



Projet « SAFE »

Programme « Au fil de l'eau »

Rapport final

Le 12/02/2024

CRESICA
Consortium pour la recherche, l'enseignement supérieur et l'innovation
en Nouvelle-Calédonie

Nos membres



Avec le soutien
des partenaires financiers



www.cresica.nc

Sommaire

1. Présentation	5
2. Synthèse à destination du public	6
Contexte.....	6
Objectif(s).....	7
Phase(s).....	8
Résultat(s) et interprétation(s).....	9
Conclusion(s)	10
3. Enjeux et objectifs du projet	11
4. Matériels et méthodes.....	14
4.1 Étude du bassin versant :	14
4.1.1 Les échantillons :	14
4.1.2 Modalités d'identification des particules et fibres amiantifères :	16
4.2 Développements méthodologiques :	17
4.2.1 Reconnaissance automatisée des fibres par traitement et analyse d'image associé au Machine Learning	17
4.2.2 Quantification des fibres dans des sédiments :	19
5. Résultats et discussions	21
5.1. Capacité de dispersion des particules dans les eaux de surface :	21
5.2 Développements méthodologiques :	24
5.2.1 Reconnaissance automatisée des fibres par traitement et analyse d'image associé au Machine Learning	24
6. Conclusions et perspectives	26
7. Éléments de valorisation prévus et obtenus.....	28
8. Références.....	29
9. Annexes.....	32
Annexe 1 – Images MEB échantillons de particules de chrysotile	32
Annexe 2 – Données MET acquises sur des particules initialement identifiées comme de la trémolite	33
Annexe 3 – Résultats des tests de quantification des fibres dans des sédiments – mélanges contrôlés.....	35

Liste des figures

Figure 1 – Cartographie des terrains potentiellement amiantifères de la Nouvelle-Calédonie	7
Figure 2 – Répartition des sites d'intérêt du projet SAFE à l'échelle d'un bassin versant.....	8
Figure 3 – Évolution du minéral asbestiforme, Antigorite, sous l'effet de l'altération de surface	12
Figure 4- Image satellite (GEOREP) du bassin versant de la Tontouta.....	14
Figure 5- Exemple de prélèvement de roches amiantifères à antigorite, sur le site minier de la Tontouta.....	15
Figure 6- Positionnement des points d'échantillonnage à l'embouchure de la Tontouta.....	16
Figure 7- Échantillonnage des sédiments.....	16
Figure 8- Image brute initiale des particules déposées sur un filtre.....	17
Figure 9- Synthèse des étapes depuis l'acquisition de l'image jusqu'à la reconnaissance automatique du nombre et de la morphologie des fibres.....	19
Figure 10- Synthèse des étapes du protocole suivi pour évaluer un seuil de détection des fibres dans un sédiment....	20
Figure 11- Photos et images MEB de particules sédimentaires d'antigorite.....	21
Figure 12- Image MET (a) et analyse par EDX d'une particule sédimentaire d'antigorite.....	22
Figure 13- Photos et images MEB de particules sédimentaires de chrysotile.....	22
Figure 14- Photos, images MET, diffraction et EDX de particules sédimentaires de chrysotile.....	23
Figure 15- Image obtenue après prétraitement et segmentation de l'image brute initiale.....	24
Figure 16- Illustration des résultats de chacune des étapes de reconnaissance des fibres.....	24
Figure 17- Exemple de la réponse obtenue via l'utilisation du logiciel de reconnaissance automatique des fibres par traitement d'image de microscopie optique.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1 – Liste des amiantes telle que définie par la législation européenne	11
--	----

Liste des abréviations

ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
D	Diamètre
DIMENC	Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de la Nouvelle-Calédonie
EDX	Spectroscopie à dispersion d'énergie
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
l	Largeur
L	Longueur
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
MET	Microscopie Électronique à Transmission
NF	Norme Française
NOA	Naturally Occurring Asbestos (occurrences naturelles d'amiante)
NC	Nouvelle-Calédonie
PMA	Particule Minérale Allongée
UNC	Université de la Nouvelle-Calédonie
VLEP	Valeur Limite d'Exposition Professionnelle

1. Présentation

Titre **complet** du projet : Suivi des Asbestes au Fil de l'Eau (SAFE)

Durée du projet : 19 mois

Rédacteur(s) du présent rapport :

LAPORTE-MAGONI Christine, Université de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Tableau 1 - Composition de l'équipe du projet

NOM	Prénom	Fonction	Nom de l'établissement	Nom du laboratoire
Dr Barale	Luca	Chercheur	University of Torino	Institute of Geosciences and Earth Resources
Barthelemy	Olivia	Technicienne	Université de la Nouvelle-Calédonie	P2M CRESICA
Dr Fabrizio	Piana	Chercheur	CNR Torino	Istituto di Geoscienze e Georisorse
Dr Lemonnier	Hugues	Chercheur	IFREMER	LEAD/Entropie
Dr Monnin	Aurélié	Ingénieur de recherche	Université de la Nouvelle-Calédonie	P2M CRESICA
Dr Pasquier	Claude	Chercheur	Université Côte d'Azur	I3S/CNRS
Dr Petriglieri	Jasmine. Rita	Chercheuse	University of Torino	Institute of Geosciences and Earth Resources
Dr Quiniou	Thomas	Ingénieur de Recherche	Université de la Nouvelle-Calédonie	Institut des Sciences Exactes et Appliquées
Pr Selmaoui-Folcher	Nazha	Enseignant-Chercheur	Université de la Nouvelle-Calédonie	Institut des Sciences Exactes et Appliquées
Dr Serres	Arnaud	Enseignant-Chercheur	Université de la Nouvelle-Calédonie	Institut des Sciences Exactes et Appliquées
Dr Tomatis	Maura	Chercheur	University of Torino	Dipartimento di Chimica
Pr Turci	Francesco	Chercheur	University of Torino	Dipartimento di Chimica

Citation du document

Mots clés : Naturally Occurring of Asbestos, risques d'exposition, bassins versants ultra-basiques; transports sédimentaires, rivières, érosion sur sites miniers, sédimentation, traitement d'image, reconnaissance automatique de fibres, méthode de quantification des fibres.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Laporte-Magoni, C., Barthelemy, O., Barale, L., Fabrizio, P., Lemonnier, H., Monnin, A., Pasquier, C., Petriglieri, J. R., Quiniou, T., Selmaoui-Folcher, N., Serres, A., Tomatis, M., Turci, F., 2024. Rapport de fin de contrat du projet SAFE, financé dans le cadre du programme au Fil de l'Eau du CRESICA, pages 37

2. Synthèse à destination du public

Contexte

L'extraction minière de minéraux d'amiante se justifiait par leurs propriétés physico-chimiques exceptionnelles, associées à leurs morphologies fibreuses, qui permettaient la fabrication de matériaux particulièrement résistants aux contraintes mécaniques et thermiques dans différents domaines industriels (le bâtiment et les travaux publics, l'automobile, la construction navale...). Sur l'ensemble du processus, depuis l'extraction des amiantes, en passant par la fabrication puis l'utilisation des matériaux et matériels amiantifères, le mode de contamination, source du développement de pathologies graves, concernait exclusivement l'exposition par inhalation, principalement en milieu confiné. Dans ce cadre, les conséquences sanitaires résident dans l'apparition de diverses maladies respiratoires telles que l'asbestose, le cancer des poumons et des voies respiratoires, et le mésothéliome, ou cancer de la plèvre, seule pathologie exclusivement consécutive à une contamination par des fibres d'amiante. Les nombreuses recherches menées sur le sujet de l'amiante dans ce contexte, ont servi de base à l'établissement de décrets d'interdiction de l'exploitation d'amiante (Décret n°96-1133 du 24 décembre 1996 relatif à l'interdiction de l'amiante en France et décret N°82 du 25 Août 2010 en Nouvelle-Calédonie) ainsi que de codes d'obligations réglementaires (annexe 13-9 du décret N°2011-629 du 3 juin 2011, code de la santé publique – article R1334-27, et arrêté du 26 2013, relatif au repérage des matériaux et produits de la liste C, contenant de l'amiante...).

Cependant, les minéraux d'amiante forment initialement des affleurements naturels. De la même façon que ces minéraux libèrent des aérosols pathogènes au cours de la manipulation des matériaux industriels qu'ils constituent, ils relarguent des fibres toxiques depuis leurs affleurements naturels, dans l'environnement plus ou moins proximal. Il est alors question de « *Naturally Occurring Asbestos* » ou NOA. Ces minéraux présents à l'air libre, deviennent donc des sources d'exposition lors de leur manipulation professionnelle (excavation d'axes routiers, terrassements, exploitations minières de minerais associés...) ou de contamination passive des populations, vivant, et/ou domiciliées, à proximité (établissements publics ou privés construits sur, ou proches, de terrains amiantés ; jardins aménagés avec des terres contenant de l'amiante, revêtement de cases contaminés...). Les travaux scientifiques de ces dernières décennies démontrent également que des minéraux, non identifiés dans la législation, présentent à l'affleurement des propriétés physico-chimiques, des morphologies, et une toxicité, similaires aux amiantes (Lee et al., 2008, ANSES 2015, 2017).

La problématique d'estimation du risque encouru par les populations exposées aux NOA, se complexifie fortement dans un environnement qui n'est plus confiné. À titre d'exemple, la formation et les modalités de dispersion des aérosols contenant des fibres pathogènes répond à un nombre de paramètres beaucoup plus importants en milieu naturel qu'en milieu fermé (humidité, pluviométrie, orientation du vent, variation des propriétés de cohésion des minéraux à l'affleurement...). Les sources de dissémination des particules toxiques dans l'environnement et les modalités de contamination demeurent également beaucoup plus hétérogènes en milieu naturel. Ainsi, les eaux de ruissellement qui transportent les particules érodées, des affleurements vers les cours d'eau puis les embouchures, représentent des agents de dispersion des fibres pathogènes dans l'environnement qui s'ajoutent au transport aérien. Les pathologies liées à l'exposition aux NOA, et autres minéraux asbestiformes, pourraient ne plus se limiter aux voies respiratoires, mais atteindre également l'ensemble du circuit digestif, suite, par exemple à l'ingestion d'eau contaminée.

Les enjeux scientifiques pour accompagner les décideurs en responsabilité de la prévention des risques sanitaires restent encore très nombreux concernant l'exposition aux NOA.

Le territoire de la Nouvelle-Calédonie (NC) comprend de nombreux affleurements naturels de minéraux pathogènes (Figure 1). La présence de ces affleurements amiantifères sur la majorité du territoire calédonien, génère une problématique majeure de santé publique en Nouvelle-Calédonie (En 2007, incidence du mésothéliome 30 fois supérieure en Nouvelle-Calédonie par rapport à la métropole, Boulmier, 2007, 2009, 2011 ; Houchot, 2010).

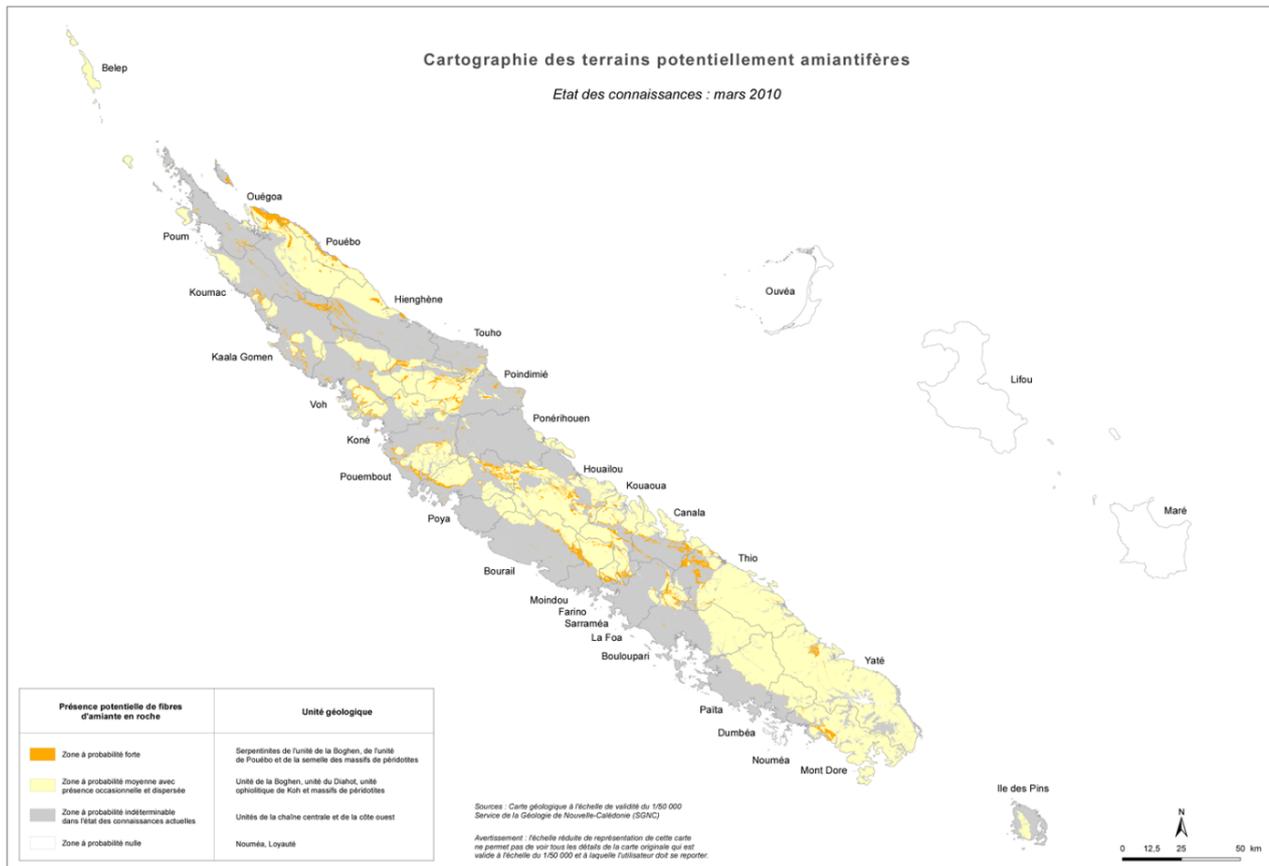


Figure 1 : Cartographie des terrains potentiellement amiantifères de la Nouvelle-Calédonie. (Maton, D. & Maurizot, P., 2009)

Dans ce contexte, le projet SAFE amène de nouvelles connaissances scientifiques, destinées à contribuer à une meilleure estimation du risque associé à l’affleurement de minéraux d’amiante et asbestiformes, pour accompagner le développement des plans de prévention. Les données récoltées, ainsi que les nouvelles méthodologies de reconnaissance et de comptage des fibres pathogènes développées au cours du projet SAFE, apportent de nouveaux outils de compréhension des capacités de dispersion des particules d’amiante ou amiantifères, depuis l’affleurement via les cours d’eau, au travers de l’exemple d’un bassin versant calédonien.

Objectif(s)

Le projet SAFE proposait d’apporter de nouvelles connaissances destinées aux décideurs et à la communauté scientifique.

L’une des problématiques abordées étaient le développement de méthodologies pour quantifier le potentiel d’émission de fibres pathogènes des affleurements de NOA. À terme, il s’agissait de tenter de quantifier le risque d’émission de fibres en fonction de la typologie des minéraux affleurants. Ces travaux se reposaient sur l’échantillonnage d’un front d’exploitation minière, situé en amont du bassin versant de la Tontouta.

