



UNIVERSITÉ DE LILLE

UFR3S-MÉDECINE

Année : 2025

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Exposition prénatale aux micro- et nanoplastiques : quels enjeux pour la
santé périnatale ? *Une revue critique des données scientifiques à
destination des professionnels de santé***

Présentée et soutenue publiquement le 31/10/2025 à 14h

au Pôle Formation

par Timothé BAILLEUX

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Damien SUBTIL

Assesseurs :

Madame le Professeur Véronique DEBARGE

Monsieur le Docteur Geoffroy CHEVALIER

Directeur de thèse :

Madame le Docteur Lydia NIKASINOVIC

AVERTISSEMENT

L'université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Liste des abréviations

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styène
ACR : Acrylate
AFM : Microscopie à Force Atomique
AG : Âge gestationnel
AIC : Akaike Information Criterion
ALAT : Alanine Aminotransférase
ASAT : Aspartate Aminotransférase
ATR-FTIR / μ -FTIR / FTIR-ATR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode réflexion totale atténuée
AUC : Area Under the Curve
BMSF : Breast Milk Seafood-consuming Females
BMSH : Breast Milk non-Seafood-consuming Females
BPA : Bisphénol A
BR : Butadiène Rubber
BKMR : Bayesian Kernel Machine Regression
CPE : Caoutchouc Polychloré (Chlorinated Polyethylene)
CVF : Capacité Vitale Forcée
DHEA : Déhydroépiandrostérone
DOHaD : Developmental Origins of Health and Disease
EDS : Spectroscopie dispersive en énergie des rayons X)
EVA : Ethylene Vinyl Acetate
FC : Fausses Couches
FCSR : Fausses Couches Spontanées à Répétition
FKM : Fluoroélastomère
GGT : Gamma-Glutamyl-Transférase
GPx4 : Glutathione Peroxidase 4
HAIG : Hypertension Artérielle Induite par la Grossesse
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HDPE : Polyéthylène haute densité
HHS : Axe Hypothalamo-Hypophyso-Surrénalien
HNO₃ : Acide nitrique
HSD11B2 / 11 β -HSD2 : 11- β -Hydroxystéroïde Déshydrogénase de type 2
HQI : Hit Quality Index (Indice de correspondance spectrale minimale)
IL-1 β / IL-6 / IL-8 : Interleukines 1 β , 6 et 8
IMC / BMI : Indice de Masse Corporelle
KOH : Hydroxyde de potassium
LA : Liquide Amniotique
LD-IR : Laser Direct Infrared Imaging (Diffraction laser infrarouge)
LC-MS/MS : Liquid Chromatography coupled with Tandem Mass Spectrometry
MAPK : Mitogen-Activated Protein Kinase
MCT8 : Monocarboxylate Transporter 8
MEB / MET / VP-SEM : Microscopie Électronique à Balayage / en Transmission / à Pression Variable
MICI : Maladies Inflammatoires Chroniques de l'Intestin
MNPs : Micro- et Nanoplastiques
MO / SM : Microscopie Optique / Stéréomicroscopie
MPs : Microplastiques
MyD88 : Myeloid Differentiation Primary Response 88
NF- κ B : Nuclear Factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells
NPs : Nanoplastiques

NR3C1 : Gène du Récepteur des Glucocorticoïdes
 NR : Non Rapporté
 NS : Non Significatif
 PA : Polyamide
 PAG : Petit Poids pour l'Âge Gestationnel
 PAL : Phosphatase Alcaline
 PB : Polybutadiène
 PBS : Polybutylène Succinate
 PEC : Polyéthylène Co-Téréphtalate
 PE : Polyéthylène
 PEA : Polyéthylène Adipate
 PEMA : PolyÉthyl Méthacrylate
 PET : Polyéthylène Téréphtalate
 PEVA / EVA : PolyÉthylène-Acétate de Vinyle
 PFAS : Substance Per- ou PolyFluoroAlkylées
 PI / PI3K-Akt : Phosphoinositide-3-Kinase / Akt pathway
 PLA : Polyacide lactique
 PCL : Polycaprolactone
 PMMA : Polyméthacrylate de Méthyle
 POM : Polyoxyméthylène
 POP / POPs : Polluants Organiques Persistants
 PP : Polypropylène
 PPE : Polyphénylène Éther
 PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
 PROSPERO : International Prospective Register of Systematic Reviews
 PS : Polystyrène
 PSF / PES : Polysulfone
 PTFE : Polytétrafluoroéthylène
 PU : Polyuréthane
 PVC : Polychlorure de Vinyle
 PVOH / PVA : Alcool polyvinylique
 PVS : Polyvinylsiloxane
 Py-GC/MS : Pyrolyse – Chromatographie en Phase Gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse
 RCIU : Retard de Croissance Intra-Utérin
 RNA 16S : Séquençage du gène ribosomal 16S
 ROBINS-E : Risk Of Bias In Non-Randomized Studies – of Exposures
 ROC : Receiver Operating Characteristic
 ROS : Reactive Oxygen Species (Espèces Réactives de l'Oxygène)
 RPM : Rupture Prématuration des Membranes
 SBR / SBS : Styrène-Butadiène Rubber / Styrène-Butadiène-Styrène
 SOD : Superoxyde Dismutase
 STROBE : Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology
 T3 / T4 / TSH : Triiodothyronine / Thyroxine / Thyroïdostimuline
 Th / NK : Lymphocytes T auxiliaires / Cellules tueuses naturelles (Natural Killer cells)
 TL : Longueur Télomérique
 TNF- α : Tumor Necrosis Factor Alpha
 TPA : Acide Téréphtalique (monomère du PET)
 VEMS : Volume Expiratoire Maximal par Seconde

Liste des tableaux

Tableau I. Quantité et concentrations de MNPs détectées dans les matrices humaines
Tableau II. Résumé des études sur les sources de MNPs et les pratiques en laboratoire
Tableau III. Récapitulatif des critères d'inclusion et d'exclusion
Tableau IV. Critères utilisés pour évaluation du risque de biais final
Tableau V. Méthode d'évaluation qualitative du niveau de preuve
Tableau VI. Répartition des matrices périnatales étudiées
Tableau VII. Synthèse des techniques analytiques principales
Tableau VIII. Synthèse des techniques analytiques secondaires / complémentaires
Tableau IX. Synthèse des niveaux d'imprégnation placentaire en MNPs
Tableau X. Synthèse des niveaux d'imprégnation du liquide amniotique en MNPs
Tableau XI. Synthèse des niveaux d'imprégnation du sang de cordon en MNPs
Tableau XII. Synthèse des niveaux d'imprégnation du méconium en MNPs
Tableau XIII. Synthèse des niveaux d'imprégnation du lait maternel en MNPs
Tableau XIV. Caractéristiques globales des MP dans les différentes matrices biologiques
Tableaux XV. Déterminants modulant l'imprégnation des matrices périnatales
Tableau XVI. Evaluation de la qualité du reporting, du risque de biais, de l'équilibre des résultats et du niveau de preuve des études

Liste des figures

Figure 1 : Origine et devenir dans l'environnement des MNPs
Figure 2 : Diagramme de flux PRISMA généré par Rayyan©
Figure 3 : Quantité de MP absorbée par jour dans différentes denrées alimentaires et via l'air chez l'homme, la femme, la garçon et la fille.
Figure 4 : Concentration de MP déposés/m²/jour dans l'environnement intérieur et extérieur
Figure 5 : Mécanisme hypothétique par lequel les MP pourraient induire des modifications épigénétiques responsables de changements phénotypiques fœtaux à long terme.
Figure 6 : Mécanismes hypothétiques de pénétration des MP dans les tissus humains.

Liste des annexes

Annexe 1 : Grille d'évaluation de la qualité du reporting pour les études épidémiologique (STROBE)
Annexe 2 : Grille d'évaluation du risque de biais pour les études épidémiologique (ROBIN-E)
Annexe 3 : Liste de contrôle PRISMA 2020
Annexe 4 : Protocoles de recueil et de traitement des matrices biologiques
Annexe 5 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales monocentriques (N < 1000)
Annexe 6 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales à visée méthodologique
Annexe 7 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales monocentriques (N > 1000)
Annexe 8 : Résultats des études cas-témoins

Table des matières

INTRODUCTION	1
OBJECTIFS DE LA THÈSE	2
PARTIE 1 - GÉNÉRALITÉS SUR LES MICRO- ET NANOPLASTIQUES	3
I. DES PLASTIQUES AUX MICRO- ET NANOPLASTIQUES	3
I.1. OMNIPRÉSENCE DU PLASTIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT	3
I.2. FORMATION DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES PRIMAIRES ET SECONDAIRES	3
I.3. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES	4
I.4. DEVENIR ENVIRONNEMENTAL DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES	5
II. SOURCES, VOIES ET DÉTERMINANTS DE L'EXPOSITION HUMAINE AUX MICRO-NANOPLASTIQUES	7
II.1. SOURCES	7
II.2. VOIES D'EXPOSITION HUMAINE	8
II.3. NIVEAUX D'IMPRÉGNATION EN MICRO-NANOPLASTIQUES DES MATRICES BIOLOGIQUES	8
II.4. DÉTERMINANTS ENVIRONNEMENTAUX ET COMPORTEMENTAUX DES EXPOSITIONS AUX MICRO- ET NANOPLASTIQUES	9
III. EFFETS DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LES ORGANISMES ET L'HOMME	10
III.1. EFFETS DIGESTIFS	11
III.2. EFFETS RESPIRATOIRES	12
III.3. EXPLICATIONS MÉCANISTIQUES	12
PARTIE 2 - MICRO- ET NANOPLASTIQUES ET SANTÉ PÉRINATALE : BILAN DES ÉTUDES épidémiologiques	14
I. MATÉRIEL ET MÉTHODES DE LA REVUE	14
I.1. POPULATION, EXPOSITION, COMPARATEUR, OUTCOMES (PECO)	14
I.2. SOURCES DE DONNÉES ET STRATÉGIE DE RECHERCHE DOCUMENTAIRE	16
I.3. SÉLECTION DES ÉTUDES	16
I.4. EXTRACTION DES DONNÉES	16
I.5. QUALITÉ MÉTHODOLOGIQUE, RISQUE DE BIAIS ET NIVEAU DE PREUVE	17
I.6. SYNTHÈSE DES DONNÉES ET STRATÉGIE D'ANALYSE	19
I.7. ENREGISTREMENT ET TRANSPARENCE	19
II. RÉSULTATS : EFFETS DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LA SANTÉ PÉRINATALE	19
II.1. MÉTHODOLOGIES DES ÉTUDES	19
II.2. RÉSULTATS DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES	31
PARTIE 3 - DISCUSSION ET PERSPECTIVES	69
I. SYNTHÈSE GÉNÉRALE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS	69
II. MISE EN PERSPECTIVE AVEC LA LITTÉRATURE	74
III. ANALYSE CRITIQUE DES ÉTUDES INCLUSES	79
IV. FORCES ET LIMITES DE LA PRÉSENTE REVUE	81
V. IMPLICATIONS CLINIQUES ET DE SANTÉ PUBLIQUE	82
VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	84
Références	89
Annexes	94

INTRODUCTION

La pollution plastique est aujourd'hui reconnue comme l'un des grands enjeux environnementaux du XXI^e siècle. Si l'attention médiatique s'est initialement concentrée sur les déchets plastiques visibles dans les mers et les océans, la recherche scientifique s'intéresse aujourd'hui aux formes insidieuses et tout aussi préoccupantes que sont les microplastiques (MPs) et les nanoplastiques (NPs), désignés ensemble par MNPs. Issus de la dégradation des macroplastiques ou directement intégrés dans des produits manufacturés, les MNPs se retrouvent désormais dans tous les compartiments de l'environnement : air, eaux, sols [\(1\)](#). En outre, ils sont également omniprésents dans l'environnement intérieur en raison des émissions provenant des textiles, du mobilier, des produits ménagers, des contenants alimentaires, des cosmétiques et des produits d'hygiène [\(2\)](#).

Cette présence ubiquitaire entraîne une exposition humaine quasi inévitable, par les voies respiratoire et digestive et, potentiellement, par voie transcutanée. Plusieurs études ont détecté des MNPs dans des matrices biologiques humaines telles que le sang, les poumons, le placenta, le méconium, et le lait maternel [\(3,4\)](#). Cependant, les niveaux réels d'exposition des populations restent encore méconnus. Chez la femme enceinte, la question des expositions environnementales est particulièrement sensible au regard des enjeux de santé des 1 000 premiers jours de la vie. Cette période, qui s'étend de la conception aux deux ans de l'enfant, constitue une fenêtre de vulnérabilité mais aussi une opportunité en termes de prévention pour la santé et le développement de l'enfant. Ce principe s'inscrit dans le cadre du concept de l'origine développementale de la santé et de la maladie (DOHaD - Developmental Origins of Health and Disease), selon lequel les expositions précoces, qu'elles soient nutritionnelles, environnementales ou psychosociales, peuvent influencer durablement la santé future. Des études confirment que ces expositions précoces ont un impact déterminant sur la santé physique, mentale et cognitive à long terme [\(5–7\)](#).

Les données épidémiologiques humaines restent rares : Xue *et al.* (2024) [\(8\)](#) ont analysé le liquide amniotique (LA) de femmes enceintes et observé que celles présentant la plus forte charge en MPs accouchaient plus tôt que les moins exposées. De même, l'étude de Jochum *et al.* (2025) [\(9\)](#), a mis en évidence une corrélation négative entre la concentration placentaire en MPs et l'âge gestationnel (AG) ou le poids de naissance. En toxicologie, les travaux se multiplient et rapportent des effets préoccupants notamment sur le développement neurologique et cardiovasculaire fœtal [\(10–12\)](#).

De plus, les professionnels de santé en périnatalité (sages-femmes, obstétriciens, pédiatres, pharmaciens etc.) sont de plus en plus interpellés par les patientes, parfois sur-informées sur la thématique environnementale. Pourtant, les repères scientifiques et pratiques restent flous pour les MNPs. Cette thèse vise à faire le point sur les données disponibles, à identifier les facteurs modifiables et, le cas échéant, à proposer des pistes de préventions adaptées, selon le principe de précaution.

OBJECTIFS DE LA THÈSE

L'objectif principal est de faire le bilan des données scientifiques disponibles chez l'Homme concernant les liens entre exposition aux MNPs durant la grossesse et la lactation et la santé périnatale.

Les objectifs secondaires sont d'identifier les lacunes dans les connaissances, les leviers d'actions et les implications pratiques pour les professionnels de santé, notamment en matière de conseils, de prévention et d'accompagnement des patientes.

La thèse se décline en trois volets :

- (i) Généralités sur les MNPs
- (ii) Bilan des études chez l'Homme
- (iii) Discussion générale et perspectives

PARTIE 1 - GÉNÉRALITÉS SUR LES MICRO- ET NANOPLASTIQUES

I. DES PLASTIQUES AUX MICRO- ET NANOPLASTIQUES

I.1. OMNIPRÉSENCE DU PLASTIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT

Depuis la révolution pétrochimique du XXe siècle, le plastique est devenu un matériau omniprésent. La production mondiale est passée de 2 Mt en 1950 à plus de 460 Mt en 2023, illustrant une croissance exponentielle (13–15). Les emballages constituent le principal secteur d'utilisation, représentant environ 158 Mt de plastique produit en 2022 (~35-40 % de la production annuelle), majoritairement pour des usages uniques. Ce modèle du « tout jetable » repose sur des cycles de vie très courts, générant une grande quantité de déchets avec des politiques publiques en retard (13,16–18). D'autres secteurs industriels consomment également d'importantes quantités : le bâtiment et la construction (17-19 %, principalement en PVC pour isolation, tuyauteries et revêtements), les textiles (15 %, fibres synthétiques comme polyester et nylon), les transports (8-10 %, pièces automobiles), les équipements électriques et électroniques (~7 %, coques, câbles, circuits imprimés) et l'agriculture (~4 %, films plastiques, paillages, goutte-à-goutte) (16).

Sur les 460 Mt de plastiques produits chaque année, environ 350 Mt deviennent des déchets. Près de 22 % (soit ~77 Mt/an) échappent aux filières de gestion, dont 44 Mt sont brûlés à l'air libre et 33 Mt sont rejetés directement dans l'environnement (19). Les plastiques à cycle court, principalement les emballages et objets jetables, génèrent plus de 60 % des déchets mondiaux, contre seulement 17–20 % pour ceux du bâtiment. (20). Leur lente dégradation – aucun polymère courant n'étant biodégradable – entraîne leur accumulation croissante, notamment dans les gyres océaniques. Sans mesures fortes sur la production, l'usage et la gestion des déchets, cette dynamique ne pourra que s'amplifier (13,21).

I.2. FORMATION DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES PRIMAIRES ET SECONDAIRES

Les **MNPs primaires** sont fabriqués directement à petite taille pour un usage industriel : microbilles cosmétiques, poudres pour peinture, granulés de plasturgie (22,23). Les **MNPs**

secondaires résultent de la dégradation de plastiques abandonnés dans l'environnement (emballages, textiles, filets de pêche...) ou soumis au vieillissement lors de leur usage (films pour l'agriculture, canalisation en PVC, mobilier ...). L'origine de ces MNPs ainsi que leurs caractéristiques sont présentées Figure 1 (19,24–26).

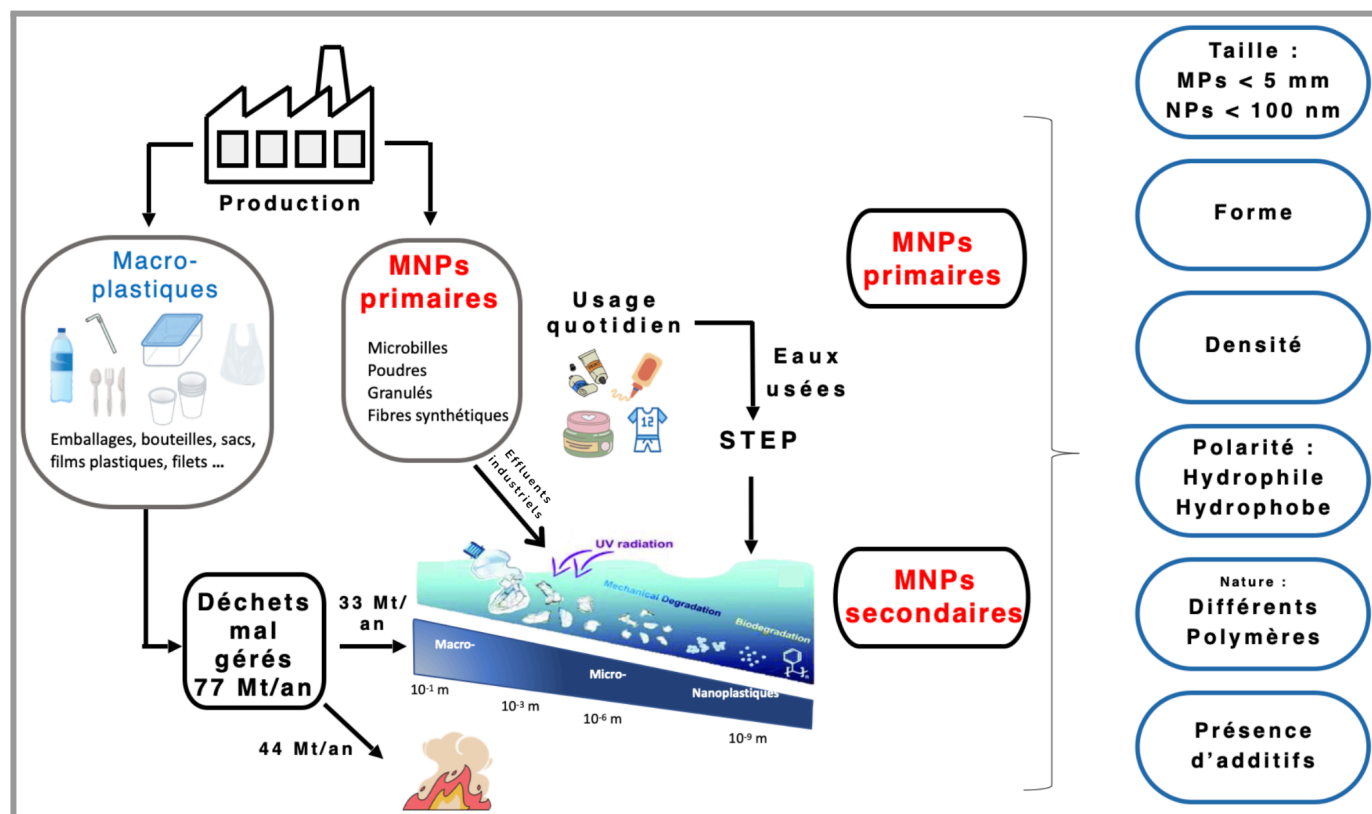


Figure 1 : Origine et devenir dans l'environnement des MNPs (d'après B. Grave et T. Bailleux)

I.3. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES

Les MPs sont définis comme des particules < 5 mm, et les NPs < 1 µm, bien que certains auteurs fixent la limite des NPs à 100 nm pour s'aligner sur les produits manufacturés (27). La taille conditionne leur biodisponibilité : les particules les plus petites peuvent franchir les barrières biologiques et s'accumuler dans les tissus (26,28). Les formes sont variées : sphères, fragments, fibres, films, mousses. Les fibres textiles, plus volatiles, sont particulièrement fréquentes dans l'air intérieur, et plus susceptibles d'être inhalées (29). La densité varie selon les polymères : le polyéthylène (PE, ~0.91) et le polypropylène (PP, ~0.90) flottent ; le PVC (~1.4) et le polyéthylène téréphtalate (PET, ~1.37) coulent. Cette propriété influence leur distribution dans l'air, les eaux, les sols et dans les tissus biologiques (30).

Les MNPs sont principalement constitués de PE, PP, Polystyrène (PS), PET, PVC, Polyamide (PA), Polyuréthane (PU). Certains relâchent des monomères toxiques (styrène, antimoine, bisphénol A). Les additifs industriels (colorants, plastifiants, retardateurs de flamme...) peuvent migrer et interagir avec les tissus biologiques (31,32). Ils peuvent aussi adsorber divers contaminants environnementaux : polluants organiques persistants (POPs), métaux lourds, hydrocarbures, antibiotiques, mycotoxines, etc. (26,28).

La détection et la quantification des MNPs dans l'environnement combinent des étapes de séparation, identification morphologique et caractérisation chimique. Les échantillons sont préparés par filtration, digestion enzymatique ou chimique pour éliminer la matière organique, puis analysés morphologiquement par microscopie optique ou électronique à balayage (MEB). L'identification chimique des polymères repose principalement sur la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (μ FTIR) et Raman (33,34). Pour les NPs, qui sont plus difficiles à détecter, des méthodes plus sensibles sont utilisées comme la pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (Py-GC/MS) (27). Chaque méthode présente des limites en termes de sensibilité, de résolution ou de temps d'analyse, justifiant les protocoles combinés et une standardisation inter-laboratoire.

I.4. DEVENIR ENVIRONNEMENTAL DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES

Les MNPs sont émis dans les différents compartiments environnementaux par une multitude de sources. : lavage de textiles, usure des pneus (35), utilisation de produits cosmétiques ou de films plastiques agricoles, fragmentation des déchets plastiques abandonnés (36), brûlage à l'air libre (19,25), ou encore épandage de boues contaminées (36). Ces MNPs échappent souvent aux systèmes de traitement des eaux usées et rejoignent donc les milieux naturels (37,38). Leur devenir dépend de leurs caractéristiques physico-chimiques (sus-citées) et des conditions environnementales (température, rayonnement UV, pH, activité biologique). Qu'ils soient primaires ou secondaires, les MNPs s'inscrivent dans un cycle environnemental global, alimenté par les activités humaines favorisant leur dispersion dans l'air,

l'eau, les sols et les organismes vivants, y compris humains (37–40). Une fois relâchés, ils colonisent :

- les milieux aquatiques (cours d'eau, mers et océans) où les MNPs hydrophobes et peu denses (PP, PE) flottent et se dispersent sur de longues distances tandis que les particules les plus denses (PET, PVC) se déposent dans les sédiments, où elles peuvent persister pendant des décennies (41),
- les sols, par les pratiques agricoles ou les dépôts atmosphériques (36),
- l'air : transport sur de longues distances, par le vent et les précipitations (42,43).

La dégradation des plastiques est lente, incomplète (plusieurs décennies ou siècles) et régie par des processus physico-chimiques : photodégradation, oxydation thermique, hydrolyse, fragmentation mécanique, biodégradation (très limitée dans le cas des plastiques conventionnels) (39,40,44). Certaines bactéries spécifiques (ex. : *I. sakaiensis*) peuvent partiellement dégrader des polymères comme le PET (45). Les MNPS sont désormais présents dans les glaciers, sédiments profonds, montagnes et zones polaires (41,46). Les échanges entre les compartiments (ruissellement, remobilisation éolienne, crues, précipitations) entretiennent leur recirculation (42,43,47,48). Dans les écosystèmes aquatiques, les MNPs sont ingérés par le plancton, les mollusques, les poissons, puis leurs prédateurs, entraînant potentiellement bioaccumulation et bioamplification (49). Sur les terres, ils ont été détectés dans les vers de terre (50,51), oiseaux (52), animaux d'élevage (53), ainsi que dans les végétaux (54). Chez l'humain, les MNPs ont été retrouvés dans le sang (55), le LA (56), le placenta, le méconium, les selles et le lait maternel (57,58). Ainsi, les plastiques, issus de la transformation des hydrocarbures fossiles, ne disparaissent jamais réellement : produits, consommés, rejetés, fragmentés et redistribués, ils reviennent à l'Homme. Ce cycle non linéaire transforme le plastique en traceur silencieux de notre mode de vie, jusqu'à s'inscrire au cœur même de la vie, dans le placenta.

Dans l'environnement, les MNPs agissent aussi comme vecteurs de substances chimiques : additifs incorporés lors de la fabrication (phtalates, retardateurs de flamme, bisphénols) ; polluants organiques persistants (POP) adsorbés à la surface depuis l'environnement (polychlorobiphényles – PCB, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAP) ; métaux lourds piégés dans la matrice plastique ou adsorbés à la surface. La combinaison entre persistance, mobilité et capacité de transport de contaminants renforce les risques environnementaux et sanitaires.

II. SOURCES, VOIES ET DÉTERMINANTS DE L'EXPOSITION HUMAINE AUX MICRO-NANOPLASTIQUES

II.1. SOURCES

Dès la phase industrielle, des MPs sont émis : granulés plastiques (« nurdles »), contaminant les eaux et sols (59), effluents d'usines textiles ou chimiques (37). Les machines à laver rejettent des microfibres issues des vêtements synthétiques (60,61). Les produits d'hygiène et cosmétiques peuvent contenir des MPs primaires : microbilles exfoliantes (PE, PP, PET) dans les gommages, dentifrices, gels douche, shampoings, paillettes en PET (gels douche, maquillage), fibres de nylon (mascaras) et microcapsules polymériques (shampoings, gels douche, déodorants) pour l'encapsulation de parfums ou d'actifs (38,62). L'usure d'objets du quotidien (ustensiles, meubles, emballages) contribue aussi à la libération de MNPs dans l'air intérieur (jusqu'à 1 583 MPs/m³ ou 19 600 MPs/m²/jour) (63). L'agriculture emploie des plastiques (paillages, serres) qui se fragmentent, et les boues d'épuration, riches en fibres et MNPs, épandues sur les sols, les contaminent durablement (36,64). Les engrais à libération contrôlée, produits oxo-fragmentables ou plastiques biodégradables participent aussi à cette pollution diffuse (65,66). Les dispositifs médicaux en plastique (cathéters, perfusions...), peuvent relarguer des MNPs dans l'organisme (26,67). Certains sacs de perfusion contiennent jusqu'à 1 570 MPs de 3–12 µm (68).

II.2. VOIES D'EXPOSITION HUMAINE

Les MNPs sont ingérés via les aliments (fruits, légumes, poissons, sel) et l'eau avec une exposition annuelle estimée entre 39 000 et 121 000 MPs (63,69,70). L'eau en bouteille plastique peut contenir plus de 240 000 MNPs/L, dont 90 % de NPs (71). L'inhalation constitue une autre voie majeure d'exposition, avec des concentrations de 1,7 à 16,2 MPs/m³ en intérieur (72), soit 26 000 à 130 000 MPs inhalés par an (73), dont les fibres synthétiques des vêtements représentent la principale source (43). Dans certaines populations, l'inhalation pourrait dépasser 50 % de l'exposition totale (63). La pénétration cutanée paraît limitée, mais les NPs peuvent franchir follicules pileux ou muqueuses, surtout en présence de solvants ou de perturbateurs cutanés (73), entraînant inflammation, altération du microbiote et de la fonction barrière. La voie injectable a fait l'objet de quelques travaux comme évoqués précédemment pour les sources.

II.3. NIVEAUX D'IMPRÉGNATION EN MICRO-NANOPLASTIQUES DES MATRICES BIOLOGIQUES

Une revue de la littérature publiée en 2023 fait le bilan des imprégnations en MNPs dans différentes matrices biologiques et montre des concentrations variables résumées dans le tableau I (73). La détection et l'analyse des MNPs dans les matrices biologiques utilisent des techniques proches de celles appliquées aux matrices environnementales, mais nécessitent des protocoles plus contraignants et spécifiques en raison de la complexité des tissus et des très faibles concentrations (cf. II.1.3.).

Tableau I. Quantité et concentrations de MNPs détectées dans les matrices humaines (73)

Matrices	Prélèvement / Contexte	Taille analysée	Quantité et concentration
Selles (Hong Kong) (74)	Adultes, ambulatoire	≥30 à ~500 µm	20,4–138,9 part./g
Selles (Pékin) (75)	Jeunes hommes	~20–800 µm	1–36 part./g
Sang (Pays-Bas) (55)	Donneurs sains	≥0,7 µm	1,6 µg/mL
Placenta (Italie) (4)	~23 g de placenta (n=6)	~5–10 µm	0,13 part./g
Placenta (Chine) (76)	Tissus placentaires (n = 17)	~20–500 µm	0,28–9,55 part./g
Lait maternel (Italie) (57)	~1 semaine post-partum	~1–12 µm	0,13–2,05 part./g
Poumon (RU) (77)	Résections chirurgicales	≥3 µm	1,42 ± 1,50 part./g
Foie (78)	Témoins (autopsies)	~4–30 µm	0,3–11,9 part./g

Abréviations : particule par gramme de tissu (part./g)

II.4. DÉTERMINANTS ENVIRONNEMENTAUX ET COMPORTEMENTAUX DES EXPOSITIONS AUX MICRO-ET NANOPLASTIQUES

Certains gestes du quotidien accroissent l'exposition aux MNPs : le chauffage d'un plat en PP au micro-ondes peut en libérer jusqu'à 240 milliards (79), l'eau en bouteille représente plus de 90 000 MPs ingérés par an (73) et l'application de cosmétiques relargue plusieurs milliers de particules à chaque usage (62). Les enfants sont particulièrement vulnérables en raison de leur fréquence respiratoire élevée (80), de comportements exploratoires « main-bouche » et de leur proximité avec le sol (81,82).

Des études en laboratoire ont également étudié l'impact de certains gestes domestiques sur les émissions de MNPs dans l'air, l'eau et les aliments, et donc probablement l'exposition humaine (tableau II).

Tableau II. Résumé des études sur les sources de MNPs et les pratiques en laboratoire

Comportement domestique	Étude(s) clé(s)	Effet mesuré
Optimiser les conditions de lavage (charges complètes, cycles courts, eau froide, fibres naturelles)	(83.84)	Réduction significative des fibres émises (jusqu'à plusieurs ordres de grandeur selon type de textile et conditions).
Utiliser des dispositifs de capture (sacs Guppyfriend®, Cora Ball, filtres intégrés)	(85.86)	Réduction des rejets de 30 à 80 % selon dispositif ; capture moyenne de plusieurs grammes de peluches par semaine.
Privilégier l'eau du robinet plutôt que l'eau en bouteille plastique	(70)	L'eau en bouteille contient en moyenne une concentration en MPs 10× supérieure à l'eau du robinet (jusqu'à 90 000 particules/L).
Éviter le chauffage d'aliments dans du plastique	(87)	Un sachet de thé en nylon libère plusieurs milliards de particules lors d'une infusion chaude.
Éviter le stockage d'aliments dans du plastique de manière générale	(88)	Chaque contenant en plastique libère 100 000 à 260 000 MPs après stockage à 4 °C ou -20 °C. Les conditions de congélation génèrent des particules plus petites et plus nombreuses.
Réduire les textiles synthétiques dans l'habitat (tapis, rideaux, rembourrage) ; aspirateurs avec filtres HEPA ; aération	(72.81)	L'air intérieur est une source majeure d'exposition par inhalation ; les filtres HEPA et la réduction des textiles synthétiques abaissent les concentrations en particules.

HEPA : High-Efficiency Particulate Air (filtre à particules aériennes à haute efficacité). Les dispositifs mentionnés (sacs Guppyfriend®, Cora Ball, filtres intégrés) permettent de capturer une partie des fibres libérées lors du lavage domestique. Les filtres HEPA (High Efficiency Particulate Air) retiennent les particules fines présentes dans l'air intérieur.

Les expositions prénatales à des composés associés aux plastiques (phtalates, phénols, parabènes) varient selon le statut socio-économique et l'origine. L'analyse multi-cohorte de Welch *et al.* (89) aux États-Unis rapporte des niveaux plus élevés de plusieurs phénols et parabènes chez les femmes non hispaniques noires et hispaniques par rapport aux femmes non hispaniques blanches (jusqu'à ×2–×3 pour certains marqueurs), avec des écarts atteignant

+148 % pour certains métabolites de phtalates. Le revenu et l'éducation expliquent aussi une partie de ces différences. Par analogie plausible pour les MNPs (alimentation plus ou moins transformée, emballages, équipements disponibles, capacité à acheter des vêtements en fibres naturelles, accès aux alternatives), il importe d'interroger les contraintes matérielles, économiques et sociales qui structurent les pratiques en périnatalité.

L'environnement de vie module l'exposition : en milieu urbain dense, l'inhalation peut être environ 2,2 fois plus élevée qu'en zone rurale (224 vs 101 MP/m³) (73,90). Certaines professions (santé, textile, nettoyage) augmentent le contact avec des MPs spécifiques, comme le PP dans le textile (73). Les populations précaires sont particulièrement exposées en raison de logements défavorables : espaces restreints et sur-occupés, ventilation insuffisante, fréquence d'entretien réduite, abondance de textiles ou revêtements synthétiques et matériaux plastiques vieillissants (91). Enfin, la grossesse constitue une fenêtre critique d'exposition de par l'augmentation de la ventilation minute d'environ +30 à +50 % (92), favorisant une inhalation accrue de particules ; s'y ajoute une perméabilité muqueuse majorée pouvant faciliter la translocation des MNPs (73). Etant donné que nous passons environ 87 % de notre temps dans des milieux intérieurs, ce chiffre pourrait augmenter en cas de grossesse du fait d'arrêt de travail fréquent et du congé maternité, augmentant ainsi l'exposition aux MNPs au domicile. La période embryonnaire, du 1^{er} au 17^e jour, apparaît particulièrement vulnérable, le fœtus traversant une organogenèse rapide avec des défenses encore immatures. Des MNPs ont été détectés dans le placenta (4,76), LA (8) et lait maternel (57,93) (Tableau I), montrant la perméabilité des barrières biologiques et suggérant des effets possibles sur les issues de grossesse et le développement fœtal.

III. EFFETS DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LES ORGANISMES ET L'HOMME

Les données actuelles sur les effets des MNPs reposent principalement sur des études *in vitro* et *in vivo* (94,95). Chez l'humain, seules trois études hors contexte périnatal ont montré des associations : Yan *et al.* (2022) et Cetin *et al.* (2023), et Atis *et al.* (2005) (96–98).

III.1. EFFETS DIGESTIFS

Les données humaines sur les effets digestifs des MNPs commencent à émerger, principalement dans le cadre des maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI).

Une étude chinoise menée par Yan *et al.* 2022 a comparé la charge en MPs dans les selles de 50 patients atteints de MICI à celle de 50 témoins sains. Les auteurs ont identifié une abondance moyenne de $41,8 \pm 18,0$ part./g dans les selles des patients contre $28,0 \pm 15,4$ part./g chez les témoins ($p < 0,001$). De plus, la concentration fécale en MPs était positivement corrélée à la sévérité de la maladie (coefficient de corrélation $r = 0,45$, $p < 0,01$) (96).

Ces observations sont en adéquation avec l'étude de Cetin *et al.* (2023), qui a détecté des MPs dans les tissus colorectaux humains : les tissus tumoraux présentaient une concentration moyenne de $9,3 \pm 4,7$ part./g, contre $4,6 \pm 2,8$ part./g dans les tissus sains adjacents ($p < 0,01$). Elle conforte l'hypothèse selon laquelle les MNPs peuvent s'accumuler dans les tissus inflammatoires ou néoplasiques. Les mécanismes proposés sont : une activation du stress oxydatif, une altération de la muqueuse intestinale, une perturbation de la signalisation immunitaire (IL-6, TNF- α , NF- κ B) et une modification du microbiote (97).

La revue de Sangkham *et al.* (2022) soutient ces mécanismes, montrant que les MNPs favorisent l'infiltration de macrophages, la production de cytokines pro-inflammatoires et la diminution de la diversité bactérienne intestinale, altérant l'équilibre immunitaire local (95).

Les études *in vitro* humaines complètent ce tableau physiopathologique :

- Forte *et al.* (2016) ont montré que l'exposition de cellules gastriques humaines à des nanoparticules de PS (44–100 nm) provoque une surexpression d'IL-6 et d'IL-8 ($p < 0,05$) et une diminution significative de la viabilité cellulaire (99).
- Stock *et al.* (2019) ont exposé des co-cultures de cellules intestinales humaines à des microbilles de PS (1–10 μ m), et ont constaté une activation immunitaire (sécrétion de cytokines) et des modifications morphologiques sans lésions histologiques (100).

III.2. EFFETS RESPIRATOIRES

Dans le milieu professionnel, l'étude transversale d'Atis *et al.* (2005) a étudié les effets respiratoires d'une exposition chronique aux microfibres de polypropylène chez 47 travailleurs d'une usine de flocage textile, comparés à 45 témoins. Les sujets exposés présentaient une prévalence significativement plus élevée de symptômes respiratoires — toux chronique (34 % vs 11 %, $p = 0,01$), dyspnée d'effort (43 % vs 13 %, $p < 0,001$) et sifflements (28 % vs 11 %, $p = 0,04$). La spirométrie montrait une baisse de la fonction ventilatoire : VEMS et CVF plus bas ($p < 0,001$) et rapport VEMS/CVF diminué ($p = 0,005$). De plus, la durée d'exposition et le VEMS présentait une corrélation négative ($r = -0,38$; $p = 0,008$) (98).

La revue de Chartres *et al.* (2024) fournit également des estimations quantitatives issues de 23 études expérimentales sur la proportion des effets délétères (94) :

- Fonction pulmonaire (VEMS/CVF) : 0,83 (IC95 % 0,63–0,93) ; $n = 19/23$.
- Lésions pulmonaires histologiques : 0,88 (IC95 % 0,53–0,98) ; $n = 7/8$.

La revue conclut ainsi que les MPs sont “suspectés d'être un danger pour le système respiratoire humain”, et que leur exposition pourrait contribuer à un risque accru de pathologies obstructives chroniques et possiblement de cancers pulmonaires.

III.3. EXPLICATIONS MÉCANISTIQUES

Les mécanismes toxicologiques reposent sur cinq processus : stress oxydatif, inflammation, cytotoxicité, génotoxicité et apoptose. Les MNPs induisent un excès d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), activant les voies NF- κ B et MAPK et stimulant la production de cytokines pro-inflammatoires (IL-6, TNF- α , IL-1 β), à l'origine d'une inflammation chronique et de lésions tissulaires (1,95). Les NPs peuvent également provoquer des cassures simple et double brin de l'ADN et altérer la régulation épigénétique, notamment via des modifications de la méthylation de l'ADN et de l'expression de gènes clés comme Estrogen-Related Receptor Beta (ESRRB) et Hepatocyte Nuclear Factor 1 Alpha (HNF1A). Le premier, ESRRB, est un facteur de transcription impliqué dans le maintien de la pluripotence et la reprogrammation cellulaire,

tandis que HNF1A joue un rôle essentiel dans la régulation du métabolisme hépatique et pancréatique ainsi que dans la différenciation cellulaire. Leur dérégulation induit des perturbations de la pluripotence et de la différenciation, ce qui peut altérer durablement la plasticité cellulaire et les fonctions métaboliques (101).

Ce stress génotoxique et épigénétique peut ensuite activer des voies de mort cellulaire programmée, incluant non seulement l'apoptose mitochondriale, mais aussi la ferroptose, une forme de mort cellulaire dépendante du fer caractérisée par une accumulation de peroxydes lipidiques et une défaillance des défenses antioxydantes (Glutathione Peroxidase 4 – GPx4, superoxyde dismutase – SOD). Les MNPs favorisent ainsi la peroxydation lipidique, l'activation de la cascade des caspases, la surexpression de gènes tels que p53 et Bax, et la perturbation du métabolisme du glutathion, menant à la destruction mitochondriale et à la perte de l'intégrité cellulaire (1). L'ensemble de ces mécanismes concourt à compromettre la régénération tissulaire, altérer les barrières biologiques et participer aux effets à long terme sur la santé.

Principaux insights : les données expérimentales et les premières observations humaines hors contexte périnatal démontrent la capacité des MNPs à franchir les barrières biologiques, à s'accumuler dans les tissus et à induire des processus cytotoxiques et génotoxiques. Ces éléments renforcent la plausibilité d'un effet pouvant s'exprimer au cours de périodes critiques de la vie, notamment les 1000 premiers jours, période reconnue comme essentielle à la programmation épigénétique de la santé future selon le concept de DOHaD.

Dans ce contexte, l'exposition maternelle aux MNPs soulève des interrogations quant à ses effets potentiels sur la santé maternelle durant la grossesse, le développement fœtal, la fonction placentaire et l'allaitement.

PARTIE 2 - MICRO- ET NANOPLASTIQUES ET SANTÉ PÉRINATALE : BILAN DES ÉTUDES

épidémiologiques

Pour faire le point sur les données disponibles en santé périnatale, nous avons réalisé une revue systématique de la littérature.

I. MATÉRIEL ET MÉTHODES DE LA REVUE

La revue a été réalisée conformément aux recommandations Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) 2020 ([102](#)), sans méta-analyse en raison de l'hétérogénéité des études du sujet.

I.1. POPULATION, EXPOSITION, COMPARATEUR, OUTCOMES (PECO)

La recherche bibliographique a été structurée selon le modèle PECO, intégrant directement les critères d'inclusion et d'exclusion.

