qui a été utilisée lors des mesures de perturbation en puits tubé réalisées en centre d'étalonnage (tenant compte des contraintes de mise en œuvre, cf. partie 3.2) et la géométrie idéalisée utilisée dans les calculs de fonctions de sensibilité à vocation plus générale (i.e. la prédiction rapide de diagaphies pour faire de l'interprétation des mesures diagaphiques).

Dans l'architecture réelle, la géométrie du puits n'est pas parfaitement cylindrique (cf. Figure 30 A). Une marge de sécurité permettant de descendre et remonter le dispositif simulant le tubage et le ciment a été nécessaire pour éviter d'endommager les étalons rocheux (cf. partie 3.2). Ce dispositif est ensuite plaqué

contre la paroi du puits, créant une dissymétrie (comme le plaquage de la sonde dans le tubage). Le puits réel est foré avec un diamètre de 200 mm, le tubage est de diamètre externe 114 mm (4.5') et de diamètre interne 102 mm. De plus, le ciment (équivalent en fibre de verre-époxy) n'est pas de forme parfaitement cylindrique, avec une épaisseur devant de la sonde de 16 mm, proche de la valeur standard utilisée dans l'industrie, mais une épaisseur arrière de 36 mm. Ceci permet de limiter la quantité d'eau entre la paroi du puits et le tubage, pour se rapprocher des puits industriels où il n'y a pas d'eau dans cet espace.

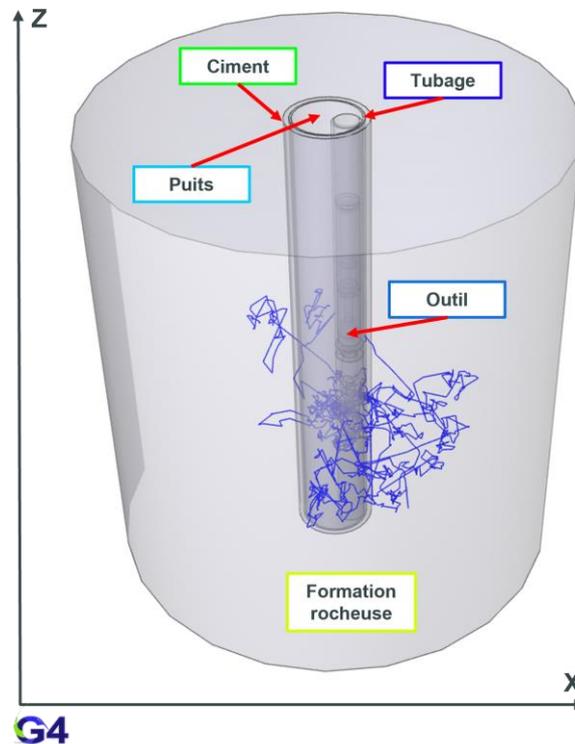


Figure 29: Vue 3D en perspective du modèle numérique de la sonde neutron-neutron de porosité hydrogène implémentée dans GEANT4, obtenue avec l'outil de visualisation EDGE (EDGE, 2019; Trouche et al., 2019), montrant les parcours d'une dizaine de neutrons.

Dans l'architecture idéalisée, la géométrie présente une symétrie cylindrique de révolution par rapport à l'axe du puits (hormis la sonde, cf. Figure 30 B). Le puits numérique « parfait » modélisé pour calculer les fonctions de sensibilité (cf. Figure 30 B) présente un diamètre de 200 mm, un tubage de diamètre interne 156 mm et de 6 mm d'épaisseur, une épaisseur de ciment entre la formation rocheuse et le tubage de 16 mm. Cette géométrie reste proche de celle des mesures (i.e. la géométrie réelle), la différence principale provenant du diamètre interne du tubage qui est de 156 mm dans le modèle de puits idéalisé par rapport à celui du puits expérimental, 102 mm. De ce fait, la quantité d'eau est plus grande à l'arrière de la sonde dans le puits idéalisé.

Nous comparons dans la partie 3.3, les taux de comptages simulés avec MCNP et GEANT4 vs. les taux de comptages mesurés dans les expériences de perturbation (les dispositifs et les résultats des mesures sont présentés dans la partie 3.2). Les mesures diagraphiques et les simulations Monte-Carlo sont faites rigoureusement dans la même géométrie de puits réelle (cf. Figure 30 A). Puis nous comparons dans la partie 3.4, la projection sur une dimension (1D) des fonctions de sensibilité de flux 3D (FSF) calculées vs. les profils de sensibilité mesurés. Ici, les fonctions de sensibilité de flux sont calculées dans la géométrie idéalisée (cf. Figure 30 B) et les mesures sont faites dans la géométrie de puits réelle (cf. Figure 30 A).

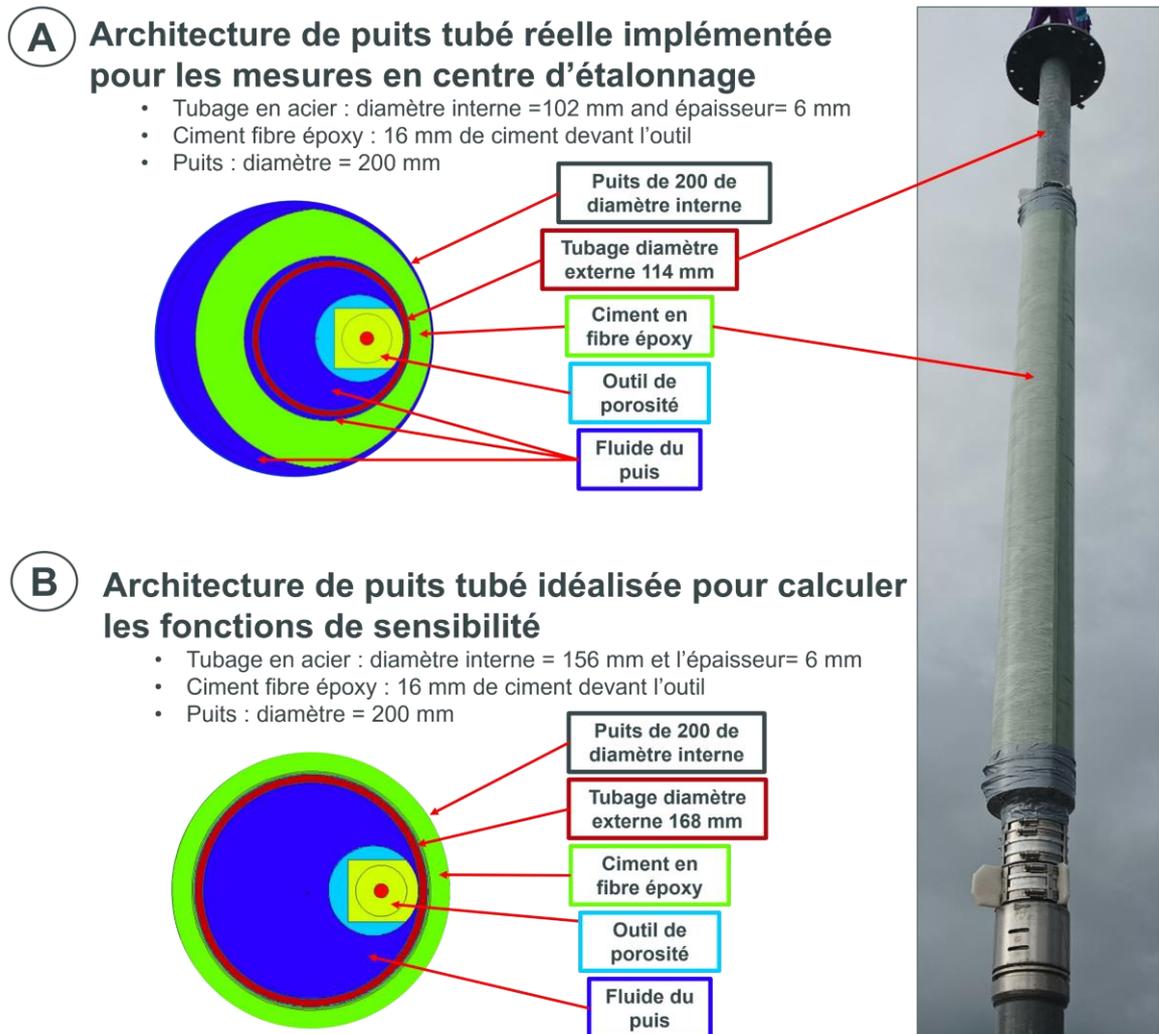


Figure 30: Comparaison de la géométrie de puits implémentée dans les mesures (A) et utilisée dans les modèles de calcul des fonctions de sensibilité (B).

Le fait que les mesures et les calculs ne soient pas réalisés dans la même géométrie n'est pas bloquant pour la thèse. Dans les expériences de perturbation (cf. partie 3.2), nous perturbons le signal dans la formation rocheuse uniquement et non pas dans le puits.

Dans la comparaison mesures vs. calculs, nous utilisons pour ces derniers les cellules de la FSF 3D qui sont surimposées à la formation rocheuse et non pas celles surimposées au puits (incluant l'eau, le tubage et le ciment). Les valeurs de sensibilité de la FSF 3D contenues dans les cellules surimposées à la formation rocheuse sont projetées sur un axe (i.e. en 1D), puis comparées aux profils de sensibilité mesurés.

Ainsi, même si l'architecture de puits tubé réelle et de puits tubé idéalisé sont différentes, nous en minimisons l'impact en ne comparant que les profils de sensibilité dans la partie formation rocheuse et non pas dans la partie puits.

Par ailleurs pour les expériences de perturbation en configuration de puits ouvert, du fait que le tubage et le ciment sont retirés du puits, les calculs et les mesures sont obtenus rigoureusement dans la même géométrie (diamètre 200 mm). L'asymétrie ne concerne que les expériences de perturbation en configuration de puits tubé.

3.2 Expérience de perturbation axiale et radiale

3.2.1 Présentation du dispositif expérimental

Les deux expériences décrites dans cette partie ont pour but de mettre en évidence les profils 1D de sensibilité de flux dans le sens radial et axial. Elles sont appelées expériences de perturbation et se basent sur l'enregistrement de la réponse du dispositif de mesure à l'introduction, dans un milieu homogène sans hydrogène (blocs de dolomie ou de calcaire très peu poreux), d'un élément perturbateur aux propriétés neutroniques très différentes, à savoir une plaque de 1 cm d'épaisseur de PEHD (Polyéthylène Haute Densité), à forte teneur en hydrogène. La Figure 31 illustre le principe d'une expérience de perturbation axiale avec une plaque de PVC (pour une sonde neutron-gamma dont l'étude complète est présentée dans le chapitre 4, mais c'est bien une plaque blanche de PEHD, non présentée ici car peu visible sur les blocs de dolomie blancs, qui est utilisée avec la sonde de porosité hydrogène neutron-neutron).

Une première acquisition est faite en milieu homogène, sans hétérogénéité. La mesure de porosité hydrogène neutron-neutron enregistre alors un taux de comptages de référence non perturbé, noté CPS_{Ref} . Puis, l'hétérogénéité est insérée dans le volume d'investigation de la sonde, soit axialement soit radialement, à différentes positions sur les axes Z ou R. La mesure enregistre alors des taux de comptages plus faibles à cause de l'hétérogénéité. Les variations du taux de comptages pour différentes positions des hétérogénéités, et plus précisément leur différence par rapport au signal CPS_{Ref} , constituent le profil 1D de sensibilité mesurée suivant l'axe radial ou l'axe axial (cf. Figure 33 ou Figure 34).

Dans le cas de l'expérience axiale, le milieu de référence est une dolomie de formule chimique $CaMg(CO_3)_2$ avec une porosité de 0.3 PU et une masse volumique de 2.86 g.cm^{-3} . Dans le cas de l'expérience radiale, c'est un calcaire $CaCO_3$ de 0.3 PU et 2.70 g.cm^{-3} . Ces blocs étalons homogènes de forme hexagonale (cf. Figure 31 et Figure 32) sont les faciès SIVÉC¹⁵ et HENRI IV¹⁶. Leurs propriétés physico-chimiques (e.g. masse volumique, porosité, composition chimique, etc.) ont été caractérisées en laboratoire (Chuilon *et al.*, 2019.) Ces blocs destinés à l'étalonnage des outils diagraphiques sont forés avec un puits central de 200 mm de diamètre.

Étant très faiblement poreux (0.3 PU), ils ne sont pas saturés en eau pour des raisons pratiques. Le silo qui contient le dispositif expérimental n'est pas rempli d'eau pendant la session de mesures. Ne pas saturer les blocs rocheux étalons permet de monter et démonter facilement le dispositif expérimental (indispensable pour réaliser l'ensemble des mesures dans un temps raisonnable).

Du fait que les blocs ne sont pas saturés en eau (pas d'eau dans le silo), le puits n'est initialement pas rempli d'eau non plus. Ainsi pour se rapprocher des conditions de mesures pétrolières réelles (un puits rempli d'eau et une formation rocheuse saturée en eau), un sac étanche en PEHD (de diamètre 200 mm et de longueur de 9 m) est ajouté à l'intérieur du puits et rempli d'eau douce. L'outil se trouve alors dans de l'eau comme dans un puits réel et face à une roche quasiment sans porosité (comme cela peut arriver

¹⁵ Le faciès SIVÉC est une roche de type dolomitique de couleur caractéristique blanche, qui provient de carrières en Macédoine du Nord. Cette roche, très homogène d'un point de vue granulométrique et très peu poreuse, est aussi appelée marbre blanc.

¹⁶ Le faciès HENRI IV est une roche de type calcaire qui provient de carrière dans le sud-ouest de la France. Cette roche est de couleur caractéristique grise et très peu poreuse.

sur le terrain). D'une épaisseur très faible (inférieure à 1 mm) et de teneur en hydrogène proche de l'eau, le sac étanche en PEHD n'est pas décrit dans les simulations Monte-Carlo.

Les étalons de dolomie SIVÉC utilisés dans l'expérience axiale sont un empilement de plaques de 6 cm d'épaisseur (plaques blanches sur la photo de la Figure 31) et les étalons HENRI IV utilisés dans l'expérience radiale sont des blocs de 37.5 cm d'épaisseur (blocs gris sur la Figure 32). Des blocs rocheux, eux aussi forés en 200 mm (en jaune sur les schémas des Figure 31 et Figure 32), sont utilisés à des fins de radioprotection ou de support mécanique. Pour toutes les acquisitions, la sonde est plaquée contre le bord du puits grâce à un bras excentreur. Les deux expériences de perturbation axiale et radiale sont réalisées en configuration de puits ouvert et de puits tubé. Un tubage en acier de 114 mm de diamètre externe (4.5') est ajouté dans le puits, à l'intérieur du sac étanche, ainsi qu'un matériau équivalent au ciment du puits, à savoir une fibre de verre époxy de 16 mm d'épaisseur (devant l'outil) et de masse volumique 2.08 g.cm^{-3} (propriétés physiques proches du ciment vis-à-vis du transport neutronique). Une analyse chimique de la fibre de verre époxy a été réalisée afin de la modéliser précisément dans les simulations Monte-Carlo avec MCNP et GEANT4.

Tableau 7: Composition chimique de la fibre époxy utilisée dans les expériences en puits tubé.

	H	C	O	N	Si
Fraction massique	1.71	14.64	45.78	0.72	37.15

Dans l'expérience axiale (cf. Figure 31), l'hétérogénéité est une plaque horizontale de PEHD de 1 cm d'épaisseur, de forme hexagonale et percée d'un puits central de 200 mm (comme les blocs rocheux étalons), positionnée au milieu des plaques de dolomie. Dans cette configuration, l'hétérogénéité est fixe et l'outil est mobile. L'acquisition est une diagraphie des blocs étalons i.e. un enregistrement du taux de comptages en fonction de la profondeur Z de la sonde, avec un point tous les cm. Au début de l'acquisition, la sonde se trouve dans un milieu homogène sans influence de la perturbation, puis l'hétérogénéité rentre progressivement dans la zone de sensibilité de l'outil et à la fin de l'acquisition, l'outil se trouve de nouveau dans le même milieu homogène sans influence de l'hétérogénéité.

Dans le cas radial, l'expérience qui consiste à déplacer radialement une hétérogénéité depuis le bord du puits vers la formation rocheuse est beaucoup plus complexe à mettre en œuvre (cf. Figure 32) Ici, la sonde est fixe et on déplace l'hétérogénéité radialement (dans la formation rocheuse) pour réaliser successivement une série de neuf mesures statiques du taux de comptages en fonction du rayon R où se trouve l'hétérogénéité (R = 10 cm; R = 13 cm; R = 17 cm; R = 21 cm; R = 25 cm; R = 29 cm; R = 33 cm; R = 37 cm avec le centre du puits en R = 0 cm), ainsi qu'une mesure de référence sans hétérogénéité (CPS_{Ref}).

Le montage a nécessité de découper trois blocs de calcaire HENRI IV de 37.5 cm de hauteur (soit une hauteur totale de l'expérience de 112.5 cm) en chacun deux demi-blocs de 180° , l'un non segmenté pour la partie située derrière (à l'opposé) de la sonde, l'autre redécoupé en quatre segments angulaires de chacun 45° pour la partie devant la sonde plaquée contre la paroi du puits. Ces segments de 45° sont de plus découpés radialement en 7 plaques de 4 ou 3 cm (selon que l'on insère ou non une plaque de PEHD de 1 cm d'épaisseur). En pratique, on dispose d'une série de sept plaques de 4 cm d'épaisseur et de 112.5 cm de hauteur, ainsi que d'une autre série de plaques de même hauteur, mais de 3 cm d'épaisseur, sur lesquelles sont fixées les plaques de PEHD de 1 cm d'épaisseur. Les plaques de roche (de 3 cm et 4 cm) sont taillées dans le même calcaire HENRI IV que le reste de l'étalon. Chaque série contient des plaques de largeurs différentes en fonction de leur éloignement par rapport au puits.

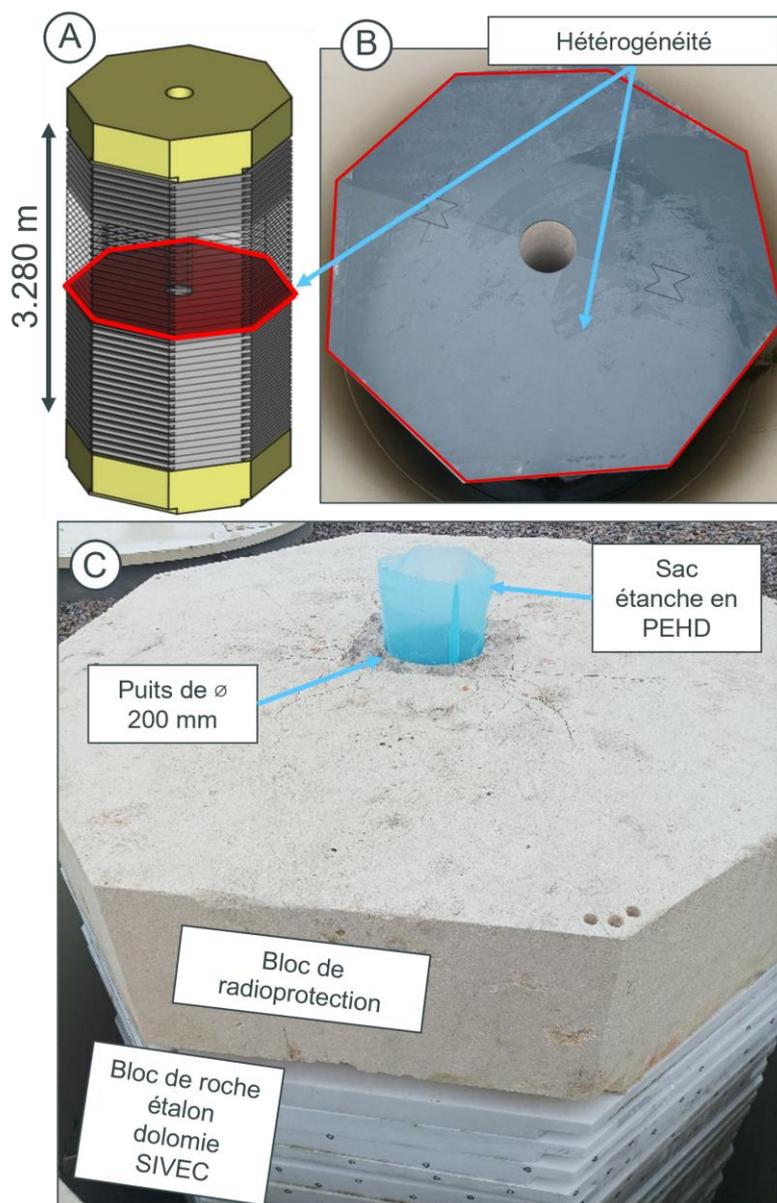


Figure 31: Expérience de perturbation axiale dans une colonne de dolomie de faciès SIVEC non poreuse de 328 cm de hauteur (A), dans laquelle est introduite une plaque de PEHD de 1 cm d'épaisseur (ici du PVC) perpendiculaire par rapport à l'axe du puits (A et B). Le sac bleu en PEHD visible sur la photo (C) est rempli d'eau douce pour permettre le remplissage du puits en eau. Le bloc supérieur de couleur beige (dolomie poreuse, en jaune sur A et C) est utilisé comme écran de radioprotection, celui du bas (aussi en dolomie poreuse) pour étendre la longueur de l'étalon rocheux.

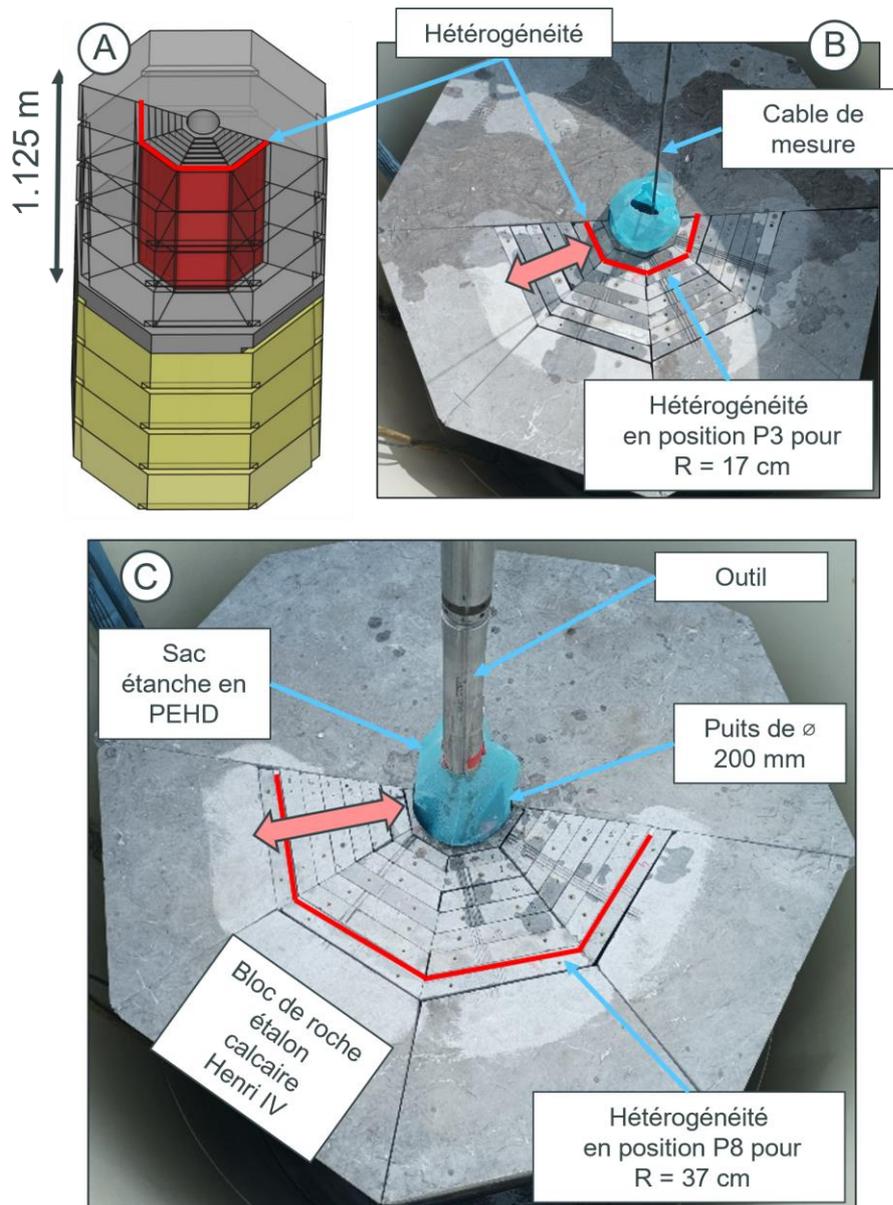


Figure 32: Expérience de perturbation radiale dans un ensemble de 4 galettes de calcaire non poreux de faciès HENRI IV de 112 cm de hauteur (A). Une hétérogénéité radiale est introduite sous la forme de 4 plaques de PEHD de 1 cm d'épaisseur surlignées en rouge (A, B, C). Cette hétérogénéité est progressivement déplacée du proche abord du puits vers l'extérieur de l'expérience, cf. Figure 34. Les plaques se situent en troisième position (P3) sur la photo B et en huitième position (P8) sur la photo C. La partie arrière du dispositif expérimental (bloc en gris) n'est pas segmentée (ni perturbée), car la sensibilité de mesure se concentre du côté où la sonde est plaquée à la paroi du puits (cf. Figure 39). Le câble de mesure est visible sur la photo (B). Sur la photo (C), la sonde est en position de mesure.

3.2.2 Résultats des expériences de perturbation

La Figure 33 présente les résultats de l'acquisition axiale en dynamique avec un enregistrement continu en fonction de la profondeur depuis la base du puits jusqu'en surface. On observe pour les deux détecteurs proche et lointain une perte de taux de comptages (due à la plaque de PEHD) par rapport au signal de référence sans perturbation CPS_{Ref} .

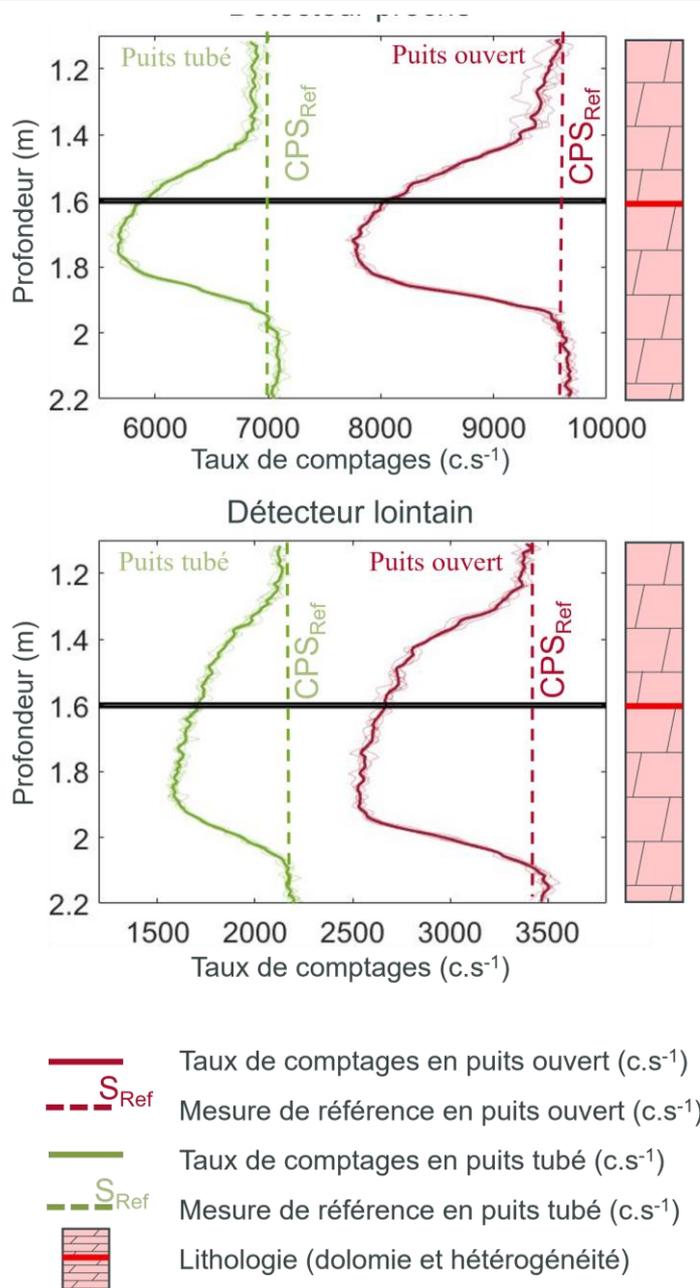


Figure 33: Résultats des mesures de perturbation axiale selon Z (profondeur). Cinq acquisitions successives ont été réalisées pour vérifier la répétabilité (traits fins avec leur moyenne en trait large). La vitesse de défilement de la sonde est de 0.3 m.s⁻¹.

La vitesse choisie ici (0.3 m.s⁻¹) est une vitesse de mesure diagraphique extrêmement lente. Un treuil spécial a été utilisé pour remonter l'outil depuis le fond du puits jusqu'en surface. Ce treuil spécial permet de ralentir au maximum la vitesse de remontée.

En pratique, dans une mesure diagraphique, la sonde additionne les comptages (neutron ou gamma) sur une seconde pour obtenir un taux de comptages. Puis, la sonde moyenne les taux de comptages mesurés sur des intervalles d'un ou plusieurs centimètres. Nous avons ici un taux de comptages moyen mesuré tous les 1 cm. La résolution (ou précision) de la sonde ne peut pas descendre en dessous du centimètre. Plus la vitesse de mesure est lente, plus la moyenne des taux de comptages allouée à chaque cote en profondeur (i.e. chaque centimètre le long du puits) est statistiquement fiable. En d'autres termes, la qualité de la mesure (i.e. son incertitude) dépend de la vitesse de mesure. Plus la vitesse de remontée

est lente, plus la mesure est précise (i.e. une bonne résolution) et plus la mesure est juste (i.e. faible variation statistique de coups par seconde).

Les profils axiaux mesurés présentent une asymétrie, avec une amplitude de la perte de signal maximale quand le détecteur se trouve en face de l'hétérogénéité, située à une profondeur de 1.6 m (lignes horizontales noires). Par convention, pour les outils de diagraphie avec une source et des détecteurs, la position indiquée pour le taux de comptages ou le spectre n'est pas celle du détecteur considéré (proche ou lointain), mais la profondeur moyenne entre la source et le milieu du détecteur (point de l'outil à mi-distance entre les deux).

On note que le taux de comptages CPS_{Ref} (sans effet de l'hétérogénéité de PEHD) est logiquement plus faible en puits tubé qu'en puits ouvert (sans tubage ni ciment). En effet, l'équivalent ciment en fibre de verre et résine époxy d'épaisseur 16 mm (devant l'outil) thermalise les neutrons (notamment par ses noyaux d'hydrogène) et le tubage en acier de 6 mm d'épaisseur absorbe les neutrons thermiques. La perte de taux de comptages relative due à l'hétérogénéité de PEHD est similaire en puits ouvert ou tubé, avec au maximum 20 % pour le détecteur proche et 28 % pour le détecteur lointain par rapport à CPS_{Ref} .

La Figure 34 présente une coupe schématique radiale du dispositif expérimental et montre les positions successives de l'hétérogénéité PEHD introduite dans les expériences radiales en puits ouvert (A) et puits tubé (B). Dans ces montages, la sonde reste statique à la même profondeur et on mesure la perte de taux de comptages (CPS vs. CPS_{Ref}) en fonction de la position radiale (P1 à P8) de l'hétérogénéité dans la formation rocheuse.

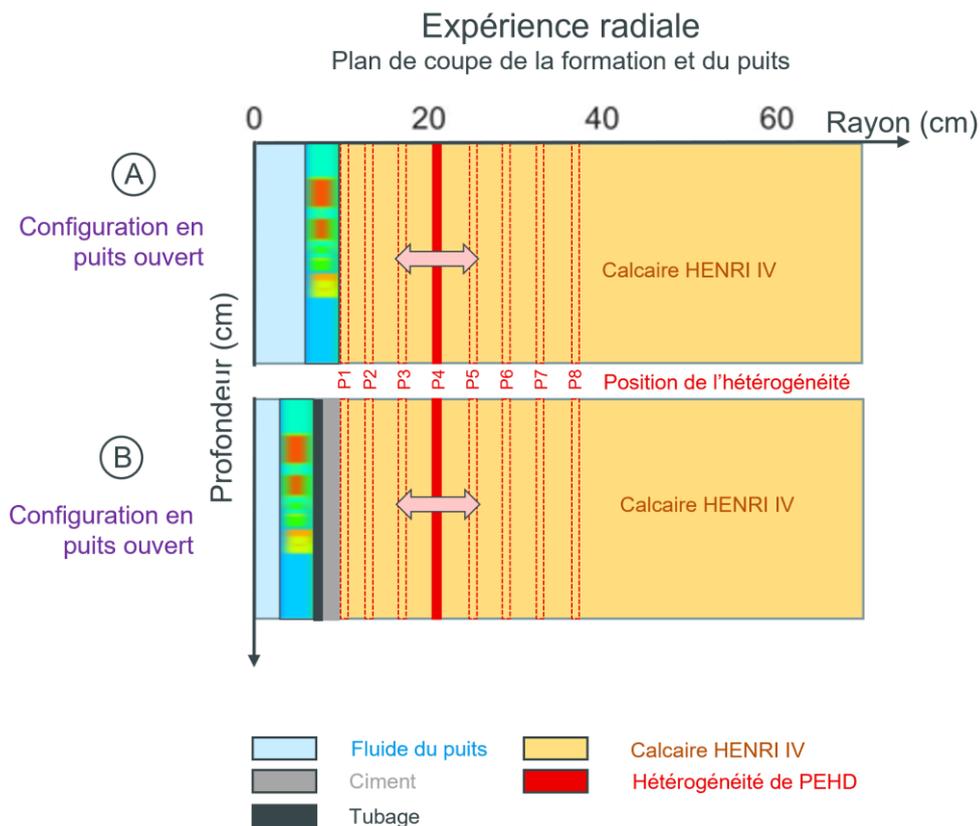


Figure 34: Schéma d'une coupe verticale dans les dispositifs expérimentaux radiaux en puits ouvert (A) et puits tubé (tubé et cimenté) (B). Les pointillés rouges représentent la position successive de l'hétérogénéité PEHD de la position P1 (la plus proche du puits) à la position P8 (la plus éloignée). Dans ces expériences, la sonde est immobile et la mesure statique (en fonction du temps), contrairement aux mesures axiales.

La Figure 35 présente les résultats de l'acquisition radiale. Le signal de référence CPS_{Ref} , correspondant à une mesure sans hétérogénéité, est toujours représenté par une ligne de base horizontale en pointillés. Contrairement aux mesures axiales précédentes qui sont continues grâce à un échantillonnage centimétrique (défilement de la sonde suivant Z), le nombre limité de positions radiales de l'hétérogénéité donne un profil radial composé seulement de 8 points et qui s'arrête à $R = 37$ cm, dernière position possible de l'hétérogénéité. Aussi, ce profil sera complété par des points simulés avec MCNP entre $R = 37$ cm et $R = 60$ cm (i.e. dans le prolongement du profil calculé avec MCNP entre 0 et 37 cm, cf. Figure 38).