Les travaux scientifiques menés au cours du projet SAFE s’intéressaient également à la capacité de dispersion des fibres pathogènes de l’amont vers l’aval d’un bassin versant. Le bassin versant de la Tontouta a fait l’objet d’un échantillonnage des sédiments transportés et déposés par ses eaux douces (figure 2).

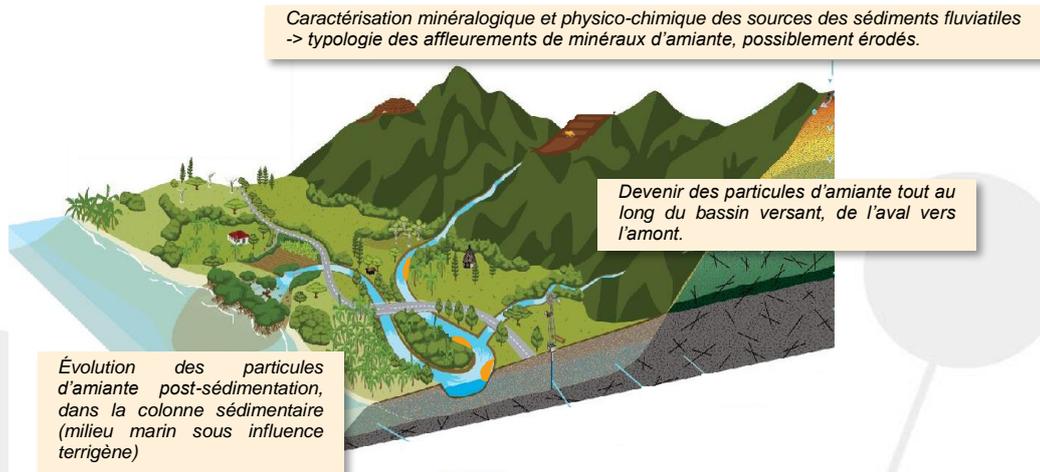


Figure 2 : Répartition des sites d'intérêt du projet SAFE à l'échelle d'un bassin versant (modifié d'après Julie Jeanpert, DIMENC)

Parallèlement aux techniques classiques utilisées pour identifier et compter les fibres pathogènes dans un échantillon, il s'agissait de développer une nouvelle méthodologie, moins chronophage, plus rigoureuse et reproductible, basée sur l'analyse d'image via l'utilisation de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles procédures tendent à fournir des outils plus compatibles avec un suivi systématique, impliquant l'analyse d'un nombre important d'échantillons.

Phase(s)

Initialement le projet SAFE devait s'appuyer sur l'échantillonnage réalisé depuis le front de mine, dans les broyats jusqu'au chargement de minerais, sur le site minier de la Tontouta (Société Minière Georges Montagnat). Malheureusement, si l'échantillonnage est disponible, les contraintes financières rencontrées sur la période du projet SAFE, par le CRESICA, n'ont pas permis les analyses, initialement prévues, de ces échantillons. Cependant, ce travail pourra être réalisé dans les mois à venir au travers d'autres réponses à appel à projet déjà déposées et en attente de la décision définitive.

Des prélèvements de sédiments ont été réalisés le long du bassin versant de la Tontouta. La stratégie a consisté à échantillonner de l'aval vers l'amont. Le postulat était simplement que la reconnaissance de fibres amiantifères dans les sédiments de la rivière, déposés à l'embouchure, impliquait obligatoirement leur transport, et leur dépôt partiel, tout au long du bassin versant. La quantification de la distance maximale de transport par les eaux douces résultait donc de l'identification des premiers sédiments incluant des fibres amiantifères, et de leur localisation en remontant le bassin versant. Des échantillonnages ont également été réalisés suivant une transversale à l'embouchure de la Tontouta. Il s'agissait de vérifier la capacité de dispersion des particules amiantifères sur la largeur du bassin versant. L'ensemble de ces échantillons ont été triés à la loupe binoculaire, pour isoler les particules susceptibles d'appartenir aux minéraux d'amiante ou amiantifères, puis analysés suivant le protocole normé NF X 43-050, basés sur l'analyse en microscopie électronique à transmission (MET), à la plateforme de microscopie P2M du CRESICA.

Le projet SAFE s'est aussi déroulé en partenariat avec les chercheurs du projet ECOMINE, également financé par le programme CRESICA au fil de l'eau. Dans le cadre de ce programme, un prélèvement en profondeur (carottage) a été réalisé au large de la commune de Thio, à l'embouchure d'un bassin versant minier. Ces échantillons offrent une archive sédimentaire des apports de bassins versants ultrabasiques, soumis à l'activité minière sur le temps représenté par cet enregistrement géologique. Il s'agissait également de développer une méthodologie permettant d'établir un lien entre l'identification des fibres dans le prélèvement analysé et leurs concentrations dans le sédiment initial (problématique de représentativité du prélèvement).

Résultat(s) et interprétation(s)

Les principaux résultats que nous avons obtenu en étudiant spécifiquement le bassin versant de la Tontouta sont les suivants :

- L'échantillonnage des sédiments, immergés et émergés, déposés à l'embouchure de la Tontouta révèle systématiquement la présence de particules sédimentaires d'amiante. Ces résultats confirment que les sédiments amiantifères résistent au transport tout au long du bassin versant de la Tontouta, de l'amont vers l'aval, pour se déposer à l'embouchure. Les faibles quantités de sédiments analysés par rapport à la masse totale présente dans le bassin versant, à la même altitude, atteste d'une proportion sans doute élevée de fibres pathogènes. Enfin, l'identification des fibres d'amiante dans les échantillons immergés et émergés lors de l'échantillonnage transversal du bassin versant révèle que l'exposition des populations demeure multiple avec les possibilités conjointes d'ingestion (exemple : remise en suspension des particules d'amiante dans l'eau au cours de la baignade), et d'inhalation (création d'affleurement secondaires tout au long du bassin versant qui représentent de nouvelles sources d'aérosols, potentiellement toxiques).
- Les analyses en microscopie électronique des particules fibreuses révèlent la présence de minéraux d'amiante de type antigorite et chrysotile. La minéralogie est également confirmée par les analyses élémentaires obtenues par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDX). Les compositions minéralogiques des roches affleurantes sur secteur minier révélaient également la présence d'antigorite et de chrysotile, avec une dominance quantitative du premier. Les analyses minéralogiques des particules sédimentaires échantillonnées dans le bassin versant de la Tontouta, semblent donc en accord avec l'interprétation d'un apport sédimentaire par érosion des roches qui composent les terrains miniers.
- Les analyses au MET des fibres initialement considérées comme appartenant à la catégorie amiante de type trémolite, n'ont pas permis de totalement confirmer ou d'infirmer la présence de cette minéralogie. Cette amiante qui appartient à la famille des amphiboles, se diffère de l'antigorite et du chrysotile classés dans la famille des serpentines. Les différences de composition chimique et d'organisation géométrique des atomes, constitutifs du réseau cristallin, engendrent potentiellement des propriétés physico-chimiques distinctes pour ces amiantes. Leurs capacités de résistance aux contraintes mécaniques et chimiques lors du transport particulaire, le long du bassin versant, peuvent en conséquence se différencier. En première approximation, et sous réserve que l'identification de particules de trémolite soit confirmée par des analyses supplémentaires, ces résultats laissent supposer que les principales amiantes identifiées sur mine (NOA), subissent un transport dans les eaux de surface, qui génère une dispersion et une sédimentation sur l'ensemble du bassin versant.
- Les particules sédimentaires amiantifères possèdent une hétérogénéité importante de leur morphologie, de leur composition chimique et de leur propriété de cohésion. Les études des affleurements de minéraux d'amiante ou asbestiformes sur terrains miniers révèlent la même diversité. En fonction de l'altération de surface (lessivage, érosion), subie par les minéraux affleurants, leur morphologie, leur composition chimique de surface et leur propriété de cohésion varient. Ces modifications s'expliquent essentiellement par les échanges chimiques eau/minéral (solubilisation des éléments chimiques composant le minéral et précipitation des éléments dissous dans l'eau), couplé aux contraintes physiques liées aux modifications de volume air/eau lors de l'infiltration dans les zones de circulation d'eau au sein des minéraux (Petriglieri et al., 2019, 2020 ; Laporte et al., 2018). L'étude des particules sédimentaires d'amiante démontre qu'elles présentent également différentes typologies d'altération. Il semblerait donc que le transport par l'eau douce du bassin versant ne permet pas la dissolution des particules amiantifères, y compris lorsque les minéraux d'amiante érodés, sont déjà initialement altérés. Ces résultats du projet SAFE apportent une information importante pour progresser dans l'estimation du risque sanitaire associé aux NOA en Nouvelle-Calédonie. En effet, les premiers travaux menés sur la toxicologie des minéraux d'antigorite affleurants sur site minier sur le territoire, semblent démontrer qu'il pourrait exister un lien entre le niveau d'altération supergène des fibres et leur toxicité (Gazzano et al., 2023 ; Petriglieri et al., 2021).
- Ces résultats tendent à prouver l'intérêt d'un suivi de la nature des sédiments des rivières collectant des eaux de ruissellement contaminées, ou drainant des terrains amiantifères. Un processus présentant une dangerosité pour les populations nécessite d'être caractérisé, et décrypté scientifiquement, pour élaborer des plans de

prévention qui protégeront au mieux les personnes et leur environnement. Ces recherches requièrent un cumul important de données fiables, qui soient représentatives du milieu, et des mécanismes à caractériser. Cependant, il n'existe pas à ce jour de cadre réglementaire ou de méthodes normées, définissant les protocoles et les techniques analytiques, les plus significatifs et adaptés à ces problématiques. Il y a donc nécessité de développer de nouvelles méthodologies.

Dans ce cadre, le projet SAFE a permis d'apporter de nouvelles réponses au travers d'approches innovantes :

- ✓ L'une de ces contributions réside dans le développement d'une interface informatique qui permet la reconnaissance morphologique des fibres (définition : $L \geq 5\mu\text{m}$ et $L/l \geq 3$) et leur comptage, au sein des particules sédimentaires récoltées lors du filtrage des eaux, à partir des images numériques de microscopie optique. La réalisation de ce logiciel repose sur des méthodes de traitement et d'analyse d'images, associées au Machine Learning. L'utilisation de cette interface informatique offre la possibilité de traiter automatiquement un nombre important d'images d'échantillons et garantit non seulement un gain de temps, mais également des données objectives et reproductibles. L'adossement du Machine Learning permet un apprentissage récurrent des morphologies des fibres individuelles ou en amas, au fur et à mesure des analyses des images numériques d'échantillons de sédiments. Un nombre croissant d'échantillons traités améliore l'apprentissage et favorise la précision de la reconnaissance. L'objectif est que le gain de temps de ces méthodes innovantes, automatisées, favorise le traitement d'un nombre important de prélèvements. Il s'agit de favoriser l'acquisition des données nécessaires à la caractérisation des risques associés à la présence d'amiantes dans les particules sédimentaires des rivières, et plus particulièrement calédoniennes.
- ✓ Le projet SAFE a également permis d'initier une collaboration avec Aurélie Monnin et Olivia Barthelemy, de la plateforme P2M du CRESICA, pour l'élaboration d'un protocole de traitement des échantillons de sédiments, potentiellement détenteurs de fibres d'amiantes. L'objectif réside à, d'une part, contraindre le seuil limite de quantité de fibres qui doivent être présentes dans un sédiment pour qu'elles soient identifiables, et d'autre part, de définir les méthodes de prélèvement et de quartage des fractions analysées qui assurent la meilleure représentativité du sédiment initial et de la zone étudiée. Ce protocole, une fois validé, servira, entre autres, à étudier la présence d'amiante dans les sédiments constitutifs de la carotte sédimentaire prélevée au large de Thio, dans le cadre du projet ECOMINE, financé par le programme au fil de l'eau du CRESICA. Ces échantillons représentent l'enregistrement sédimentaire de la période ante et post activité minière du bassin versant minier. Ce suivi de l'histoire sédimentaire offre l'opportunité unique de suivre l'impact de l'activité minière sur l'accumulation de fibres d'amiantes et leurs évolutions physico-chimiques potentielles au cours du temps.

Conclusion(s)

Le projet SAFE contribue à une meilleure connaissance de la capacité de dispersion des minéraux d'amiante ou amiantifères, transportés dans les eaux des rivières au travers de l'exemple du bassin versant de la Tontouta. Les résultats acquis au cours de ce projet démontrent :

- Le transport et le dépôt des particules sédimentaires d'amiante sur l'ensemble du bassin versant jusqu'à l'embouchure.
- Les particules sédimentaires d'amiantes possèdent une minéralogie diversifiée, qui représente les différentes minéralogies amiantifères, rencontrées à l'affleurement, en amont du bassin versant.
- Les particules sédimentaires d'amiantes qui témoignent d'un degré initial, ante-érosion, d'altération supergène significatif, ne se désagrègent par entièrement lors du transport dans les eaux douces puisqu'elles sédimentent à l'embouchure, bien en aval.

Le projet SAFE apporte également de nouvelles méthodologies pour favoriser la reconnaissance des fibres pathogènes au sein des sédiments transportés et déposés le long du bassin versant. Elles complètent les contributions de ce projet à l'acquisition des connaissances requises pour l'établissement des plans de préventions des risques sanitaires liés à l'exposition à l'amiante environnemental.

3. Enjeux et objectifs du projet

Le terme « amiante », ou « asbeste », regroupe un certain nombre de minéraux reconnus pour leurs propriétés physico-chimiques spécifiques telles que leur grande résistance aux fortes températures, aux contraintes mécaniques et aux attaques chimiques ; leur mauvaise conduction thermique, acoustique et électrique, ainsi que leur morphologie fibreuse qui, associée à une grande élasticité, autorise leur tressage et tissage pour constituer une grande diversité de matériaux industriels. En France, la première attribution officielle d'une pathologie liée à l'exposition aux fibres d'amiante, en l'occurrence une asbestose (fibrose pulmonaire de l'amiante), remonte à 1927, alors que la description du premier mésothéliome, (cancer de la plèvre exclusivement consécutif à l'inhalation d'amiante), date de 1965 (INRS, 2023). Au fil des années, l'acquisition de connaissances scientifiques croissantes sur les matériaux amiantifères et les modalités d'exposition, ont abouti à l'établissement de réglementations (Décret 96-1133 du 24/12/96, article L. 4412-2 code du travail, arrêté du 25 juillet 2022...) et de normes (NFX43-050, NFISO 22262-2...) définissant les méthodologies d'échantillonnage, de quantification ainsi que les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), afin d'assurer une meilleure prévention du risque. Cependant ces avancées scientifiques et législatives ne concernent que les expositions liées aux activités professionnelles dans les secteurs utilisant des matériaux amiantés (bâtiments et travaux publics, construction automobile, construction navale...), ce qui limite la liste des minéraux identifiés comme amiante à 6 minéraux fibreux appartenant à deux familles minérales (serpentine et amphibole, Tableau 1).