I.1.1. Population (P)

Ont été incluses les études humaines observationnelles portant sur les femmes en âge de procréer, allaitantes, enceintes ou en post-partum, et les dyades mère-enfant, qu'il s'agisse de grossesses normales ou associées à des complications telles que le petit poids pour l'âge gestationnel (PAG), l'hypertension artérielle induite par la grossesse (HAIG), le retard de croissance intra-utérin (RCIU), la prééclampsie ou les fausses couches (FC). Ont été exclues les études expérimentales (*in silico* comprise) et les études sans lien avec la périnatalité.

I.1.2. Exposition (E)

Toutes les études évaluant une exposition aux MNPs ont été incluses, indépendamment du type de polymère (PE, PP, PET, PS ...), de leur taille, de leur forme, de leur charge de surface ou de la présence d'additifs associés (pigments, retardateurs de flamme ...). L'ensemble des voies d'exposition documentées (orale, respiratoire ou cutanée) a été considéré pertinent. De plus, les situations de co-exposition aux MNPs associées à d'autres polluants (bisphénols, PFAS, phtalates, éléments traces métalliques, radionucléides, agents biologiques)

ont été retenues lorsqu'elles étaient en lien direct avec la santé périnatale. Les études exclusivement écotoxicologiques ont été exclues.

1.1.3. Comparateur (C)

Les quatre études retenues incluant un comparateur étaient des études épidémiologiques analytiques (études cas-témoins, de cohortes, ou transversales) (9,103–105). Les 26 études restantes, sans comparateur, étaient purement descriptives, explorant l'imprégnation des matrices périnatales (placenta, cordon ombilical, méconium, LA, lait maternel, sang maternel, selles maternelles) par les MNPs (8,57,76,93,106–127).

1.1.4. OUTCOMES (O)

Les outcomes se sont concentrés sur la grossesse et la périnatalité (la présence, la quantité, la concentration, le type, la taille et la forme de MNPs dans les matrices périnatales et les facteurs déterminants ces niveaux, les associations avec des complications obstétricales, foetales et néonatales). Ont été exclus les éditoriaux, les lettres, les revues générales, les cas isolés, les protocoles sans résultats, les résumés sans texte intégral, la littérature grise inaccessible et les textes intégraux indisponibles malgré des démarches complémentaires auprès des auteurs correspondants. Les critères PECO ont permis de définir les critères d'inclusion et d'exclusion des publications (tableau III).

Tableau III. Récapitulatif des critères d'inclusion et d'exclusion

PECO	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
Population (P)	Femmes enceintes Dyades mère-enfant	Etudes expérimentales, qu'elle soit <i>in vivo</i> , <i>in vitro</i> , <i>in silico</i> .
Exposition (E)	MNPs seuls ou associés à d'autres polluants Tous polymères, toutes tailles, toutes voies d'exposition	Études purement écotoxicologiques sans lien humain.
Comparateur (C)	Études observationnelles descriptives et analytiques avec ou sans comparateur ; Études méthodologiques	Aucune exclusion spécifique
Outcomes (O)	Complication liée à la grossesse Complication périnatale (présence de MNPs dans les matrices périnatales, complications maternelles, foetales et/ou néonatales)	Toutes études ne concernant pas des outcomes en lien avec la périnatalité
Critères généraux	Articles originaux Français ou anglais Texte intégral disponible 2010-2025	Littérature grise inaccessible, lettres, éditoriaux, revues, cas isolés Résumés sans texte intégral Protocoles sans résultats

I.2. SOURCES DE DONNÉES ET STRATÉGIE DE RECHERCHE DOCUMENTAIRE

La recherche bibliographique systématique a été conduite sur les bases PubMed, Embase et ScienceDirect, complétée par une recherche manuelle additionnelle sur Google Scholar. Les termes de recherche détaillés (mots-clés et équations) ont été les suivants pour chaque base de données : *(microplastics OR nanoplastics OR plastic particles) AND (pregnancy OR placenta OR fetus OR newborn) AND (human) AND (2010-2025)*, avec le filtre supplémentaire "Articles originaux". La période d'inclusion couvrait les études publiées de janvier 2010 à octobre 2025, date de la dernière mise à jour.

I.3. SÉLECTION DES ÉTUDES

Les références issues des différentes bases de données (formats .ris, .nbib, .csv) ont été importées dans l'outil Rayyan© (Qatar Computing Research Institute, Doha, Qatar ; <https://www.rayyan.ai>). Celui-ci vise à accélérer et fiabiliser le tri des références bibliographiques tout en assurant la rigueur méthodologique requise par les standards PRISMA. Le dédoublonnage automatique (similarité $\geq 95\%$) a été suivi d'un contrôle manuel. La sélection finale des études s'est effectuée en trois étapes distinctes :

- (i) tri sur les titres et les résumés pour une première sélection,
- (ii) lecture intégrale des articles sélectionnés,
- (iii) résolution des désaccords éventuels par discussion entre évaluateurs (Bailleux Timothé, Béatrice Grave, Lydia Nikasinovic).

Cette procédure est illustrée par le diagramme de flux PRISMA Figure 2.

I.4. EXTRACTION DES DONNÉES

Les informations pertinentes des études retenues ont été extraites de manière standardisée dans des tableaux. Les données collectées comprenaient systématiquement la référence, le pays, le type d'étude, la taille de l'échantillon et son type, son mode de recueil éventuel, les protocoles de prétraitement, d'assurance qualité et de contrôle qualité, les caractéristiques des MNPs, les résultats obtenus, la qualité du *reporting*, le risque de biais,

l'équilibre des résultats, le niveau de preuve attribué à chaque étude et une conclusion. Un contrôle croisé indépendant d'un sous-échantillon représentatif (12 études – 40%) a été effectué par le Docteur Anna Dequirez (Université de Lille) pour garantir la fiabilité des données extraites (8,9,57,93,103–110).

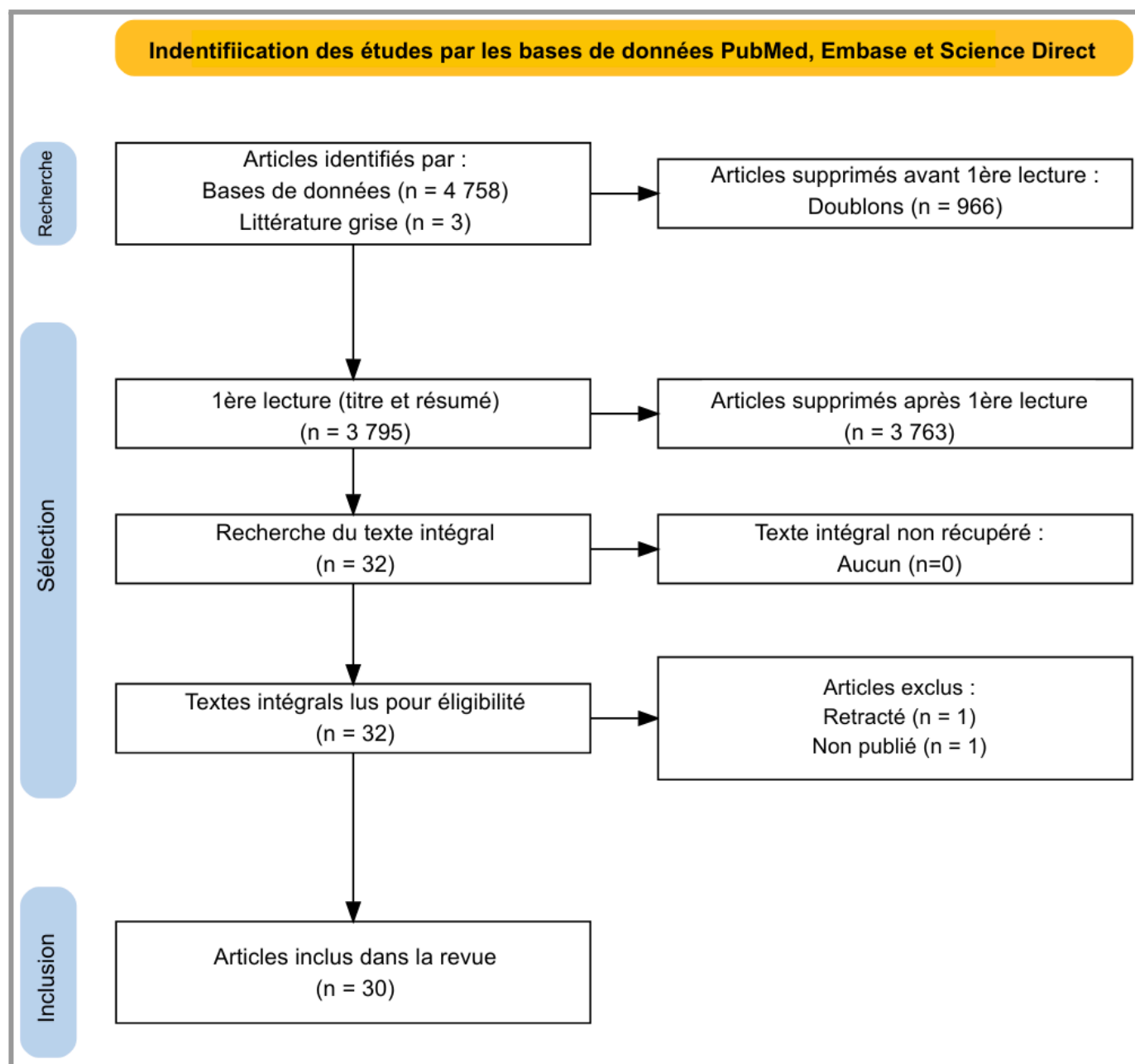


Figure 2 : Diagramme de flux PRISMA généré par Rayyan©

I.5. QUALITÉ MÉTHODOLOGIQUE, RISQUE DE BIAIS ET NIVEAU DE PREUVE

La qualité du reporting a été évaluée selon une grille inspirée de la méthodologie d'évaluation internationalement validées pour les études épidémiologiques : Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) [\(128\)](#) (grille en annexe 2).

Chaque item a été coté (« oui » = 1, « partiellement » = 0,5, « non » = 0) permettant d'élaborer un score exprimé en fraction pour chaque étude. Pour le risque de biais, une autre grille a été utilisée, inspirée cette fois-ci de *Risk Of Bias In Non-randomized Studies – of Exposures* (ROBINS-E) [\(129\)](#) (annexe 3). Chaque étude a été évaluée de manière qualitative (faible, modérée, sérieuse/critique), assortie d'une justification synthétique. Pour conclure sur le niveau de risque de biais final, les critères suivants ont été utilisés (tableau IV).

Tableau IV. Critères utilisés pour évaluation du risque de biais final

Niveau de risque de biais final	Critères utilisés
Faible	Aucun domaine > faible
Modéré	≥1 domaine modéré, aucun sérieux
Sérieux	≥1 domaine sérieux, aucun critique
Critique	≥1 domaine critique

Enfin, un niveau de preuve global a été attribué qualitativement à chaque étude. Ce niveau de preuve, qualifié de fort, modéré ou faible, résulte de l'appréciation conjointe de la qualité du reporting, du risque de biais et de la cohérence des résultats de l'étude. Cette approche pragmatique est synthétisée au moyen d'une grille de décision (tableau V).

Tableau V. Méthode d'évaluation qualitative du niveau de preuve

Qualité du reporting	Risque de biais	Équilibre des résultats	Niveau de preuve	Justification
Haute (≥ 75 %)	Faible	Concordant	Fort	Résultats cohérents, bien rapportés, peu de biais.
Haute	Faible	Mixte / Incohérent	Modéré	Méthode solide mais divergence des analyses.
Haute	Modéré	Concordant	Modéré	Biais potentiels limités – prudence.
Haute	Modéré	Mixte	Faible	Double incertitude (biais + résultats discordants).
Haute	Sérieux / Critique	Peu importe	Faible	Biais majeurs dépassant la qualité de reporting.
Moyenne (50–74 %)	Faible	Concordant	Modéré	Reporting perfectible, méthode robuste.
Moyenne	Faible	Mixte	Faible	Divergences + reporting imparfait.
Moyenne	Modéré ou Sérieux	Peu importe	Faible	Au moins un défaut majeur.
Basse (< 50 %)	Quel qu'il soit	Peu importe	Faible	Informations insuffisantes.

Le biais de publication a été exploré qualitativement par la recherche complémentaire dans la littérature grise et les registres spécialisés (International Prospective Register of Systematic Reviews – PROSPERO : registre prospectif des revues systématiques en santé et en sciences biomédicales, [ClinicalTrials.gov](https://www.clinicaltrials.gov) : registre d'essais cliniques portant sur des interventions médicales, chirurgicales, comportementales ou préventives), ainsi qu'un contrôle des références croisées des articles inclus.

I.6. SYNTHÈSE DES DONNÉES ET STRATÉGIE D'ANALYSE

En raison de l'importante hétérogénéité des données collectées, la synthèse des résultats sera narrative, organisée autour de deux grands axes :

- Synthèse méthodologique des études,
- Résultats des études sur les niveaux d'imprégnation des matrices périnatales et les différents effets sur la périnatalité.

Dans le premier axe, les résultats seront présentés selon les types d'étude, les matrices étudiées, les méthodes d'analyse et de détection, et les contrôles d'assurance et de qualité. Dans la seconde partie, les résultats s'articuleront selon les matrices étudiées et selon les différents liens avec les complications maternelles, obstétricales, foetales / néonatales et les complications du post-partum notamment l'allaitement.

I.7. ENREGISTREMENT ET TRANSPARENCE

La check-list PRISMA 2020 complétée est présentée en annexe 8.

II. RÉSULTATS : EFFETS DES MICRO- ET NANOPLASTIQUES SUR LA SANTÉ PÉRINATALE

II.1. MÉTHODOLOGIES DES ÉTUDES

II.1.1. Type de design et origine géographique

Les trente études analysées sont observationnelles. Parmi elles, vingt-six sont descriptives et transversales (8,57,76,93,106–127). Leur objectif principal était de démontrer la présence et de caractériser les MNPs dans différentes matrices biologiques. Les quatre études

restantes sont comparatives de type cas-témoins, explorant les liens entre l'imprégnation en MNPs et certaines issues périnatales comme le RCIU, la prématurité, les fausses couches spontanées à répétition (FCSR) ou l'HAIG (9,103–105). Dans les études transversales, quatre se distinguent par leur effectif supérieur à 1000 dyades mère-enfant, permettant d'étudier les associations entre charge placentaire en MNPs et biomarqueurs biologiques (enzymes hépatiques, profil endocrinien, longueur télomérique, fonction thyroïdienne) (106–109) et quatre se distinguent par leur objectif méthodologique (développement de protocole sans plastique, de technique de préparation et d'analyse des MNPs) (113,114,116,124).

Concernant le cadre d'étude, vingt-neuf travaux (97 %) sont monocentriques (8,9,57,76,103–127) et une seule est multicentrique (3 %) (différence géographique : 2 sites hospitaliers de la même province en Thaïlande) (93). Sur le plan géographique, la majorité des travaux proviennent d'Asie, avec seize études (53 %) menées en Chine (8,76,104–109,111,113,115–117,119,125,127). L'Europe totalise cinq études (17 %) — Italie (57,112,122), Allemagne (130) et Tchéquie (56) —. Le continent américain représente cinq études (17 %) dont quatre provenant des États-Unis (9,120,124,126) et une du Canada (121). Enfin, quatre études (13 %) proviennent d'autres régions : Iran (103), Pakistan (110), Indonésie (123) et Thaïlande (93).

II.1.2. Matrices biologiques étudiées

Ces travaux se distinguent non seulement par leurs plans d'étude mais aussi par les matrices biologiques explorées (tableau VI). Le placenta est la matrice la plus étudiée, par vingt-et-une études sur trente ([9,76,103,106–109,112,114,121,122,124–126](#)). Le LA a été étudié dans quatre travaux récents ([8,111,118,119](#)). Le sang maternel et le sang de cordon font également l'objet d'analyses, soit dans le cadre d'études multi-matrices ([117,119](#)) soit dans de plus grandes séries portant spécifiquement sur le sang de cordon ([106–109](#)). Le méconium est étudié dans sept travaux ([113,115–117](#)). Le lait maternel l'est dans quatre articles dont un

multi-matrices ([57,93,110](#)). Enfin, les selles de mères en cours de grossesse ont également été analysées (131).

Tableau VI. Répartition des matrices périnatales étudiées

Étude	Placenta	LA	Sang de cordon	Méconium	Lait (mères)	Sang (mères)	Selles (mères)
Ragusa 2021 (Italie) (4)	X						
Braun 2021 (Allemagne) (130)	X			X			
Zhang 2021 (USA) (120)				X			
Ragusa 2022a (Italie) (112)	X						
Ragusa 2022b (Italie) (57)					X		
Amereh 2022 (Iran) (103)	X						
Weingrill 2023 (USA) (126)	X						
Halfar 2023 (Tchéquie) (118)	X	X					
Zhu 2023 (Chine) (76)	X						
Li 2023 (Chine) (116)				X			
Liu 2023a (Chine) (115)	X			X	X + lait infantile		
Liu 2023b (Chine) (127)	X			X			
Zhu 2024 (Chine) (117)	X		X	X			
Zurub 2024 (Canada) (121)	X						
Yun 2024 (Chine) (125)	X						
Garcia 2024 (USA) (124)	X						
Wan 2024 (Chine) (104)	X Villosités choriales						
Xue 2024 (Chine) (8)		X					
Sun 2024 (Chine) (119)	X	X	X			X	
Hasanah 2024 (Indonésie) (123)							X
Saraluck 2024 (Thaïlande) (93)					X		
Arshad 2024 (Pakistan) (110)					X		
Zhang 2024 (Chine) (105)	X Tissu de cordon						
Li 2025 (Chine) (113)				X			
Tian 2025 (Chine) (111)		X					
Wang 2025 (Chine) (106)	X		X Biomarqueurs				
Liu 2025 (Chine) (109)	X		X Biomarqueurs				
Zhang 2025a (Chine) (107)	X		X Biomarqueurs				
Zhang 2025b (Chine) (108)	X		X Biomarqueurs				
Jochum 2025 (USA) (9)	X						

Abréviations : Etats-Unis d'Amérique (United States of America – USA), liquide amniotique (LA). Les matrices biologiques incluent le placenta, le LA, le sang de cordon, le méconium, le lait maternel, le sang maternel et les selles maternelles. Les symboles X indiquent la présence d'une analyse de la matrice correspondante dans l'étude citée. Les mentions spécifiques (« villosités choriales », « tissu de cordon », « biomarqueurs ») précisent les sous-matrices ou les paramètres biologiques étudiés (sinon il s'agit de la détection de MNPs).

II.1.3. Modes et conditions de recueil, de transport, de stockage et de préparation

Avant toute étape de digestion chimique, les études se distinguaient par la rigueur des procédures de prélèvement, de transport, de stockage et de préparation des échantillons, qui visaient à limiter les contaminations exogènes. Les prélèvements placentaires ont été réalisés en salle d'accouchement ou au bloc opératoire, immédiatement après l'accouchement, à l'aide d'instruments métalliques ou en verre borosilicaté (76,103,106–108,115,122,125,127). Les échantillons étaient généralement subdivisés en portions stratégiques — face maternelle, face fœtale et membranes — et placés dans des récipients en verre à couvercle en acier inoxydable, en verre, en bois ou en polytétrafluoroéthylène (PTFE) qui, malgré un relargage possible de MNPs, est le meilleur compromis parmi les plastique. Dans certains protocoles, les placentas étaient transférés sur glace vers le laboratoire dans l'heure suivant l'expulsion (112,121). Les liquides biologiques (sang maternel, sang de cordon, liquide amniotique, lait maternel) étaient recueillis dans des seringues en verre à l'aide d'aiguilles en acier chirurgical lorsque c'était nécessaire. Pour le LA, celui-ci était généralement recueilli avant l'accouchement par prélèvement transamniotique (par exemple lors d'une césarienne). Les matrices solides (méconium, selles) étaient prélevées, directement dans les couches pour le méconium (libérant du PP qu'il aura fallu prendre en considération), à l'aide de coton-tiges en bois ou de spatules métalliques, puis conditionnées dans des flacons en verre hermétiques.

Les conditions de transport et de conservation étaient homogènes d'une étude à l'autre : la réfrigération sur glace ou à +4 °C était systématique pendant le transfert vers le laboratoire, suivie d'un stockage de -20 °C à -80 °C selon la nature du tissu. De manière générale, les échantillons n'ont jamais été décongelés avant l'analyse. Les étapes de préparation avant digestion incluaient parfois la découpe, le séchage, ou la lyophilisation des échantillons, ainsi que leur conditionnement dans des contenants inertes en verre.

II.1.4. Technique de digestion et de filtration

Les protocoles de digestion appliqués aux matrices biologiques visaient à éliminer la matière organique tout en préservant l'intégrité des MNPs. Malgré une grande hétérogénéité inter-études, la plupart des équipes avaient recours à des solutions alcalines ou oxydantes, seules ou combinées, adaptées à la nature du tissu analysé. La **digestion alcaline** à l'hydroxyde de potassium (KOH), généralement à une concentration de 10 % (parfois jusqu'à 30 %), représentait la méthode la plus fréquemment employée (57,76,106–109,118,122,126). Les échantillons étaient incubés à température modérée (40–50 °C) pendant 48 à 72 heures, parfois à température ambiante pour des durées prolongées (jusqu'à 7 jours chez Ragusa 2021 et Weingrill 2023). Cette approche permettait une dégradation progressive des composants organiques (collagène, lipides, protéines) sans endommager les polymères plastiques courants (PE, PP, PET, PS, PVC).

Certaines équipes avaient recours à des **méthodes oxydatives** reposant sur l'usage de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 , 30 %) (114,116,117,121,122). Ces protocoles, appliqués à 50–70°C pendant plusieurs heures, facilitaient la digestion des tissus riches en lipides mais exposaient à un risque de dégradation partielle des polymères thermosensibles. D'autres équipes utilisaient des mélanges acides plus puissants, tels que l'acide nitrique (HNO_3) à 65–68 %, parfois chauffé à 95°C, afin d'accélérer la décomposition tissulaire (8,105,115,127).

Dans les matrices solides complexes (méconium, selles), certaines équipes avaient combiné digestion acide et solvants organiques, utilisant des mélanges d'éther et d'alcool avec ultrasons pour dissoudre les graisses, suivis d'un traitement par H_2O_2 ou HNO_3 (116).

Les protocoles intégraient pour certains une **étape de flottation** par densité visant à séparer les particules plastiques des résidus minéraux. La solution la plus couramment utilisée était le formiate de potassium (densité $\sim 1,5 \text{ g/cm}^3$) associée à une sonication de 20 à 30 minutes à 40 kHz (76,106–109).

La filtration constituait la dernière étape avant rinçage et séchage des filtres. Les membranes utilisées étaient en fibre de verre (GF/A ou GF/D, pore 1–2,7 μm) ou en acier inoxydable (maille 10–13 μm). Pour certaines digestions acides, des filtres en PTFE (0,45 μm) ou en cellulose étaient employés (105,117), tandis que Li 2025 utilisait des membranes d'argent 0,45 μm (113). Les échantillons étaient ensuite, la plupart de temps, rincés à l'eau ultrapure puis séchés à température ambiante dans des boîtes de Pétri en verre, puis conservés à l'abri de la lumière jusqu'à l'étape analytique.

En résumé, les études convergeaient vers des procédures combinant digestion alcaline douce, flottation par densité et filtration inorganique.

II.1.5. Techniques d'analyse des micro-nanoplastiques dans les matrices étudiées

Les études reposaient sur un ensemble de techniques analytiques, chacune présentant des avantages et des limites. Ces techniques sont synthétisées dans le tableau VII.

La spectroscopie Raman est utilisée pour caractériser la composition chimique et la morphologie des particules. Elle permet d'identifier de façon précise les polymères plastiques et les pigments, avec une limite de détection pratique située autour de 1 à 5 μm (parfois annoncée jusqu'à 0,25 μm selon les dispositifs). Les polymères couramment recherchés incluent le PE, le PP, le PS, le PVC et le PET, auxquels s'ajoutent, selon les bibliothèques spectrales employées, des PA, du PU, du polycarbonate (PC) ou encore du polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Les résultats sont exprimés en nombre de part./g de tissu ou part./mL et en μm pour la taille.

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode ATR (*Attenuated Total Reflectance*) (FTIR-ATR ou μ -FTIR) était également utilisée. Elle cible des particules plus grossières (≥ 10 –50 μm) et reste moins sensible pour les fragments irréguliers < 50 μm . Les résultats sont exprimés en part./g de tissu ou part./mL ou en proportion de surface occupée (%) dans le cas de l'imagerie μ -FTIR automatisée.

Le Laser Direct Infrared (LD-IR) constituait l'autre méthode spectroscopique. Il s'agit d'une imagerie infrarouge automatisée permettant de cartographier plusieurs centaines de

particules par heure. Sa limite de détection est plus élevée (20–500 μm ou $\geq 10 \mu\text{m}$ selon les filtres). Les polymères recherchés sont similaires à ceux identifiés par Raman, avec une attention particulière aux PE, PP, PS, PVC, PET, ainsi qu'à certains copolymères comme l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) ou l'éthylène-vinyl acetate (EVA). Les résultats sont exprimés en part./g de tissu ou part./mL de fluide, avec répartition par classes de taille (généralement 10–100 μm , 100–200 μm , $>200 \mu\text{m}$), et rarement en concentration massique.

La pyrolyse couplée à la chromatographie-spectrométrie de masse (Py-GC/MS) permet une quantification massique ($\mu\text{g/g}$ de tissu ou d'échantillon) des polymères après dépolymérisation thermique. Cette technique est indépendante de la taille des particules et offre une bonne spécificité grâce à l'utilisation de marqueurs pyrolytiques. Elle ne fournit en revanche aucune information morphologique ou dimensionnelle, et les résultats dépendent du panel de polymères inclus dans la calibration (8 à 12 le plus souvent). Les résultats sont exprimés en concentration massique ($\mu\text{g/g}$ de tissu, ng/mL de fluide), ou en pourcentage massique pour chaque polymère détecté et parfois selon la somme totale de MNPs en $\mu\text{g/g}$.

Enfin, certaines études méthodologiques se sont appuyées sur la **chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS)** après dépolymérisation, ciblant uniquement deux polymères, le PET et le PC, par quantification de leurs monomères respectifs (acide téréphtalique – TPA et bisphénol A – BPA), dans le méconium et les selles, avec une sensibilité de l'ordre du ng/g . Cette méthode ne permet toutefois pas de caractériser la morphologie ou la dimension des particules et se limite à un spectre restreint de polymères. Les résultats sont exprimés sous forme de concentrations en ng/g ou $\mu\text{g/g}$ de monomères.

Les différentes études rapportent donc deux grands types d'approches analytiques :

- **Les méthodes basées sur l'analyse des particules (« *particle based* »)** qui permettent leur identification individuelle, en fournissant des informations sur leur taille,

morphologie, abondance et composition chimique. Ce type d'analyse est réalisé par des techniques comme la spectroscopie Raman, le μ -FTIR ou le LD-IR.

- **Les méthodes d'analyse en masse ou globale (« *bulk analysis* »)** qui ne reposent pas sur l'isolement des particules mais sur leur dépolymérisation chimique ou thermique, permettant de quantifier la masse totale de polymères présents dans l'échantillon. Ces approches, telles que la Py-GC/MS ou la LC-MS/MS après dépolymérisation, n'apportent pas d'informations morphologiques ou dimensionnelles mais permettent de détecter les plastiques de petite taille y compris les NPs.

La combinaison de ces deux approches constitue aujourd'hui la stratégie privilégiée pour obtenir une caractérisation complète des MNPs dans les matrices biologiques.

Tableau VII. Synthèse des techniques analytiques principales

Technique analytique	Références	Taille recherchée / détectable	Polymères ciblés	Unités
Raman	(57,93,103,111,117,121,122,125,126)	$\approx 1\text{--}5\ \mu\text{m}$ (parfois $\approx 0,25\ \mu\text{m}$ selon instrument)	PE, PP, PS, PVC, PET $\pm$ PA, PU, PC, PMMA, pigments	part./g (ou /mL) ; distribution en taille (μm) et forme
FTIR / FTIR-ATR / μ-FTIR	(110,114,116,118,124)	$\geq 10\text{--}50\ \mu\text{m}$	Selon bibliothèques FTIR	part./g ; proportion surfacique (%)
LD-IR	(8,76,106–109,115,119,127)	$\geq 20\text{--}500\ \mu\text{m}$ (parfois $\geq 10\ \mu\text{m}$ selon filtres)	Panel large : PE, PP, PS, PVC, PET $\pm$ EVA, ABS, PA, PU...	part./g ou /mL ; classes de taille (10–100, 100–200, $>200\ \mu\text{m}$)
Py-GC/MS	(9,104–106,111,113,124,125)	Non applicable (quantification en masse $\mu\text{g/g}$)	Listes calibrées 8–12 polymères : PE, PP, PS, PVC, PET, PC, PA/nylon, PU, ABS...	Concentration en $\mu\text{g/g}$ ou ng/mL
LC-MS/MS	(120)	Non applicable (mesure de monomères)	PET $\rightarrow$ TPA ; PC $\rightarrow$ BPA	Concentration en ng/g ou $\mu\text{g/g}$ de monomère

Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), EVA (éthylène-acétate de vinyle), ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène).

- Les méthodes incluent la spectroscopie Raman, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), sa variante à réflexion totale atténuée (FTIR-ATR) et la micro-FTIR (μ -FTIR), ainsi que la diffraction laser infrarouge (LD-IR) pour la caractérisation morphologique et chimique des particules. Les techniques thermiques et chromatographiques — pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse (Py-GC/MS) et chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) — permettent la quantification en masse des polymères ou de leurs monomères.

- Les unités sont exprimées en particules par gramme ou millilitre (part./g ou /mL), ou en microgrammes ou nanogrammes par gramme ($\mu\text{g/g}$, ng/g) selon la méthode.

Plusieurs études ont eu recours à des techniques complémentaires afin d'améliorer la précision de l'identification, de limiter les faux positifs et de renforcer la validité des résultats analytiques. Ces approches, présentées dans le tableau VIII, visent principalement à compléter les analyses quantitatives en documentant la morphologie et la composition.

La microscopie optique ou stéréomicroscopie (MO / SM) est la technique complémentaire la plus fréquemment utilisée. Elle permet un repérage morphologique initial des particules (fibres, fragments, films) avant l'analyse spectroscopique. Sa résolution ($\approx 1\text{--}5\ \mu\text{m}$) la rend adaptée à la présélection, bien qu'elle ne permette pas d'identification chimique.

La microscopie électronique à balayage sous vide variable (VP-SEM) et **la microscopie électronique en transmission** (MET) ont été utilisées dans deux études (105,112). Ces techniques offrent une observation subcellulaire, par exemple de la localisation intracellulaire des particules dans le syncytiotrophoblaste et des altérations mitochondriales associées. Elles ne permettent pas d'identifier la nature polymérique, mais apportent une preuve morphologique directe de la pénétration tissulaire.

La microscopie à force atomique (AFM), employée par Weingrill (2023) (126), fournit une caractérisation topographique à l'échelle nanométrique, utile pour décrire la rugosité ou la structure de surface des particules.

Les **analyses élémentaires par spectroscopie dispersive en énergie des rayons X** (EDS) visent à distinguer les plastiques d'autres particules inorganiques en identifiant leurs signatures élémentaires caractéristiques (carbone, oxygène, chlore, métaux) (112,121).

Dans l'ensemble, ces techniques secondaires renforcent la fiabilité des résultats obtenus par les approches principales. Elles permettent de documenter la morphologie et la composition des particules, mais aussi de contrôler les performances analytiques (ou "la qualité") des méthodes spectroscopiques et chromatographiques utilisées.

II.1.6. Assurance et contrôle qualité

a) Procédures de contrôle et d'assurance qualité spécifiques aux micro- et nanoplastiques

L'ensemble des études recensées accordait une place centrale à l'assurance et au contrôle qualité, éléments indispensables pour limiter les risques de contamination exogène et garantir la fiabilité des résultats. Compte tenu des faibles concentrations de MNPs dans les matrices biologiques et de la sensibilité des techniques analytiques, la plupart des équipes avaient mis en œuvre des dispositifs spécifiques de sécurisation à chaque étape du protocole.

Tableau VIII. Synthèse des techniques analytiques secondaires / complémentaires

Technique analytique	Référence	Taille recherchée / détectable	Polymères ciblés	Unités / Analyse
MO / SM	(57,93,103,110,111,117,121,122,124)	$\geq 1-5 \mu\text{m}$ (limite de résolution optique)	Non spécifique (utilisée pour repérage visuel)	part./g (ou /mL) ; distribution en taille (μm) et forme
VP-SEM / MET / MEB	(105,112)	$\approx 0,1-20 \mu\text{m}$	Non spécifique (analyse morphologique)	Taille (μm) et morphologie ; observation qualitative (structure subcellulaire, internalisation)
AFM	(126)	Nanométrique ($\approx 10-500 \text{ nm}$)	Non applicable	Analyse topographique (rugosité, structure de surface)
EDS	(112,121)	Non applicable (analyse élémentaire)	Non applicable (éléments chimiques)	Spectres élémentaires semi-quantitatifs (% atomique ou en intensité relative)

Abréviations : MO / SM : microscopie optique ou stéréomicroscopie ; VP-SEM / MET / MEB : microscopie électronique à balayage à pression variable (Variable Pressure Scanning Electron Microscopy), microscopie électronique en transmission (Transmission Electron Microscopy) et microscopie électronique à balayage (Scanning Electron Microscopy) ; AFM : microscopie à force atomique (Atomic Force Microscopy) ; EDS : spectroscopie de dispersion d'énergie des rayons X (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

- Ces méthodes permettent l'analyse morphologique (taille, forme, surface), topographique ou élémentaire des particules, en complément des approches spectroscopiques et chromatographiques.

- Les unités sont exprimées en particules par gramme ou millilitre (part./g ou /mL) ou en pourcentage atomique.

Les protocoles de pré-traitement étaient menés selon des conditions encadrées afin de prévenir l'introduction de plastiques exogènes. Toutes les études avaient suivi des procédures dites *plastic-free* ou *plastic-reduced*, excluant tout contact avec des matériaux polymériques et imposant l'utilisation exclusive d'instruments en verre, métal ou aluminium. Ces procédures consistaient à limiter les sources de contamination sans pouvoir les éliminer totalement. Quelques équipes utilisaient encore ponctuellement certains matériaux plastiques (tubes de prélèvement, membranes filtrantes en PTFE, bouchons ou joints en polymères), justifiés par des contraintes de prélèvement, d'analyse ou de sécurité biologique.

Les solutions de digestion et de rinçage (KOH, HNO₃, H₂O₂, formiate de potassium, eau ultrapure) étaient systématiquement filtrées avant emploi, avec des seuils de porosité compris entre 0,7 et 1,6 µm. Les verreries pouvaient être préalablement chauffées à 450 °C pour éliminer tout résidu organique ou MPs résiduels. Les analyses étaient conduites dans des environnements contrôlés, à atmosphère confinée, avec un nettoyage des surfaces de travail à l'éthanol 70% et la fermeture des circuits de ventilation. Certaines équipes travaillaient en salle blanche ou sous hotte à flux laminaire ISO 5 (111,118). Le port de vêtements en fibres naturelles (blouse en coton) et de gants en coton, latex ou nitrile était la règle.

La robustesse des résultats reposait également sur l'intégration de contrôles procéduraux et environnementaux appelés "blancs". **Les blancs procéduraux**, consistant à reproduire l'ensemble du protocole analytique sans matrice biologique, avaient été réalisés dans vingt-trois études (77 %). Ils visaient à détecter toute contamination potentielle au cours des étapes de digestion, de filtration ou d'analyse. Dans la majorité des cas, les résultats étaient négatifs. Cependant, lorsque des particules étaient observées, leur nature non polymérique ou leur signal spectroscopique inférieur au seuil d'appariement (Hit Quality Index – HQI < 65 %) ainsi que leur taille supérieure à celle des particules attendues conduisait à leur exclusion du comptage final. **Les blancs environnementaux**, destinés à évaluer la contamination de l'air ambiant ou du matériel, avaient été mis en place dans neuf études (30 %). Ces contrôles consistaient à exposer des filtres ou récipients témoins dans les zones de manipulation. Les rares particules détectées étaient le plus souvent des fibres macroscopiques (>500 µm) ou incompatibles avec une translocation biologique, et ont été systématiquement exclues des analyses quantitatives. D'autre part, des travaux avaient intégré des tests de récupération et des études de reproductibilité. Ces tests consistaient en la réalisation de l'ensemble du protocole en remplaçant l'échantillon par des sphères de polymères de 20 à 500 µm. Liu 2023a (115) avait mesuré un rendement moyen de 84 à 97 % selon le polymère testé, tandis que Zhu 2023 et Wang 2025 rapportaient des taux proches de 90 % (76,106).

Enfin, la validation croisée des identifications par des techniques d'analyse complémentaires constituait un autre atout assurant la qualité (cf. II.1.5.) La mise en place de ces procédures de contrôle, pouvant varier légèrement d'une étude à l'autre, étaient toujours décrites au moins en partie dans chaque étude.

b) Procédure de contrôle et d'assurance qualité indépendante des plastiques

Au-delà des mesures spécifiques à la gestion du risque de contamination plastique, des études avaient intégré des procédures de contrôle qualité générales afin d'assurer la fiabilité analytique, la traçabilité des mesures et la reproductibilité inter-analyses. La répétabilité des mesures était évaluée par l'analyse en triplicat de certains échantillons, tandis que la reproductibilité inter-analyse reposait sur la comparaison des résultats entre plusieurs opérateurs ou instruments au sein d'un même laboratoire (107–109). Des étalonnages réguliers des spectromètres et des vérifications de stabilité du signal optique étaient décrits, garantissant la constance de la sensibilité et du seuil de détection (57,114). La validation spectroscopique des identifications reposait sur des critères objectifs : une correspondance spectrale minimale de 65 à 80 % sur l'indice HQI était retenue selon la méthode employée, tandis que plusieurs équipes avaient recours à des bibliothèques internes enrichies de spectres de polymères vieillis ou pigmentés pour limiter les erreurs d'attribution (117).

Toutes les informations détaillées, issues des articles, concernant les protocoles employés, du recueil des matrices jusqu'à l'analyse sont disponibles en Annexe 4.

Principaux insights : les trente études incluses, majoritairement descriptives et monocentriques, provenaient surtout d'Asie, et portaient principalement sur le placenta, suivi du méconium, du LA, du lait maternel et du sang de cordon. Les protocoles combinaient digestion chimique, filtration inorganique et analyses spectroscopiques ou massiques, permettant l'identification et la quantification des MNPs selon des approches complémentaires.

Les travaux reflètent une rigueur méthodologique croissante, avec des protocoles majoritairement sans plastique, des taux de récupération élevés et des validations inter-techniques, assurant la fiabilité des résultats. Bien qu'aucune norme internationale ne soit encore établie, les pratiques tendent à converger vers des méthodes harmonisées, favorisant une meilleure interprétation des données et une comparabilité des résultats. Cette progression méthodologique constitue une étape importante pour réaliser une évaluation fiable de l'exposition aux MNPs et des risques pour la santé humaine.

II.2. RÉSULTATS DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Le corpus est composé de 17 études d'imprégnation (57,76,110,113–124,126,127) et treize études combinant imprégnation et outcomes de santé (8,9,93,103–109,111,112,125). (voir les détails en annexes 5, 6, 7 et 8).

II.2.1. Niveaux d'imprégnation des microplastiques dans les matrices étudiées

Cette section présente les niveaux d'imprégnation en MNPs rapportés dans les principales matrices biologiques périnatales humaines. Au total, vingt et une études ont analysé le placenta ([9,76,103–109,111,112,114,115,117–119,121,122,124–127](#)), quatre se sont intéressées au LA ([8,111,118,119](#)), deux au sang de cordon ([117,119](#)), sept au méconium, quatre au lait maternel ([57,93,110,115](#)), une étude le sang maternel ([119](#)) et une étude les selles maternelles ([123](#)).

a) Contamination placentaire

L'ensemble des 21 études recensées sur le placenta montrait une détection quasi systématique de MNPs dans les échantillons humains (tableau IX. p34). *Les méthodologies* employées variaient selon les périodes et les pays : les premières études reposaient sur la spectroscopie Raman (caractérise la composition chimique et la morphologie des particules), tandis que les plus récentes utilisaient des approches LD-IR (cartographie les polymères) ou Py-GC/MS (quantification massique des polymères après dépolymérisation thermique). *Les*

taux de positivité variaient de 40 % à 100 %. *Les niveaux moyens ou médians* étaient de 1 à 15 part./g de placenta dans les études Raman et FTIR, à environ 1 à 2 part./g dans les études LD-IR, tandis que les approches par Py-GC/MS rapportaient des concentrations massiques moyennes d'environ 100 à 250 µg/g et présentaient de grandes variabilités, pouvant aller de 6,5 à 685 µg/g. *Les polymères* dominants étaient constants : PE, PP, PVC, PET, PU et PA. Pour ce qui est des *tailles* observées, dans les études Raman/FTIR, les MPs placentaires identifiés pouvaient mesurer entre 1 à 44 µm (moyennes ~3–6 µm), tandis que les séries LD-IR montraient une distribution de : ~55–60 % entre 10–100 µm, ~30–40 % entre 100–200 µm et ~10 % au-delà de 200 µm. Les tailles plus petites correspondant aux NPs n'étaient pas recherchées. *Les formes observées* étaient principalement des fragments, plus rarement des fibres ou des sphères.

b) Contamination du liquide amniotique

Les études portant sur le LA demeuraient encore peu nombreuses, mais toutes convergeaient vers une détection de MNPs. Elles ne concernaient que des femmes ayant subi une césarienne. Quatre études récentes en apportent la preuve (tableau X. p37). *Les taux de positivité* observés étaient élevés, variant de 80 % à 100 %. *Les approches analytiques* reposaient sur des techniques LD-IR ou µ-FTIR. *Les niveaux moyens et médians* rapportés se situaient autour de 2 à 5 part./g d'échantillon (médiane : 4,8 part./g IQR 2,9–6,3 ; moyenne : 2,0 ± 4,2 part./g). Ces valeurs rejoignent les niveaux décrits dans le placenta. *Les polymères* les plus fréquemment détectés incluaient le PE, le PP, le PS, le PVC, le PU, le PA, le PET, et, dans l'étude de Tian 2025 et Xue 2024, des copolymères tels que le caoutchouc chloré (CPE), EVA ou styrène-butadiène-styrène (SBS) (8,111). *Les tailles* retrouvées étaient limitées par les techniques d'analyse, pouvant aller de 1 à 500 µm. Pour 85-90% des MPs, la taille était comprise entre 20 et 100 µm. Pour les autres, elle allait au-delà de 100 µm. *Les formes* identifiées étaient majoritairement fragmentaires (~70%), suivies de fibres et de quelques

sphères ou films. Enfin, Halfar (2023) (56) ont mis en évidence la présence concomitante d'additifs chimiques (comme les phtalates) dans 100% des échantillons.

c) Contamination du sang de cordon

Les études consacrées au sang de cordon confirmaient la présence de MPs dans la circulation fœtale, attestant de leur passage transplacentaire (tableau XI. p38). Six travaux (106–109,117,119) ont étudié cette matrice, mais seulement 2 d'entre eux, multi-matrices, se sont intéressés aux MPs contenus dans le sang de cordon. Ces deux travaux reposaient sur des approches complémentaires : Raman MS (117) et LD-IR (119).