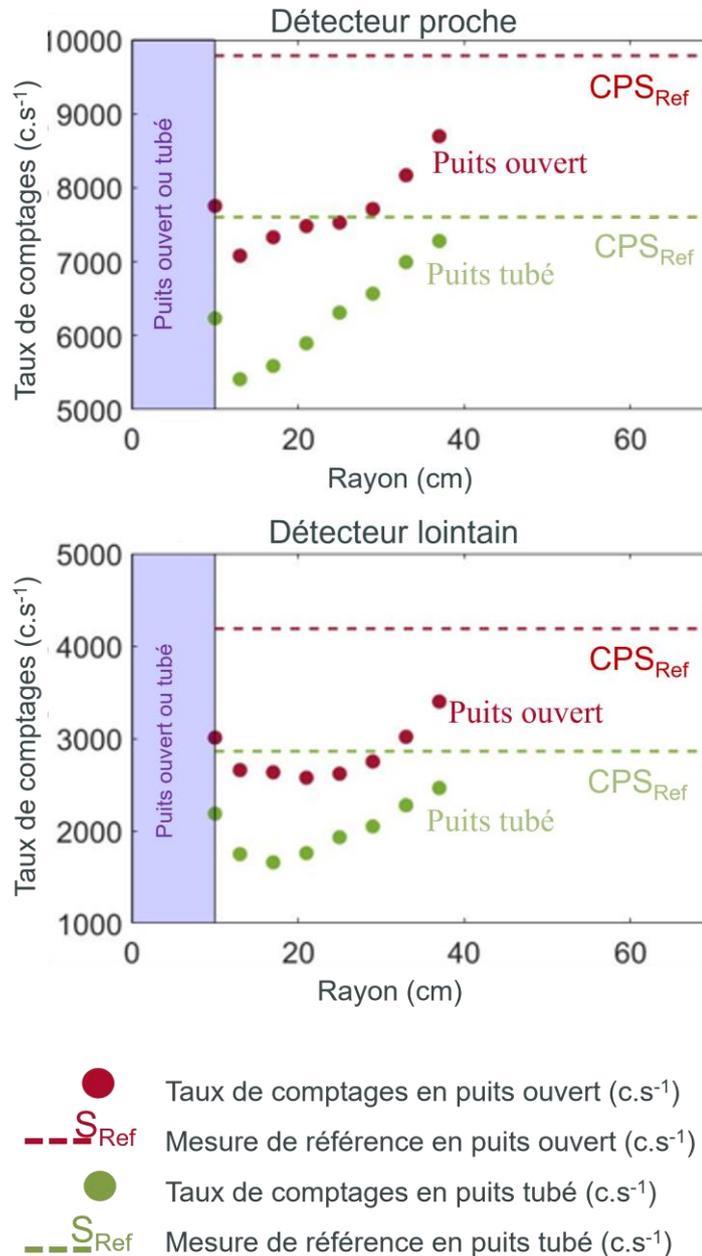


Figure 35: Résultats des acquisitions dans le dispositif radial. La durée de l'acquisition est de 5 minutes pour chaque point.

3.3 Comparaison des taux de comptages mesurés et simulés

3.3.1 Corrections des pertes électroniques

Cette partie présente la comparaison des taux de comptages obtenus par simulations Monte-Carlo des expériences de perturbation axiale et radiale avec les résultats expérimentaux de ces mesures, en vue de valider les modèles numériques des outils diagraphiques et les méthodes de calcul mises en œuvre dans MCNP et GEANT4. Cette étape est indispensable pour pouvoir utiliser avec confiance la simulation Monte-Carlo pour produire les fonctions de sensibilité dans les parties suivantes.

Les modèles numériques des expériences de perturbation axiale et radiale réalisés avec MCNP et GEANT4 ont été présentés dans la partie 3.1.4, cf. Figure 30 A. Le résultat de la simulation Monte-Carlo avec MCNP est donné en nombre de coups par particule source et par centimètre cube d' ^3He , c'est le taux de réaction volumique de la réaction de capture $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$. Ce résultat doit donc être multiplié par le volume de détection du détecteur proche ou lointain (cm^3) et par le taux d'émission neutronique de la source AmBe ($3.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$). Le résultat de la simulation Monte-Carlo avec GEANT4 est donné directement en nombre de coups (nombre de réactions $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$) pour le nombre total de particules sources tirées. Ce résultat doit donc être divisé par le nombre total de particules sources tirées dans la simulation GEANT4 et multiplié par le taux d'émission de la source AmBe.

La Figure 36 présente l'ensemble des taux de comptages mesurés dans les expériences qui ont permis d'établir les profils axiaux et radiaux de la partie 3.2, en fonction de ceux simulés avec MCNP et GEANT4, et ce pour les deux détecteurs (proche et lointain).

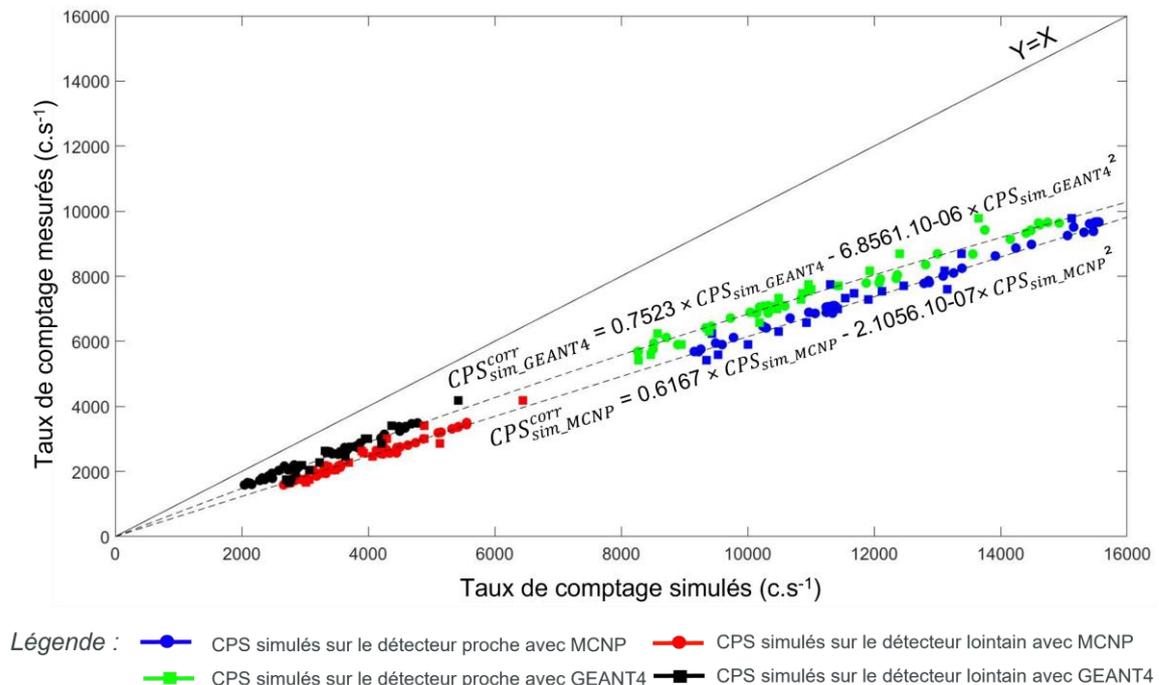


Figure 36: Comparaison des taux de comptages mesurés (axe Y) et simulés (axe X). La droite $Y=X$ est indiquée pour information et les courbes en pointillés représentent les régressions polynomiales d'ordre deux pour chaque code de transport (MCNP et GEANT4), cf. plus de détails dans le texte ci-après concernant les écarts entre ces courbes.

Dans les deux codes de transport, les effets de liaison des noyaux d'hydrogène dans les molécules d'eau et de PEHD ont été pris en compte, car ils sont significatifs dans le ralentissement des neutrons et la diffusion des neutrons thermiques (cf. la base de données ACE pour « A Compact ENDF », Conlin *et al.*, 2014; Trellue *et al.*, 2008). En effet, le transport des neutrons de faible énergie est sensible aux liaisons chimiques, à la température et aux effets moléculaires qui jouent un rôle significatif sur la valeur des sections efficaces (cf. partie 2.1.3 pour plus de détails).

Les taux de comptages obtenus par simulation sont supérieurs à ceux mesurés par la sonde en raison du seuil de coupure du bruit électronique dans le système d'acquisition, qui fait perdre une fraction du signal neutronique comprise entre quelques pourcents et jusqu'à environ 40 % (Fondement *et al.*, 2022; Fondement, 2023a) selon le type d'électronique utilisée, à collection de charges, de courant ou un compromis entre les deux, selon que l'on souhaite privilégier l'efficacité ou des impulsions courtes pour limiter les phénomènes de temps mort et d'empilements (Pérot, 1996).

Ici, on observe aussi une différence significative entre les coefficients linéaires de la régression (à faible taux de comptage) entre GEANT4 (0.75) et MCNP (0.62). Ces coefficients traduisent en partie ces pertes liées au seuil électronique, mais ils devraient être similaires, aussi leur différence montre que les taux de comptages intrinsèquement calculés avec ces deux codes diffèrent de presque 20 %. Cet écart pourrait venir de différences dans les bibliothèques de sections efficaces neutroniques utilisées par MCNP et GEANT4, voire de l'utilisation de modèles physiques pour ce dernier, ou dans leurs mises en forme spécifiques pour ces codes (interpolation des valeurs de bibliothèques évaluées par exemple). Cet écart a déjà été observé dans des travaux précédents (cf. partie 2.2.2 publiée dans Varignier *et al.*, 2023, mais aussi par Velker *et al.*, 2012).

Il est impossible de dire quel code est plus précis sur cette seule série d'expériences complexes et il faudrait réaliser une mesure de calibration dans une géométrie simple et maîtrisée, en laboratoire. Par exemple une source neutronique (AmBe ou ^{252}Cf) étalon d'émission neutronique certifiée (on ne connaît pas ici avec précision celle de l'outil de porosité) qui pourrait être mesurée par un détecteur à ^3He entouré de polyéthylène et d'une feuille de cadmium pour limiter la contribution des neutrons diffusés dans l'environnement (sol, murs, équipements à proximité, etc.), comme dans Fondement *et al.*, 2023b.

En plus des pertes de comptage liées au seuil électronique, une légère perte de linéarité est observée pour les taux de comptages les plus élevés, due au temps mort de l'électronique (incapacité à traiter une nouvelle impulsion quand une première est en cours d'analyse), ce que traduit l'ajustement par des polynômes d'ordre deux pour les fonctions en pointillés de la Figure 36. Ces polynômes seront utilisés pour corriger les taux de comptages simulés afin de pouvoir les comparer aux valeurs mesurées dans les parties suivantes, selon l'équation:

$$CPS_{sim}^{corr} = m1 \times CPS_{sim} + m2 \times CPS_{sim}^2 \quad (16)$$

CPS_{sim}^{corr} sont les taux de comptages simulés avec MCNP ou GEANT4 corrigés des pertes attendues dans l'électronique, CPS_{sim} sont ceux issus directement des simulations, $m1$ et $m2$ sont les coefficients des régressions polynomiales de la Figure 36.

3.3.2 Comparaison des profils simulés et mesurés

La Figure 37 compare les profils des taux de comptages axiaux simulés avec MCNP et GEANT4, après correction avec l'équation (16), à ceux mesurés pour 20 points allant de $Z = 2.2$ m jusqu'à $Z = 1.1$ m. L'accord global est très satisfaisant pour cette expérience axiale. On obtient une RMSE (erreur quadratique moyenne) de 175 c.s^{-1} et 125 c.s^{-1} respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur

proche et une RMSE de 107 c.s⁻¹ et 121 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur lointain avec GEANT4. On obtient une RMSE de 88 c.s⁻¹ et 131 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur proche et une RMSE de 80 c.s⁻¹ et 22 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur lointain avec MCNP.

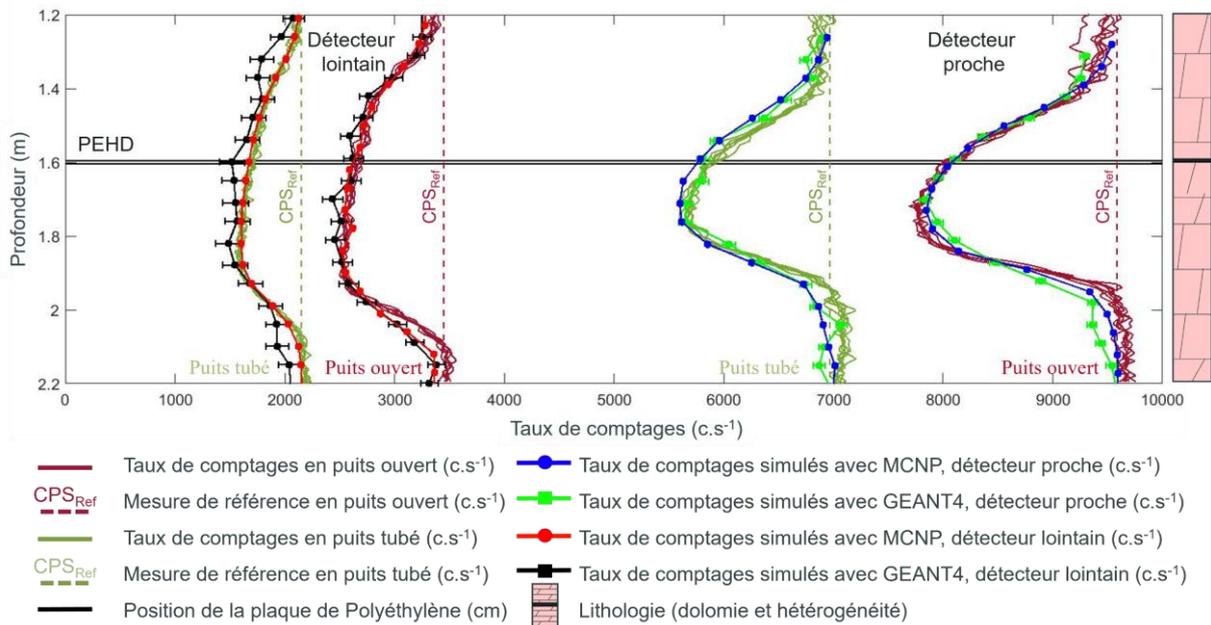


Figure 37: Comparaison entre les simulations MCNP et GEANT4 (corrigées des pertes de comptage dans l'électronique) et les mesures pour l'expérience axiale.

La Figure 38 compare les profils radiaux simulés corrigés avec l'équation (16) à ceux mesurés pour 13 points allant de $R = 10$ cm jusqu'à $R = 57$ cm. On observe des petites différences entre les simulations et les mesures pour le détecteur proche dans les premières positions de l'hétérogénéité de PEHD, à $R = 10$ cm et $R = 13$ cm. Ceci est probablement dû à la complexité et à la proximité de cette perturbation par rapport à la sonde (cf. Figure 32). L'accord global est satisfaisant pour cette expérience radiale. On obtient une RMSE (erreur quadratique moyenne) de 239 c.s⁻¹ et 528 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur proche et une RMSE de 180 c.s⁻¹ et 183 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur lointain avec GEANT4. On obtient une RMSE de 255 c.s⁻¹ et 373 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur proche et une RMSE de 186 c.s⁻¹ et 168 c.s⁻¹ respectivement en puits ouvert et tubé pour le détecteur lointain avec MCNP.

Une fois corrigés des pertes électroniques avec l'équation (16), les deux codes donnent des profils équivalents. Le bon accord global entre mesures et simulations, pour les expériences axiales comme radiales, permet de valider le modèle numérique de la sonde ainsi que les méthodes de calcul utilisées dans ces deux codes. Les NPS moyennes (*Number of Particle Source*) dans MCNP sont de $288.66e+7$ pour les expériences axiales et $100.46e+7$ pour les expériences radiales. Le nombre de NSP n'est pas constant dans MCNP car on utilise un temps de simulation fixes appelé option CTME (pour *Computed Time CutOff*). Les NPS dans GEANT4 (qui eux sont constants contrairement à MCNP) sont rigoureusement de $50.00e+7$ pour les expériences axiales et radiales. La plus forte amplitude des barres d'erreur pour GEANT4 s'explique par le plus faible nombre de NPS dans GEANT4 par rapport à MCNP, principalement en raison de la longue durée de simulation.

Pour l'expérience radiale, on note un écart plus important entre les mesures et les simulations (que pour l'expérience axiale), en particulier pour le détecteur proche. Cet écart peut être expliqué par la variabilité géométrique du dispositif expérimental. En effet le modèle numérique tend à reproduire le dispositif réel

mais en pratique certaines incertitudes que l'on peut difficilement prendre en compte. Par exemple, il existe des incertitudes sur la présence de lamelles d'air et d'eau entre les différents éléments qui sont difficile à reproduire. Celle-ci peuvent apparaître entre les plaques elles-mêmes et entre les différents éléments du puits comme le ciment et le tubage. La présence de ces lamelles est amplifiée par le grand nombre de manipulations des plaques de roches calcaires, nécessaire à la réalisation de l'expérience radiale. Toutes ces manipulations changent, à chaque fois, légèrement l'organisation globale de l'ensemble. Le modèle numérique reproduit l'expérience au mieux, sans tenir compte très précisément des erreurs de positionnement des plaques de roches calcaires et des lamelles qui peuvent apparaître.

Il s'ajoute à cela une certitude sur le positionnement de la sonde dans le puits (puits ouvert) ou dans le tubage (puits tubé). Ceci modifie légèrement l'orientation de la sonde par rapport aux plaques (e.g. de quelques degrés sur la droite ou sur la gauche par rapport à un référentiel centré face à l'expérience). Ce décalage peut modifier le taux de comptages attendu (i.e. celui obtenu avec les simulations).

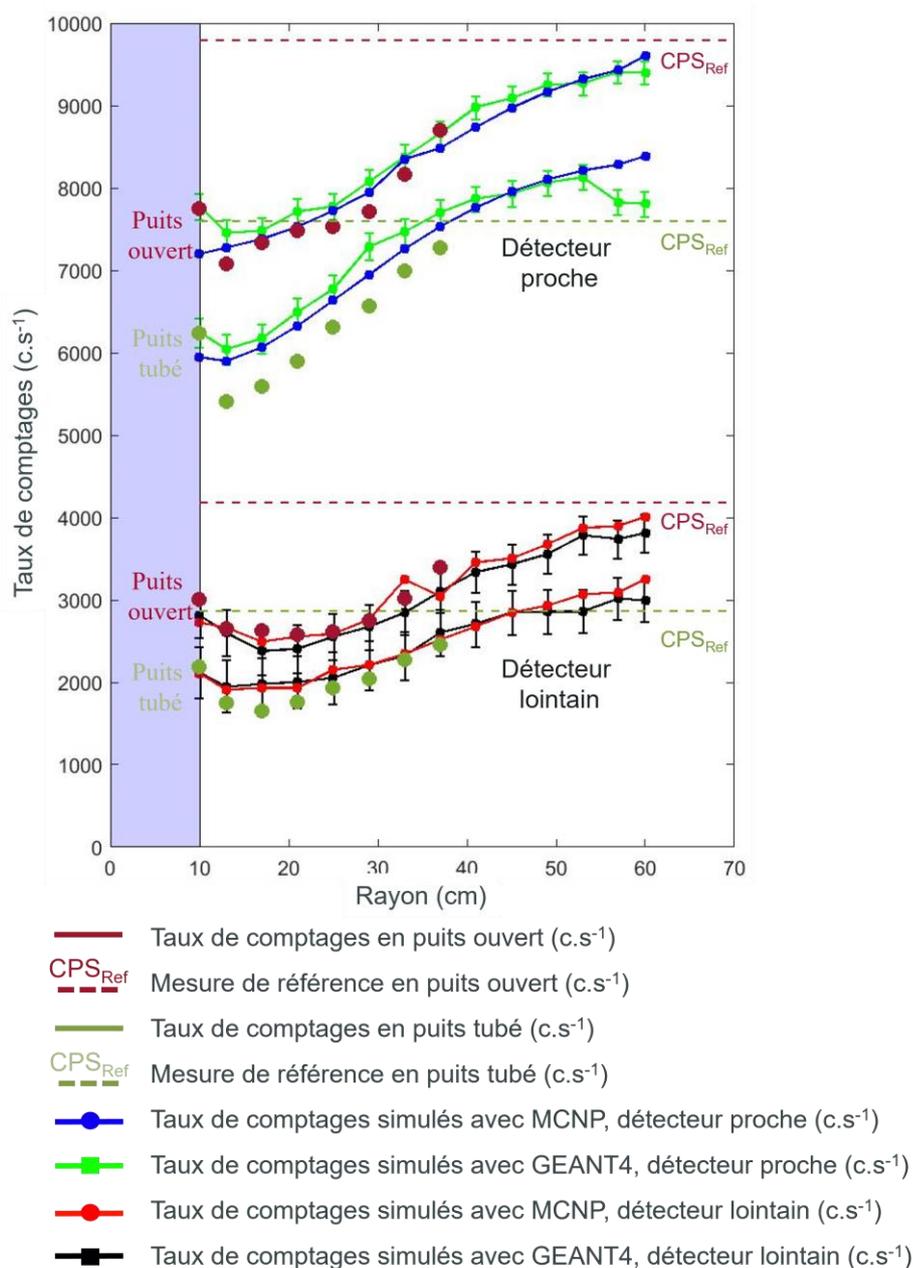


Figure 38: Comparaison entre les simulations MCNP et GEANT4 (corrigées des pertes de comptage dans l'électronique) et les mesures pour l'expérience radiale.

3.4 Validation expérimentale de la fonction de sensibilité d'un outil de porosité

3.4.1 Comparaison des méthodes de calcul des fonctions de sensibilité

Avant la comparaison avec l'expérience, nous comparons ici les fonctions de sensibilité calculées avec deux méthodes différentes, le suivi de particule (PT pour *Particle Tracking*) avec GEANT4 et les fenêtres de poids avec MCNP (WW pour *Weight Window*, cf. chapitre 1). La Figure 39 présente la projection 2D (axiales et radiales) des fonctions de sensibilité 3D, ISF_{PT} (*Interaction Sensitivity Functions*) calculées avec GEANT4, $FSF_{PT\text{ ou }WW}$ (*Flux Sensitivity Functions*) calculées avec GEANT4 (PT) et MCNP (WW), pour le détecteur lointain dans un cas de puits ouvert de 200 mm de diamètre interne. La sensibilité est affichée ici uniquement dans la formation rocheuse, mais les calculs Monte-Carlo permettant d'obtenir ces fonctions de sensibilité (cf. Figure 39) sont réalisés dans un modèle numérique de puits ouvert comprenant la formation, le puits et la sonde.

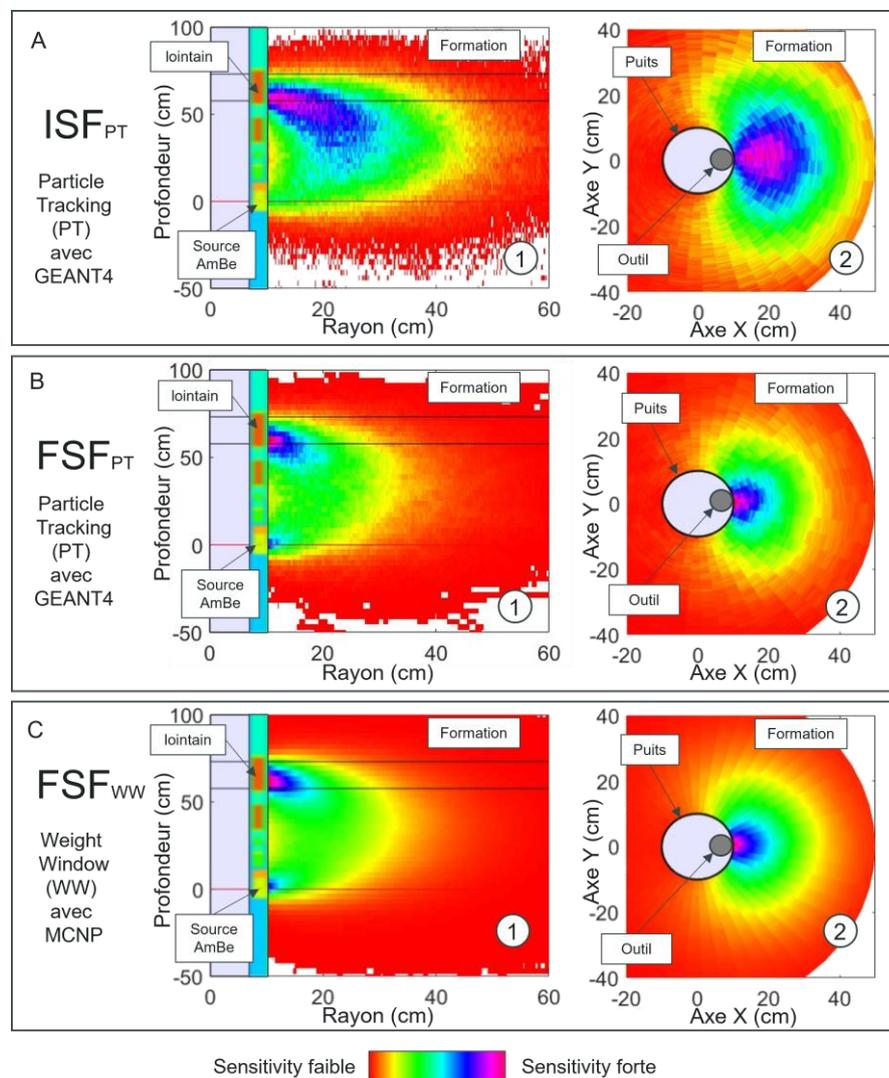


Figure 39: Projections 2D des fonctions de sensibilité 3D calculées pour le détecteur lointain (intégrales sur l'angle Ω pour les projections 2D verticales 1, 3 et 5; intégrales sur Z les projections 2D radiales (ou horizontales) 2, 4 et 6). Pour les projections 2D verticales (1, 3 et 5), la ligne horizontale rouge en $Z = 0$ cm indique la position de la source AmBe et les deux lignes noires sont les limites supérieure et inférieure du détecteur lointain.

Qualitativement, les FSF du détecteur lointain calculées avec les deux méthodes (PT et WW) sont similaires (cf. Figure 39 B et C), avec un lobe de sensibilité entre la source AmBe et le détecteur sur la projection 2D axiale. Le maximum de sensibilité localisé à la base du détecteur traduit le fait que le flux de neutrons contribuant au signal est le plus important dans cette zone, mais on peut aussi noter une petite zone secondaire de forte sensibilité à proximité de la source de neutrons. La projection 2D radiale (ou horizontale), qui intègre la sensibilité le long de l'outil, montre quant à elle, un maximum près de la sonde.

La ISF_{PT} (cf. Figure 39 A) montre une distribution spatiale très différente des fonctions FSF (cf. Figure 39 B et C), avec une zone de sensibilité de plus grande étendue, aussi bien sur la projection 2D axiale que la projection 2D radiale (ou horizontale). La contribution des mailles proches de la source est aussi moins importante (pas de zone secondaire de forte sensibilité). Ceci s'explique par le fait que les neutrons mesurés interagissent peu au voisinage de leur lieu d'émission où ils sont encore rapides, cependant ils laissent une trace lors de leur passage dans les mailles au voisinage de la source et contribuent au calcul du flux. La ISF_{PT} est estimée par le nombre d'interactions dans les mailles, tandis que le flux (FSF_{PT} ou FSF_{WW}) est estimé avec les traces des particules, qu'elles aient interagi ou pas.

Dans la littérature, les algorithmes de FFM sont utilisés pour prédire des diagraphies (taux de comptages ou porosité) en conditions de puits ouvert (UTAPWeLS, 2020). La sensibilité dans le puits est soit complètement retirée de la matrice 3D (comme c'est le cas en Figure 39), soit conservée, mais mise à zéro. Ainsi, la zone puits ne contribue pas au calcul du paramètre Fp (cf. l'équation 18). Cela permet d'obtenir une fonction sensibilité qui dépend uniquement de la formation rocheuse (Mendoza *et al.*, 2007), ce qui signifie qu'un changement de taux de comptages mesuré sur l'un des deux détecteurs de l'outil neutron-neutron de porosité, résulte d'un changement des propriétés pétrophysiques de la formation rocheuse uniquement. Les propriétés pétrophysiques du puits et de la sonde sont considérées comme constantes tout au long de l'acquisition diagraphique.

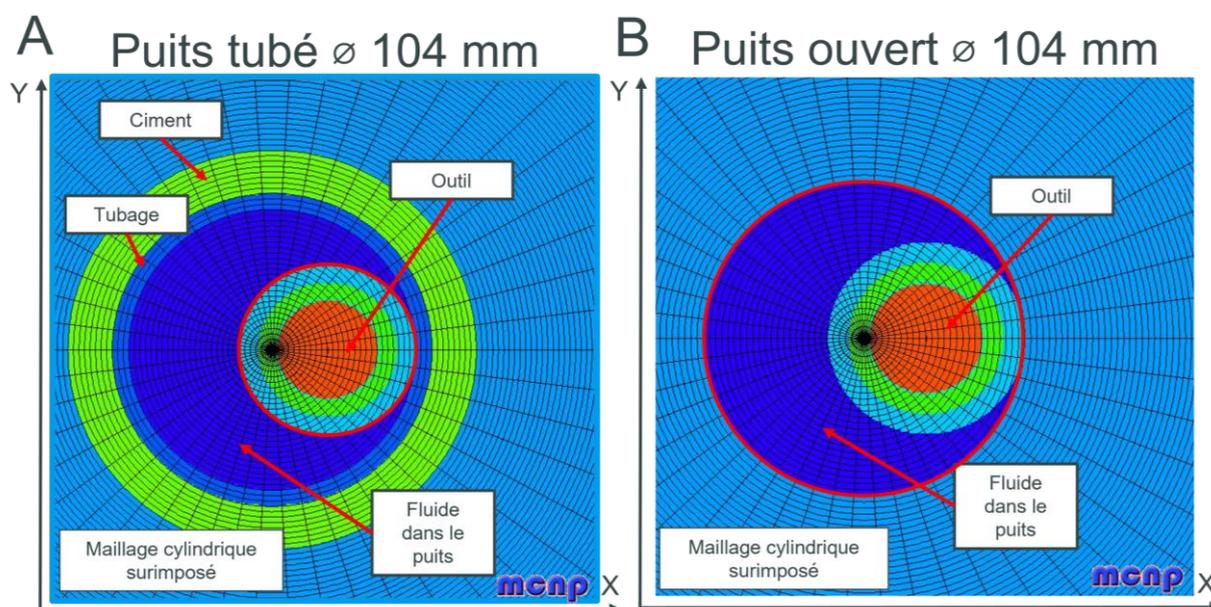


Figure 40: Vue détaillée du maillage cylindrique d'un puits tubé en A, avec un tubage en acier de diamètre interne 104 mm et d'épaisseur 6 mm et un ciment d'épaisseur 16 mm et d'un puits ouvert en B de diamètre interne 104 mm.

Dans le cadre de l'extension des algorithmes de FFM à l'environnement de puits tubé, objet de ce travail de thèse, il devient nécessaire de tenir compte de la sensibilité contenue dans le puits pour le calcul du paramètre Fp. Dans un puits tubé, un changement de taux de comptages mesuré au détecteur résulte

soit d'un changement des propriétés pétrophysiques de la formation rocheuse comme en puits ouvert, soit d'un changement de l'architecture ou des propriétés du puits: salinité du fluide, épaisseur du ciment, qualité de la cimentation, etc.

Cependant, comme le flux de neutrons contribuant au signal est très important dans la sonde elle-même, (cf. Figure 41 C), cette très grande sensibilité apporterait, si elle n'était pas mise à zéro (comme précédemment le puits l'était en configuration ouverte), une forte réduction du contraste entre les autres éléments du modèle (cf. Figure 45) et par suite de la qualité des prédictions diagrammiques.

La méthode du WW ne permet cependant pas, lors du calcul de la FSF_{WW} , de mettre à zéro la sensibilité de la sonde uniquement (comme c'était le cas pour l'ensemble du puits ouvert cf. Figure 41 A). En effet, certaines mailles utilisées pour le calcul des fenêtres d'importance WW, surimposées au modèle du puits tubé et de l'outil, sont à cheval entre le fluide et la sonde (cf. Figure 40 B, cercle en rouge gras). La méthode PT permet, elle, lors du calcul des fonctions FSF_{PT} et ISF_{PT} , de mettre à zéro la sensibilité contenue dans la sonde. En pratique, les interactions des particules ou le flux de neutron dans la sonde ne sont pas comptabilisés. La Figure 41 présente des fonctions FSF_{PT} et ISF_{PT} avec et sans la contribution de la sonde. On peut souligner que cette mise à zéro de la sensibilité dans la sonde est faite en post-traitement après la simulation Monte-Carlo, mais l'outil reste bien décrit dans ces simulations avec GEANT4.

La Figure 41 concerne un environnement de puits tubé avec un tubage de 200 mm de diamètre interne et 6 mm d'épaisseur et un ciment de 16 mm d'épaisseur. Elle prend en compte cette fois-ci la sensibilité dans la formation rocheuse et aussi dans le puits. La sensibilité contenue dans la sonde est volontairement mise à zéro (cf. Figure 41 A et B1) pour rehausser la sensibilité dans le reste du modèle sauf pour la FSF_{WW} (C) où cela n'est pas possible avec MCNP et à titre de comparaison avec la FSF_{PT} (B2).

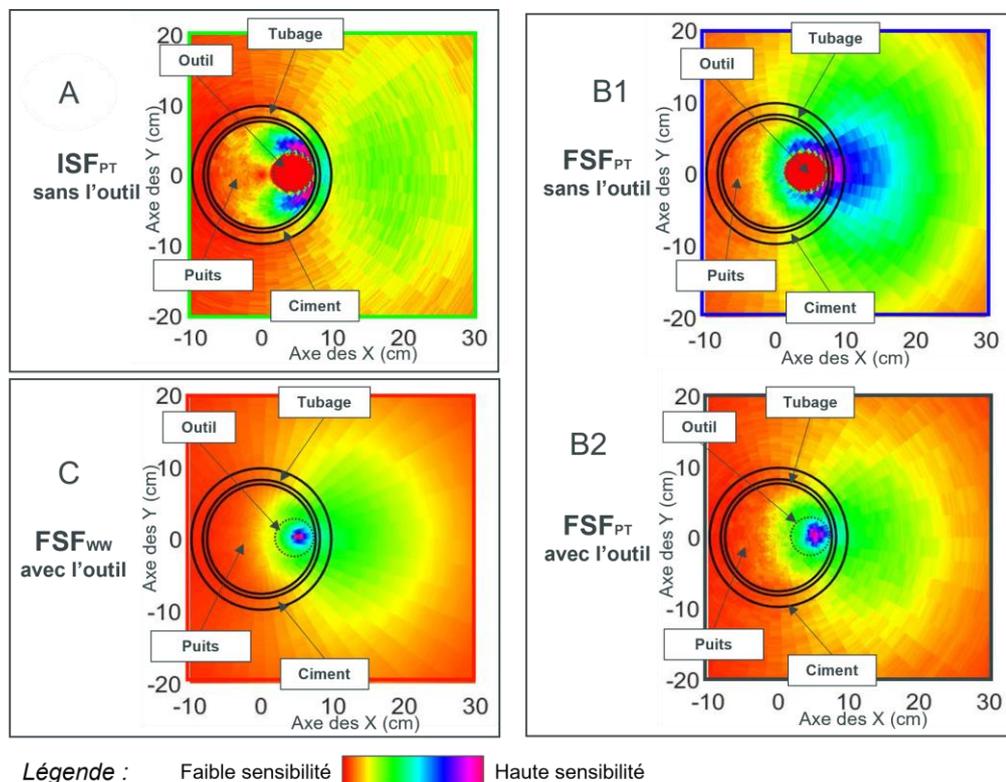


Figure 41: Projections 2D radiale (ou horizontale) des fonctions de sensibilité 3D (ISF ou FSF calculées avec les méthodes PT ou WW) en configuration de puits tubé obtenues par intégration suivant l'axe Z (profondeur), montrant la sensibilité dans le puits avec (C et B2) ou sans (A et B1) la prise en compte de la sensibilité dans la sonde diagrammique.