		COMMON NAME	CHEMICAL FORMULA
Serpentine	Chrysotile	Chrysotile	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Amphiboles	Actinolite	Actinolite	$Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5 [Si_8O_{22}](OH)_2$
	Grunerite	Amosite	$(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$
	Anthophyllite	Anthophyllite	$(Mg, Fe^{2+})_7[Si_8O_{22}](OH)_2$
	Riebeckite	Crocidolite	$Na_2(Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2) [Si_8O_{22}](OH)_2$
	Tremolite	Tremolite	$Ca_2Mg_5 [Si_8O_{22}](OH)_2$

Tableau 1 : Liste des amiantes telle que définie par la législation européenne (directive 2003/18/EC)

L'identification, lors de ces dernières décennies, d'occurrences naturelles de minéraux pathogènes (Naturally Occurring Asbestos, NOA), intégrant les amiantes, mais également des minéraux de propriétés similaires aux amiantes (asbestiformes), a révélé que l'environnement naturel pouvait, également, présenter un risque sanitaire pour les populations. La cohabitation avec des NOA expose à un risque de développement de différentes pathologies des voies respiratoires (asbestoses, cancers des poumons, du larynx), de cancers ovariens, mais plus particulièrement, de mésothéliomes, cancers fatals de la plèvre (Pan et al. 2005). L'exposition aux aérosols amiantifères en milieu confiné (ex : bâtiments) s'évalue grâce à des protocoles normés, et des valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP), (législation européenne du 17/10/2023 : VLEP = 0,01 fibre/cm³). La problématique s'avère d'une plus grande complexité lorsqu'il s'agit d'environnement naturel.

Les sollicitations mécaniques naturelles (érosion, lessivages) ou anthropiques (exploitation minière, carrières, travaux routiers, aménagements...) favorisent le fractionnement des minéraux de type amiante et la dispersion dans l'environnement de fibres et fibrilles susceptibles de déclencher des pathologies graves, lorsqu'elles pénètrent dans les organismes. Les risques liés à l'exposition aux émissions environnementales de fibres demeurent cependant encore peu contraints (Harper, 2008 ; Turci et al., 2016, Barale et al., 2020 ; Noonan, 2017). Les protocoles nécessaires pour lier la probabilité d'exposition (occurrence/ émissivité) et l'impact sanitaire associé, restent à définir mais demeurent indispensables, pour mieux évaluer et gérer le risque (ANSES, 2015, 2017).

En milieu naturel, les modalités d'exposition aux fibres et particules minérales allongées (PMA) sont extrêmement diversifiées (Lee et al., 2008). Pour rappel, le caractère pathogène des fibres provient de trois paramètres : leur morphologie fibreuse (favorise la pénétration et la fixation dans les tissus humains), la réactivité chimique de surface (catalyseur des réactions chimiques qui favorisent le développement des cancers) et la biopersistence (résistance à tous les mécanismes de « nettoyage » et dissolution dans l'organisme). L'évaluation du risque encouru par les populations en présence d'occurrences naturelles d'amiante ou de minéraux asbestiformes, requiert non seulement une évaluation de ces trois paramètres, mais également une caractérisation et une quantification de l'exposition en milieu ouvert, naturel.

En premier lieu, la difficulté réside dans la grande diversité des minéraux fibreux affleurants naturellement : près de 400 minéraux peuvent présenter une morphologie fibreuse, dont certains partagent la toxicité des amiantes (Skinner et al., 1988). L'établissement d'une liste exhaustive des espèces minérales concernées se poursuit encore aujourd'hui. La classification en minéral pathogène requiert une évaluation de leur toxicité via des tests *in vitro* mais également *in vivo*, très chronophages et coûteux. Les résultats de ce type d'expérimentation demeurent en attente pour plusieurs d'entre eux (Petriglieri et al., 2018, Gualtieri et al., 2021, Mattioli et al., 2022).

En second lieu, la quantification de l'exposition, en milieu ouvert, nécessite le développement de nouvelles méthodologies/protocoles adaptés, pour tenir compte de la grande variabilité des conditions environnementales des zones d'affleurement. Ces milieux, non confinés, rendent beaucoup plus complexe l'évaluation de la capacité de dispersion des fibres pathogènes (humidité, direction du vent, morphologie de l'affleurement, pluviométrie...). Les activités susceptibles de mobiliser ces fibres et favoriser l'exposition demeurent également très variées, avec des impacts très hétérogènes (Pacella et al., 2015 ; Gwenzi et al., 2020).

Contrairement à l'évolution en milieu confiné, les occurrences naturelles d'amiante et de minéraux asbestiformes subissent les mêmes transformations que tous les minéraux affleurants. Le lessivage par les eaux de surface, est susceptible de modifier les propriétés de cohésion des minéraux et la chimie de surface des fibres (Gazzano et al., 2023 ; Petriglieri et al., 2019, 2020, 2021 ; Laporte et al., 2018). L'érosion, une altération naturelle mécanique, aboutit, via la fragmentation des roches, à la formation de particules sédimentaires capables de se disperser dans l'environnement. L'évaluation du risque d'exposition des populations proximales de NOA doit prendre en compte cette évolution temporelle, liée à l'altération de surface (Figure 3).



Figure 3 : Évolution du minéral asbestiforme, Antigorite, sous l'effet de l'altération de surface (d'après Petriglieri et al., 2019 et fiches entreprises minières calédoniennes)

À ce jour, les recherches sur les occurrences naturelles d'amiante focalisent leurs travaux essentiellement sur les expositions par dispersions des aérosols contaminés. De la même façon, les études sanitaires se concentrent très

majoritairement sur les pathologies liées aux inhalations des fibres et PMA (cancers du poumon, mésothéliome...). Cependant, si en milieu confiné, les fibres pathogènes se dispersent exclusivement sous forme d'aérosols, dans l'environnement, les eaux de ruissellement puis les rivières et fleuves, représentent des agents supplémentaires de déplacement des particules fibreuses. Comme toute particule sédimentaire érodée, ces dernières peuvent se déposer loin de la source initiale, pour constituer de nouveaux affleurements, de l'amont vers l'aval des cours d'eau (dessèchements des zones inondables, contamination des granulats et sables...). Si un affleurement rocheux révèle facilement la présence de minéraux asbestiformes aux yeux des géologues ou des personnes formées, la masse de sédiments transportés peut dissimuler l'existence de fibres aisément mobilisables dans les zones de dépôts sédimentaires. Or, la présence de particules fibreuses dans les eaux de surface, expose également aux risques, nouvellement définis, d'ingestion de ces fibres pathogènes, que des travaux récents associent aux développements potentiels de cancers de l'estomac, colorectaux et pharyngés (ANSES, 2022).

Le risque sanitaire encouru suite à la proximité d'occurrences naturelles d'amiantes et de minéraux asbestiformes, qui représente, dans certains sites et pays, une problématique de santé publique, impose impérativement la mise en place de politiques et de législations pour prévenir le danger et sécuriser les populations. Pour rappel, sur un total de 59 pays disposant de registres sanitaires considérés comme satisfaisants, l'analyse des données aboutit à un taux de 38 400 décès par mésothéliome / an (Odgerel et al., 2017). Le développement de plans de prévention des risques liés à la présence de NOA doit reposer sur une juste évaluation de la dangerosité des fibres émises et du potentiel d'exposition. En effet, une politique « alarmiste », des réglementations trop extrémistes, et inutilement sévères, peuvent avoir des conséquences sanitaires et économiques plus importantes que l'impact des NOA. À titre d'exemple, la communication d'un risque avéré entraîne la dévalorisation d'un bien immobilier, qui représente parfois une garantie financière de fin de vie protégée, ou une succession de valeur pour les descendants. La perte de ce bien qui résulte de l'investissement d'une vie, peut entraîner à titre individuel un risque de dépression grave, voire de suicide et à titre collectif, une panique stressante pour les populations, ainsi qu'une désertification des zones impactées avec toutes les difficultés économiques inhérentes.

La Nouvelle-Calédonie se retrouve confrontée à ces problématiques complexes liées à la présence de NOA. En effet, l'île de la grande terre calédonienne intègre des terrains potentiellement amiantifères sur plus de la moitié de sa superficie (BRGM-DIMENC, 2010, Figure 1). L'exposition aux occurrences naturelles d'asbestes est un problème majeur de santé publique sur le territoire. La présence de minéraux asbestiformes, non reconnus comme amiante mais présentant des effets toxiques potentiellement similaires, ainsi que la possible augmentation de la capacité de libération des fibres et fibrilles pathogènes sous l'influence d'un climat tropical (fortes pluviométries), concourent à accroître l'exposition des populations calédoniennes (Gazzano et al., 2023; Petriglieri et al., 2019, 2020, 2021; Laporte et al., 2018). Dans le cadre d'une meilleure prévention du risque sanitaire lié aux NOA, le projet SAFE proposait donc, d'acquérir de nouvelles données scientifiques et de développer des méthodologies innovantes, afin de mieux comprendre la capacité de dispersion des fibres et particules sédimentaires amiantifères par les eaux douces, à travers l'étude de bassins versants calédoniens. Initialement le projet SAFE concernait la totalité des sources d'émissions des fibres pathogènes depuis les affleurements en amont, jusqu'à l'embouchure et également plusieurs bassins versants couvrant plusieurs zones géographiques de la Nouvelle-Calédonie. Les réductions des ressources dédiées aux analyses imposaient de diminuer leur nombre, en réduisant les objets étudiés aux particules sédimentaires d'un seul bassin versant, en l'occurrence celui de la Tontouta. Cependant, le développement de nouvelles méthodologies pour l'acquisition des données nécessaires à l'établissement d'une meilleure prévention du risque sanitaire lié aux NOA, compense, au moins partiellement, cette restriction en termes de plus-value scientifique du projet SAFE.

4. Matériels et méthodes

Le projet SAFE repose sur deux approches : 1. l'échantillonnage de roches et sédiments, immergés et émergés, potentiellement amiantifères le long du bassin versant de la Tontouta et 2. Le développement de nouvelles méthodologies pour identifier, compter et caractériser les concentrations en fibres pathogènes dans les sédiments.

4.1 Étude du bassin versant :

Les résultats, acquis au sein du projet SAFE, proviennent d'un échantillonnage représentatif des affleurements situés en amont, sources des particules sédimentaires transportées au sein du bassin versant de la Tontouta, et des particules sédimentées à son embouchure.

4.1.1 Les échantillons :

4.1.1.1 Les affleurements en amont, sur site minier :

L'obligation de se restreindre à l'étude d'un seul bassin versant a guidé le choix vers celui de la rivière de la Tontouta situé au sud de la Grande Terre (Figure 4)

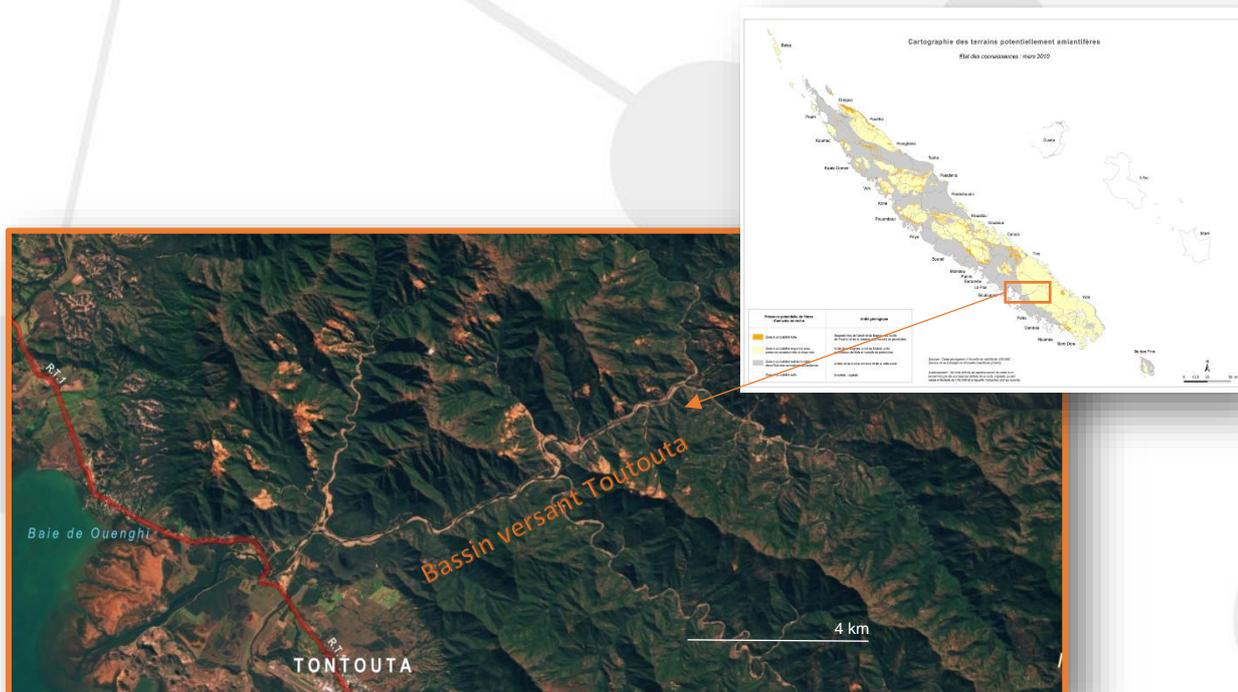


Figure 4 : Image satellite (GEOREP) du bassin versant de la Tontouta (carte des terrains potentiellement amiantifères de Nouvelle-Calédonie, *Maton, D. & Maurizot, P., 2009*)

Ce choix repose sur la présence d'affleurements d'amiante et de minéraux amiantifères en amont du bassin versant, sur plusieurs sites d'exploitation, à ciel ouvert, de mines de Nickel. Ces affleurements ont fait l'objet d'une campagne d'échantillonnage, en collaboration avec la Société Minière Georges Montagnat (SMGM, que nous remercions pour la qualité à la fois humaine et scientifique de son accompagnement, et tout particulièrement Monsieur Denis Fayard, chef de mine) et les membres du projet SAFE de l'Université de Turin (Pr Francesco Turci, Jasmine Rita Petriglieri et Barale Luca) et de l'UNC (Figure 5). Ces prélèvements de roches amiantifères font suite aux échantillonnages, réalisés sur la même zone d'exploitation minière, pour le programme « Amiante et Bonnes Pratiques », financé par le CNRT (Petriglieri et al., 2020, 2021 ; Laporte et al. 2018). L'ensemble représente un total de 38 échantillons, dont les analyses minéralogiques identifient des chrysotiles et des antigorites fibreuses (Diffraction des rayons X, Microscopie

électronique à balayage et transmission et spectroscopie Raman). Les analyses chimiques prouvent également que ces minéraux fibreux se classent dans différents degrés d'altération. Ils possèdent donc des propriétés de cohésion, et des compositions chimiques variables. Les analyses minéralogiques et physico-chimiques de ces prélèvements de minéraux d'amiante et amiantifères, des mines situées en amont du bassin versant de la Tontouta, apportent donc une connaissance étayée des NOA, qui suite à l'érosion et au ruissellement des eaux de pluie, participent potentiellement aux matières en suspension transportées par les eaux de la rivière, de l'amont vers l'aval.



Figure 5 : Exemple de prélèvement de roches amiantifères à antigorite, sur le site minier de la Tontouta

4.1.1.2 Les dépôts sédimentaires en aval, à l'embouchure :

L'objectif de cet échantillonnage résidait dans l'estimation de la capacité de transport et de sédimentation des particules sédimentaires de minéraux d'amiante et amiantifères depuis les affleurements miniers jusqu'à l'embouchure de la Tontouta. Pour minimiser le nombre d'échantillons à traiter pour obtenir la réponse, le choix a consisté à remonter le lit de la rivière, en débutant par l'embouchure. En effet, les particules sédimentées en aval proviennent exclusivement des apports de matière en suspension transportée dans le cours d'eau depuis l'amont.