Les taux de positivité rapportés variaient de 56 % à 100 %. *Les niveaux médians* allaient de 0 à 15,6 part./g pour l'étude utilisant la MS Raman, soit une charge similaire à celle du placenta pour la même technique. Dans l'étude de Sun 2024 (LD-IR), la médiane était de 2,7 (IQR 1,6–18,5) part./g, sans différence significative pour les corrélations entre le sang maternel, le placenta, le LA et le sang de cordon (119). En revanche, les analyses de Zhu *et al.* (2024), après ajustement sur l'âge maternel, l'IMC, la parité, le niveau d'éducation et le sexe fœtal, mettaient en évidence une corrélation faible mais positive et significative entre la charge placentaire et celle du sang de cordon : $r = 0,38$ ($p < 0,05$), ainsi qu'une corrélation négative entre la charge en MPs dans le sang de cordon et le méconium : $r = -0,26$ ($p < 0,01$) (117).

La composition polymérique du sang de cordon retrouvait les mêmes polymères que dans les 2 matrices précédentes en proportion différente : avec une prédominance du PA, du PU, du PP et du PE, suivis du PB et du CPE. *Les MPs détectées mesuraient* entre 20 et 639 μm , essentiellement entre 20 et 400 μm . Là encore, *les formes* dominantes étaient les fragments.

Tableau IX. Synthèse des niveaux d'imprégnation placentaire en MNPs (*par ordre chronologique*)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Ragusa 2021 (4) Italie	Raman MS	N=6, 67 % positifs Quantité : 12 MPs dans 4 échantillon de 23g	PP (3/12) ; 9/12 non identifiés Tailles : ~5–10 µm (10/12) et ~5 µm (2/12) Formes : fragments
Braun 2021(130) Allemagne	µ-FTIR	N=2, 100 % positifs, présence qualitative Pas de quantification	PE, PP, PU Tailles : > 50 µm Formes : fragments
Ragusa 2022a (112) Italie	VP-SEM + MET + EDS	N=10, 3 échantillons par placenta (face maternelle, face foetale et membrane), 100 % positifs, présence de MPs en intra/extracellulaire Pas de quantification	Analyse élémentaire (pics de carbone intenses, absence d'azote et d'oxygène, compatibles avec plastiques) Tailles : ~2–18 µm Formes : fragments
Amereh 2022 (103) Iran	Raman MS	N=43, 40 % positifs, Quantité : 308 MPs, 2–38 MPs/placenta Répartition : 49 % face maternelle, 33 % face foetale, 18 % membranes Témoins : N=4/30 positifs (6 MPs) RCIU : N=13/13 positifs (302 MPs) (p < 0,05)	Taille (globale) : moyenne 9,86 µm (64% < 10µm) <u>Témoins</u> : - PE 67%, PS 33% - Tailles : 7,3–27,6 µm - Formes : fragments 83 %, films 17 % <u>RCIU</u> : - PE 43%, PS 36%, PET 15%, PP 6% - Tailles : 2,9–34,5 µm - Formes : fragments 66 %, fibres 15 %, granules 11 %, films 8 %
Weingrill 2023 (126) Hawaï	Raman + AFM (série temporelle)	N=30 (10 par année) % positifs, nombre de MPs et quantité (part./50g ± ET) : - 2006 : 60% – 22 MPs – 4,1 ± 1,3 - 2013 : 90% – 38 MPs – 7,1 ± 0,9 - 2021 : 100% – 82 MPs – 15,5 ± 3,0	2006 : 8 polymères (PP, PES) → 2021 : >15 polymères (PES, PET) Tailles (moyennes en µm ± ET) : - 2006 : 2,82 ± 0,31 (plages 1–8) - 2013 : 6,24 ± 0,57 (plages 1–17) - 2021 : 5,14 ± 0,75 (plages 1–44) Formes : fragments ou sphères
Halfar 2023 (118) Tchéquie	µ-FTIR-ATR	N=10, 90 % positifs Quantité : 11 MPs 0–10 part./placenta (0–20 part./g, médiane 2,8)	15 polymères : CPE, PVC, PE prédominant... Tailles : 6,8–260 µm (80% entre 10 et 50 µm, 10% en deçà et 10% au delà) Formes : fragments Additifs (phtalates, BPA, nonylphénol) positifs dans 100 % des échantillons
Zhu 2023 (76) Chine	LD-IR (20–500 µm)	N=17, 100 % positifs Quantité : 149 MPs au total Moyenne totale : 2,70 ± 2,65 part./g (min 0,28 – max 9,55)	11 polymères : PVC (43 %), PP (15 %), PBS (11 %), PET (7 %), PC (7 %), PS (6 %), PA (5 %), fibre de polyester (3 %), PE (1 %), PAM (1 %), PSF (1 %) Tailles : 20,34 – 307,29 µm - < 100 µm : 80,29 % - 100–200 µm : 15,22 % - > 200 µm : 4,49 % Formes : Fragments (67 %), fibres (22 %), films (9 %), sphères (1 %)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Liu 2023a (115) Chine	LD-IR (20–500 µm)	N=18, 100 % positifs Quantité : Médiane MPs totaux 18,0 part./g (IQR 12,2–33,5)	16 polymères : PA et PU (> 65% des MPs totaux), PE, PET, PP, PVC, POM, EVA, PTFE, CPE, Polybutadiène, PC, PS, PMMA, PLA, Polysulfones Tailles : 20–50 µm (> 74 %), le reste > 50 µm Formes : granules et fragments
Liu 2023b (127) Chine	LD-IR (20–500 µm)	idem Liu 2023a	16 polymères : PA et PU (>78 % des MPs totaux), PE, PET, PP, PVC, POM, EVA, PTFE, CPE, Polybutadiène, PC, PS, PMMA, PLA, Polysulfones Tailles : 20–50 µm (~76 %), le reste > 50 µm Formes : NR
Zhu 2024 (117) Chine	Raman MS	N=9, 100 % positifs Quantité : 34 MPs au total Médiane : 3,15 part./g (IQR 1,82–7,85) (min 1,37 – max 13,41) Ordre d'abondance : Méconium > Placenta > Sang de cordon (p < 0,01) Corrélation abondance de MPs entre placenta et cordon : r = +0,38, p<0,05	9 polymères : CEL (23,5 %), PNB (17,6 %), Blend (29 %), PB, PEA, PET, PPG, PVS, PVA Tailles : 63,6–638,7 µm (~80 % entre 100–400 µm) Formes : fragments
Zurub 2024 (121) Canada	Raman MS + EDS	N=10, 100 % positifs Quantité : ~650 MPs/placenta Moyenne : 1,0 ± 1,2 part./g	PE : 1/10 placentas (7 particules, 2–20 µm, fragments) PP : 1/10 (1 particule, ~60 µm, fragment) PS : 2/10 (2 particules, 7–40 µm, fragments) PVC : 2/10 (3 particules, 9–15 µm, fragments) PMMA : 1/10 (1 particule, 3 µm, forme NR) Polymères contenant du Cu-phthalocyanine (colorant bleu) : 6/10 (16 particules, 2–44 µm, fragments)
Yun 2024 (125) Chine	Raman MS (0,25 µm) + Py-GC/MS (pour confirmation PC et PTFE)	N=50, 62 % positifs Quantité : 40 MPs au total	7 polymères : PTFE (30 %), PS (12 %), ABS (6 %), PC (4 %), PP (4 %), PE (4 %), PVC (2 %) Tailles moyennes (µm ± ET) : 2,35 ± 1,25 (min 1,03 – max 6,84) Formes : fragments ou sphères
Garcia 2024 (124) USA	MO + FTIR-ATR + Py-GC/MS	N=62, 100 % positifs Concentration (µg/g ± ET) : (min 6,5 – max 685) - Moyenne 126,8 ± 147,5 - Médiane 85,8	Panel calibré pour 12 polymères : PE (~54%), PVC (~10%), Nylon 66 (~10%), SBR, ABS, PET, Nylon 6 (N6), PMMA, PU, PC, PP, PS (les 9 ~26%) Tailles : 1–20 µm Formes : granules et fibres

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Wan 2024 (104) Chine	Villosités choriales Py-GC/MS ciblant PS	N=36, % positif NR Concentrations totales (mg/kg) : (p < 0,001) - N=18 FCSR, médiane 2,09 (min 0,564 – max 4,13) - N=18 témoins, médiane 0,227 (min 0 – max 1,68)	PS Tailles et formes non évaluables
Sun 2024 (119) Chine	LD-IR (20–500 µm)	N=12, 100 % positifs Quantité : Médiane (toutes matrices) : 4.7 part./g (IQR : 2.53–35.235) Corrélations inter-matrices NS	9 polymères : PA (45 %), PU (27 %), Autres (28 % – PET, CPE, PE, ACR, PP, FKM, BR) Tailles : 20–100 µm (> 90 %), 100–500 µm (< 10 %) Formes : NR
Zhang 2024 (105) Chine	Cordon ombilical Py-GC/MS + MEB	N = 45, 100 % positifs Concentrations totales (mg/kg ± ET) : (p = 0,012) - N=15 HAIG : 120,7 ± 56,3 (min 44,57 – max 213,9) - N=30 Témoins : 82,4 ± 41,4 (min 28,04 – max 175,2)	PE, PC (↑ groupe HAIG) + PP, PVC, PMMA, PS Tailles : < 50 µm Formes : fibres, fragments, granules
Wang 2025 (106) Chine	LD-IR (≥10 µm)	N=1057, 100 % positifs Quantité : Médiane totale = 12 part./10 g (IQR = 8) (PVC = 4, PP = 4, PBS = 4 part./10 g – IQR = 4)	Panel calibré pour 3 polymères : PVC (~88 %), PP (~89 %), PBS (~89 %) Tailles : 10–100 µm (PVC ~57 %), 100–200 µm (NR), > 200 µm (NR) (globalement taille majoritaire 10-100 µm) Formes : NR
Liu 2025 (109) Chine	LD-IR (≥10 µm)	N=1324, 100 % positifs Quantité : Médiane totale = 12 part./10 g (IQR = 7) (PVC = 4, PP = 4, PBS = 4 part./10 g – IQR 4-5)	Panel calibré pour 3 polymères : PVC (89 %), PP (90 %), PBS (88 %) Tailles : - PVC : 10–100 µm (64 %), autres NR - PP : 10–100 µm (49 %), 100–200 µm (30 %), >200 µm (17 %) - PBS : 10–100 µm (43 %), 100–200 µm (45 %), >200 µm (12 %) Formes : NR
Zhang 2025a (107) Chine	LD-IR (≥10 µm)	N=1121, >89 % positifs (NR précisément) Quantité : Médiane totale = 15 part./10 g (IQR = 8) (PVC ≈ 5, PP ≈ 5, PBS ≈ 5 part./10 g – IQR = 6)	Panel calibré pour 3 polymères : PVC (89 %), PP (90 %), PBS (88 %) Tailles : - PVC : 10–100 µm (60 %), autres NR - PP : 10–100 µm (55 %), 100–200 µm (35 %), > 200 µm (10 %) - PBS : 10–100 µm (50 %), 100–200 µm (40 %), > 200 µm (10 %) Formes : NR
Zhang 2025b (108) Chine	LD-IR (≥10 µm)	N=1250, >89 % positifs (NR précisément) Quantité (moyenne ± ET) : MPs totaux = 10,84 ± 4,45 part./10 g (PVC = 3,62, PP = 3,67, PBS = 3,55 part./10 g)	Panel calibré pour 3 polymères : PVC (89 %), PP (90 %), PBS (88 %) Tailles : - PVC : 10–100 µm (60 %), autres NR - PP : 10–100 µm (55 %), 100–200 µm (35 %), > 200 µm (10 %) - PBS : 10–100 µm (50 %), 100–200 µm (40 %), > 200 µm (10 %) Formes : NR

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Jochum 2025 (9) USA	Py-GC/MS	N=158, 100 % positifs Concentrations totales ($\mu\text{g/g} \pm \text{ET}$) : (p=0,038) - N=71 pré-termes $224,7 \pm 180,7$ - N=87 termes $175,5 \pm 137,9$	Panel calibré pour 12 polymères : PVC, PET, PU, PC ↑ groupe prétermes Autres : PE, SBR, PP, N66, N6, PMMA, ABS, PS Tailles et formes non évaluables

- Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; FTIR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ; μ -FTIR / FTIR-ATR : micro-FTIR / FTIR en mode réflexion totale atténuée ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; Py-GC/MS : pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse ; VP-SEM / MET / MEB : microscopie électronique à balayage à pression variable / microscopie électronique en transmission / microscopie électronique à balayage ; EDS : spectroscopie de dispersion d'énergie des rayons X ; AFM : microscopie à force atomique ; NS : non significatif ; NR : non rapporté ; IQR : intervalle interquartile ; ET : écart type.

- Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), EVA (éthylène-acétate de vinyle), ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène), PBS (polybutylène succinate), PCL (polycaprolactone), PLA (poly(acide lactique)).

- Les résultats indiquent, pour chaque étude, la méthode d'analyse, la proportion d'échantillons positifs, les niveaux moyens ou médians de particules détectées (exprimée en particules par gramme ou microgrammes par gramme), les tailles et formes observées, ainsi que les polymères identifiés.

Tableau X. Synthèse des niveaux d'imprégnation du liquide amniotique en MNPs (par ordre chronologique)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Halfar 2023 (118) Tchéquie	μ -FTIR-ATR	N=10, 90 % positifs Quantité : 15 MPs 0–8 part./placenta (0–1,6 part./g mL, médiane 1,5)	15 polymères : CPE, PVC, PE prédominant... Tailles : 6,8–260 μm (80% entre 10 et 50 μm , 10% en deçà et 10% au delà) Formes : fragments Additifs (phtalates, BPA, nonylphénol) positifs dans 100 % des échantillons
Xue 2024 (8) Chine	LD-IR (20–500 μm)	N=40, 80 % positifs Quantité : Moyenne : $2,01 \pm 4,19$ part./g (min 0 – max 15,63)	9 polymères : PE (39 %), CPE (27 %), PA (22 %), PU (4 %), PP (4 %), EVA (2 %), SBS (1 %), PET (1 %), PVC (0,4 %) Tailles : 20–100 μm (87,6 %) Formes : fragments (71 %), fibres (17 %), sphériques (10 %), films (2 %)
Sun 2024 (119) Chine	LD-IR (20–500 μm)	N=12, 100 % positifs Quantité : Médiane : 4.8 part./g (IQR : 2.869–6.35) Corrélations inter-matrices NS	12 polymères : PA (61 %) puis PU > PET > PMMA > ACR, etc ... Tailles : 20–100 μm (> 90 %), 100–500 μm (< 10 %) Formes : NR
Tian 2025 (111) Chine	Raman MS (0,25 μm) + Py-GC/MS	N=48, 81 % positifs Quantité : 96 MPs au total (~2 MPs/échantillon)	6 polymères : PTFE (31 %), PS (20 %), ABS (15 %), PE (10 %), PC (2 %), PVC (2 %) Tailles ($\mu\text{m} \pm \text{ET}$) : $3,05 \pm 1,05$ (min 0,94 – max 5,73) Formes : fragments ou sphères

- Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; FTIR-ATR / μ -FTIR-ATR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode réflexion totale atténuée ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; Py-GC/MS : pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse ; NS : non significatif ; NR : non rapporté ; IQR : intervalle interquartile.

- Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), EVA (éthylène-acétate de vinyle), ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène), PTFE (polytétrafluoroéthylène), CPE (polyéthylène chloré), SBS (styrène-butadiène-styrène), ACR (acrylique)

- Les résultats rapportent, pour chaque étude, la méthode analytique utilisée, la proportion d'échantillons positifs, les niveaux moyens ou médians (en particules par gramme ou microgrammes par gramme), la distribution des tailles, les formes des particules observées et les polymères identifiés.

Tableau XI. Synthèse des niveaux d'imprégnation du sang de cordon en MNPs (*par ordre chronologique*)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Zhu 2024 (117) Chine	Raman MS	N=9, 56% positifs Quantité : 14 MPs au total Médiane : 1,10 part./g (IQR 0–1,55) (min 0 – max 15,6) Corrélation abondance de MPs entre placenta et cordon : $r = +0,38$, $p < 0,05$ Corrélation abondance de MPs entre cordon et méconium : $r = -0,26$, $p < 0,01$	4 polymères : PB (43 %), CEL (29 %), PP (21 %), PNB (7 %) Tailles : 63,6–638,7 μm (~80 % entre 100–400 μm) Formes : fragments
Sun 2024 (119) Chine	LD-IR (20–500 μm)	N=12, 100 % positifs Quantité : Médiane : 2.7 part./g (IQR 1.62–18.463) Corrélations inter-matrices NS	9 polymères : PA (63 %) puis PU > CPE > ACR > Autres (PET, PE, PMMA, PP, FKM) Tailles : 20–100 μm (> 90 %), 100–500 μm (< 10 %) Formes : NR

- Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; NS : non significatif ; NR : non rapporté ; IQR : intervalle interquartile.

- Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), CPE (polyéthylène chloré), PB (polybutadiène), PNB (poly(n-butadiène)), CEL (cellulose), FKM (fluoroélastomère), ACR (acrylique).

- Les résultats rapportent, pour chaque étude, la méthode analytique utilisée, la proportion d'échantillons positifs, les niveaux moyens ou médians (en particules par gramme), les tailles et formes des particules, les corrélations (Pearson) intermatrices éventuelles et les polymères identifiés.

d) Contamination du méconium

Le méconium, première excrétion intestinale du nouveau-né, constitue une matrice informative pour évaluer l'exposition fœtale *in utero* aux MNPs. Elle reflète l'exposition cumulée sur plusieurs mois aux MNPs. Sept études ([113–117,120,127](#)) ont voulu documenter la présence de MPs dans cette matrice (tableau XII. p42). *Les taux de positivité* rapportés atteignaient 100 % dans toutes les études hormis celle de Li 2023 qui n'en a détecté aucun ([116](#)). Ce résultat négatif peut s'expliquer par un faible niveau réel d'exposition fœtale dans les échantillons, par la barrière placentaire empêchant le passage de particules > 10 µm, par les limites de la méthode FTIR, peu sensible pour les particules < 50 µm ou de forme irrégulière et ne permettant pas la détection en deçà de 10 µm, par la perte possible de MPs lors de la digestion acide, par le faible effectifs (N = 16 méconium) et par une quantité limitée des prélèvement puisque sur les 37 prélèvements initiaux, 21 ont été exclus de l'analyse pour trop faible de quantité. *Les niveaux de contamination* variaient de 20,8 à 54,1 part./g de méconium (IQR 6,7–77,8). En Py-GC/MS, les concentrations massiques moyennes étaient de $1,6 \times 10^{-5}$ à $1,53 \times 10^3$ µg/g. Pour ce qui est des corrélations inter-matrices, l'étude de Liu *et al.* 2023a indiquait une corrélation positive entre charge en MPs dans le placenta et le méconium ($r = 0,84$; $p < 0,001$; non ajusté) (115).

La composition polymérique du méconium était dominée par le PA et le PU dans les séries LD-IR (60 % et 20 % respectivement), tandis que les études Raman et Py-GC/MS mettaient plutôt en évidence une prédominance de PE, suivi du PVC, du PP, du PS et du PET. Des polymères secondaires ou additifs (PMMA, ABS, EVA, PTFE, PC, polyacide lactique – PLA, polysulfones, Poly(ε-caprolactone) – PCL, cellulose acétate) avaient également été détectés ponctuellement en LD-IR. *Les tailles* détectées variaient de 63,6 à 638,7 µm (surtout entre 100 et 400 µm) par technique Raman et de 20 à 50 µm par LD-IR (~ 75 %). *Les formes* observées pouvaient être des fragments ou des granules.

e) Contamination du lait maternel

Quatre études (57,93,110,115) ont rapporté la présence de MNPs dans le lait humain (tableau XIII. p43). *Les taux de positivité* variaient de 39 % à 100 %. *Les niveaux de contamination* pouvaient atteindre un charge moyenne de $1,7 \pm 0,9$ part./g jusqu'à une médiane de 20 part./g (IQR 3,8–37,1). Par ailleurs, les échantillons de lait infantile issus du même protocole présentaient une médiane presque comparable (17,3 part./g ; IQR 17–20,8). *La composition polymérique* du lait maternel était dominée par le PE, le PP, le PVC, le PA et le PU. Selon les études, d'autres polymères étaient détectés, notamment le PET, le PS, le PC, le PMMA, l'acrylate d'éthyle (PEMA), le copolymère éthylène-acétate de vinyle (PEVA), ou encore des polysulfones. *Les tailles* des particules détectées s'échelonnaient de 2 à plus de 50 μm , majoritairement > 50 μm . Les formes observées étaient des fragments, des fibres, des sphères ou des granules dans des proportions variables d'une technique à l'autre.

Devant cette contamination ubiquitaire des différentes matrices périnatales par les MNPs, certaines études se sont intéressées à l'exposition maternelle.

f) Contamination du sang maternel

L'étude de Sun *et al.* (2024) était la seule à avoir analysé simultanément le sang maternel et plusieurs matrices périnatales (119). Elle a mis en évidence la présence de MNPs dans 100 % des échantillons sanguins (N=12). *Les niveaux médians* observés dans le sang maternel étaient de : 8,176 part/g (IQR 3.991–19.573).

Aucune corrélation entre matrices et sang maternel n'a été identifiée. Cette absence de corrélation peut s'expliquer par plusieurs points : distribution hétérogène des MPs entre les compartiments maternel et fœtal, existence de barrières biologiques limitant le transfert materno-fœtal, possibilité de rétention ou d'accumulation tissulaire sélective selon la matrice, flux circulatoires différents entre le sang maternel et les annexes fœtales, taille d'échantillon faible (N = 12) limitant la détection des corrélations faibles par manque de puissance.

Les polymères retrouvés dans le sang maternel étaient similaires à ceux décrits dans les matrices fœtales avec un panel de 10 polymères détectés : PA (32%) > PU > ACR > FKM puis PET, CPE, PE, PMMA, PP et PS. *Les tailles* détectées s'étendaient principalement de 20 à 100 µm (>90 %), avec une faible proportion de particules entre 200 et 500 µm (<10 %). Des données sur les formes ne sont pas rapportées dans l'article.

g) Contamination des selles maternelles

Les selles maternelles, tout comme le sang, constituent une matrice informative pour évaluer l'exposome interne. Elles reflètent à la fois l'ingestion d'eau et d'aliments contaminés, l'ingestion de particules déposées sur les aliments et l'absorption digestive. L'étude de Hasanah *et al.* (2024) était la seule à explorer cette matrice dans un contexte périnatal (131). Réalisée chez 30 femmes enceintes à terme, elle mettait en évidence la présence de MPs dans 100 % des échantillons fécaux.

L'analyse, effectuée par stéréomicroscopie Euromex et µ-FTIR (10–500 µm), révèle une charge moyenne de $11,9 \pm 4,7$ pour 25 g de selles, soit environ $0,48 \pm 0,19$ part./g de selles. Cette quantité, même si elle est difficilement comparable, apparaît 40 à 100 fois plus faible que celle observée dans le méconium (pour rappel la charge médiane : 20,8 à 54,1 MPs/g). *Les polymères* les plus fréquents étaient le PA (30 %), le PET (20 %), le PEC (20 %), le polyéthylène haute densité (HDPE – 20 %) et l'éthylène-propylène (EP – 10 %). *Les tailles* détectées s'étendaient de 0,2 mm à 4,9 mm. *Les formes* étaient des films (41 %), des fragments (33 %) et des fibres (25 %).

Tableau XII. Synthèse des niveaux d'imprégnation du méconium en MNPs (*par ordre chronologique*)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Braun 2021 Allemagne	μ-FTIR-ATR	N=2, 100 % positifs, présence qualitative Pas de quantification	PE, PP, PS Tailles : > 50 μm Formes : fragments
Zhang 2021 USA	LC-MS/MS	N=3, 2 positifs pour PET et 1 positif pour PC Concentration (en matière sèche): - PET : 12 000 et 3 200 ng/g - PC : 110 ng/g	Ciblage indirect : PET (TPA) et PC (BPA) Taille/Forme : non applicables
Li 2023 Chine	μ-FTIR-ATR	N=16, (21 non analysables par faible quantité) Aucun polymère détecté ≥10 μm (limite de détection)	—
Liu 2023a Chine	LD-IR (20–500 μm)	N=6, 100 % positifs Quantité : Médiane MPs totaux 54,1 (IQR 28,1–77,8) part./g A noter : selles nourrissons N=12 Médiane MPs totaux 26,6 (IQR 14,3–131,1) part./g	16 polymères : PA (60% des MPs totaux), PU (20%), PE, PET, PP, PVC, POM, EVA, PTFE, CPE, Polybutadiène, PC, PS, PMMA, PLA, Polysulfones Tailles : 20–50 μm (> 74 %), le reste > 50 μm Formes : granules et fragments
Liu 2023b Chine	LD-IR (20–500 μm)	N=12, 100 % positifs Quantité : Médiane MPs totaux = 51,4 (IQR 28,1–77,8) part./g	16 polymères : PA et PU (> 78 % des MPs totaux), PE, PET, PP, PVC, POM, EVA, PTFE, CPE, Polybutadiène, PC, PS, PMMA, PLA, Polysulfones Tailles : 20–50 μm (~76 %), le reste > 50 μm Formes : NR
Zhu 2024 Chine	Raman MS	N=9 dyades, 100 % positifs Quantité : Médiane = 20,75 part./g (IQR 6,75–65,27) Corrélation abondance de MPs entre cordon et méconium : r = -0,26, p<0,01	14 polymères : PE (39 %), Blend (33 %), PCL (7,5 %), CEL (6 %) Autres identifiés : PB, PI, PA, PVA, PET, PNB, PVS, etc ... Tailles : 63,6–638,7 μm (~80 % entre 100–400 μm) Formes : fragments Abondance inter-matrice : Méconium > Placenta > Sang de cordon
Li 2025 Chine	Py-GC/MS	N=60, 100% positifs Polymères présents entre 51,67 % à 71,67 % des éch. Concentration : variable selon les polymères Plage totale de détection : $1,6 \times 10^{-5}$ – $1,53 \times 10^3$ μg/g	PE (le plus abondant) > PVC > ABS > PET > PS > PP > PC > PMMA Taille et formes : non évaluables

- Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; μ-FTIR-ATR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode réflexion totale atténuée ; LC-MS/MS : chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; Py-GC/MS : pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse ; NS : non significatif ; NR : non rapporté ; IQR : intervalle interquartile ; éch. : échantillon.

- Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), EVA (éthylène-acétate de vinyle), ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène), PTFE (polytétrafluoroéthylène), CPE (polyéthylène chloré), PCL (polycaprolactone), PLA (poly(acide lactique)), POM (polyoxyméthylène), PB (polybutadiène), PNB (poly(n-butadiène)), CEL (cellulose), PI (polyimide), PVA (alcool polyvinylique), PVS (polyvinylsiloxane).

- Les résultats précisent, pour chaque étude, la méthode d'analyse utilisée, la proportion d'échantillons positifs, les niveaux mesurés (en particules ou en microgrammes par gramme), la distribution granulométrique, la taille et la forme des particules observées et les polymères identifiés et les corrélations (Pearson) intermatrices éventuelles.

Tableau XIII. Synthèse des niveaux d'imprégnation du lait maternel en MNPs (par ordre chronologique)

Réf.	Analyse	Détection et Niveaux (Quantité / Concentration)	Polymères détectés
Ragusa 2022b Italie	Raman MS	N=34, 76,5 % positifs Quantité : 48 MPs au total ~1,7 ± 0,9 part./g	11 polymères : PE (38 %), PVC (21 %), PP (17 %), autres (<10 %) : PVOH, PEVA, PEMA, ABS, PE, PA, PC, PS Tailles : 2–12 µm (29 % ≤ 3 µm ; 47 % 4–9 µm ; 24 % ≥ 10 µm) Formes : fragments (91 %), sphères (9 %)
Liu 2023a Chine	LD-IR (20–500 µm)	N=7, 100 % positifs Quantité : Médiane MPs totaux 20 (IQR 3,8–37,1) part./g A noter : lait infantile N=5 Médiane MPs totaux 17,3 (IQR 17–20,8) part./g	16 polymères : PA (> 50% des MPs totaux), PU, PE, PET, PP, PVC, POM, EVA, PTFE, CPE, Polybutadiène, PC, PS, PMMA, PLA, Polysulfones Tailles : 20–50 µm (> 74 %), le reste > 50 µm Formes : granules et fragments
Saraluck 2024 Thaïlande	Raman MS + MO	N=59, 38,98 % positifs Quantité : 38 MPs au total ~0,135 part./g*	PVC, PP, PS, puis nylon, PET, PE Tailles : NR Formes : fragments (~80 %), sphères (~20 %)
Arshad 2024 Pakistan	MO + µ-FTIR-ATR	N=23, 100% positifs - 15 consommatrices de fruits de mer (BMSF) - 8 non consommatrices (BMSH) Quantité : BMSF = 276 MPs, BMSH = 49 MPs Min – Max : p = 0,001 - BMSF = 0,66 à 3,43 part./g - BMSH = 0,26 à 1,32 part./g	BMSF : PE (28 %), PVC (20 %), PP (16 %) BMSH : PE (25 %), PVC (15 %), PP (15 %) Autres : CPE, acétate de vinyle (PEVA), PES, PS, nitrate de cellulose (NC), PC Tailles moyennes dominantes : 5–18 µm Formes : - BMSF : fibres (55%), granules (42%), fragments (3%) - BMSH : fibres (61%), granules (33%), fragments (6%)

- Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; MO : microscopie optique ; µ-FTIR-ATR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode réflexion totale atténuée ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; IQR : intervalle interquartile ; ET : écart type ; NS : non significatif ; NR : non rapporté.

- Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), PC (polycarbonate), PMMA (polyméthacrylate de méthyle), EVA / PEVA (éthylène-acétate de vinyle), CPE (polyéthylène chloré), ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène), PTFE (polytétrafluoroéthylène), POM (polyoxyméthylène), PLA (poly(acide lactique)), PVOH (alcool polyvinylique), PES (polysulfone), NC (nitrate de cellulose).

- Les données présentées indiquent, pour chaque étude, la méthode analytique utilisée, la proportion d'échantillons positifs, la quantité moyenne ou médiane (en particules ou en µg/g), la distribution des tailles, la morphologie des particules (fragments, fibres, sphères ou granules) et les polymères identifiés.

*valeur estimée d'après données du tableau 2 de l'article

Principaux insights : l'analyse de ces matrices permet de dégager des tendances et des différences résumés dans le tableau XIV. Les niveaux d'imprégnation les plus élevés étaient observés dans le méconium, suivi du placenta et du lait maternel, puis du LA, du sang de cordon et enfin des selles maternelles. Les particules détectées mesuraient majoritairement 10 à 400 µm, les selles maternelles contenant les plus gros polymères. Les fragments représentaient la forme prédominante. Les polymères récurrents étaient le PE, le PP, le PVC, le PET, le PA et le PU, avec des proportions variables selon les techniques analytiques, et dont voici différentes sources : emballages et contenants alimentaires, fibres synthétiques provenant des textiles, produits d'hygiène et cosmétiques, matériel médical et d'autres sources industrielles comme les revêtements ou les mousses isolantes

La détection de MNPs dans le sang maternel, le sang de cordon, le placenta et le LA montre que ces particules (jusqu'à 400 µm) peuvent franchir la barrière placentaire et atteindre le compartiment fœtal. Cela signifie que le fœtus est exposé *in utero* à ces polluants, dès les premières étapes du développement.

Tableau XIV. Caractéristiques globales des MPs dans les différentes matrices biologiques

Matrice	Positivité	Niveaux	Tailles (µm)	Polymères	Formes
Placenta	40–100 %	1–15 part./g 100–250 µg/g	10–100	PE, PP, PVC, PET, PA, PU	Fragments Fibres
Liquide amniotique	80–100 %	2–5 part./g	20–100	PE, PP, PA, PU, PVC, PET	Fragments Fibres
Sang de cordon	56–100 %	1–3 part./g	20–400	PA, PU, PP, PE	Fragments
Méconium	~100 %	20–54 part./g Jusqu'à $1,5 \times 10^3$ µg/g	20–50 (LD-IR) 100–400 (Raman)	PA, PU, PE, PP, PVC, PS, PET	Fragments Granules
Lait maternel	39–100 %	0,1–20 part./g	2–50	PE, PP, PVC, PA, PU	Fragments Granules
Sang maternel	100 %	~8 part./g	20–100	PA, PU, PE, PP	NR
Selles maternelles	100 %	~0,5 part./g	200–4900	PA, PET, HDPE, PVC	Films Fragments Fibres

Abréviations : MPs : microplastiques ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; Raman : spectroscopie Raman micro-spectroscopique.

Abréviations des polymères : PE (polyéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène), PVC (polychlorure de vinyle), PET (polyéthylène téréphtalate), PA (polyamide), PU (polyuréthane), HDPE (polyéthylène haute densité).

- Les valeurs indiquent les taux de positivité, les niveaux moyens ou médians (exprimées en particules par gramme ou en microgrammes par gramme), les plages de taille observées, les polymères dominants et les formes rapportées. Ces données synthétisent les tendances générales observées dans les matrices biologiques humaines (placenta, liquide amniotique, sang de cordon, méconium, lait et selles maternelles).

II.2.2. Déterminants des imprégnations prénatales

Ainsi, l'ensemble des résultats précédents met en évidence une présence ubiquitaire de MPs dans les matrices périnatales. La section suivante s'intéresse aux facteurs associés aux niveaux d'imprégnation, en explorant quelques déterminants environnementaux, comportementaux et biologiques susceptibles d'influencer la charge en MPs dans ces matrices.

a) Déterminants de l'imprégnation placentaire

Les déterminants associés à la charge placentaire en MPs ont été explorés dans neuf études (103,105,112,115,119,121,125,126). Dans l'étude de Zhang (2024) (N = 45, 15 HAIG et 30 témoins), les concentrations de MPs étaient positivement corrélées à des habitudes d'exposition rapportées autour de la grossesse (coefficients de corrélation ou de régression non rapportés, $p < 0,05$) (105) :

- usage de bouteilles plastiques, couverts plastiques et plats à emporter pour le PE,
- consommation de plats à emporter pour le PC,
- et, pour l'ensemble des MPs, utilisation fréquente de bouteilles, couverts et contenants en plastique.

L'analyse univariée a retrouvé des associations significatives entre la concentration en MPs et plusieurs déterminants domestiques, alimentaires ou professionnels liés à l'exposition :

- consommation d'eau en bouteille plastique (OR = 4,9 ; IC95 % 1,30–18,73),
- utilisation de couverts plastiques (OR = 5,69 ; IC95 % 1,32–24,54),
- alimentation dans des plats en plastique jetables à emporter (OR = 7,6 ; IC95 % 1,86–30,71),
- réchauffage d'aliments dans des contenants plastiques (OR = 7,5 ; IC95 % 1,83–30,73),
- consommation de produits de la mer pendant grossesse (OR = 1,44 ; IC95 % 1,02–2,05),
- exposition professionnelle (OR = 4,38 ; IC95 % 1,08–17,68),
- fréquence de maquillage avant grossesse (OR = 2,51 ; IC95 % 1,22–5,18),

- usage de cosmétiques nacrés : fard à paupières (OR = 25,4 ; IC95 % 2,71–237,57) et rouge à lèvres nacré (OR = 12,3 ; IC95 % 2,11–70,99).
- fréquence totale d'expositions avant grossesse (OR = 1,45 ; IC95 % 1,07–1,95),
- fréquence totale d'expositions pendant grossesse (OR = 2,34 ; IC95 % 1,42–3,83).

Ces résultats indiquent des associations parfois très fortes mais avec des IC95% très larges liés aux faibles effectifs (N = 45). L'analyse multivariée sans ajustement sur les variables cliniques, ne retrouve plus d'ailleurs ces associations. Mais compte tenu de la force des associations en univariées, ces résultats peuvent être dû à un effectif faible et méritent une attention forte pour les futures recherches avec des échantillons plus larges.

L'étude de Amerreh (2022) a montré, par une régression logistique univariée (pas de modèle multivarié mentionné), que certaines habitudes de vie étaient associées à une charge placentaire plus élevée [\(103\)](#) :

- consommation d'eau en bouteille versus eau du robinet bouillie (OR = 18,0 ; IC95 % 1,61–200,83 ; p = 0,01),
- consommation fréquente de plats à emporter versus cuisine maison (OR = 6,7 ; IC95 % 1,34–33,59 ; p = 0,02).
- tendance non significative observée pour le travail hors domicile (OR = 3,35 ; p = 0,142).

Dans l'étude de Liu (2023a), les femmes rapportant une consommation d'eau quotidienne ≥ 2000 mL/jour et celles utilisant fréquemment des produits de gommage ou des dentifrices exfoliants présentaient une charge placentaire plus élevée (respectivement p = 0,038 et p = 0,005) (115). En revanche, la consommation d'eau du robinet, l'usage de gobelets ou de bouteilles en plastique, ainsi que la consommation de boissons en bouteilles plastiques n'étaient pas significativement associés aux niveaux de MPs placentaires.

Contrairement aux travaux de Sun (2024), les études de Yun (2024) et Zurub (2024) n'avaient mis en évidence aucune différence significative entre les caractéristiques maternelles ou néonatales — telles que l'âge maternel, l'IMC et le sexe du nouveau-né, ou la voie

d'accouchement — et les paramètres liés à l'imprégnation en MPs, qu'il s'agisse de la quantité totale de particules, du type de polymère détecté ou de la répartition régionale des polymères placentaires [\(121,125\)](#). Sur le plan environnemental, l'étude longitudinale de Weingrill (2023) menée sur X femmes enceintes habitant à Hawaï, rapportait une évolution significative en 2006, 2013 puis 2021 du taux de positivité en termes de MNPs dans les placentas (60%, 90% puis 100% respectivement) et une augmentation de la quantité moyenne de MNPS exprimée en part./50g de placenta – moyenne $\pm$ ET ($4,1 \pm 1,3$ puis $7,1 \pm 0,9$ puis $15,5 \pm 3,0$ respectivement). Ces paramètres étaient significativement augmentés entre 2006 et 2021 ($p < 0,001$) [\(126\)](#). Les auteurs l'expliquent par l'essor global de la production et de la pollution plastique, associé à la vulnérabilité des populations côtières d'Hawaï exposées aux débris marins, à une forte consommation de produits emballés et à l'introduction de nouveaux polymères dans l'environnement. Ces observations invitent à s'interroger sur l'évolution des imprégnations périnatales dans les années à venir, en l'absence de politiques efficaces de réduction des MNPs à la source et de changements notables des expositions individuelles.

Enfin, l'étude de Ragusa (2022a), bien que non comparative, avait montré une présence intracellulaire des MPs dans plusieurs types cellulaires et décrit des altérations ultrastructurales du réticulum endoplasmique et des mitochondries, sans différence selon la voie d'accouchement ni le sexe fœtal. Les auteurs attribuent ces altérations cellulaires à un stress du réticulum endoplasmique et mitochondrial inhabituel pour des placentas à terme, en soulignant le caractère exploratoire et non comparatif de l'étude. Il faut ajouter que l'effectif est faible ($N = 10$) limitant l'interprétation, et que d'autres facteurs environnementaux, périnataux ou métaboliques (co-polluants, variabilité interindividuelle) pourraient contribuer à ces altérations.

b) Déterminants de l'imprégnation du liquide amniotique

Les déterminants associés à la présence de MPs dans le LA ont été explorés dans 2 études (8,119). Les concentrations de MPs dans le LA étaient corrélées positivement et significativement chez les femmes consommatrices de fruits de mer ($r = 0,781$; $p < 0,001$) et

chez celles buvant de l'eau embouteillée ($r = 0,386$; $p = 0,014$). L'abondance de MPs totaux dans le LA était positivement associée à l'âge maternel ($r = 0,64$; $p = 0,025$) et à l'IMC pré-grossesse ($r = 0,59$; $p = 0,049$).

c) Déterminant de l'imprégnation du méconium

Une seule étude a exploré les déterminants de la charge en MPs dans le méconium, celle de Zhu (2024), dans laquelle la consommation de thé ≥ 3 fois/semaine pendant la grossesse était associée à une abondance plus faible de MPs dans le méconium ($p = 0,048$) (117). Ce résultat est inattendu et contraire aux travaux antérieurs; plusieurs hypothèses sont envisagées : possible dépôt des MPs dans le tartre de l'eau bouillie, effet digestif du thé favorisant leur élimination, les "buveurs de thé" qui pourraient avoir un profil particulier avec des comportements protecteurs vis-à-vis des exposition aux MNPs (par exemple, une exposition plus importantes en MNPs par la libération de nylon par le sachet de thé chauffé mais compensée par l'utilisation plus importante de contenant en verre pour le stockage). Par ailleurs, les modalités d'usage du thé ne sont pas précisées (chauffage de l'eau, achat en vrac vs sachets, infusion à travers métal ou sachet en nylon). D'autres facteurs tels que la consommation d'eau, l'utilisation de contenants plastiques, l'exposition au tabac ou la fréquence de consommation de fruits n'étaient pas associés.

d) Déterminant de l'imprégnation du lait maternel

Les déterminants dans le lait maternel ont été explorés dans trois études (57,93,110). Dans l'étude de Saraluck (2024), la détection de MPs était moins fréquente chez les mères présentant de bonnes pratiques d'hygiène : lavage des mains après l'allaitement (83,3 % vs 30,4 %, $p < 0,001$), lavage des mains régulier (88,9 % vs 52,2 %, $p = 0,002$) ou utilisation d'un produit dédié au lavage des sous-vêtements mère/bébé (72,2 % vs 17,4 %, $p < 0,001$) (93).