Par comparaison qualitative, les FSF calculées avec la méthode PT (GEANT4) ou WW (MCNP), respectivement B2 et C, sont très proches même quand la sonde n'est pas retirée de la sensibilité du puits tubé, comme déjà observé en Figure 39 B et C en puits ouvert, mais le contraste de sensibilité est meilleur dans l'environnement de puits et dans la formation quand la sonde est occultée (A et B1).

3.4.2 Validation expérimentale du concept de fonction de sensibilité

Les variations axiales et radiales des taux de comptages mesurés présentées en Figure 33 et Figure 35, sont les réponses de l'outil à une perturbation fine (i.e. la plaques de PEHD) et sont comparées dans cette partie aux profils 1D de sensibilité de flux qui sont issues des calculs avec MCNP et GEANT4. En vue de cette comparaison, les 8 acquisitions statiques du profil radial sont complétées par 5 simulations MCNP pour construire un profil radial complet.

Mendoza *et al.*, 2010a définissent une relation permettant de lier un changement relatif du taux de comptages mesuré au détecteur $\frac{|CPS_{Ref} - CPS_{perturbé}|}{CPS_{Ref}}$ avec une variation relative des propriétés pétrophysiques entre un milieu initial et un milieu perturbé, $\frac{\Sigma_{initial} - \Sigma_{perturbé}}{\Sigma_{initial}}$, convoluée en 3D par la FSF dans chaque maille. Σ correspond ici à une grandeur représentative du transport neutronique comme la section efficace macroscopique de diffusion (élastique et inélastique en cm^{-1}) ou la longueur de migration (en cm).

$\Sigma_{initial}$ est une matrice 3D de même taille que la FSF et représente le milieu initial (i.e. la formation rocheuse de type calcaire homogène). $\Sigma_{perturbé}$ est la matrice 3D du milieu perturbé (i.e. la formation rocheuse avec une plaque de PEHD). $|CPS_{Ref} - CPS_{perturbé}|$ est l'écart entre le taux de comptages mesuré au détecteur dans le milieu perturbé ($CPS_{perturbé}$) avec l'hétérogénéité et le milieu initial non perturbé (CPS_{Ref}) pour une position radiale ou axiale.

Le ratio $\frac{|CPS_{Ref} - CPS_{perturbé}|}{CPS_{Ref}}$ pour les différents points de mesure (axiaux ou radiaux) définit le profil 1D de sensibilité qui est mesuré:

$$Profil_{norm}^{radial \text{ ou } axial} = \frac{|CPS_{Ref} - CPS_{perturbé}|}{CPS_{Ref}} \quad (17)$$

La Figure 42 compare les FSF 1D axiale et radiale du détecteur lointain, calculées avec les deux méthodes de calcul PT et WW, avec ces profils 1D de sensibilité qui sont mesurés, toujours normalisés selon l'équation (12). Pour obtenir les FSF 1D calculées, les FSF 3D sont intégrées soit sur l'axe R et sur l'angle Ω pour FSF(Z), soit sur l'axe Z et sur l'angle Ω pour FSF(R), puis normalisées avec l'équation (12).

Sur les profils axiaux (cf. Figure 42 C et D), la sensibilité est importante au voisinage du détecteur et de la source, en puits ouvert comme tubé. Un bon accord global est observé entre profils calculés et mesurés. On observe néanmoins une forme légèrement plus « arrondie » des profils axiaux mesurés entre 0 et 50 cm de profondeur par rapport aux calculs, probablement due à la différence intrinsèque entre les fonctions de sensibilité calculées (fonctions 3D de sensibilité de flux calculées dans un milieu homogène) et la réalité des mesures expérimentales (réponse de la sonde à un passage devant une plaque de PEHD de 1 cm d'épaisseur).

Les écarts maximums entre expérience et calcul se situent vers le haut du détecteur lointain car c'est une région de forte variation de la sensibilité et le front est un peu plus bas dans les mesures que dans les calculs. Il pourrait s'agir d'un petit décalage géométrique de quelques centimètres entre le modèle numérique et la réalité, car l'amplitude du front est quant à elle correctement reproduite par les calculs.

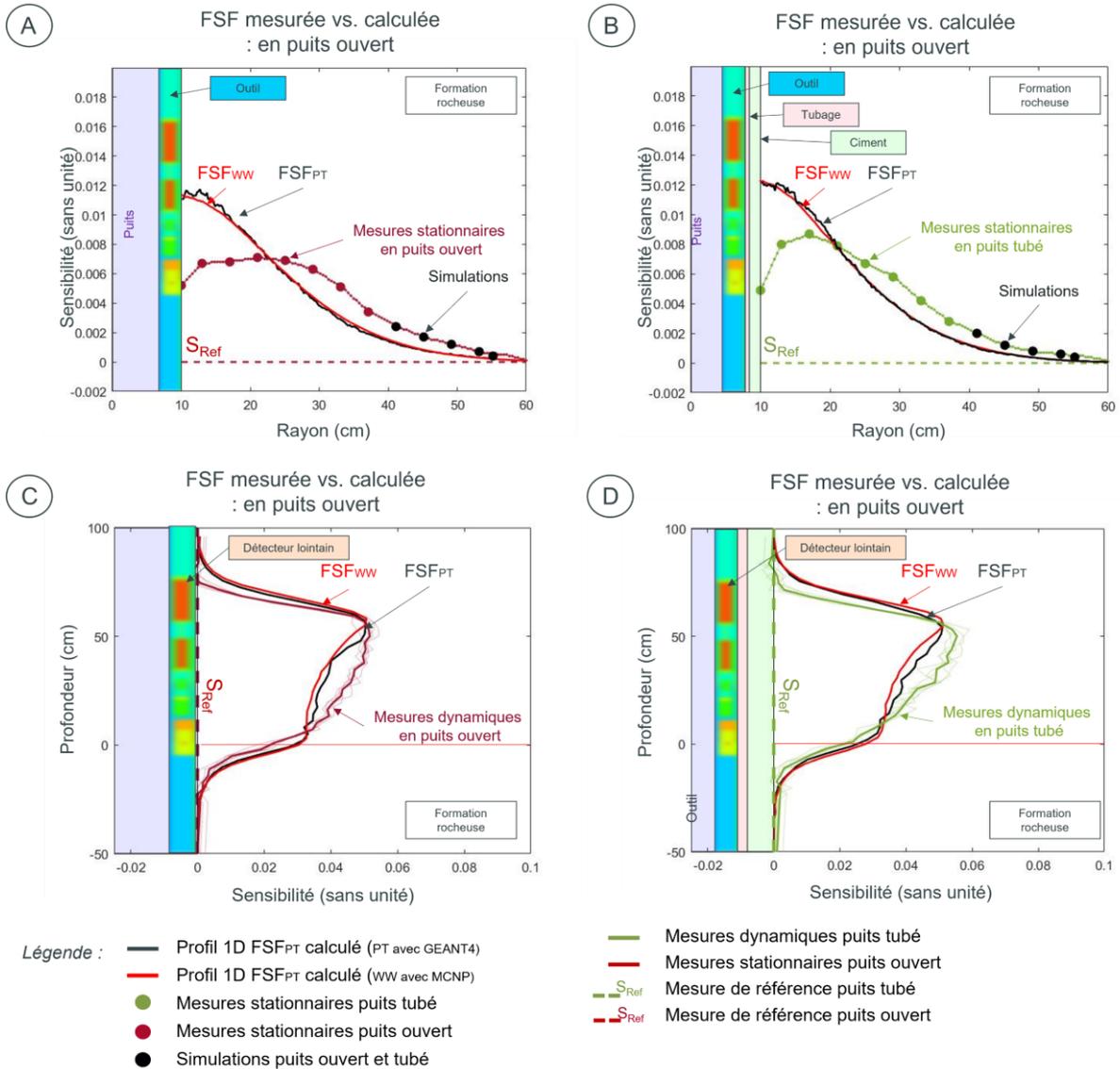


Figure 42: Comparaison pour le détecteur lointain des profils 1D de sensibilité qui ont été mesurés et des FSF 1D calculées. Pour C et D, la ligne horizontale rouge est la position de la source AmBe.

Sur les profils radiaux (cf. Figure 42 A et B), les calculs décroissent en s'éloignant de la sonde, mais pas les mesures qui dessinent une forme en « cloche » sur les premiers points. Les profils mesurés et calculés sont clairement différents contrairement au cas axial. Ces différences pourraient s'expliquer par le fait que l'hétérogénéité n'a pas le même volume dans l'expérience radiale en fonction du rayon, contrairement à l'expérience axiale où la sonde défilait devant une seule et même plaque. Pour l'expérience radiale, le volume de l'hétérogénéité de PEHD augmente quasi linéairement avec le rayon (i.e. avec son éloignement du centre du puits, cf. Figure 32 b et c) car la plaque a toujours la même épaisseur de 1 cm, et par suite la quantité d'hydrogène augmente.

On se propose donc de tester une pondération par le volume de l'hétérogénéité, en utilisant les ratios de la dernière ligne du Tableau 8 pour calculer les profils mesurés radiaux: $\frac{Profil_{norm}^{radial}}{Volume_{ratio}}$.

Tableau 8: Valeurs de pondération par le volume de PEHD des profils 1D mesurés dans l'expérience radiale.

	Mesures								Simulations				
Position de l'hétérogénéité	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Volume (cm ³)	3709	4700	6163	7771	9372	11136	12947	14644	16402	18246	19971	21719	23546
Ratio de volume avec P1	1.00	1.27	1.66	2.10	2.53	3.00	3.49	3.95	4.42	4.92	5.38	5.86	6.35

La Figure 43 compare les FSF(R) issues des simulations avec ces profils 1D mesurés dans l'expérience radiale, pondérés par le volume de l'hétérogénéité. L'accord est alors très bon en puits ouvert et nettement meilleur en puits tubé, l'écart maximum entre expérience et calcul étant observé au niveau du premier point R = 10 cm, probablement en raison de la géométrie complexe de l'hétérogénéité sur ce premier point et des différences intrinsèques évoquées ci-dessus entre fonctions de sensibilité calculées par simulation dans un milieu homogène et profils mesuré avec une plaque de PEHD.

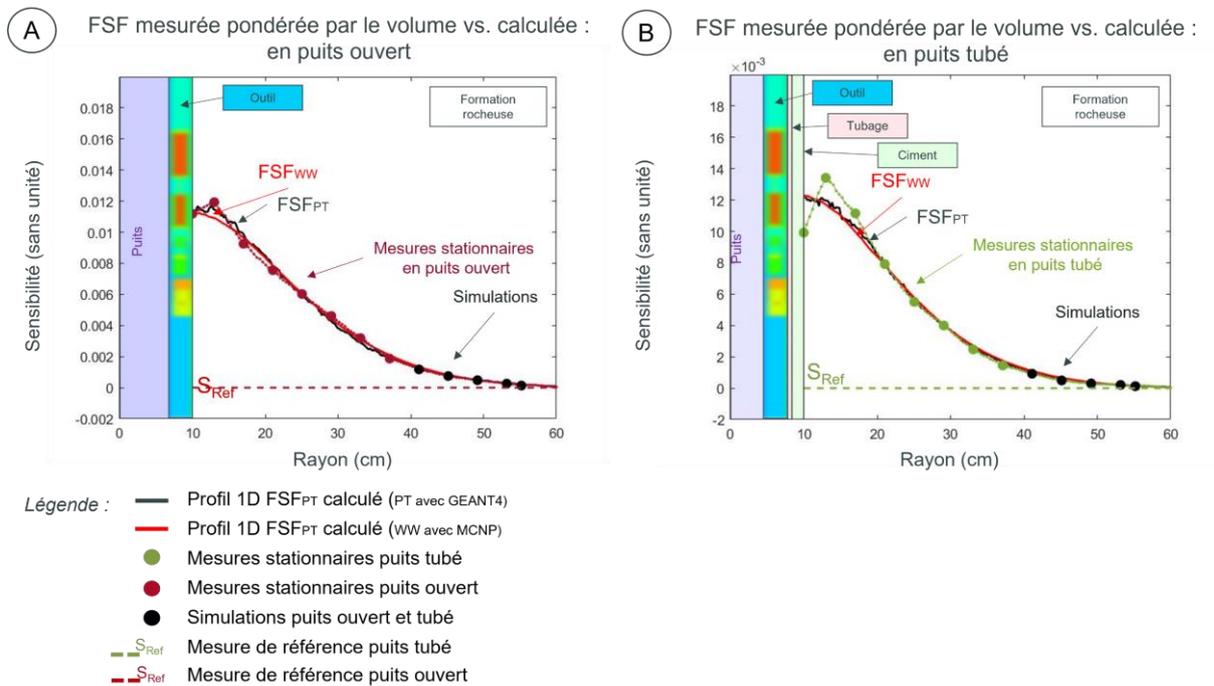


Figure 43: Comparaison pour le détecteur lointain des profils 1D de sensibilité qui ont été mesurés puis pondérés par le volume de l'hétérogénéité et les FSF 1D calculés.

3.5 Prédiction rapide des diagraphies de porosité

3.5.1 Sélection de la fonction de sensibilité adaptée aux puits tubés

Avant de confronter les prédictions aux mesures, cette partie vise d'une part, à sélectionner la méthode de calcul la plus pertinente pour la construction de fonction sensibilité destinée la prédiction rapide de diagraphie en environnement de puits tubé entre *Particle Tracking* (PT) et *Weight Window* (WW). Et d'autre part, à sélectionner le type de fonction de sensibilité le plus adapté à la prédiction rapide de diagraphie en environnement de puits tubé entre celle basée sur les interactions (ISF_{PT}) ou le flux (FSF_{PT} ou FSF_{WW}).

On rappelle que les ISF et FSF sont liées par l'équation (15). La Figure 44 présente des profils 1D de sensibilité selon les axes R (cf. Figure 44 C) ou Z (cf. Figure 44 B) ainsi que les projections 2D (cf. Figure 44 A) suivant XY pour un cas de puits avec tubage en acier d'épaisseur 6 mm et de diamètre externe 104 mm, suivi d'une épaisseur de ciment de 16 mm, pour un diamètre total du puits de 148 mm. La contribution de la sonde est mise à zéro (zone en rouge sur les projections 2D).

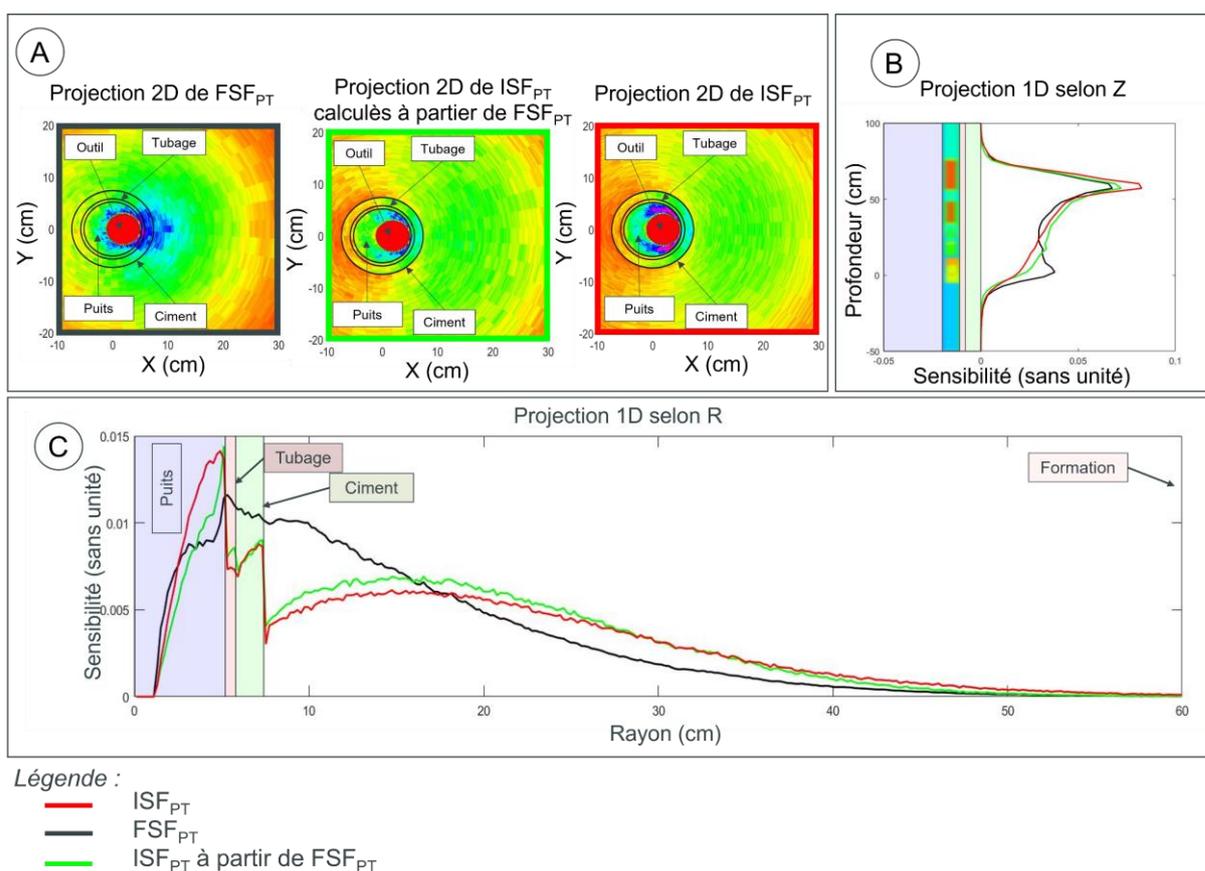


Figure 44: Comparaison 1D et 2D des FSF_{PT} et ISF_{PT} obtenues directement avec GEANT4 et la méthode du suivi de particule ou recalculée en post traitement à partir de FSF_{PT}.

Pour reconstruire la ISF à partir de la FSF, il a été calculé, dans chaque maille, une énergie moyenne avant interaction des neutrons qui y ont fait une réaction (uniquement pour les neutrons qui sont ensuite mesurés au détecteur). A partir de cette valeur d'énergie moyenne, une section efficace macroscopique de diffusion (élastique et inélastique) a été déduite pour chaque maille à partir de la base de données

ENDF/B-VIII.0 (Brown *et al.*, 2018), qui dépend du matériau contenu dans la maille (tubage, eau, ciment ou roche). Puis, avec l'équation (15), la ISF (courbe verte) est calculée à partir de la FSF (courbe en noir) et comparée à la vraie ISF initialement simulée avec GEANT4 (courbe rouge). L'accord est bon entre ces deux ISF, même si des différences sont observables dans le puits et dans la formation du fait de la simplification du calcul avec une énergie moyenne et la section efficace associée, car en toute rigueur, comme signalé dans la partie 3.1.3 au niveau de l'équation (15), il faudrait intégrer en fonction de l'énergie des neutrons le produit du flux (FSF) et de la section efficace (Σ), tous deux dépendants de cette énergie.

La Figure 45 montre les profils 1D de sensibilité radiale calculés avec les méthodes PT et WW pour une ISF_{PT} et deux FSF (PT et WW), pour un puits avec tubage en acier d'épaisseur 6 mm et de diamètre externe 104 mm, suivi d'une épaisseur de ciment de 36 mm, pour un diamètre total du puits de 188 mm.

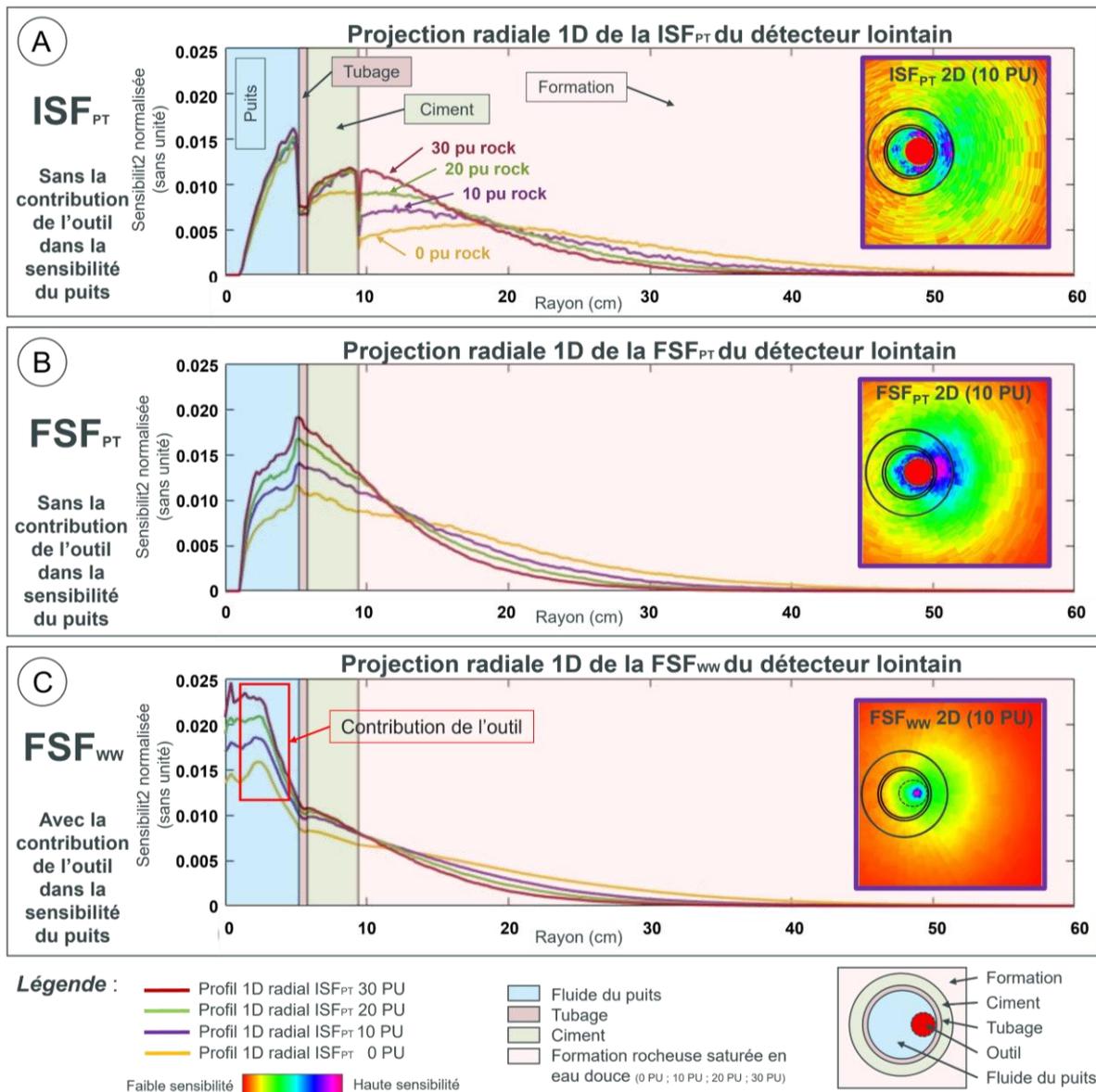


Figure 45: Profils radiaux 1D de sensibilité d'une ISF_{PT}, d'une FSF_{PT} et d'une FSF_{WW} pour le détecteur lointain d'une sonde de porosité hydrogène neutron-neutron et quatre porosités de formation rocheuse (0 PU, 10 PU, 20 PU et 30 PU). La contribution de la sonde est retirée en A et B, mais pas en C car le calcul WW de MCNP ne permet pas de le faire. Les projections 2D insérées sur la droite correspondent au cas de formation rocheuse à 10 PU.

On note que la sensibilité est nulle sur les premiers centimètres (cf. Figure 45 A et B) parce que nous avons mis à zéro la sensibilité contenue dans la sonde pour FSF_{PT} et ISF_{PT} (cf. maillage surimposé dans la Figure 40). Le rayon interne du tubage (52 mm) étant inférieur au diamètre de la sonde de porosité hydrogène neutron-neutron (62 mm), retirer la contribution de la sonde entraîne une sensibilité nulle au centre du puits (toutes les mailles du centre sont mises à zéro), plus précisément entre $R = 0$ et 1 cm.

La Figure 45 montre que retirer la contribution de la sonde sur FSF a pour effet de maximiser la sensibilité dans le tubage, le ciment et la formation rocheuse (meilleur contraste aux variations de porosité en Figure 45 B vs. C). On observe par ailleurs un comportement très différent entre la ISF_{PT} et la FSF_{PT} (cf. Figure 45 A vs. B) près de l'outil, car le flux des neutrons détectés croît jusqu'à la sonde alors que leur nombre d'interactions chute dans le ciment et le tubage en acier. On note aussi que la ISF_{PT} est sensible aux variations de porosité essentiellement dans la formation rocheuse, alors que la FSF_{PT} dépend de la porosité jusque dans le tubage le ciment et le puits. De plus comme, comme nous verrons plus tard, les régressions et prédictions sont meilleures avec la ISF_{PT} qu'avec la FSF_{WW} (cf. Figure 46 et Figure 48), nous choisissons donc d'utiliser la ISF_{PT} en mettant à zéro la sensibilité contenue dans la sonde pour prédire des diagraphies en environnement de puits tubé.

3.5.2 Modèles de prédiction rapide des diagraphies de porosité hydrogène neutron-neutron

Cette dernière partie du chapitre 3 présente le paramétrage des algorithmes de prédiction rapide ou de FFM (*Fast Forward Modeling*) et la validation de leur capacité à prédire des diagraphies de porosité, en configuration de puits ouvert et tubé.

La ISF_{PT} est multipliée (avec un produit d'Hadamard termes à termes) par des modèles numériques de terrain 3D (de même dimension que la ISF_{PT}) notés EM (pour *Earth Model*) contenant des grandeurs caractéristiques des propriétés de transport neutronique comme la longueur de ralentissement des neutrons rapides L_s (s pour *slowing down*), la longueur de diffusion des neutrons thermiques L_d (d pour *diffusion*) et la masse volumique ρ_b (b pour *bulk*). Les grandeurs L_s , L_d et ρ_b sont calculées avec le logiciel UTNuPro à partir des informations connues sur le milieu géologique et les composants du puits (Montgomery *et al.*, 2016). La somme du produit d'Hadamard de l'équation (15) conduit à des longueurs de ralentissement, ou de façon similaire à des longueurs de diffusion apparentes et à des masses volumiques apparentes ($L_{s\text{apparent}}$, $L_{d\text{apparent}}$ et $\rho_{b\text{apparent}}$) qui peuvent être considérées comme des moyennes pondérées (par la ISF_{PT}) des propriétés physiques intrinsèques contenues dans chaque maille des trois EM (i.e. le EM contenant des valeurs de L_s , le EM contenant des valeurs de L_d et le EM contenant des valeurs de ρ_b).

$$L_{s\text{apparent}} = \sum_{j=1}^N EM_Ls^j \times ISF_{PT}^j \quad (18)$$

$L_{s\text{apparent}}$ (cm) est la longueur de ralentissement apparente. ISF_{PT}^j (sans dimension) est la valeur de sensibilité contenue la maille j de la fonction de sensibilité des interactions 3D appelée ISF_{PT} qui est normalisée selon l'équation (12). EM_Ls^j (cm) est la longueur de ralentissement intrinsèque contenue la maille j du modèle numérique de terrain EM_Ls (i.e. la matrice 3D contenant les valeurs de L_s intrinsèques pour le puits et la formation rocheuse pour un puits ouvert et le puits, le tubage, le ciment et la formation rocheuse pour un puits tubé). Pour calculer $L_{d\text{apparent}}$ ou $\rho_{b\text{apparent}}$ on utilise les modèles de terrain numériques EM_Ld^j ou EM_pb^j dans l'équation (18).

Ijisan *et al.*, 2011 et 2013a introduisent le concept de paramètre de formation composite F_p pour prédire les diagraphies de porosité en puits ouvert avec les algorithmes de FFM et l'amélioration présentée ici est son extension à l'environnement d'un puits tubé. Les algorithmes de FFM reposent sur la relation entre les données physiques apparentes $L_{s\text{apparent}}$, $L_{d\text{apparent}}$ et $\rho_{b\text{apparent}}$ (obtenues avec la ISF_{PT} calculée avec GEANT4) et le taux de comptages (calculé avec MCNP) pour un grand nombre de configurations de puits (qui correspond à la bibliothèque d'étalonnage). Les données physiques apparentes sont combinées dans un paramètre de formation composite noté F_p (cm^{-1}) défini dans l'équation (19):

$$F_p = \frac{m_2}{\sqrt{L_{s\text{apparent}} + m_1 \times L_{d\text{apparent}}}} + m_3 * p_{b\text{apparent}} \quad (19)$$

m_1 , m_2 (sans dimension) et m_3 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) sont des coefficients d'étalonnage ajusté par régression, comme nous allons le voir ci-après. Un polynôme de degré deux permet ensuite de relier F_p et le logarithme des taux de comptages prédits par les algorithmes de FFM, CPS_{pred} , selon l'équation (20):

$$\log(CPS_{\text{pred}}) = m_4 \times F_p^2 + m_5 \times F_p + m_6 \quad (20)$$

m_4 (cm^{-2}), m_5 et m_6 (sans dimension) sont les coefficients des régressions polynômiales montrées en Figure 46. Les six coefficients (m_1 à m_6) sont obtenus par minimisation (avec la fonction Matlab, *fminunc*) des écarts entre CPS_{pred} (i.e. les taux de comptages obtenus avec l'équation(20)) et CPS_{corr} qui sont les taux de comptages simulés avec MCNP (pour l'ensemble des cas contenus dans la bibliothèque d'étalonnage, cf. Figure 47) et corrigés des pertes électroniques grâce à l'équation (16). Ainsi les algorithmes de FFM prédisent avec l'équation (20) des taux de comptages (noté CPS_{pred}) qui sont comparables à ceux mesurés expérimentalement.

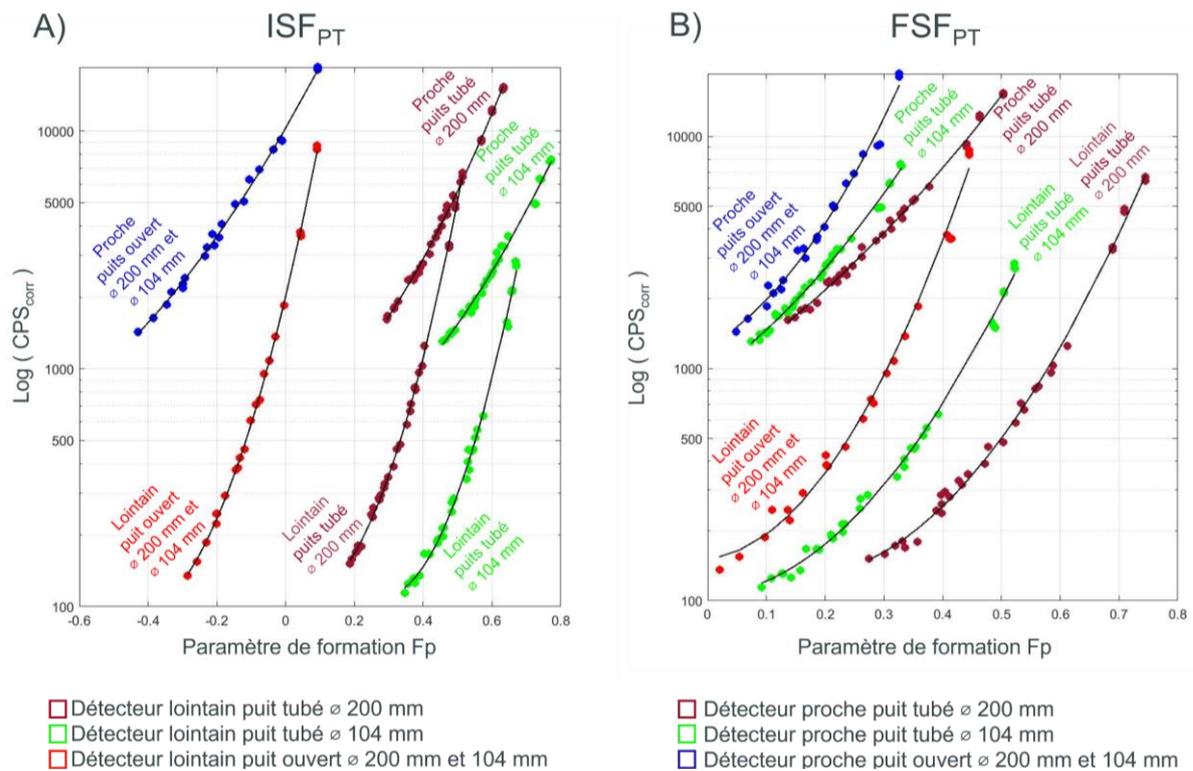


Figure 46: Régressions polynômiales d'ordre deux liant le paramètre de formation composite F_p obtenus avec les ISF_{PT} ou les FSF_{PT} (grâce à l'équation (19) vu précédemment), et les CPS_{corr} simulés avec MCNP et corrigés des pertes de comptage selon l'équation (16).

La Figure 46 montre les régressions polynomiales d'ordre deux reliant les CPS_{cor} simulés et corrigés grâce à l'équation (16) au paramètre de formation composite Fp pour différentes architectures de puits ouverts et tubés avec différents diamètres internes (noté \varnothing dans la Figure 46) avec les ISF_{PT} (en A) et FSF_{PT} (en B). Les régressions polynomiales d'ordre deux obtenues avec les FSF_{PT} (cf. Figure 46 B), moins bonnes que celles obtenues avec les ISF_{PT} , sont présentées à titre de comparaison pour justifier l'utilisation des interactions plutôt que du flux en environnement de puits tubés.

Pour établir ces fonctions de régressions polynomiales d'ordre deux aussi appelées fonctions d'étalonnage (cf. Figure 46), un grand nombre de formations géologiques homogènes et de configurations de puits ont été simulées. Pour chaque ISF_{PT} calculée avec GEANT4 (bibliothèque de fonctions de sensibilité), un taux de comptages (en $c.s^{-1}$) est calculé avec MCNP, constituant la bibliothèque d'étalonnage (cf. Figure 47). Pour ces calculs, les modèles numériques (architectures de puits et formations géologiques) sont identiques dans MCNP (simulations des taux de comptages) et dans GEANT4 (calculs des ISF_{PT}). L'ensemble des cas de cette bibliothèque d'étalonnage sont calculés à partir des 8 architectures de puits de la Figure 47, dont 2 ouverts (diamètres internes 104 et 200 mm) et 6 tubés avec une épaisseur de 6 mm d'acier (diamètres internes de tubage 104 et 200 mm) et un ciment d'épaisseur 0, 16 ou 36 mm.