L'échantillonnage des sédiments s'échelonnait suivant deux coupes : une longitudinale, amont-aval, sur une distance de 20 m, et une seconde transverse, perpendiculaire à la première, sur une distance de 10 m (Figure 6). Au total, l'ensemble des prélèvements forme une masse d'environ 10 kg de sédiments, récoltés en période sèche (Août). Ils représentent à la fois les sédiments immergés dans le lit de la rivière et ceux affleurant, dans la zone centrale asséchée. Dans l'eau, les particules peuvent être remises en suspension par agitation (risque potentiel d'absorption) et dans la zone à l'air libre, elles peuvent constituer des aérosols (risque potentiel d'inhalation). Lors des échantillonnages aucune personne non impliquée dans le projet n'était présente, et les eaux n'avaient subies aucune perturbation préalable. Chaque échantillon représente un mélange de plusieurs prises au même endroit pour assurer la bonne représentativité du site (Figure 7). L'objectif étant de rechercher la présence de fibres pathogènes, dont les tailles se limitent à quelques dizaines de micromètres, ce protocole ne concernait que les particules les plus fines à l'œil nu. Toutes les précautions nécessaires à la protection des individus ont été prises tout au long des prélèvements.



Figure 6 : Positionnement des points d'échantillonnage à l'embouchure de la Tontouta (zone et points en rouge)

4.1.2 Modalités d'identification des particules et fibres amiantifères :

Pour chaque échantillon de sédiments, 4 prélèvements secondaires, de la valeur d'une demi cuillère à café ont été triés à la loupe binoculaire. Il s'agissait d'isoler manuellement les particules présentant les caractéristiques morphologiques, d'éclat, et de couleur les plus proches des minéraux d'amiantes identifiés sur les affleurements initiaux.



Figure 7 : Échantillonnage des sédiments immergés (à gauche) et émergés (à droite). Exemple de prélèvement analysé à la loupe binoculaire (en bas)

Chaque particule sédimentaire sélectionnée et isolée, a ensuite fait l'objet d'une prise de photo, et d'une analyse par microscopie électronique (MET) à transmission par imagerie, pour déterminer la minéralogie, et par spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDX) pour obtenir une composition chimique de surface. 9 particules sédimentaires ont également fait l'objet d'une imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB). Ces analyses MET et MEB, ont

été réalisées à la plateforme P2M (CRESICA), par Aurélie Monnin et Olivia Barthelemy. Les appareillages utilisés sont le MEB JEOL JSM – IT 300 LV, le MET JEOL 1400 et la sonde EDX Cam 80 associée au logiciel AZtec, Oxford. Le protocole suivi pour les analyses MET répond aux normes NFX43-050, version 2021, et NF ISO 2262 et 2262-2, version 2014.

4.2 Développements méthodologiques :

En complément du traçage du potentiel de dispersion des particules sédimentaires amiantifères le long d'un bassin versant, le consortium scientifique du projet SAFE souhaitait apporter des outils et méthodologies indispensables pour favoriser un suivi du comportement des NOA dans le compartiment eau douce. L'aspect novateur de cette thématique scientifique implique qu'une carence demeure en la matière. Les protocoles d'échantillonnage et de quantification de la concentration de fibres et fibrilles dans l'air correspondent à des normes, clairement identifiées, mais encore inexistantes pour ce qui concerne le réseau hydrique de surface.

L'un des points communs aux deux problématiques réside dans l'aspect extrêmement chronophage des analyses et comptages des fibres par MET (norme NFX43-050), ainsi que la variabilité possible des arbitrages réalisés lors de la procédure en fonction des opérateurs. Or, l'obtention d'une réponse représentative de la présence ou pas de fibres nécessite un nombre important d'échantillons traités. Pour tenter d'apporter des éléments de réponses, le projet SAFE a proposé de développer un logiciel qui assure une reconnaissance des fibres à partir d'images numériques.

Parmi les spécificités liées à la recherche de fibres amiantifères dans des sédiments, en milieu non confiné, figurent la grande étendue de la zone étudiée, ainsi que la quantité et l'hétérogénéité importantes des particules présentes dans ce milieu. A l'inverse, la quantité d'échantillon, déposée pour la recherche de fibres via l'analyse au MET, n'excède pas quelques μl . La question cruciale demeure alors d'obtenir en fin de chaîne, des résultats garantissant une représentativité de la variabilité et de l'échelle pluri-métrique du milieu initial étudié. Autrement dit, comment obtenir avec un minimum de certitude une concentration de fibres dans les dépôts sédimentaires initiaux à partir de leur comptage sur une grille d'analyse au MET. Le projet SAFE propose d'apporter des éléments de réponse.

4.2.1 Reconnaissance automatisée des fibres par traitement et analyse d'image associé au Machine Learning

Les images numériques utilisées pour ce volet du projet SAFE correspondent à des photos, de vues en microscopie optique, de filtres de liquides chargés en matière en suspension contaminée par de l'amiante de type trémolite (familles des amphiboles), (Figure 8).

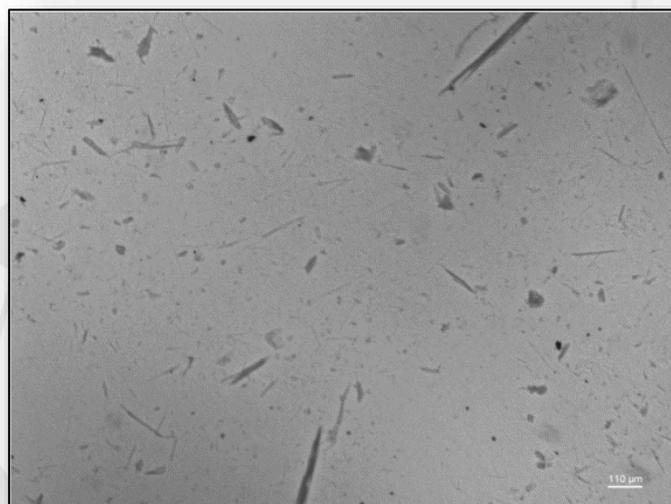


Figure 8 : Image brute initiale des particules déposées sur un filtre de $0,45\mu\text{m}$ après filtration d'un liquide contenant des fibres de trémolite en suspension.

Les paramètres qui définissent la qualité de l'image du filtre support, par rapport à l'extraction d'objets recherchés, peuvent être très hétérogènes d'une acquisition à l'autre (netteté, contraste, homogénéité du fond numérique, taille du pixel...). En amont de la détection des formes à caractériser, les images doivent subir un prétraitement, afin de compenser ces variations de qualité et préparer des supports dont les caractéristiques demeurent les plus homogènes possibles. La démarche suivie a consisté à appliquer une technique de segmentation, inspirée de la méthode de Kenichi-Ishizu, qui permet d'extraire efficacement la part du fond de l'image (tout ce qui est hors objet) et attribuer une valeur nulle à chacun de ces pixels. L'application d'un seuillage fournit par la suite une image binaire (valeur de seuillage choisie 20%, après tests de pourcentages progressifs).

Ce prétraitement induit des défauts d'attribution des pixels, entre fond et objet, dont les conséquences peuvent être une perte partielle ou totale de la continuité d'une fibre. L'application d'un algorithme de restauration des objets compense ces erreurs (comparaison avec l'image de base pour retrouver l'information perdue, aménagement de l'algorithme de Floodfill). La segmentation, favorise également l'apparition d'un bruitage de l'image, consécutif à la présence de zones très claires, dans le fond de l'image, impliquant des valeurs de pixels trop proches de celles des objets. Ces bruits présentent des tailles très réduites et sont éliminés après la segmentation, et avant l'étape de restauration.

L'enjeu suivant réside dans l'individualisation et la détection des fibres parmi l'ensemble des objets présents. Pour rappel, une fibre est définie par : $L > 5\mu\text{m}$, $D < 3\mu\text{m}$ et une valeur $L/D > 3$ ($L =$ Longueur et $D =$ Diamètre). Les paramètres morphologiques des objets doivent être reconnus pour identifier les fibres. Dans un premier temps, l'utilisation de fonctions prédéfinies autorise l'identification du contour de chaque objet. La suite a nécessité le développement d'un algorithme spécifique capable d'identifier les segments représentatifs de chaque objet. Le raisonnement est basé sur la définition de règles applicables aux segments, contraintes par les lignes des contours, et cohérentes avec les paramètres morphologiques définissant une fibre. Le résultat est l'identification de segments pour chaque point de contour qui respectent les règles posées (utilisation de l'algorithme de Bresenham). Une filtration de ces segments permet ensuite de ne conserver que ceux nécessaires à la représentation de la forme.

La difficulté principale pour obtenir les paramètres morphologiques et le nombre des fibres, réside dans leur positionnement aléatoire sur le filtre (partiellement masquées par les autres particules non fibreuses), et notamment dans la présence d'amas, qui rendent très ardue l'individualisation et la reconnaissance des contours de chaque objet fibreux. Le manipulateur responsable de la reconnaissance et du comptage de fibres est confronté aux mêmes problématiques et doit alors réaliser un choix face aux lacunes visuelles. La preuve en est que les protocoles normés imposent un cadre décisionnel en la matière, pour assurer au maximum une reproductibilité des résultats, quel que soit le manipulateur. L'algorithme développé permet, in fine de représenter chaque morphologie fibreuse par un segment. Ce résultat autorise non seulement l'identification des fibres sur l'image, en comparant les valeurs des segments aux critères morphologiques les définissant, mais également leur comptage y compris lors de superposition dans certain type d'amas. Le développement d'une interface fonctionnelle donne accès à ces différents traitements et aux résultats finaux. La figure 9 synthétise la démarche suivie pour l'élaboration de ce logiciel de reconnaissance automatique des fibres à partir d'images numériques. Ces travaux sont les résultats de l'implication des chercheurs en informatique du consortium du projet SAFE, ainsi que de Nathaël-Christian Galante-Gras (élève ingénieur), de Mathéo Moinet et Guillaume Berthelat (étudiants de licence), stagiaires encadrés par la Pr Nazha Selmaoui-Folcher, Jannai Tokotoko (docteur en informatique) et Christine Laporte-Magoni.

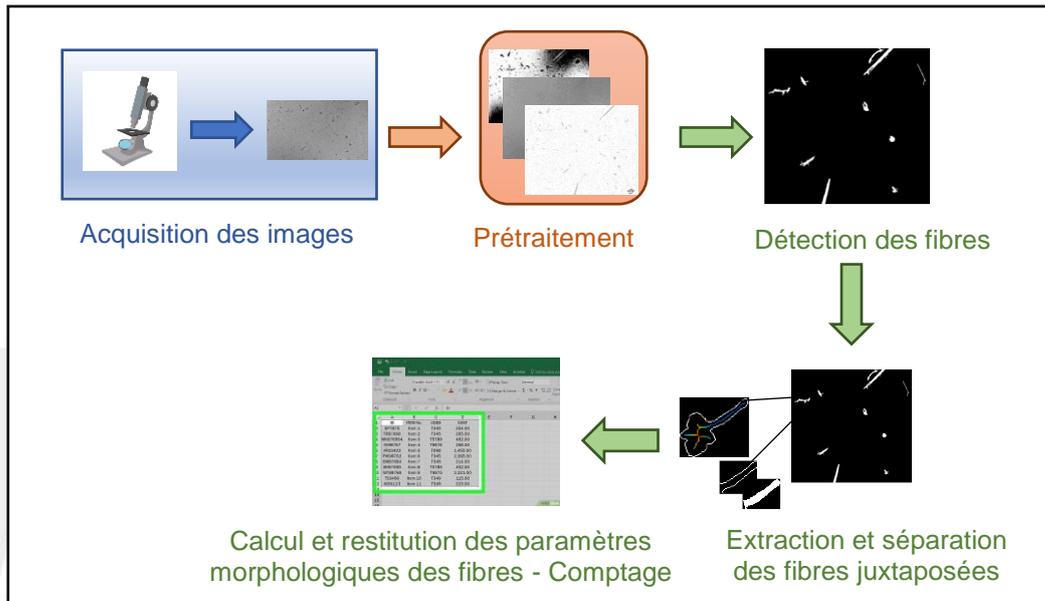


Figure 9 : Synthèse des étapes depuis l'acquisition de l'image jusqu'à la reconnaissance automatique du nombre et de la morphologie des fibres.

4.2.2 Quantification des fibres dans des sédiments :

Obtenir une quantification de la concentration en fibres d'un sédiment, à l'issue du comptage des fibres identifiées par MET, présente de grandes difficultés. Le premier obstacle est l'écart énorme entre la quantité d'échantillon analysée par microscopie et celle du sédiment initial. Le projet SAFE n'a pas pour ambition de résoudre cette problématique, mais d'apporter quelques éléments de réponse.

Le premier d'entre eux réside dans la quantification de la valeur minimum de concentration en fibres dans le sédiment, nécessaire pour l'identification d'au moins une fibre, au cours de l'analyse au MET. Il s'agit donc de déterminer un seuil de détection. L'objectif, par la suite, consistera à tester l'existence d'un lien, récurrent et stable, entre la concentration en fibres du sédiment et le nombre de fibres présentes sur la grille analysée au MET. Il sera alors possible de remonter à la concentration en fibres dans le sédiment initial, sur la base du comptage réalisé par microscopie.

La granulométrie et la nature minéralogique des particules sédimentaires associées au NOA, le nombre d'échantillon en fonction de la quantité initiale de sédiments (échelle terrain), ainsi que la répartition et le nombre de prélèvements réalisés pour effectuer les observations en microscopie par échantillon de sédiment (échelle laboratoire), peuvent représenter des paramètres susceptibles d'influencer, le nombre et la morphologie, des fibres détectées par l'analyse au MET. Dans un premier temps, les expériences incluaient exclusivement une seule amiante, en l'occurrence du chrysotile (UICC Chrysotile A rhodesian asbestos, 02701-AB SPI / 775065, lot 1091030, Bowes & Farrow, 1997). La démarche à consister à choisir deux sédiments de natures minéralogiques distinctes, l'un latéritique, l'autre volcanosédimentaire, de granulométrie fine (< 200 µm), et d'effectuer des mélanges contrôlés en ajoutant des volumes connus de chrysotile. L'échantillon contrôlé a ensuite été mélangé abondamment, puis quarté en 10 surfaces les plus égales possibles. Trois surfaces, toujours les mêmes pour chaque quartage, ont fait l'objet de trois prélèvements destinés à l'analyse au MET (dépôt sur grille). L'étape finale de préparation et d'analyse des prélèvements par microscopie électronique à transmission suit les procédures décrites dans les normes NF ISO 2262 et 2262-2, 2014, et NF X 43-050, destinée au dosage quantitatif de l'amiante en utilisant les méthodes gravimétrique et microscopique, sur des matériaux et produits commerciaux contaminés (Figure 10). La totalité des analyses MET ont été réalisées à la plateforme P2M (CRESICA), par Aurélie Monnin et Olivia Barthelemy. L'appareillage utilisé est le MET JEOL 1400.