En revanche, l'étude a montré huit comportements significativement plus fréquents dans le groupe présence de MPs ($N = 23$) versus absence de MPs ($N = 36$) ($p < 0,05$) : contact cutané et inhalation maternel avec des produits chimiques, utilisation fréquente d'emballage

plastique alimentaire, consommation de fruits de mer, prise de compléments pour stimuler la lactation, consommation d'eau en bouteille plastique, consommation fréquente d'eau du robinet, usage fréquent de paille en plastique, cuisson au micro-onde dans des contenants en plastique. L'association entre le lavage des mains après l'allaitement et l'absence de MPs semble davantage refléter un effet de confusion comportemental qu'une association directe. Ce geste constitue probablement un indicateur d'un environnement domestique plus propre et moins exposé aux plastiques (mesures d'hygiène adaptées, plus haut niveau de précaution, littératie en santé plus élevé).

L'étude de Ragusa (2022b) constitue la première détection confirmée de MPs dans le lait maternel cependant, aucune association significative n'a été observée entre la présence ou la quantité de MPs et l'âge maternel, la consommation de produits de la mer, l'usage de cosmétiques, la consommation d'eau en bouteille ou d'aliments emballés (57).

Enfin, dans l'étude de Arshad (2024), tous les échantillons de lait contenaient des MPs, avec des niveaux significativement plus élevés chez les consommatrices de produits de la mer (0,66 – 3,43 part./g) que chez les non-consommatrices (0,26 – 1,32 part./g, $p < 0,05$) (110).

Tableaux XV. Déterminants modulant l'imprégnation des matrices périnatales

Augmentation des niveaux de MPs	Diminution des niveaux de MPs
Placenta	
• Consommation d'eau en bouteille plastique • Plats à emporter et aliments en barquettes plastiques • Réchauffage d'aliments dans des contenants plastiques • Usage de cosmétiques nacrés • Consommation d'eau ≥ 2000 mL/jour • Usage fréquent de produits exfoliants gommants ou dentifrices	
Liquide amniotique	
• Consommation de fruits de mer • Consommation d'eau embouteillée • Âge maternel élevé • IMC pré-grossesse élevé	
Méconium	
• Corrélation positive entre charge placentaire et méconium • PA plus abondant dans le méconium que dans le placenta	• Consommation de thé ≥ 3 fois/semaine
Lait maternel	
• Contact cutané avec produits chimiques • Utilisation fréquente d'emballages plastiques alimentaires • Consommation de fruits de mer • Prise de compléments de lactation • Consommation d'eau en bouteille ou du robinet • Usage de pailles en plastique • Cuisson au micro-ondes dans des contenants plastiques	• Bonnes pratiques d'hygiène post-partum : - Lavage des mains après l'allaitement - Lavage régulier des mains - Utilisation d'un produit de lavage spécifique pour sous-vêtements mère/bébé

Abréviations : MPs : microplastiques ; PA : polyamide ; IMC : indice de masse corporelle.

En conclusion, des déterminants pouvant moduler l'imprégnation à la hausse sont assez bien identifiés : la consommation d'eau en bouteille, les plats à emporter ou réchauffés dans des contenants plastiques, l'usage de cosmétiques exfoliants ou nacrés, la prise de compléments de lactation, la consommation de fruits de mer, ainsi qu'un âge maternel ou un IMC pré-grossesse élevés ; par contre ceux qui la modulent à la baisse sont moins nombreux (tableaux XV). De futures recherches observationnelles devraient inclure des données sur les "causes des causes", c'est-à-dire les conditions de vie, les contextes sociaux et psychologiques susceptibles d'influencer ces comportements et les expositions qui en résultent. Enfin, des études contrôlées randomisées devraient être envisagées afin d'identifier plus largement les cibles comportementales et l'efficacité des changements de comportement à réduire les imprégnations maternelles et foetales.

II.2.3. Associations entre niveaux d'imprégnation et effets clinico-biologiques

Si les expositions maternelles apparaissent comme déterminantes pour expliquer l'imprégnation prénatale, leurs conséquences biologiques et cliniques demeurent encore peu documentées. Six catégories d'effets ont pu être identifiées : les altérations de la fonction placentaire et issues maternelles et néonatales (103–105,107,111,112,125), la prématurité (8,9), les altérations de la fonction hépatique foetale (106), les perturbations de la fonction endocrinienne (108,109), les complications de l'allaitement (93) et les altérations du microbiote méconial, placentaire ou lacté (93,127).

a) Microplastiques, fonction placentaire, issues maternelles et néonatales

Les sept études concernées ont exploré les liens entre l'imprégnation placentaire en MPs et la fonction placentaire, à travers plusieurs approches : l'hypertension artérielle induite de grossesse (HAIG), les paramètres néonataux notamment le retard de croissance intra-utérin (RCIU), les fausses couches spontanées à répétition (FCSR) et la longueur télomérique des cellules du placenta et du sang de cordon ([103–105,107,112,119,125](#)). L'étude cas-témoins de Zhang (2024) a examiné les concentrations de MPs dans le tissu de cordon ombilical et leurs associations avec l'HAIG ([105](#)). L'échantillon comprenait 45 dyades mère-enfant, dont 15 cas d'HAIG et 30 témoins. Les échantillons provenaient de l'extrémité foetale du cordon (≥ 8 cm) et étaient accompagnés d'un questionnaire sur les habitudes d'exposition aux plastiques. Les concentrations totales de MPs, ainsi que celles de PE et de PC, étaient significativement plus élevées dans le groupe HAIG – moyenne $\pm$ ET ($120,7 \pm 56,3$ mg/kg vs $82,4 \pm 41,4$ mg/kg, $p < 0,05$). Dans ce groupe, les auteurs rapportent des corrélations significatives entre la charge en MPs et certaines issues néonatales par un modèle univarié (coefficients de corrélation estimés visuellement) : un score d'Apgar plus bas à 1 et 5 minutes (respectivement moyenne $\pm$ ET : $7,3 \pm 2,5$ et $9,3 \pm 1$ vs 9 et 10 ± 0 ; $r = -0,40$; $p < 0,05$), une augmentation des nausées et vomissements maternels ($r = +0,40$; $p < 0,05$) et une mortalité néonatale accrue (13% groupe HAIG vs 0% groupe témoin ; $r = +0,50$; $p < 0,05$). La concentration en PVC était corrélée

négativement à la taille néonatale ($r = -0,15$, $p < 0,05$). L'analyse des corrélations n'a été faite que par un modèle univarié c'est pourquoi il est difficile de conclure à l'association des MPs notamment pour le score d'Apgar, la mortalité néonatale et la taille néonatale puisque ces variables sont dépendantes des complications de l'HAIG telle que la pré-éclampsie.

Concernant le modèle multivarié (sans ajustement sur des variables cliniques) a identifié les concentrations en MPs (totaux, PE et PC) comme facteurs prédictifs indépendants de l'apparition d'une HAIG :

- PE (OR = 7,5 ; IC95 % 1,83–30,73),
- PC (OR = 12,2 ; IC95 % 2,11–70,99),
- Total MPs (OR = 25,4 ; IC95 % 2,53–254,51).

L'étude cas-témoins d'Amereh (2022) a inclus 43 femmes enceintes, dont 13 grossesses compliquées de RCIU et 30 grossesses normales. Les corrélations, uniquement en univarié entre la charge placentaire en MPs et les paramètres néonataux étaient significatives (103) :

- **poids de naissance** ($r = -0,82$; $p < 0,001$),
- **taille de naissance** ($r = -0,56$; $p < 0,001$),
- **périmètre crânien** ($r = -0,50$; $p = 0,001$),
- **score d'Apgar à 1 minute** ($r = -0,75$; $p < 0,001$).

Cependant, l'absence d'analyse de ces corrélations par sous-groupe ne permet pas d'exclure une influence du RCIU sur ces paramètres. Les auteurs reconnaissent eux-mêmes cette limite et appellent à la prudence, en soulignant la nécessité d'études à plus large échelle et de modèles ajustés pour confirmer une potentielle association.

L'étude cas-témoins de Wan (2024) a inclus 36 femmes, dont 18 présentant des fausses couches spontanées à répétition inexpliquées (FCSR) et 18 témoins (104). Des PS ont été détectés dans les villosités choriales de 100 % des femmes FCSR, avec des **charges médianes dix fois plus élevées** que chez les témoins (2,09 vs 0,23 mg/kg ; $p < 0,0001$). La régression logistique univariée indiquait une association significative entre la concentration en

PS et la survenue de FCSR (OR = 34 ; IC95 % [3,61–320] ; $p < 0,01$). L'analyse *Receiver Operating Characteristic* (ROC – servant à mesurer la capacité d'un test ou d'une variable continue à discriminer correctement deux états cliniques) montrait une excellente discrimination (air sous la courbe – AUC = 0,899).

L'étude de Zhang (2025a) a inclus 1 121 femmes enceintes, et a examiné la relation entre la charge placentaire en MPs et la longueur télomérique (TL) dans le placenta et le sang de cordon. Après ajustement sur l'âge maternel, l'IMC pré-gestationnel, l'AG à la naissance, la parité, le sexe du nourrisson, le revenu et l'exposition tabagique (107), une association significative était mise en évidence entre la charge en MPs et la TL :

- dans le sang de cordon : $\beta = -0,14$ [IC95 % : $-0,22$; $-0,06$] ($p < 0,001$),
- dans le placenta : $\beta = -0,13$ ($p < 0,001$).

Les polymères tels que le PVC ($\beta = -0,16$; $p = 0,003$), le PBS ($\beta = -0,13$; $p = 0,01$) et le PP ($\beta = -0,12$; $p = 0,01$), étaient spécifiquement associés à un raccourcissement télomérique significatif. L'analyse par *generalized computation algorithm* (g-computation – servant à estimer l'effet combiné d'une augmentation globale de la charge placentaire en MPs selon une relation linéaire) a confirmé que l'exposition cumulée aux MPs totaux (PVC, PP, PBS) était associée à une diminution significative de la longueur des télomères. Ainsi, la TL diminuait de 0,14 unités pour chaque quartile d'augmentation de la charge totale en MPs ($\beta = -0,14$; IC95 % $-0,22$; $-0,06$). Le modèle *Bayesian Kernel Machine Regression* (BKMR – servant à estimer la relation dose-réponse entre la charge totale en MPs et la variable à expliquer, donc pas nécessairement par une relation linéaire) a précisé la relation dose-réponse :

- la TL tendait à être légèrement plus longue à faibles concentrations de MPs,
- puis à diminuer nettement pour des taux de MPs plus élevés, le PBS contribuant le plus fortement à cette réduction.

Ces résultats épidémiologiques ont été corroborés par les données histologiques et cellulaires : Ragusa (2022a) a décrit, pour la première fois, la localisation de MPs au sein du

syncytiotrophoblaste, du cytotrophoblaste, des péricytes et des cellules endothéliales (112). Ceux-ci étaient observées à la fois dans les espaces intra- et extracellulaires, logées dans les lysosomes, vacuoles, peroxysomes, gouttelettes lipidiques et corps multivésiculaires, ainsi que dans le stroma intervilloux. Des altérations ultrastructurales étaient rapportées : dilatation du réticulum endoplasmique, mitochondries gonflées ou pycnotiques. Ces observations évoquaient un stress cellulaire placentaire pouvant compromettre les échanges métaboliques.

À l'inverse, l'étude de Yun (2024) (N = 50 placentas) n'avait trouvé aucune association significative entre les fréquences relatives placentaires en PTFE (30%) ou en PS (12%), et l'AG, le poids ou la taille néonatale (125). Par ailleurs, l'examen histologique du placenta ne montrait aucune différence morphologique. Ces résultats pourraient s'expliquer par la petite taille d'échantillon, qui limite la puissance statistique : groupe "Normal" : placentas sans MPs détectés (N = 19), groupe PS (N = 6), groupe PTFE (N = 15). Le protocole, conçu pour éviter toute contamination plastique, garantit la fiabilité des mesures mais peut aussi sous-estimer la charge réelle en particules, notamment pour les plus petites tailles non détectées par la microspectroscopie Raman ($\sim 0,25 \mu\text{m}$). Le fait que seuls deux polymères aient été analysés (PS et PTFE) réduit également la portée des conclusions, d'autant que d'autres plastiques comme l'ABS, le PC, le PP, le PE et le PVC étaient détectés. De plus, l'examen histologique standard ne permettait pas de détecter d'éventuelles altérations ultrastructurales placentaires (stress oxydant, inflammation, perturbations vasculaires ou moléculaires). Enfin, pour cette étude, les biais ont été évalués comme modérés du fait de l'absence d'ajustement avec un niveau de preuve jugé modéré. Ces éléments expliquent que les résultats, bien que négatifs, ne puissent être interprétés comme une absence d'effet réel.

De manière concordante, l'étude de Tian (2025), portant sur le LA (N = 48), n'a mis en évidence aucune association significative entre la présence ou le type de polymère détecté et les issues obstétricales ou néonatales (AG, poids, taille et sexe du nouveau-né) (111). Le protocole, d'une rigueur méthodologique élevée — collecte réalisée en salle ISO Classe 5,

utilisation exclusive de matériel en verre précombusté et inclusion de séries de blancs négatifs — confère une fiabilité élevée aux détections. Toutefois, comme dans l'étude précédente, il pourrait sous-estimer la charge réelle en particules, notamment celles de taille nanométrique, non détectables en raison de la limite instrumentale de la microspectroscopie Raman (~0,25 µm). L'analyse statistique renforce la valeur descriptive de cette étude par rapport à celle de Yun *et al.* (2024), puisqu'elle a pris en compte l'ensemble des six polymères identifiés. Néanmoins, la taille d'échantillon limitée ($n = 48$) réduit la puissance statistique. Les biais ont été jugés modérés, en raison notamment de l'absence d'ajustement sur les co-variables potentielles, conduisant à un niveau de preuve globalement modéré. On peut ainsi considérer fiables les résultats concernant la détection de MPs dans le LA, mais pour ce qui est de l'absence d'association, des études longitudinales plus larges sont nécessaires.

Principaux insights : les données disponibles suggèrent que l'imprégnation placentaire en MPs pourrait être associée à des altérations structurelles et fonctionnelles du placenta ainsi qu'à certaines issues obstétricales et néonatales défavorables. Des signaux répétés indiquent un lien possible entre niveau de MPs placentaire et RCIU, HAIG ou risque accru de FCSR inexplicée. Sur le plan histologique, les atteintes des mitochondries et du réticulum endoplasmique, font suspecter un stress cellulaire trophoblastique. Cependant, d'autres travaux n'ont retrouvé aucune différence sur les issues cliniques ou histologiques, rappelant les limites méthodologiques actuelles, la variabilité des protocoles d'analyse inter-études et l'absence d'étude longitudinale prospective, seule à même d'étudier l'inférence causale. Dans l'état actuel des connaissances, la littérature converge vers l'hypothèse d'une interaction possible entre exposition placentaire et fonction physiologique du placenta, mais les preuves demeurent insuffisantes pour conclure à un effet clinique direct.

b) Microplastiques et prématurité

Deux études observationnelles récentes ont exploré le lien entre la charge en MPs dans le placenta ou le LA et la prématurité [\(8,9\)](#). L'étude cas-témoins nichée dans la biobanque prospective monocentrique (Houston – Texas) PériBank menée par Jochum (2025) a inclus 158 femmes enceintes, dont 71 accouchements prématurés et 87 à terme, appariées sur le sexe fœtal, l'ethnie, la voie d'accouchement et la viabilité néonatale [\(9\)](#). Les analyses portaient sur les placentas par un protocole sans plastique (cité mais non détaillé) et utilisaient des données cliniques extraites du dossier obstétrical. Les concentrations placentaires totales en MPs étaient en moyenne 28 % plus élevées dans le groupe des naissances prématurées (concentration moyenne $\pm$ ET en $\mu\text{g/g}$: $224,7 \pm 180,7$ vs $175,5 \pm 137,9$). Certains polymères présentaient des élévations encore plus marquées : PVC +17 %, PET +113 %, PU +157 %, PC +46 % et ABS +42 % dans le groupe des naissances prématurées. Les corrélations univariées entre concentration en MPs et AG étaient significatives et négatives pour le PU ($r = -0,39$; $p < 0,001$), le PET ($r = -0,37$; $p < 0,001$) et le PC ($r = -0,16$; $p = 0,04$), tandis que l'ABS montrait une corrélation positive ($r = +0,21$; $p = 0,01$). Aucune corrélation n'était observée pour la charge totale en MPs ($p = 0,15$). Concernant le poids de naissance, une corrélation négative a été retrouvée pour le PU ($r = -0,35$; $p = 0,001$) et le PC ($r = -0,14$; $p = 0,048$). Les analyses multivariées ajustées sur la prééclampsie, l'HAIG, le score d'Apgar, le type de travail maternel, l'origine ethnique et les polymères ayant une colinéarité $>85\%$ (PVC, PC, PP, ABS) ont identifié le PVC et le PC comme facteurs prédictifs indépendants de la prématurité, avec un odds ratio ajusté (aOR) $> 6,9$ (IC 95% 1.5–30) (leur toxicité potentielle est biologiquement plausible : le PVC libère des phtalates et le PC relargue du bisphénol A, deux composés perturbateurs endocriniens). À l'inverse, l'ABS présentait un effet protecteur (aOR $< 0,23$; IC 95% 0.06–0.7). D'après les auteurs, l'ABS, retrouvé dans les plastiques rigides (coques de téléphones portables) montre ces résultats du fait d'une exposition prolongée par la grossesse à terme.

L'étude de Xue (2024) a complété ces résultats en explorant les liens entre la charge en MPs dans le LA et l'AG de naissance (8). Quarante femmes enceintes ont été incluses lors d'une césarienne programmée avec membranes intactes. Les MPs détectés dans le LA, majoritairement des PE et CPE de 20 à 100 μm , présentaient une relation linéaire inverse avec l'AG : **chaque augmentation d'une part./g de MPs dans le LA était associée à une réduction de 0,44 jour de gestation** (β ajusté = $-0,441$; IC95 % [$-0,826$; $-0,055$]) dans le modèle ajusté sur l'âge maternel, la parité, l'IMC, la consommation d'alcool, l'exposition tabagique, le niveau d'éducation et le sexe de l'enfant. L'association avec le poids de naissance n'était pas significative après ajustement sur l'AG en plus des co-variables précédentes, bien qu'une tendance négative ait été observée ($\beta = -11,67$ g ; $p = 0,43$).

Ces deux études se distinguent par une fiabilité analytique élevée et un contrôle rigoureux des contaminations. L'étude de Jochum (2025), avec son niveau de preuve jugé modéré de par sa standardisation méthodologique et sa puissance statistique, renforce la confiance dans les associations observées entre concentration placentaire en MPs et prématurité, malgré un design transversal. L'étude de Xue (2024), bien que menée sur un effectif plus restreint ($N = 40$), repose sur un protocole sans plastique rigoureux et statistiquement ajusté, conférant un niveau de preuve fort à la corrélation négative observée entre la charge en MPs du LA et l'AG.

Principaux insights : ces deux études complémentaires (placenta et LA), mettent en évidence des associations convergentes entre la charge en MPs et la prématurité. Leur rigueur méthodologique et analytique confèrent à ces résultats une crédibilité particulière au sein d'un champ encore naissant. Bien que des études supplémentaires soient nécessaires pour confirmer ces résultats et préciser la dynamique temporelle de cette association, la concordance de ces signaux dans deux matrices périnatales distinctes constitue un indicateur préoccupant. Elle justifie la mise en place urgente d'études longitudinales multicentriques afin d'évaluer l'impact de l'imprégnation materno-fœtale en MNPs, en particulier en NPs sur le risque de prématurité et, plus largement, sur les issues obstétricales et néonatales précoces.

c) Microplastiques et fonction hépatique foetale

L'étude observationnelle transversale descriptive de Wang (2025) a exploré l'association entre la charge placentaire en MPs et la fonction hépatique fœtale, évaluée à partir des enzymes sériques mesurées dans le sang de cordon à la naissance [\(106\)](#). L'échantillon incluait 1 057 dyades mère–enfant. Dix grammes de tissu placentaire étaient prélevés pour l'analyse des MPs, tandis que 5 mL de sang de cordon servaient au dosage des enzymes hépatiques : phosphatase alcaline (PAL), alanine aminotransférase (ALAT), aspartate aminotransférase (ASAT) et gamma-glutamyl-transférase (GGT). Les niveaux médians de MPs placentaires ont été corrélés aux taux d'enzymes fœtales par régression linéaire multiple, ajustée sur l'âge maternel, l'IMC pré-gestationnel, le sexe de l'enfant, la parité, le terme de naissance, le niveau d'éducation, le revenu familial et l'exposition tabagique maternelle. **Une augmentation d'un quartile de MPs totaux pour 10 g de placenta était associée à une élévation moyenne de 20,7 UI/L de PAL** ($\beta = 20,74$; IC95 % [0,36–41,13] ; $p = 0,05$), **de 7,1 UI/L d'ASAT** ($\beta = 7,09$; [3,88–10,30] ; $p < 0,001$) **et de 27,7 UI/L de GGT** ($\beta = 27,67$; [11,05–44,28] ; $p < 0,01$). L'étude rapportait aussi une tendance à l'augmentation de l'ALAT ($\beta = 0,94$; [0,15–1,72] ; $p = 0,053$).

Certaines associations spécifiques à des polymères ont été identifiées :

- le PVC augmente la PAL,
- le PP augmente l'ALAT et la GGT,
- le PBS augmente l'ASAT.

L'analyse par modèles de mélanges (*g-computation* et *BKMR*) confirmait ces tendances, avec des relations dose-réponse positives entre la charge totale en MPs et les trois principaux biomarqueurs (PAL, ASAT, GGT).

Principaux insights : une augmentation d'un quartile (8 part./10g) de MPs totaux pour 10 g de placenta était associée à une élévation combinée d'environ 30 UI/L des PAL, 7 UI/L des ASAT et 23 UI/L des GGT. Il s'agit donc d'une relation dose-réponse qui plaide en faveur d'une association causale.

d) Microplastiques et fonction endocrinienne foetale

Deux études observationnelles transversales descriptives ont évalué les associations entre l'imprégnation placentaire en MPs et les altérations hormonales fœtales dans le sang de cordon (108,109). L'étude de Liu (2025) a inclus 1 324 dyades mère-enfant et exploré la relation entre la charge en MPs et les taux hormonaux, incluant le cortisol, la cortisone, la déhydroépiandrostérone (DHEA), l'androstènedione et leurs rapports (cortisol/DHEA et glucocorticoïdes/androgènes) (109). Les analyses multivariées ont été ajustées sur l'âge maternel, l'IMC pré-gestationnel, la parité, le sexe du nourrisson, l'âge gestationnel à la naissance, le niveau d'éducation, le revenu familial et l'exposition tabagique. Les résultats de la régression linéaire multiple montrent que les MPs totaux et les 3 polymères analysés (PVC, PBS et PP) étaient significativement associés à des modifications du profil hormonal fœtal :

- ↓ **cortisol** : $\beta = -1,59$ (PVC), $\beta = -1,93$ (PBS), β MPs totaux = $-2,20$ ($p < 0,01$) ;
- ↓ **cortisone** : $\beta = -3,50$ (PVC), $\beta = -4,52$ (PP), β MPs totaux = -5.05 ($p < 0,01$) ;
- ↑ **DHEA** : $\beta = 0,08$ (PBS), β MPs totaux = $\beta 0.07$ ($p < 0,01$) ;

- ↑ **androstènedione** : $\beta = 0,01$ (PVC, $p = 0,04$; PBS, $p = 0,01$), β MPs totaux = 0.01 ($p < 0,01$) ;
- ↓ **rapports cortisol/DHEA et glucocorticoïde/androgène** : tous les MPs ($p < 0,01$) ;
- rapport cortisol/cortisone : inchangé.

Dans le modèle de *g-computation*, une augmentation d'un quartile de MPs totaux était associée à :

- ↓ **cortisol** ($\beta = -2,83$; IC95 % $[-4,01 ; -1,66]$; $p < 0,01$) ;
- ↓ **cortisone** ($\beta = -5,61$; $[-7,51 ; -3,72]$; $p < 0,01$) ;
- ↑ **DHEA** ($\beta = 0,10$; $[0,05 ; 0,15]$; $p < 0,01$) ;
- ↑ **androstènedione** ($\beta = 0,01$; $[0,00 ; 0,02]$; $p < 0,01$) ;
- rapport cortisol/cortisone : NS.

Le modèle BKMR a confirmé une relation dose-dépendante non linéaire, avec une diminution progressive du cortisol et de la cortisone à mesure que la charge en MPs augmentait (effet marqué au-delà du 50e percentile), et une augmentation parallèle du DHEA et de l'androstènedione. Les rapports cortisol/DHEA et glucocorticoïde/androgène diminuaient significativement ($\beta = -2,13$ et $\beta = -5,20$; $p < 0,01$). L'analyse stratifiée selon le sexe du nourrisson a mis en évidence des tendances différentes : les effets glucocorticoïdes étaient plus marqués chez les garçons, tandis que les perturbations androgéniques et les rapports hormonaux étaient plus altérés chez les filles. Les auteurs attribuent les altérations observées à plusieurs mécanismes concomitants : stress oxydant et inflammation placentaire qui pourrait perturber l'activité de l'enzyme 11 β -HSD2, interférence des MPs et de leurs additifs (BPA, phtalates) avec les récepteurs hormonaux (glucocorticoïdes et androgènes) et les enzymes stéroïdogènes (CYP11A1, CYP17A1, CYP19A1), modifications épigénétiques et altération des transporteurs hormonaux placentaires pouvant déséquilibrer la régulation de ces axes.

L'étude de Zhang (2025b) a porté sur 1 057 dyades mère-enfant issues de la même série chinoise, et a examiné l'association entre la charge en MPs et les hormones thyroïdiennes

foétales (TSH, T3, T4 et ratio T4/T3) (108). Les analyses ont été ajustées sur les mêmes covariables (âge maternel, IMC, parité, sexe du nourrisson, tabagisme, statut socio-économique). Les résultats de la régression linéaire multiple indiquent une altération significative du profil thyroïdien néonatal, proportionnelle à la charge en MPs totaux et aux polymères PVC, PP et PBS :

- ↓ **TSH par PVC, PP, PBS et MPs totaux** = $-4,65$ [IC95 % : $-6,16$; $-3,14$] ($p < 0,01$),
- ↓ **T4 par PVC, PP, PBS et MPs totaux** = $-2,18$ [$-3,08$; $-1,27$] ; ($p < 0,01$),
- ↓ **ratio T4/T3 par PVC, PP et MPs totaux** = $-8,92$ [$-12,32$; $-5,46$] ($p < 0,01$),
- ↑ **T3 légère par PP** = $+0,05$ [$0,01-0,10$] ($p = 0,03$).

Le modèle de g-computation a confirmé une diminution significative de la T4, de la TSH et du ratio T4/T3. Le modèle BKMR a mis en évidence une relation dose-dépendante : la T4 et le ratio T4/T3 diminuaient progressivement avec la charge en MPs, tandis que la TSH montrait une hausse modérée à faibles expositions puis une baisse aux concentrations plus élevées. Les auteurs attribuent ces altérations à plusieurs mécanismes concomitants : stress oxydant et inflammation placentaire, interférence avec le transport de l'iode et des hormones thyroïdiennes, effets perturbateurs endocriniens (BPA, phtalates) sur la synthèse et la signalisation thyroïdienne, et possibles modifications épigénétiques altérant la régulation de l'axe thyroïdien fœtal.

Principaux insights : ces deux études convergent vers une dysrégulation endocrinienne fœtale multiaxiale associée à la charge placentaire en certains MPs. D'une part, par un déséquilibre du métabolisme stéroïdogène (↓ glucocorticoïdes, ↑ androgènes), suggérant une atteinte de la signalisation du stress et de la maturation fœtale. D'autre part, par une altération de la fonction thyroïdienne (↓ T4, ↓ TSH, ↓ T4/T3), pouvant affecter la croissance et le développement neurologique.

e) Microplastiques et complications de l'allaitement

Une étude observationnelle descriptive transversale a exploré la présence de MPs dans le lait maternel et leurs éventuelles associations avec les complications de l'allaitement. L'étude multicentrique de Saraluck (2024) a été conduite auprès de 59 femmes allaitantes, recueillant leur lait entre le premier et le troisième jour post-partum (93). La présence de MPs était associée à une fréquence significativement plus élevée de complications d'allaitement par un modèle non ajusté (OR non rapportés) : **mastite** (21,7 % vs 0 %, $p = 0,003$), **engorgement mammaire** (47,8 % vs 11,1 %, $p = 0,002$) et **hypogalactie** (21,7 % vs 0 %, $p = 0,003$). Les différences observées pour l'obstruction des canaux galactophores (21,7 % vs 9,3 %) et les abcès mammaires (8,7 % vs 0 %) n'étaient pas significatives.

Principaux insights : Les premiers résultats suggèrent que la présence de certains MPs dans le lait maternel pourrait être positivement associée aux mastites, aux engorgements mammaires et aux hypogalacties. Bien que ces observations nécessitent d'être confirmées par des études de plus grande ampleur intégrant des analyses multivariées, elles soulèvent la question du rôle potentiel de l'exposition aux MNPs dans l'initiation et le maintien de l'allaitement maternel jusqu'aux 6 mois du nourrisson, comme le recommande l'OMS.

f) Microplastiques et microbiote périnatal

Deux études ont exploré les liens entre MPs et la composition du microbiote dans le placenta, le méconium et le lait maternel. L'étude de Liu (2023b) a combiné la quantification des MPs dans le placenta et le méconium à une analyse métagénomique par séquençage 16S rRNA. D'abord, les profils bactériens différaient bien entre les deux matrices, tant par la présence/absence d'espèces ($p = 0,001$) que par leur abondance ($p = 0,002$), gage d'une bonne différenciation des matrices. La charge en PA ($p = 0,006$) et en MPs totaux ($p = 0,009$)

était significativement plus élevée dans le méconium que dans le placenta. D'autre part, les corrélations entre charge en MPs et diversité microbienne révélait plusieurs tendances.

- le PS était négativement corrélé à l'indice de diversité Chao1 du **microbiote méconial** ($p < 0,05$), indiquant une diminution de la richesse bactérienne et suggérant une dysbiose précoce de l'intestin néonatal ;
- le PE présentait des corrélations négatives avec plusieurs genres du **microbiote placentaire**, dont *Ruminococcus* et *Neisseria* considérés comme commensaux, bénéfiques par leur implication dans la production de métabolites protecteurs) ;
- à l'inverse, le PA et le PU étaient positivement corrélés à des genres dominants du **microbiote méconial**, tels que *Escherichia-Shigella*, *Treponema* et *Streptococcus* (germes opportunistes principalement d'origine maternelle) ce qui pourrait favoriser la prolifération de bactéries potentiellement pathogènes et participer à la mise en place d'une dysbiose méconiale, avec un risque théorique d'inflammation ou de susceptibilité infectieuse accrue après la naissance.

L'analyse du microbiote lacté de Saraluck (2024) a mis en évidence un profil différencié selon la présence de MPs : dominance de bactéries Gram + (principalement *Staphylococcus* et *Streptococcus*) pour les laits contaminés, contre Gram – (*Enterobacter*, *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*) pour les laits dans lesquels aucun MPs n'avait été détecté ($p < 0,05$). Les MPs pourraient favoriser l'adhésion et la croissance des bactéries Gram+ via des interactions avec leur paroi plus épaisse et leur capacité à former des biofilms. Ces modifications pourraient participer à une dysbiose lactée et potentiellement une dysbiose intestinale chez le nourrisson par l'allaitement.

Principaux insights : Les données disponibles suggèrent que la présence de MPs pourrait induire une dysbiose placentaire, méconiale et lactée, avec une diminution de la richesse bactérienne et une sélection d'espèces opportunistes (notamment Gram +).

II.2.4. Évaluation du reporting, des biais et du niveau de preuve

Cette section évalue la qualité méthodologique des études incluses, à travers l'analyse de leur conformité aux recommandations STROBE, de leur risque de biais (grille ROBINS-E), de l'équilibre des résultats rapportés et du niveau de preuve attribué (tableau XVI).

a) Qualité du reporting

L'évaluation de la qualité du reporting montrait une bonne conformité globale des études incluses, avec une médiane de 19 items rapportés sur 22 (soit environ 86 % de conformité). L'étendue variait de 15,5 à 21,5 items, indiquant un bon reporting global. Plus de 90 % des études (27 sur 30) respectaient au moins trois quarts des critères STROBE, et deux tiers atteignaient une couverture supérieure à 80 %. Les scores les plus élevés étaient observés dans les travaux récents, notamment ceux publiés à partir de 2023, qui bénéficiaient de protocoles analytiques mieux standardisés et de sections méthodologiques plus détaillées. Les items les mieux documentés concernaient la description des objectifs, la population étudiée, les méthodes analytiques et la présentation des résultats principaux, souvent accompagnés d'une discussion des limites. À l'inverse, les faiblesses récurrentes portaient sur la description et le contrôle des biais potentiels, la justification de la taille d'échantillon, la gestion des données manquantes et l'explicitation des analyses de sensibilité.

Voici les études avec un reporting supérieur à 20/22 : Jochum (2025), Li (2023), Liu 2025 et Zhang (2025b) (9,108,109,116).

b) Risque de biais

L'évaluation du risque de biais mettait en évidence un niveau global modéré à élevé. Vingt études ont été évaluées avec un risque de biais "modéré" (9,57,76,93,103–109,111,112,116,117,119,121,122,125,126), et neuf présentaient au moins un domaine évalué comme "sérieux" ou "critique" (110,113–115,118,120,123,124,127). Seule

l'étude de Xue (2024) présentait un biais considéré comme "faible" de part l'ajustement de ses analyses et une méthodologie rigoureuse (8).

Les principaux biais étaient :

- biais de sélection, en raison de tailles d'échantillon restreintes, d'un recrutement souvent monocentrique et d'un manque de représentativité des populations incluses limitant la validité externe des résultats,
- biais de confusion, lié à l'absence d'ajustement multivarié notamment sur d'autres facteurs environnementaux, liés à la fois à l'exposition et à l'outcome étudié.,
- et biais de mesure, découlant de la taille d'échantillon restreinte, de l'hétérogénéité des méthodes analytiques, de l'absence de calibration inter-laboratoires et de la non-prise en compte des NPs, dont la détection reste techniquement limitée.

c) Équilibre des résultats

Parmi les trente études incluses, vingt-cinq avaient évalué une association entre la charge en MPs et au moins un paramètre clinique, biologique ou environnemental. Parmi celles-ci, dix-neuf (76 %) rapportaient au moins une association statistiquement significative ([8,9,93,103–110,115,120,123,126,127](#)), quatre (16 %) présentaient des résultats mixtes ([105,112,117,119](#)), et cinq (20 %) n'identifiaient aucune relation significative ([57,76,111,121,125](#)). Cette répartition indique une prépondérance de signaux positifs, tout en soulignant que plus d'un tiers des études n'ont pas retrouvé d'association claire, renforçant la nécessité d'une interprétation prudente.

d) Niveau de preuve global

L'évaluation du niveau de preuve global montrait dix-sept études (57 %) à niveau de preuve modéré (9,76,93,103–109,111,116,117,119,121,125,126). Sept études (23 %) présentaient un niveau faible (57,115,118,120,123,124,127), en raison d'un risque de biais élevé, d'un effectif restreint ou d'un manque d'ajustement statistique. Cinq études (17 %) étaient

classées à très faible niveau de preuve, principalement parmi les travaux exploratoires antérieurs à 2022 telles que les études de Ragusa (2021 et 2022a), Braun (2021) mais aussi celles de Arshad (2024) et Li (2025) devant un reporting moyen et un sérieux risque de biais (110,112–114,122). Seule l'étude de Xue (2024) atteignait un niveau de preuve fort (8).

Principaux insights : la qualité du reporting était jugée excellente. Seules 3 études présentaient un reporting inférieur à 16,5/22 (75 %) et tout de même supérieur à 11/22 (50%) dont une en 2024 et une en 2025. Ceci permet d'attester le respect des recommandations *STROBE* par les auteurs.

Le risque de biais était dans l'ensemble jugé modéré à élevé.

Même si les associations positives demeurent majoritaires, la cohérence des tendances observées permet de considérer cet ensemble de résultats comme globalement convergent mais encore exploratoire surtout concernant les associations de l'imprégnation sur les outcomes de santé. Par la même occasion, ces résultats font suspecter un biais de publication.

Le niveau de preuve des études sur l'imprégnation, ses déterminants et son association avec les outcomes de santé est encore globalement modéré, notamment du fait de l'absence de contrôle sur le risque de biais, par des échantillons à la fois petits et non comparables, et par l'absence d'ajustement sur les co-variables environnementales et les facteurs de confusion. Globalement, les études dont les résultats sont les plus solides sont : Jochum (2025), Zhang (2025a,b), Liu (2025), Wang (2025), Zhang (2024), Saraluck (2024), Wan (2024), Xue (2024) et Amereh (2022) (8,9,93,103–109).

Tableau XVI. Evaluation qualitative du niveau de preuve des études sur les MNPs en santé périnatale

Référence	Reporting	Biais	Équilibre des résultats	NVP
Ragusa 2021 (Italie) (4)	16,5	Modéré	Résultats positifs partiels, discutés avec prudence, présentation transparente incluant échantillons négatifs Interprétation limitée par faible effectif et prédominance de pigments non polymériques (composés chimiques minéraux ou organiques)	Très faible
Braun 2021 (Allemagne) (130)	17	Critique	Résultats descriptifs uniquement, sans analyse statistique Discussion limitée à la faisabilité technique	Très faible
Zhang 2021 (USA) (120)	16,5	Sérieux	Résultats significatifs pour PET et PC présentés avec prudence et limites reconnues (faible n, risque de contamination); Équilibre satisfaisant entre signaux détectés et précautions interprétatives	Faible
Ragusa 2022a (Italie) (112)	15,5	Modéré	Résultats qualitatifs positifs (100 %) mais prudence dans l'interprétation Discussion centrée sur les mécanismes possibles de translocation, reconnaissance des limites analytiques	Très faible
Ragusa 2022b (Italie) (57)	17,5	Modéré	Résultats non significatifs pour les associations comportementales, présentation équilibrée et transparente; discussion honnête sur les limites méthodologiques et l'absence d'effet	Faible
Amereh 2022 (Iran) (103)	20	Modéré	Résultats significatifs (RCIU ↔ charge MPs) présentés de manière équilibrée Analyses univariées cohérentes, pas de multivariée, limites analytiques reconnues et discussion nuancée	Modéré
Weingrill 2023 (USA) (126)	19,5	Modéré	Résultats descriptifs discutés de façon équilibrée; reconnaissance du faible n et des limites analytiques	Modéré
Halfar 2023 (Tchéquie) (118)	20	Sérieux	Résultats cohérents, positifs dans 80–100 % des cas; présentation claire et discussion prudente, reconnaissant le n faible	Faible
Zhu 2023 (Chine) (76)	17,5	Modéré	Résultats entièrement positifs (100 % des placentas), clairement rapportés; interprétation prudente, sans corrélation avec les variables maternelles	Modéré
Li 2023 (Chine) (116)	21,5	Modéré	Résultats négatifs, avec quantification claire et limites reconnues (échantillon restreint, biais de récupération – rendement moyen de récupération de 66% pour des tailles de 200 µm)	Modéré
Liu 2023a (Chine) (115)	20	Sérieux	Résultats cohérents entre matrices, corrélations significatives discutées sans sur-interprétation	Faible
Liu 2023b (Chine) (127)	20	Sérieux	Résultats descriptifs positifs; discussion nuancée intégrant le rôle du microbiote	Faible
Zhu 2024 (Chine) (117)	19,5	Modéré	Résultats positifs pour toutes les matrices, corrélations détaillées et prudentes; faible n reconnu, portée exploratoire assumée.	Modéré
Zurub 2024 (Canada) (121)	20	Modéré	Résultats entièrement positifs pour l'imprégnation, clairement exposés; analyse rigoureuse et discussion contextualisée	Modéré
Yun 2024 (Chine) (125)	19	Modéré	Résultats mixtes (62 % positifs) et absence d'association avec les outcomes de santé; auteurs prudents sur les risques de contamination et les limites techniques à l'origine d'un biais de mesure	Modéré

Référence	Reporting	Biais	Équilibre des résultats	NVP
Garcia 2024 (USA) (124)	18	Sérieux	Résultats quantitatifs cohérents, transparents et rigoureusement présentés; limites méthodologiques reconnues	Faible
Wan 2024 (Chine) (104)	18,5	Modéré	Résultats positifs (100 % des échantillons); discussion rigoureuse et cohérente, limites reconnues	Modéré
Xue 2024 (Chine) (8)	19,5	Faible	Résultats significatifs avec modèles ajustés, rapportés avec prudence; discussion centrée sur les limites analytiques et la taille d'échantillon	Fort
Sun 2024 (Chine) (119)	19	Modéré	Résultats homogènes entre matrices, absence de différence inter-matrice clairement signalée; modèles ajustés interprétés avec prudence	Modéré
Hasanah 2024 (Indonésie) (123)	19	Sérieux	Résultats positifs cohérents avec une exposition digestive; discussion prudente et reconnaissance des limites	Faible
Saraluck 2024 (Thaïlande) (93)	19,5	Modéré	Résultats mixtes (38,9 % positifs) et positifs en univarié pour les outcomes de santé et déterminants de l'exposition; discussion équilibrée, interprétation prudente des associations comportementales	Modéré
Arshad 2024 (Pakistan) (110)	15,5	Sérieux	Résultats positifs et cohérents (consommation de fruits de mer ↔ charge accrue); discussion prudente, limites de puissance reconnues	Très faible
Zhang 2024 (Chine) (105)	18,5	Modéré	Résultats positifs en univarié, prudence analytique en multivarié; discussion équilibrée et transparente	Modéré
Li 2025 (Chine) (113)	15,5	Sérieux	Résultats positifs, cohérents et détaillés, limites de généralisation reconnues; discussion méthodologique complète	Très faible
Tian 2025 (Chine) (111)	17	Modéré	Résultats positifs pour l'imprégnation, cohérents entre matrices et méthodes; résultats négatif pour l'association à des outcomes de santé, discussion claire, prudente et rigoureuse	Modéré
Wang 2025 (Chine) (106)	20	Modéré	Résultats positifs homogènes et robustes, interprétés sans surévaluation; discussion méthodologique complète	Modéré
Liu 2025 (Chine) (109)	20,5	Modéré	Résultats positifs et robustes; associations biologiques discutées avec prudence	Modéré
Zhang 2025a (Chine) (107)	17,5	Modéré	Résultats positifs et robustes; discussion prudente et contextualisée	Modéré
Zhang 2025b (Chine) (108)	21	Modéré	Résultats positifs, associations endocriniennes cohérentes; discussion complète et équilibrée	Modéré
Jochum 2025 (USA) (9)	21	Modéré	Résultats positifs, associations robustes; discussion claire sur les limites du design transversal et les ajustements statistiques	Modéré

Abréviations : MNPs : micro- et nanoplastiques ; NVP : niveau de preuve ; RCIU : retard de croissance intra-utérin.