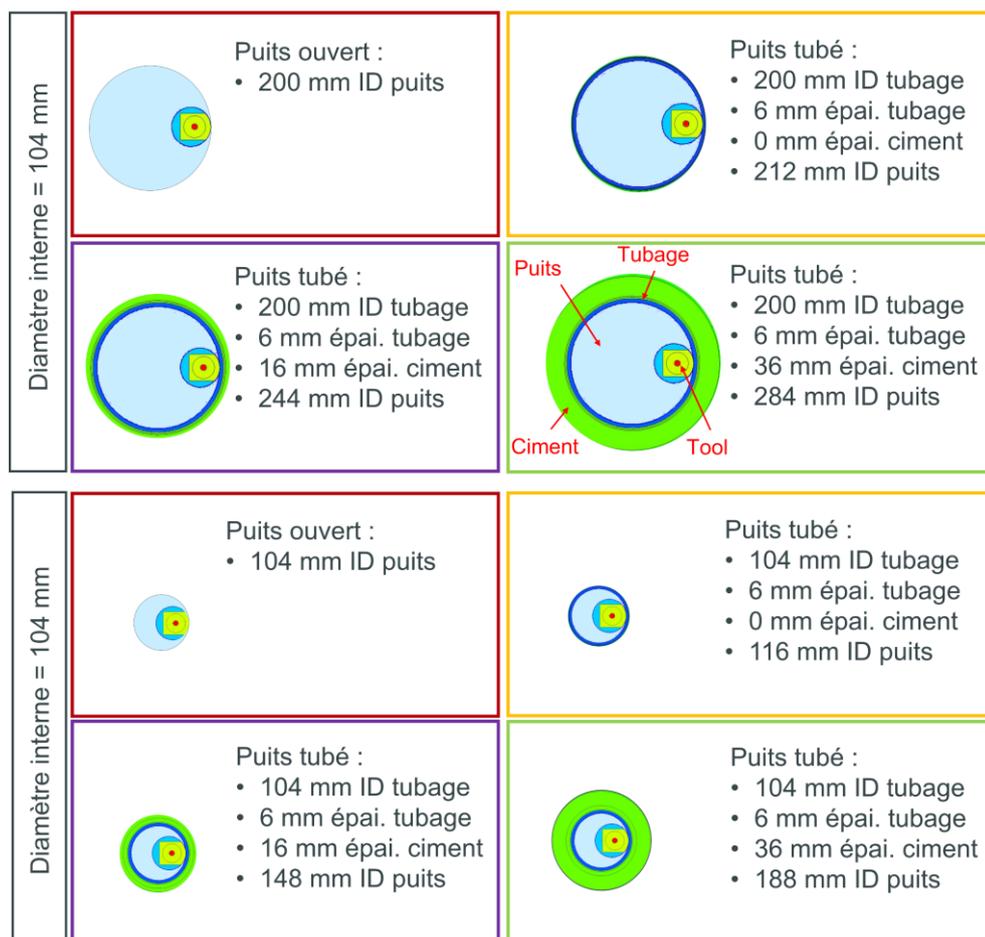


Figure 47: Architectures de puits utilisées dans la construction de la bibliothèque de fonctions de sensibilité, avec deux diamètres de forage (\varnothing 104 et \varnothing 200 mm), une épaisseur de tubage (6 mm) et trois épaisseurs de ciment (0, 16 et 32 mm). On utilise « épai. » pour épaisseur, « ID » pour diamètre interne (Inner Diameter) et « OD » pour diamètre externe (Outer Diameter). Ici la formation rocheuse est tronquée à l'affichage, seulement la partie puits est représentée. Mais les modèles MCNP et GEANT4 contiennent bien la formation rocheuse lors des simulations Monte-Carlo

Pour chacune des 8 configurations de puits, une lithologie calcaire CaCO_3 homogène et totalement saturée en fluide ($S_w=1$) a été utilisée, avec 4 porosités (0, 10, 20, 30 PU) et 3 salinités de fluide (0, 100 et 200 kppm NaCl). On effectue donc, par détecteur (proche et lointain), 96 calculs de fonction ISF_{PT} avec GEANT4 et 96 calculs de taux de comptages avec MCNP (que l'on corrige avec l'équation (16) pour avoir des taux de comptages corrigés notés CPS_{corr}) afin de bâtir les courbes d'étalonnage de la Figure 46, pour les détecteurs proche et lointain. On note que les cas de puits tubé de diamètres internes 104 et 200 mm (cf. Figure 46, points marron et verts respectivement) ont été séparés lors de l'étalonnage pour obtenir de meilleurs résultats de prédiction des diagraphies de porosité, mais cette séparation n'est pas nécessaire en puits ouvert.

L'équation (18), l'équation (19) et l'équation (20) sont implémentées dans les algorithmes de FFM pour faire des prédictions rapides de diagraphies. De manière générale, dans le cadre d'une prédiction rapide de diagraphie, les algorithmes de FFM vont chercher (dans la bibliothèque d'étalonnage) la ISF_{PT} la plus pertinente. En d'autres termes, ils vont chercher la ISF_{PT} la plus représentative de la sensibilité de l'outil pour un EM donné bâti par l'utilisateur.

Ainsi, le EM de puits et de formation rocheuse bâti par l'utilisateur, n'est pas rigoureusement le même que celui qui a été utilisé dans les simulations Monte-Carlo dans GEANT4 pour calculer la ISF_{PT} , sélectionnée par les algorithmes de FFM (sauf si l'utilisateur cherche à prédire rigoureusement la réponse de l'outil dans EM déjà présent dans la bibliothèque d'étalonnage).

Ici, dans le cadre de la création du modèle prédictif, l'ensemble des EM de puits et de formation rocheuse utilisés pour créer les fonctions d'étalonnages (cf. Figure 46), sont rigoureusement les mêmes que ceux qui ont servi à calculer avec des simulations Monte-Carlo dans GEANT4, la ISF_{PT} (cf. Figure 47).

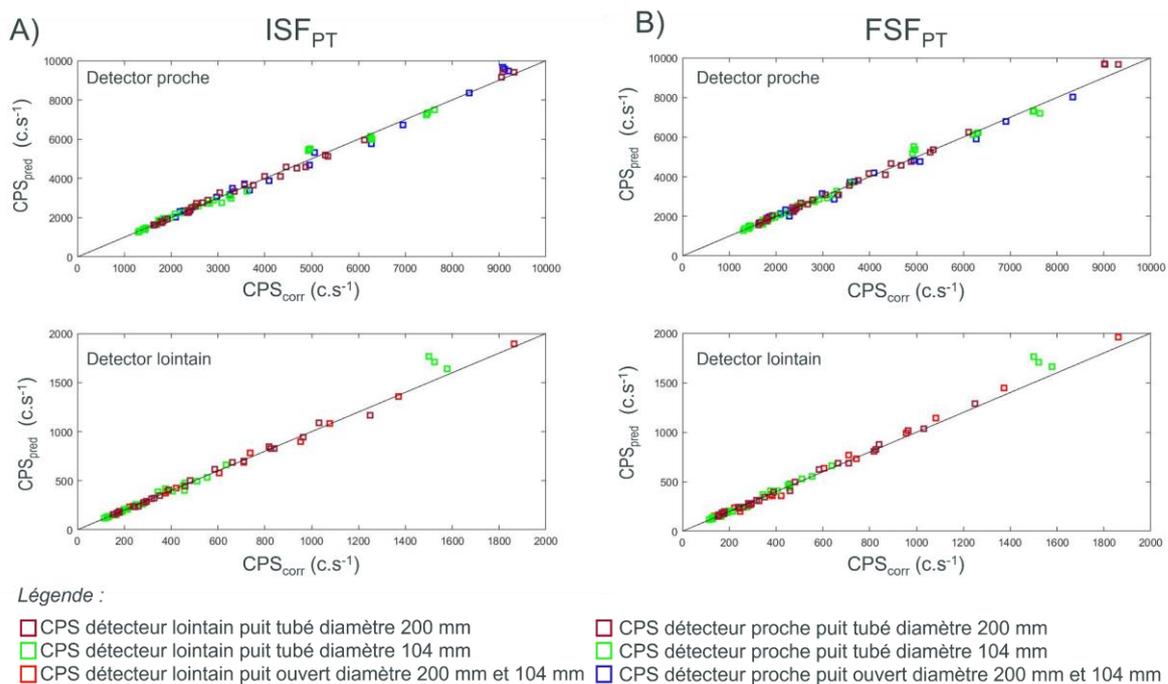


Figure 48: Évaluation du modèle de prédiction des algorithmes de FFM par comparaison des taux de comptages prédits CPS_{pred} et de ceux simulés avec MCNP puis corrigés des pertes de comptage CPS_{corr} .

Les diagraphies de porosité prédites (cf. Figure 50) sont obtenues avec les 6 fonctions d'étalonnage de la Figure 46 et avec des coefficients m_1 à m_6 uniques pour chaque géométrie d'outil, dépendant fortement des cas de base présents dans la bibliothèque. Étendre la bibliothèque à de nouveaux cas (comme un diamètre intermédiaire de 152 mm) aurait pour effet de changer les coefficients d'étalonnage obtenus via

une nouvelle optimisation pour les puits ouverts, et de générer de nouvelles courbes de régression pour les puits tubés.

La Figure 48 A et B présente l'accord entre les taux de comptages prédits (notés CPS_{pred}) respectivement avec les ISF_{PT} et les FSF_{PT} et ceux simulés avec MCNP et corrigés des pertes électroniques grâce à l'équation (16) (notés CPS_{cor}), pour l'ensemble des cas de la bibliothèque d'étalonnage (cf. Figure 46). Sur la Figure 48 on voit que l'accord est meilleur avec la ISF_{PT} qu'avec la FSF_{PT} . Ceci est visible par la dispersions des points et confirmé par les RMSE qui donnent, pour la ISF_{PT} , 97 $c.s^{-1}$ pour le détecteur lointain et 208 $c.s^{-1}$ pour le détecteur proche et pour la FSF_{PT} , 228 $c.s^{-1}$ pour le détecteur lointain et 389 $c.s^{-1}$ pour le détecteur proche.

La dernière étape est la prédiction de la grandeur physique recherchée, ici l'index de porosité hydrogène PHI pour cet outil neutron-neutron, à partir des taux de comptages prédits précédemment CPS_{pred} . La Figure 49 présente la fonction d'étalonnage reliant le taux de comptages mesuré par le détecteur proche ou lointain à la porosité intrinsèque de la roche. Les deux détecteurs 3He mesurent un signal décroissant avec la porosité de la roche en raison de l'augmentation de la concentration en noyaux d'hydrogène dans l'environnement proche de la sonde.

Cependant, l'outil est également sensible à l'hydrogène présent en dehors des pores de la formation, comme celui éventuellement présent dans la matrice cristalline elle-même, mais aussi dans les fluides du puits, le tubage, le ciment. Au 2^{ème} ordre, il est aussi sensible aux autres éléments (C, Ca, O, Mg, Si, etc.) de la formation rocheuse. Il s'agit donc d'une mesure de porosité apparente. Par exemple, en environnement de puits tubé, le tubage en acier et le ciment diffusent, ralentissent et absorbent les neutrons, ce qui a pour effet de faire chuter le taux de comptages des détecteurs, entraînant une porosité apparente plus importante que la porosité intrinsèque de la roche, cf. Figure 50.

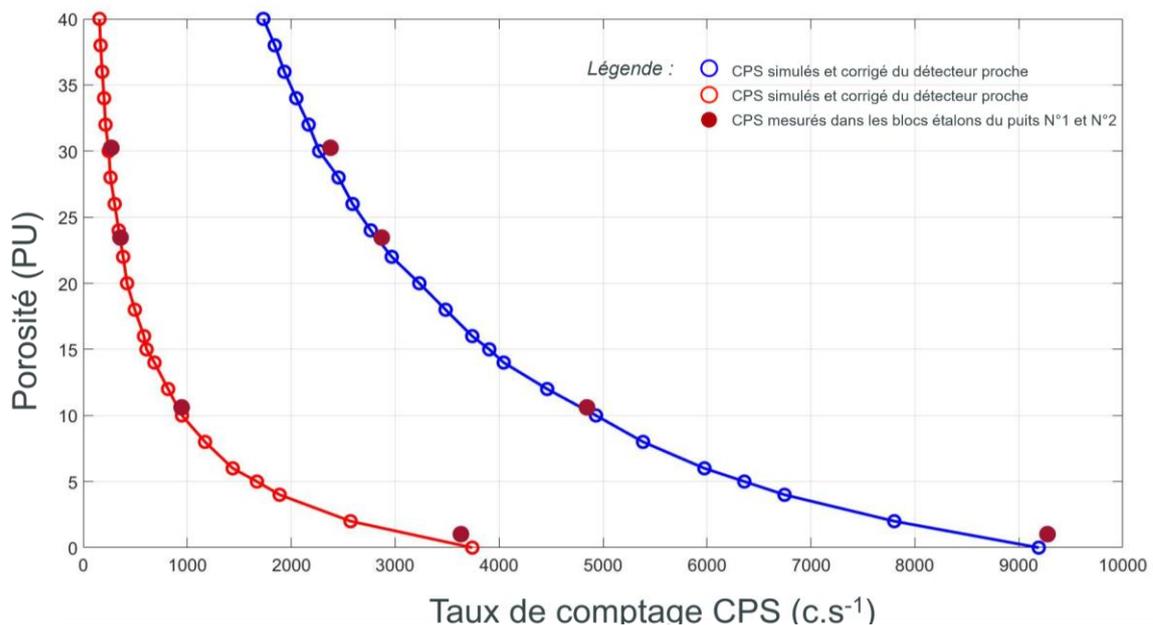


Figure 49: Courbes d'étalonnage pour une formation calcaire et un puits ouvert de diamètre 200 mm, donnant la porosité en fonction des taux de comptages des détecteurs proche et lointain.

Avant de la commenter en détail, il est utile de noter qu'en vue de l'inversion multi-physique qui sera implémentée à la suite de cette thèse, il ne faut pas chercher à corriger cette porosité apparente (avec des corrections d'environnement classiques) car l'inconnue n'est pas uniquement la porosité de la formation rocheuse, mais aussi la structure du puits (e.g. épaisseur de ciment, fluide dans le puits, masse volumique du ciment, etc.). L'inversion multi-physique va donc comparer les mesures de porosité

apparente avec les prédictions des algorithmes de FFM, afin de chercher parmi la base d'étalonnage numérique une configuration d'environnement minimisant les écarts entre les prédictions et les mesures, qui sera *a priori* la plus représentative de l'environnement réel de puits.

La Figure 50 compare les prédictions des algorithmes de FFM aux mesures réalisées en centre d'étalonnage. Les blocs étalons utilisés pour l'étalonnage des sondes sont des faciès calcaires très purs en calcaire (CaCO_3) sélectionnés pour leur homogénéité en termes de porosité et de composition chimique. On dispose d'un faciès appelé LUNEL de porosité 1.02 PU (orange foncé), d'un autre appelé VILHONNEUR CLASSIQUE de 10.6 PU (orange clair), d'un troisième appelé $\frac{1}{2}$ FERME DE CAEN de 23.46 PU (bleu clair) et enfin d'un dernier faciès appelé ESTAILLADES de 30.25 PU (bleu foncé).

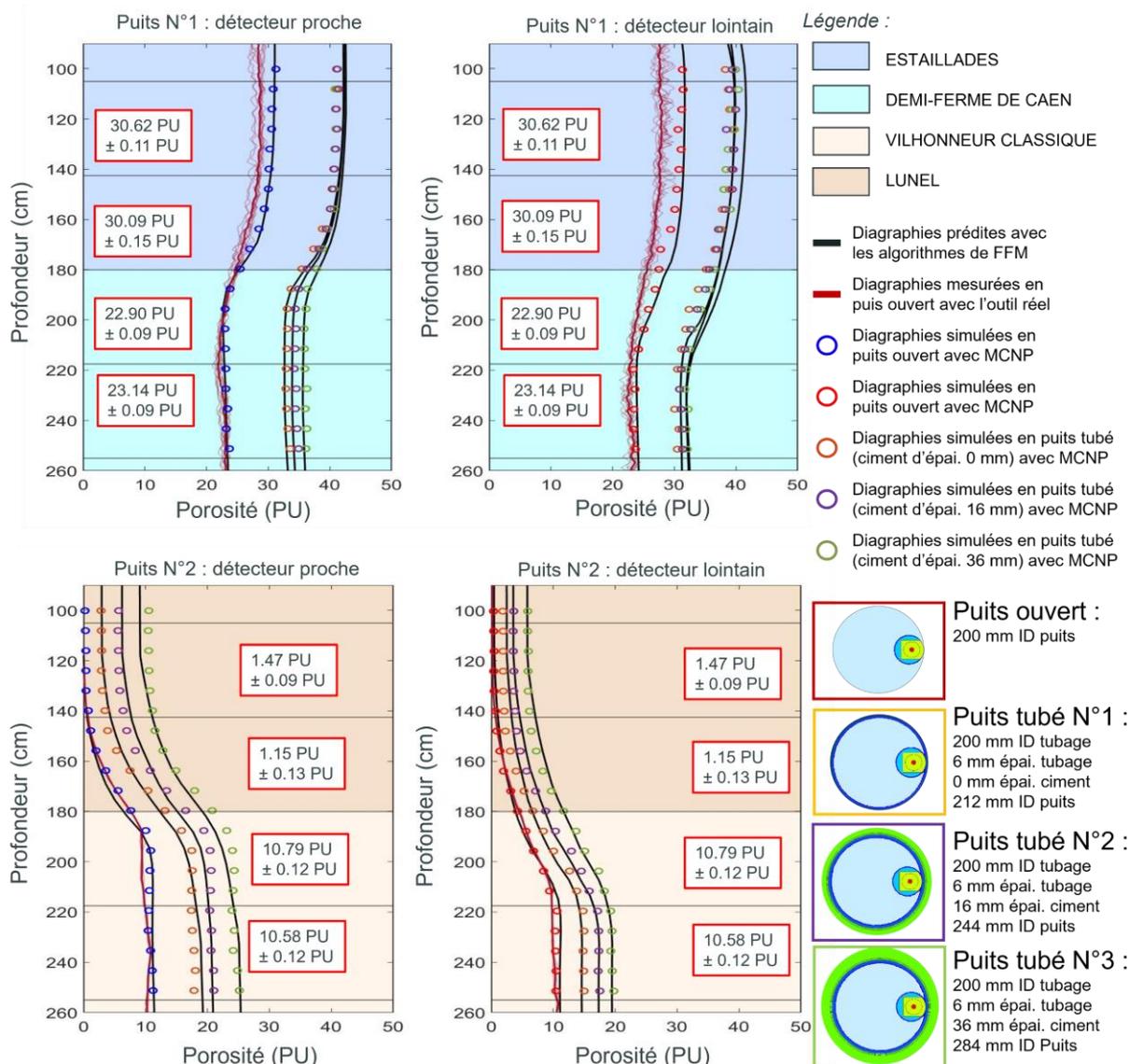


Figure 50: Prédiction des diagraphies de porosité hydrogène obtenues avec les détecteurs proche et lointain pour une configuration en puits ouvert et trois configurations en puits tubé, dans les blocs étalons N°1 et N°2. Les valeurs de porosité intrinsèque de chaque bloc, mesurées en laboratoire, sont indiquées dans les encadrés rouges avec les incertitudes associées.

Les blocs étalons sont forés au centre par un puits de 200 mm de diamètre et saturés en eau douce. Ils sont de forme hexagonale et de largeur 150 cm, ce qui permet de les considérer comme quasi-infinis radialement pour les sondes diagraphiques nucléaires. Le puits est rempli d'eau douce. Les étalons se

composent de quatre blocs de 37.5 cm d'épaisseur chacun. Chaque étalon mesure donc 150 cm de hauteur (4 x 37.5 cm), ce qui permet aussi de les considérer comme infinis selon Z.

Le puits N°1 se compose de l'étalon ESTAILLADES sur l'étalon CAEN et le puits N°2 de l'étalon LUNEL sur l'étalon VILHONNEUR. Connaissant précisément leurs porosités intrinsèques, ces étalons ont pour but de valider la capacité des algorithmes de FFM à prédire des diagraphies de porosité à partir des taux de comptages mesurés expérimentalement (sur les détecteurs proche et lointains) en puits ouvert, ou les biais induits sur cette porosité apparente mesurée en configuration de puits tubé. Pour chaque bloc étalon, dans l'encadré rouge, il est précisé la valeur de porosité intrinsèque mesurée en laboratoire sur des carottages et l'incertitude associée.

Tableau 9: Tableau des RMSE correspondant aux diagraphies de porosité hydrogène prédites, mesurées et simulées avec MCNP, pour des cas en puits ouvert et en puits tubé.

	RMSE du détecteur proche puits 2			RMSE du détecteur lointain puits 2		
	Prédictions vs. MCNP (PU)	Prédictions vs. mesures (PU)	MCNP vs. mesures (PU)	Prédictions vs. MCNP (PU)	Prédictions vs. mesures (PU)	MCNP vs. mesures (PU)
Ouvert	0.6052	0.7809	0.5686	0.4677	0.6324	0.3046
Tubé 00mm	0.9612	-	-	0.7377	-	-
Tubé 16mm	0.9599	-	-	0.5628	-	-
Tubé 36mm	0.8950	-	-	0.6473	-	-

	RMSE du détecteur proche puits 1			RMSE du détecteur lointain puits 1		
	Prédictions vs. MCNP (PU)	Prédictions vs. mesures (PU)	MCNP vs. mesures (PU)	Prédictions vs. MCNP (PU)	Prédictions vs. mesures (PU)	MCNP vs. mesures (PU)
Ouvert	0.3233	1.3377	1.1480	0.8758	2.8542	2.1715
Tubé 00mm	1.0504	-	-	1.5006	-	-
Tubé 16mm	0.9983	-	-	2.4189	-	-
Tubé 36mm	1.2688	-	-	1.0801	-	-

En puits ouvert, les prédictions rapides (courbes en noir) sont en bon accord avec les mesures (courbes en marron), les taux de comptages de ces dernières étant converties en porosité avec les courbes étalons de la Figure 49. Les écarts les plus importants sont observés pour le faciès ESTAILLADES de porosité 30 PU (RMSE « mesures vs. prédictions rapide » maximum égale à 2.85 PU dans le puits N°1 pour le détecteur lointain, cf. Tableau 9), pour lequel la sensibilité à forte porosité (au-delà de 20 PU) devient très faible comme on peut le voir sur sa courbe d'étalonnage en Figure 49.

En puits tubé, les mesures ne sont pas effectuées dans un puits idéalisé avec une cimentation symétrique (cf. Figure 30 A vs. B). Par conséquent, les prédictions rapides en puits tubé (cf. courbes en noir) sont comparées seulement aux simulations MCNP (corrigée grâce à l'équation (16)) et pas aux mesures.

En puits ouvert, les simulations MCNP (ronds bleus pour le détecteur proche et rouges pour le détecteur lointain) sont en bon accord avec les prédictions rapides (courbes noires) avec une RMSE « mesures vs. MCNP » maximum égale à 0.87 PU dans le puits N°1 pour le détecteur lointain, cf. Tableau 9. Les simulations MCNP sont aussi en bon accord avec les mesures (courbes rouges), avec une RMSE « mesures vs. MCNP » maximum égale à 2.17 PU pour le puits N°1, cf. Tableau 9.

En puits tubé, les simulations MCNP (ronds orange, violets et verts, ici on utilise les mêmes couleurs pour les deux détecteurs) sont également en bon accord avec les prédictions (courbes noires), avec une RMSE « mesures vs. MCNP » maximum égale à 2.41 PU pour le puits N°1, cf. Tableau 9.

On remarque au-delà de 30 PU (partie haute du puits N1), en particulier pour le détecteur lointain, une dégradation de la qualité de la prédiction. La plus forte RMSE entre les simulations MCNP et les prédictions rapides est de 2.41 PU sur l'ensemble le pit N°1 (16 mm de ciment). En relatif, sachant que la porosité apparente obtenues en puits tubé est de l'ordre de 30 PU à 40 PU dans le PIT N°1, cet écart représente entre 6 % et 8 %.

La porosité réelle (intrinsèque) de chaque faciès est nettement surestimée en puits tubé, que ce soit par les algorithmes de prédiction rapide ou par les simulations MCNP, comme attendu pour cette mesure de porosité hydrogène apparente sensible aux éléments de l'environnement de puits (fluide, tubage, ciment) et non aux seuls noyaux hydrogène présents dans la formation géologique. Dans un puits d'exploration, ce biais fait l'objet de corrections d'environnement, mais comme signalé plus haut, on le conservera en vue de l'inversion multi-physique car il contient les informations non seulement sur la porosité de la formation rocheuse, mais aussi sur l'épaisseur et de la qualité de la cimentation.

Il n'existe pas réellement de fonctions d'étalonnage comme celles de la Figure 49 pour des environnements de puits tubé. De telles fonctions permettraient théoriquement, de déterminer directement la porosité intrinsèque de la roche derrière tubage et de ne pas obtenir le biais observé sur la Figure 50. Cependant en puits tubé, il subsiste un grand nombre d'inconnues, notamment la qualité et la masse volumique du ciment, l'épaisseur du ciment, la salinité du fluide dans le puits, etc. (ce qui n'est pas le cas en puits ouvert). Le nombre d'inconnue est telle qu'il n'existe pas de cas de base universel et des corrections d'environnement au « cas par cas », calculées par simulation Monte-Carlo, deviennent nécessaires.

L'innovation proposée ici est de conserver ces biais avec l'objectif de faire converger l'inversion multi-physique vers une solution globale de puits et de formation rocheuse. Un seul outil diagraphique nucléaire n'est évidemment pas suffisant pour solutionner toutes les inconnues et ce travail doit être étendu à d'autres outils comme nous le verrons dans le chapitre 4. Le bon accord global entre prédictions rapides et mesures pour les cas de puits ouverts, et entre prédictions rapides et simulations MCNP pour les cas de puits tubés, permet de valider les algorithmes de FFM¹⁷ pour l'outil neutron-neutron de porosité dans ces deux types d'environnements.

¹⁷ À l'interface géologique entre deux couches, les prédictions rapides sont faites à partir d'une fonction de sensibilité interpolée. Cette fonction de sensibilité est calculée en se basant sur la proportion de la couche 1 et de la couche 2 dans la zone de sensibilité de l'outil. Mendoza *et al.*, 2007 proposent des algorithmes spécifiques pour l'interpolation des fonctions de sensibilité qui sont appelé algorithmes LIR (*Linear Iterative Refinement*). Par la suite Ijasan *et al.*, 2011 introduisent un modèle de diffusion neutronique appelé DFD (*Diffusion Flux Difference*) dans le but de mieux approximer la fonction de sensibilité à l'interface et de réduire la taille de la bibliothèque. Ici, dans les cas présentés en Figure 50 l'approximation de la fonction de sensibilité à l'interface est faite par interpolation linéaire.

3.6 Conclusion

Ce chapitre 3 avait pour objectif de valider le concept de fonction de sensibilité et de valider les diagraphies estimées par des algorithmes de prédiction rapide étendus aux puits tubés (*Fast Forward Modeling* ou FFM) pour un outil neutron-neutron de porosité hydrogène dans un environnement de puits tubé avec des mesures en centre d'étalonnage.

Deux méthodes de calcul des fonctions de sensibilité ont d'abord été comparées, l'une basée sur le suivi de particule (*Particle Tracking* ou PT) avec GEANT4 et l'autre sur des fenêtres de poids (*Weight Window* ou WW) avec MCNP, montrant un très bon accord sur les profils 1D de sensibilité de flux suivant le rayon R et l'axe vertical Z.

Les expériences de perturbation axiale et radiale réalisées ont ensuite été modélisées avec ces deux codes de transport, montrant un bon accord entre les taux de comptages mesurés et simulés, aux pertes près dues au seuil de coupure du bruit de fond dans l'électronique. On note néanmoins un écart de l'ordre de 20 % entre les calculs MCNP et GEANT4, comme déjà noté au chapitre 2, mais qui n'impacte pas le calcul des fonctions de sensibilité 3D normalisées, qui représentent la sensibilité de l'outil en relatif dans les différentes mailles.

Ensuite, les profils 1D axiaux et radiaux (suivant Z et R) de sensibilité simulés et mesurés ont été comparés, montrant également un bon accord et validant expérimentalement le concept de fonction de sensibilité pour l'outil neutron-neutron de porosité. La fonction de sensibilité basée sur les interactions des particules, développée dans le cadre de cette thèse, a de plus été comparée à celle utilisée jusqu'à présent dans le domaine pétrolier, basée sur le flux dans les mailles de la géométrie, montrant que pour les puits tubés elle permet de mieux retranscrire la contribution des éléments du modèle numérique de terrain (fluide du puits, tubage, ciment, formation rocheuse). De ce fait, la régression polynomiale permettant de relier le paramètre de formation composite F_p (traduisant ses propriétés physiques apparentes en termes de transport neutronique) avec les taux de comptages « mesurés » (en fait ceux simulés avec MCNP et corrigés des pertes électroniques pour ce qui concerne la bibliothèque d'étalonnage, constituée de 96 cas de puits ouverts ou tubés de différents diamètres et avec différentes épaisseurs de ciment pour les puits tubés) s'ajuste mieux en utilisant la fonction de sensibilité des interactions (calculée elle avec GEANT4 pour les mêmes cas d'étalonnage et le même modèle numérique de terrain).

Nous avons ensuite utilisé cet étalonnage pour la prédiction des diagraphies de porosité avec les algorithmes de FFM étendus aux puits tubés, les travaux antérieurs dans ce domaine portant uniquement sur des puits ouverts. Pour les configurations de puits ouvert testées, on observe un accord satisfaisant entre les porosités prédites et celles mesurées avec l'outil en centre d'étalonnage, et aussi en bon accord avec la porosité réelle mesurée en laboratoire sur des échantillons des blocs étalon. De plus, pour les trois configurations de puits tubé et la configuration de puits ouvert testées, l'accord est bon entre les porosités prédites avec les algorithmes de FFM et celles simulées avec MCNP. On note, comme attendu, une surestimation de la porosité hydrogène dans tous les cas de puits tubé, car le tubage et le ciment contribuent, comme les noyaux d'hydrogène de la formation, à atténuer les signaux des détecteurs. Les algorithmes de FFM étendus aux puits tubés reproduisent cependant fidèlement ce biais. Pour le puits ouvert, comme signalé précédemment, on n'observe pas ce biais.

Au lieu de le corriger pour les puits tubés, comme cela se fait dans les puits d'exploration (corrections d'environnement), il sera au contraire exploité dans l'inversion multi-physique prévue à l'issue de ce travail de thèse, en vue de reconstituer les caractéristiques du puits (tubage, épaisseur de ciment, salinité, etc.).

4. Validation des fonctions de sensibilité et algorithmes de prédiction rapide pour l'outil Sigma

4.1 Résumé en Français

Ce chapitre 4 présente un travail sur l'outil neutron-gamma Sigma qui mesure la section efficace macroscopique d'absorption des neutrons avec un spectre de décroissance temporel des rayonnements gamma induits. Ce travail a été présenté à la conférence SPWLA (*Society of Petrophysicists and Well log Analysts, 65th Annual Logging Symposium, Rio de Janeiro, May 18-22, 2024*).

De la même façon qu'au chapitre 3, les modèles de calcul GEANT4 et MCNP permettant de simuler les spectres temporels de cet outil neutron-gamma sont présentés ainsi que les différentes approches de calcul des fonctions de sensibilité (PT pour *Particle Tracking* et WW pour *Weight Window*), puis leurs confrontations avec les mesures expérimentales de perturbation axiale et radiale.

On observe un bon accord entre les simulations et expériences sur les spectres temporels mesurés comme sur les sections efficaces macroscopiques d'absorption (Sigma) calculées à partir des pentes de décroissance. Il en est de même pour les profils de sensibilité 1D mesurés et calculés avec les deux méthodes de calcul des fonctions de sensibilité (WW et PT), avec comme au chapitre 3 de meilleures régressions polynomiales et prédictions pour la méthode PT. Enfin, les prédictions des diagraphies Sigma avec les algorithmes de FFM sont en bon accord avec les mesures dans le puits tubé réalisées en centre d'étalonnage.

In fine, ce chapitre 4 décrit une toute première confrontation des prédictions rapides à des diagraphies mesurées dans un puits réel tubé, pour déterminer l'état de saturation en hydrocarbures ou en saumure d'une zone réservoir. Cette comparaison directe des diagraphies prédites et mesurées a permis de confirmer l'absence d'hydrocarbures résiduels dans la zone réservoir de ce puits de production. Elle laisse augurer d'une possible utilisation des algorithmes de prédiction rapide dans l'inversion multi-physique qui fera suite à ce travail de thèse.

4.2 Abstract

Mature producing areas face the challenge to abandon safely numerous wells. Cased-hole logs can play a key role in the integrity and confinement assessment. Therefore, the industrial problem today is no longer to characterize some petrophysical properties of the rock formation (e.g. porosity, density, lithology, oil or gas saturation, etc.), but also some components of the well (e.g. drilling fluids, casing, cement). Due to the large number of variables, a multi-physics inversion considering simultaneously different nuclear log input is mandatory. During the past twenty years, the Austin University introduced the concept of sensitivity functions to simulate logs and allow the inversion of formation properties. This approach has been successfully tested in open hole, but for cased hole, it relies on the ability of the Fast-Forward Modeling to reliably reproduce the nuclear tools responses in the broad variety of wellbore environments. We report in this work this validation with a dedicated experimental setup. The concept of sensitivity function is discussed for a neutron-gamma Sigma tool (neutron absorption cross section) using nuclear Monte-Carlo simulations and measurements acquired in cased-hole with axial and radial disturbance experiments, characterized standards rock blocks and an oil and gas industry logging tool. This study also proposes to benchmark the numerical methods for calculating the sensitivity functions by comparing two different approaches based on "Weight Window" with MCNP and on "Particle Tracking" with GEANT4, two independent Monte-Carlo transport codes. Neutron-gamma Sigma tools are composed either of two, three or four detectors. The apparent Sigma parameters measured by the detectors are different from the intrinsic Sigma value of the zone of investigation because they are influenced by the diffusion effect and the well components (i.e. casing, cement, etc.). The challenge for the algorithms is to

correctly reproduce those effects and predict the accurate apparent Sigma values delivered by each detector. To that end, we compare predicted Sigma logs obtained with Fast-Forward Modeling algorithms using sensitivity functions, and measured Sigma logs acquired in standards rock blocks having strong contrasts of petrophysical properties. We also applied qualitatively the Fast-Forward Modeling algorithms to a field case where Sigma logs were acquired in a real cased hole production well. The results show good agreement between the predicted and measured logs, highlighting the usefulness of Fast-Forward Modeling for testing different scenarios in the saturation interpretation workflow.

4.3 Introduction

Oil & Gas (O&G) companies have more and more wells whose production capacities must be maintained and more mature fields to abandon while ensuring the well integrity and assessing a proper confinement. To this end, the industry tries to enhance the use of cased hole acquisitions where nuclear logs play a key role. The objectives are to get (through cement, casing and production tubing) a quantification of the evolution of water saturation, the identification and characterization of the bypassed reservoirs and a quantitative evaluation of the well integrity for Plug & Abandonment jobs. Consequently, the industrial challenge is not only to measure the rock formation petrophysical properties (porosity, density, lithology, oil/gas saturation, etc.), but also to characterize the borehole components (e.g. drilling fluids, casing, cement). Due to the large number of unknowns, a multi-physics inversion approach considering all the traditional nuclear logs is required from density, PEF (PhotoElectric Factor), PHI (Porosity Hydrogen Index), but also carbon/oxygen ratio and neutron capture decay Sigma.

The reliability of an inversion system and the convergence toward a single solution (i.e. a unique earth model and a single well architecture) relies on the data accuracy and consistency. Hence, simulated data must be as close as possible to the raw, uncorrected measurements (i.e. before any corrections for borehole, cement and casing). Traditional modeling using Monte-Carlo nuclear simulations is a possible solution but presents limitations to cover the entire well section (mainly computation power and calculation time). Therefore, those Monte-Carlo methods are not relevant for an inversion workflow in cased hole context. The University of Texas (Austin, USA) has developed in past decades a fast nuclear log simulator based on the concept of flux sensitivity function (Mendoza *et al.*, 2007) which allows formation properties inversion. The flux sensitivity function reproduces the flux contributing to the signal at the detector of a nuclear logging tool.