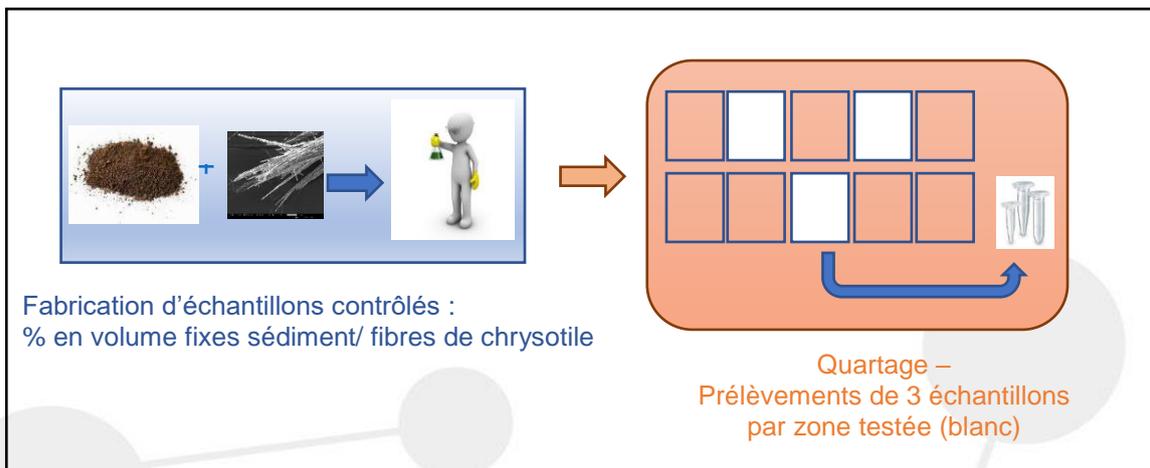


Figure 10 : Synthèse des étapes du protocole suivi pour évaluer un seuil de détection des fibres dans un sédiment.

Les premiers résultats obtenus au cours du projet SAFE figurent dans l'annexe 3. Le protocole suivi en amont de la préparation des grilles d'analyse au MET apparaît cohérent et efficace d'après ces premiers résultats.

Un rapport en volume semble prévaloir sur la masse pour définir le mélange. En effet, les deux types de sédiments initiaux, choisis pour bâtir les mélanges contrôlés, ne possèdent pas la même densité : les mêmes volumes fournissent des masses différentes, d'un facteur quasiment égal à 2. Par contre, les nombres de fibres identifiées suivant la norme NF X 43-050 demeurent très proches dans les deux cas : $M_{15} = 36$ fibres et $UN_{15} = 40$ fibres. Le volume de sédiment et le volume de fibres de chrysotile ajoutés sont identiques dans les deux expériences, alors que les masses diffèrent. Il est donc raisonnable d'estimer que le mélange en volume a plus de signification. Pour valider cette première conclusion, il sera nécessaire de vérifier que le volume de fibres ajouté est bien constant entre les expériences.

Ces premières expériences, qui devront être poursuivies semblent montrer que pour un ratio (volume de fibres/ml de sédiment) égal à $1/15$, les fibres sont détectables suivant le protocole normé NF X 43-050.

5. Résultats et discussions

5.1. Capacité de dispersion des particules dans les eaux de surface :

Les tris à la loupe binoculaire des échantillons de sédiments immergés et émergés, prélevés à l'embouchure de la Tontouta, que ce soit de l'amont vers l'aval ou transversalement au cours d'eau, ont tous permis d'identifier des particules sédimentaires d'amiante. La reconnaissance résultait de la similitude des caractéristiques visuelles avec les minéraux d'amiante observés à l'affleurement sur site minier (exemple : figure 11a et 11b). Tous les prélèvements de tous les échantillons contenaient des particules d'antigorite et de chrysotile. Les analyses en microscopie électronique à balayage et à transmission, ainsi que les mesures par diffraction et EDX ont confirmé la présence de fibres d'antigorite (Figure 11 et 12) et de chrysotile (Figure 14).

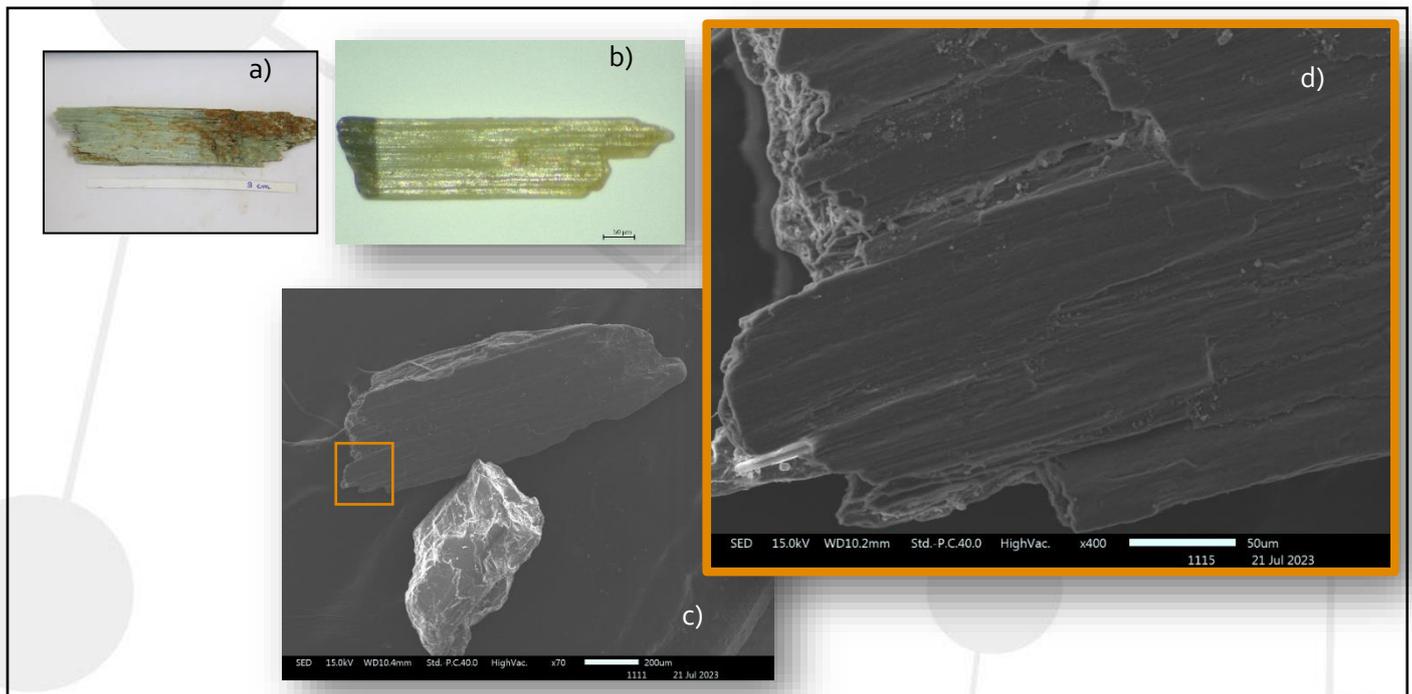


Figure 11 : a) Photo d'un échantillon d'antigorite, peu altéré, prélevé sur un affleurement de la mine de la Tontouta (NOA, Laporte et al., 2018) ; b) Photo en microscopie optique d'une particule sédimentaire d'antigorite (échantillon T₄, zone immergée) ; c) Image en microscopie électronique à balayage (MEB) d'une particule sédimentaire d'antigorite ; et d) zoom de la zone encadrée en orange de l'image MEB b).

Les images MEB des particules sédimentaires d'antigorite permettent de reconnaître l'organisation lamellaire caractéristique de cette amiante. Ces lamelles se scindent en fibrilles telles que visibles sur l'image figure 11c), et plus encore sur l'image acquise au MET (figure 12a). Les analyses par diffraction et EDX réalisées sur plusieurs points de la surface des fibres, confirment l'identification minéralogique d'antigorite (figure 12b).

Les observations des affleurements en amont, sur secteur minier, montrent la présence de plusieurs degrés d'altération supergène des minéraux d'antigorite. Le lessivage de surface modifie leurs compositions chimiques et leurs propriétés de cohésion. Les conséquences sont une augmentation de la capacité de libération des fibres pathogènes mais également, si les premiers résultats acquis in vitro se confirment in vivo, une croissance des radicaux libres libérés et des réactions inflammatoires caractéristiques de la toxicologie des amiantes (Petriglieri et al., 2019, 2020 et 2021 ; Gazzano et al., 2023). Or, le tri à la loupe binoculaire a permis d'identifier des particules sédimentaires d'antigorite de degrés d'altération différents (Figure 13b).

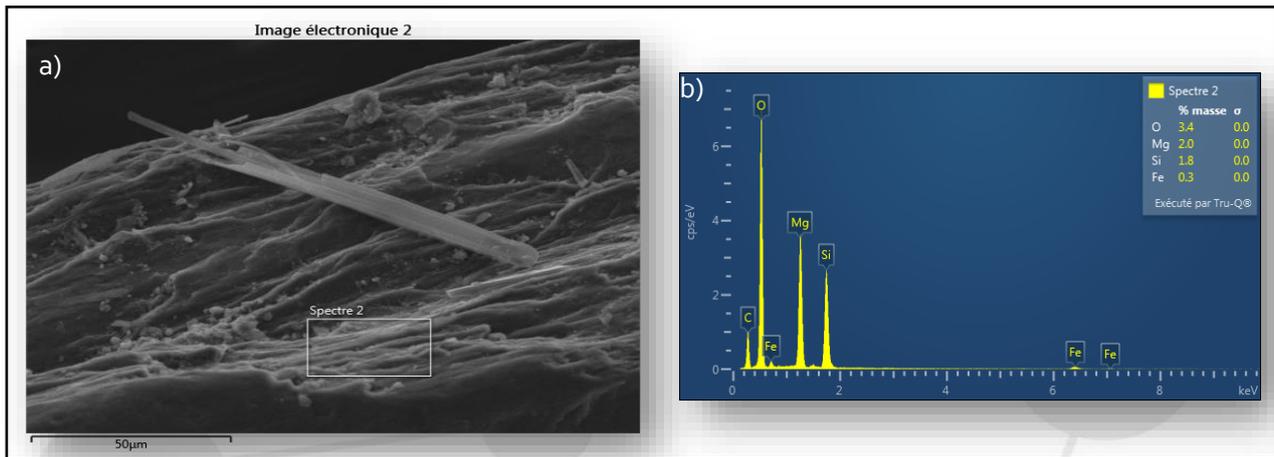


Figure 12 : Image MET (a) et analyse par EDX d'une particule sédimentaire d'antigorite de l'échantillon T4

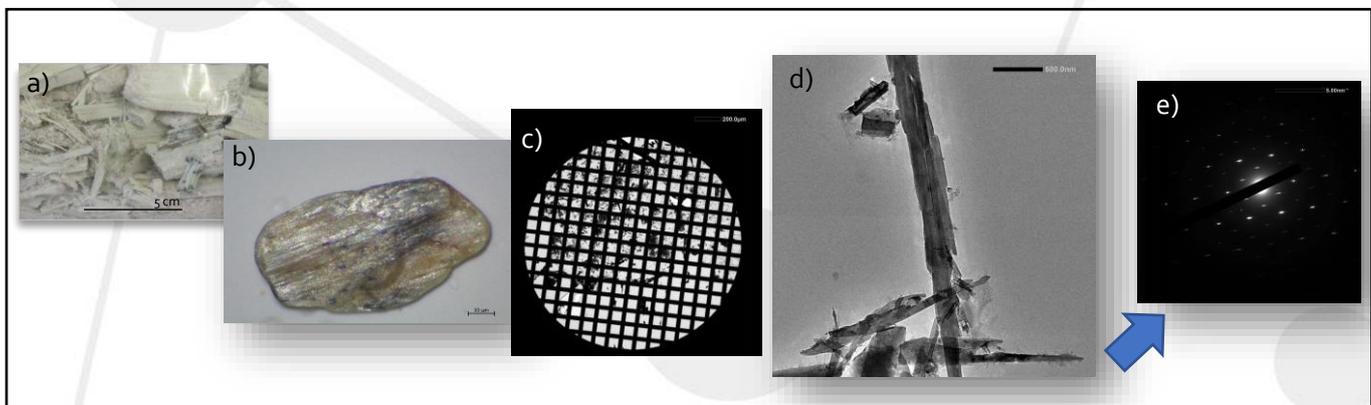


Figure 13 : a) Photographie d'un échantillon de minéral d'antigorite de niveau d'altération 2, prélevé sur le site minier de la Tontouta (Laporte et al., 2018) ; b) Photo en microscopie optique d'une particule sédimentaire d'antigorite altérée (échantillon T4-10 m-2) ; c) grille de préparation de l'échantillon T4-10 m-2 pour l'observation au MET ; d) Image au MET des fibres d'antigorite de l'échantillon T4-10 m-2 ; e) Résultat de diffraction MET (T4-10 m-2).

Ce résultat confirme que les particules d'antigorite altérées résistent, au moins partiellement, au transport le long de l'ensemble du bassin versant de la Tontouta, pour se déposer en aval sur de longues distances. Il n'y a donc pas dissolution ou désagrégation complète de la totalité des antigorites altérées dans les eaux de la rivière. En termes de contribution à l'évaluation du risque sanitaire encouru par les populations exposées, c'est un élément à prendre en compte puisque ces NOA ne présentent pas la même virulence toxique. La comparaison de la quantité, de particules et de fibres, présente sur des grilles de préparation pour l'analyse au MET, des différents échantillons d'antigorite, semble déjà montrer une croissance forte de la quantité de matière et de fibres pour le plus haut degré d'altération de ces particules sédimentaires (couverture de la grille très importante figure 13c).

La totalité, des sédiments échantillonnés, a également révélé la présence de particules sédimentaires de chrysotile. Les proportions semblent inférieures à celles des antigorites mais une quantification plus exacte doit être réalisée pour le confirmer définitivement. Les études minéralogiques menées sur site minier dénotaient de cette différence de représentativité avec une dominance quantitative des occurrences d'antigorite. En cohérence avec l'organisation des affleurements sur site minier, les particules sédimentaires de chrysotile montrent des alternances de cristallisation avec de la lizardite, une autre serpentine, mais non fibreuse (Figure 14). L'image MEB, figure 14c, témoigne de l'organisation en amas de fibrilles, typique des fibres de chrysotile, (à noter également, la présence de microalgues (cercle blanc), qui attestent de l'échantillonnage en milieu aqueux). De la même façon, l'image MET 14d et 14 e) révèlent la présence, au centre des fibres et fibrilles, de la tubulure typique de la structure cristalline des chrysotiles, et qui ne laisse aucun doute sur la nature minéralogique de ces fibres d'origine sédimentaire.