L'évaluation du reporting a été faite selon une grille de 22 critères inspirés des recommandations STROBE (Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology). Le risque de biais est estimé selon les critères du protocole ROBINS-E (Risk Of Bias In Non-randomized Studies – of Exposures).

PARTIE 3 - DISCUSSION ET PERSPECTIVES

I. SYNTHÈSE GÉNÉRALE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les trente études incluses dans cette revue étaient toutes observationnelles, majoritairement transversales et essentiellement monocentriques, avec des effectifs allant de 2 à 1324, complétées par quatre études cas-témoins (nombre de cas allant de 36 à 158) ayant exploré les liens entre l'imprégnation en MPs et certaines issues périnatales telles que le RCIU, la prématurité, l'HAIG ou les FCSR inexpliquées. Les travaux provenaient majoritairement d'Asie (16 études / 30), en particulier de Chine, où ont été menées les séries les plus larges (N allant de 1059 à 1324), tandis que l'Europe et le continent américain (USA et Canada) totalisaient quatre études chacun avec des effectifs allant de 6 à 158.

Les matrices biologiques les plus fréquemment étudiées étaient le placenta (21 études), le méconium (7 études), le liquide amniotique (4 études), le lait maternel (4 études) et, plus rarement, le sang de cordon, le sang maternel et les selles maternelles. Dans l'ensemble, la présence ubiquitaire de MPs dans les matrices fœtomaternelles est désormais bien établie. Les niveaux d'imprégnation rapportés variaient selon la matrice et la méthode d'analyse : de 1 à 15 part./g pour le placenta, 2 à 5 part./g pour le LA, 20 à 50 part./g pour le méconium et jusqu'à 20 part./g pour le lait maternel. Les polymères les plus fréquents étaient le PE, le PP, le PVC, le PET, le PA et le PU, sous forme principale de fragments, de taille allant de 10 à 400 µm. Aucune étude d'imprégnation en NPs n'est actuellement disponible chez la femme enceinte et le nouveau-né.

Les études apportent des éléments convergents sur deux aspects complémentaires : *les déterminants de l'imprégnation prénatale et ses effets biologiques et cliniques potentiels*. Sur le plan de l'exposition, plusieurs travaux ont identifié des facteurs comportementaux et environnementaux associés à une imprégnation accrue en MPs. Les comportements les plus fréquemment corrélés à une charge élevée de MPs incluaient la consommation d'eau embouteillée, l'usage de contenants et d'emballages plastiques pour les repas surtout lorsqu'ils

sont réchauffés, la consommation de plats à emporter, ainsi que la consommation de produits de la mer. Certains déterminants spécifiques étaient également rapportés, tels que l'usage de cosmétiques contenant des microbilles (fards, exfoliants, dentifrices). À l'inverse, des facteurs semblaient associés à une moindre exposition, comme les pratiques d'hygiène après la naissance (lavage des mains, entretien du linge mère-bébé sans détergent). Ces associations restaient toutefois principalement issues d'analyses univariées, sur de faibles échantillons, rarement confirmées après ajustement multivarié. Des études à plus large échelle sont donc attendues.

S'agissant de la prématurité, les résultats observés dans deux études indépendantes constituent un signal cohérent et préoccupant. Le fait que cette association soit retrouvée dans deux matrices distinctes — le placenta et le LA — renforce sa plausibilité biologique. Ces données suggèrent que l'imprégnation materno-fœtale en MPs pourrait faire partie des facteurs environnementaux émergents impliqués dans le déclenchement du travail prématuré. par différents biais comme des voies d'action hormonale, inflammatoire, ou par altération du microbiote qui pourrait induire une susceptibilité à la rupture prématurée des membranes et à l'infection intra-utérine. Ces travaux doivent donc être considérés comme un point d'alerte, invitant à la mise en place d'études longitudinales de plus grande ampleur afin de déterminer si cette relation observée est fortuite, marqueur d'exposition cumulative ou véritable facteur de risque périnatal.

D'autres études ont mis en évidence des associations significatives entre une charge placentaire élevée et la survenue de complications obstétricales telles que le RCIU, l'HAIG ou les FCSR inexplicables. Des corrélations négatives ont également été rapportées entre les niveaux de MPs dans le placenta et divers paramètres néonataux (poids, taille, périmètre crânien, score d'Apgar). Cependant, deux études à effectif limité dont l'objectif principal était d'étudier l'imprégnation, n'ont retrouvé aucune association entre la charge en MPs et les paramètres obstétricaux, néonataux ou histologiques.

Concernant l'allaitement, l'imprégnation est associée à plus de mastites, plus d'engorgements mammaires et à plus d'hypogalacties. Cependant ces associations ont été mises en évidence par des analyses univariées, parfois non significatives lors d'utilisation de modèles multivariés qui, d'ailleurs, n'ont pas ajusté sur les variables cliniques potentiellement confondantes notamment le RCIU ou l'HAIG compliquée. De plus, les niveaux de preuve pour les études ayant montré ces associations ont été jugé modéré justement du fait d'un manque d'ajustement sur des variables cliniques ou environnementales, en plus d'effectifs faibles limitant la puissance statistique.

L'ensemble de ces résultats sur les outcomes de santé sont donc des signaux importants à considérer compte tenu de la gravité des outcomes périnataux concernés et des implications pour le bon déroulement et le maintien de l'allaitement maternel. Ils méritent d'être confirmés dans des études longitudinales à plus large échelle et avec des analyses multivariées.

Sur le plan mécanistique, plusieurs travaux plaident en faveur d'une relation causale liant les imprégnations en MPs et les outcomes de santé en apportant une plausibilité biologique aux différentes associations identifiées. Ainsi, certaines études reposant sur un niveau de preuve modéré ont mis en évidence des corrélations entre imprégnation et :

- (i) un raccourcissement télomérique (ce qui implique un retentissement sur la longévité cellulaire et le bon développement placentaire et foetal),
- (ii) des altérations des axes corticostéroïdien et thyroïdien (impliquant une effet perturbateur endocrinien),
- (iii) des perturbations hépatiques foetales qui perturbent les processus métaboliques et hépato-biliaires

D'autres résultats avec un niveau de preuve très faible à modéré indiquent des corrélations entre imprégnation et :

- (iv) des anomalies histologiques liées au stress oxydant,

(v) des modifications du microbiote lacté par les MPs avec apparition de biofilms Gram+ pouvant favoriser par exemple les mastites et les abcès mammaires.

Les données disponibles présentent une cohérence forte quant à la présence systématique de MNPs dans les matrices périnatales, mais la quantification précise et l'impact biologique de cette exposition demeurent incertaines. L'hétérogénéité des résultats s'explique essentiellement par les différences de protocoles de prélèvement et d'analyse (type de filtres, seuils de détection, techniques spectroscopiques), mais aussi par l'absence de normalisation des unités de mesure entre études. Aucune étude n'a à ce jour évalué la fraction nanométrique des plastiques, aux propriétés toxicologiques plus pertinentes, dont la détection reste techniquement complexe, ce qui sous-estime probablement l'exposition réelle et ses effets potentiels. Les travaux les plus récents, intégrant des approches analytiques combinées et des modèles ajustés, ont néanmoins permis d'améliorer la comparabilité inter-études, inter-matrices et la fiabilité des données (106–109).

Malgré leur nombre encore restreint, les études humaines sur les MNPs en période périnatale constituent une avancée scientifique majeure. Elles ont permis de franchir un cap entre les approches purement expérimentales, les recherches évaluant l'imprégnation, et la recherche clinique, ouvrant la voie à l'exploration de l'exposition aux MNPs dans un contexte humain réel à plus large échelle.

La totalité des études recensées ont été publiées après 2020, ce qui souligne leur caractère émergent. Elles ont fourni les premières preuves directes de la présence de MPs dans des matrices périnatales humaines et démontré la faisabilité de leur détection. Les études fondatrices, comme celles de Ragusa *et al.*, ont joué un rôle catalyseur pour la communauté scientifique en posant les premiers jalons de la recherche clinique sur les MNPs (57,112,122).

Ces études se distinguent par une diversification rapide des outils de détection et des approches analytiques. Elles ont mobilisé des techniques de pointe telles que la microspectroscopie Raman et FTIR, la Py-GC/MS, la MET ou l'EDS. Tous les travaux ont

également intégré des protocoles de prévention de la contamination plastique, incluant l'usage d'instruments dans la mesure du possible sans plastique (verre, métal), la filtration des réactifs et la réalisation de blancs procéduraux et environnementaux. L'évolution vers des approches semi-quantitatives, exprimant les résultats en part./g ou en $\mu\text{g/g}$, renforce la comparabilité inter-études et marque une étape clé vers une standardisation des mesures.

Concernant les voies d'exposition, hormis la mention "manière d'entrer en contact avec un produit chimique : Inhalation" dans l'étude de Saraluck (2024), cette voie d'exposition n'est pas évaluée dans les déterminants pouvant moduler l'imprégnation des matrices. Pourtant, celle-ci est à considérer au même titre que l'ingestion ou le contact cutané et devra être prise en compte dans les futures études (Figure 3) (63). En effet, nous passons plus de 80% de notre temps dans l'environnement intérieur (domicile, lieu de travail, transport). Les concentrations en MPs dans les poussières intérieures sont 5 à 10 fois plus élevées que dans celles de l'environnement extérieur d'après la méta-analyse de 124 études de O'Brien *et al.* 2023 (Figure 4) (132).

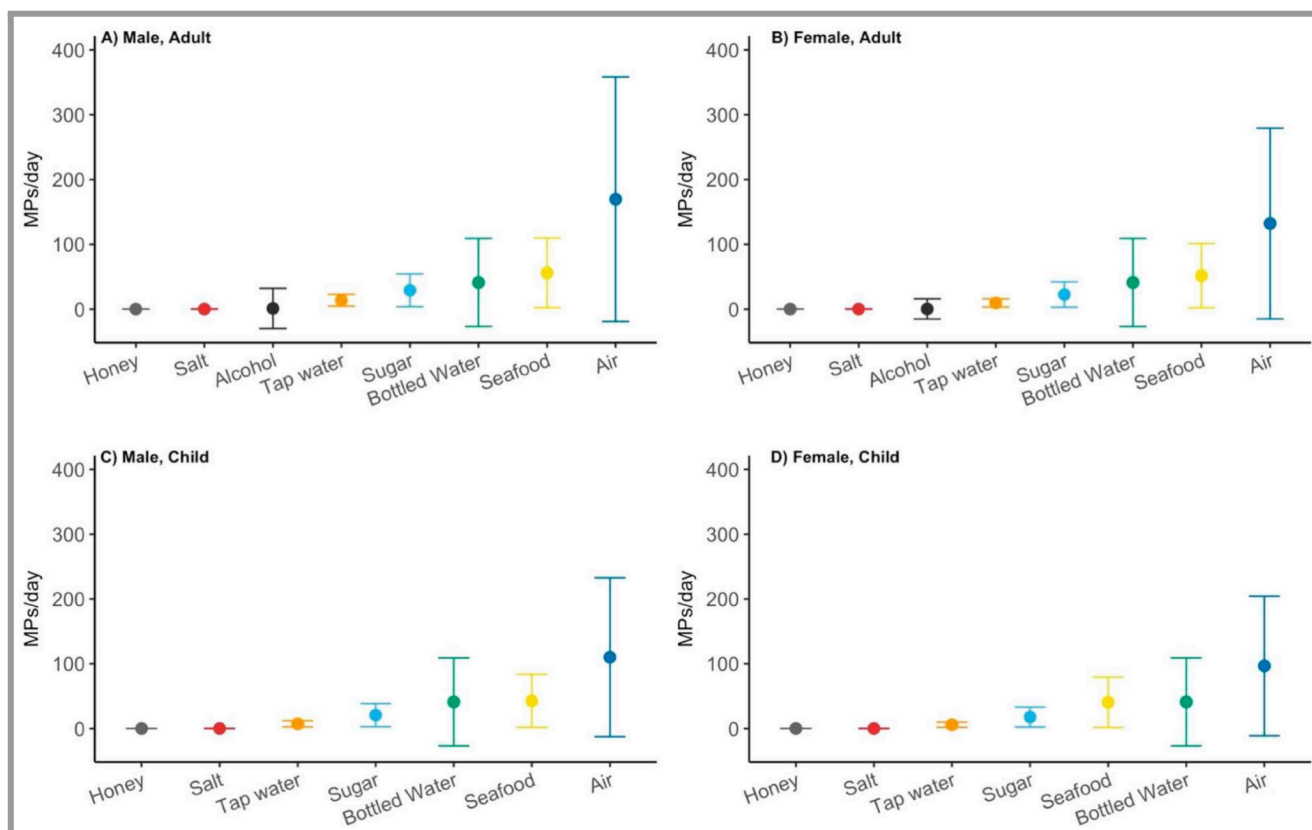


Figure 3 : Quantité de MPs absorbée par jour dans différentes denrées alimentaires et via l'air chez l'homme, la femme, la garçon et la fille (63).

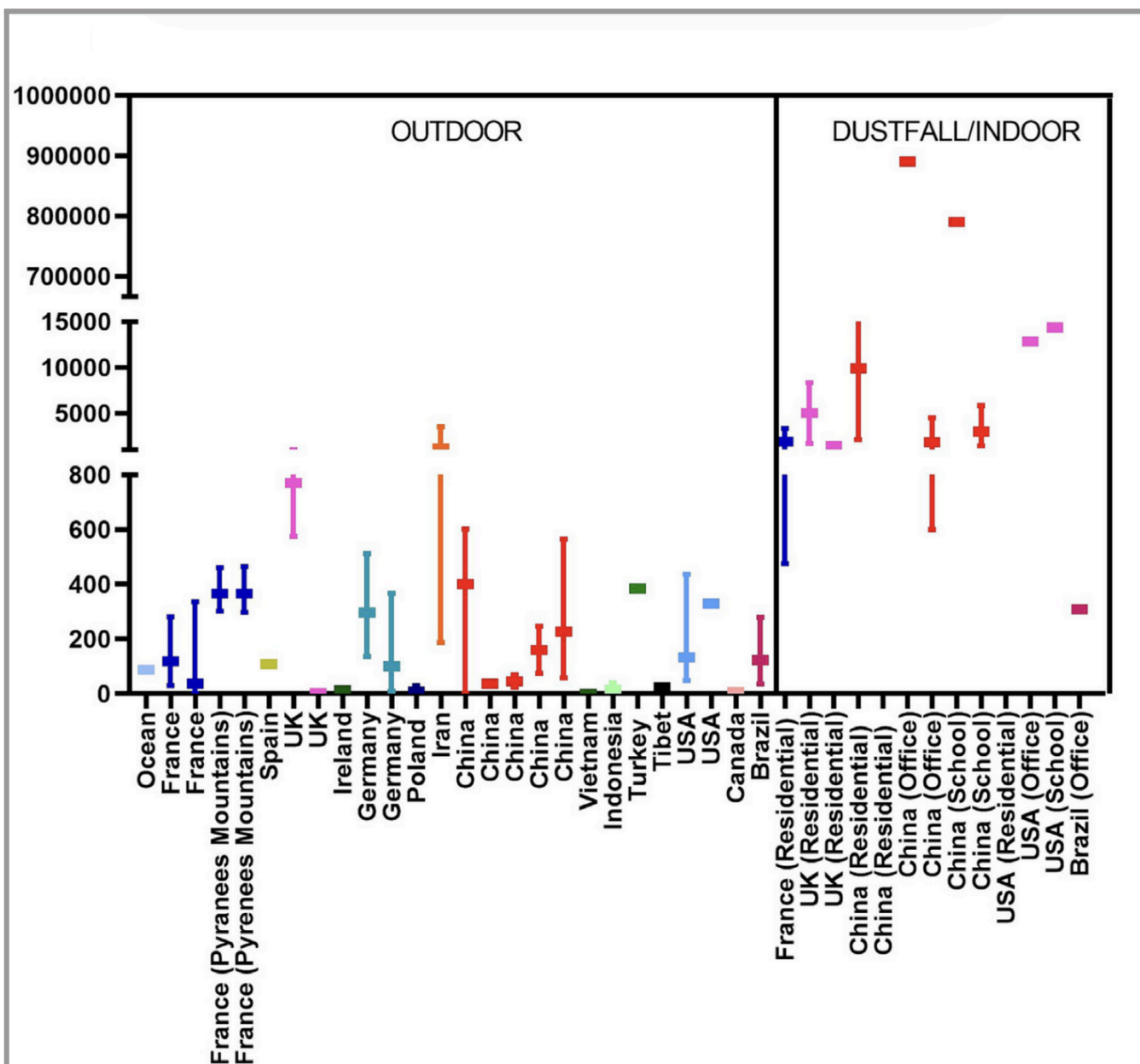


Figure 4 : Concentration de MPs déposés/m²/jour dans l'environnement intérieur et extérieur (132).

Le modèle périnatal présente un intérêt unique en santé environnementale, en raison de la vulnérabilité accrue de la mère et du fœtus pendant cette période critique du développement. L'analyse de matrices comme le placenta, le LA, le sang de cordon ou le lait maternel offre un accès privilégié à la transmission materno-fœtale des MNPs et à leur bioaccumulation potentielle. Ces études s'inscrivent dans le concept de DOHaD, selon lequel les expositions précoces opèrent une reprogrammation développementale qui conditionne la santé ultérieure de l'enfant puis de l'adulte (5–7). Elles permettent de relier des niveaux d'exposition en conditions réelles à des indicateurs cliniques et biologiques tangibles tels que la croissance

foetale, les complications de grossesse ou la composition du microbiote néonatal. Toutefois, à ce jour, aucune étude n'a évalué les effets à plus long terme des expositions précoces aux MPs sur la santé du nourrisson, de l'enfant, de l'adolescent ou de l'adulte, laissant entière la question de leurs conséquences développementales et fonctionnelles ultérieures.

Les travaux humains viennent compléter les observations issues des modèles animaux. Ils montrent que les phénomènes observés chez les rongeurs — passage transplacentaire, accumulation tissulaire, réponses inflammatoires — sont plausibles chez l'Homme. Cette complémentarité renforce la crédibilité des signaux observés et contribue à une approche intégrée entre toxicologie expérimentale, épidémiologie et médecine périnatale.

Enfin, ces études illustrent l'émergence d'un champ de recherche interdisciplinaire, associant chimistes, cliniciens, experts en sciences humaines et sociales, biologistes, toxicologues et épidémiologistes. Ces collaborations traduisent une maturité scientifique croissante en santé-environnement, avec des protocoles alliant la quantification environnementale, l'identification des déterminants de l'exposition à l'origine de l'imprégnation, la caractérisation physico-chimique et l'évaluation clinique et biologique des effets observés. Elles contribuent à poser les bases d'une santé environnementale périnatale, reliant la mesure de l'exposition, la compréhension des mécanismes physiopathologiques et les enjeux de santé publique.

II. MISE EN PERSPECTIVE AVEC LA LITTÉRATURE

Depuis 2020, plusieurs revues de la littérature ont tenté de dresser un état des lieux des connaissances sur l'exposition périnatale aux MNPs. Parmi elles, la revue systématique de Sharma *et al.* (2024) a compilé 12 études humaines publiées entre 2021 et 2024, confirmant la présence de MPs dans le placenta, le LA, le méconium et les selles maternelles, avec des tailles variant de 2 à 100 μm et des associations défavorables sur le poids de naissance et l'AG. Cette revue a constitué une étape importante mais restait limitée par un nombre d'études restreint et l'absence d'évaluation du niveau de preuve.

Le présente revue prolonge ces travaux et nous permet de faire plusieurs constats. Le premier constat concerne le peu d'études publiées en santé périnatale comparées aux études dans le domaine de la santé humaine en général, que ce soit des articles originaux ou des revues. Ainsi, pour illustrer ce constat, à la requête dans Pubmed "*microplastics human*": 1487 résultats apparaissent en 2024 contre 33 résultats la même année à la requête "*microplastics human pregnancy*", ce qui montre que le champ reste encore peu investi même si le nombre de publication est à la hausse.

Les résultats humains concordent avec les données expérimentales démontrant la capacité des MNPs à franchir la barrière placentaire, s'accumuler dans les tissus fœtaux et altérer la fonction trophoblastique. Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la présence de MNPs dans le placenta humain (122). Les auteurs évoquent principalement trois voies d'entrée potentielles (Figure 5) :

- (i) la voie digestive, par ingestion de particules via les aliments, l'eau et l'air puis leur passage transépithélial intestinal,
- (ii) la voie respiratoire, par inhalation de particules fines pouvant franchir la barrière alvéolaire et rejoindre la circulation systémique,
- (iii) la translocation hématogène transplacentaire, les MNPs circulants pouvant traverser la barrière trophoblastique par endocytose, diffusion paracellulaire ou via des cellules immunitaires (macrophages, monocytes).

Ces hypothèses reposent notamment sur les observations ultrastructurales de Ragusa 2022a, qui a mis en évidence la présence de particules dans le syncytiotrophoblaste et le stroma villositaire, suggérant un franchissement actif ou passif de la barrière placentaire. Une fois dans le compartiment intracellulaire, les MNPs pourraient altérer les organites intracytoplasmiques et provoquer des modifications épigénétiques engendrant des altérations du développement foetal à long terme (Figure 6) (112,122).

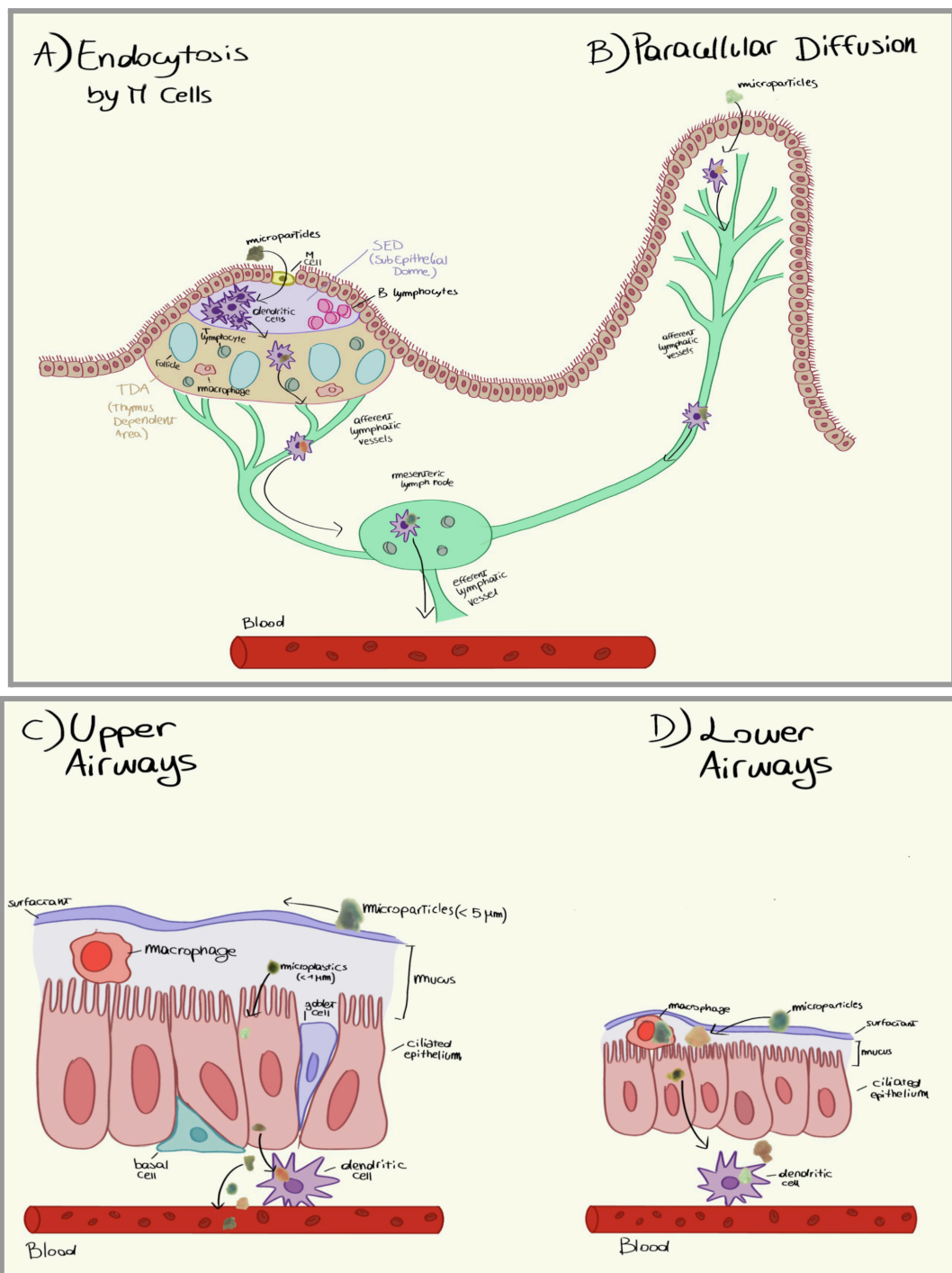


Figure 5 : Mécanismes hypothétiques de pénétration des MPs dans les tissus humains (122).

(A) **Endocytose par les cellules M.** Au niveau des plaques de Peyer, sous la muqueuse intestinale, les MPs ingérés par l'alimentation peuvent être captés par endocytose via les cellules M. Ils sont ensuite transportés à travers l'épithélium vers le dôme sous-épithélial, où ils rencontrent les cellules dendritiques. Celles-ci assurent leur transfert vers la circulation lymphatique, d'où ils rejoignent ensuite le sang.

(B) **Diffusion paracellulaire.** Les MPs pourraient également traverser la lumière intestinale en passant entre les jonctions lâches des cellules épithéliales. Ce phénomène pourrait expliquer, au moins en partie, pourquoi certains états inflammatoires — qui augmentent la perméabilité intestinale — facilitent le passage des particules. Une fois la barrière intestinale franchie, les MPs sont captés par les cellules dendritiques puis transportés via la circulation lymphatique, avant d'atteindre la circulation systémique.

(C) **Voies respiratoires supérieures.** Au niveau des voies respiratoires supérieures, le mucus est plus épais, ce qui favorise la clairance des particules étrangères. De plus, le mouvement mécanique de l'épithélium cilié et la présence de surfactant empêchent les plus petites particules de traverser l'épithélium et d'atteindre la circulation.

(D) **Voies respiratoires inférieures.** Dans les voies respiratoires inférieures, la couche de mucus est plus fine, facilitant la diffusion des particules qui, grâce à leur forme aérodynamique particulière, peuvent atteindre ces zones profondes. Une fois pénétrés, les MPs peuvent diffuser dans la circulation générale soit par capture cellulaire, soit par diffusion passive.

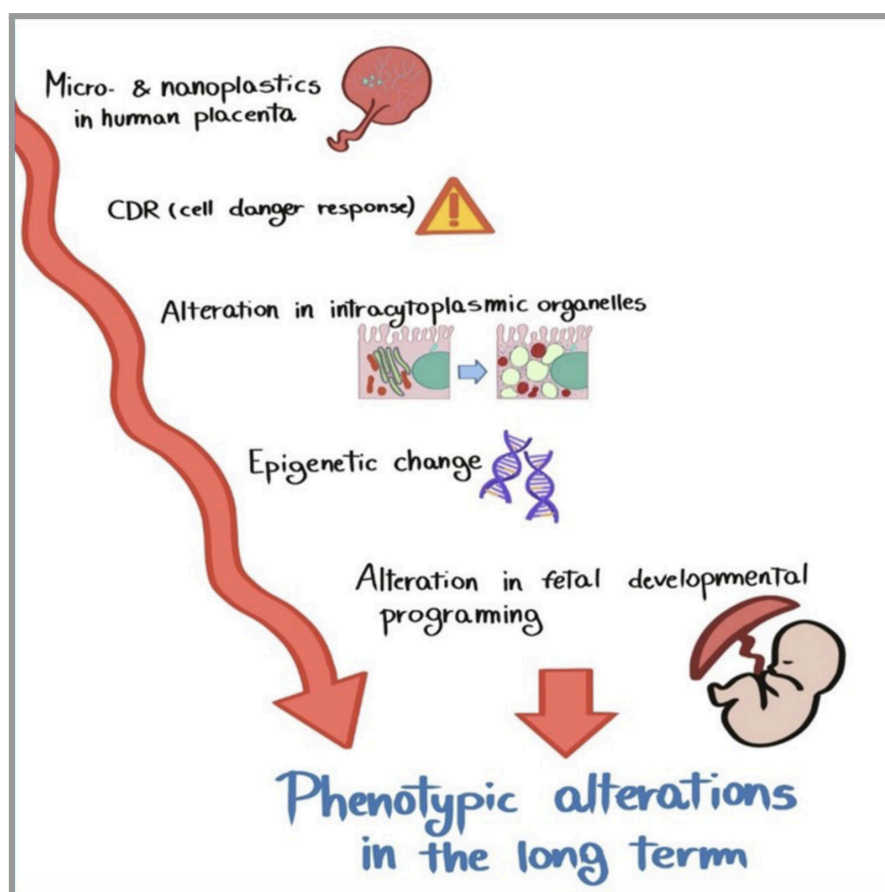


Figure 6 : Mécanisme hypothétique par lequel les MPs pourraient induire des modifications épigénétiques responsables de changements phénotypiques fœtaux à long terme (112).

Pour ce qui est des autres matrices, les voies de translocation sont systémiques et locales. Pour le LA, les auteurs évoquent principalement un passage transplacentaire hématogène. Le méconium refléterait quant à lui une exposition digestive in utero, liée à la déglutition de LA contaminé. Enfin, la présence de MNPs dans le lait maternel s'expliquerait par une translocation depuis la circulation sanguine maternelle, via des mécanismes d'endocytose ou de phagocytose cellulaire au niveau des glandes mammaires [\(8.93.119.127\)](#).

D'autres auteurs, tels que Weingrill 2023 et Zurub 2024, soulignent le rôle possible de la lipophilie et de la charge électrique des polymères dans leur capacité de translocation. Chez la souris, des travaux ont confirmé un transfert transplacentaire de nanoparticules de PS, associé à une inflammation placentaire, un déséquilibre redox et des troubles de la croissance fœtale (133–135). Ces expositions entraînent une production accrue de cytokines pro-inflammatoires (IL-6, TNF- α), une augmentation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et une diminution

des enzymes antioxydantes (superoxyde dismutase – SOD, catalase – CAT). Des anomalies mitochondriales (fragmentation, perte du potentiel membranaire) et une activation des caspases ont également été rapportées. Les voies PI3K-Akt et MAPK, impliquées dans la survie et la réponse au stress cellulaire, sont dérégulées, de même que la stéroïdogénèse placentaire et le métabolisme glucidique maternel (136). L'exposition combinée aux NPs et aux phtalates accentue ces effets, majorant le stress oxydant, l'inflammation et la perturbation hormonale (137). Sur modèles *ex vivo* de placenta humain, les MNPs déclenchent une réponse inflammatoire et oxydative, caractérisée par une élévation des cytokines pro-inflammatoires et une baisse des défenses antioxydantes, avec surexpression de gènes inflammatoires et angiogéniques (138,139). Ces résultats mécanistiques sont concordants avec l'étude de Zhang (2025a) sur le raccourcissement des télomères placentaires.

Deux publications récentes apportent un renforcement majeur du socle mécanistique reliant les MNPs à la physiopathologie placentaire et fœtale. La revue de Subramanian *et al.* (2024) met en évidence des effets à la fois transcriptionnels, épigénétiques et structuraux (140). Les MNPs induisent une dérégulation de microARNs trophoblastiques, notamment miR-21 et miR-34a, impliqués dans le contrôle de l'apoptose, de la prolifération et de la réponse inflammatoire. Ces modifications s'accompagnent d'une désorganisation des jonctions cellulaires — avec une baisse de l'expression de ZO-1 et d'E-cadhérine — traduisant une perte d'intégrité membranaire susceptible de faciliter la translocation des particules à travers la barrière placentaire. Parallèlement, les voies PI3K/Akt et MAPK, essentielles à la survie cellulaire, à la différenciation trophoblastique et à l'angiogenèse, apparaissent dérégulées, suggérant une atteinte fonctionnelle du tissu placentaire. De leur côté, Anifowoshe *et al.* (2025) soulignent que ces perturbations moléculaires s'inscrivent dans un stress placentaire global, associant inflammation chronique, déséquilibre redox, dysfonction mitochondriale et altération du remodelage vasculaire au sein de l'unité fœto-placentaire. Dans l'ensemble, ces modèles confirment une toxicité placentaire multifactorielle, fondée sur le stress oxydant, l'inflammation,

la dysfonction mitochondriale et la perturbation endocrino-métabolique, mécanismes cohérents avec les observations humaines ce qui renforce la plausibilité biologique d'un rôle délétère des MNPs dans la survenue de complications obstétricales et fœtales telles que l'HAIG, la prééclampsie, la prématurité ou le RCIU.

Ces processus s'inscrivent dans un schéma déjà connu pour d'autres contaminants prénataux — PFAS, phtalates, bisphénols et particules fines (PM_{2.5}) — qui partagent les mêmes voies de stress oxydant, inflammation et perturbation hormonale. Les PFAS sont associés à un faible poids de naissance et à la prééclampsie, via un déséquilibre redox et une interférence endocrinienne (141,142). Les phtalates activent la cascade ROS/NF-κB, responsable d'une inflammation trophoblastique chronique (143). Les bisphénols (BPA, BPS) induisent une dysfonction mitochondriale et des modifications épigénétiques analogues à celles proposées pour les MNPs (144). Enfin, les particules fines (PM_{2.5}) provoquent une inflammation placentaire et une baisse des défenses antioxydantes (145).

Les MNPs pourraient donc agir à la fois comme polluants directs et comme vecteurs de co-contaminants, partageant des processus mécanistiques communs. Les MNPs, en interférant avec la fonction placentaire, la signalisation hormonale et la régulation épigénétique, participent potentiellement à la programmation développementale de l'enfant. Ainsi, les perturbations observées — inflammation, stress oxydant, dérégulation endocrinienne et modifications épigénétiques — peuvent altérer la croissance fœtale et la maturation des systèmes respiratoire, métabolique, neurologique et immunitaire, favorisant ultérieurement des troubles touchant ces systèmes.

III. ANALYSE CRITIQUE DES ÉTUDES INCLUSES

L'analyse critique du corpus met en évidence plusieurs limites méthodologiques majeures qui nuancent la portée et la généralisabilité des résultats.

La première limite concerne l'hétérogénéité des matrices et des techniques de détection. Les études utilisent des approches analytiques très variées qui ne mesurent ni les mêmes

tailles de particules ni les mêmes unités de masse. Cette absence de standardisation limite les comparaisons inter-études et complique toute estimation quantitative des niveaux d'imprégnation. De plus, la fraction nanométrique, pourtant la plus susceptible de franchir les barrières biologiques, n'a encore jamais été mesurée chez l'Homme, pouvant conduire à une sous-estimation de l'imprégnation.

La seconde limite tient au risque de contamination lors du prélèvement, du transport et de la préparation des échantillons. Malgré les protocoles dits *plastic-free* et l'emploi de blancs procéduraux ou environnementaux, le risque de contamination secondaire reste présent et n'est pas toujours documenté dans les publications. Les démarches de contrôle qualité sont inégales, parfois limitées à un simple blanc négatif sans test de récupération ni estimation de la limite de détection. Cette limite pourrait induire des faux positifs ou des faux négatifs en termes de détection avec pour conséquence un biais de mesure sur l'exposition rendant les mesures d'association (OR) peu fiables.

La troisième limite est liée à la puissance des analyses statistiques. Une majorité d'études souffrent d'effectifs modestes. Cette faiblesse de puissance statistique réduit la précision des estimations et la robustesse des associations observées.

Une quatrième limite concerne le mode de constitution des échantillons pour les études transversales. Monocentriques et de taille réduite, ces études ne permettent pas d'atteindre une certaine représentativité et d'équilibrer les caractéristiques maternelles, compromettant la validité externe des résultats. Par ailleurs, les designs transversaux dominent largement, décrivant l'imprégnation et les corrélations ponctuelles sans permettre d'établir la temporalité entre exposition et effet, limitant l'étude de l'inférence causale.

Enfin, une dernière limite concerne la mesure de l'imprégnation qui reste indirecte et partielle, fondée sur un prélèvement unique au moment de l'accouchement, sans suivi longitudinal ni prise en compte des co-expositions environnementales (phtalates, PFAS, particules fines) et des effets cocktails associés.

Dans ce contexte, la qualité globale des preuves peut être qualifiée de modérée, suffisante pour confirmer la réalité d'une imprégnation périnatale généralisée mais encore insuffisante pour établir des liens solides avec les issues obstétricales ou néonatales. Les biais de mesure, de sélection et de publication demeurent présents. Les travaux les plus récents témoignent toutefois d'une amélioration sensible : protocoles mieux contrôlés et analyses multivariées. Ainsi, si le corpus actuel apporte des preuves exploratoires robustes de la présence de MNPs dans les matrices périnatales, les limites des études invitent à la prudence quant à l'interprétation des associations et à la généralisation des effets observés.

IV. FORCES ET LIMITES DE LA PRÉSENTE REVUE

Cette revue présente plusieurs forces méthodologiques notables, mais également des limites. La première force réside dans la démarche exhaustive et systématique adoptée pour identifier et sélectionner les études pertinentes. La recherche documentaire a été conduite selon les recommandations PRISMA, avec une stratégie explicite et reproductible. Les critères d'inclusion et d'exclusion ont été clairement définis en amont, garantissant la transparence et la traçabilité du tri des articles. L'utilisation d'outils d'évaluation de la qualité, tels que STROBE pour le reporting et ROBINS-E pour le risque de biais, confère à l'analyse une bonne rigueur méthodologique. Enfin, la revue a été conduite avec un souci de transparence scientifique, incluant la mention des protocoles d'extraction, de l'évaluation du risque de biais et du niveau de preuve global, éléments rarement détaillés dans les synthèses actuelles sur les MNPs.

Cette revue n'échappe pas à certaines limites méthodologiques. La principale tient à la rareté et à l'hétérogénéité du corpus scientifique ce qui limite la puissance de synthèse et empêche la réalisation d'une méta-analyse quantitative. Les différences de protocoles, de matrices étudiées et d'unités de mesure rendent impossible toute agrégation statistique fiable des données. L'exclusion de certaines bases de données secondaires, faute d'accès ou de recoupement linguistique, ainsi que la restriction aux articles en anglais et en français, exposent la revue à un biais de langue et de publication. Il est donc probable que des travaux non

anglophones ou non indexés aient été manqués. Enfin, bien que la revue ait adopté une grille critique complète, le caractère hétérogène des données sources et l'absence de standards analytiques universels pour les MNPs limitent la comparabilité des conclusions. Les résultats reposent donc sur une synthèse qualitative.

V. IMPLICATIONS CLINIQUES ET DE SANTÉ PUBLIQUE

Les données issues de cette revue ne justifient pas une alarme immédiate, mais elles soulignent la nécessité d'une vigilance raisonnée face à un risque environnemental émergent. Dans l'état actuel des connaissances, le message à délivrer aux femmes enceintes et allaitantes relève du principe de précaution et du bon sens, en privilégiant des mesures simples, accessibles à tous et sans effet indésirable. Les recommandations pratiques suivantes reposent sur des gestes à faible coût et à fort bénéfice potentiel, susceptibles de réduire à la fois les expositions aux MNPs et leurs co-polluants :

- éviter le contact répété des aliments chauds avec le plastique,
- ne pas chauffer les contenants alimentaires au micro-ondes,
- privilégier le verre, l'inox, la céramique, le bois ou le silicone platine,
- limiter le stockage et la congélation dans des contenants plastiques, au profit du verre,
- aérer régulièrement le logement et réduire dans la mesure du possible les poussières et fibres textiles synthétiques (tapis, banquettes, rideaux),
- chez le nouveau-né, utiliser de préférence des biberons en verre avec tétines en silicone platine ou en caoutchouc naturel.

Pour les professionnels de santé, l'enjeu est d'informer sans alarmer. Les patientes doivent comprendre que les MNPs sont désormais omniprésents dans l'environnement, et que des études sont en cours pour en évaluer les effets. Les messages doivent être clairs et proportionnés : aucun seuil d'exposition n'est actuellement défini, aucun biomarqueur clinique n'est validé, et aucune indication n'existe à interrompre l'allaitement, dont les bénéfices demeurent largement supérieurs aux risques supposés. Les laits infantiles industriels

présentent d'ailleurs des niveaux de MPs comparables à ceux du lait maternel, si bien que l'arrêt de l'allaitement n'en réduirait pas l'exposition.

Sur le plan de la santé publique, les résultats de cette revue plaident pour une mobilisation coordonnée de la recherche et des politiques environnementales. L'OMS souligne que les connaissances actuelles sont freinées par une hétérogénéité méthodologique importante et l'absence de standardisation internationale des protocoles de mesure. Les priorités identifiées seraient les suivantes (146):

- (i) Standardiser les méthodes analytiques (prélèvements, matrices, seuils de taille, limites de détection, contrôles qualité),
- (ii) Développer des techniques adaptées à la mesure de la fraction nanométrique ($< 1 \mu\text{m}$).
- (iii) Mettre en place des cohortes longitudinales multicentriques, combinant les approches particle-based et mass-based, intégrant les co-expositions (PFAS, phtalates, bisphénols, particules fines).
- (iv) Documenter les biomarqueurs intermédiaires (inflammation, stress oxydant, signatures épigénétiques et métabolomiques).
- (v) Renforcer la recherche psychosociale, afin d'analyser les contraintes structurelles pesant sur les comportements d'exposition et d'orienter l'adaptation des politiques publiques (voir mon sujet de stage en M2 dédié à cette thématique (147)).

À l'échelle collective, les MNPs doivent être considérés comme un indicateur de la dérive du cycle du plastique : leur omniprésence traduit les limites actuelles de la production, de la gestion et du recyclage des polymères. Les mesures de prévention doivent s'inscrire dans des politiques publiques ambitieuses, fondées sur la réduction à la source, la réglementation des matériaux au contact des aliments ou des MNPs primaires introduits volontairement dans divers produits, la limitation des plastiques à usage unique et le renforcement de la surveillance environnementale.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

VI.1. CONCLUSION

Cette revue systématique s'inscrit dans un champ de recherche émergent en santé-environnement. Elle offre une photographie critique fidèle de l'état actuel des connaissances sur l'exposition périnatale aux MNPs, tout en explicitant clairement les limites de la preuve disponible. De plus, son caractère exploratoire, l'hétérogénéité des études incluses et l'impossibilité de méta-analyse imposent une lecture prudente des conclusions. Cependant, en mettant en évidence l'imprégnation quasi-systématique des matrices maternelles et périnatales, et des associations avec certains outcomes maternels et périnataux, elle permet d'une part de dégager des implications à la fois en santé périnatale et en santé publique, et d'autre part, de mettre en lumière les besoins en recherche.