This definition of the sensitivity is relevant and has been successfully tested in open hole conditions but needs to be revisited in cased hole where significant radial heterogeneities appears between casing, cement and formation. To ensure the capability of the Fast Forward Modeling Algorithms (which predict nuclear logs, without additional Monte-Carlo simulation, in a fast and effective way thanks to sensitivity functions) to accurately predict log data in cased hole environment, the computed sensitivity functions should be compared to full-scale experiments and predicted nuclear logs to laboratory measurements. This work focuses on the neutron-gamma Sigma tool which consists in measuring induced gamma-rays generated after the radiative capture of thermal neutrons emitted by a pulsed neutron generator towards two NaI(Tl) scintillators. Historically, Sigma tools were designed for hydrocarbons saturation monitoring in brine (i.e. high chlorine content). With a partial borehole compensation, they are considered as a key nuclear tool for quantitative interpretation in cased hole.

4.4 Neutron-gamma Sigma measurements

The neutron-gamma Sigma logging tool allows the measurement of the neutron macroscopic absorption cross section. Figure 51 shows the MCNP model of a commercial Sigma tool, displayed using VISED visual editor (Schwarz *et al.*, 2018). This tool consists of a 14 MeV pulsed neutron generator and two NaI(Tl) scintillators called near and far detectors. Models are displayed in GEANT4 (cf. Figure 52) using the EDGE visual editor (Trouche *et al.*, 2019). MCNP (Kulesza *et al.*, 2022) is a reference particle transport codes in the oil and gas industry. An alternative is GEANT4 (Agostinelli *et al.*, 2003), initially developed for high energy physics, but extended for applications below 20 MeV.

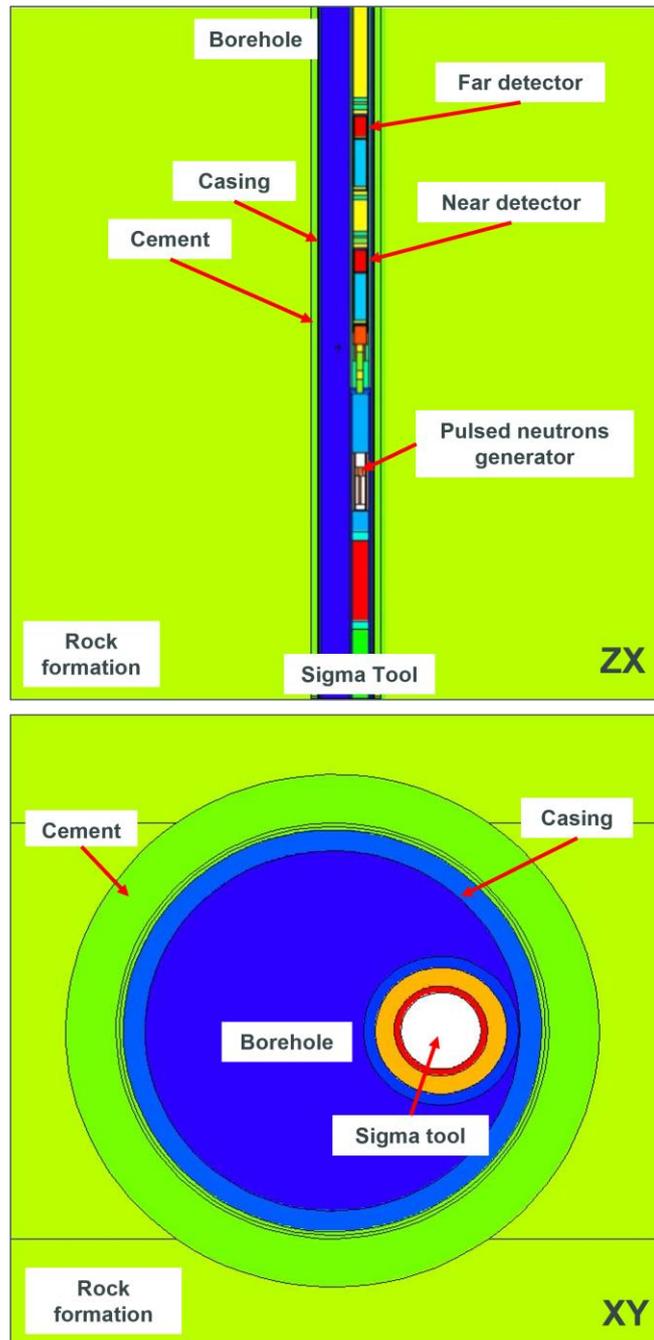


Figure 51: ZX and XY axis projections of the neutron-gamma Sigma tool MCNP model with VISED visual editor.

The neutron-gamma Sigma measurement corresponds to the recording of the induced gamma time decay spectrum by neutrons inelastic interaction and/or neutron radiative capture, during or after the generator pulse. The pulse duration (for this tool) is 100 μs and the total recording length is 1000 μs (from the beginning of the pulse to the end of the recording before another pulse). The time decay spectra recorded by the tool are summed over a second and are delivered in number of induced gammas detected per second, i.e. CPS (Counts Per Second).

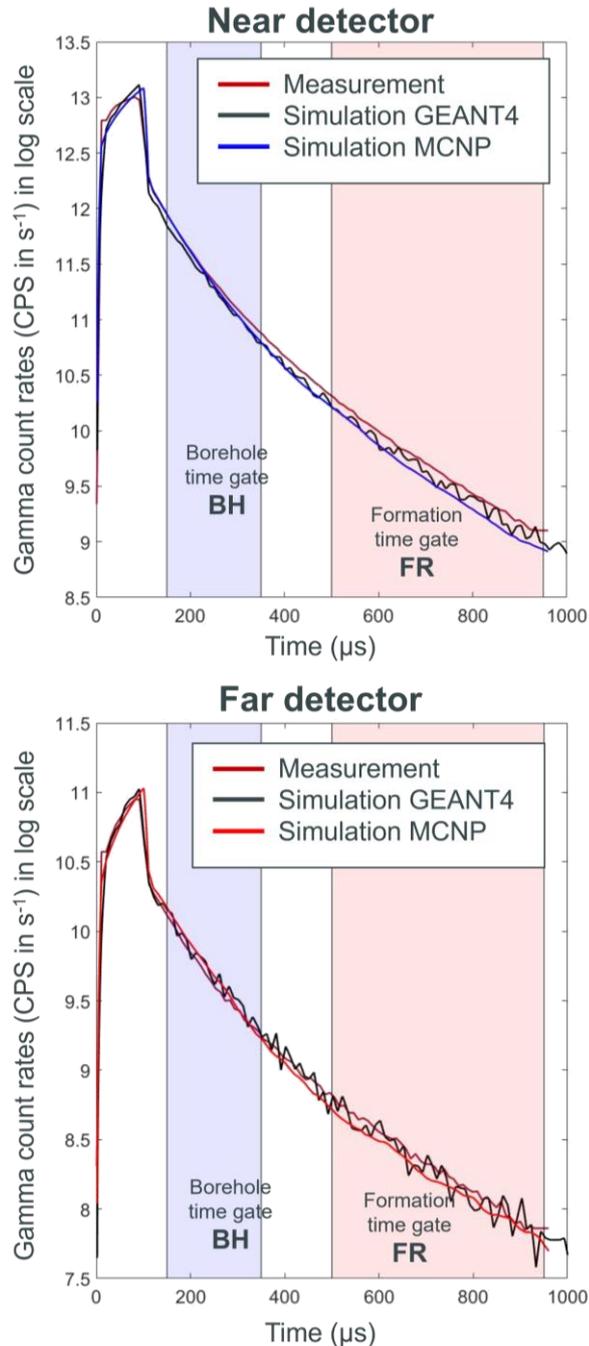


Figure 52: Neutron-induced gamma time decay spectra.

The neutron macroscopic absorption cross section (Sigma) is obtained with the slopes of the time decay spectrum, usually calculated using two specific time windows, an early one called borehole window (e.g. 200 μs to 350 μs) which allows the calculation of a so-called borehole Sigma, and a second one called formation window (e.g. 500 μs to 1000 μs) which allows the calculation of a formation Sigma. The

macroscopic absorption cross section unit is cm^{-1} but in the oil and gas industry it is given in practical capture unit (CU). This cross section is called Sigma (Schmid *et al.*, 2018) and is obtained with equation (21):

$$\text{Sigma} = -4545 \times \frac{d \log(\text{CPS})}{dt} \quad (21)$$

In which the 4545 constant (in $\mu\text{s}/\text{cm}$) is the inverse of the 25 meV thermal neutrons speed ($0.22 \text{ cm}/\mu\text{s}$) multiplied by 1000. The borehole window is strongly influenced by the environment close to the tool (e.g. the fluid in the well, casing and cement), therefore it produces an overestimated Sigma compared to the intrinsic value of the rock formation and is used to assess the fluid in the well.

Figure 52 presents neutron-induced gamma time decay spectra obtained with MCNP and GEANT4, compared to a real measurement with a Sigma tool recorded in open hole conditions in a pure limestone (CaCO_3) standard (Chuilon *et al.*, 2019) with a 0.3 PU (Porosity Unit), and a 200 mm diameter borehole filled with fresh water. As the emission of pulsed neutron generators can significantly fluctuate over time, simulated time spectra of Figure 52 are normalized to the measured count rates (during the generator pulses) to allow a qualitative comparison of the decay times.

4.5 Methods to calculate sensitivity functions

4.5.1 Weight Window method

The first sensitivity function computation method was initially published by the University of Texas at Austin (Mendoza *et al.*, 2007). It consists, for a neutron-gamma Sigma tool, in the calculation of the map of the thermal neutrons flux giving rise to a radiative capture and a gamma energy deposit in the detector (Ortega *et al.*, 2013; Mimoun *et al.*, 2011). The thermal neutrons maximal energy collected in the sensitivity function is set below an arbitrary limit of 0.414 eV (McKeon *et al.*, 1989).

Luycx *et al.*, 2020 presented the method with MCNP6.2, where two different simulations are required to obtain the sensitivity functions for both near and far detectors. This method multiplies a 3D importance map, obtained from the Weight Window Generator of MCNP, with the thermal neutrons flux in each cell of the mesh (FMESH option in MCNP).

$$FSF_{WW}^j = Importance^j \times Flux^j \quad (22)$$

FSF_{WW}^j (particles/cm²) is the flux sensitivity function of the neutron-gamma Sigma tool in cell j obtained with the Weight Window method (WW). The mesh is superimposed to the tool and the borehole model. As sensitivity depends on the radial, axial and azimuthal position (R, Z, Ω) of cell j , FSF_{WW}^j can be written also $FSF_{WW}(R, Z, \Omega)$. When used in FFM (Fast Forward Modeling) algorithms like UTAPWeLS (UTAPWeLS, 2020), FSF_{WW} are normalized (i.e. the sum of sensitivities in all cells is unity) as shown in equation (23):

$$\sum_{j=1}^N FSF_{WW}^j = 1 \quad (23)$$

The Weight Window (WW) method is the most commonly used method to compute 3D flux sensitivity functions, but it has never been compared with another computation method as presented below.

4.5.2 Particle Tracking method

An alternate sensitivity function computation method proposed here is the Particle Tracking method, which is simpler to use with GEANT4 than with MCNP. By design, GEANT4 is based on the individual tracking of each particle in various volumes of interest, while MCNP is based on statistical estimators. This work does not aim to compare these two particle transport codes (cf. Varignier *et al.*, 2023 for a detailed comparison) but just the computation methods of sensitivity functions.

The Particle Tracking method consists in calculating the map of thermal neutron (with an energy below 0.414 eV) elastic diffusions giving rise to a radiative capture gamma ray that deposits energy in the detector (two separated functions are computed, one per detector, as for the Weight Window method).

$$ISF_{PT}^j = \sum_k N_{interaction_{elastic}_k}^j \quad (24)$$

ISF_{PT}^j is the interaction sensitivity function (named ISF for Interaction Sensitivity Function) in cell j obtained with the Particle Tracking (PT) method. $N_{interaction_{elastic}_k}^j$ is the number of elastic diffusions of neutron k in cell j , where the induced gamma ray (generated by capture interaction) is detected. ISF_{PT}^j is written $ISF_{PT}(R,Z,\Omega)$ and, as previously explained for FSF_{WW} , is also normalized according to equation (23).

FSF_{WW} is a 3D map of the neutron flux, while ISF_{PT} is a 3D map of the elastic diffusions of thermal neutrons, both contributing to the signal measured at the detector. With GEANT4, it is also possible to calculate a FSF_{PT} based on Particle Tracking by determining the trace (path length) of each neutron in each cell. It allows comparing two sensitivity function computation methods with the same code (FSF_{PT} and ISF_{PT}), as well as FSF_{WW} and FSF_{PT} estimated with different codes and methods (Weight Window with MCNP and Particle Tracking with GEANT4). The flux sensitivity function in cell j , FSF_{PT}^j (particles/cm²), is computed with the Particle Tracking method using the equation (25).

$$FSF_{PT}^j = \frac{\sum_k T_k^j}{V^j} \quad (25)$$

Where T_k^j is the distance (i.e. the trace) traveled by the neutron k in cell j (cm) and V^j is the volume of the same cell (cm³). Equation (25) is similar to a flux estimator.

ISF_{PT} can also be approximated from the FSF_{PT} as shown in equation (26), analog to a volume reaction rate calculation (equivalent to ISF) by multiplying the flux (equivalent to FSF) and the macroscopic thermal neutron cross section.

$$ISF_{PT}^j \approx FSF_{PT}^j \times \sum_{Neutron_Energy < 0.414\ eV}^j \times V^j \quad (26)$$

FSF_{PT}^j (particles/cm²), ISF_{PT}^j (interactions), V (cm³) and $\sum_{Neutron_Energy < 0.414\ eV}^j$ (cm⁻¹) are respectively the flux, the number of neutron interactions below 0.414 eV (quasi thermal neutrons), the volume, and the macroscopic thermal neutron cross section (below 0.414 eV) in cell j . This simplified presentation is just presented to illustrate the link between FSF_{PT} and ISF_{PT} , but in fact it would have been necessary to calculate an energy-dependent integral.

The motivation for studying this new computation method of sensitivity functions in cased hole is the large radial contrast of nuclear properties due to the components of a wellbore (e.g. casing, cement, fluid in the borehole), which have an influence on the signal measured at the detector. As ISF is based on interactions, rather than FSF on thermal neutron fluxes, it is expected to better reflect these cased hole measurements, which we will illustrate and discuss in the following parts.

4.6 Axial and radial heterogeneity experiments

4.6.1 Experimental setups

Two experimental setups have been designed to measure the experimental 1D flux sensitivity function (FSF) profile of a neutron-gamma Sigma tool in the radial and axial directions. They allow the measurement of the impulse response of the tool when introducing a thin layer (1 cm) of material creating a clear contrast in a homogeneous medium, for instance PVC (polyvinyl chloride), which is rich in chlorine and hydrogen nuclei, inside a medium composed of limestone (CaCO_3) or dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

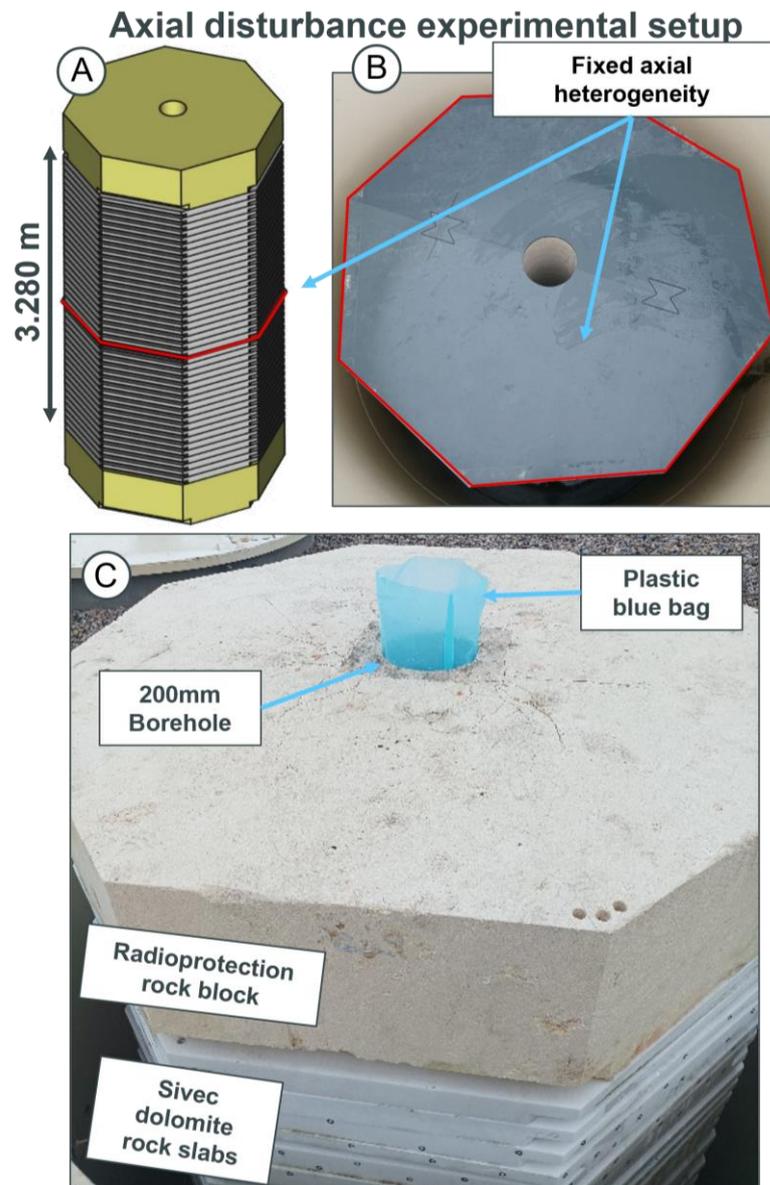


Figure 53: Axial disturbance experiment.

The first Sigma acquisition is performed in a homogeneous environment, without PVC heterogeneity. The tool measures an induced gamma time decay spectrum called reference Sigma (noted S_{Ref}). Then, the

heterogeneity is introduced in the volume of investigation of the tool, either axially (the tool moves along the Z axis) or radially (the heterogeneity moves along the R axis). This new recorded spectrum (affected by the presence of the heterogeneity), allows the measurement of a Sigma variation compared to SRef. By analyzing a series of new recorded spectra (i.e. a series of Sigma variations compared to SRef) at different positions along the Z or R axes, one can construct the measured 1D flux sensitivity profiles.

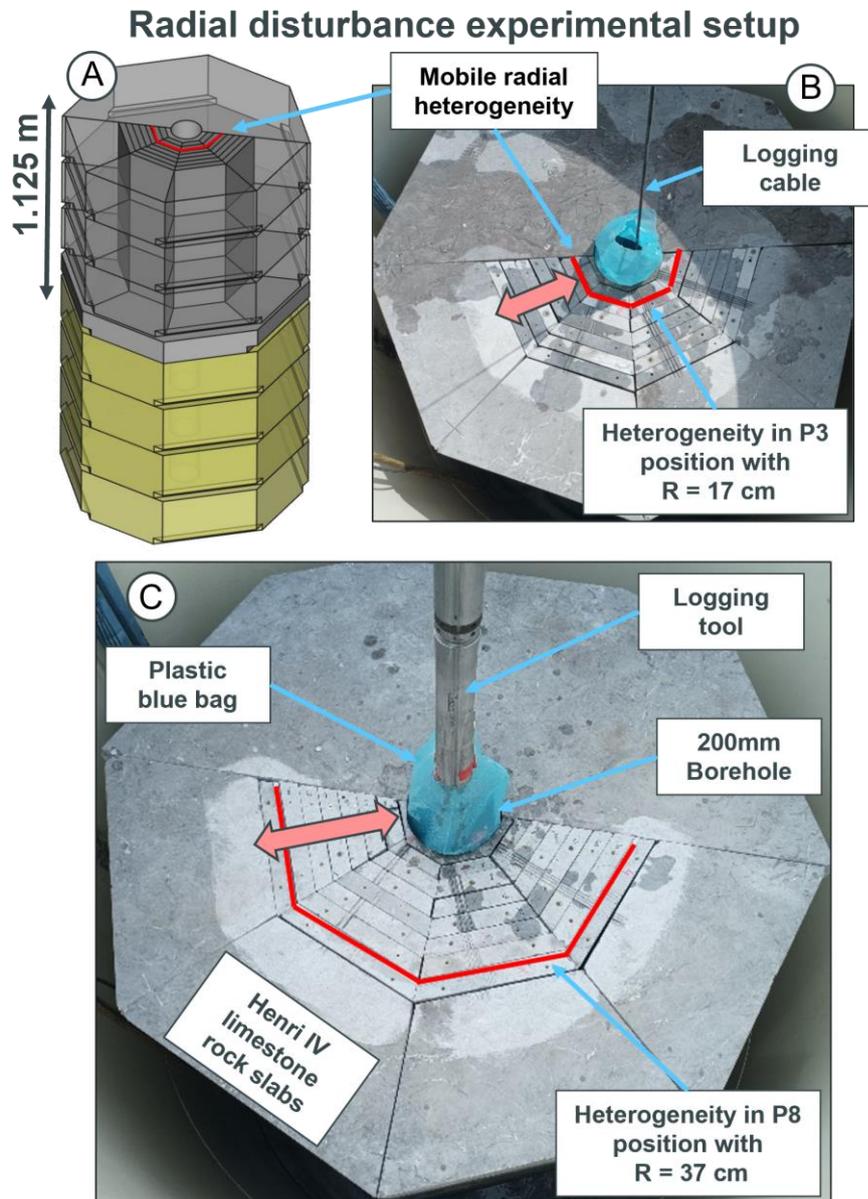


Figure 54: Radial disturbance experiment. The logging cable is visible in the first picture (top right). In the second picture (bottom), the tool is in measurement position. The heterogeneity is made of 4 PVC plates (highlighted in red), here in 3rd position on the top right picture, and in 8th position on the bottom picture. The rear part of the block is not segmented for practical reasons, but the sensitivity is mainly in front of the tool, as shown further in Figure 60.

The reference medium of the standard blocks (cf. Figure 53) is considered for the logging tool as homogeneous and infinite along both the R (150 cm wide) and Z axes (> 1 m deep). In the axial experiment, the reference medium is a dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ with a porosity of 0.3 PU and a density of 2.86 g.cm^{-3} . In the radial experiment, it is a limestone CaCO_3 of 0.3 PU and 2.70 g.cm^{-3} . These homogeneous hexagonally shaped standard blocks are respectively SIVÉC and HENRI IV facies from

quarries in France and in North Macedonia. Their petrophysical properties (e.g. density, porosity, chemical composition, etc.) have been thoroughly characterized in laboratory (Chuilon *et al*, 2019). They are used for calibration of logging tools with a central well of diameter 200 mm. These blocks are very tight, with a very low porosity (~ 0.3 PU), and not saturated with water for practical reasons. A waterproof polyethylene bag with a small thickness (1 mm) and a hydrogen content close to water (similar neutron diffusion and absorption cross sections) is inserted in the well and filled with fresh water. This bag is not described in MCNP and in GEANT4.

The SIVÉC dolomite standard blocks are a stack of 6 cm thick hexagonal plates (white plates in Figure 53) and the HENRI IV ones are made of three stacked hexagonal blocks each 37.5 cm thick (grey blocks in Figure 54). Top and bottom blocks used for radiation protection and/or as base support complete the setup (in yellow on the numerical model, Figure 53 and Figure 54). For all the acquisitions, the logging tool is pushed towards the borehole thanks to a bow spring. These two axial and radial disturbance experiments are performed both in open and cased hole.

A 4.5' casing (114 mm external diameter) can be added in the well (inside the polyethylene bag) with a 16 mm thick fiber epoxy sleeve to mimic an equivalent O&G cement, in terms of density ($2.08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and neutron transport properties. A chemical analysis of this epoxy fiber glass was conducted in view of MCNP and GEANT4 simulations (cf. Tableau 10).

Tableau 10: Chemical composition of the fiber epoxy equivalent cement used in axial and radial disturbance experiments.

	H	C	O	N	Si
Mass fraction	1.71	14.64	45.78	0.72	37.15

4.6.2 Measurements results

Figure 55 displays the results of the dynamic axial acquisition with a continuous recording from the bottom to the surface of the well. We observe on the two near and far detectors an increase of Sigma due to the PVC plate located at a depth of 1.6 m (black line), compared to the reference Sigma S_{Ref} without disturbance. Figure 56 presents the results of the radial acquisition. In this setup, the tool is static at the same depth (the tool is in the middle of the grey rock block). The rock standard is longer than the distance between the source and the far detector. Therefore, the source is located above the base of the limestone rock standard and the far detector is located below the top (grey block in Figure 54). The variations of Sigma are due to the 8 radial positions of the heterogeneity in the rock formation.

For Figure 55 and Figure 56, the reference Sigma S_{Ref} corresponds to a measurement without heterogeneity (dotted baselines). The S_{Ref} values obtained in the formation window are much closer to the intrinsic values of the rock (4.8 CU for dolomite and 7.2 for limestone, red curves) than S_{Ref} from the borehole window.

The maximum signal variation caused by the presence of the PVC heterogeneity (i.e. the difference between S_{Ref} and the maximum Sigma value measured on the profiles) is smaller in the borehole window (noted BH in Figure 55 and Figure 56) than in the formation window (noted FR in Figure 55 and Figure 56), as the borehole signal is more influenced by the borehole environment, and conversely less by the rock formation. It is therefore expected that the borehole Sigma in a cased hole environment contains valuable information on the well constituents (e.g. fluid in the borehole, casing, cement thinness, etc.).

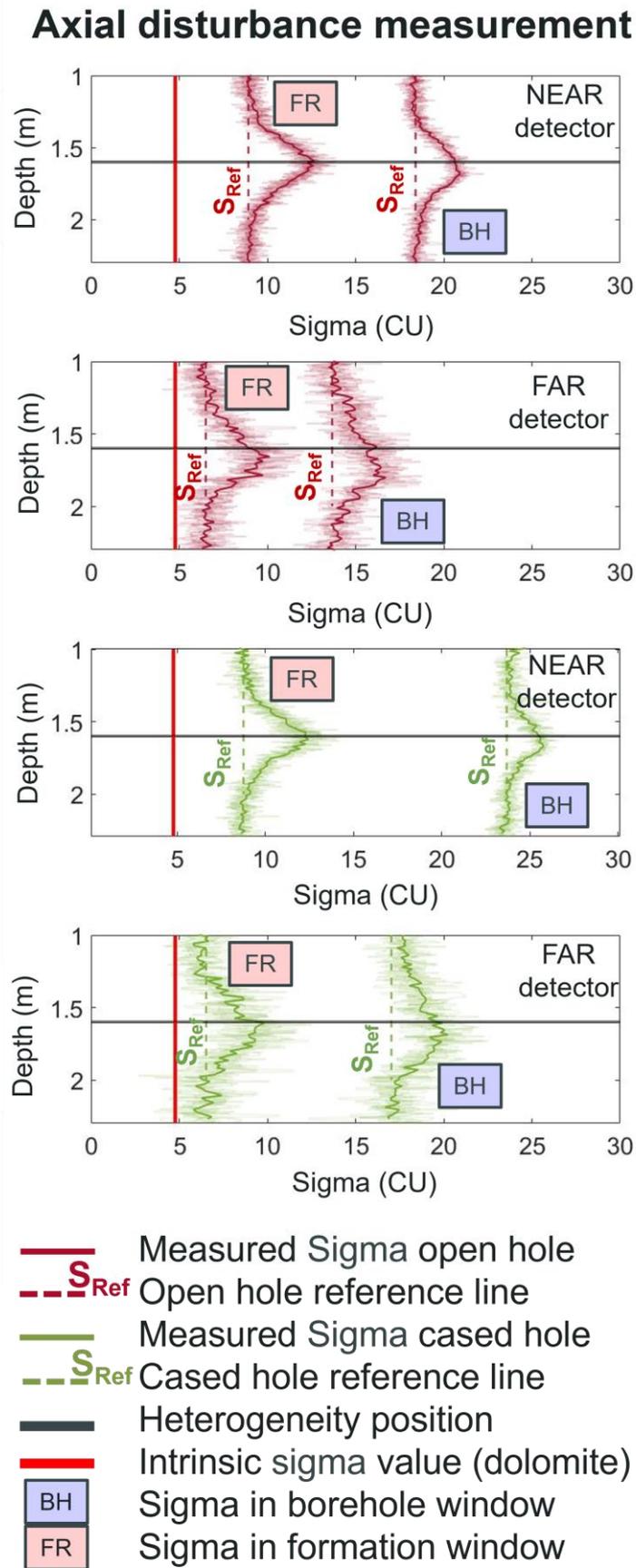


Figure 55: Results of the axial disturbance experiment. 10 successive acquisitions were performed (thin lines) to evaluate the repeatability and calculate a mean (bold line).

Radial disturbance measurement

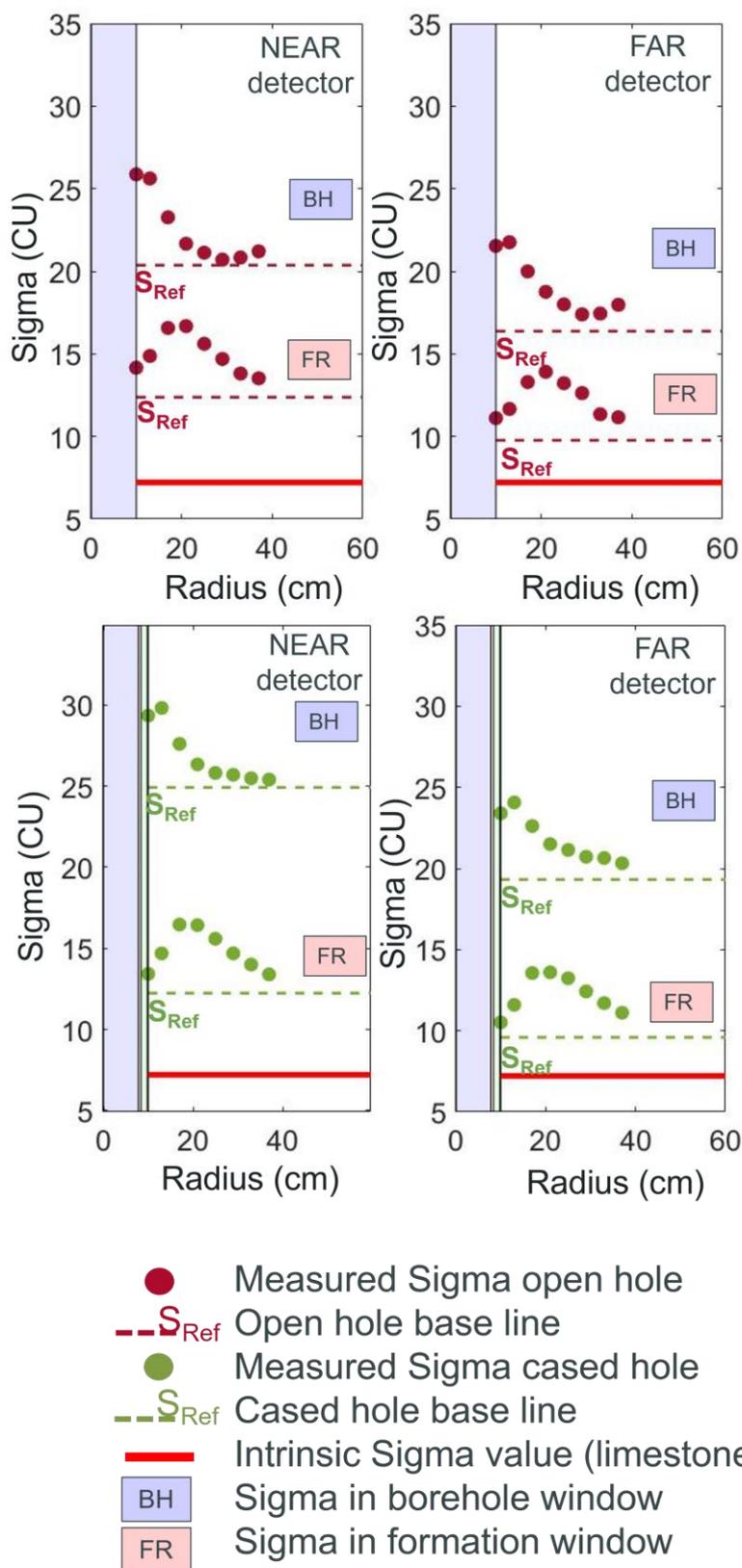


Figure 56: Results of the radial disturbance experiment. 2 successive acquisitions per position were taken to evaluate the repeatability. The average is displayed with the brown and green points (8 radial positions of the PVC heterogeneity).

4.7 Comparison between experimental results and simulations

The validation of MCNP and GEANT4 numerical models (i.e. the commercial Sigma logging tool presented here) through a quantitative comparison between Sigma measurements and Monte-Carlo simulations is essential before using GEANT4 or MCNP to compute sensitivity functions. Therefore, the above disturbance experiments (cf. Figure 53 and Figure 54) in open hole and cased hole were simulated with MCNP and with GEANT4.

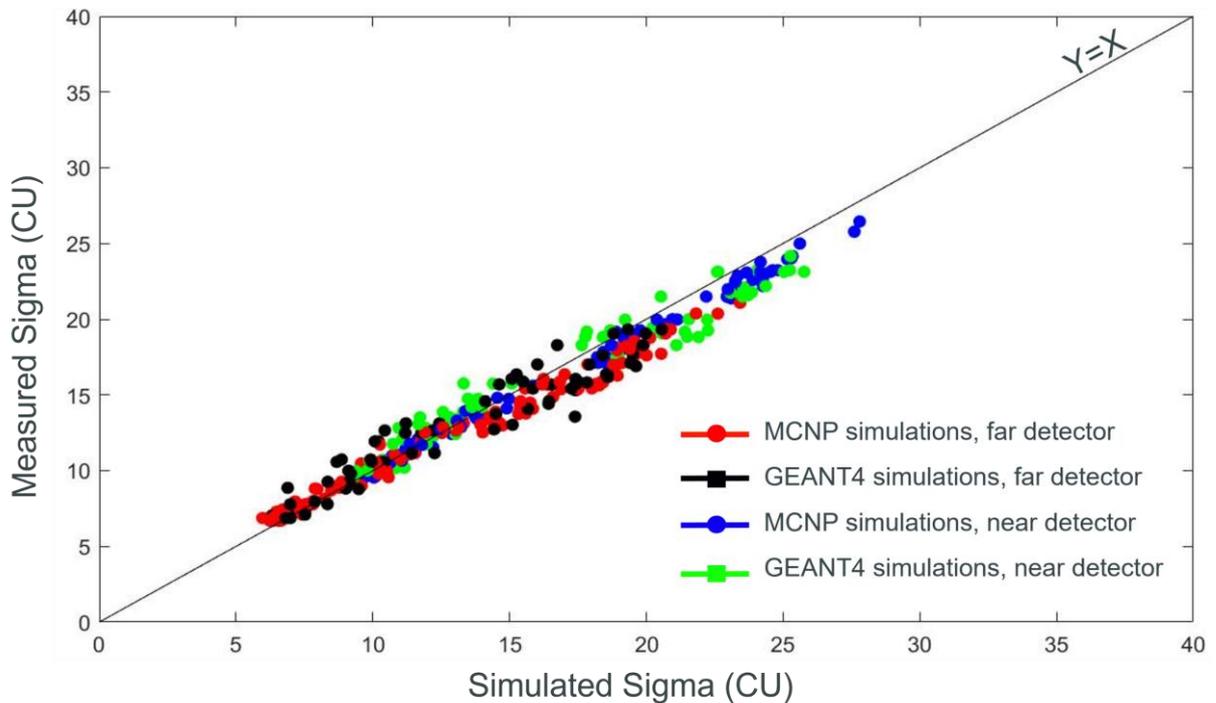


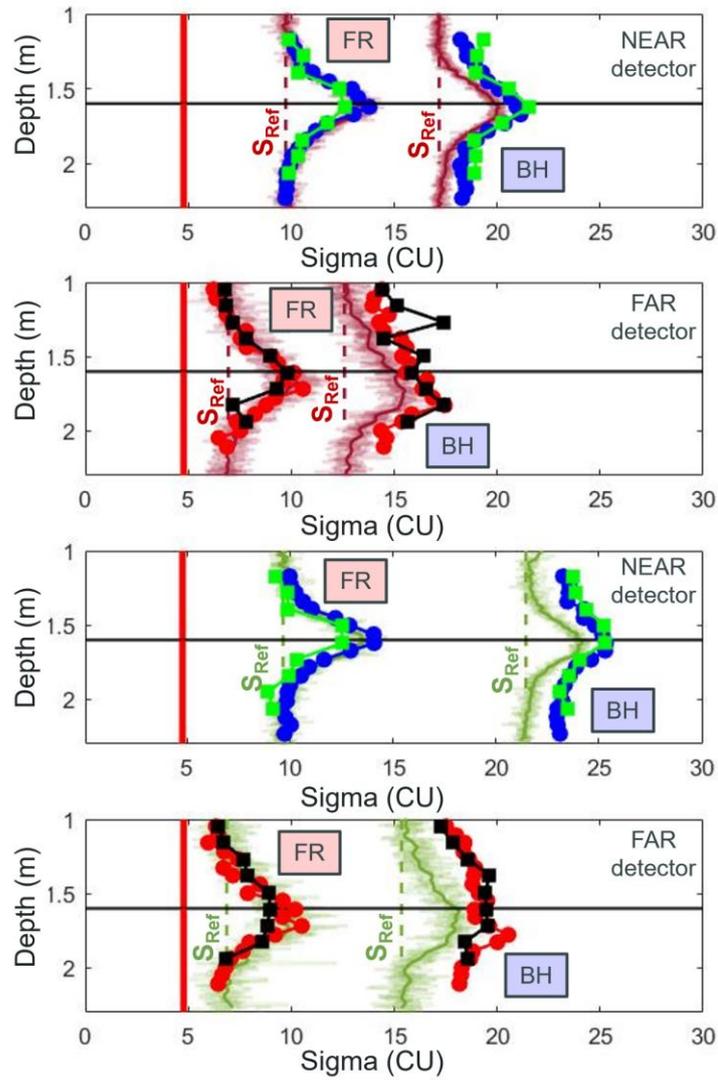
Figure 57: Comparison of measured (Y axis) and simulated (X axis) Sigma.