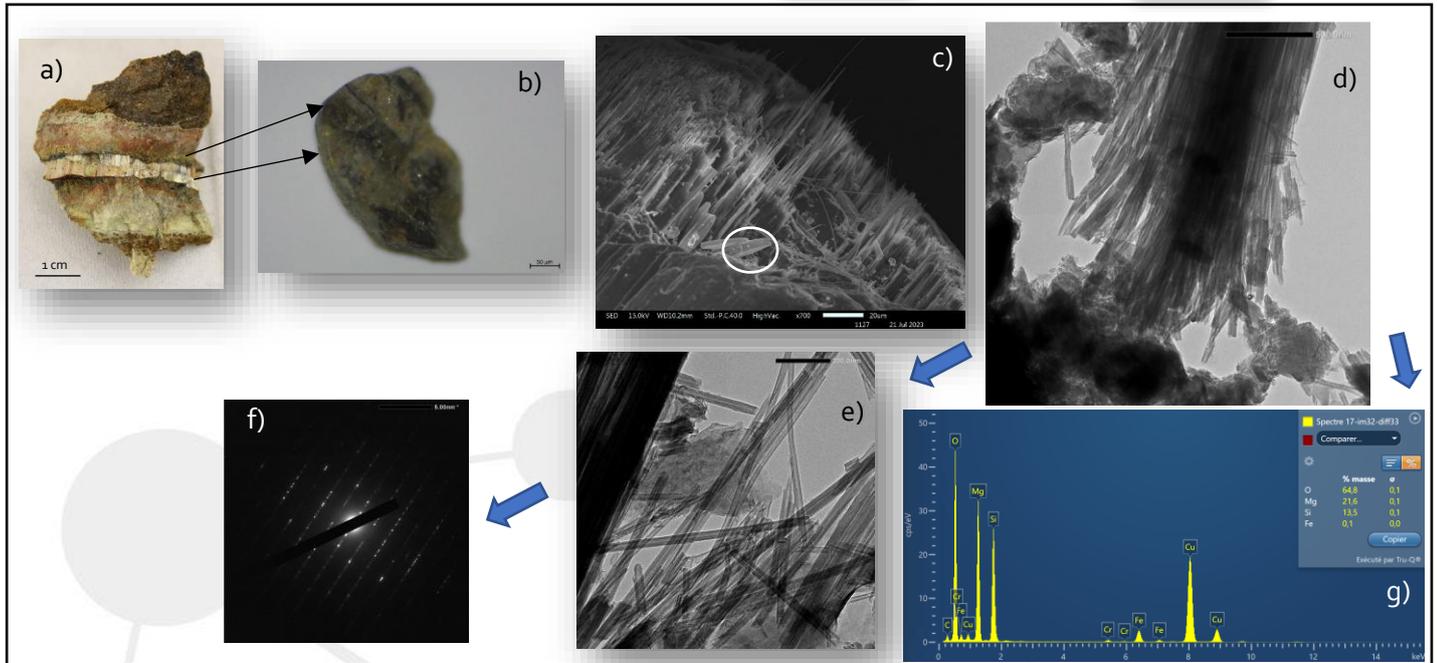


Figure 14 : **a)** Photographie d'un échantillon de minéraux de chrysotile, prélevé sur site minier (Laporte et al., 2018) ; **b)** Photo en microscopie optique d'une particule sédimentaire de chrysotile (échantillon T₄-10 m-4) ; **c)** Image en microscopie électronique à balayage (MEB) des fibres de chrysotile (échantillon T₄-10 m-4) ; **d) e)** Images au MET des fibres de chrysotile de l'échantillon T₄-10 m-4 ; **f)** Résultat de diffraction MET (T₄-10 m-4) ; **g)** Résultat analyse EDX, en surface des fibres de chrysotile (T₄-10 m-4).

Les résultats de diffractométrie et EDX (figure 14f et g) sont similaires à ceux obtenus lors de l'étude des minéraux de chrysotiles des NOA présentes sur site minier (Petriglieri, 2017). En fonction des conditions physico-chimiques du milieu, les capacités de dissolution du chrysotile peuvent être considérées comme supérieures aux autres amiantes, notamment en comparaison de celles appartenant à la famille des amphiboles (Walter et al., 2022 ; Bloise et al., 2020 ; Laporte et al., 2018). Les données acquises dans le projet SAFE attestent qu'à l'échelle du bassin versant de la Tontouta, les particules et fibres de chrysotile érodées depuis le site minier en amont, perdurent dans les matières en suspension transportées par la rivière, pour se déposer jusqu'à la zone la plus en aval. Le chrysotile et l'antigorite, de part leur appartenance à la même famille des serpentines, présentent des similitudes chimiques. Cependant, si nous comparons les résultats des analyses EDX obtenues sur les fibres sédimentaires de ces deux minéralogies, nous constatons des traces de Cr pour le chrysotile, qui semblent absentes des antigorites. Si ces premières données sont confirmées par un nombre plus représentatif d'acquisitions, cela implique que les fibres de chrysotile constituent des sources potentielles de Cr dissout, biodisponible. Or, le chrome possède deux spéciations dont la plus soluble, le CrVI est reconnu pour son caractère fortement cancérigène. Comme le soulignent Bloise et al., 2020, dans le cadre d'une évaluation de la toxicité des fibres de chrysotile issues des NOA, il sera nécessaire de prendre en compte cet « *effet cocktail* » de source potentielle d'éléments traces pathogènes et d'appartenance à la catégorie des amiantes.

Les sédiments triés à la loupe binoculaire semblaient intégrer des particules de trémolite. Leur nombre, est de moitié inférieur à celui des antigorites et chrysotiles. Cependant, les analyses de ces fragments, au MET, fournissent des résultats non totalement discriminants. Si les données d'EDX révèlent la présence d'un pic de calcium et un profil chimique compatible avec les valeurs connues de la trémolite, la diffractométrie fournit des distances réticulaires de valeurs d'angle proches de celles précédemment obtenues à partir de NOA de trémolites calédoniennes, mais pas totalement similaires (Annexe 2). La certitude d'une dispersion de particules érodées de trémolite le long du bassin versant de la Tontouta requiert l'acquisition d'un plus grand nombre de données.

5.2 Développements méthodologiques :

5.2.1 Reconnaissance automatisée des fibres par traitement et analyse d'image associé au Machine Learning

L'ensemble des algorithmes développés dans le projet SAFE, tels que décrit dans le chapitre « matériels et méthodes », ont démontré leur efficacité pour l'identification, le comptage et l'obtention des paramètres morphologiques, des fibres déposées sur un filtre de séparation, des particules en suspension, de la fraction dissoute. Le prétraitement, par filtration et segmentation des images, a permis d'optimiser la séparation des pixels du fond de l'image de ceux appartenant aux objets, ou particules déposées. Les valeurs du fond de l'image sont alors totalement retirées (figure 15).

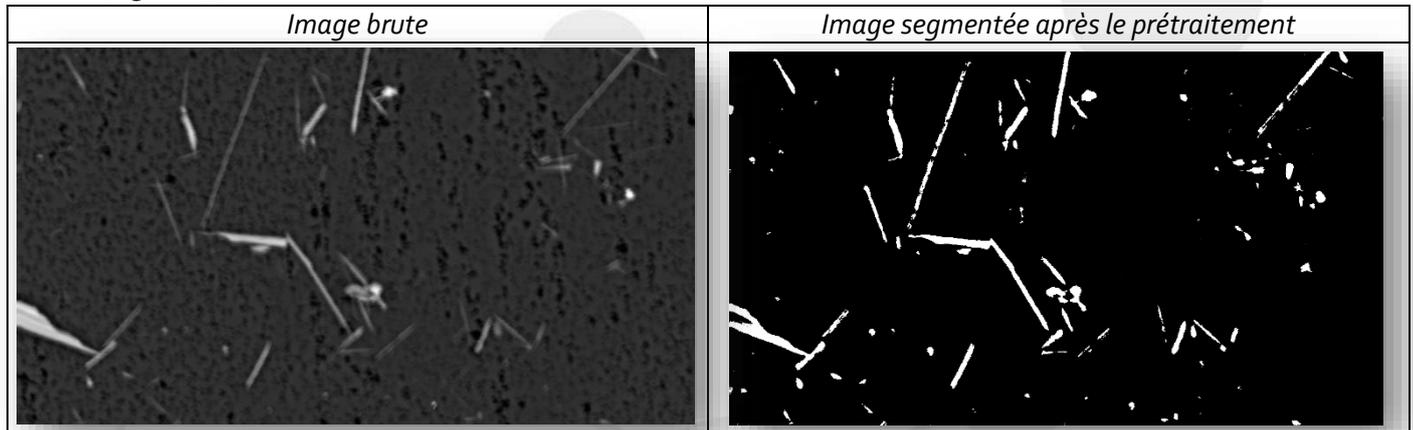


Figure 15 : Image obtenue après prétraitement et segmentation de l'image brute initiale

Les algorithmes de restauration et de réduction du bruitage des images ainsi obtenues achèvent la préparation pour la détection des fibres parmi l'ensemble des particules. La reconnaissance des contours et l'identification des segments permettent de singulariser les morphologies fibreuses (Figure 16).

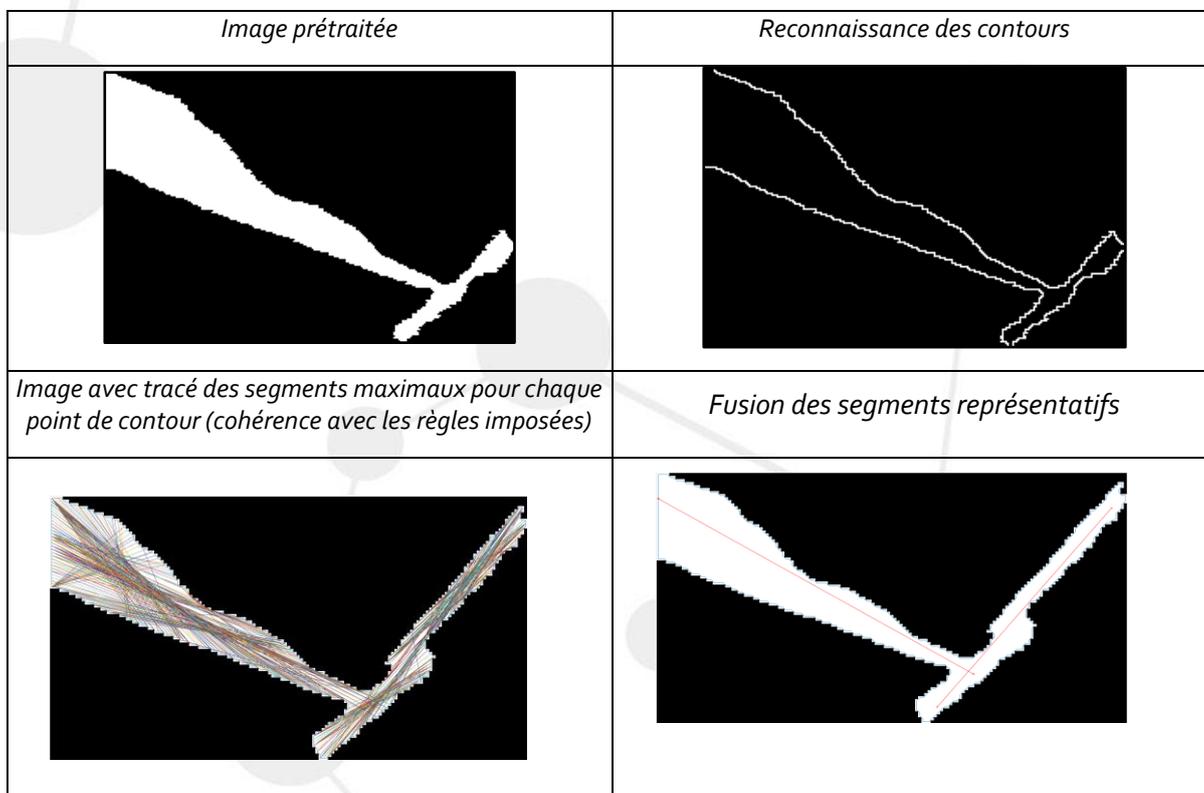


Figure 16 : Illustration des résultats de chacune des étapes de reconnaissance des fibres.

La figure 17 montre la comparaison entre l'image brute initiale et l'ensemble des formes fibreuses reconnues après utilisation du logiciel développé au sein du programme SAFE. Seules les fibres demeurent visibles dans l'image finale et leurs paramètres morphologiques ainsi que leur nombre peuvent être restitués.

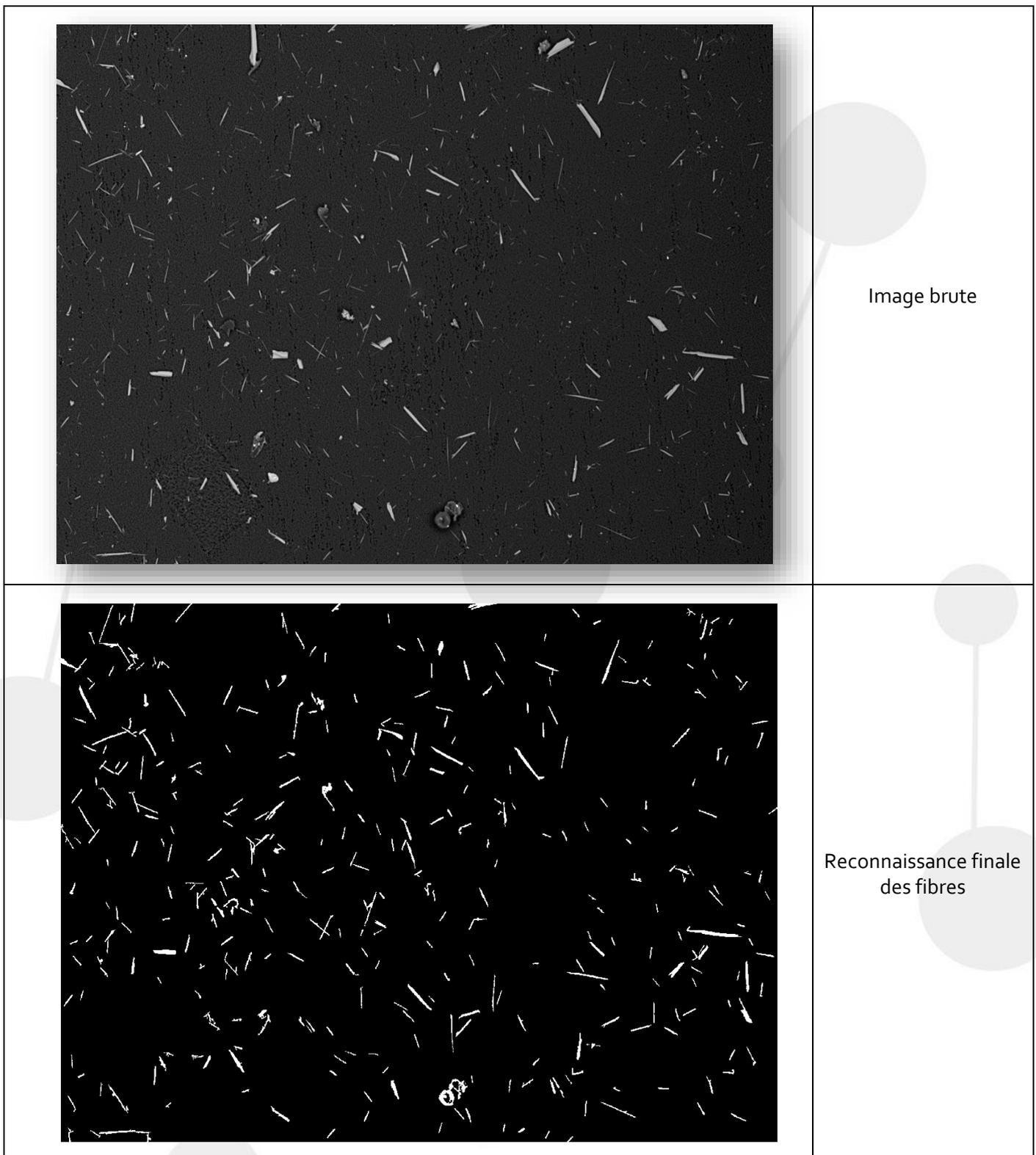


Figure 17 : Exemple de la réponse obtenue via l'utilisation du logiciel de reconnaissance automatique des fibres par traitement d'image de microscopie optique

6. Conclusions et perspectives

Le projet CRESICA SAFE explore pour la première fois les capacités de dispersions des occurrences naturelles d'amiante (NOA) via les eaux douces d'un bassin versant. Les premières données récoltées attestent de l'aptitude des particules sédimentaires d'antigorite et de chrysotile, deux amiantes de la famille des serpentines, à perdurer dans les matières en suspension, lors du transport sédimentaire, et à se déposer bien en aval de l'affleurement source initial. Les observations en microscopie optique et électronique démontrent la présence de fibres facilement libérables dans l'environnement, que ce soit dans l'eau ou à l'air libre. Les contaminations potentielles pour les populations exposées apparaissent donc multiples : par absorption de fibres présentes dans l'eau, ou par inhalation d'aérosols amiantés, issus des dépôts sédimentaires le long du bassin versant.