VI.2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Il y a donc urgence de structurer la recherche sur les MNPs autour de protocoles harmonisés et de collaborations interdisciplinaires durables. L'une des priorités est la normalisation des méthodes analytiques pour la détection et la quantification des MNPs dans les matrices humaines. Ce thème fait l'objet d'un projet de recherche de l'équipe IMPECS (Université de Lille). Il est indispensable d'harmoniser les protocoles de prélèvement, de recueil, les conditions de stockage, les seuils de taille analysés, ainsi que les limites de détection et de quantification. L'intégration systématique de blancs procéduraux et environnementaux, la publication des incertitudes et la validation interlaboratoire doivent devenir la norme afin de réduire les biais de contamination et de permettre une comparabilité internationale des données. Le développement de techniques capables de caractériser la fraction nanométrique représente un enjeu majeur, car cette population de particules est la plus susceptible d'interagir avec les structures cellulaires et de franchir les barrières biologiques.

Les études disponibles sont majoritairement transversales et descriptives. La mise en place de cohortes longitudinales multicentriques incluant des biobanques périnatales est

essentielle pour explorer la dynamique temporelle de l'imprégnation et des effets biologiques associés. Ces cohortes devraient permettre :

- l'évaluation des déterminants modulant l'imprégnation,
- la quantification précises des MNPs dans les matrices, ainsi que l'évaluation de leur taille et morphologie voire d'autres caractéristiques (permettant parfois d'en déterminer la provenance),
- la corrélation des expositions et de l'imprégnation aux issues obstétricales et néonatales,
- la mesure de biomarqueurs intermédiaires (stress oxydant, inflammation, profils hormonaux, télomères, signatures épigénétiques).

Une telle approche offrirait la possibilité d'établir des relations dose-effet et d'avancer vers des preuves d'un lien causal. La cohorte française Filomene, qui prévoit d'inclure 100 000 futurs parents suivis jusqu'à l'âge adulte, pourrait largement contribuer à cet objectif. Les porteurs de cette grande cohorte ont lancé un appel à manifestation d'intérêt (AMI) auprès de la communauté scientifique (148). Dans ce cadre, l'équipe IMPECS de l'Université de Lille a proposé une étude spécifique intégrée à un projet plus global porté par la fédération hospitalo-universitaire – FHU Respire (Groupe G4), et plus particulièrement rattachée à l'objectif 2, qui vise à étudier l'impact des expositions précoces aux MNPs et aux PFAS sur les trajectoires fonctionnelles respiratoires.

L'avenir de la recherche sur les MNPs passe par des approches multi-omiques intégrées. L'analyse combinée de l'épigénomique, de la transcriptomique, de la protéomique et de la métabolomique permettra de décrypter les voies de signalisation et les réseaux moléculaires impliqués dans la réponse placentaire et fœtale aux MNPs. Ces approches pourraient aider à identifier des biomarqueurs d'exposition ou d'effets précoces.

Il devient également nécessaire d'investir le champ de la recherche interventionnelle, en évaluant l'efficacité des changements de comportements en faveur d'une réduction d'exposition (usage de contenants alternatifs, réduction des plastiques à usage unique, ventilation

domestique, pratiques alimentaires). Ces études, combinant sciences biomédicales et sciences sociales, permettront d'estimer la faisabilité et l'impact réel des recommandations de prévention sur les niveaux d'imprégnation et les déterminants comportementaux.

Enfin, la complexité du sujet impose l'implication de multiples disciplines. La recherche future doit s'appuyer sur une coopération étroite entre chimistes, biologistes, épidémiologistes, cliniciens, toxicologues et chercheurs en sciences humaines et sociales (en particulier la psychologie environnementale), en lien avec les institutions de santé publique. La création de consortiums internationaux et de plateformes partagées de données et d'échantillons faciliterait la mutualisation des outils, l'harmonisation des méthodes et l'émergence de standards analytiques communs.

VI.2. PERSPECTIVES DE SANTÉ PUBLIQUE

Les résultats combinés de cette thèse et du mémoire de master 2 PlastiQualiCE : *Déterminants Comportementaux et Environnementaux de l'exposition domestique aux micro- et nanoPLASTIques (MNPs) chez les femmes enceintes : approche QUALitative*, soulignent que la pollution plastique relève à la fois d'un enjeu environnemental, sur le plan écologique et d'un enjeu de santé publique, soutenu par des approches One Health et EcoHealth qui reposent sur l'idée que la santé humaine est indissociable de celle des animaux et des écosystèmes. "One Health" vise à promouvoir une vision intégrée de la santé à l'interface entre humains, animaux et environnement, en encourageant la collaboration entre disciplines médicales, vétérinaires et environnementales pour prévenir les risques sanitaires émergents (zoonoses, antibiorésistance, polluants) (149). EcoHealth, plus large encore, met l'accent sur les systèmes socio-écologiques, les interactions entre les sociétés humaines et les milieux naturels, et la recherche d'un équilibre durable entre santé, biodiversité et justice environnementale. Ces deux paradigmes convergent vers une approche systémique et transdisciplinaire de la santé globale et de la prévention des crises sanitaires et écologiques (150).

Mon sujet de master 2 Recherche, PlastiQualiCE a montré que l'exposition domestique est structurée par des déterminants matériels, économiques et sociaux, davantage que par les seules intentions individuelles. Cette constatation impose de dépasser une vision centrée sur la responsabilité personnelle de l'individu pour adopter une prévention systémique, intégrant les contraintes réelles des individus et des familles. Ainsi, la réduction de l'exposition ne pourra être effective que si les politiques publiques s'attaquent aux freins structurels : coût des alternatives, accessibilité au vrac, charge mentale domestique et normes commerciales renforçant l'usage du plastique, amélioration de la gestion des déchets à l'échelle mondiale.

Les femmes enceintes représentent une population vulnérable mais également réceptive et prioritaire pour la prévention et la promotion de la santé. La grossesse, identifiée comme un *“teachable moment”*, constitue une période clé pour initier des changements durables (151). Il est urgent d'avoir des résultats concernant les changements de comportement à cibler dans les actions de prévention et de promotion de la santé comme le projet FEES (152).

Les acteurs de santé périnatale — sages-femmes, obstétriciens, puéricultrices, pédiatres, PMI, pharmaciens, naturopathes, ostéopathes ... — doivent être formés à la communication environnementale, afin d'intégrer des conseils concrets et non culpabilisants dans le suivi prénatal et postnatal.

La prévention doit également être portée à un niveau collectif et politique. Les institutions nationales et internationales (OMS, EFSA, HCSP, APPA) convergent pour recommander une information claire, adaptée et bienveillante sur les polluants domestiques, en particulier pendant la grossesse. À court terme, il s'agit de :

- Diffuser largement les messages clés auprès du grand public et des professionnels, par des campagnes de sensibilisation et un étiquetage plus transparent des produits.
- Renforcer la littératie en santé environnementale, en développant des programmes éducatifs tels que le projet FEES.

- Soutenir les démarches locales (collectivités, associations, maternités vertes) promouvant des environnements moins plastiques.

À long terme, la gestion du risque lié aux MNPs exige une action intersectorielle, à la croisée de la santé, de l'environnement et de l'économie circulaire :

- Réduire à la source les plastiques à usage unique et les emballages inutiles, conformément à la loi AGECE (2021) et au règlement européen 2023/2055 (153–155),
- Encourager la consigne et le vrac, soutenus par des incitations économiques et logistiques,
- Développer un étiquetage environnemental sur les textiles et produits de puériculture mentionnant le risque de libération de MPs,
- Financer la recherche.

Enfin, la prévention des MNPs doit être pensée à l'échelle du cycle de vie et d'une transmission intergénérationnelle : un jeune parent sensibilisé transmet à son enfant des pratiques protectrices (réduction du plastique, tri, usage raisonné), amorçant un cercle vertueux intergénérationnel. À l'inverse, un jeune parent sensibilisé transmet à ses parents et ses proches des pratiques protectrices.

Rendre visible ce risque invisible, par la science et l'éducation, constitue une priorité éthique et sociétale.

Références

1. Zhao B, Rehati P, Yang Z, Cai Z, Guo C, Li Y. The potential toxicity of microplastics on human health. *Sci Total Environ.* févr 2024;912:168946.
2. Prata JC, Da Costa JP, Lopes I, Duarte AC, Rocha-Santos T. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Sci Total Environ.* févr 2020;702:134455.
3. Fournier SB, D'Errico JN, Adler DS, Kollontzi S, Goedken MJ, Fabris L, et al. Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy. *Part Fibre Toxicol.* déc 2020;17(1):55.
4. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, Catalano P, Notarstefano V, Carnevali O, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environ Int.* janv 2021;146:106274.
5. Gluckman PD, Hanson MA, Cooper C, Thornburg KL. Effect of In Utero and Early-Life Conditions on Adult Health and Disease. *N Engl J Med.* 3 juill 2008;359(1):61-73.
6. Draper CE, Yousafzai AK, McCoy DC, Cuartas J, Obradović J, Bhopal S, et al. The next 1000 days: building on early investments for the health and development of young children. *The Lancet.* nov 2024;404(10467):2094-116.
7. Vrijheid M, Slama R, Robinson O, Chatzi L, Coen M, Van Den Hazel P, et al. The Human Early-Life Exposome (HELIX): Project Rationale and Design. *Environ Health Perspect.* juin 2014;122(6):535-44.
8. Xue J, Xu Z, Hu X, Lu Y, Zhao Y, Zhang H. Microplastics in maternal amniotic fluid and their associations with gestational age. *Sci Total Environ.* avr 2024;920:171044.
9. Jochum M, Garcia M, Hammerquist A, Howell J, Stanford M, Liu R, et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae [Internet]. Springer Science and Business Media LLC; 2025 [cité 29 juill 2025]. Disponible sur: <https://www.researchsquare.com/article/rs-5903715/v1>
10. Zaheer J, Kim H, Ko IO, Jo EK, Choi EJ, Lee HJ, et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environ Int.* mars 2022;161:107121.
11. Jeong B, Baek JY, Koo J, Park S, Ryu YK, Kim KS, et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *J Hazard Mater.* mars 2022;426:127815.
12. Chen X, Huang S, Wang L, Liu K, Wu H. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics induces sex-specific cardiotoxicity in offspring mice. *Heliyon.* 30 oct 2024;10(20):e39139.
13. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 7 juill 2017;3(7):e1700782.
14. Plastics Europe AISBL. Plastics – the fast Facts 2023. An analysis of European plastics production, demand and waste data. [Internet]. Bruxelles: PlasticsEurope AISBL; 2023 [cité 25 mai 2025]. Disponible sur: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/10/Plasticsthefastfacts2023-1.pdf>
15. Skoczinski P, Carus M, Tweddle G, Ruiz P, Dammer L, Zhang A, et al. Plastics production from 1950 to 2023 [Internet]. nova-Institute; 2025 [cité 25 mai 2025]. Disponible sur: <https://renewable-carbon.eu/graphics>

16. Houssini K, Li J, Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Commun Earth Environ*. 10 avr 2025;6(1):257.
17. Xanthos D, Walker TR. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. *Mar Pollut Bull*. mai 2017;118(1-2):17-26.
18. Sénat [Internet]. 2023 [cité 7 juin 2025]. Pollution plastique : une bombe à retardement ? Disponible sur: <https://www.senat.fr/rap/r20-217/r20-217.html>
19. Cottom JW, Cook E, Velis CA. A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. *Nature*. 5 sept 2024;633(8028):101-8.
20. OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options [Internet]. OECD; 2022 [cité 1 août 2025]. Disponible sur: https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html
21. Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*. 13 févr 2015;347(6223):768-71.
22. Avio CG, Gorbi S, Regoli F. Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat. *Mar Environ Res*. juill 2017;128:2-11.
23. Song J, Wang C, Li G. Defining Primary and Secondary Microplastics: A Connotation Analysis. *ACS EST Water*. 14 juin 2024;4(6):2330-2.
24. Julienne F. Fragmentation des plastiques : effet de l'environnement et de la nature du polymère sur la taille et la forme des fragments générés [Internet] [phdthesis]. Le Mans Université; 2019 [cité 21 sept 2025]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02954351>
25. Nawab A, Ahmad M, Khan MT, Nafees M, Khan I, Ihsanullah I. Human exposure to microplastics: A review on exposure routes and public health impacts. *J Hazard Mater Adv*. nov 2024;16:100487.
26. Stapleton P, 1 Department of Pharmacology and Toxicology, Ernest Mario School of Pharmacy, Rutgers University, 160 Frelinghuysen Rd., Piscataway, NJ 08854, USA, 2 Environmental and Occupational Health Sciences Institute, 170 Frelinghuysen Rd., Piscataway, NJ 08854, USA. Toxicological considerations of nano-sized plastics. *AIMS Environ Sci*. 2019;6(5):367-78.
27. Gigault J, Halle AT, Baudrimont M, Pascal PY, Gauffre F, Phi TL, et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environ Pollut*. avr 2018;235:1030-4.
28. Alimi OS, Farner Budarz J, Hernandez LM, Tufenkji N. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environ Sci Technol*. 20 févr 2018;52(4):1704-24.
29. Prata JC. Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environ Pollut*. mars 2018;234:115-26.
30. Lambert S, Wagner M. Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview. In: Wagner M, Lambert S, éditeurs. *Freshwater Microplastics : Emerging Environmental Contaminants?* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [cité 28 mai 2025]. p. 1-23. Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_1
31. Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue? *Environ Sci*. 2017;

32. Zurub RE, Bainbridge S, Rahman L, Halappanavar S, El-Chaâr D, Wade MG. Particulate contamination of human placenta: Plastic and non-plastic. *Environ Adv.* oct 2024;17:100555.
33. Prata JC, Da Costa JP, Duarte AC, Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends Anal Chem.* janv 2019;110:150-9.
34. K  ppler A, Fischer D, Oberbeckmann S, Schernewski G, Labrenz M, Eichhorn KJ, et al. Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Anal Bioanal Chem.* nov 2016;408(29):8377-91.
35. Kole PJ, L  hr AJ, Van Belleghem F, Ragas A. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int J Environ Res Public Health.* 20 oct 2017;14(10):1265.
36. Corradini F, Meza P, Eguiluz R, Casado F, Huerta-Lwanga E, Geissen V. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Sci Total Environ.* juin 2019;671:411-20.
37. Carr SA, Liu J, Tesoro AG. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Res.* mars 2016;91:174-82.
38. Lin YD, Huang PH, Chen YW, Hsieh CW, Tain YL, Lee BH, et al. Sources, Degradation, Ingestion and Effects of Microplastics on Humans: A Review. *Toxics.* 1 sept 2023;11(9):747.
39. Gewert B, Plassmann MM, MacLeod M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ Sci Process Impacts.* 2015;17(9):1513-21.
40. Chamas A, Moon H, Zheng J, Qiu Y, Tabassum T, Jang JH, et al. Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustain Chem Eng.* 9 mars 2020;8(9):3494-511.
41. Pabortsava K, Lampitt RS. High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean. *Nat Commun.* 18 ao  t 2020;11(1):4073.
42. Allen S, Allen D, Phoenix VR, Le Roux G, Dur  ntez Jim  nez P, Simonneau A, et al. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat Geosci.* mai 2019;12(5):339-44.
43. Dris R, Gasperi J, Mirande C, Mandin C, Guerrouache M, Langlois V, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environ Pollut.* f  vr 2017;221:453-8.
44. Andrady AL. Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull.* ao  t 2011;62(8):1596-605.
45. Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, Taniguchi I, Yamaji H, Maeda Y, et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science.* 11 mars 2016;351(6278):1196-9.
46. Bergmann M, M  tzl S, Primpke S, Tekman MB, Trachsel J, Gerdts G. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Sci Adv.* 2 ao  t 2019;5(8):eaax1157.
47. Werbowski LM, Gilbreath AN, Munno K, Zhu X, Grbic J, Wu T, et al. Urban Stormwater Runoff: A Major Pathway for Anthropogenic Particles, Black Rubbery Fragments, and Other Types of Microplastics to Urban Receiving Waters. *ACS EST Water.* 11 juin 2021;1(6):1420-8.

48. Bergmann M. Marine Anthropogenic Litter. Cham: Springer International Publishing AG; 2015. 1 p.
49. Miller ME, Hamann M, Kroon FJ. Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data. Mukherjee A, éditeur. PLOS ONE. 16 oct 2020;15(10):e0240792.
50. Rodriguez PM, Ondarza PM, Miglioranza KSB, Ramirez CL, Vera B, Muntaner C, et al. Pesticides exposure in pregnant Argentinian women: Potential relations with the residence areas and the anthropometric neonate parameters. Chemosphere. 1 août 2023;332:138790.
51. Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, Van Der Ploeg M, et al. Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). Environ Sci Technol. 1 mars 2016;50(5):2685-91.
52. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, Leviner A, Perrine JD, California Polytechnic State University, San Luis Obispo. Documentation of microplastics in the gastrointestinal tracts of terrestrial raptors in central California, USA. Calif Fish Wildl J [Internet]. 10 juill 2023 [cité 6 août 2025];9(2). Disponible sur: <https://journal.wildlife.ca.gov/2023/07/10/documentation-of-microplastics-in-the-gastrointestinal-tracts-of-terrestrial-raptors-in-central-california-usa/>
53. Prata JC, Dias-Pereira P. Microplastics in Terrestrial Domestic Animals and Human Health: Implications for Food Security and Food Safety and Their Role as Sentinels. Animals. 14 févr 2023;13(4):661.
54. Li Z, Li Q, Li R, Zhao Y, Geng J, Wang G. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. Environ Sci Pollut Res. août 2020;27(24):30306-14.
55. Leslie HA, Van Velzen MJM, Brandsma SH, Vethaak AD, Garcia-Vallejo JJ, Lamoree MH. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. Environ Int. mai 2022;163:107199.
56. Halfar J, Čabanová K, Vávra K, Delongová P, Motyka O, Špaček R, et al. Microplastics and additives in patients with preterm birth: The first evidence of their presence in both human amniotic fluid and placenta. Chemosphere. déc 2023;343:140301.
57. Ragusa A, Notarstefano V, Svelato A, Belloni A, Gioacchini G, Blondeel C, et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers. 30 juin 2022;14(13):2700.
58. Ragusa A, Matta M, Cristiano L, Matassa R, Battaglione E, Svelato A, et al. Deeply in Placenta: Presence of Microplastics in the Intracellular Compartment of Human Placentas. Int J Environ Res Public Health. 14 sept 2022;19(18):11593.
59. Karlsson TM, Arneborg L, Broström G, Almroth BC, Gipperth L, Hassellöv M. The unaccountability case of plastic pellet pollution. Mar Pollut Bull. avr 2018;129(1):52-60.
60. De Falco F, Di Pace E, Cocca M, Avella M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. Sci Rep. 29 avr 2019;9(1):6633.
61. Henry B, Laitala K, Klepp IG. Microfibres from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment. Sci Total Environ. févr 2019;652:483-94.
62. Bikiaris N, Nikolaidis NF, Barmapalexis P. Microplastics (MPs) in Cosmetics: A Review on Their Presence in Personal-Care, Cosmetic, and Cleaning Products (PCCPs) and

Sustainable Alternatives from Biobased and Biodegradable Polymers. *Cosmetics*. 23 août 2024;11(5):145.

63. Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE. Human Consumption of Microplastics. *Environ Sci Technol*. 18 juin 2019;53(12):7068-74.
64. Ye C, Lin J, Li Z, Wang G, Li Z. Characteristics of Microplastic Pollution in Agricultural Soils in Xiangtan, China. *Sustainability*. 23 août 2024;16(17):7254.
65. Bhattacharjee L, Gopakumar AN, Beheshtimaal A, Jazaei F, Ccanccapa-Cartagena A, Salehi M. Mechanisms of microplastic generation from polymer-coated controlled-release fertilizers (PC-CRFs). *J Hazard Mater*. mars 2025;486:137082.
66. Briassoulis D, Dejean C. Critical Review of Norms and Standards for Biodegradable Agricultural Plastics Part I. Biodegradation in Soil. *J Polym Environ*. sept 2010;18(3):384-400.
67. Dewika M, Kantha N, Markandan K, Nagaratnam S, Irfan NA, Khalid M. Microplastics release from coronary catheters: Insights from catheter analysis. *Chemosphere*. oct 2024;366:143428.
68. Huang T, Liu Y, Wang L, Ruan X, Ge Q, Ma M, et al. MPs Entering Human Circulation through Infusions: A Significant Pathway and Health Concern. *Environ Health*. 16 mai 2025;3(5):551-9.
69. Catarino AI, Macchia V, Sanderson WG, Thompson RC, Henry TB. Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environ Pollut*. juin 2018;237:675-84.
70. Mason SA, Welch VG, Neratko J. Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water. *Front Chem*. 11 sept 2018;6:407.
71. Qian N, Gao X, Lang X, Deng H, Bratu TM, Chen Q, et al. Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy. *Proc Natl Acad Sci*. 16 janv 2024;121(3):e2300582121.
72. Vianello A, Jensen RL, Liu L, Vollertsen J. Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Sci Rep*. 17 juin 2019;9(1):8670.
73. Sun A, Wang WX. Human Exposure to Microplastics and Its Associated Health Risks. *Environ Health*. 15 sept 2023;1(3):139-49.
74. Ho YW, Lim JY, Yeoh YK, Chiou JC, Zhu Y, Lai KP, et al. Preliminary Findings of the High Quantity of Microplastics in Faeces of Hong Kong Residents. *Toxics*. 23 juill 2022;10(8):414.
75. Zhang N, Li YB, He HR, Zhang JF, Ma GS. You are what you eat: Microplastics in the feces of young men living in Beijing. *Sci Total Environ*. mai 2021;767:144345.
76. Zhu L, Zhu J, Zuo R, Xu Q, Qian Y, An L. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy. *Sci Total Environ*. janv 2023;856:159060.
77. Jenner LC, Rotchell JM, Bennett RT, Cowen M, Tentzeris V, Sadofsky LR. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Sci Total Environ*. juill 2022;831:154907.
78. Horvatits T, Tamminga M, Liu B, Sebode M, Carambia A, Fischer L, et al. Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *eBioMedicine*. août 2022;82:104147.

79. Hussain KA, Romanova S, Okur I, Zhang D, Kuebler J, Huang X, et al. Assessing the Release of Microplastics and Nanoplastics from Plastic Containers and Reusable Food Pouches: Implications for Human Health. *Environ Sci Technol*. 4 juill 2023;57(26):9782-92.
80. Topjian AA, Raymond TT, Atkins D, Chan M, Duff JP, Joyner BL, et al. Part 4: Pediatric Basic and Advanced Life Support: 2020 American Heart Association Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation* [Internet]. 20 oct 2020 [cité 2 juin 2025];142(16_suppl_2). Disponible sur: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIR.0000000000000901>
81. Zhang Q, Zhao Y, Du F, Cai H, Wang G, Shi H. Microplastic Fallout in Different Indoor Environments. *Environ Sci Technol*. 2 juin 2020;54(11):6530-9.
82. Zhang Q, Xu EG, Li J, Chen Q, Ma L, Zeng EY, et al. A Review of Microplastics in Table Salt, Drinking Water, and Air: Direct Human Exposure. *Environ Sci Technol*. 7 avr 2020;54(7):3740-51.
83. Kelly MR, Lant NJ, Kurr M, Burgess JG. Importance of Water-Volume on the Release of Microplastic Fibers from Laundry. *Environ Sci Technol*. 15 oct 2019;53(20):11735-44.
84. Napper IE, Thompson RC. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions. *Mar Pollut Bull*. nov 2016;112(1-2):39-45.
85. McIlwraith HK, Lin J, Erdle LM, Mallos N, Diamond ML, Rochman CM. Capturing microfibers – marketed technologies reduce microfiber emissions from washing machines. *Mar Pollut Bull*. févr 2019;139:40-5.
86. Ó Briain O, Marques Mendes AR, McCarron S, Healy MG, Morrison L. The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment. *Water Res*. sept 2020;182:116021.
87. Hernandez LM, Xu EG, Larsson HCE, Tahara R, Maisuria VB, Tufenkji N. Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea. *Environ Sci Technol*. 5 nov 2019;53(21):12300-10.
88. Xia Y, Wang WX. Subcellular toxicity assessments of microplastics released from food containers. *J Hazard Mater*. juin 2025;489:137541.
89. Welch BM, Keil AP, Buckley JP, Engel SM, James-Todd T, Zota AR, et al. Racial and Ethnic Disparities in Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of Sixteen U.S. Cohorts. *Environ Health Perspect*. déc 2023;131(12):127015.
90. Liu K, Wang X, Wei N, Song Z, Li D. Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health. *Environ Int*. nov 2019;132:105127.
91. Soltani NS, Taylor MP, Wilson SP. International quantification of microplastics in indoor dust: prevalence, exposure and risk assessment. *Environ Pollut*. nov 2022;312:119957.
92. Weinberger SE, Weiss ST, Cohen WR, Weiss JW, Johnson TS. Pregnancy and The Lung. *Am Rev Respir Dis*. mars 1980;121(3):559-81.
93. Saraluck A, Techarang T, Bunyapipat P, Boonchuwong K, Pullaput Y, Mordmuang A. Detection of Microplastics in Human Breast Milk and Its Association with Changes in Human Milk Bacterial Microbiota. *J Clin Med*. 10 juill 2024;13(14):4029.

94. Chartres N, Cooper CB, Bland G, Pelch KE, Gandhi SA, BakenRa A, et al. Effects of Microplastic Exposure on Human Digestive, Reproductive, and Respiratory Health: A Rapid Systematic Review. *Environ Sci Technol*. 31 déc 2024;58(52):22843-64.
95. Sangkham S, Faikhaw O, Munkong N, Sakunkoo P, Arunlertaree C, Chavali M, et al. A review on microplastics and nanoplastics in the environment: Their occurrence, exposure routes, toxic studies, and potential effects on human health. *Mar Pollut Bull*. août 2022;181:113832.
96. Yan Z, Liu Y, Zhang T, Zhang F, Ren H, Zhang Y. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environ Sci Technol*. 4 janv 2022;56(1):414-21.
97. Cetin M, Demirkaya Miloglu F, Kilic Baygutalp N, Ceylan O, Yildirim S, Eser G, et al. Higher number of microplastics in tumoral colon tissues from patients with colorectal adenocarcinoma. *Environ Chem Lett*. avr 2023;21(2):639-46.
98. Atis S, Tutluoglu B, Levent E, Ozturk C, Tunaci A, Sahin K, et al. The respiratory effects of occupational polypropylene flock exposure. *Eur Respir J*. janv 2005;25(1):110-7.
99. Forte M, Iachetta G, Tussellino M, Carotenuto R, Prisco M, De Falco M, et al. Polystyrene nanoparticles internalization in human gastric adenocarcinoma cells. *Toxicol In Vitro*. mars 2016;31:126-36.
100. Stock V, Böhmert L, Lisicki E, Block R, Cara-Carmona J, Pack LK, et al. Uptake and effects of orally ingested polystyrene microplastic particles in vitro and in vivo. *Arch Toxicol*. juill 2019;93(7):1817-33.
101. Stojkovic M, Ortuño Guzmán FM, Han D, Stojkovic P, Dopazo J, Stankovic KM. Polystyrene nanoplastics affect transcriptomic and epigenomic signatures of human fibroblasts and derived induced pluripotent stem cells: Implications for human health. *Environ Pollut*. mars 2023;320:120849.
102. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 29 mars 2021;n71.
103. Amereh F, Amjadi N, Mohseni-Bandpei A, Isazadeh S, Mehrabi Y, Eslami A, et al. Placental plastics in young women from general population correlate with reduced foetal growth in IUGR pregnancies. *Environ Pollut*. déc 2022;314:120174.
104. Wan S, Wang X, Chen W, Wang M, Zhao J, Xu Z, et al. Exposure to high dose of polystyrene nanoplastics causes trophoblast cell apoptosis and induces miscarriage. *Part Fibre Toxicol* [Internet]. 7 mars 2024 [cité 29 juill 2025];21(1). Disponible sur: <https://particleandfibretoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12989-024-00574-w>
105. Zhang M, Zhang Y, Liu T, An C, Sun Y. Microplastic Exposure In Daily Life and the Risk of Pregnancy-Induced Hypertension: A Study on the Association between Environmental Pollutants and Maternal-Fetal Health Outcomes [Internet]. Elsevier BV; 2025 [cité 29 juill 2025]. Disponible sur: <https://www.ssrn.com/abstract=5216618>
106. Wang C, Chang H, Wang H, Li H, Ding S, Ren F. Exposure to microplastics during pregnancy and fetal liver function. *Ecotoxicol Environ Saf*. avr 2025;294:118099.
107. Zhang S, Chen H, Li L, Li Z, Wang D. Exposure to placental microplastic and placental and umbilical cord blood telomere length. *Ecotoxicol Environ Saf*. sept 2025;302:118536.

108. Zhang X, Li L, Zhang Y, Liu B, Wang X, Sun L. Placental microplastics contamination and its impact on thyroid function in newborns. *Ecotoxicol Environ Saf.* oct 2025;304:119056.
109. Liu B, Zheng D, Wang J, Wang D, Zhang S, Chu D. Prenatal microplastic exposure and umbilical cord blood androgenic and glucocorticoid hormones. *Ecotoxicol Environ Saf.* sept 2025;303:118827.
110. Arshad N, Kiran F, Kamran M, Saboor K, Azeem A, Su'ud MB, et al. Microplastic contamination in human breast milk: A disquieting disparity linked to seafood consumption in an economically disadvantaged fishermen community settled along the Karachi coast. *Iran J Fish Sci [Internet].* sept 2024 [cité 3 oct 2025];23(5). Disponible sur: <https://doi.org/10.22092/ijfs.2024.131624>
111. Tian J, Liang L, Li Q, Li N, Zhu X, Zhang L. Association between microplastics in human amniotic fluid and pregnancy outcomes: Detection and characterization using Raman spectroscopy and pyrolysis GC/MS. *J Hazard Mater.* janv 2025;482:136637.
112. Ragusa A, Matta M, Cristiano L, Matassa R, Battaglione E, Svelato A, et al. Deeply in Plasticenta: Presence of Microplastics in the Intracellular Compartment of Human Placentas. *Int J Environ Res Public Health.* 14 sept 2022;19(18):11593.
113. Li J, Wang K, Lin Z, Zhu M, Xu S, Cui Z, et al. Detection and quantification of microplastics in meconium by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *J Chromatogr A.* mai 2025;1749:465868.
114. Braun T, Ehrlich L, Henrich W, Koeppel S, Lomako I, Schwabl P, et al. Detection of Microplastic in Human Placenta and Meconium in a Clinical Setting. *Pharmaceutics.* 22 juin 2021;13(7):921.
115. Liu S, Guo J, Liu X, Yang R, Wang H, Sun Y, et al. Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study. *Sci Total Environ.* janv 2023;854:158699.
116. Li Z, Wang J, Gao X, Du J, Sui H, Wu J, et al. Investigation of Microplastics ($\geq 10 \mu\text{m}$) in Meconium by Fourier Transform Infrared Microspectroscopy. *Toxics.* 27 mars 2023;11(4):310.
117. Zhu M, Li X, Lin W, Zeng D, Yang P, Ni W, et al. Microplastic Particles Detected in Fetal Cord Blood, Placenta, and Meconium: A Pilot Study of Nine Mother–Infant Pairs in South China. *Toxics.* 26 nov 2024;12(12):850.
118. Halfar J, Čabanová K, Vávra K, Delongová P, Motyka O, Špaček R, et al. Microplastics and additives in patients with preterm birth: The first evidence of their presence in both human amniotic fluid and placenta. *Chemosphere.* déc 2023;343:140301.
119. Sun H, Su X, Mao J, Liu Y, Li G, Du Q. Microplastics in maternal blood, fetal appendages, and umbilical vein blood. *Ecotoxicol Environ Saf.* nov 2024;287:117300.
120. Zhang J, Wang L, Trasande L, Kannan K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ Sci Technol Lett.* 9 nov 2021;8(11):989-94.
121. Zurub RE, Bainbridge S, Rahman L, Halappanavar S, El-Chaâr D, Wade MG. Particulate contamination of human placenta: Plastic and non-plastic. *Environ Adv.* oct 2024;17:100555.

122. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, Catalano P, Notarstefano V, Carnevali O, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environ Int.* janv 2021;146:106274.
123. Hasanah U, Amqam H, Septami AE, Chalid M, Aris AZ. Plasticizing Pregnancy: Microplastics Identified in Expectant Mothers' Feces. *Environ Health Insights* [Internet]. janv 2024 [cité 29 juill 2025];18. Disponible sur: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/11786302241235810>
124. Garcia MA, Liu R, Nihart A, El Hayek E, Castillo E, Barrozo ER, et al. Quantitation and identification of microplastics accumulation in human placental specimens using pyrolysis gas chromatography mass spectrometry. *Toxicol Sci.* 29 avr 2024;199(1):81-8.
125. Yun X, Liang L, Tian J, Li N, Chen Z, Zheng Y, et al. Raman-guided exploration of placental microplastic exposure: Unraveling the polymeric tapestry and assessing developmental implications. *J Hazard Mater.* sept 2024;477:135271.
126. Weingrill RB, Lee MJ, Benny P, Riel J, Saiki K, Garcia J, et al. Temporal trends in microplastic accumulation in placentas from pregnancies in Hawai'i. *Environ Int.* oct 2023;180:108220.
127. Liu S, Liu X, Guo J, Yang R, Wang H, Sun Y, et al. The Association Between Microplastics and Microbiota in Placentas and Meconium: The First Evidence in Humans. *Environ Sci Technol.* 21 nov 2023;57(46):17774-85.
128. Vandembroucke JP, Poole C, Schlesselman JJ, Egger M. Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE): Explanation and Elaboration. *PLoS Med.* 2007;4(10).
129. Higgins JPT, Morgan RL, Rooney AA, Taylor KW, Thayer KA, Silva RA, et al. A tool to assess risk of bias in non-randomized follow-up studies of exposure effects (ROBINS-E). *Environ Int.* avr 2024;186:108602.
130. Braun T, Ehrlich L, Henrich W, Koepfel S, Lomako I, Schwabl P, et al. Detection of Microplastic in Human Placenta and Meconium in a Clinical Setting. *Pharmaceutics.* 22 juin 2021;13(7):921.
131. Hasanah U, Amqam H, Septami AE, Chalid M, Aris AZ. Plasticizing Pregnancy: Microplastics Identified in Expectant Mothers' Feces. *Environ Health Insights.* janv 2024;18:11786302241235810.
132. O'Brien S, Rauert C, Ribeiro F, Okoffo ED, Burrows SD, O'Brien JW, et al. There's something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *Sci Total Environ.* mai 2023;874:162193.
133. Lv J, He Q, Yan Z, Xie Y, Wu Y, Li A, et al. Inhibitory Impact of Prenatal Exposure to Nano-Polystyrene Particles on the MAP2K6/p38 MAPK Axis Inducing Embryonic Developmental Abnormalities in Mice. *Toxics.* 17 mai 2024;12(5):370.
134. Huang T, Zhang W, Lin T, Liu S, Sun Z, Liu F, et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics during gestation and lactation induces hepatic and testicular toxicity in male mouse offspring. *Food Chem Toxicol.* févr 2022;160:112803.
135. Chen Z, Zheng M, Wan T, Li J, Yuan X, Qin L, et al. Gestational exposure to nanoplastics disrupts fetal development by promoting the placental aging via ferroptosis of syncytiotrophoblast. *Environ Int.* mars 2025;197:109361.

136. Zhang R, Feng Y, Nie P, Wang W, Wu H, Wan X, et al. Polystyrene microplastics disturb maternal glucose homeostasis and induce adverse pregnancy outcomes. *Ecotoxicol Environ Saf.* juill 2024;279:116492.
137. Magosso N, Souza PV, Moreira MF, Rocha VA, Fioretto MN, Pinha VC, et al. Maternal exposure to phthalates and nanoplastics, isolated or combined: Impacts on placental structure, development, and antioxidant defense as a trigger for maternal-fetal adversities. *Reprod Toxicol.* 1 août 2025;135:108930.
138. De Sousa AKA, Pires KSN, Cavalcante IH, Cavalcante ICL, Santos JD, Queiroz MIC, et al. Polystyrene microplastics exposition on human placental explants induces time-dependent cytotoxicity, oxidative stress and metabolic alterations. *Front Endocrinol.* 20 nov 2024;15:1481014.
139. Chortarea S, Gupta G, Saarimäki LA, Netkueakul W, Manser P, Aengenheister L, et al. Transcriptomic profiling reveals differential cellular response to copper oxide nanoparticles and polystyrene nanoplastics in perfused human placenta. *Environ Int.* juill 2023;177:108015.
140. Subramanian D, Ponnusamy Manogaran G, Dharmadurai D. A systematic review on the impact of micro-nanoplastics on human health: Potential modulation of epigenetic mechanisms and identification of biomarkers. *Chemosphere.* sept 2024;363:142986.
141. Verner MA, Loccisano AE, Morken NH, Yoon M, Wu H, McDougall R, et al. Associations of Perfluoroalkyl Substances (PFAS) with Lower Birth Weight: An Evaluation of Potential Confounding by Glomerular Filtration Rate Using a Physiologically Based Pharmacokinetic Model (PBPK). *Environ Health Perspect.* déc 2015;123(12):1317-24.
142. Hu CY, Qiao JC, Gui SY, Xu KX, Dzhambov AM, Zhang XJ. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and hypertensive disorders of pregnancy: A systematic review and meta-analysis. *Environ Res.* août 2023;231:116064.
143. Martínez-Razo LD, Almeida-Aguirre EKP, Bobadilla-Bravo M, Mancilla-Herrera I, Martínez-Ibarra A, Cerbón M. Mono(2-Ethylhexyl) Phthalate Induces Inflammatory and Angiogenic Alterations Mediated by the PI3K / AKT Pathway in HTR -8/ SVNEO Trophoblastic Cells. *Environ Toxicol.* 26 sept 2025;tox.24570.
144. Basak S, Srinivas V, Duttaroy AK. Bisphenol-A impairs cellular function and alters DNA methylation of stress pathway genes in first trimester trophoblast cells. *Reprod Toxicol.* déc 2018;82:72-9.
145. Gong C, Chu M, Yang J, Gong X, Han B, Chen L, et al. Ambient fine particulate matter exposures and human early placental inflammation. *Environ Pollut.* déc 2022;315:120446.
146. Dietary and Inhalation Exposure to Nano- and Microplastic Particles and Potential Implications for Human Health. 1st ed. Geneva: World Health Organization; 2022. 1 p.
147. Bailleux Timothé. Déterminants comportementaux et environnementaux de l'exposition domestique aux micro- et nanoplastiques (MNPs) chez les femmes enceintes : approche qualitative. Université de Lille; 2025.
148. FILOMENE | France Cohortes [Internet]. 2025 [cité 23 oct 2025]. Disponible sur: <https://francecohortes.org/cohortes/annuaire-des-cohortes/FILOMENE>
149. Destoumieux-Garzón D, Mavingui P, Boetsch G, Boissier J, Darriet F, Duboz P, et al. The One Health Concept: 10 Years Old and a Long Road Ahead. *Front Vet Sci.* 12 févr 2018;5:14.

150. Zinsstag J, Ford A, Jukola S, Bukachi S, Degeling C, Whittaker M, et al. Integrated approaches to health: A paradigmatic, methodological and operational comparison of EcoHealth, One Health and Planetary Health. CABI One Health. 7 oct 2025;0029.
151. McBride CM, Emmons KM, Lipkus IM. Understanding the potential of teachable moments: the case of smoking cessation. Health Educ Res. 1 avr 2003;18(2):156-70.
152. Projet FEES – Femmes Enceintes Environnement et Santé [Internet]. [cité 23 oct 2025]. Disponible sur: <https://www.projetfees.fr/>
153. Règlement (UE) 2023/... de la Commission du 25 septembre 2023 modifiant l'annexe XVII du règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne les microparticules de polymère synthétique.
154. Ministère de la transition écologique. Loi anti-gaspillage pour une économie circulaire. 2021.
155. Directive (UE) 2019/ du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement.