Figure 57 presents, for both the near and far detectors, the measured vs. simulated Sigma values obtained with MCNP and GEANT4 in the axial and radial experiments. The Sigma values obtained from the simulations show good agreement with the measured ones. No correction is required to transform the simulated signal into the equivalent measured signal, unlike other nuclear logging tools, such as the neutron-neutron porosity tool, where the simulated count rates are higher than the measured ones due to the electronics threshold of the acquisition system, which cuts off a fraction of the useful neutron signal.

Figure 58 compares the simulated and measured Sigma profiles from spectra (20 points for MCNP and 10 points for GEANT4 due to the long simulation time needed) measured between $Z = 2.2$ m and $Z = 1.1$ m. The overall agreement is very satisfactory for this axial disturbance experiment.

Figure 59 compares the computed and experimental Sigma profiles from $R = 10$ cm to $R = 57$ cm (8 measurements and 13 simulations). The overall agreement is also very satisfactory for the radial disturbance experiment, except for the far detector with GEANT4 because statistics is quite low despite a very long time of simulation.

Axial disturbance measurement



- Measured Sigma open hole
- - - S_{Ref} Open hole reference line
- Measured Sigma cased hole
- - - S_{Ref} Cased hole reference line
- Heterogeneity position
- Intrinsic Sigma value (dolomite)
- Simulated Sigma near MCNP
- Simulated Sigma near GEANT4
- Simulated Sigma far MCNP
- Simulated Sigma far GEANT4
- Intrinsic Sigma value (dolomite)
- BH Sigma in borehole window
- FR Sigma in formation window

Figure 58: Comparison between Monte-Carlo simulations (MCNP and GEANT4) and measurements for the axial experiment.

Radial disturbance measurement

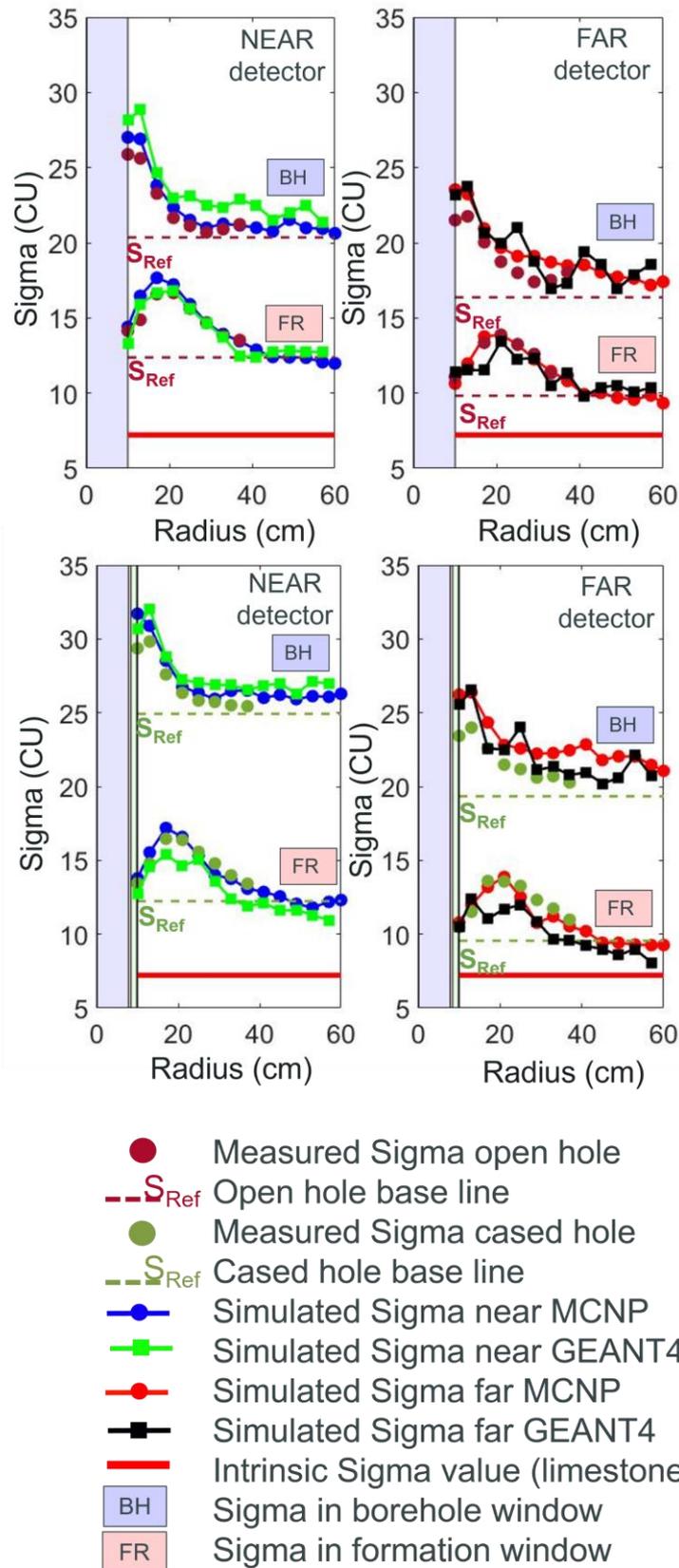


Figure 59: Comparison between Monte-Carlo simulations (MCNP and GEANT4) and measurements for the radial experiment.

The number of particles source (NPS) in GEANT4 is 2×10^8 and the parallel calculation is split on 480 CPU (Central Processing Units) with about 24 h computing per simulation. The number of NPS in MCNP is 6×10^8 , split on 48 CPU and about 3 h of computing per simulation, yet simulation statistics is much better. Therefore, MCNP will be used for the rest of the quantitative Monte-Carlo simulations.

We notice larger simulated Sigma (both in MCNP and GEANT4) compared to measurements in the borehole window (cf. Figure 58 and Figure 59). A possible explanation could be a larger standoff (gap between the tool and the borehole) in the numerical model than in reality, leading to a higher macroscopic absorption cross section assessed in this time gate.

At this point, the globally satisfactory agreement between measurements and simulations observed both with MCNP and with GEANT4 for the axial and radial experiments, validates the numerical models of this commercial Sigma logging tool and the simulation methods used in these two Monte-Carlo transport codes.

A better data analysis (e.g. use of a dual-exponential fit, Schmid *et al.*, 2018) could improve the values obtained from time decay spectra, especially in the borehole window. More NPS in GEANT4 would also improve the statistics.

4.8 Comparison between sensitivity function methods

Before comparing the measured and computed flux sensitivity functions, we compare here two calculation methods (WW and PT). The innovative approach presented here proposes to work by detector (near and far) and by time window (borehole and formation). An approach by individual detector allows preserving the wellbore information, especially casing and cement properties. Indeed, the long term objective of this work is to perform a multi-physics wellbore inversion from cased hole logs. As such, the wellbore elements need to be treated as unknown variables.

The flux sensitivity functions in Figure 60 are computed with a cased hole numerical model including the tool and all the well components. However, for a better display (color scale), the well is removed in the display to enhance the contrast on sensitivity in the casing, cement and rock formation.

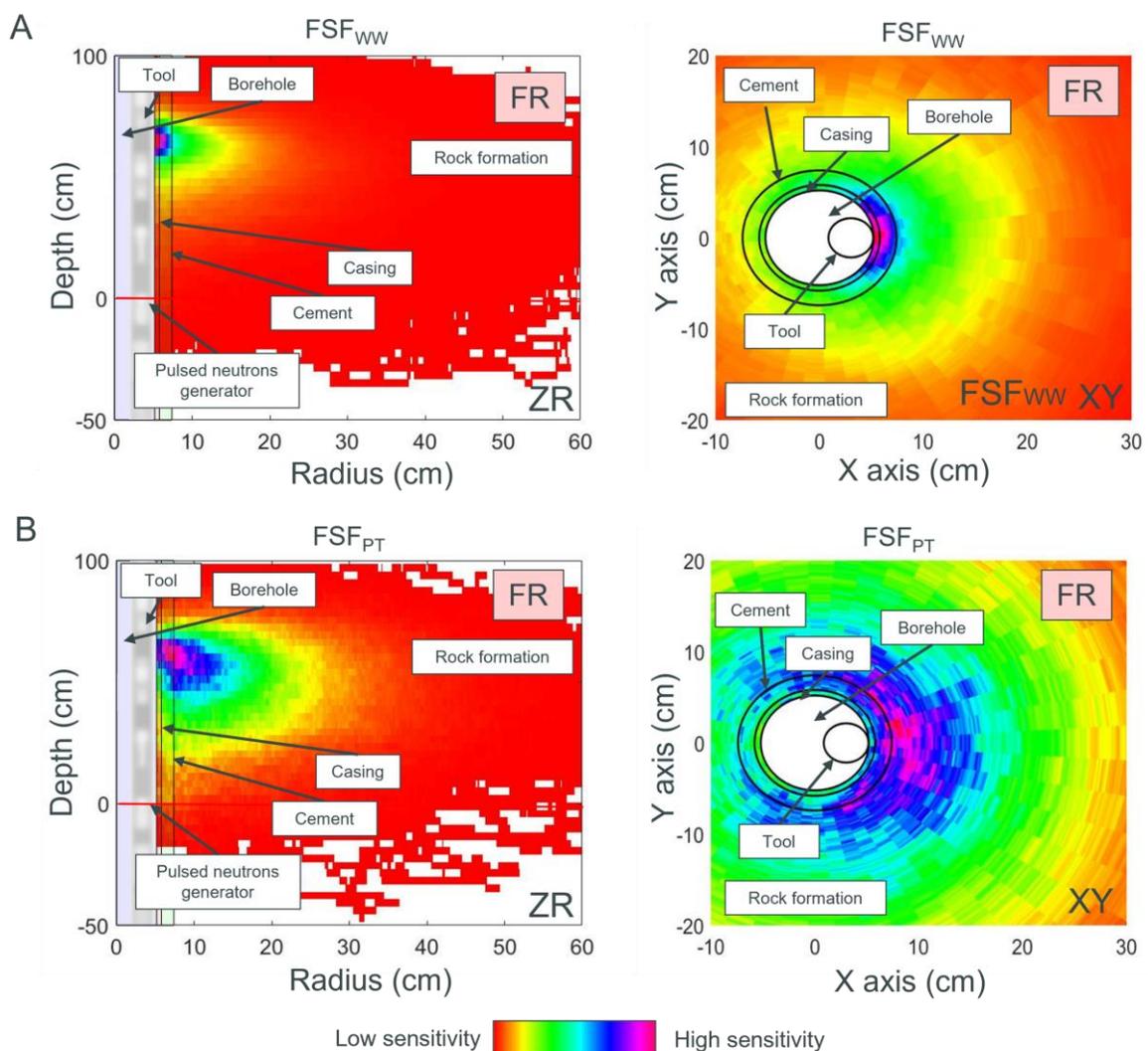


Figure 60: 2D projections of the computed 3D sensitivity functions for the far detector, integrated along the Ω angle for the (Z,R) projections and along the Z axis for the (R, Ω) projections. For the (Z,R) projections, the red horizontal line at Z = 0 cm locates the position of neutron emission (generator target). This example is for a 0 PU limestone.

Figure 60 shows 2D projections of 3D flux sensitivity functions for the far detector computed in the formation time window (FR), in a cased hole environment including the tool and all constituents of the well. Figure 60 A shows 2D projections (R,Z) and (R, Ω) of a FSF_{WW} (Flux Sensitivity Function obtained from the MCNP thermal neutron flux map and the Weight Window method). Figure 60 B shows 2D projections (R,Z) and (R, Ω) of a FSF_{PT} (obtained with GEANT4 from the thermal neutron interactions map and the Particle Tracking method). Both the FSF_{WW} and the FSF_{PT} present a maximum of sensitivity close to the far detector, but the thermal neutron cloud contributing to the signal in the formation window is much more focused close the detector for the FSF_{WW} than for the FSF_{PT} , on both Z and R axes.

This is due to limitations of the Weight Window Generator of MCNP, which does not allow removing thermal neutrons contributing to the signal before the formation window. Thus, the MCNP WW method records all thermal neutrons whose radiative captures emit gamma ray detected between 0 and 1000 μ s, instead of only those between 500 and 1000 μ s (formation window) as it is possible to select with the GEANT4 PT method.

Indeed, thermal neutron captures inducing detected gamma rays during or shortly after the pulse generally occur close to the detector, unlike captures inducing gamma rays detected in a later time window. To validate this hypothesis, we compared two FSF computed with the two methods (PT with GEANT4 and WW with MCNP), but without time constraint in GEANT4 contrary to Figure 60. The results (not reported here) are then qualitatively very close between MCNP and GEANT4.

With the borehole window (200 to 350 μ s), we also observe a FSF_{PT} more spread out from the detector than FSF_{WW} because the WW method records all neutron captures creating detected gamma rays between 0 and 350 μ s, contrary to the PT method that allows selecting only those between 200 to 350 μ s. In order to define which option is the most suited to calculate FSF of a Sigma tool, these two approaches are confronted in next part to experimental data.

4.9 Experimental validation of sensitivity functions

The axial and radial variations of the measured Sigma (in cm^{-1} or in CU), presented in Figure 55 and Figure 56, are the tool responses to a fine disturbance (the PVC plates) and are compared in this part to the 1D sensitivity profiles resulting from MCNP and GEANT4 computations. For this comparison, five MCNP simulations complete the eight static acquisitions to construct a complete radial profile (called measured profile).

Mendoza *et al.*, 2010a define a relationship linking a relative change in the slope calculation $\frac{|Sigma_{Ref} - Sigma_{disturbed}|}{Sigma_{Ref}}$ with a relative variation in the petrophysical properties between an initial medium and a disturbed medium, $\frac{\Sigma_{initial} - \Sigma_{disturbed}}{\Sigma_{initial}}$, convolved in 3D by the FSF in each cell.

Σ is a quantity representative of neutron transport such as the macroscopic thermal neutron cross section (in cm^{-1}) with the energy inferior to 0.414 eV (cf. equation (26)) or the diffusion length (Ld in cm). $\Sigma_{initial}$ is a 3D matrix with the same size as FSF and represents the initial environment (a homogeneous limestone or dolomite rock formation) and $\Sigma_{disturbed}$ is the 3D matrix of the disturbed environment (a heterogeneous limestone or dolomite rock formation with a PVC plate).

$|Sigma_{Ref} - Sigma_{disturbed}|$ is the difference between the Sigma (in cm^{-1}) measured in the disturbed medium with the heterogeneity (noted $Sigma_{disturbed}$) and the Sigma measured in the initial medium (noted $Sigma_{Ref}$) for a radial or axial position.

The ratio $\frac{|Sigma_{Ref} - Sigma_{disturbed}|}{Sigma_{Ref}}$ for the different measurement points in the axial direction defines the measured 1D sensitivity profile.

$$Profil_{norm}^{axial} = \frac{|Sigma_{Ref} - Sigma_{disturbed}|}{Sigma_{Ref}} \quad (27)$$

Figure 61 compares, for cased hole and open hole environments, the computed 1D axial profiles of flux sensitivity (obtained by integrating the 3D FSF along R axis and Ω angle) with the measured profiles. All profiles are normalized according to equation (23). Figure 61 shows Sigma profiles estimated in the formation window.

We observe on measured profiles that the sensitivity is important close to the detector as already mentioned for the qualitative comparison of the 2D projections (cf. Figure 60). We clearly see that profiles computed with the PT method better fit to measurements than with the WW method, because of the issue with time filtering in MCNP Weight Window Generator explained previously.

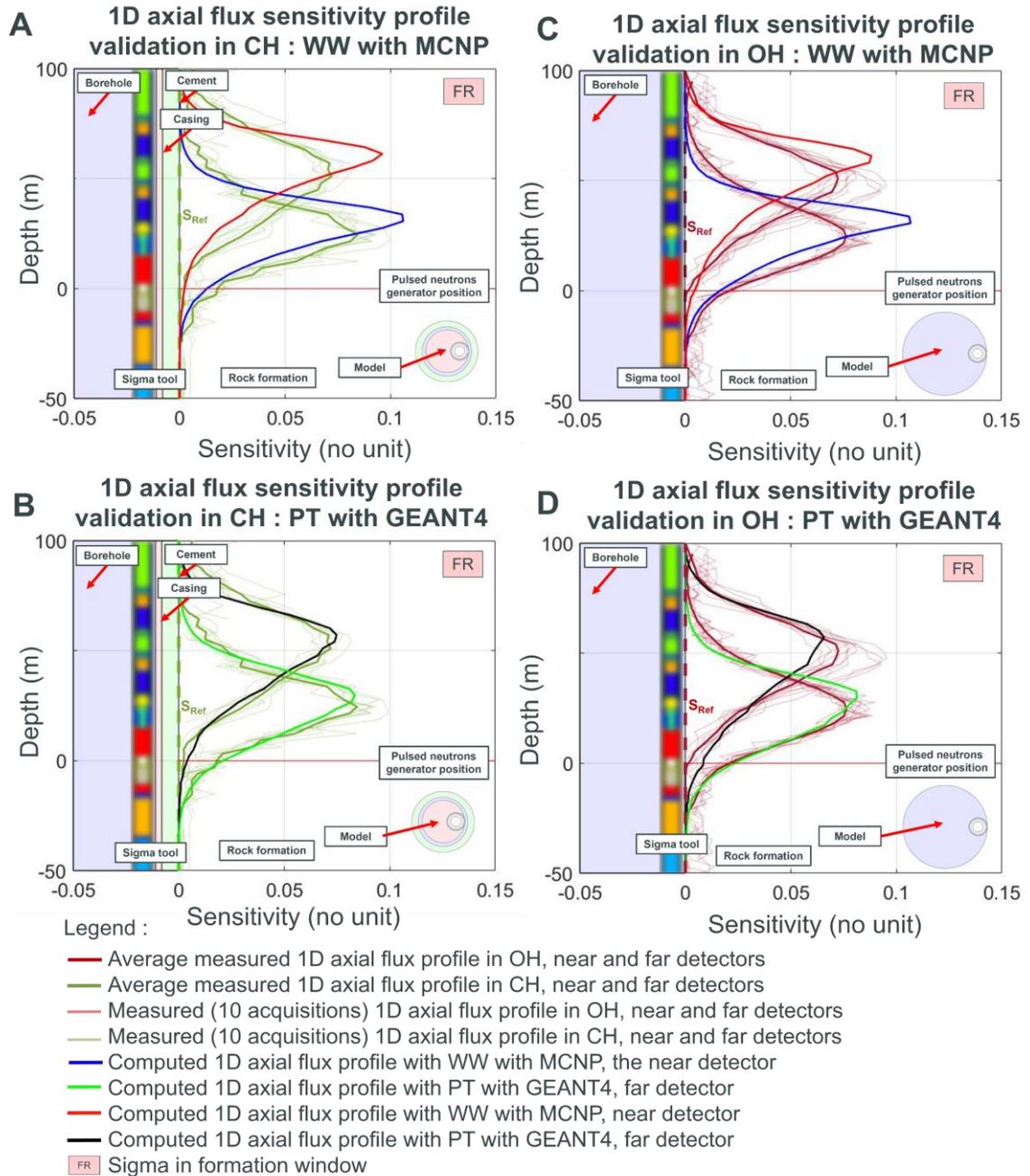


Figure 61: Comparison between the measured and computed 1D axial profiles of sensitivity for the near and the far detectors. All profiles (computed and measured) are segmented with the same number of samples (50 samples along the Z axis). The sum of the sensitivity of each profile is equals to 1. The red horizontal line is the position of the pulsed neutrons generator.

Concerning the radial profiles, it is important to note that the volume of the PVC plate increases with the radius, contrary to the axial experiment where the tool passes in front of a unique PVC plate. This volume rise is quasi linear with R (distance from the center of the well, cf. Figure 54) because the thickness is the same (1 cm) for all PVC plates. Hence, the quantity of hydrogen nuclei increases according to the heterogeneity position (cf. Table 11).

Table 11: PVC volume weighting values of the 1D profiles measured in the radial experiment.

Heterogeneity position	Measurements								Simulations				
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Volume (cm ³)	3709	4700	6163	7771	9372	11136	12947	14644	16402	18246	19971	21719	23546
Volume ratio with respect to P1	1.00	1.27	1.66	2.10	2.53	3.00	3.49	3.95	4.42	4.92	5.38	5.86	6.35
Rayon	10	13	17	21	25	29	33	37	41	45	49	53	57

Therefore, the measured radial 1D profile is weighted by the volume ratio of Table 10 as follow

$$\frac{Profil_{norm}^{radial}}{Volume_{ratio}}$$

Figure 62 compares, in cased hole, the computed 1D radial flux sensitivity profiles (integration of the 3D computed FSF_{WW} and FSF_{PT} along the Z axis and the Ω angle) and the measured profiles, for Sigma estimated in the borehole (BH) and formation (FR) windows.

For the BR window (cf. Figure 62 A and B), the computed and measured profiles globally agree satisfactorily, but again, the computed ones using the PT method are matching better the measurements, especially in the area close to the wellbore (near R = 10 cm).

For the FR window (cf. Figure 62 C and D), however, significant discrepancies are observed between the computed and the measured profiles, with a drop near the wellbore for the measurements, not observed on the computations. This behavior could be due to neutron moderation in the hydrogen rich PVC plates, which are not present in the computation (cf. Figure 60). Indeed, a PVC plate is not a pure neutron absorber (like cadmium or gadolinium), which only increases Sigma as intended in these disturbance experiments. A PVC plate is also a neutron moderator.

It is worth recalling here that MCNP and GEANT4 correctly simulate measurements, as reported above in Figure 59, but in the future, Sigma disturbance experiments should be performed with pure absorbing materials like Cd or Gd sheets. The fact that this effect is not observed in the borehole time window (cf. Figure 62 A and B) is likely due to the greater sensitivity to thermalizing elements in the wellbore in this time gate (i.e., borehole fluids and cement), which reduces the sensitivity to hydrogen nuclei in the PVC.

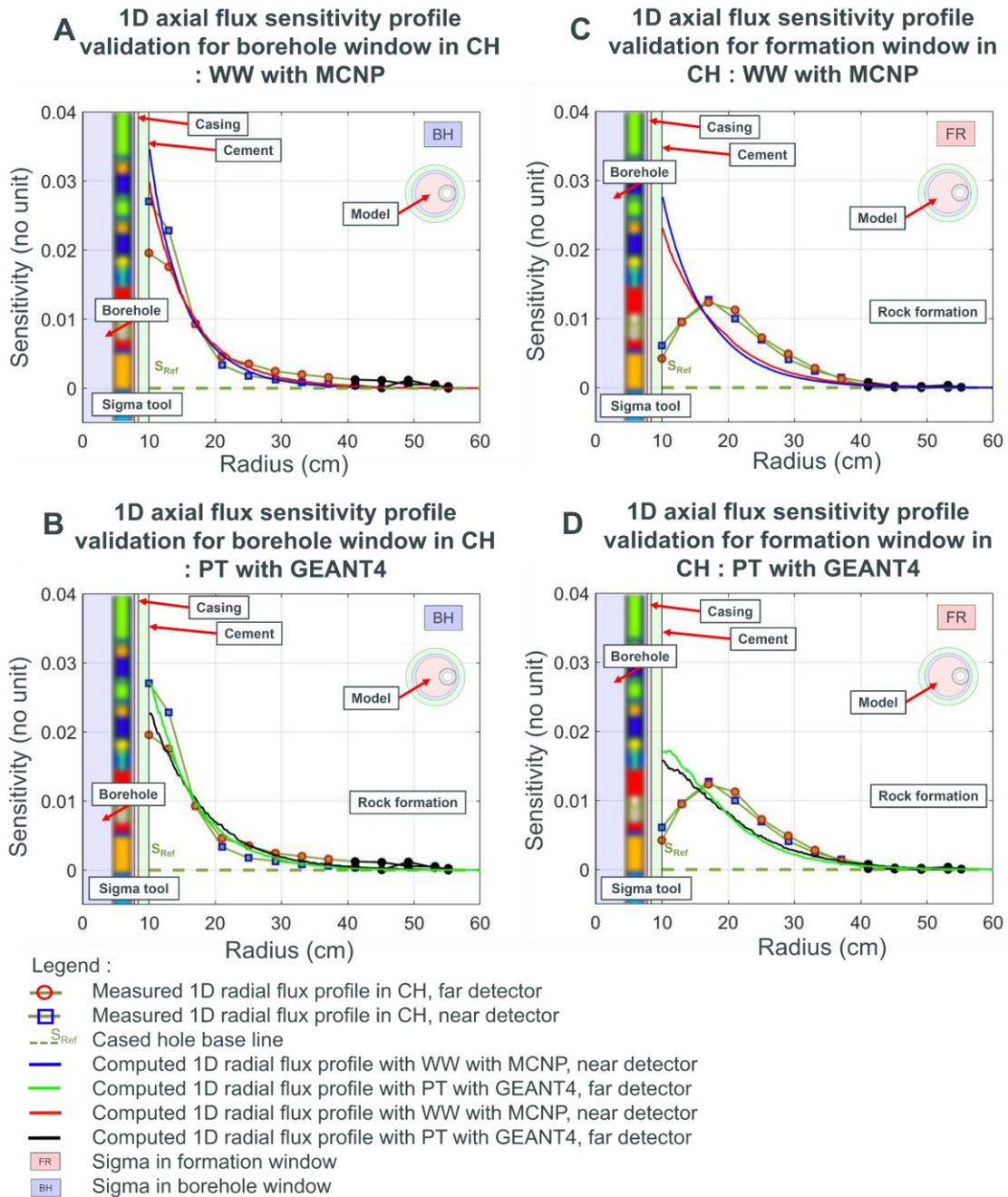


Figure 62: Comparison between the measured and computed 1D radial profiles of sensitivity for near and far detectors. All profiles (computed and measured) are segmented with the same number of samples (250 samples along the R axis). The sum of the sensitivity of each profile is equals to 1.

We tested a new experiment thanks to the Monte-Carlo simulation in MCNP. Rather to use a PVC plate made of hydrogen, carbon and chlorine, we only used pure chlorine inside the PVC volume i.e. the chemical composition of the PVC described in MCNP was replaced by 100 % chlorine. We kept for this simulation the same material density (about 1.35 g.cm^{-3}).

The Figure 63 shows the new flux sensitivity profile theoretically measured in a setup disturbed by a plate made of 100% chlorine. In doing so, we limit the diffusion effect and create a contrast in Sigma only

between the initial medium (i.e. the Henri IV limestone block) and the disturbed medium (i.e. the Henri IV limestone block with a chlorine plate introduced at different positions).

1D axial flux sensitivity profile validation for formation window in CH : PT with GEANT4

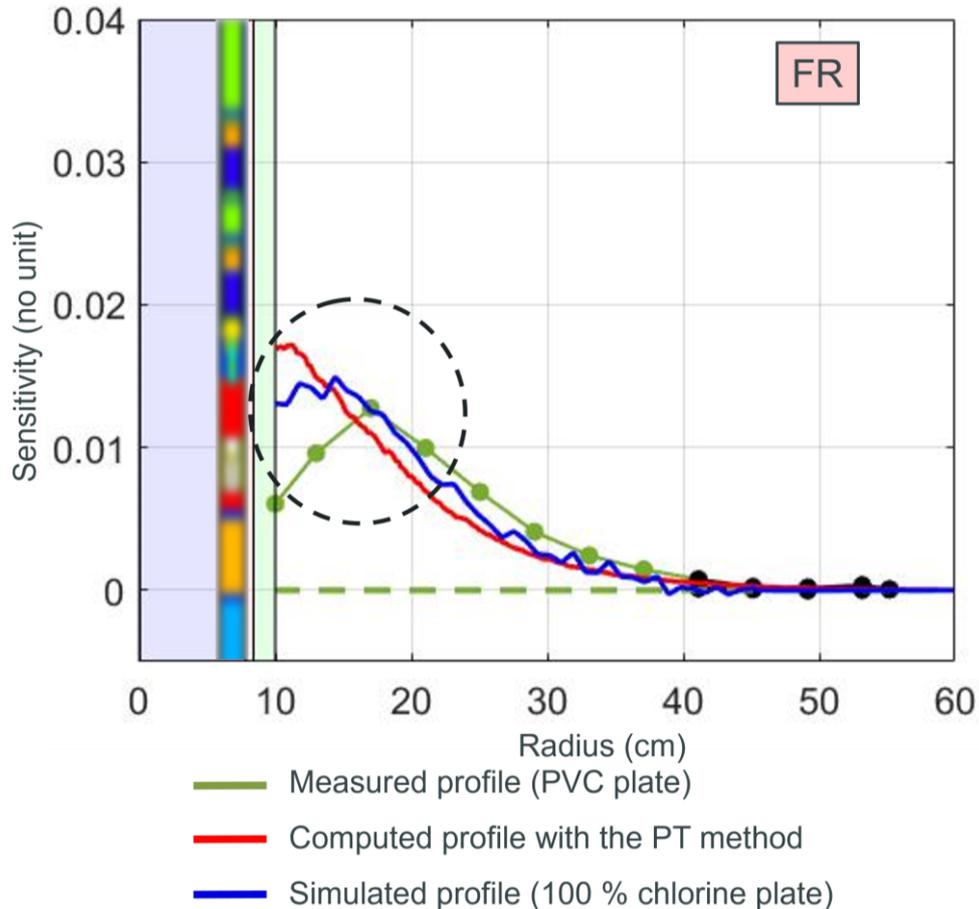


Figure 63: Comparison between the measured, simulated, and computed 1D radial sensitivity profiles for the near detector. The black dotted circle highlights the area with significant discrepancies.

The blue curve is the Monte-Carlo simulation with MCNP. It represents the theoretical measured profile (obtained through a hypothetical radial experiment using plates made of 100 % chlorine). The green curve is the measured profile obtained with the true radial experiment using PVC plates (chlorine plus hydrogen plus carbon). The red curve is the computation resulting from the integration of the 3D flux sensitivity function (computed with the PT method) around the borehole (Ω axis) and along the tool (Z axis). When we limit the diffusion effect by using a new material, the experiment (blue curve) matches the computation (red curve) much better than when using the previous material (green curve). This result helps to explain the discrepancies observed between the computation and the measurements for this radial experiment.

Owing to its overall better agreement with measurements, we prefer using GEANT4 FSF_{PT} in the followings, rather than MCNP FSF_{WW} . In addition, we perform in next part another comparison between GEANT4 sensitivity functions based on particle interactions or fluxes, in cased hole environment.

4.10 Cased hole sensitivity functions based on particle interactions or flux

This part aims to select the most relevant type of sensitivity functions (between ISF_{PT} and FSF_{PT} , both computed with GEANT4 and the PT method) for the predictions of Sigma logs in cased hole.

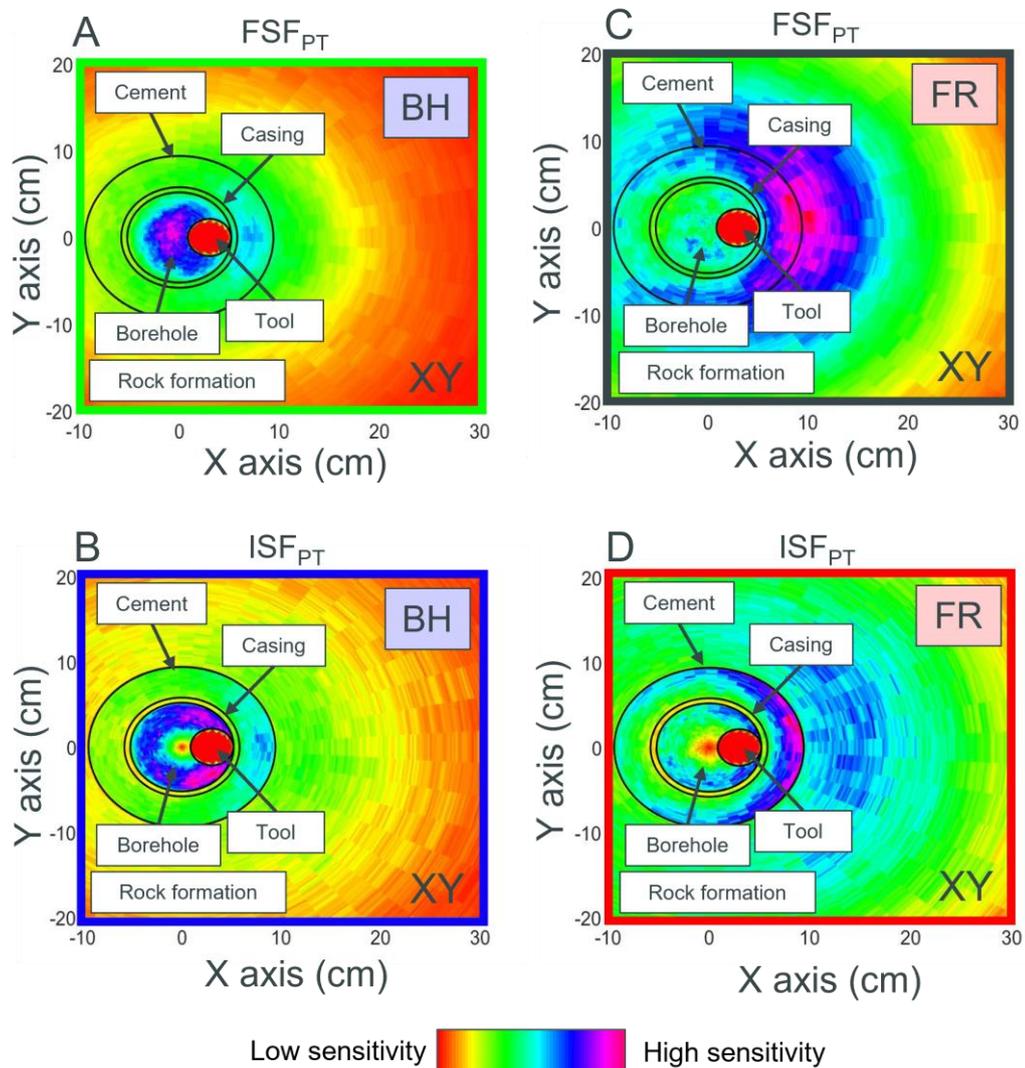


Figure 64: 2D projections of cased hole sensitivity functions obtained by integrating along the Z axis (depth) from 3D sensitivity functions. The 2D projections show the sensitivity inside the borehole, excluding the tool's contribution (the tool sensitivity is set to zero inside the tool, shown in red).