Dans des travaux antérieurs (programme CNRT Amiante et Bonnes Pratiques), les premières données toxicologiques acquises *in vitro* sur l'antigorite, ont permis de suspecter une corrélation entre l'augmentation de l'altération supergène et leur toxicité (Petriglieri et al., 2019, 2021 ; Gazzano et al., 2023). Les observations des sédiments démontrent la présence de particules d'antigorite altérée. Soit ces particules d'antigorite étaient initialement altérées à l'affleurement amont, soit le transport et les échanges solide-liquide qu'il implique, ont générés cette altération. Cependant, quelle qu'en soit l'origine, la présence de ces particules d'antigorite altérée représente potentiellement une augmentation du risque pour les populations exposées.

Les premières données sur la chimie de surface des fibres de chrysotile, montrent également, la possibilité d'un « effet toxique cocktail » par la présence de concentrations mesurables de chrome. La libération par les fibres et la solubilisation dans les organismes, de cet élément métallique reconnu comme hautement cancérigène dans sa spéciation soluble (CrVI), demeure envisageable et l'impact potentiel sur les propriétés pathogènes des chrysotiles mérite d'être investigué.

Les observations des particules sédimentaires semblaient révéler la présence de trémolite, une amiante de la famille des amphiboles. Les affleurements de NOA sur site minier contiennent une part de trémolite même si quantitativement, elle demeure moins présente que les serpentines fibreuses (Petriglieri, 2017, 2020 ; Laporte et al., 2018). Cependant, si l'identification apparaît cohérente, et si les analyses de microscopie électronique à transmission (MET), n'écartent pas cette possibilité, elles ne permettent pas d'affirmer avec une totale certitude que les particules sédimentaires contiennent de la trémolite.

Le projet CRESICA SAFE apporte les premières réponses de quantification de la capacité de dispersion des NOA le long des bassins versants. Cependant, cette exploration scientifique doit être poursuivie pour confirmer et mieux contraindre ces premiers apports de connaissance sur le sujet. Dans un premier temps, il apparaît indispensable de multiplier les caractérisations minéralogiques des particules sédimentaires transportées et déposées le long du bassin versant de la Tontouta. Un nombre plus important de prélèvements apportera une confirmation statistiquement robuste des conclusions du projet SAFE.

Le bassin versant de la Tontouta représente un exemple de dimensions, de caractéristiques topographiques, et hydrologiques spécifiques, et se situe en aval d'un exemple de typologie de NOA. Les connaissances scientifiques acquises au cours du projet CRESICA SAFE doivent être confortées par l'application de la même méthodologie de suivi sur d'autres bassins versants miniers, mais également, sur des rivières approvisionnées par des NOA de natures minéralogiques différentes (exemple, bassin versant du complexe métamorphique Nord Est de la Nouvelle-Calédonie).

La compréhension de l'ensemble des mécanismes mis en jeu lors de l'apparition d'un risque, ainsi que leur suivi temporel, demeurent indispensables pour l'élaboration des plans de prévention, nécessaires à la protection de l'environnement et des populations exposées. Cependant, cette approche implique l'acquisition d'un nombre très important de données sur des temporalités significatives. Pour concrétiser ces politiques de prévention, il apparaît donc indispensable de pourvoir les services ou organismes compétents en outils d'acquisition de la donnée

performants, rapides et précis. Le projet CRESICA SAFE a permis de développer un logiciel capable d'effectuer la reconnaissance automatique des fibres présentes au sein d'autres particules, à partir d'images numériques de filtres de séparation des fractions particulaires et dissoutes. Leur identification donne accès à leurs paramètres morphologiques en 2 dimensions (Longueur, largeur) ainsi qu'à leur nombre. Les difficultés liées à la transcription dans l'algorithme des critères des choix, normalement réalisés par le manipulateur, face à la présence d'amas de fibres qui rend partielle la vision de chaque individu, apparaissent résolues. Cette déshumanisation de la prise de décision assure la reproductibilité et la neutralité. Cet arbitrage peut ne pas être totalement conforme à la réalité, à l'instar de l'intervention humaine, mais les erreurs commises par le logiciel, ne peuvent en aucun cas être arbitraires, ce qui offre l'opportunité de les estimer et ainsi d'apporter d'éventuelles corrections.

La multiplication des reconnaissances, des morphologies des fibres et des types d'amas, offre l'opportunité de coupler du Machine Learning et ainsi consolider et améliorer les performances du logiciel. La constitution d'une base de données, issue des acquisitions d'informations sur les fibres, présentes sur les filtres ou sur toute image numérique, nourrit le réseau d'apprentissage, et augmente ainsi ses performances de discrimination des objets recherchés. Cette perspective, non encore totalement explorée, devra faire l'objet de futurs développements.

L'aspect novateur des thématiques abordées dans le projet CRESICA SAFE sur le sujet des NOA ouvre des perspectives d'investigation nouvelles. Dans ce cadre, les méthodologies déjà existantes n'apparaissent pas toujours appropriées aux problématiques soulevées ou aux nouveaux environnements d'études. Le développement de nouvelles méthodologies s'avère donc indispensable. Les premiers résultats obtenus pour acquérir un protocole qui permette de définir un seuil de détection des fibres pathogènes dans les sédiments, ouvrent ainsi de nouvelles perspectives d'expérimentation. Ces méthodologies seront ensuite appliquées aux sédiments qui constituent l'enregistrement de la sédimentation en aval de la zone d'exploitation minière de la commune de Thio, sur une période de plus de 100 ans, et carottés au cours du programme CRESICA ECOMINE.

Le consortium scientifique du projet CRESICA SAFE continuera ses investigations pour aborder les différentes perspectives énoncées. Dans cet objectif plusieurs réponses à différents appels à projet ont été déposées (CNRT, Fonds Pacifiques). Il est important notamment de spécifier à quel point l'occurrence de particules sédimentaires d'amiante ne constitue en aucun cas une estimation exhaustive du niveau de risque d'exposition des populations. Ce n'est qu'une identification d'un danger potentiel, sans estimation de la vraie dangerosité.

7. Éléments de valorisation prévus et obtenus

Communications	• Restitutions après du comité scientifique du CRESICA
Conférences	• C. Laporte-Magoni, J.R. Petriglieri, Salvioli-Mariani, A. Monnin, O. Barthelemy. « The impact of surface water on Naturally Occurring Asbestos, Erionite 1 Mineral fibers symposium, University of Auckland, Waipapa Taumata Rau, 28-29 august 2023.
Publications	• Rapports de stage, « Reconnaissance et comptage des fibres d'amiante environnementale par imagerie microscopique », BERTHERAT Guillaume, MOINET Mathéo, 2021, Université de la Nouvelle-Calédonie
Brevets	
Création d'entreprise	
Partenariats	
Utilisation des travaux	
...	

8. Références

ANSES (2022). Saisine n° 2018-SA-0266 « MP- Amiante et cancers de l’ovaire et du larynx »

ANSES, (2017), Rapport d’expertise collective relatif aux particules minérales allongées, identification des sources d’émission et proposition de protocoles de caractérisation et de mesures. (Saisine « 2016-SA-0034 Particules minérales allongées » Saisine liée « 2014-SA-0196 Fragments de clivage »), 165.

ANSES. (2015). Rapport d’expertise collective relatif aux effets sanitaires et à l’identification des fragments de clivage d’amphiboles issus des matériaux de carrière. (Saisine 2014-SA-0196). Maisons-Alfort, ANSES, 218 p.

Avataneo, C. "Waterborne Naturally Occurring Asbestos: a case study from Piedmont (NW Italy). EUG 2020

Barale et al. (2020). Geological Model for Naturally Occurring Asbestos Content Prediction in the Rock Excavation of a Long Tunnel (Gronda di Genova Project, NW Italy). *Environmental & Engineering Geoscience*, 26(1), 107-112. <https://doi.org/10.2113/EEG-2269>

Bloise, A., Ricchiuti, C., Punturo, R., & Pereira, D. (2020). Potentially toxic elements (PTEs) associated with asbestos chrysotile, tremolite and actinolite in the Calabria region (Italy). *Chemical Geology*, 558(July), 119896. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119896>

Boulmier, J., & Deschamps, F. (2011). Mesures d’exposition aux fibres et à l’amiante dans la chaîne de production minière.

Boulmier, J. (2009). Expertise indépendante sur l’amiante dans la chaîne de production minière Mission préparatoire. In BRGM. BRGM.

Boulmier, J., Billon-Galland, M.-A., & Luce, D. (2007). Amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie Recommandations concernant les mesures de réduction du risque et l’évaluation du risque sanitaire.

Bowes, D. R., & Farrow, C. M. (1997). Major and trace element compositions of the UICC standard asbestos samples. *American Journal of Industrial Medicine*, 32(6), 592–594. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199712\)32:6<592::AID-AJIM3>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199712)32:6<592::AID-AJIM3>3.0.CO;2-S)

Gazzano E.; Petriglieri J.R.; Aldieri E.; Fubini B.; Laporte-Magoni C.; Pavan C.; Tomatis M.; Turci F. « Cytotoxicity of fibrous antigorite from New Caledonia ». *Environmental Research*, 2023, *Environmental Research*, 115046, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115046>.

Gronow, J. R. (1987). The Dissolution of asbestos fibres in water. *Clay Minerals*, 0, 21–35.

Gualtieri, A. F., Zoboli, A., Filafarro, M., Benassi, M., Scarfi, S., Mirata, S., Avallone, R., Vitale, G., Bailey, M., Harper, M., & Di Giuseppe, D. (2021). In vitro toxicity of fibrous glaucophane. *Toxicology*, 454(March), 152743. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152743>

Gwenzi, W. (2020). Occurrence, behaviour, and human exposure pathways and health risks of toxic geogenic contaminants in serpentinitic ultramafic geological environments (SUGEs): A medical geology perspective. *Science of the Total Environment*, 700, 134622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134622>

Harper, M. (2008). 10th Anniversary critical review: Naturally occurring asbestos. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(12), 1394-1408. <https://doi.org/10.1039/B810541N>

INRS, « rapport amiante », 2023, p. 83

Houchot M-A. , "Amiante, développement et santé durable en Nouvelle-Calédonie", *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 252 | 2010, 525-536

Laporte-Magoni C., Tribaudino M., Meyer M., Fubini B., Tomatis M., Juillot F., Petriglieri J. R., Gunkel-Grillon P., N. Selmaoui-Folcher. « ABP, Amiante et Bonnes Pratiques : rapport scientifique final. » [Rapport de recherche] tome Nickel et Environnement, CNRT "Nickel et son environnement". 2018, 238 p.

Lee R.J., Strohmeier B.R., Bunker K.L., Van Orden D.R., 2008. Naturally Occurring Asbestos - a recurring public policy challenge. *Journal of Hazardous Materials* 153,

Mattioli, M., Ballirano, P., Pacella, A., Cangiotti, M., Di Lorenzo, F., Valentini, L., Meli, M. A., Roselli, C., Fagiolino, I., & Giordani, M. (2022). Fibrous Ferrierite from Northern Italy: Mineralogical Characterization, Surface Properties, and Assessment of Potential Toxicity. *Minerals*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/min12050626>

Maton D., Maurizot P. (2009) – Préconisations de travaux pour la réduction du risque d'exposition dans des zones d'affleurement de roches amiantifères en Nouvelle-Calédonie. BRGM/RP-56666-FR, 141 p., 5 fig., 14 tabl., 9 ann.

Millette, J. R., Clark, P. J., Pansing, M. F., & Twyman, J. D. (1980). Concentration and size of asbestos in water supplies. *Environmental health perspectives*, 34, 13-25. <https://doi.org/10.1289/ehp.803413>

Noonan C.W., 2017. Environmental asbestos exposure and risk of mesothelioma. *Annals of Translational Medicine* 5, 234-234.

Odgerel, C. O., Takahashi, K., Sorahan, T., Driscoll, T., Fitzmaurice, C., Yoko-O, M., Sawanyawisuth, K., Furuya, S., Tanaka, F., Horie, S., Zandwijk, N. Van, & Takala, J. (2017). Estimation of the global burden of mesothelioma deaths from incomplete national mortality data. *Occupational and Environmental Medicine*, 74(12), 851–858. <https://doi.org/10.1136/oemed-2017-104298>

Pacella, A., Fantauzzi, M., Turci, F., Cremisini, C., Montekali, M. R., Nardi, E., Atzei, D., Rossi, A., & Andreozzi, G. B. (2015). Surface alteration mechanism and topochemistry of iron in tremolite asbestos: A step toward understanding the potential hazard of amphibole asbestos. *Chemical Geology*, 405, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.03.028>

Pan, X. L., Day, H. W., Wang, W., Beckett, L. A., & Schenker, M. B. (2005). Residential proximity to naturally occurring asbestos and mesothelioma risk in California. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 172(8), 1019–1025. <https://doi.org/10.1164/rccm.200412-1731OC>

Petriglieri J. R.; Laporte-Magoni C.; Salvioli-Mariani E.; Ferrando S.; Tomatis M.; Fubini B.; Turci F. "Morphological and chemical properties of fibrous antigorite from lateritic deposit of New Caledonia in view of hazard assessment" *Science of the Total Environment*, 2021, Vol.777, 146185, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146185>

Petriglieri J. R., Laporte-Magoni C., Gunkel-Grillon P., Tribaudino M., Bersani D., Sala O., Le Mestre M., Viliaturo R., Bursi Gandolfi N., Salvioli-Mariani E. "Mineral fibres and environmental monitoring: A comparison of different analytical strategies in New Caledonia", *Geosciences Frontiers*, 2020, DOI: 10.1016/j.gsf.2018.11.006.

Petriglieri J. R., Laporte-Magoni C., Salvioli-Mariani E., Tomatis M., Gazzano E., Turci F., Cavallo A., Fubini B. "Identification and Preliminary Toxicological Assessment of a Non-Regulated Mineral Fiber: Fibrous Antigorite from New Caledonia". *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XXV, No. 5, September 2019, pp. 1–9

Petriglieri J. R., PhD, Alteration of asbestiform minerals under sub-tropical climate: mineralogical monitoring and geochemistry. The example of New Caledonia, december15th 2017, p.194

Roccaro P., Vagliasindi F.G.A. "Indoor release of asbestiform fibers from naturally contaminated water and related health risk", *Chemosphere* 202, 2018, pp.76-84, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.040>

Skinner HCW, Ross M, Frondel C. (1988) *Asbestos and other fibrous materials: mineralogy, crystal chemistry and health effects*. New York; Oxford University Press.