Annexes

Annexe 1 : Grille d'évaluation de la qualité du reporting pour les études épidémiologique (STROBE)

Référence	Domaine	Définition	Question pratique	Respecté	Commentaire
	1. Titre et résumé	Titre précis et résumé équilibré indiquant le design et les résultats clés.	Le titre et le résumé indiquent-ils le design et les résultats clés ?		
	2. Contexte scientifique (Introduction)	Contexte scientifique et justification de l'étude clairement exposés.	Le contexte scientifique est-il clair et justifié ?		
	3. Objectifs (Introduction)	Objectifs spécifiques et hypothèses préalables formulés.	Les objectifs sont-ils clairs et complets ?		
	4. Design de l'étude (Méthodes)	Présentation claire des éléments clés du design.	Le design est-il clairement décrit ?		
	5. Cadre et lieu de l'étude	Description du lieu, période de recrutement, exposition et collecte.	Le lieu et la période sont-ils bien décrits ?		
	6. Participants : critères d'inclusion/exclusion	Critères d'éligibilité, méthodes de sélection et suivi.	Les critères de sélection sont-ils explicites ?		
	7. Variables : définition claire	Définir clairement exposition, outcome, confounders, modificateurs.	Les variables clés sont-elles bien définies ?		
	8. Sources de données et méthodes de mesure	Sources de données et méthodes de mesure détaillées.	Les méthodes de mesure sont-elles détaillées ?		
	9. Biais : description et contrôle	Décrire toute méthode pour réduire ou contrôler les biais.	Les biais potentiels sont-ils décrits et contrôlés ?		
	10. Taille de l'échantillon	Expliquer comment la taille de l'échantillon a été déterminée.	La taille d'échantillon est-elle justifiée ?		
	11. Variables quantitatives : gestion	Préciser comment les variables quantitatives ont été traitées.	Les variables quantitatives sont-elles traitées clairement ?		
	12. Méthodes statistiques complètes	Décrire toutes les méthodes statistiques utilisées.	Les méthodes statistiques sont-elles détaillées ?		
	13. Participants : description et diagramme de flux	Rapporter le nombre à chaque étape + diagramme si pertinent.	Le flux des participants est-il rapporté ?		
	14. Données descriptives : caractéristiques et données manquantes	Caractéristiques des participants et données manquantes précisées.	Les caractéristiques et données manquantes sont-elles claires ?		
	15. Données de résultats : exposés de façon appropriée	Résultats détaillés pour chaque variable clé.	Les résultats sont-ils détaillés et clairs ?		
	16. Résultats principaux : estimations et précision	Estimation brute et ajustée avec intervalle de confiance.	Les estimations sont-elles présentées avec précision ?		
	17. Autres analyses : sous-groupes, interactions	Autres analyses : sous-groupes, interactions, sensibilité.	Les autres analyses sont-elles rapportées ?		
	18. Discussion : résumé des résultats clés	Résumer les résultats en lien avec les objectifs.	Les résultats sont-ils bien résumés par rapport aux objectifs ?		
	19. Discussion : limites et biais potentiels	Discuter les limites et biais possibles, ampleur et direction.	Les limites et biais sont-ils discutés ?		
	20. Discussion : interprétation globale	Interprétation globale prudente et mise en perspective.	L'interprétation est-elle globale et prudente ?		
	21. Discussion : généralisabilité/externalité	Discuter la généralisabilité des résultats.	La généralisabilité est-elle discutée ?		
	22. Autre : financement et rôle des financeurs	Indiquer sources de financement et rôle des financeurs.	Le financement est-il clairement indiqué ?		
Score total					

Annexe 2 : Grille d'évaluation du risque de biais pour les études épidémiologique (ROBIN-E)

Référence	Domaine	Définition	Question pratique	Respecté	Commentaire	Niveau de risque de biais
	1. Biais de confusion	Contrôle de tous les facteurs confondants importants, mesure valide et fiable des confounders.	Les facteurs confondants majeurs sont-ils bien contrôlés et mesurés de façon fiable ?			
	2. Biais lié à la sélection des participants	Sélection appropriée des participants ou de l'analyse, absence de biais de sélection (collider).	La sélection des participants ou des sous-groupes est-elle exempte de biais de sélection ?			
	3. Biais lié à la mesure de l'exposition	Qualité, validité, absence d'erreur systématique ou différentielle dans la mesure de l'exposition.	La mesure de l'exposition est-elle précise, valide et sans erreur de classification ?			
	4. Biais dû aux interventions post-exposition	Présence d'interventions post-exposition influencées par l'exposition initiale et contrôle approprié.	Des interventions post-exposition sont-elles présentes et correctement prises en compte ?			
	5. Biais dû aux données manquantes	Disponibilité complète des données sur l'exposition, le résultat et les confounders ; gestion correcte de l'imputation.	Les données manquantes sont-elles expliquées et traitées correctement ?			
	6. Biais lié à la mesure du résultat	Exactitude et objectivité de la mesure du résultat, absence de biais différentiel lié à l'exposition.	Le résultat est-il mesuré de façon fiable et indépendant de l'exposition ?			
	7. Biais de sélection du résultat rapporté	Sélection transparente des résultats parmi les multiples analyses possibles ; cohérence avec le protocole annoncé.	Le résultat rapporté reflète-t-il fidèlement toutes les analyses prévues ?			
					Conclusion	

Annexe 3 : Liste de contrôle PRISMA 2020

Section et thème	Item N°	Item de la liste de contrôle	Page où l'item est signalé
TITRE			
Titre	1	Identifier le rapport comme une revue systématique.	1ère couverture
RÉSUMÉ			
Résumé	2	Voir la liste de contrôle PRISMA 2020 pour les résumés.	Résumé
INTRODUCTION			
Justification	3	Décrire la justification de la revue dans le contexte des connaissances actuelles.	1-2
Objectifs	4	Fournir un énoncé explicite de l'objectif ou de la question que la revue aborde.	2
MÉTHODES			
Critères d'éligibilité	5	Préciser les critères d'inclusion et d'exclusion de la revue et la manière dont les études ont été regroupées pour les synthèses.	14-15
Sources d'information	6	Préciser toutes les bases de données, registres d'essais, sites web, organisations, références bibliographiques et autres sources recherchées ou consultées pour identifier les études. Spécifier la date à laquelle chaque source a été recherchée ou consultée pour la dernière fois.	16
Stratégie de recherche documentaire	7	Présenter les stratégies de recherche complètes pour toutes les bases de données, tous les registres et tous les sites web, y compris les filtres et les limites utilisés.	16
Processus de sélection	8	Préciser les méthodes utilisées pour décider si une étude répond aux critères d'inclusion de la revue, y compris le nombre d'évaluateurs qui ont examiné chaque document et chaque rapport récupéré, s'ils ont travaillé indépendamment et, le cas échéant, les détails des outils d'automatisation utilisés dans le processus.	16
Processus de collecte des données	9	Préciser les méthodes utilisées pour collecter les données des rapports, y compris le nombre d'évaluateurs qui ont collecté les données de chaque rapport, s'ils ont travaillé de manière indépendante, les processus d'obtention ou de confirmation des données auprès des investigateurs de l'étude et, le cas échéant, les détails des outils d'automatisation utilisés dans le processus.	16
Éléments de données	10a	Lister et définir tous les critères de jugement pour lesquels des données ont été recherchées. Préciser si tous les résultats compatibles avec chaque domaine des critères de jugement de chaque étude ont été recherchés (par exemple, pour toutes les mesures, tous les points de mesure, toutes les analyses) et, dans la négative, les méthodes utilisées pour décider des résultats à collecter.	15
	10b	Lister et définir toutes les autres variables pour lesquelles des données ont été recherchées (par exemple, les caractéristiques des participants et de l'intervention, les sources de financement). Décrire les hypothèses formulées à propos des informations manquantes ou imprécises.	15
Évaluation du risque de biais de l'étude	11	Préciser les méthodes utilisées pour évaluer le risque de biais dans les études incluses, y compris les détails de l'outil ou des outils utilisés, le nombre d'évaluateurs qui ont évalué chaque étude et s'ils ont travaillé indépendamment, et le cas échéant, les détails des outils d'automatisation utilisés dans le processus.	17-19
Mesures de l'effet	12	Préciser pour chaque critère de jugement la ou les mesures d'effet (par exemple, risque relatif, différence de moyennes) utilisées dans la synthèse ou la présentation des résultats.	Non fait dans M&M – difficilement anticipable
Méthodes de synthèse	13a	Décrire les processus utilisés pour décider quelles études étaient éligibles pour chaque synthèse (par exemple, tabulation des caractéristiques de l'intervention de l'étude et comparaison avec les groupes prévus pour chaque synthèse (item 5)).	Non fait dans M&M – difficilement anticipable
	13b	Décrire les méthodes nécessaires pour préparer les données en vue de la présentation ou de la synthèse, telles que le traitement des statistiques récapitulatives manquantes ou les conversions de données.	Hétérogénéité trop grande pour l'anticiper
	13c	Décrire les méthodes utilisées pour présenter sous forme de tableau ou de graphique les résultats des études individuelles et des synthèses.	16-19
	13d	Décrire les méthodes utilisées pour synthétiser les résultats et justifier le(s) choix. Si une méta-analyse a été réalisée, décrire le(s) modèle(s), la(les) méthode(s) permettant d'identifier la présence et l'étendue de l'hétérogénéité statistique, et le(s) logiciel(s) utilisé(s).	18-19
	13e	Décrire les méthodes utilisées pour explorer les causes possibles de l'hétérogénéité des résultats des études (par exemple, analyse des sous-groupes, méta-régression).	Non valable
	13f	Décrire les analyses de sensibilité effectuées pour évaluer la robustesse des résultats synthétisés.	17-19

Évaluation du biais de notification	14	Décrire les méthodes utilisées pour évaluer le risque de biais dû aux résultats manquants dans une synthèse (résultant de biais de notification).	19 - qualitatif
Évaluation du niveau de confiance	15	Décrire les méthodes utilisées pour évaluer le niveau de confiance dans l'ensemble des données probantes relatives à un critère de jugement.	17-19
RÉSULTATS			
Sélection de l'étude	16a	Décrire les résultats du processus de recherche et de sélection, depuis le nombre des documents identifiés lors de la recherche jusqu'au nombre d'études incluses dans la revue, de préférence à l'aide d'un diagramme de flux.	17
	16b	Citer les études qui pourraient sembler répondre aux critères d'inclusion, mais qui ont été exclues, et expliquer pourquoi elles ont été exclues.	Aucune
Caractéristiques des études	17	Citer chaque étude incluse et présenter ses caractéristiques.	19-21
Risque de biais dans les études	18	Présenter les évaluations du risque de biais pour chaque étude incluse.	67-68
Résultats des études individuelles	19	Pour tous les critères de jugements, présenter, pour chaque étude : (a) des statistiques sommaires pour chaque groupe (le cas échéant) et (b) une estimation de l'effet et sa précision (par exemple, intervalle de confiance/crédibilité), idéalement à l'aide de tableaux ou de graphiques structurés.	Annexes 5-6-7-8 Tableaux IX-X-XI-XII-XIII
Résultats des synthèses	20a	Pour chaque synthèse, résumer brièvement les caractéristiques et le risque de biais des études participantes.	+/- 31-68
	20b	Présenter les résultats de toutes les synthèses statistiques réalisées. Si une méta-analyse a été réalisée, présenter pour chacune l'estimation globale et sa précision (par exemple, l'intervalle de confiance/crédibilité) et les mesures de l'hétérogénéité statistique. Si vous comparez des groupes, décrivez la direction de l'effet.	31-68
	20c	Présenter les résultats de toutes les recherches sur les causes possibles de l'hétérogénéité des résultats des études.	+/- 31-68
	20d	Présenter les résultats de toutes les analyses de sensibilité effectuées pour évaluer la robustesse des résultats synthétisés.	31-68
Biais de notification	21	Présenter les évaluations du risque de biais dû aux résultats manquants (résultant des biais de notification) pour chaque synthèse évaluée.	65-66
Niveau de confiance des données probantes	22	Présenter les évaluations du niveau de confiance dans l'ensemble des données probantes pour chaque critère de jugement évalué.	Non valable
DISCUSSION			
Discussion	23a	Fournir une interprétation générale des résultats dans le contexte d'autres données probantes.	69
	23b	Discuter des limites éventuelles des données probantes incluses dans la revue.	79-81
	23c	Discuter des limites éventuelles des processus de la revue utilisés.	81-82
	23d	Discuter des implications des résultats pour la pratique, la politique et la recherche future.	82-88
AUTRES INFORMATIONS			
Enregistrement et protocole	24a	Fournir les informations relatives à l'enregistrement de la revue, y compris le nom du registre et le numéro d'enregistrement, ou indiquer que la revue n'a pas été enregistrée.	Pré enregistrée, à valider
	24b	Indiquer où le protocole de la revue peut être consulté où préciser qu'aucun protocole n'a été préparé.	PROSPERO (pas encore disponible)
	24c	Décrire et expliquer toute modification apportée aux informations fournies lors de l'enregistrement ou dans le protocole.	Non valable
Soutien	25	Décrire les sources de soutien financier ou non financier pour la revue et le rôle des bailleurs de fonds ou des sponsors dans la revue.	Aucun
Déclaration d'intérêts	26	Déclarer les conflits d'intérêts des auteurs de la revue.	Aucun
Disponibilité des données, du code et d'autres matériels	27	Indiquer quels sont les éléments suivants qui sont accessibles au public et où ils peuvent être trouvés : modèles de formulaires de collecte de données ; données extraites des études incluses ; données utilisées pour toutes les analyses ; code analytique ; tout autre matériel utilisé dans le cadre de la revue.	Tout est disponible dans ce document (hormis les tableaux des biais et du reporting)

Annexe 4 : Protocoles de recueil et de traitement des matrices biologiques

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Ragusa 2021 (Italie) (4)	KOH 10% T° ambiante 7j Filtration GF/A 1,6 µm Séchage à T° ambiante	6 placentas sectionnés en 3 portions ~23,3 ± 5,7 g (face maternel, face fœtale et membranes amniotiques puis stockés dans des flacons en verre à couvercle métallique à -20 °C Protocole sans plastique : <i>outils métalliques, gants et blouses en coton, serviettes en coton dans la salle d'accouchement, aucune utilisation de sacs ou instruments plastiques avant clampage du cordon</i> Surfaces de travail nettoyées à l'éthanol 70% Tous les liquides (eau déionisée, solution KOH) filtrés (1,6 µm) Manipulations réalisées en conditions aseptisées (sans hotte à flux laminaire)	<u>Blancs procéduraux</u> : Exclusion des fibres plastiques observées dans les échantillons en raison de l'absence de hotte à flux laminaire <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 80 % Hit Quality Index (HQI)
Braun 2021 (Allemagne) (130)	H ₂ O ₂ 30 % 25 °C puis NaOH 0.05 M 25 °C 5–7 semaines en tout Tamisage 50 µm inox Filtration Anodisc 0.2 µm Séchage 60 °C une nuit	2 échantillons de chaque matrice : placenta, méconium, selles maternelles Analyses réalisées en salle blanche : air entrant filtré à 34 µm, ventilation séparée, accès restreint Personnel formé, port de blouses en coton, utilisation de matériaux non plastiques (verre, métal, aluminium) Rinçage à l'eau ultrapure 3 fois, séchage 2 h à 100 °C Surface de travail désinfectée et protégée par papier aluminium Hotte laminaire stérile utilisée pour toutes manipulations	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Blancs environnementaux</u> : 16 matériaux chirurgicaux testés → détection de PE, PP, PET <u>Contrôle d'air pendant 10 min</u> : PU détecté
Zhang 2021 (USA) (120)	Lyophilisation, broyage au mortier/pilon en inox, tamisage (maille 2 mm) Dépolymérisation alcaline	3 méconiums prélevés à partir de couches du programme NYU Children's Health and Environment Study (2019) transférée dans récipient en PP et conservé à -80 °C Fioles chauffées à 450 °C pendant 12 h avant utilisation	<u>Blancs procéduraux</u> : PET détecté à 1600 ± 87 ng/g (poids sec), PC non détecté (Soustraction du fond effectuée pour PET) <u>Rendement moyen de récupération</u> : >95 %
Ragusa 2022a (Italie) (112)	Fixation au glutaraldéhyde 2,5 % à 4 °C ≥ 48 h – Post-fixation au tétr oxyde d'osmium 2 % à 4 °C, 2 h Incubation dans acide tannique 1 % T° ambiante 40 min Déshydratation à l'éthanol puis immersion dans oxyde de propylène, puis résine Agar 100 à 60 °C 48h	Protocole sans plastique : <i>matériel métallique, verrerie, gants et draps en coton, pinces et scalpels métalliques, récipients en verre</i> Collecte placentaire sous conditions aseptiques puis transport immédiat dans des conteneurs métalliques sur glace, dans les 10 min suivant l'accouchement Échantillonnage exclusivement dans la portion intra-parenchymateuse pour éviter toute contamination externe Stockage des échantillons à 0–7 °C jusqu'à l'analyse	Utilisation de protocoles validés et publiés précédemment (Ragusa 2021)

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Ragusa 2022b (Italie) (57)	KOH 10 % 40 °C 48 h Filtration GF/A (1,6 µm)	Recueil manuel de 4g de lait Verrerie stérilisée, gants latex, blouse coton Filtration GF/A 1,6 µm pour toutes solutions Surfaces nettoyées à l'éthanol 70 % Eau déionisé pour rinçages	<u>Blancs procéduraux négatifs</u> <u>Blancs environnementaux</u> : fibres >500 µm, trop grosses pour être transférées au lait <u>Correspondance spectrale minimale</u> <u>pour identification</u> : ≥ 80 % HQI
Amereh 2022 (Iran) (103)	KOH 10 % T° ambiante 7j Filtration Whatman™ 1,6 µm	Placentas ~250 ± 33,7 g collectés dans un conteneur métallique, sectionnés en 3 portions : face maternelle, face fœtale, membranes Conservés dans des flacons en verre à couvercle métallique à -20 °C Protocole sans plastique : <i>gants en coton (intérieurs en caoutchouc pour les soignants), draps et serviettes en coton pré-lavé, aucun sac gradué ni matériel plastique utilisé pendant l'accouchement, pinces métalliques pour clamper le cordon ombilical, verrerie nettoyée trois fois à l'eau ultrapure, analystes portant des gants coton.</i>	<u>Blancs procéduraux</u> (eau ultrapure sans tissu traitée selon la même procédure) : négatif
Weingrill 2023 (USA) (126)	KOH 10 % 7j à T° ambiante (flacons en verre fermés) Filtration GF/A 1,6 µm Séchage à T° ambiante et stockage dans des contenants métalliques	50 g de tissu placentaire provenant de 2 cotylédons Échantillons archivés (2006, 2013) conservés à -80 °C dans tubes en PE Échantillons prospectifs (2021) collectés selon protocole évitant tout contact avec le plastique (usage exclusif d'instruments et de contenants en inox et verre) Procédure en enceinte stérile Utilisation de solutions filtrées sur sur GF/A 1,6 µm	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Blancs environnementaux</u> : fibres exclues de l'analyse finale
Halfar 2023 (Tchéquie) (118)	KOH 30 % (liquide amniotique, 24h, T° ambiante) KOH 10 % (placenta, 2 h à 37 °C puis 22 h à T° ambiante Filtration fibres de verre 1 µm Séchage en boîtes de Petri en verre, 1 semaine sous dessiccateur	Protocole sans plastique : <i>seringues en verre borosilicaté, aiguilles en acier chirurgical, tubes et boîtes en verre avec bouchons en caoutchouc, utilisation de matériel en verre ou métal, blouses et gants en matériaux non plastiques</i> Conservation à 4 °C, à l'abri de la lumière Eau distillée, éthanol, solutions de KOH filtrés (< 1 µm) avant usage Ventilation coupée, portes et fenêtres fermées ; accès restreint au personnel pendant la manipulation Nettoyage préalable des surfaces avec chiffon coton et éthanol	<u>Blancs procéduraux</u> : 6 boîtes de Petri ouvertes placées à proximité pendant le traitement des échantillons = 7 particules (6 fibres, 1 fragment) détectées <u>Correspondance spectrale minimale</u> <u>pour identification</u> : ≥ 60 % HQI Exclusion systématique des fibres pour éviter contamination atmosphérique

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Zhu 2023 (Chine) (76)	KOH 10 %, 50 °C, 3j Filtration inox 10 µm Formiate de potassium + ultrason 30 min, filtration répétée (3x) Concentration à éthanol anhydre (0,5 mL)	17 placentas conservé à -20 °C Découpés en petits morceaux dans des bécchers en verre Procédure sans plastique : <i>Aucun matériau plastique utilisé (récipients, emballages, équipements), utilisation de verre, blouses en coton, gants en nitrile</i> Rinçage du matériel 3x à l'eau ultrapure + séchage en étuve Travail sous hotte aspirante	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs Rendement moyen de récupération : 88,00 ± 10,58 % <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : > 90 % HQI (base Agilent + base interne de polymères vieillis)
Li 2023 (Chine) (116)	Lyophilisés (-53 °C) puis broyés Éther + alcool avec ultrasons répétés jusqu'à solution incolore Séchage sous azote HNO ₃ 65 % incubation nocturne à froid puis digestion 4 h à 80 °C H ₂ O ₂ 30 % à 80 °C 30 min Filtration inox 10 µm Rinçage à 70 °C Séchage à l'air ou à 50 °C	37 échantillons collectés, 16 analysés Utilisation d'eau ultrapure Matériel en verre préalablement lavé et séché Échantillons manipulés en salle isolée, propre, sans fenêtre et à accès restreint Port de blouses en coton et gants en latex naturel Personnel formé à la collecte et au traitement des échantillons	<u>Blancs procéduraux</u> (avec contrôle de couche) : négatifs <u>Rendement moyen de récupération</u> : 84,69 ± 12,38 % (50 µm) et 66,80 ± 15,26 % (200 µm) <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 70% HQI (Omic et Bruker)
Liu 2023a (Chine) (115)	HNO ₃ 68 %, T° ambiante, 48h, puis chauffage à 95 °C ≥ 3 h Filtration inox 13 µm sous vide Rinçage à l'eau ultrapure et à l'éthanol (> 99,7 %) + Ultrason 40 kHz ≥ 30 min Concentration éthanol à 200 µL	18 placentas et 12 méconiums collectés en salle d'accouchement stériles et stockés à -80 °C dans des flacons de verre à couvercle métallique Environnement stérile et protocole sans plastique (<i>gants coton, pinces métalliques, conteneurs en métal ou verre</i>) Tous les réactifs (eau ultrapure, HNO ₃ , éthanol absolu) filtrés sur membranes inox 13 µm avant utilisation Matériel rincé 3x à l'éthanol absolu avant emploi	<u>Taux de récupération</u> (sols contaminés) : PP 96 %, PE 97 %, PS 96 %, PET 91 %, PVC 87 %, PU 84 % <u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 65 % HQI (Agilent)
Liu 2023b (Chine) (127)		<i>A noter : Les réactifs ne pouvaient être utilisés que si ≤ 3 particules de MPs détectées et si le taux de correspondance spectrale < 65 %</i>	
Zhu 2024 (Chine) (117)	Lyophilisation H ₂ O ₂ 30 % 70 °C 3 h HNO ₃ 60 % 2 h Filtration fibre de verre 1 µm	Placenta (portion fœtale proche du cordon), sang de cordon (prélevé par seringue stérile), méconium (prélevé sur couche avec coton-tige en bois, <24 h après naissance) Stockage : -80 °C Matériaux utilisés non plastiques (inox, verre, coton) Tous les réactifs (H ₂ O ₂ , HNO ₃ , eau ultrapure, éthanol) filtrés sur membrane fibre de verre 1 µm avant usage Outils de prélèvement rincés 3× à l'éthanol anhydre puis 3× à l'eau ultrapure	<u>Blancs procéduraux</u> : très peu de MPs détectés <u>Rendement moyen de récupération</u> : 80 à 110 % <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 40% HQI (WiRE 3.4)

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Zurub 2024 (Canada) (121)	H ₂ O ₂ 30 % 55 °C 11j Filtration GF/D 2,7 µm préchauffée à 55 °C, rinçage à l'eau désionisée Séchage dans des boîtes de Pétri en verre sous hotte	Placentas prélevés sous conditions stériles immédiatement après l'accouchement transporté dans un conteneur métallique scellé, sur glace, vers le laboratoire (≤ 1 h), stockage à -20 °C Microdissection de 3 régions par placenta de 1 g chacune Protocole "plastic-reduced" : <i>substitution de la majorité des matériels plastiques par des équivalents non plastiques (verre, métal, coton, laine, lin), vêtements et blouses en fibres naturelles, gants nitriles</i> Rinçage systématique de tous les contenants et verreries à l'eau désionisée filtrée 0,7 µm Aucune présence de plastique autorisée dans la hotte	<u>Blancs procéduraux</u> : flacons traités comme les échantillons sans ajout de tissu, pour vérifier la contamination lors du traitement chimique et de la filtration. Négatifs <u>Blancs environnementaux</u> : seul le drap chirurgical a libéré 3 particules de PP/30 ml
Yun 2024 (Chine) (125)	KOH 15 % 40 °C 48 h Filtration fibre en verre (taille NR)	Échantillons prélevés au centre de la plaque basale du placenta après l'accouchement, à l'aide de gants en latex stériles : 10 g de tissu placentaire prélevés, puis 2 g transférés dans un flacon en verre scellé Aucune utilisation de matériaux plastiques (verre ou métal stérile) Opérations effectuées dans une salle à flux laminaire ISO 5 Blouses, gants, masques et charlottes en coton Décontamination du verre à 450 °C pendant 6h avant usage Nettoyage des surfaces et instruments avec eau ultrapure et éthanol	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs
Garcia 2024 (USA) (124)	KOH 10% 40°C 72 h Ultracentrifugation 4 h Lavage 3× à l'éthanol 100 % Séchage 24 h à température ambiante	Placenta (0,4 g) collecté sous conditions stériles retirant la décida et les membranes pour éviter contamination puis conservé à -80°C Utilisation de verrerie	<u>Blancs procéduraux et environnementaux</u> : négatifs
Wan 2024 (Chine) (104)	KOH 10% T°ambiante 48 h Filtration fibre de verre (0,22 µm) Séchage à 110°C 2 h	2g de villosités choriales collectés avec instruments métalliques Nettoyage du matériel à l'eau ultrapure Stockage : récipients en verre avec couvercles en bois à -80 °C Vêtements de laboratoire : blouses, masques et charlottes en coton ; gants latex à usage unique Manipulation dans des zones exemptes de plastiques visibles	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Rendement moyen de récupération après digestion</u> : > 90 % Identification confirmée par spectres de référence du styrène monomère et trimère
Xue 2024 (Chine) (8)	HNO ₃ 95°C 3H Filtration inox 13 µm	Gants en nitrile, blouses coton Sous conditions aseptiques, aiguille acier 20G, seringue en verre Échantillons souillés (sang, méconium) écartés Stockage flacons en verre + bouchon PTFE, conservation à -20 °C Verrerie stérilisés à la flamme avant usage	<u>Contrôle blanc</u> non détaillé : négatif

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Sun 2024 (Chine) (119)	HNO ₃ 48 h (prolongée de 24 h si nécessaire) 60 °C Filtration inox 13 µm Lavage répété : eau ultrapure + éthanol Ultrason Séchage et concentration à ~150 µL	Protocole sans plastique appliqué du prélèvement à l'analyse <i>Sang maternel : extraction avec aiguille et tube sous vide jetables</i> <i>Liquide amniotique et sang ombilical : extraction à la seringue 5 mL</i> <i>Collecte en salle propre, verrerie utilisée (pipettes Pasteur, béchers, flacons)</i> <i>Blouses en coton, gants en nitrile, masques au charbon actif</i> <i>Linges chirurgicaux en coton</i> Réactifs (éthanol, acide nitrique) filtrés 3 fois avant usage	<u>Blancs procéduraux et environnementaux</u> : NR <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 80% HQI (Agilent)
Hasanah 2024 (Indonésie) (123)	Phénol 1 % + eau distillée 60 °C 48 h sous couvercle en aluminium Séchage et broyage puis transféré dans un flacon en verre Puis KOH 10 % 2 semaines	25 g de selles fraîches collectées dans un flacon en verre muni d'un couvercle en aluminium Tous les matériaux utilisés (cuillères, flacons, verrerie) étaient en verre et recouverts d'aluminium Nettoyage systématique des instruments à l'eau distillée avant chaque utilisation	<u>Blancs environnementaux</u> : négatifs
Saraluck 2024 (Thaïlande) (93)	KOH 10 % 40 °C 48 h Filtration 1,6 µm (type NR)	Protocole sans plastique non détaillé Recueil manuel aseptique (chlorhexidine 2%, contenant NR) Première fraction jetée, port de gants stériles (type NR), conservation à -20 °C (contenant NR)	NR
Arshad 2024 (Pakistan) (110)	KOH 10 % T° ambiante 48 h Filtration GF/A (1,6 µm)	Recueil manuel à domicile sous contrôle médical, stockage flacons en verre à -20 °C Verrerie et acier inoxydable, surfaces nettoyées à l'éthanol 70 % Filtration 1,6 µm pour toutes solutions Eau déionisée pour rinçages Vérification microscopique préalable des filtres	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Blancs environnementaux</u> : 20 fibres de 650–4 500 µm, trop grosses pour être transférées au lait <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> : ≥ 70% HQI
Zhang 2024 (Chine) (105)	<u>Avant pyrolyse</u> : HNO ₃ 40°C 48h Filtration fibre de verre Aliquots 375 µL <u>Pour MEB</u> : Réactif de Fenton (FeSO ₄ + H ₂ O ₂ , 40 °C) Filtration cellulose (0,45 µm) HNO ₃ 50°C 30 min puis 70°C 10 min puis filtration PTFE (0,45) µm	Évitement de matériaux plastiques durant le prélèvement et le stockage Échantillons stockés et transportés dans des contenants en métal ou en verre Conservation immédiate à 4 °C, puis congélation à -80 °C	NR

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Li 2025 (Chine) (113)	Lyophilisation 0,1 g de méconium Ajout de 1 mL d'eau ultrapure + 1 mL d'HNO ₃ 68 % 60 °C (1 h) → 70 °C (1 h) → 80 °C (1 h) → 90 °C (4 h) Filtration argent 0,45 µm sous vide Rinçage à l'éthanol ≥ 6 fois Séchage, puis transfert direct du filtre dans une cupule de pyrolyse	Méconium (n = 60) avec coton-tige sur couches dans les 24–48 h après la naissance puis stocké à –80 °C Rinçage du matériel de laboratoire à l'éthanol ≥ 6 fois Reste du protocole non détaillé	<u>Blancs procéduraux et blancs environnementaux</u> : NR <u>Rendement moyen de récupération</u> : 65,24 % – 114,27 % (PET ≈ 30 %)
Tian 2025 (Chine) (111)	KOH 15 % 48 h 40 °C Filtration fibres de verre (taille NR)	48 échantillons de LA lors de l'accouchement, en flacons en verre stériles salle opératoire ISO 5 sous flux laminaire Protocole sans plastique utilisé dans la zone opératoire (<i>matériel uniquement en verre ou métal</i>) <i>Personnel équipé de blouses, gants, masques et bonnets 100 % coton</i> Analyses effectuées sous enceinte propre avec matériel en verre précombusté (450 °C, 6 h) Nettoyage entre chaque échantillon avec eau ultrapure et éthanol 70 % Toutes les solutions sont filtrées (fibre de verre 1,2 µm) Surveillance de la retombée atmosphérique par filtres exposés	<u>Blancs procéduraux, blancs environnementaux, contrôles de solution de digestion, et contrôles de procédé</u> : négatifs Exclusion de toute particule dont le spectre n'était pas apparié de manière concluante
Wang 2025 (Chine) (106)	KOH 10% 50°C 72h Filtre inox 10 µm Formiate de potassium + ultrasons 30 min 2e filtration inox 10 µm Concentration à l'éthanol anhydre (0,5 mL)	10 g de placenta collectés et stockés dans du verre stérile à –80 °C Protocole sans plastique : manipulations sous hotte, blouses coton, gants nitriles Verrerie rincée ×3 à l'eau ultrapure puis séchée	<u>Blancs procéduraux</u> : moyenne 5 particules/10 mL, soustraites des comptes expérimentaux <u>Rendement moyen de récupération après digestion</u> : 91,00 ± 9,23 % Vérification LD-IR avec mélange standard multi-polymères concordance spectrale > 65 %

Réf.	Prétraitement	Assurance qualité	Contrôle qualité
Liu 2025 (Chine) (109)	KOH 10 % 50 °C 72h Filtration inox 10 µm Formiate de potassium + ultrasons 30 min 2e filtration inox 10 µm Concentration à l'éthanol anhydre (0,5 mL)	10 g de placenta stocké en verre stérile à –80 °C Protocole sans plastique : manipulations sous hotte, blouses coton, gants nitriles Verrerie rincée ×3 à l'eau ultrapure puis séchée	<u>Blancs procéduraux</u> : négatifs <u>Rendement moyen de récupération après digestion</u> : 91,00 ± 9,23 % <u>Correspondance spectrale minimale pour identification</u> >92% Suspensions/flottations réalisées en triplicat avant seconde filtration
Zhang 2025a (Chine) (107)			
Zhang 2025b (Chine) (108)			
Jochum 2025 (USA) (9)	KOH 10 % 40 °C 72 h Ultracentrifugation Lavage éthanol 100 % x 3 Séchage 24h à température ambiante Pyrolyse 600°C 45 min	Aliquotes ~0,38 g de tissu placentaire, prélevées à 4 cm du cordon Stockage immédiat à –80 °C dans des tubes en PU stériles, jamais décongelés avant analyse Procédures stériles standardisées non détaillées Conservation des après digestion dans des flacons en verre	Analyse Py-GC/MS calibrée pour 12 polymères cibles Absence ou uniquement traces de MNPs dans les <u>blancs procéduraux et environnementaux</u> (études antérieures)

Abréviations : KOH (hydroxyde de potassium), NaOH (hydroxyde de sodium), H₂O₂ (peroxyde d'hydrogène), HNO₃ (acide nitrique), GF/A (filtres en fibre de verre de type A, 1,6 µm), GF/D (filtre fibre de verre type D, 2,7 µm), Anodisc® (membrane d'alumine anodique 0,2 µm), HQI (Hit Quality Index, indice de correspondance spectrale minimale), PP (polypropylène), PE (polyéthylène), HDPE (polyéthylène haute densité), PET (polyéthylène téréphtalate), PTFE (polytétrafluoroéthylène), PU (polyuréthane), PS (polystyrène), MNPs (micro- et nanoplastiques), LD-IR : diffraction laser infrarouge (vérification granulométrique) ; Py-GC/MS : pyrolyse puis chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (confirmation massique), ISO 5 (classe de propreté de salle blanche selon l'International Organization for Standardization – flux laminaire), MEB (microscopie électronique à balayage).

Les protocoles présentés détaillent :

- Les étapes de prétraitement (digestion chimique, filtration, séchage, fixation ou lyophilisation) selon la matrice étudiée (placenta, liquide amniotique, méconium, lait, sang).
- Les mesures d'assurance qualité, incluant la standardisation des conditions de prélèvement, le recours à des environnements stériles et l'utilisation de procédures sans plastique (verre, métal, coton).
- Les contrôles qualité : mise en place de blancs procéduraux et environnementaux, vérification des taux de récupération, de la correspondance spectrale minimale pour l'identification (souvent ≥ 65–95 % HQI), et de l'absence de contamination des échantillons.

Ces protocoles visent à garantir la fiabilité des analyses et à limiter les biais liés à la contamination plastique au cours des différentes étapes de traitement.

Annexe 5 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales monocentriques (N < 1000)

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Ragusa 2021 (Italie) (4)	N = 6 placentas (3 zones : côté fœtal, côté maternel, membranes)	Présence de MPs dans différentes zones placentaires	La détection de MPs dans le placenta indique une exposition potentielle materno-fœtale et justifie des études complémentaires pour évaluer l'impact sur la grossesse et la santé périnatale. <u>Discussion :</u> - Taille compatible avec un passage sanguin potentiel (5–10 µm). - Hypothèse d'un transport via le sang après passage respiratoire ou digestif. - La présence de ces particules pourrait perturber la tolérance immunitaire materno-fœtale et la signalisation placentaire, avec des conséquences possibles sur le développement embryonnaire (non démontrées).
Zhang 2021 (USA) (120)	N = 19 humains : méconium (n=3), selles nourrissons 1 an (n=6), selles adultes (n=10)	PET et PC détectés dans la majorité des échantillons fécaux Concentration de PET ↑ chez les nourrissons par rapport aux adultes (p=0,01) ; PC non différent (p=0,664) <u>Apport journalier estimé via alimentation :</u> - Un nourrisson de 7 kg ingérerait environ 0,58 mg de PET et 0,006 mg de PC par jour - Un adulte de 64 kg ingérerait environ 0,37 mg de PET et 0,013 mg de PC par jour	Présence de MPs (PET, PC) dans le méconium. Concentrations en MPs chez les nourrissons > adultes. Ces données suggèrent une exposition précoce plus importante liée à l'environnement domestique et aux produits en plastique utilisés pour l'alimentation ou le soin des enfants, ainsi qu'au comportement main-bouche. <u>Discussion :</u> - Les niveaux chez les nourrissons seraient comparables à ceux observés chez les animaux domestiques exposés aux mêmes environnements. - Sources potentielles telles que biberons, jouets, textiles ou poussières. - Intérêt d'études de plus grande ampleur pour confirmer ces observations et préciser les voies d'exposition et les effets potentiels sur la santé. <u>Limites :</u> petit échantillon et incertitudes liées aux taux d'excrétion fécale et au risque de contamination lors du prélèvement dans les couches.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Ragusa 2022a (Italie) (112)	N = 10 placentas	Détection dans les villosités chorales (syncytiotrophoblaste, cytotrophoblaste, péricytes, cellules endothéliales fœtales) <u>Localisation</u> : intracellulaire (lysosomes, vacuoles, peroxysomes, gouttelettes lipidiques, corps multivésiculaires) et extracellulaire (stroma, sinusoïdes) <u>Altérations ultrastructurales observées</u> : dilatation du réticulum endoplasmique, mitochondries gonflées ou pycnotiques Aucune différence de quantité en MPs observée selon la voie d'accouchement ni le sexe du fœtus	Les auteurs démontrent pour la première fois la présence de fragments compatibles avec des MPs dans les compartiments intra- et extracellulaires du placenta. Ces particules pourraient être liées à des altérations morphologiques du réticulum endoplasmique et des mitochondries, suggérant un stress oxydatif et une atteinte cellulaire potentielle, mais sans impact clinique démontré chez les nouveau-nés étudiés (tous nés sains). <u>Discussion</u> : - Les MPs pourraient induire un stress du réticulum endoplasmique et une dysfonction mitochondriale semblables à celles observées dans certaines pathologies métaboliques. - Hypothèse d'un "cell danger response" chronique lié à la présence de particules indestructibles. - Appel à des études supplémentaires sur un plus grand nombre de sujets, avec quantification précise et corrélation clinique.
Ragusa 2022b (Italie) (57)	N = 34 femmes allaitantes (J7 post-partum) Lait maternel et questionnaire 7J avant et après accouchement	Aucune association significative entre la présence ou le nombre de MPs et : âge, consommation de poissons/fruits de mer, usage de produits de soins corporels, boissons en bouteille plastique, alimentation emballée (tous les p > 0,16)	Aucun impact clinique démontré, mais exposition potentielle du nourrisson via l'allaitement. Aucune raison de contre-indiquer l'allaitement : bénéfices largement supérieurs aux risques hypothétiques <u>Discussion</u> : - Ubiquité environnementale des MPs - Translocation biologique possible (via cellules épithéliales mammaires et/ou cellules immunitaires), - Intérêt d'études plus larges, longitudinales et quantitatives (cinétique, excrétion, impact infantile) <u>Limites</u> : petit échantillon, sous-estimation (seuil $\geq 2 \mu\text{m}$, aliquote $\sim 4 \text{ g}$)

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Weingrill 2023 (USA) (126)	N = 30 placentas (50 g prélevés sur 2 cotylédons) (10 en 2006, 10 en 2013, 10 en 2021) Placenta	↑ du nombre de MPs par 50 g de tissu placentaire : Différence statistiquement significative entre 2021 et 2006 ($p < 0,001$) et entre 2021 et 2013 ($p < 0,05$) ↑ de la taille moyenne des MPs : Différence significative entre 2006 et 2013 ($p < 0,05$), et entre 2013 et 2021 ($p < 0,0001$). Tendance à l'évolution de la composition polymérique : - ↓ PP - ↑ PET et PES Tendance croissante de proportion de placentas contenant des MP (60% – 100%)	MPs détectés dans tous les placentas récents (100 % en 2021), avec une augmentation du nombre, de la taille et une différence de composition polymérique de 2006 à 2021. <u>Discussion :</u> - Introduction de nouveaux polymères non référencés dans les bases spectrales (15–17 % non identifiés). - Présence d'additifs potentiellement toxiques (POP, BPA). - Aucune contamination détectée dans les contrôles procéduraux. - Hypothèse d'une augmentation parallèle à la production mondiale de plastiques. - Intérêt du placenta comme bio-indicateur non invasif de l'exposition environnementale. <u>Limites :</u> petit échantillon, absence d'analyse sur outcomes cliniques, possibles biais de conservation (tubes PE des échantillons anciens).
Halfar 2023 (Tchéquie) (118)	N = 10 patientes avec rupture prématurée des membrane (RPM) LA (N=10) + placenta (N=10)	MPs et additifs polymériques détectés dans le placenta et le LA	Première mise en évidence simultanée de MPs et d'additifs polymériques (BPA, phtalates) dans le placenta et le LA. <u>Discussion :</u> - Le placenta semble agir comme une barrière partielle aux MPs (moins d'éléments dans le LA). - Nécessité d'études à plus large échelle pour confirmer le transfert et les effets potentiels sur la santé fœtale. <u>Limites :</u> petit échantillon, aucune analyse des NPs ($<1 \mu\text{m}$), absence de groupe témoin, méthodologie non standardisée (internationalement), risques de contamination malgré protocole sans plastique, difficulté logistique et éthique à collecter des échantillons d'amniocentèse

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Zhu 2023 (Chine) (76)	N = 17 placentas	Aucune association significative entre l'abondance, la taille ou le type de MPs et l'âge maternel	Détection confirmée de MPs dans le placenta. <u>Discussion :</u> - Présence de MPs, en quantités supérieures à celles rapportées auparavant (Ragusa 2021 ; Braun 2021). - Méthode LD-IR, plus sensible, permet une détection accrue. - Exposition fœtale potentielle, mais les effets sur la santé restent inconnus. - Appel à des études complémentaires pour préciser les sources, mécanismes de transfert et impacts sur le développement fœtal. <u>Limites :</u> petit échantillon, restreinte à une seule région de Chine, absence de groupe témoin ou de comparaison inter-populationnelle, aucune donnée clinique ou environnementale associée empêchant l'analyse de facteurs d'exposition, Méthode de détection restreinte aux particules $\geq 10 \mu\text{m}$, excluant les NPs, étude strictement descriptive sans exploration des mécanismes biologiques ni des effets sanitaires, risque résiduel de contamination malgré le protocole sans plastique.
Liu 2023a (Chine) (115)	N = 18 dyades mères-enfants Matrices : placenta, méconium (J1), selles nourrisson (6 mois), lait maternel, lait infantile	Présence confirmée de MPs dans toutes les matrices étudiées <u>Comparaison inter-matrices</u> (placenta vs méconium vs fèces) : - PA méconial > PA placentaire ($p = 0,008$) - PE dans les fèces des nourrissons > PE méconial ($p = 0,044$) <u>Comportements maternels ↑ la charge placentaire de MPs :</u> - Consommation d'eau $\geq 2000 \text{ mL/jour}$ vs < 2000 mL/j ($p = 0,038$) - Utilisation fréquente de produits de gommage ou de dentifrice exfoliant vs jamais/rarement ($p = 0,005$) <u>Tendances NS :</u> - Consommation d'eau du robinet ou d'eau en bonbonne vs eau purifiée - Utilisation de gobelets en plastique ou consommation régulière de boissons en bouteilles plastiques	Détection de MPs dans le placenta, le méconium, les selles d'enfants, le lait maternel et le lait infantile. L'ingestion d'eau et l'usage de dentifrice/gommage pourraient contribuer à l'exposition pendant la grossesse. Chez le nourrisson, les sources potentielles pourraient être l'allaitement, les biberons et les jouets plastiques. <u>Discussion :</u> - Première étude à analyser simultanément plusieurs matrices mère-enfant. - Nécessité de travaux à plus grande échelle pour déterminer les voies d'exposition, la toxicocinétique et les effets développementaux. <u>Limites :</u> petit échantillon, risque de contamination (air, couches, poussières), perte potentielle de MPs due au traitement à l'acide nitrique et à la chaleur, absence de données sur les caractéristiques des enfants à 6 mois.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Liu 2023b (Chine) (127)	N = 18 dyades mères-enfants Matrices (pour MPs) : placenta (N=18) et méconium (N=12) Pour 16S RNA (microbiote) : placenta (N=18) et méconiums (N=17)	Charge de PA ($p = 0.006$) et de MPs totaux $\uparrow$ dans le méconium ($p = 0.009$) par rapport au placenta Différences entre le microbiote du placenta et du méconium (sur la présence/absence d'espèce $p = 0,001$ ou sur l'abondance d'espèce $p = 0,002$) Corrélations charge en MPs et diversité du microbiote : - <u>PS</u> : corrélation négative avec l'indice de diversité Chao1 du microbiote méconial ($p < 0.05$) - <u>PE</u> : corrélations négatives avec plusieurs genres du microbiote placentaire (<i>Ruminococcus</i> , <i>Neisseria</i>) - <u>PA et PU</u> : corrélations positives avec plusieurs genres du microbiote méconial (<i>Escherichia-Shigella</i> , <i>Treponema</i> , <i>Streptococcus</i>)	MPs détectés dans l'ensemble des placentas et méconiums. Résultats indiquant des associations possibles entre MPs et dysbiose placentaire et méconial. <u>Discussion :</u> - Variabilité inter-études liée aux méthodes de traitement et d'analyse - Sources potentielles d'exposition évoquées : textiles (PA, PU), air et eau domestiques. - Appel à des études élargies pour confirmer l'influence des MPs sur le microbiote fœto-maternel. <u>Limites :</u> petit échantillon, contamination environnementale possible, absence de témoins négatifs, sous-estimation des MPs (digestion acide).
Zhu 2024 (Chine) (117)	N = 9 dyades mère-enfant Matrices : sang veineux de cordon, placenta, méconium (9 échantillons de chaque)	Présence de MPs dans les 3 matrices Corrélations inter-matrices sur la <u>charge</u> en MPs : - Placenta $\leftrightarrow$ Sang de cordon : $rs = 0,38$ ($p < 0,05$) - Sang de cordon $\leftrightarrow$ Méconium : $rs = -0,26$ ($p < 0,01$) - Placenta $\leftrightarrow$ Méconium : NS Différence significative d'abondance de MPs entre matrices biologiques : Méconium > Placenta > Sang de cordon <u>Consommation de thé ≥ 3 fois/semaine</u> pendant la grossesse : associée à une abondance plus faible de MPs dans le méconium ($p = 0,048$) <u>Autres déterminants étudiés NS :</u> - Eau du robinet vs eau embouteillée - Usage de contenants plastiques pour boire - Exposition à la fumée passive - Fréquence de consommation de fruits de mer, plats à emporter, lait en boîte ... - Utilisation de produits d'hygiène - Temps de port de masque (<3 h/j vs ≥ 3 h/j)	Première mise en évidence conjointe de MPs dans le placenta, sang de cordon et méconium , suggérant un transfert materno-fœtal. Nécessité de rechercher l'impact clinique fœtal de ces expositions, notamment sur la croissance et la santé néonatale. <u>Discussion :</u> - Hypothèse d'une accumulation fœtale progressive expliquant la concentration plus élevée dans le méconium. - Aucune contamination significative dans les blancs. - Recommandations : élargir les cohortes, standardiser les protocoles analytiques, explorer les impacts biologiques et obstétricaux des MPs. <u>Limites :</u> petit échantillon, absence d'évaluation toxicologique, potentiel sous-estimation liée à la digestion acide, limites du Raman (fluorescence, coût, temps).