Figure 64 shows the 2D (R, Ω) projections of these 3D sensitivity functions (integration along the Z axis) for the far detector in a 6 mm thick casing with a 116 mm outer diameter (104 mm inner diameter casing), followed by a 36 mm thick cement. The total well diameter is 168 mm. The rock formation is a 10 PU limestone saturated with fresh water.

The PT method allows removing the tool contribution from FSF_{PT} and ISF_{PT} sensitivity calculations (the red zone inside the tool). In practice, the particle interactions (ISF_{PT}) or the neutrons flux (FSF_{PT}) in the tool are not considered, even if the tool remains described in the simulations with GEANT4. Indeed, the large flux and number of interactions inside the components of the tool, yield a huge sensitivity, which it

is mandatory to remove to enhance the contrast in the well and in the rock formation. This high sensitivity in the tool would introduce a constant shift (a baseline) reducing the sensitivity contrast between the other components, and consequently the quality of the log prediction.

The FSF_{PT} and the ISF_{PT} computed from the borehole window (BR in Figure 64) show a high sensitivity in the well and low sensitivity in the rock formation. Conversely, the FSF_{PT} and the ISF_{PT} computed from the formation window (FR) are low in the well and high in the rock formation. As already explained, neutrons undergoing late radiative captures (FR window) statistically interact more in the rock formation than neutrons making early radiative captures (BR window), because their lifetime before capture is significantly longer in limestone (about 7 CU) than in the water of the well (about 22 CU).

Figure 65 shows the FSF_{PT} and the ISF_{PT} 1D profiles projected according to the radial axis. We observe a clear different behavior between the FSF_{PT} and the ISF_{PT} . The profile based on thermal neutron flux (FSF_{PT} , green and black curves) does not present large sensitivity contrasts between the different well components (fluid, casing, cement and formation), contrary to that of elastic scattering interactions of thermal neutrons (ISF_{PT} , blue and red curves), which is clearly dropping in the casing and sharply increasing in cement, then dropping again in the rock formation.

Due to a sharper contrast of sensitivity between the wellbore components, we will see that the calibration of the FFM algorithms (using a large database of wellbore and formation configurations) is significantly improved with the ISF_{PT} (cf. Figure 66). The predictions vs. the simulations are also better using ISF_{PT} (cf. Figure 67). Therefore, we choose to keep this ISF_{PT} approach.

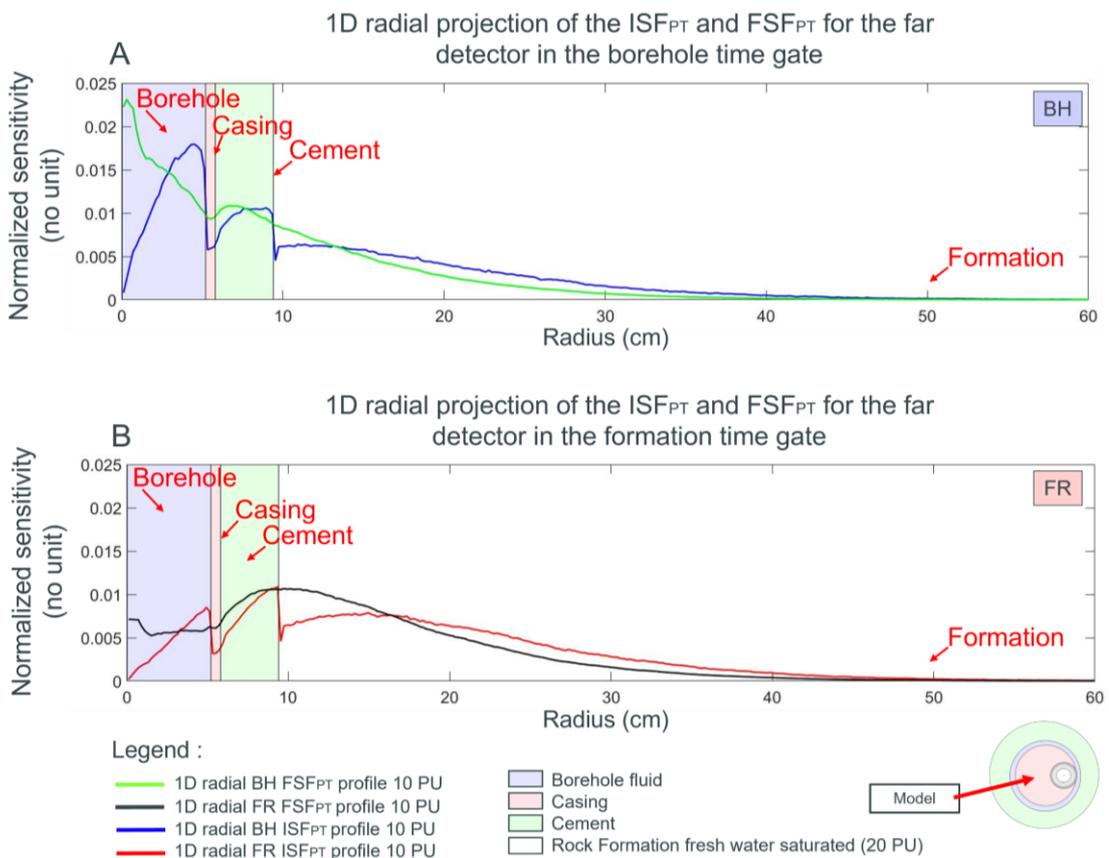


Figure 65: 1D radial profiles of sensitivity of ISF_{PT} and FSF_{PT} for the far detector of a neutron-gamma Sigma tool in a 10 PU limestone formation. The 1D projections show the sensitivity inside the borehole without the tool contribution.

4.11 Calibration of Fast Forward Modeling

In order to predict Sigma log data, the interaction sensitivity function is multiplied by a 3D numerical earth model (EM) containing petrophysical parameters in relation to the thermal neutron transport properties, such as the macroscopic absorption cross section (Sigma), the thermal neutrons diffusion length (Ld) and the bulk density (pb). These rock properties are calculated with the UTNuPro software (Montgomery *et al.*, 2016) from explicit knowledges on the geological environment and the well architecture. The ISF_{PT} and the EM (several 3D matrices) are constructed following the same cylindrical discretization around the well.

The equation (28) is a sum over an Hadamard product and leads to apparent values of Sigma (or similarly diffusion length and bulk density) called Sigma_{apparent} (Ld_{apparent} and pb_{apparent}).

$$Sigma_{apparent} = \sum_{j=1}^N EM_Sigma^j \times ISF_{PT}^j \quad (28)$$

Em_Sigma^j is the 3D numerical earth model (EM) containing the theoretical intrinsic Sigma values for each constituent (rock formation and fluid in open hole – borehole fluid, casing, cement and rock formation in cased hole), and ISF_{PT}^j is the 3D interaction sensitivity function computed in this numerical earth model.

Ijasan *et al.*, 2013a introduced the concept of formation parameter called Fp to predict open hole porosity logs with the FFM algorithm (Ijasan *et al.*, 2011 ; Ijasan *et al.*, 2013a). Luycx *et al.*, 2018 extended the Fp parameter to a neutron-gamma density tool in open hole. In this work we extend the neutron-gamma Sigma tool in cased hole. The FFM algorithms are based on the relationship between the apparent petrophysical data (Sigma_{apparent} Ld_{apparent} and pb_{apparent}) and the Sigma measured from the time decay spectra. In the FFM calibration phase, this relationship is established from a large number of MCNP simulations, each giving a value Sigma_{simulated} for a wide range of well and formation parameters described below.

The apparent petrophysical data are combined into a formation parameter Fp (dimensionless) defined in equation (29):

$$Fp = m1 * Sigma_{apparent}^{m2} + m3 * Ld_{apparent}^{m4} + m5 * \rho_{B_{apparent}} \quad (29)$$

And a polynomial function allows predicting Sigma from Fp according to equation (30).

$$Sigma_{predicted} = m6 \times Fp^2 + m7 \times Fp + m8 \quad (30)$$

m1 to m8 are empirical parameters obtained by minimizing the difference between MCNP simulated (Sigma_{simulated}) and FFM predicted (Sigma_{predicted}) Sigma values.

Figure 66 shows the polynomial fit linking Fp (calculated with the ISF_{PT} or the FSF_{PT}) to Sigma simulated with MCNP. As mentioned earlier, this regression is based on a large number of simulated cases (i.e. each point in Figure 66 in a homogeneous case) and their corresponding library of sensitivity functions. These simulated cases correspond to homogeneous rock formations in open and cased hole configurations. As the ISF_{PT} or the FSF_{PT} are simulated with GEANT4 and the Sigma values with MCNP, the numerical models (well architectures and rock formations) implemented in both codes are identical. This reference calibration library contains 8 well architectures, including 2 open hole cases (104 mm or 200 mm well diameter) and 6 cased hole cases. These last have 104 mm or 200 mm inner casing

diameters, both with a 6 mm thick casing but with a cement thickness of 0 mm, 16 mm or 36 mm. For these 8 well configurations, a homogeneous limestone lithology was tested with 4 porosities (0, 10, 20, 30 PU) and 3 salinities (0, 100, 200 kppm). The borehole was always filled with fresh water. We therefore performed 96 ISF_{PT} computations with GEANT4 and 96 Sigma calculations (from the time decay spectra) with MCNP in view to build the regressions presented in Figure 66.

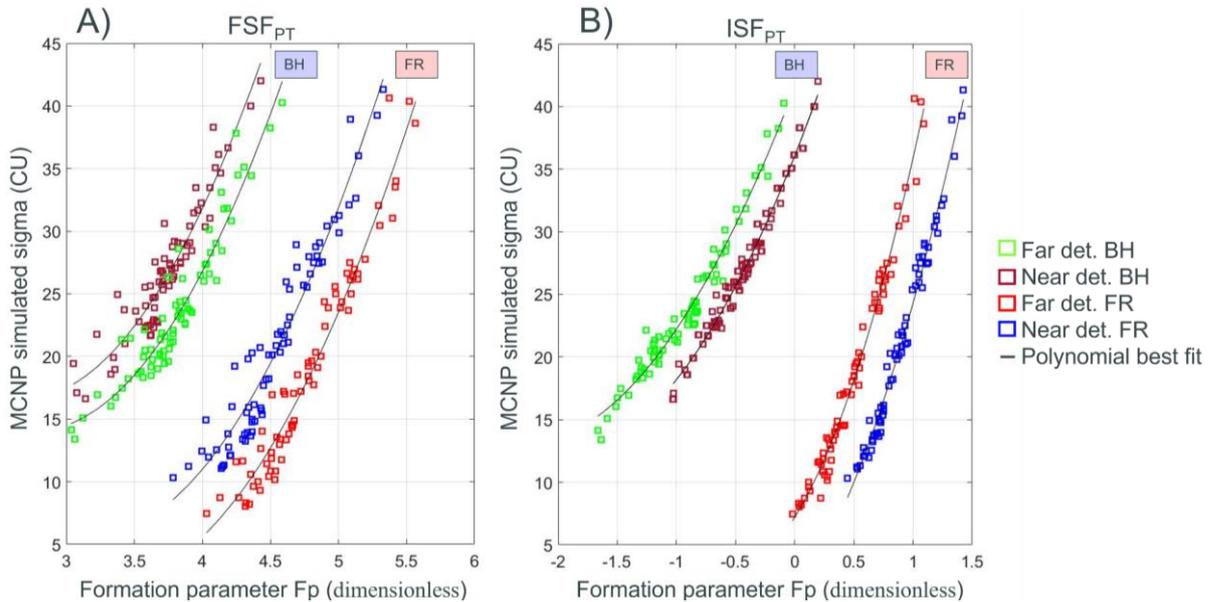


Figure 66: Two order polynomial regression functions for the near and far detectors.

Figure 67 presents the predicted Sigma with the FFM algorithms vs. the Sigma calculated from the simulated time decay spectra obtained by simulation with MCNP. Predictions are better using sensitivity functions computed with the interactions (ISF_{PT}, Figure 67 B) rather than the flux (FSF_{PT}, Figure 67 A), for both near and far detectors.

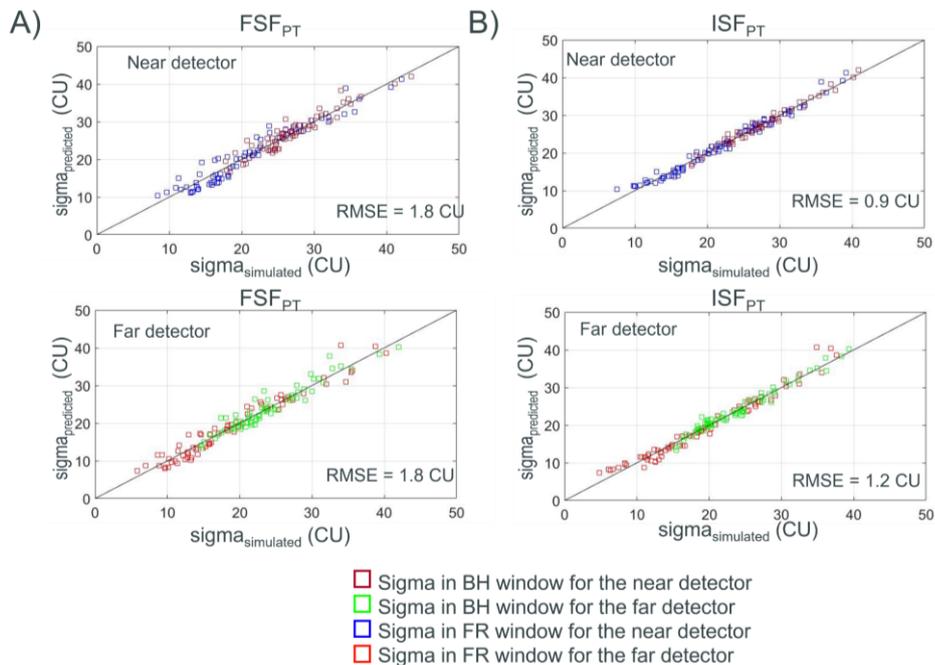


Figure 67: Sigma predicted with the FFM algorithms vs. Sigma simulated with MCNP.

4.12 Experimental validation of Sigma log predictions

4.12.1 Calibration facility measurements

The pure standard rock blocks presented in Figure 68 consist of very homogenous limestone in terms of porosity and geochemistry (Chuilon *et al.*, 2019). The borehole is drilled in 200 mm and filled with fresh water. The FFM predictions of Sigma logs reported in Figure 68 are performed in standards rock block called LUNEL (porosity of 1.02 PU), VILHONNEUR CLASSIQUE (10.61 PU), ½ FERME DE CAEN (23.46 PU) and ESTAILLADES (30.25 PU), all saturated with fresh water.

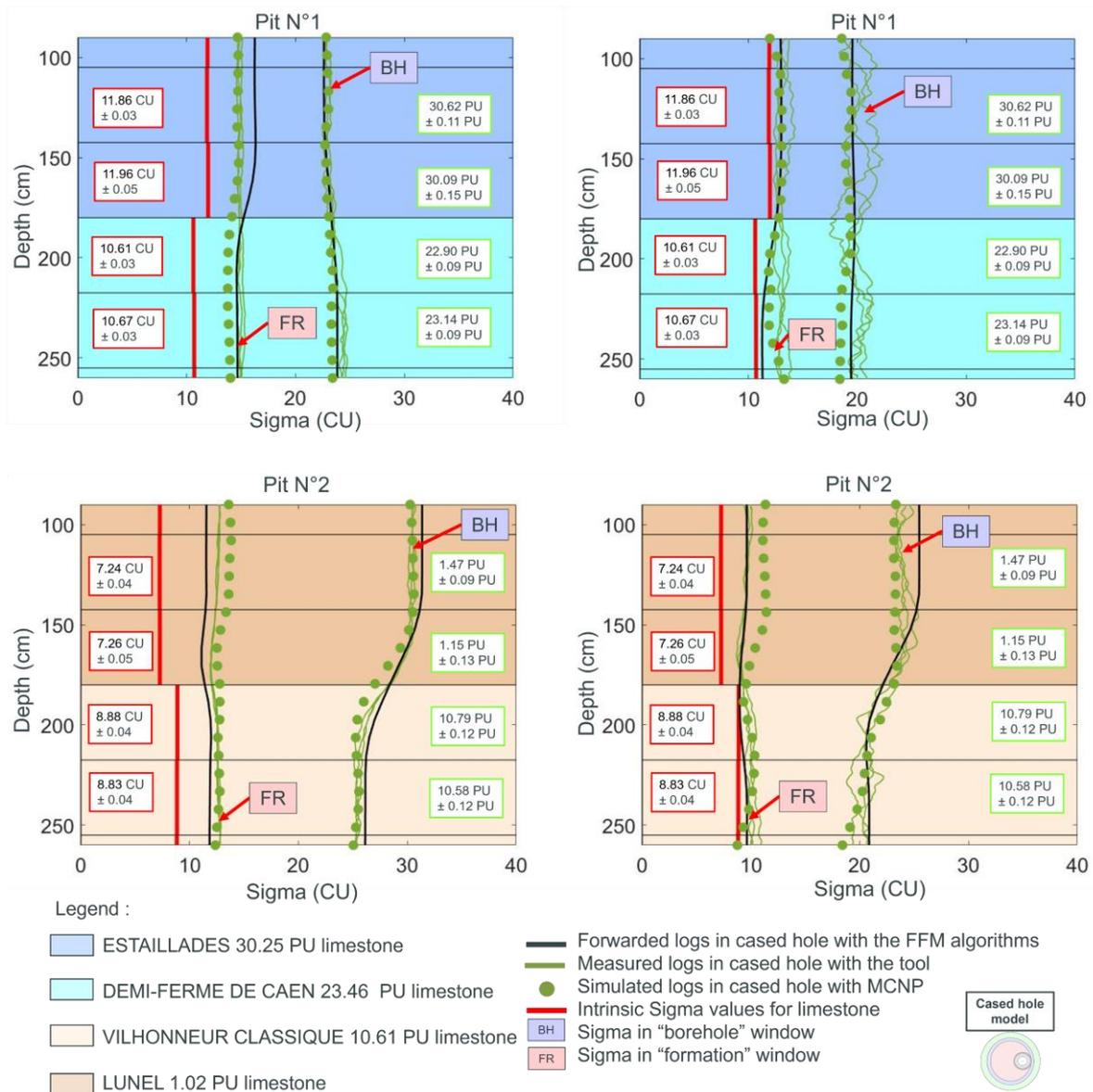


Figure 68: Predictions of Sigma logs obtained with near and far detectors for cased hole configurations in standard wells No. 1 and No. 2.

Pit N°1 (cf. Figure 68) consists of ESTAILLADES over ½ FERME DE CAEN rock standards and pit N°2 of LUNEL over VILHONNEUR CLASSIQUE. As we precisely know the porosity and therefore the intrinsic Sigma (cf. red lines in Figure 68) of each rock block from laboratory analyses on core samples, we can check the ability of the FFM algorithm to predict Sigma logs in cased hole. Figure 68 shows that FFM predictions (continuous black curves) are in quite good agreement with measurements (continuous green curves), as well as MCNP simulations (green circles), both in BH and FR windows.

A significant shift is observed between formation Sigma and borehole Sigma values (the so-called diffusion effect), which is well represented in both Monte-Carlo simulations and predictions. This shift observed in the borehole window could be used in a multi-physics inversion, with other nuclear logs such as litho-density and porosity measurements, to estimate a wellbore model (e.g. a cement thickness and a cement quality).

4.12.2 Production well measurements

This part aims at testing the FFM algorithms in a geological interpretation workflow of a production well. Figure 69 shows the FFM predictions (A3 and B3 panels) in a reservoir zone of a field well, in view to confirm the saturation status of the reservoir and verify that no more hydrocarbons remain inside porosity (about 0 % HC saturation).

The reservoir zone consists of a 20 PU sandstone saturated with brine around 100 kppm. The salinity of the borehole fluid is about 60 kppm. The casing outer diameter is 177 mm and the cement thickness is 19 mm. The total borehole size is about 215 mm (8.5'). A dedicated ISF_{PT} library was built with GEANT4 for this application case. As the simulated tool is not exactly the one effectively used in the field, the interpretation of the predicted logs with the FFM algorithms is just qualitative. Moreover, an uncertainty remains on water salinity in the formation due to water flooding. We also implemented in the FFM algorithms, the simplified earth models (EM) of Figure 69 A2 and B2, instead of the initial geological EM (continuous interpretations of Figure 69 A1 and B1) based on open hole logs acquired directly after the exploration phase.

In panel A3, the light blue area is the difference between Sigma values measured on the far detector (left orange curve, smaller Sigma) and near detector (right blue curve, larger Sigma), which is associated with the neutron scattering effect also called diffusion effect. The Sigma logs were acquired after a long production period and a reservoir flooding with brine.

The first scenario A tested with the FFM algorithms is an earth model with the reservoir in its original state before exploitation with hydrocarbons (HC) between 4473 and 4476 m. The second scenario B is a brine flooded reservoir without HC remaining in the porosity.

FFM predictions match the log measurements between 4482 m and 4478 m, over the water-bearing zone for both scenarios. However, from 4476 m to 4473 m, the FFM algorithms significantly underestimate the measured Sigma with scenario A, while scenario B is in good agreement. This indicates that this area is probably not filled with hydrocarbons, as a water bearing formation has a higher capture Sigma than hydrocarbon-bearing rock. Although yet qualitative, this interpretation shows the capability of the FFM algorithms to interpret real reservoir logs in cased hole.

Fast Forward Modeling vs. field measurements

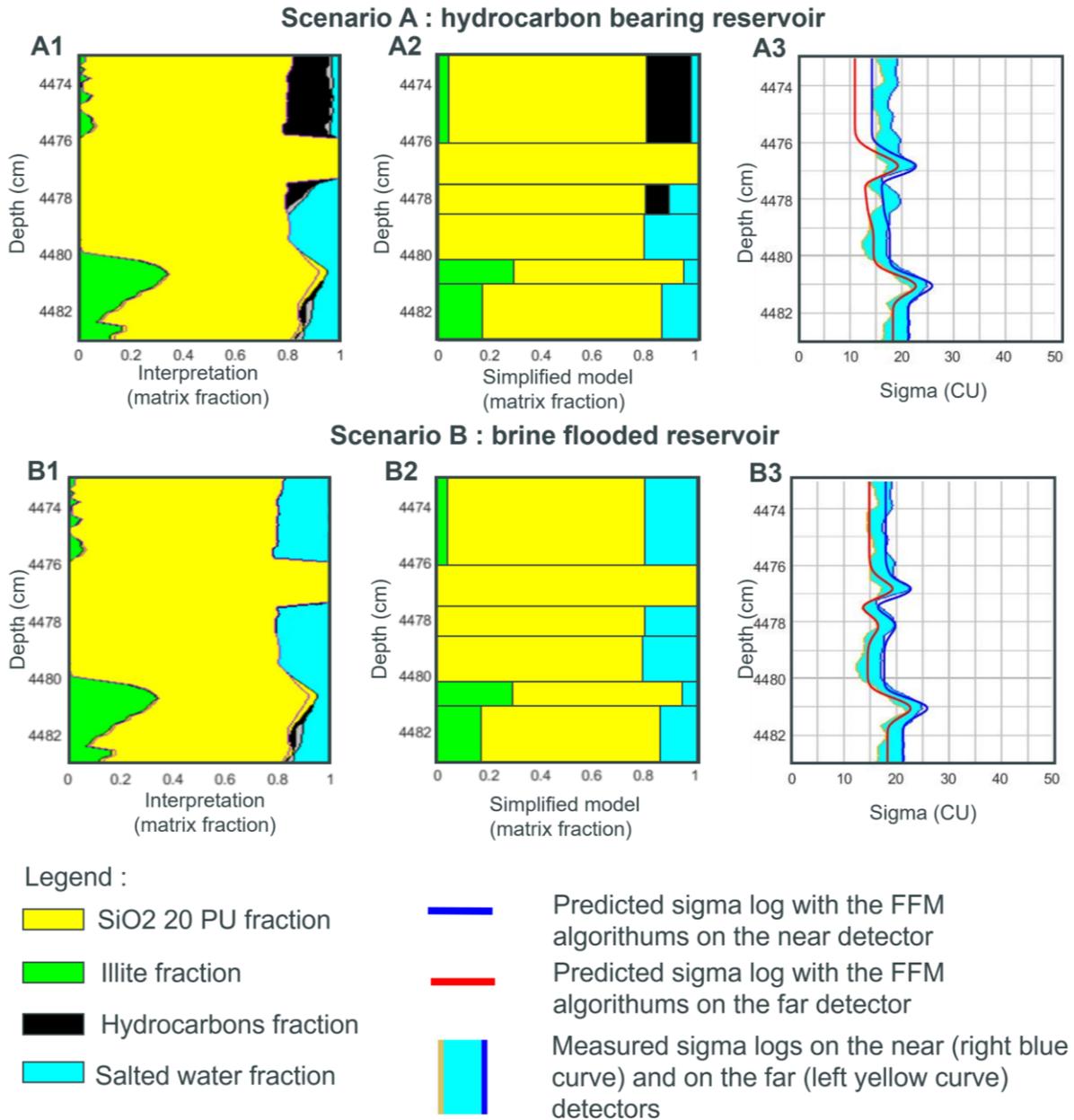


Figure 69: Qualitative comparison between measured Sigma and predicted Sigma with the FFM algorithms in cased hole for two saturation scenarios: virgin (A) and water flooded (B) states.

4.13 Conclusion

This work allows to validate the sensitivity function concept in cased hole environment, and its application to Sigma logs prediction by Fast-Forward Modeling (FFM) algorithms for a neutron-gamma Sigma tool. Qualification is based on disturbance measurements performed in a calibration facility, and on a very first application to field production data. The axial and radial disturbance experiments performed and simulated with the two transport codes show a good agreement between measured and simulated Sigma logs for both MCNP and GEANT4.

Then, we compared two methods for the computation of sensitivity functions, the first one based on the Weight Window with MCNP, the other one based on the Particle Tracking with GEANT4. The comparison of computed and measured 1D flux sensitivity profiles along the vertical (Z) axis showed a satisfactory agreement with both methods, but the radial profile along the R axis is better reproduced using the Particle Tracking.

We performed an additional comparison of sensitivity functions between the ones based on particle interactions (ISF) and the ones of based on flux (FSF). The comparison shows that the ISF better render the contributions of each constituent of the wellbore (casing, cement, formation and borehole fluid) than the FSF. As a result, the calibration of the FFM algorithms, based on a large number of MCNP simulations for a wide range of wellbore and rock formation characteristics, fits globally better with the ISF than the FSF.

Finally, we observe a satisfactory agreement between Sigma logs predicted with the FFM algorithms extended to cased hole, the Sigma logs simulated with MCNP, and the Sigma logs measured with the neutron-gamma tool in different standard rock blocks. We also performed a first interpretation of a real production well showing that the Fast-Forward Modeling can valuably be used to predict the presence or absence of hydrocarbons from a comparison between predicted and measured Sigma logs.

To go a step further, the calibration database of sensitivity functions should be extended to more cases e.g. with clay, with hydrocarbons, more thicknesses of cement (starting from 0 to 40 cm, with an increase of 2 cm between cases for instance), and different cement compositions (well cemented with 100 % cement, badly cemented with 50 % water 50 % cement, not cement with water or gas).

The next prospect will be to extend the qualification of the FFM based on sensitivity functions to other nuclear measurement tools like C/O and litho-density. Ideally, a sensitivity function approach mixing different nuclear physics could be tested in a real production well, in collaboration with an oil and gas logging company. The ultimate objective is to realize a multi-physics inversion in order to improve the quantitative interpretation of cased hole wells, including wellbore elements as unknown parameters to be determined.

Conclusion générale

Nous avons vu dans ce travail de thèse que les mesures en forage, en particulier nucléaires, sont essentielles pour caractériser l'environnement du puits et de la formation rocheuse. Elles sont considérées comme quantitatives en conditions de puits ouvert et permettent de déterminer, après application de corrections d'environnement (taille du puits, fluides de remplissage, etc.), les grandeurs pétrophysiques intrinsèques de la formation rocheuse comme la porosité, la masse volumique, la saturation en hydrocarbures, etc. Elles sont cependant qualitatives lorsqu'un tubage est ajouté et que le puits est cimenté, l'acquisition se faisant au travers de ces éléments qui atténuent fortement le signal et impactent la détermination des grandeurs pétrophysiques d'intérêt. La diversité des cas de puits tubés est telle (épaisseur du ciment et du tubage, qualité de la cimentation, salinité et densité du fluide du puits, etc.) qu'aucune correction d'environnement standard ne permet actuellement de corriger ces données.

Nous avons présenté au chapitre 1 les différentes sondes nucléaires utilisées en puits pétrolier (ouvert et tubé):

- l'outil « neutron-neutron de porosité » qui consiste à estimer, via un comptage total avec un détecteur ^3He des neutrons rétrodiffusés émis par une source AmBe, la porosité apparente aussi appelée index hydrogène ;
- l'outil « gamma-gamma de litho-densité et de facteur photoélectrique », dans lequel la mesure avec un détecteur NaI(Tl) du spectre en énergie des rayonnements gamma rétrodiffusés émis par une source ^{137}Cs permet d'estimer la masse volumique de la roche (dans la zone à haute énergie du spectre) et ses propriétés d'absorption photoélectrique (dans la zone à basse énergie du spectre), représentatives de la lithologie (numéro atomique apparent) ;
- l'outil « neutron-gamma Sigma » qui mesure avec un détecteur NaI(Tl) la décroissance du signal des rayonnements gamma induits avec un générateur de neutrons pulsé, laquelle permet une estimation de la section efficace macroscopique d'absorption et fournit donc une autre information sur la lithologie (absorbants neutroniques) ;
- l'outil « neutron-gamma C/O » qui consiste à mesurer, avec un détecteur NaI(Tl) ou LaBr, le ratio carbone sur oxygène à partir du spectre en énergie des rayonnements gammas induits avec un générateur de neutrons pulsé, ce qui permet une estimation de la saturation de la formation en hydrocarbures (ce ratio est aussi sensible à la lithologie).

L'interprétation des diagraphies, quand les grandeurs pétrophysiques délivrées par les mesures nucléaires sont éloignées des valeurs intrinsèques de la formation rocheuse (comme c'est le cas en puits tubé), pose un réel problème aux géologues pétroliers. Plutôt que de corriger les mesures en puits tubé au cas par cas, ce qui nécessiterait de connaître précisément les caractéristiques des fluides, tubages et de la cimentation pour chaque puits et à chaque profondeur, l'approche développée dans cette thèse est de conserver ces biais induits par le tubage et le ciment (i.e. les différences entre les grandeurs pétrophysiques mesurées dites apparentes et les grandeurs intrinsèques), en vue de déduire ces dernières via une inversion multi-physique. L'inversion multi-physique nécessite de générer des diagraphies nucléaires reproduisant ces biais (aussi appelés effets de puits) de manière rapide, qui seront ensuite comparées aux mesures réelles en puits tubé. Nous avons vu au chapitre 1, que la prédiction rapide des diagraphies nucléaires avec les algorithmes de prédiction rapide (FFM, *Fast Forward Modeling*) actuellement utilisés pour les cas de puits ouverts, reposent sur des fonctions de sensibilité qui traduisent la dépendance de la mesure à l'environnement de puits en 3D.

Cette approche a été étendue aux puits tubés et validée expérimentalement grâce à ces travaux de thèse menés par le groupe TotalEnergies en collaboration avec le Laboratoire de Mesures Nucléaires du CEA de Cadarache. De plus, une nouvelle approche de calcul des fonctions de sensibilité basée sur le suivi individuel des particules (*Particle Tracking* PT) avec le code GEANT4 a été développée pour améliorer l'approche actuelle, basée sur des calculs statistiques de fenêtres d'importances (*Weight Windows* WW) avec le code MCNP. Ces nouvelles approches ont été validées pour la prédiction des diagraphies nucléaires en puits tubé.

Le chapitre 2 a permis de comparer MCNP et GEANT4 pour des applications de géosciences. MCNP est le code de simulation utilisé dans l'industrie pétrolière, mais il ne donne pas accès facilement aux informations primaires telles que les coordonnées des interactions (neutron ou gamma) et les énergies déposées. GEANT4 permet d'accéder plus facilement à ces informations et donc d'appliquer la méthode du suivi de particule au calcul des fonctions de sensibilité, mais il n'avait pas été largement testé et validé pour ce type de simulation Monte-Carlo de géosciences à basse énergie (< 20 MeV). Des modèles simples sphériques puis des modèles plus complexes de sondes génériques ont été testés dans MCNP et GEANT4 pour les physiques neutron-neutron, gamma-gamma et neutron-gamma. Les codes de transport ont été évalués dans les modèles sphériques avec des éléments purs (H, O, C, Mg, Si, Ca) et dans les modèles de sondes génériques avec des formations géologiques avec une porosité de 20 PU de type calcaire (CaCO_3), dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et grès (SiO_2). Les résultats montrent un très bon accord en gamma-gamma (écarts relatifs de l'ordre du pourcent) et assez satisfaisant en neutron-neutron (écarts d'environ 20 %) lorsque les effets moléculaires sont pris en compte dans le transport des neutrons thermiques. Cependant, des différences significatives apparaissent pour la physique d'activation neutron-gamma avec certaines compositions chimiques et certaines bandes d'énergie des spectres gamma induits. Des corrections dans GEANT4 sont nécessaires pour filtrer les rayonnements gamma simulés non physiques et qui ne sont pas observés expérimentalement (comme plusieurs raies pour le carbone), ce qui permet d'améliorer les spectres finaux, mais des écarts importants subsistent (notamment pour les rayonnements induits sur les noyaux de calcium). Ces écarts ne sont néanmoins pas bloquants à ce stade car les fonctions de sensibilité calculées avec les deux méthodes (PT et WW) ne sont pas utilisées de manière quantitative, mais qualitative pour traduire l'influence relative des mailles de la géométrie les unes par rapport aux autres.