Turci, F., Favero-Longo, S. E., Gazzano, C., Tomatis, M., Gentile-Garofalo, L., & Bergamini, M. (2016). Assessment of asbestos exposure during a simulated agricultural activity in the proximity of the former asbestos mine of Balangero, Italy. *Journal of Hazardous Materials*, 308, 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.056>

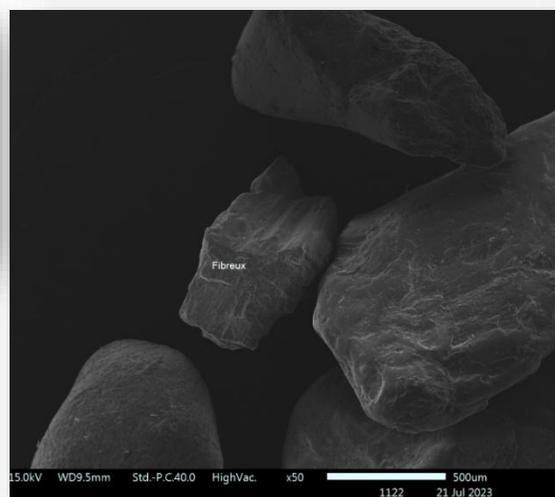
Walter, M., Geroldinger, G., Gille, L., Kraemer, S. M., & Schenkeveld, W. D. C. (2022). Soil-pH and cement influence the weathering kinetics of chrysotile asbestos in soils and its hydroxyl radical yield. *Journal of Hazardous Materials*, 431(December 2021), 128068. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128068>

9. Annexes

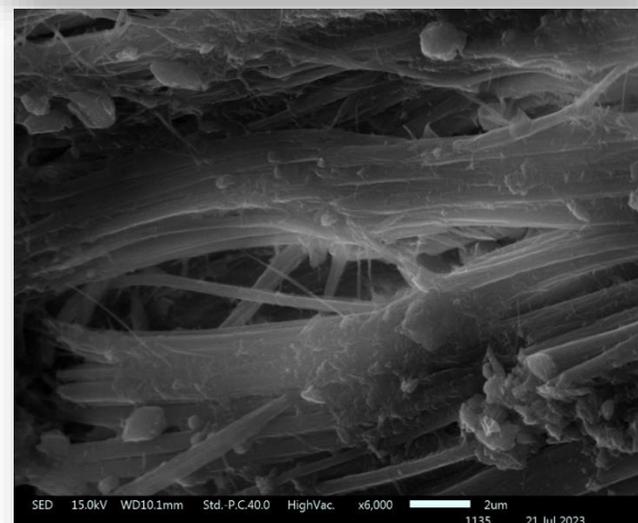
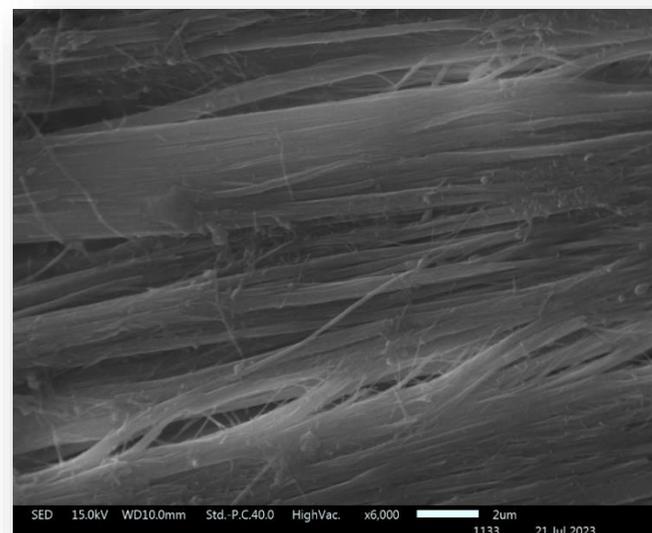
Annexe 1 – Images MEB échantillons de particules de chrysotile



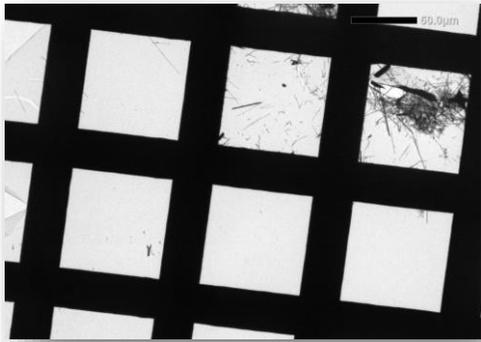
Échantillon T4 10 m - 4



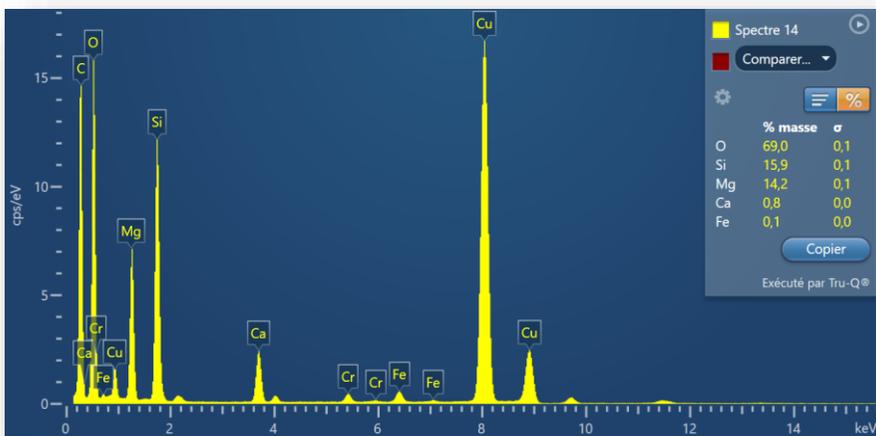
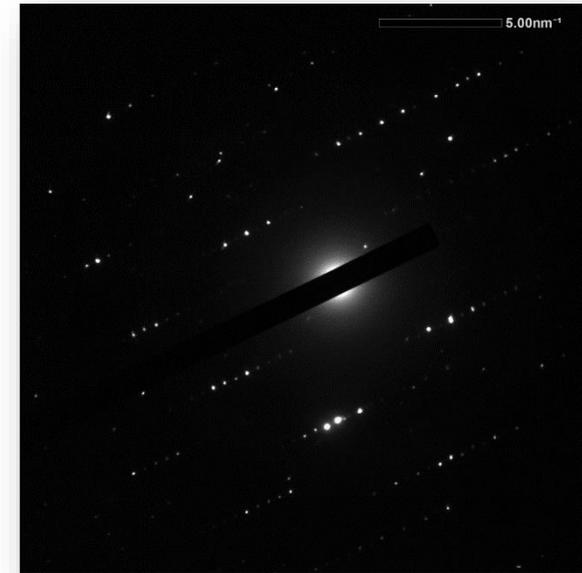
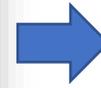
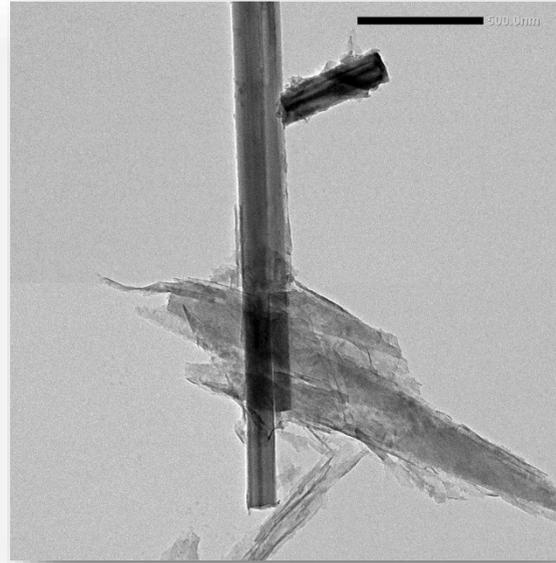
Échantillon T6



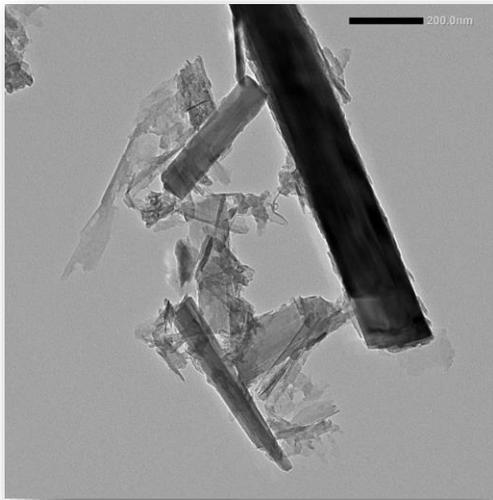
Annexe 2 – Données MET acquises sur des particules initialement identifiées comme de la trémolite



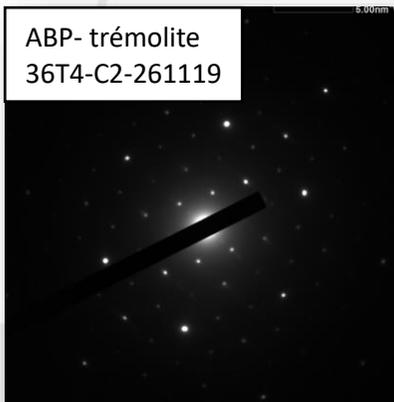
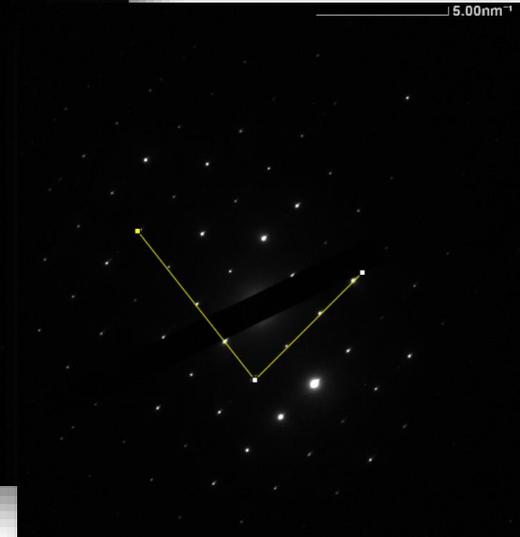
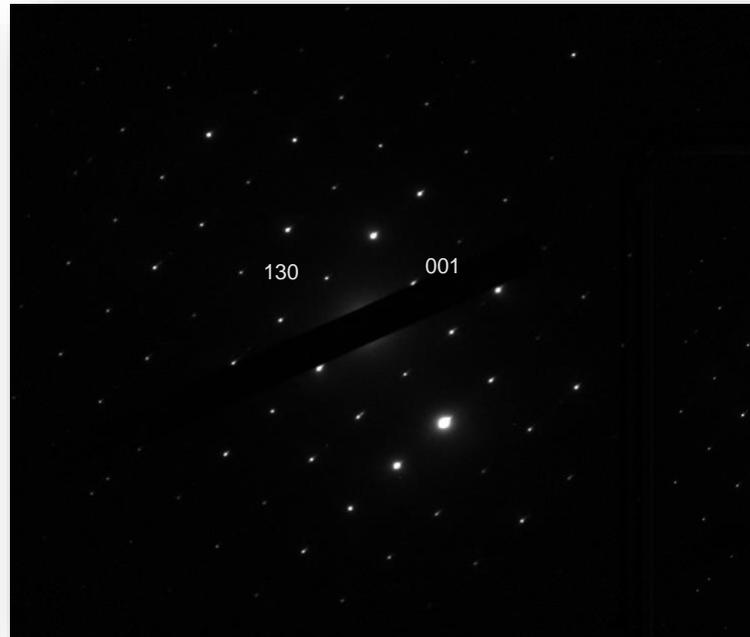
Échantillon T4 - 3



- ✓ L'EDX plutôt favorable à la présence de trémolite
- ✓ Image de diffraction non discriminante



Échantillon T4 - 3



Exemple : angle mesuré 84°, attendu 90°, entre 130 et 001



Distances réticulaires et valeurs des angles très proches de la trémolite, mais pas totalement identiques => un doute subsiste

Annexe 3 – Résultats des tests de quantification des fibres dans des sédiments – mélanges contrôlés

Référence échantillon fabriqué	Fibres de chrysotile (flacon amiante de référence P2M)	Sédiment (broyé, tube à centrifuger)	Masse pilulier avec sédiment (mg)
UN15	1 micro-cuillère rase	15 ml – Unité Nouméa	14,12
M15	1 micro-cuillère rase	15 ml – Minier	24,39

Référence Eppendorf	Date de préparation	Broyage pilon dans l'Eppendorf	Volume ou nombre de gouttes déposées	Référence Grille – boîte 168 326
UN15 – 1A non broyée	14/03/2023	Non	2 x 10 µL	1A
M15 – 1A non broyée	14/03/2023	Non	2 x 10 µL	2B
UN15 – 1A broyée	15/03/2023	Oui	2 x 10 µL	1C
M15 – 1A broyée	15/03/2023	Oui	2 x 10 µL	2D
UN15 – 1A	20/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	1E
UN15 – 1A	27/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	1G
UN15 – 2A	27/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	1L
UN15 – 2A	28/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	3A
UN15 – 3A	28/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	3C
UN15 – 3A	29/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	3E
M15 – 1A	20/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	2F
M15 – 1A	27/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	2H
M15 – 2A	27/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	2J
M15 – 2A	28/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	4B
M15 – 3A	28/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	4D
M15 – 3A	29/03/2023	Oui	3 µL - Micropipette	4F

Mélange	M15
---------	-----

**Boite 138
326**

Eppendorf	Référence grille	Nombres d'ouvertures lues	Nombres de fibres comptées	Fibres /mm2	Répartition fibreuse acceptable selon 43-050
M15-1A	2F	52	3,5	11,2	NON
M15-1A	2H	50	4	13,3	NON
M15-2A	2J	50	15	50,0	OUI
M15-2A	4B	50	11,5	38,3	NON
M15-3A	4D	50	2	6,7	NON
M15-3A	4F	60	0	0,0	NON

Nombre total d'ouvertures observées 312
 Surface explorée (mm2) 0,912
Nombre total de fibres comptées 36,0
Densité moyenne de fibres (fibres / mm2) 19,2

Densité moyenne de fibres avec répartition fibreuse
 ok 50,00
Limite inf Poisson (fibres) 25
Limite sup Poisson (fibres) 50
Limite inf Poisson (fibres / mm2) 28
Limite sup Poisson (fibres / mm2) 55

UN15

**Boite 168
326**

Référence grille	Nombres d'ouvertures lues	Nombres de fibres comptées	Fibres /mm ²	Répartition fibreuse acceptable selon 43-050
1E	53	4	12,6	NON
1G	52	6,5	20,8	NON
1I	53	13	40,9	OUI
3A	50	7	23,3	NON
3C	50	2	6,7	NON
3E	50	8	26,7	NON

Nombre total d'ouvertures observées 308
 Surface explorée (mm²) 1,548
 Nombre total de fibres comptées 40,5
Densité moyenne de fibres (fibres /mm²) 21,9

Densité moyenne de fibres avec répartition fibreuse
 ok 40,88
Limite inf Poisson (fibres) 29
Limite sup Poisson (fibres) 54
Limite inf Poisson (fibres / mm²) 30
Limite sup Poisson (fibres / mm²) 57