Le chapitre 3 est le cœur du travail de thèse et porte sur la qualification des modèles et méthodes de simulation grâce à des mesures réalisées dans un centre d'étalonnage avec un outil neutron-neutron de porosité hydrogène, dans un environnement de puits ouvert ou tubé. Il a d'abord permis de qualifier les deux modèles numériques GEANT4 et MCNP, en confrontant les taux de comptages simulés à ceux acquis en centre d'étalonnage lors de diagraphies avec des perturbations introduites dans des blocs étalons de roche. La confrontation montre un bon accord entre les taux de comptages mesurés et simulés, aux pertes près dues au seuil de coupure du bruit de fond dans l'électronique. On note néanmoins un écart de l'ordre de 20 % entre MCNP et GEANT4, comme déjà noté au chapitre 2. Puis les deux méthodes de calcul des fonctions de sensibilité (PT avec GEANT4 et WW avec MCNP) ont pu être validées en exploitant les expériences de perturbation. La comparaison entre les profils 1D normalisés des fonctions de sensibilité, calculés et mesurés, montre un bon accord même s'il faut rappeler que l'on ne compare pas exactement les mêmes fonctions: celles calculées correspondent à un milieu homogène alors que celles mesurées correspondent à des plaques minces de polyéthylène pour créer une perturbation dans les blocs étalons, d'où l'importance des normalisations décrites en détail au chapitre 3 (notamment au volume des hétérogénéités pour l'expérience radiale). Pour les puits tubés, nous avons montré que la fonction de sensibilité basée sur les interactions des particules (ISF_{PT}) permet de mieux retranscrire la contribution des éléments du modèle sur les mesures, par rapport à celle basée sur le flux (FSF_{PT}). Des fonctions ISF_{PT} ont donc été implémentées dans les algorithmes de FFM (*Fast Forward Modeling*), pour les puits ouverts ou tubés. Les prédictions se sont révélées en bon accord avec les diagraphies

expérimentales acquises en centre d'étalonnage. On observe ainsi un accord satisfaisant entre les porosités prédites et celles mesurées en puits ouvert, ou celles simulées avec MCNP en puits tubé car dans ce dernier cas il n'a pas été possible d'implémenter expérimentalement une cimentation symétrique. Comme attendu, les algorithmes prédisent une surestimation de la porosité (un biais) dans tous les cas de puits tubés pour les différentes épaisseurs de ciment testées, quand on n'effectue pas de correction d'environnement, i.e. de correction de l'atténuation du tubage et du ciment. Au lieu d'effectuer ce type de correction, comme c'est le cas habituellement dans l'interprétation des mesures diagraphiques, on souhaite en effet à terme exploiter ce biais dans l'inversion multi-physique, car il est porteur d'information sur l'environnement de puits.

Le chapitre 4 sur l'outil d'activation neutron-gamma Sigma montre des résultats comparables à ceux de l'outil neutron-neutron étudié au chapitre 3, notamment le fait qu'utiliser le suivi de particule à la place des fenêtres de poids permet de mieux reproduire les profils de sensibilité, puis de mieux prédire les diagraphies lorsque l'on considère les rayonnements gamma induits dans une fenêtre en temps spécifique après l'impulsion du générateur. De plus, ce chapitre 4 aborde pour la première fois une interprétation de diagraphies dans un puits tubé réel dont la production doit être monitorer (contrôle du contact huile-eau), pour vérifier la saturation en hydrocarbures. Une comparaison de la mesure neutron-gamma Sigma, réalisée derrière le tubage, avec deux prédictions diagraphiques des algorithmes de FFM pour deux modèles de terrain, l'un avec la porosité saturée en hydrocarbures, l'autre avec la porosité saturée en saumure (eau salé), a permis d'éliminer l'hypothèse d'une saturation résiduelle en hydrocarbures. En effet, la prédiction basée sur ce 1^{er} scénario diffère nettement de la mesure alors que le 2^{ème} scénario conduit à un très bon accord, confirmant la saturation à 100 % en eau de cette zone réservoir.

En conclusion, cette thèse a permis de mettre au point et de valider, grâce à de nombreuses simulations et mesures expérimentales en centre d'étalonnage, une nouvelle méthode de calcul des fonctions de sensibilité basée sur les interactions de particules plutôt que sur leur flux. Elle permet d'améliorer nettement la sensibilité aux différents éléments de l'environnement (fluides, tubage, ciment) et elle a donc été utilisée pour établir une nouvelle base de calibration numérique, basée sur des calculs MCNP (taux de comptage) et GEANT4 (fonctions de sensibilité) dans de nombreuses conditions d'environnement de puits. L'utilisation de cette bibliothèque de calibration dans les algorithmes de FMM étendus aux puits tubés, pour deux outils nucléaires (porosité hydrogène neutron-neutron et section efficace d'absorption Sigma neutron-gamma), a montré un bon accord entre les diagraphies prédites et celles mesurées en centre d'étalonnage, et a permis d'interpréter qualitativement des diagraphies dans un puits tubé réel pour estimer son niveau de saturation en hydrocarbures ou en saumure. Ceci ouvre la possibilité de l'utilisation de cette nouvelle approche de calcul des fonctions de sensibilité pour l'inversion multi-physique, comme nous le développons dans la partie suivante sur les perspectives de cette thèse.

Perspectives

La méthode de calcul des fonctions de sensibilité basée sur le suivi de particule, développée dans le cadre de cette thèse, offre de nombreuses perspectives d'amélioration de l'interprétation des diagraphies en puits tubé, mais elle reste à valider pour d'autres outils employant des mesures nucléaires non étudiés ici:

- les outils gamma-gamma de litho-densité qui utilisent le nombre de coups à basse et haute énergie dans le spectre gamma mesuré. Pour chacune de ces fenêtres en énergie, on cherchera à déterminer les lieux d'interaction des photons contribuant à leur taux de comptages respectif ;
- les outils neutron-gamma du ratio C/O, qui réalisent par détecteur, un ratio de taux de comptage gamma dans les deux fenêtres en énergie associées respectivement à l'oxygène et au carbone. On cherchera à déterminer les lieux d'interaction des neutrons à l'origine des photons contribuant à chacune de ces fenêtres ;
- les outils neutron-gamma « *burst ratio* » et « *capture ratio* » qui réalisent respectivement un ratio de comptage total gamma pendant et après l'impulsion du générateur, entre les détecteurs proche et lointain. On cherchera à déterminer les lieux d'interaction des neutrons à l'origine des photons contribuant au signal mesuré dans les fenêtres temporelles correspondantes ;
- les outils neutron-gamma basés sur une déconvolution de l'ensemble du spectre gamma induit. On sélectionnera le parcours des neutrons ayant généré des rayonnements gamma pendant ou après l'impulsion du générateur ;
- sans oublier les outils de mesure gamma passive, de comptage total ou spectrométriques, où on cherchera pour les seconds à déterminer les lieux d'interaction des rayonnements gamma en fonction de l'énergie déposée dans le détecteur, i.e. dans différentes fenêtres en énergie associées à l'uranium, le thorium ou le potassium du spectre gamma.

Cette nouvelle méthode offre aussi de la modularité avec la possibilité de recalculer des fonctions de sensibilité avec différentes valeurs de fenêtre en temps ou en énergie. Celles-ci peuvent en effet être adaptées en fonction des différents outils des contracteurs parapétroliers (par exemple avec des durées d'impulsion du générateur plus ou moins longues) ou de l'environnement de mesure (par exemple élargissement des fenêtres en temps pour mesurer les pentes de décroissance de l'outil Sigma, ou de celles en énergie dans l'outil C/O, dans les deux cas pour améliorer la statistique), sans refaire des simulations Monte-Carlo, mais à partir des données brutes obtenues avec GEANT4. La méthode PT pourrait être aussi testée avec MCNP en utilisant l'option *ptrack* (*Particle Tracking*) ou avec d'autres codes Monte-Carlo de transport de particules comme PHITS (Sato *et al.*, 2023).

Ensuite, en ce qui concerne la prédiction des diagraphies en puits tubé, on pourra principalement chercher à améliorer:

- l'approximation des fonctions de sensibilité à l'interface géologique avec l'emploi de modèles comme les algorithmes LIR (*Linear Iterative Refinement*, Mendoza *et al.*, 2010a, Mendoza *et al.*,

2010b) ou DFD (*Diffusion Flux Difference*, Ijisan *et al.*, 2012, Ijisan *et al.*, 2013a) ou GFD (*Gamma Flux Difference*, Luyck *et al.*, 2019) ;

- la forme analytique du paramètre de formation composite F_p calculé à partir des longueurs de ralentissement et de diffusion L_d et L_s et la densité bulk ρ_b (pour l'outil neutron-neutron de porosité) ou calculé à partir de la longueur de diffusion L_d , la densité bulk ρ_b et la section efficace macroscopique d'absorption Σ (pour l'outil neutron-gamma Σ). Le paramètre F_p pourrait aussi être calculé à partir d'une section efficace d'interaction moyenne (par exemple de diffusion élastique et inélastique ou d'absorption, en fonction de la physique) qui dépendrait dans chaque maille, de l'énergie moyenne (avant interaction) des neutrons qui ont contribué à la mesure ;
- la régression polynomiale permettant de bâtir l'étalonnage FP vs. $\log(CPS)$ ou FP vs. Σ ;
- la bibliothèque numérique de calibration en l'élargissant à différents outils, à une large gamme de lithologies, de saturations en hydrocarbures, de salinités, de porosités et surtout de tailles de puits, d'épaisseurs de ciment et de qualités de cimentations (par exemple une bonne cimentation avec 100 % de ciment, une mauvaise cimentation avec 50 % d'eau et 50 % de ciment, ou encore pas de ciment, mais 100 % de gaz ou d'eau).

Par ailleurs, en vue d'une inversion multi-physique comprenant des diagraphies nucléaires, mais aussi acoustiques, électromagnétiques, électriques, etc., il reste à étudier le couplage des informations complémentaires apportées par ces différents outils, notamment sur l'environnement de puits comme les fluides, l'épaisseur et la nature du tubage, la qualité de la cimentation, etc. (Zhang *et al.*, 2019; Kessler *et al.*, 2011; Govil *et al.*, 2020).

Il serait intéressant de tester les approches déjà étudiées par l'Université du Texas à Austin sur ce sujet. Mendoza *et al.*, 2012 combinent des données 1D (masses volumiques) et 2D (image de densité) d'un outil de litho-densité LWD (*Logging While Drilling*) pour améliorer l'interprétation des diagraphies de masse volumique dans des puits à fort pendage (HA, *High Angle*) ou dans des puits horizontaux (HZ, *Horizontal*), en particulier pour réduire les effets de couches minces (*shoulder-bed effect*), i.e. quand les strates sont plus fines que la résolution intrinsèque verticale de l'outil (i.e. la distance source-émetteur).

Ijisan *et al.*, 2013b présentent une méthode d'inversion permettant de lier les mesures LWD nucléaires (masse volumique, porosité hydrogène, PEF, mesure gamma passive) avec les mesures LWD de résistivité (*array propagation*), toujours dans le but d'améliorer l'interprétation des diagraphies nucléaires et de résistivité de puits HA/HZ. Les mêmes algorithmes de prédiction rapide (FFM) que ceux utilisés pour les mesures nucléaires sont utilisés, mais pour les outils de résistivité. L'inversion multi-physique consiste à prédire les diagraphies, les comparer aux mesures et construire un modèle géologique en se servant des cas présents dans la base d'étalonnage.

La Figure 70 présente par exemple, pour un puits ouvert, une comparaison entre une interprétation conventionnelle et par inversion. Les données « conventionnelles » affichées (courbes rouges de porosité totale, saturation en eau, densité de grain, saturation en hydrocarbures et le modèle du panneau b), sont déjà des interprétations par des spécialistes géophysiciens en combinant les données issues des différentes sondes, nucléaires ou non. Pour obtenir le modèle de puits par inversion multi-physique (cf. Figure 70 a), Ijisan *et al.*, 2013b prédisent des diagraphies nucléaires et de résistivité avec les algorithmes de FFM puis les comparent aux mesures réelles afin de définir, par inversion, les modèles géologiques de la base d'étalonnage qui minimisent ces écarts, aux différentes profondeurs. C'est la raison pour laquelle, le résultat de l'inversion n'est pas continu, contrairement à l'interprétation

conventionnelle qui est basée sur un bilan matière (entre roche, pores et fluides). Les créneaux de l'inversion (cf. Figure 70 a) sont dus au nombre fini de modèles de terrain disponibles dans la base de données. L'intérêt de faire une telle inversion est, d'une part, de bien distinguer dans l'interprétation géologique les différentes strates correspondant aux différents faciès géologiques, et d'autre part, d'automatiser un processus qui est actuellement en partie manuel, le géologue ajustant des paramètres qui sont en fait les corrections d'environnement: taille du puits, épaisseur de la gangue de boue le long des parois du puits (*mudcake*), type de boue de forage dans le puits, salinité du fluide dans la formation rocheuse, densité et porosité de la roche, lithologie, proportion d'argile dans la matrice rocheuse, etc.

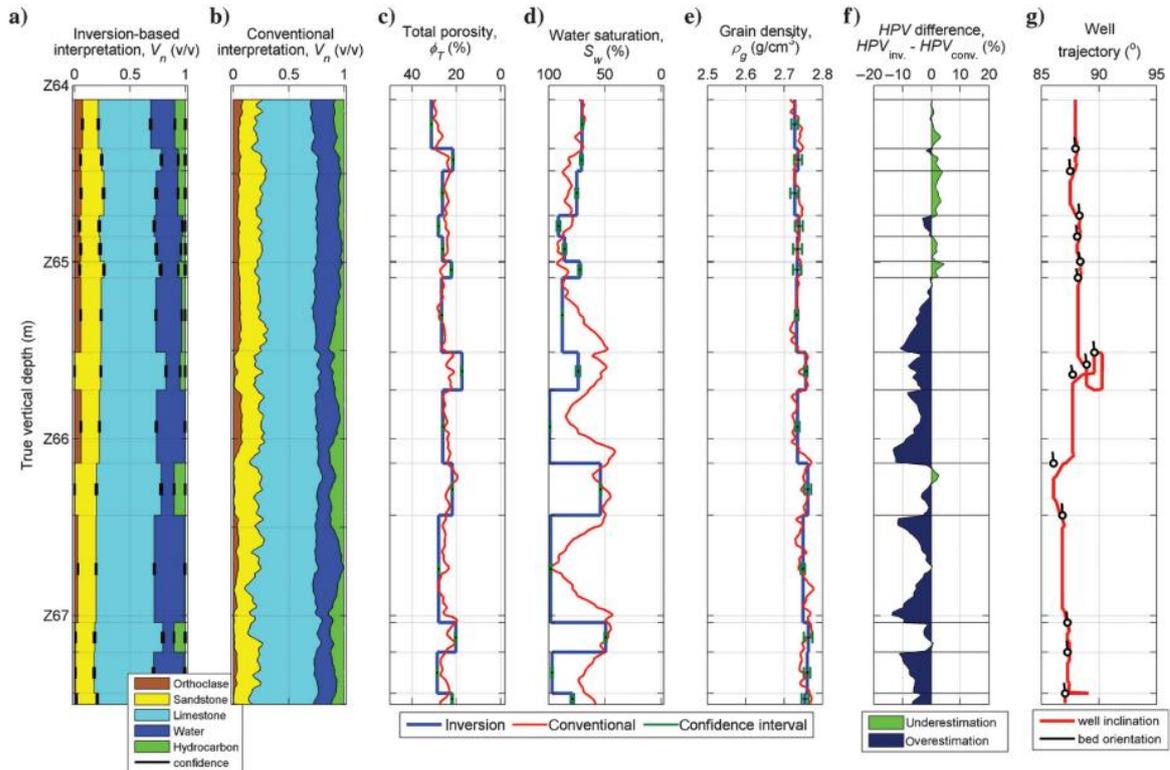


Figure 70: Comparaison entre une interprétation continue conventionnelle en (b) et une interprétation stratifiée par inversion (a) à partir des données pétrophysiques déterminée grâce aux mesures nucléaires et de résistivité. D'après Ijasa et al., 2013b.

En puits tubé, les biais de mesure en fonction de l'environnement de puits sont encore plus importants (effets du diamètre, de l'épaisseur, de la composition et de la densité du tube et du ciment) qu'en puits ouvert. Automatiser en partie ces processus de correction d'environnement et d'interprétation permettra d'aider les spécialistes géologues à analyser les diagraphies en puits et tubé et donc d'améliorer la qualité des interprétations quantitatives.

Les travaux antérieurs de l'Université du Texas à Austin portaient sur l'inversion des données de puits ouvert par une méthode de gradient non linéaire. Ortega *et al.*, 2014 et 2015 ont ainsi introduit une méthode d'inversion pour les outils Sigma LWD multi-détecteurs qui permet de corriger la mesure de la section efficace d'absorption des effets d'invasion de boue de forage en vue d'une meilleure estimation de la section efficace Sigma intrinsèque et de la saturation en eau de la formation rocheuse dans la zone vierge (en dehors de la zone envahie). Ajayi *et al.*, 2011 ont également proposé une méthode d'inversion destinée à un outil spectroscopique d'activation neutron-gamma, afin de corriger les effets de laminage (*shoulder-bed effect*) qui correspondent à une succession de fines couches géologiques dont les épaisseurs sont inférieures à la résolution verticale de l'outil, pour ainsi améliorer la détermination des teneurs en éléments (composition chimique) de la roche. La poursuite de ces travaux de thèse sera d'adapter les outils d'inversion développés par l'Université du Texas pour les puits tubés, en prenant en

compte les améliorations proposées, notamment sur le calcul des fonctions de sensibilité avec la méthode du suivi de particule.

Mais il pourrait également être intéressant de tester d'autres approches, comme les méthodes bayésiennes dans Lindberg *et al.*, 2015, qui prennent en compte le fait que la nature des couches géologiques qui se succèdent verticalement n'est pas complètement aléatoire. De façon générale, les méthodes bayésiennes permettraient d'incorporer des informations *a priori* afin de mieux régulariser le problème inverse, mais elles présentent aussi l'intérêt de fournir intrinsèquement une estimation de l'incertitude via les distributions *a posteriori* sur les grandeurs d'intérêt.

En ce qui concerne les applications plus générales dans le domaine pétrolier ou les géosciences, ce travail de thèse pourra être valorisé, par exemple, dans le cadre d'activités de mesures diagraphiques en phase d'exploration, immédiatement après le forage. Comme il est parfois difficile de réaliser les acquisitions diagraphiques en puits ouvert avant l'installation du tubage et de son cimentage, à cause de possible effondrement des parois, l'acquisition en puits tubé peut s'avérer nécessaire.

Par ailleurs, ce travail sera aussi applicable tout au long de la vie du puits avec des acquisitions diagraphiques régulières, derrière le tubage en place, permettant de monitorer la remontée du contact huile-eau et ainsi de déterminer un nouvel état de saturation en hydrocarbures car il évolue avec le rythme de production. Pour finir, ce travail sera aussi applicable pour des activités de fermeture de puits de production en fin de vie (*Plug and Abandon*) afin d'évaluer l'état de la cimentation, comme son épaisseur et sa masse volumique, ou encore l'état de corrosion du tubage. Cette phase est cruciale car elle permet de libérer une zone de gisement sans risque de fuite d'hydrocarbures.

Bibliographie

- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytracsek, R., ... Zschesche, D. (2003). Geant4—A simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- Ajayi, O., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2016). Inversion-based interpretation of logging-while-drilling gamma-ray spectroscopy measurements. *GEOPHYSICS*, 81(1), D9–D34. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0293.1>
- Bertozzi, W., Ellis, D. V., & Wahl, J. S. (1981). The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays. *GEOPHYSICS*, 46(10), 1439–1455. <https://doi.org/10.1190/1.1441151>
- Booth, T. E., & Hendricks, J. S. (1984). Importance estimation in forward Monte Carlo calculations. *Nuclear Technology - Fusion*, 5(1), 90–100. <https://doi.org/10.13182/FST84-A23082>
- Brown, D. A., Chadwick, M. B., Capote, R., Kahler, A. C., Trkov, A., Herman, M. W., Sonzogni, A. A., Danon, Y., Carlson, A. D., Dunn, M., Smith, D. L., Hale, G. M., Arbanas, G., Arcilla, R., Bates, C. R., Beck, B., Becker, B., Brown, F., Casperson, R. J., ... Zhu, Y. (2018). ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards, and thermal scattering data. *Nuclear Data Sheets*, 148, 1–142. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.02.001>
- Case, C., Watson, C. C., & Lawrence, R. (1994). Sensitivity function technique for modeling nuclear tools: United States Patent 5334833, filed June 14, 1991, and issued August 2, 1994. Retrieved from USPTO
- Chadwick, M. B., Herman, M., Obložinský, P., Dunn, M. E., Danon, Y., Kahler, A. C., Smith, D. L., Pritychenko, B., Arbanas, G., Arcilla, R., Brewer, R., Brown, D. A., Capote, R., Carlson, A. D., Cho, Y. S., Derrien, H., Guber, K., Hale, G. M., Hoblit, S., ... Young, P. G. (2011). ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields, and decay data. *Nuclear Data Sheets*, 112(12), 2887–2996. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- Chuilon, P., Puyou, G., Caroli, E., Vandamme, T., Inciarte, J., Kozłowski, M., & Dillon, B. (2019). From Houston API calibration pits... to Artigueloutan logging metrological facility. *SPWLA 60th Annual Logging Symposium Transactions*, 1–25. https://doi.org/10.30632/T60ALS-2019_GGGGG
- Conlin, J., Parsons, D., Gardiner, S., Gray, M., Kahler III, A., White, M., & Lee, M. (2014). Listing of available ace data tables (LA-UR-13-21822, 1068959; p. LA-UR-13-21822, 1068959). <https://doi.org/10.2172/1068959>.
- Couet, B., & Watson, C. (1993). Monte Carlo differential neutron sensitivity calculations for nuclear well-logging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 40(4), 928–932. <https://doi.org/10.1109/23.256687>.
- Eleon, C., Perot, B., Carasco, C., Sudac, D., Obhodas, J., & Valkovic, V. (2011). Experimental and MCNP simulated gamma-ray spectra for the UNCOSS neutron-based explosive detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 629(1), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.055>.
- Ellis, D. V., Case, C. R., & Chiaramonte, J. M. (2003). Tutorial - Porosity from Neutron Logs I - Measurement. *Petrophysics - The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description*, 44(06).

Ellis, D. V., Case, C. R., & Chiaramonte, J. M. (2004). Tutorial - Porosity from Neutron Logs II - Interpretation. *Petrophysics - The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description*, 45(01).

Ellis, D. V., & Singer, J. M. (Eds.). (2007). *Well logging for earth scientists*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4602-5>.

Fondement, V., Pérot, B., Marchais, T., Loridon, J., Toubon, H., Bensedik, Y., & Collot, J. (2022). Electronics and 3 he counter acquisition tests during the pulses of a d-t neutron generator. *2022 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC44845.2022.10399200>.

Fondement, V., Perot, B., Marchais, T., Loridon, J., Toubon, H., Bensedik, Y., & Collot, J. (2024). Development of a neutron probe to perform a combined measurement of uranium concentration and hydrogen porosity for mining applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 1059, 168888. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168888>.

Fondement, V. (2023). Conception d'une sonde diagraphique neutronique dans le cadre de l'exploration et de l'exploitation minière de l'uranium | Theses.fr. *Thesis Université Grenoble Alpes*. <https://theses.fr/s354269>.

Freedman, R., Herron, S., Anand, V., Herron, M., May, D., & Rose, D. (2015). New method for determining mineralogy and matrix properties from elemental chemistry measured by gamma ray spectroscopy logging tools. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(04), 599-608. <https://doi.org/10.2118/170722-PA>.

Goodyear, G., Sood, A., Andrews, M., Solomon, C. J., Luycx, M., & Torres-Verdín, C. (2018). What's New in Borehole Nuclear Modeling? (A Lot!) *Paper AAAA Transactions SPWLA 59th Annual Logging Symposium*, 2-6 June, London, UK.

Govil, A., Gardner, D., Obando, G., Beltrán-Jiménez, K., & Skadsem, H. J. (2020). Validating ultrasonic log response against reference barrier cells simulating downhole well conditions encountered during well construction and abandonment operations. *Day 1 Tue March 03 2020 D081S001R002*. <https://doi.org/10.2118/199578-MS>.

Ijasan, O. C., Torres-Verdín, W., Preeg, A., & Mendoza, A. (2011). Rapid modeling of LWD nuclear measurements acquired in high-angle and horizontal wells for improved petrophysical and geometrical interpretation: *Paper SPWLA2011-R presented at the SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, 14-18 May, Colorado Springs, Colorado*.

Ijasan, O., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. (2012). Fast modeling of borehole neutron measurements with a new transport-diffusion approximation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, 1-5. <https://doi.org/10.1190/segam2012-0832.1>.

Ijasan, O., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2013a). Fast modeling of borehole neutron porosity measurements with a new spatial transport-diffusion approximation. *GEOPHYSICS*, 78(3), D151-D168. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0433.1>.

Ijasan, O., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2013b). Inversion-based petrophysical interpretation of logging-while-drilling nuclear and resistivity measurements. *GEOPHYSICS*, 78(6), D473-D489. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0175.1>.

- Ijasan, O., Case, C. R., Chiaramonte, J. M., Ellis, D. V., & Roscoe, B. A. (2013c). Fast-Forward Modeling of Azimuthal Logging-While-Drilling Neutron Porosity Measurements in the Presence of Borehole and Environmental Effects. *Paper presented at the SPWLA 54th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, June 2013.*
- Kavetskiy, A., Yakubova, G., Prior, S. A., & Torbert, H. A. (2017). Neutron-stimulated gamma ray analysis of soil. In A. M. Maghraby (Ed.), *New Insights on Gamma Rays*. InTech. <https://doi.org/10.5772/68014>
- Kessler, C., Bonavides, C., Quintero, A., & Hill, J. (2011). Cement-bond evaluation: A step change in capabilities. *All Days SPE-145970-MS*. <https://doi.org/10.2118/145970-MS>.
- Kuga, N., Shiiba, T., Sato, T., Hashimoto, S., & Kuroiwa, Y. (2024). Experimental and computational verifications of the dose calculation accuracy of PHITS for high-energy photon beam therapy. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 61(1), 136-145. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275737>
- Kulesza, J. A., Adams, T. R., Armstrong, J. C., Bolding, S. R., Brown, F. B., Bull, J. S., Burke, T. P., Clark, A. R., Forster III, R. A., Giron, J. F., Grieve, T. S., Josey, C. J., Martz, G. W., McKinney, E. J., Pearson, M. E., Rising, C. J., Solomon Jr., C. J., Swaminarayan, S., Trahan, T. J., Wilson, S. C., & Zukaitis, A. J. (2022). MCNP® Code Version 6.3.0 Theory & User Manual. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-22-30006 Rev. 1. Los Alamos, NM, USA. September 2022.
- Lewis, E. E., & Miller, W. F. (1984). *Computational methods of neutron transport*. Wiley.
- Lindberg, D. V., Rimstad, E., & Omre, H. (2015). Inversion of well logs into facies accounting for spatial dependencies and convolution effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 134, 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.027>.
- Luycx, M., & Torres-Verdín, C. (2018). Rapid forward modeling of logging-while-drilling neutron-gamma density measurements. *GEOPHYSICS*, 83(6), D231-D246. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0142.1>.
- Luycx, M., Bennis, M., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. (2020). Simulation of borehole nuclear measurements: A practical tutorial guide for implementation of monte carlo methods and approximations based on flux sensitivity functions. *Petrophysics – The SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description*, 61(1), 4-36. <https://doi.org/10.30632/PJV61N1-2020T1>.
- Madicken, M. (2017). *FW/CADIS-Ω: An Angle-Informed Hybrid Method for Neutron Transport*. University of California, Berkeley. https://munkm.github.io/papers/diss_full_nosig.pdf
- McKeon, D. C., & Scott, H. D. (1989). SNUPAR-a nuclear parameter code for nuclear geophysics applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 36(1), 1215-1219. <https://doi.org/10.1109/23.34634>.
- Mendoza, A., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. (2006). Environmental and Petrophysical Effects On Density And Neutron Porosity Logs Acquired In Highly Deviated Well. *Paper presented at the SPWLA 47th Annual Logging Symposium, Veracruz, Mexico, June 2006.*
- Mendoza, A. C., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2007). Rapid simulation of borehole nuclear measurements based on spatial flux-scattering functions. *Paper SPWLA-2007-O presented at the 48th Annual Logging Symposium, 3-6 June, Austin, Texas.*
- Mendoza, A. C., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2010a). Linear iterative refinement method for the rapid simulation of borehole nuclear measurements: Part 1 – Vertical wells. *Geophysics*, 75(1), E9-E29. <https://doi.org/10.1190/1.3267877>

- Mendoza, A. C., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2010b). Linear iterative refinement method for the rapid simulation of borehole nuclear measurements: Part 2 – High-angle and horizontal wells. *Geophysics*, 75(2), E79-E90. <https://doi.org/10.1190/1.3335953>
- Mendoza, E., Cano-Ott, D., & Guerrero, C. (2012). New Evaluated Neutron Cross Section Libraries for the Geant4 Code. *IAEA technical report INDC(NDS)-0612, Vienna*.
- Mendoza, E., Cano-Ott, D., & Koi, T. (2014). *IEEE Trans. Nucl. Science*, 61, 2357.
- Mendoza, E., & Cano-Ott, D. (2018). Update of the Evaluated Neutron Cross Section Libraries for the GEANT4 Code. *IAEA technical report INDC(NDS)-0758, Vienna*.
- Mickael, M. W. (1992). Importance estimation in Monte-Carlo modeling of neutron and photon transport. *Nuclear Geophysics*, 6(3), 341-350.
- Mimoun, J. G., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2010). Quantitative Interpretation Of Pulsed Neutron Capture Logs In Thinly-Bedded Formations. *Paper presented at the SPWLA 51st Annual Logging Symposium, Perth, Australia, June 2010*.
- Mimoun, J. G., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2011). Quantitative interpretation of pulsed neutron capture logs: Part 1 — Fast numerical simulation. *GEOPHYSICS*, 76(3), E81-E93. <https://doi.org/10.1190/1.3569600>.
- Montgomery, M., Schneider, E., & Torres-Verdín, C. (2016). UTNuPro: A Self-Contained Algorithm and Software to Calculate Nuclear Properties of Rock-Fluid Mixtures. *Proceedings 16th University of Texas at Austin's Research Consortium on Formation Evaluation*. https://sites.utexas.edu/ctv-pubdata/MCNP_longhorn_Nuclear_Tools_Download.
- Morris, C., Aswad, T., Morris, F., & Quinlan, T. (2005). Reservoir monitoring with pulsed neutron capture logs (Spe94199). *67th EAGE Conference & Exhibition, Madrid, Spain*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.1.C005>.
- Ortega, E., Torres-Verdín, C., Preeg, W. E., & Miles, J. P. (2013). Multidetector LWD Sigma Logging: Principles, Petrophysical Applications, and Environmental Effects. *Paper presented at the SPWLA 54th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, June 2013*.
- Ortega, E., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2014). Rapid forward modeling of multidetector logging-while-drilling Sigma measurements. *GEOPHYSICS*, 79(4), D253-D273. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0031.1>.
- Ortega, E., Torres-Verdín, C., & Preeg, W. E. (2015). 2D inversion-based interpretation of logging-while-drilling thermal-neutron and gamma-ray time decays. *GEOPHYSICS*, 80(3), D247-D263. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0336.1>.
- Perot, B. (1996). *Optimisation des méthodes de mesure neutronique active pour les déchets radioactifs et contribution à la modélisation d'un dispositif industriel* [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier]. <https://theses.fr/1996GRE10092>.
- Perot, B., Carasco, C., Bernard, S., Mariani, A., Szabo, J.-L., Sannie, G., Valkovic, V., Sudac, D., Viesti, G., Lunardon, M., Botosso, C., Nebbia, G., Pesente, S., Moretto, S., Zenoni, A., Donzella, A., Moszynski, M., Gierlik, M., Klamra, W., & Salvato, M. (2008). Measurement of 14 MeV neutron-induced prompt gamma-ray spectra from 15 elements found in cargo containers. *Applied radiation and isotopes: including data instrumentation and methods for use in agriculture industry and medicine*, 66, 421-434. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.11.011>.

- Perot, B., El Kanawati, W., Carasco, C., Eleon, C., Valkovic, V., Sudac, D., & Obhodas, J. (2011). Quantitative comparison between experimental and simulated gamma-ray spectra induced by 14 MeV tagged neutrons. *Applied radiation and isotopes: including data instrumentation and methods for use in agriculture industry and medicine*, 70, 1186-1192. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.07.005>.
- Rising, M. E., Adams, J. C., Armstrong, T. R., Bolding, S. R., Brown, F. B., Bull, J. S., Burke, T. P., Clark, A. R., Dixon, D. A., Forster III, R. A., Giron, J. F., Grieve, T. S., Hughes III, H. G., Josey, C. J., Kulesza, J. A., Martz, G. W., McCartney, A. P., McKinney, G. W., Mosher, S. W., Pearson, E. J., ... Zukaitis, A. J. (2023). MCNP® Code Version 6.3.0 Release Notes. Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-22-33103 Rev. 1. Los Alamos, NM, USA. January 2023.
- Schmid, G., Pemper, R., Dolliver, D., Mekic, N., & Musselman, J. (2018). A diffusion-corrected sigma algorithm for a four-detector pulsed-neutron logging tool. *Day 3 Wed September 26 2018 D031S029R006*. <https://doi.org/10.2118/191738-MS>.
- Schwarz, L., Schwarz, R. A., & Schwarz, A. R. (2018). MCNPX/6© Visual Editor Computer Code Manual. *January 2018*.
- Serra, O. L. (2004). *Well Logging. Data Acquisition and Applications*, 667.
- Sherman, H., & Locke, S. (1975). Depth of investigation of neutron and density sondes for 35-percent-porosity sand. *16th Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, paper Q*.
- Tittle, C. W. (1961). Theory of neutron logging I. *GEOPHYSICS*, 26(1), 27-39. <https://doi.org/10.1190/1.1438839>.
- Trellue, H. R., & Little, R. C. (2008). Release of New MCNP S(alpha, beta) Library ENDF70SAB Based on ENDF/B-VII.0. *LA-UR-08-3628*.
- Trouche, A., et al. (2019). EDGE: new GDML CAD tool for GEANT4 based analysis and interoperability bridge for high-energy particle modeling tools. *ENSAR2 workshop: GEANT4 in nuclear physics – 24-26 April 2019 – Madrid (Spain)*.
- UTAPWeLS. (2020). 3D UTAPWeLS Application Information. Hildebrand Department of Petroleum and Geosystems Engineering, University of Texas at Austin. <https://sites.utexas.edu/formation/3d-utapwels/> (accessed 14 December 2020).
- Varignier, G., Fondement, V., Carasco, C., Collot, J., Pérot, B., Marchais, T., Chuilon, P., Caroli, E., & Doan, M.-L. (2023). Comparison between GEANT4 and MCNP for well logging applications. *EPJ Web of Conferences*, 288, 01002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328801002>
- Velker, N., Banzarov, B., Inanc, F., & Simonov, N. (2012). GEANT4 for Solving Nuclear Geophysics Problems (Russian). *10.2118/162008-RU*.
- Watson, C. C. (1984). Monte-Carlo computation of differential sensitivity functions. *Transactions of American Nuclear Society*, 46, 655-657.
- Watson, C. C. (1992). A spatial sensitivity analysis technique for neutron and gamma-ray measurements. *Transactions of American Nuclear Society*, 65(1), 3-4.
- Werner, C. J., et al. (2018). MCNP6.2 release notes. *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-18-20808*.

Werner, C. J. (Ed.). (2017). *MCNP Users Manual - Code Version 6.2. LA-UR-17-29981*.

Zhang, J., Mahbod, P., Shafer, R., Mueller, D., & Anderson, C. (2019). Multi-string isolation logging—A cost effective solution for P&A. *Day 1 Tue May 14 2019 D011S009R002*. <https://doi.org/10.2118/195607-MS>.

Zhou, T., Rose, D., Millot, P., Grover, R., Beekman, S., Amin, M. F., Zamzuri, M. D., Ralphie, B., & Zakwan, Z. (2018). A Comprehensive Neutron Porosity From a Pulsed Neutron Logging Tool. *Paper presented at the SPWLA 59th Annual Logging Symposium, London, UK, June 2018*.