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Zurub 2024 (Canada) (121)	N = 10 femmes Placenta (1g/région : plaque basale, villosités, plaque choriale)	Aucune différence statistiquement significative n'a été observée ni pour la quantité totale MPs, ni pour leur répartition régionale, ni pour le type de polymère identifié ($p > 0,05$) quelle que soit la région placentaire ou le mode d'accouchement	Présence systématique de MPs et de particules non plastiques dans les placentas humains à terme, quelle que soit la voie d'accouchement. Aucune région placentaire n'est exempte de contamination particulaire. <u>Discussion</u> : - Les MPs et NPs traversent vraisemblablement le tissu placentaire, sans barrière apparente. - Il existe une grande variabilité interindividuelle - Nécessité de recherches supplémentaires pour comprendre les effets potentiels de ces contaminants sur la santé maternelle et fœtale. <u>Limites</u> : incapacité à détecter $<1 \mu\text{m}$, petit échantillon, impossibilité d'identifier la source des polymères.
Yun 2024 (Chine) (125)	N = 50 placentas (plaque basale)	Aucune différence significative entre groupes (PTFE / PS / sans MP) pour âge maternel, IMC, âge gestationnel, poids ou taille néonatale ($p > 0,05$) <u>Histologie placentaire</u> : villosités matures, nécrose fibrinoïde, nodules syncytiaux, dépôts fibrinoïdes sans différence entre groupes	Présence de MPs placentaires sans impact clinique mesurable à ce stade. Même si l'étude ne met pas en évidence d'association entre imprégnation en MPs et les paramètres néonataux, cela ne vaut pas dire qu'elle est absente. <u>Discussion</u> : - Aucun effet observé sur les paramètres maternels et néonataux. - Nécessité d'études longitudinales et mécanistiques pour évaluer les effets développementaux et les sources d'exposition. <u>Limites</u> : petit échantillon, point unique de prélèvement, risque de contamination environnementale.
Xue 2024 (Chine) (8)	N = 40 LA per-césarienne en cours de travail, membranes intactes Questionnaires ciblant eau en bouteille et consommation de fruits de mer	<u>AG</u> : Chaque MPs/g supplémentaire réduit de 0,44 jour l'AG de naissance (ajusté sur âge maternel, parité, IMC, alcool et tabac et niveau d'éducation et sexe de l'enfant) $\beta_{\text{ajusté}} = -0,441 \text{ sem } [-0,826 ; -0,055]$ <u>Poids</u> : Association NS après ajustement mais tendance négative $\beta_{\text{ajusté}} = -11,67 \text{ g } [-41,57 ; 18,22]$ ($p = 0,43$) (même ajustement + AG) <u>MPs plus élevés chez les consommatrices</u> : • de fruits de mer : $r = 0,781$; $p < 0,001$ • eau en bouteille : $r = 0,386$; $p = 0,014$	Association entre charge totale de MPs dans le LA est inversement corrélée à l'AG ($-0,44$ jour par part./g après ajustements). Liens alimentaires plausibles augmentant l'imprégnation en MPs : fruits de mer et eau en bouteille <u>Discussion</u> : - LA apparaît comme réservoir fœtal d'exposition aux MPs <u>Limites</u> : étude transversale, spectre 20–500 μm (NPs non captés), questionnaire limité à deux sources alimentaires, digestion HNO_3 pouvant dégrader certains MPs (biais de quantification).

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Sun 2024 (Chine) (119)	N = 12 femmes Matrices (N=12 par matrices) : sang maternel, LA, placenta, membranes fœtales, cordon ombilical, sang veineux de cordon	MPs détectés dans les six matrices Aucune association statistiquement significative entre concentrations totales de MPs dans le sang maternel et celles observées dans les autres matrices fœtales (placenta, membranes, LA, sang veineux ombilical et cordon) Corrélations observées dans le LA : - entre l'abondance totale de MPs et <u>l'âge maternel</u> (R = 0,64 ; p = 0,025) - entre l'abondance de MPs et <u>l'IMC pré-grossesse</u> (R = 0,59 ; p = 0,049) Pas d'association significative entre : habitudes alimentaires, consommation d'eau, usage de cosmétiques, maquillage ou produits de soin, et concentration ou la nature des MPs détectés	Présence confirmée de MPs dans toutes les matrices étudiées. Il est possible qu'il existe des facteurs individuels modulant l'imprégnation des tissus comme le LA (âge maternel et IMC pré-grossesse). Il faudra envisager de prendre en compte ces facteurs pour les analyses multivariées futures. <u>Discussion :</u> - Confirmation que les MPs circulent dans le compartiment materno-fœtal. - Absence de corrélation entre les matrices. - Relation possible entre concentration dans le LA, âge maternel et IMC pré-grossesse (rétrocontrôle ? stockage dans les graisses ?) - Absence d'association avec les modes de vie (échantillon trop faible). - Nécessité d'études à plus grande échelle pour préciser les sources et les voies d'exposition, et les effets sur la santé fœtale. <u>Limites :</u> petit échantillon, pas d'évaluation postnatale, étude restreinte à des césariennes programmées.
Hasanah 2024 (Indonésie) (123)	N = 30 selles de femmes au 3e trimestre de grossesse Questionnaire sur la fréquence alimentaire (FFQ)	Présence de MPs dans tous les prélèvements Quantité de MPs ↑ chez les femmes à forte consommation de produits de la mer (> 12 os/semaine) (t-test, p < 0,001), sans différence selon le type ni la fréquence de consommation	Étude confirmant une exposition digestive aux MPs chez les femmes enceintes. Association entre consommation de produits marins et charge fécale en MPs. <u>Discussion :</u> - Les polymères retrouvés (PA, PET, HDPE) proviennent probablement de la consommation de fruits de mer, d'eau embouteillée ou d'aliments emballés en plastique. - Nécessite des études complémentaires sur les sources d'exposition et effets materno-fœtaux. <u>Limites :</u> seuls 10 MPs sur 359 ont été identifiés par FTIR (limite de représentativité), microscopie optique non adaptée aux particules <0,2 mm, généralisabilité limitée.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Saraluck 2024 (Thaïlande) (93)	Multicentrique N = 59 laits maternels (J1-J3 post-partum) Exclusion : utilisation d'antibiotique au T3 et post-partum	Présence de MPs dans le lait associée à une ↑ fréquence de complications d'allaitement : - Mastite : 21,7 % (5/23) vs 0 % (0/36), $p = 0,003$ - Engorgement mammaire : 47,8 % (11/23) vs 11,1 % (4/36), $p = 0,002$ - Hypogalactie / faible montée de lait : 21,7 % (5/23) vs 0 % (0/36), $p = 0,003$ Moins de MPs détectés chez les mères ayant de bonnes pratiques d'hygiène : - Lavage des mains après l'allaitement : 83,3 % (30/36) vs 30,4 % (7/23), $p < 0,001$ - Utilisation de produits de lavage pour sous-vêtements mère/bébé dédiés : 72,2 % (26/36) vs 17,4 % (4/23), $p < 0,001$ - Lavage des mains régulier : 88,9 % vs 52,2 %, $p = 0,002$ 8 comportements significativement plus fréquents dans le groupe présence de MPs ($p < 0,05$) : - Contact cutané avec produits chimiques - Utilisation fréquente d'emballage plastique alimentaire - Consommation de fruits de mer - Complément pour stimuler la lactation - Consommation d'eau en bouteille plastique - Consommation fréquente d'eau du robinet - Usage fréquent de paille en plastique - Cuisson habituelle au micro-onde dans des contenants en plastique Microbiote du lait différent selon la présence de MPs : - <i>Groupe avec MPs</i> : dominance de Gram+, Staphylococcus et Streptococcus (différence significative, $p < 0,05$) - <i>Groupe sans MPs</i> : dominance de Gram-, Enterobacter, Escherichia, Pseudomonas, Acinetobacter	Associations exploratoires suggérant : ↑ complications d'allaitement (mastite, engorgement, hypogalactie) ↓ imprégnation chez les mères avec bonnes pratiques d'hygiène (lavage des mains régulier et post-allaitement, linge dédié) Profil du microbiote différent, dysbiose en faveur de germes Gram+ qui ont plus tendance à se fixer sur les biofilms. Ces germes peuvent aussi être responsables de mastites ou d'abcès mammaires. <u>Discussion</u> : - Signal préliminaire incitant à promouvoir les mesures d'hygiène simples et à limiter l'usage domestique de plastiques (chauffage, contenants, pailles), sans remettre en cause l'allaitement qui reste bénéfique. <u>Limites</u> : petite cohorte, puissance statistique limitée (68 %), pas de quantification standardisée (pas de MPs/mL), biais de confusion possible, contamination possible malgré protocole sans plastique, questionnaire évaluant l'utilisation de produit 7 jours avant et 7 jours après accouchement, puissance de 80% non atteinte (68%).

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Arshad 2024 (Pakistan) (110)	N = 23 laits maternels	L'abondance de MPs (en part./g) dans le lait maternel entre les deux populations : ($p < 0,05$) - plus élevée groupe BMSF - plus faible groupe BMSH BMSF : consommatrices de produits de la mer (n=15) BMSH : non consommatrices (le mois précédent) (n=8)	Abondance plus élevée de MPs dans le lait des mères consommatrices de produits de la mer. <u>Discussion :</u> - Limiter la consommation de fruits de mer, surtout chez les femmes enceintes/allaitantes, et éviter les poissons de zones côtières/estuariers. - Absence de données sur des effets délétères précoces chez l'humain, - Intérêt d'études plus larges et longitudinales. <u>Limites :</u> faible nombre de participantes, pas de suivi longitudinal.
Tian 2025 (Chine) (111)	N = 48 LA prélevés per-césarienne en cours de travail, membranes intactes	Aucune différence significative sur les issues obstétricales : AG, taille, poids, sexe du nouveau-né	Présence de MPs dans le LA mais pas d'association significative sur les issues périnatales. Ne conclut pas à l'absence d'effet. <u>Discussion :</u> - Passage possible des particules à travers la barrière placentaire. - Nécessité de vigilance quant à l'exposition maternelle. - Nécessité d'études longitudinales à plus grande échelle pour déterminer les effets à long terme et comprendre la perméabilité sélective placentaire. <u>Limites :</u> petit échantillon (n=48), absence de quantification de concentration massique, impossibilité de déduire un lien causal

Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; MNPs : micro- et nanoplastiques ; LA : liquide amniotique ; AG : âge gestationnel ; IMC : indice de masse corporelle ; RCIU : retard de croissance intra-utérin ; PA : polyamide ; PE : polyéthylène ; PP : polypropylène ; PS : polystyrène ; PVC : polychlorure de vinyle ; PET : polyéthylène téréphtalate ; PU : polyuréthane ; PC : polycarbonate ; PMMA : polyméthacrylate de méthyle ; POM : polyoxyméthylène ; PLA : poly(acide lactique) ; PTFE : polytétrafluoroéthylène ; CPE : polyéthylène chloré ; PES : polysulfone ; PVS : polyvinylsiloxane ; HDPE : polyéthylène haute densité ; PI : polyimide ; CEL : cellulose ; PNB : poly(n-butadiène) ; PB : polybutadiène ; POP : polluants organiques persistants ; BPA : bisphénol A ; BMSF : Breast Milk Seafood-consuming Females ; BMSH : Breast Milk non-Seafood-consuming Females ; FFQ : Food Frequency Questionnaire ; RNA 16S : séquençage du gène 16S ribosomal ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; μ -FTIR / μ -FTIR-ATR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (mode réflexion totale atténuée) ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; LC-MS/MS : chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem ; Py-GC/MS : pyrolyse – chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse ; IQR : intervalle interquartile ; ET : écart type ; NS : non significatif ; RPM : rupture prématurée des membranes ; N : taille d'échantillon ; p : valeur de significativité (seuils de 5%) ; Gram+ / Gram- : classification bactérienne selon la coloration de Gram ; NR : non rapporté.

Annexe 6 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales à visée méthodologique

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Braun 2021 (Allemagne) (130)	N = 2 dyades mère-enfant, césariennes programmées Matrices : placenta (N=2) et méconium (N=2)	Présence de MPs dans le placenta et le méconium 3 contrôles initialement négatifs étaient en réalité positifs, avec des polymères comme PE, PP, PS 16 objets du matériel chirurgical testés : souvent PE, PP, PET retrouvés PU détecté dans le placenta et l'air ambiant	Possibilité technique de détecter des MPs dans le placenta et le méconium humains dans un cadre clinique réel (césarienne). <u>Discussion</u> : - Risque de contamination : PU détecté dans l'air pourrait expliquer certains résultats - Nécessité d'améliorer la standardisation, le contrôle des contaminations et l'analyse des NPs à venir. <u>Limites</u> : risque élevé de contamination environnementale malgré protocole stérile ; absence d'analyse quantitative standardisée ; absence d'étude des NPs ; taille minimale fixée à 50 µm (possibles faux négatifs) ; très petit échantillon (n=2) ; méthode coûteuse et longue (5–7 semaines de digestion).
Li 2023 (Chine) (116)	N = 16 méconiums	Aucun MPs ≥ 10 µm détecté dans les 16 méconiums Blancs procéduraux et contrôles de couches : négatifs	Absence de détection de MPs dans le méconium par FTIR mais n'exclut pas la présence. <u>Discussion</u> : comparaisons avec les études antérieures (Braun 2021, Liu 2022) montrant des résultats divergents possiblement liés à la taille des échantillons, aux sources de contamination et aux méthodes de détection. <u>Limites</u> : petit échantillon, seuil analytique limité à ≥10 µm, absence de corrélation avec les expositions maternelles, risque de perte de MPs pendant la digestion
Garcia 2024 (USA) (124)	N = 62 placentas	MPs détectés dans tous les placentas à des niveaux de concentration variables entre échantillons (PE prédominant)	Présence de MPs confirmée dans l'ensemble des placentas, avec concentrations mesurables et composition polymérique variée. Utilisation possible de la Py-GC/MS pour quantifier les concentrations de MPs. <u>Discussion</u> : - Importance de développer des approches quantitatives standardisées pour les matrices biologiques. - Les concentrations observées peuvent être sous-estimées. - Nécessité d'étudier l'impact des NMPs sur les issues de grossesse. <u>Limites</u> : absence de données sur la taille ou la forme, étude descriptive sans corrélation clinique, risque résiduel de contamination malgré les contrôles, absence de référence à des échantillons antérieurs à l'ère plastique.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Li 2025 (Chine) (113)	N = 60 méconiums Méconium	MPs détectés dans tous les méconiums PE prédominant et des niveaux de concentration variables entre échantillons	La méthode Py-GC/MS proposée permet de quantifier 8 polymères dans le méconium avec bonne sensibilité/linéarité et de documenter une présence fréquente (≥ 50 %) avec des niveaux particulièrement élevés pour le PE dans cet ensemble d'échantillons. <u>Limites</u> : filtre argent 0,45 μm $\Rightarrow$ particules $< 0,45 \mu\text{m}$ non captées, pertes de PET sous digestion acide (récupération ~ 30 %), matrice complexe et variabilité inter et intra-individuelle potentielle, approche massique (pas de taille/forme/couleur).

Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; MNPs : micro- et nanoplastiques ; PE : polyéthylène ; PP : polypropylène ; PS : polystyrène ; PU : polyuréthane ; PET : polyéthylène téréphtalate ; LA : liquide amniotique ; FTIR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ; μ -FTIR / μ -FTIR-ATR : micro-FTIR en mode réflexion totale atténuée ; Raman MS : spectroscopie Raman micro-spectroscopique ; Py-GC/MS : pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse ; LD-IR : diffraction laser infrarouge ; HQI : *Hit Quality Index* (indice de correspondance spectrale minimale) ; n : taille d'échantillon ; p : valeur de significativité ; NR : non rapporté ; part./g : particules par gramme.

Annexe 7 : Résultats des études observationnelles descriptives transversales monocentriques (N > 1000)

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Wang 2025 (Chine) (106)	N = 1057 dyades mère-enfant 10 g de tissu placentaire Enzymes hépatiques PAL/ALAT/ASAT/GGT mesurées dans le sang de cordon (5 mL)	Régression linéaire multiple entre charge en MPs et taux d'enzyme hépatique, ajustée sur age maternel, IMC pré-grossesse, sexe enfant, parité, terme de naissance, niveau d'éducation, revenu du ménage, exposition tabagique <u>PAL</u>: ↑ - PVC $\beta = 28,07$ (6,65–49,49 ; $p = 0,01$) - Total MPs $\beta = 20,74$ U/L (0,36–41,13 ; $p = 0,05$) <u>ALAT</u>: ↑ - PP $\beta = 0,63$ (0,01–1,25 ; $p = 0,05$) - Total MPs $\beta = 0,94$ (0,15–1,72 ; $p = 0,02$) <u>ASAT</u>: ↑ - PP $\beta = 3,42$ (0,87–5,96 ; $p = 0,01$) - PBS $\beta = 7,48$ (4,08–10,88 ; $p < 0,01$) - Total MPs $\beta = 7,09$ (3,88–10,30 ; $p < 0,001$) <u>GGT</u>: ↑ - PP $\beta = 16,84$ (3,70–29,97 ; $p = 0,01$) ; - Total MPs $\beta = 27,67$ (11,05–44,28 ; $p < 0,01$) <u>Modèle g-comp</u>: - PAL ↑ $\beta = 30,04$ (11,15–48,92 ; $p < 0,01$), - ASAT ↑ $\beta = 7,30$ (4,33–10,27 ; $p < 0,01$), - GGT ↑ $\beta = 22,98$ (7,49–38,46 ; $p < 0,01$) <u>Modèle BKMR</u> : relations dose-réponse globales ↑ surtout pour PAL/ASAT/GGT	Association entre charge placentaire en MPs et élévation de PAL/ASAT/GGT au sang de cordon. L'augmentation d'1 quartile de MPs totaux élève en moyenne de 30 UI les PAL, 7 UI l'ASAT et 23 UI les GGT. <u>Discussion</u>: - Signal épidémiologique en faveur d'un impact hépatique fœtal lié à l'imprégnation placentaire en MPs. - Pertinence de la réduction des expositions pendant la grossesse et de recherches longitudinales <u>Mécanismes avancés</u>: - Stress oxydatif, inflammation (ROS, cytokine, TNF-alpha, interleukines) = lésion hépatocellulaire - Accumulation hépatique et toxicité direct perturbant le processus métabolique - Rôles de vecteur pour les additifs polluants (phtalates, bisphénol, métaux qui sont hépatotoxiques) - Perturbation possible intestin-foie, altération microbiote fœtal et mécanisme acide biliaire <u>Limites</u>: plan transversal, biais de confusion possible, seuil analytique ≥ 10 μm (NPs non captés), pas d'issues cliniques néonatales étudiées, généralisabilités limitées.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Liu 2025 (Chine) (109)	N=1324 dyades mère–enfant Placenta (côté maternel et fœtal) et sang de cordon ombilical	<u>Régression linéaire multiple entre quantité de MPs et taux hormonaux</u>, (ajustée sur âge maternel, IMC pré-grossesse, sexe du nourrisson, parité, AG à la naissance, niveau d'éducation, revenu du foyer, exposition tabagique) : - Cortisol ↓ par PVC (β -1.59, $p=0.03$), PBS (β -1.93, $p<0.01$) et MPs totaux (β -2.20, $p<0.01$) - Cortisone ↓ par PVC (β -3.5, $p<0.01$), PP (β -4.52, $p<0.01$) et MPs totaux (β -5.05, $p<0.01$) - DHEA ↑ par PBS (β 0.08, $p=0.01$) et MPs totaux (β 0.07, $p<0.01$) - Androstènedione ↑ par PVC (β 0.01, $p=0.04$), PBS (β 0.01, $p=0.05$) et MPs totaux (β 0.01, $p<0.01$) - Rapport cortisol/DHEA ↓ (tous polymères, $p<0.01$) - Rapport glucocorticoïdes/androgènes ↓ (tous polymères, $p<0.01$) - Rapport cortisol/cortisone ↑ pour PP ($p = 0,03$) <u>En modèle G-comp, une augmentation d'un quartile de MPs totaux est associée à :</u> – ↓ Cortisol ($\beta = -2.83$; IC95 % [-4.01 ; -1.66]) – ↓ Cortisone ($\beta = -5.61$; IC95 % [-7.51 ; -3.72]) – ↑ DHEA ($\beta = 0.10$; IC95 % [0.05 ; 0.15]) – ↑ Androstènedione ($\beta = 0.01$; IC95 % [0.00 ; 0.02]) – ↓ Cortisol/DHEA ($\beta = -2.13$; IC95 % [-2.76 ; -1.50]) – ↓ Glucocorticoïde/Androgène ($\beta = -5.20$; IC95 % [-6.35 ; -4.04]) – tous $p<0.01$ <u>Modèles BKMR :</u> - ↓ non linéaire du cortisol et de la cortisone avec ↑ des MPs (effet marqué au-delà du 50^e percentile) - ↑ du DHEA et de l'androstènedione avec les MPs - ↓ progressive des rapports cortisol/DHEA et glucocorticoïde/androgène	L'exposition placentaire aux MPs est associée à une diminution significative des hormones glucocorticoïdes et à une augmentation des hormones androgéniques. Les rapports cortisol/DHEA et glucocorticoïdes/androgènes sont altérés, traduisant un possible déséquilibre endocrinien fœtal. <u>Discussion :</u> - Première étude humaine reliant MPs placentaires et hormones fœtales - Hypothèse : perturbation de la stéroïdogénèse placentaire par stress oxydant, inflammation et interférence avec les récepteurs hormonaux - L'activité enzymatique 11β-HSD2 (cortisol→cortisone) semble non altérée - Perturbation de la stéroïdogénèse via les enzymes du cytochrome P450 - Altération de l'axe HHS, modification épigénétique (NR3C1, HSD11B2) et interaction avec les transporteurs placentaires (ABC, transporteurs d'anion/cation) - Appel à des études longitudinales et mécanistiques pour confirmer les perturbations endocriniennes liées aux MPs in utero. <u>Limites :</u> design transversal, absence de mesure d'autres polluants (coexposition possible), impossibilité d'inférer la causalité, généralisabilité limitée, ne capte pas toutes les tailles (NPs), manque de données environnementales détaillées.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Zhang 2025a (Chine) (107)	N = 1121 dyades mère–enfant Placenta (côté maternel et fœtal) et sang de cordon ombilical	<u>Régression linéaire multiple entre quantité de MPs et longueur télomérique (TL)</u> (ajustée sur âge maternel, IMC pré-grossesse, sexe du nourrisson, parité, AG à la naissance, niveau d'éducation, revenu du foyer, exposition tabagique) : - TL du sang de cordon : ↓ <i>Total MPs</i> $\beta = -0,14$ (IC95 % $-0,22 ; -0,06$) ($p < 0,001$) <i>PVC</i> $\beta = -0,16$ ($p = 0,003$) <i>PBS</i> $\beta = -0,13$ ($p = 0,01$) - TL placentaire : ↓ <i>Total MPs</i> $\beta = -0,13$ (IC95 % $-0,2 ; -0,06$) ($p < 0,001$) <i>PVC</i> $\beta = -0,10$ ($p = 0,03$) <i>PBS</i> $\beta = -0,10$ ($p = 0,04$) <i>PP</i> $\beta = -0,12$ ($p = 0,01$) <u>Modèle G-comp</u> : Augmentation d'un quartile de l'exposition combinée aux MPs (PVC, PP, PBS) est associée à une diminution significative de la TL $\beta_{global} = -0,14$ [IC95 % : $-0,22 ; -0,06$] (cordon et placenta) <u>Modèle BKMR</u> : relation entre exposition et TL est non linéaire : aux faibles taux de MPs, la TL tend à être légèrement plus longue et aux taux de MPs plus élevés, la TL diminue nettement	Une imprégnation accrue en MPs est associée à un raccourcissement télomérique dans le sang de cordon et le placenta. <u>Discussion</u> : - Les MPs pourraient influencer la stabilité génomique fœtale et les processus de vieillissement cellulaire. - Nécessité d'études longitudinales et de co-exposition pour confirmer ces effets et de renforcer les politiques de réduction de la pollution plastique. - Prévention pour limiter le plastique et les coexpositions. <u>Mécanisme</u> : - Stress oxydant (ROS) endommage l'ADN télomérique - Inflammation (cytokine TNF-alpha et IL-6) idem - Perturbation de la fonction mitochondriale - Association à d'autres polluant (phtalate, bisphénol) pouvant interférer sur les voies hormonales - Vecteurs de métaux lourds et POP potentiellement toxique <u>Limites</u> : préparation et analyse des tissus peuvent induire des erreurs de mesure, risque de contamination, la télomère ne prend pas en compte la complexité des processus biologique, facteur de confusion potentiel (alimentation, exposition à d'autres polluants), présence de différence génétique inter-individuelle, influence environnementale, étude transversale.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Zhang 2025b (Chine) (108)	N = 1250 dyades mère–enfant Placenta (côté maternel et fœtal) et sang de cordon ombilical	<u>Régression linéaire multiple entre quantité de MPs et taux hormonaux</u>, (ajustée sur âge maternel, IMC pré-grossesse, sexe du nourrisson, parité, AG à la naissance, niveau d'éducation, revenu du foyer, exposition tabagique) : - TSH ↓ : PVC : $\beta = -1,27$ (IC95 : -2,31 ; -0,24), $p = 0,02$ PP : $\beta = -2,87$ (IC95 : -3,92 ; -1,83), $p < 0,01$ PBS : $\beta = -1,94$ (IC95 : -2,97 ; -0,92), $p < 0,01$ Total MPs : $\beta = -4,65$ (IC95 : -6,16 ; -3,14), $p < 0,01$ - T4 ↓ : PVC : $\beta = -1,40$ (IC95 : -2,01 ; -0,78), $p < 0,01$ PP : $\beta = -0,71$ (IC95 : -1,34 ; -0,08), $p = 0,03$ PBS : $\beta = -0,85$ (IC95 : -1,46 ; -0,23), $p = 0,01$ Total MPs : $\beta = -2,18$ (IC95 : -3,08 ; -1,27), $p < 0,01$ - T4/T3 ratio ↓ : PVC : $\beta = -5,60$ (IC95 : -7,96 ; -3,25), $p < 0,01$ PP : $\beta = -2,68$ (IC95 : -5,09 ; -0,26), $p = 0,03$ Total MPs : $\beta = -8,92$ (IC95 : -12,32 ; -5,46), $p < 0,01$ - T3 ↑ : PP : $\beta = +0,05$ (IC95 : 0,01 ; 0,10), $p = 0,03$ <u>Modèle G-comp</u> : - ↓ T4 : $\beta = -1,78$ (IC95 : -2,38 ; -1,18), $p < 0,01$ - ↓ TSH : $\beta = -3,72$ (IC95 : -4,71 ; -2,72), $p < 0,01$ - ↓ T4/T3 : $\beta = -6,24$ (IC95 : -8,53 ; -3,94), $p < 0,01$ - T3 : NS <u>Modèle BKMR</u> : Relation dose-dépendante avec baisse progressive de T4 et T4/T3 aux fortes expositions, légère hausse de TSH aux faibles expositions puis baisse aux fortes (T3 reste NS)	Association significative entre imprégnation en MPs placentaires (PVC, PP, PBS) et altération des hormones thyroïdiennes néonatales. <u>Discussion</u> : - Atteinte possible de la fonction thyroïdienne fœtale, avec implications neurodéveloppementales potentielles. - Intérêt d'une surveillance hormonale néonatale et la réduction de l'exposition maternelle aux MPs. - Nécessité de réaliser des études longitudinales multicentriques ; intégration d'autres polymères et contaminants (phtalates, BPA, métaux) ; suivi des effets neurodéveloppementaux ; mise en place de stratégies de réduction d'exposition et de biomarqueurs périnataux. <u>Mécanismes</u> : - Altération hormones thyroïdiennes via perturbation endocriniennes (additifs, phtalate, HAP), mimétisme ou antagonisme des récepteurs, inhibition de la TPO, liaison aux protéines de transport - Stress oxydant, inflammation, interférence avec le transport de l'iode, modification épigénétique, altère le transport transplacentaire des hormones MCT8 et OATP1C1 <u>Limites</u> : étude transversale, mesure unique du placenta à la naissance, seulement trois polymères étudiés ($\geq 10 \mu\text{m}$) → NPs exclus, facteurs non mesurés (iode, anticorps, co-polluants), données auto-rapportées, monocentrique limitant la généralisabilité.

Abréviations : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; MNPs : micro- et nanoplastiques ; PVC : polychlorure de vinyle ; PP : polypropylène ; PBS : polybutylène succinate ; PAL : phosphatase alcaline ; ALAT : alanine aminotransférase ; ASAT : aspartate aminotransférase ; GGT : gamma-glutamyltransférase ; ROS : espèces réactives de l'oxygène ; TNF- α : facteur de nécrose tumorale alpha ; IL-6 : interleukine 6 ; DHEA : déhydroépiandrostérone ; HHS : axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien ; HSD11B2 : 11 β -hydroxystéroïde déshydrogénase de type 2 ; NR3C1 : récepteur des glucocorticoïdes ; BKMR : *Bayesian Kernel Machine Regression* ; G-comp : modèle de régression généralisée composite ; IMC : indice de masse corporelle ; AG : âge gestationnel ; TSH : thyroïdostimuline ; T4 : thyroxine ; T3 : triiodothyronine ; TL : longueur télomérique ; IC95 % : intervalle de confiance à 95 % ; p : valeur de significativité ; POP : polluants organiques persistants ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques ; BPA : bisphénol A ; HHS : axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien ; OATP1C1 : transporteur d'anions organiques 1C1 ; MCT8 : monocarboxylate transporter 8 ; NPs : nanoplastiques ; n : taille d'échantillon ; NR : non rapporté.

Annexe 8 : Résultats des études cas-témoins

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Amereh 2022 (Iran) (103)	N = 43 femmes (13 RCIU, 30 GN) Placenta	Corrélation négative entre charge en MPs et paramètres néonataux (toutes grossesses confondues) : - ↓ Poids de naissance : $r = -0,82, p < 0,001$ - ↓ Taille de naissance : $r = -0,56, p < 0,001$ - ↓ Périmètre crânien : $r = -0,50, p = 0,001$ - ↓ Score d'Apgar 1 min : $r = -0,75, p < 0,001$ Régression logistique entre charge en MPs et habitude de vie : - Eau en bouteille vs eau du robinet bouillie : OR = 18,01 (1,61–200,83), $p = 0,01$ - Consommation de plats à emporter vs cuisine maison : OR = 6,72 (1,34–33,59), $p = 0,02$ - Travail hors du domicile vs au domicile : tendance OR = 3,35 (0,66 – 16,87), $p = 0,142$	Charge en MPs dans les RCIU plus élevé que dans les GN. Corrélations univariées inverses avec poids, taille, périmètre crânien et score d'Apgar → suggèrent un rôle délétère possible des MPs sur la croissance et la vitalité néonatale mais modèle non ajusté. <u>Discussion</u> : - Les MPs pourraient perturber les échanges nutritifs placentaires, induire un stress oxydant et des réponses inflammatoires locales. - Prudence sur l'usage de plastiques alimentaires pendant la grossesse. - Nécessite études longitudinales pour confirmer. <u>Limites</u> : petit échantillon, absence de quantification, mesures transversales, analyse restreinte aux particules $\geq 1,6 \mu\text{m}$.
Wan 2024 (Chine) (104)	N = 36 femmes : 18 avec FCS à répétition inexpliquées (FCSR) vs 18 contrôles « saines » (IVG méthode non précisée) Villosités choriales	Concentration en MPs 10 fois plus élevée groupe FCSR que chez les témoins (2,09 vs 0,23 mg/kg ; $p < 0,0001$) Régression logistique entre concentration en PS et FCSR : OR = 34 (IC95 % : 3,61–320 ; $p < 0,01$) Analyse ROC : AUC = 0,899	Présence de PS dans les tissus villex à des niveaux significativement plus élevés chez les femmes présentant des FCSR. Le PS pourrait constituer un nouveau facteur de risque environnemental de FCS inexpliquée. <u>Discussion</u> : - Hypothèse mécanistique explorée par modèles murins et cellulaires : Stress oxydatif Diminue la fonction mitochondriale Active voie Bcl-2/caspase → mort cellulaire trophoblastique - Réduire usage des plastiques jetables, favoriser tri et recyclage, éviter contact alimentaire avec plastique chauffé, privilégier les alternatives non plastiques, développer des technologie de dégradation efficace (biodégradation, oxydation avancée, photocatalyse). <u>Limites</u> : petit échantillon, absence de mesure d'autres polymères ou de mesures d'exposition environnementale, dose pouvant provoquer une FC encore à déterminer.

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Zhang 2024 (Chine) (105)	N = 45 dyades mère-enfant (15 HAIG vs 30 témoins) Collecte de tissu de cordon ombilical (extrémité foetale, ≥8 cm) + questionnaire	Total MPs, PE et PC ↑ chez les femmes HAIG ($p < 0,05$) – Le cordon des femmes avec HAIG contient en moyenne +46 % de MPs totaux <u>Corrélations univariées entre niveaux de MPs et issues néonatales</u> (groupe HAIG) : - PE ↓ Score d'Apgar à 1' et 5' ($r = -0,40$; $p < 0,05$) - PC ↑ Mortalité néonatale et nausées/vomissements maternels ($r = 0,50$; $p < 0,05$) - PVC ↑ Effets maternels de HTA et ↓ taille néonatale ($r = -0,15$; $p < 0,05$) - Total MPs ↓ Score d'Apgar à 1' ($p < 0,05$) Autres polymères NS <u>Corrélation univariée entre niveaux de MPs et comportements</u> : - ↑ PE : usage de bouteilles plastiques, couverts plastiques, et plats à emporter avant et pendant la grossesse ($p < 0,05$) - ↑ PC : consommation de plats à emporter avant/pendant grossesse ($p < 0,001$) - ↑ Total MPs : bouteilles plastiques, couverts plastiques, et plats à emporter ($p < 0,01$) <u>Modèle logistique multivarié</u>, les concentrations en MPs (totaux, PE et PC) apparaissent comme facteurs prédictifs indépendants du développement d'une HAIG (OR et IC NR) <u>En analyse univariée</u>, concentrations de MPs ↑ par : - Contenants jetables à emporter : OR = 7,56 [1,86–30,72] - Réchauffage de produits plastiques : OR = 7,50 [1,83–30,73] - Bouteilles plastiques : OR = 4,93 [1,30–18,73] - Couverts plastiques : OR = 5,69 [1,32–24,54] - Boissons avant grossesse : OR = 2,70 [1,40–5,18] - Boissons pendant grossesse : OR = 2,25 [1,38–3,65] - Fruits de mer pendant grossesse : OR = 1,44 [1,02–2,05] - Fréquence totale d'expositions avant grossesse : OR = 1,45 [1,07–1,95] - Fréquence totale d'expositions pendant grossesse : OR = 2,34 [1,42–3,83] - Exposition professionnelle : OR = 4,38 [1,08–17,68] - Fard à paupières nacré : OR = 25,38 [2,71–237,57] - Rouge à lèvres nacré : OR = 12,25 [2,11–70,99] - Fréquence de maquillage avant grossesse : OR = 2,51 [1,22–5,18] En multivarié : les analyses sur les habitudes de vie et comportements sont NS	Étude suggérant une présence ubiquitaire de MPs dans les cordons ombilicaux, avec des niveaux plus élevés chez les patientes atteintes d'HAIG. Le cordon des femmes avec HTA contient en moyenne +46 % de MPs totaux ; associations possibles avec des issues néonatales défavorables (scores d'Apgar plus bas, mortalité néonatale accrue) mais modèle non ajusté. <u>Discussion</u> : - Les MPs (principalement PE et PC) proviendraient de sources alimentaires (repas à emporter, bouteilles, vaisselle plastique). - Les résultats suggèrent une implication potentielle des MPs dans la physiopathologie de l'HAIG via des mécanismes inflammatoires (voie MyD88/NF-κB), épigénétiques (méthylation de IGF2) et immunitaires (déséquilibre Th/NK). - Nécessité d'études plus larges et d'améliorations méthodologiques (mesure de récupération, exclusion du matériel plastique médical, spectroscopie complémentaire). <u>Limites</u> : petit échantillon, traitement chimique potentiellement dégradant les MPs, absence de spectroscopie (Raman/FTIR) pour confirmer chaque particule, colinéarité des variables d'habitudes (perte de significativité en multivarié), pouvoir statistique limité (PE 66 %, total 61 %, PC 62 %), risque de biais de quantification (pas de taux de récupération Py-GC/MS rapporté), inclusion de patiente avec DG pouvant modifier la quantité de MPs, biais de mémoire, soins plus important chez les patientes HAIG (incluant des MPs dans les anti-HTA et perfusions).

Réf.	Échantillon (N) Matrices	Résultats	Conclusion
Jochum 2022 (USA) (9)	N = 158 femmes enceintes (71 prématurés, 87 à terme) Appariement sur sexe foetal, ethnie, césarienne, naissance vivante Placentas Données cliniques extraites du dossier obstétrical	<u>Comparaison des concentrations inter-groupes</u> : - Groupe pré terme : MPs +28 %, PVC +17%, PET +113%, PU +157%, PC +46% - Groupe terme : ABS +42% <u>Corrélations univariées entre concentrations en MPs et AG de naissance</u> : globalement ↓ PU : $\rho = -0,39, p < 0,001$ PET : $\rho = -0,37, p < 0,001$ PC : $\rho = -0,16, p = 0,04$ ABS : $\rho = +0,21, p = 0,01$ MPs totaux : NS ($\rho = -0,11, p = 0,15$) <u>Corrélations univariées entre concentrations en MPs et poids de naissance</u> : ↓ PC : $\rho = -0,14, p = 0,048$ PU : $\rho = -0,35, p = 0,001$ <u>Régressions logistiques entre concentration en MPs et prématurité</u>, ajustée sur prééclampsie, HTA, Apgar, type de travail, ethnie, et PVC, ABS, PP, PC (colinéarité > 85%) : - PVC et PC : aOR > 6,9 - ABS et SBR : aOR < 0,23 → Prédicteurs indépendants d'accouchement prématuré AIC 124 (ajusté) vs 175 (non ajusté) <u>MPs corrélés significativement à</u> : - ↑ PET dans prééclampsie - ↑ MPs totaux et PE chez fumeuses	Les concentrations placentaires de MPs sont plus élevées dans les placentas prématurés, particulièrement pour PVC, PET, PU et PC. Ces MPs pourraient être liés à la prééclampsie, au tabagisme et au poids de naissance plus faible. <u>Discussion</u> : - Les résultats suggèrent une bioaccumulation accélérée des MPs dans les placentas prématurés malgré une gestation plus courte. - Des études mécanistiques et longitudinales sont nécessaires. <u>Limites</u> : étude observationnelle, puissance limitée pour faibles concentrations, absence de données longitudinales ou alimentaires, colinéarité entre polymères, difficilement généralisable.

Abréviation : MPs : microplastiques ; NPs : nanoplastiques ; MNPs : micro- et nanoplastiques ; RCIU : retard de croissance intra-utérin ; GN : grossesses normales ; FCSR : fausses couches spontanées à répétition ; FCS : fausses couches spontanées ; PS : polystyrène ; PE : polyéthylène ; PP : polypropylène ; PC : polycarbonate ; PET : polyéthylène téréphtalate ; PU : polyuréthane ; PVC : polychlorure de vinyle ; ABS : acrylonitrile-butadiène-styrène ; SBR : styrène-butadiène rubber ; HTA : hypertension artérielle ; HAIG : hypertension artérielle induite par la grossesse ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques ; BPA : bisphénol A ; IGF2 : *Insulin-like Growth Factor 2* ; Th : lymphocytes T auxiliaires (helper) ; NK : cellules tueuses naturelles (*Natural Killer cells*) ; OR : *Odds Ratio* (rapport de cotes) ; aOR : *adjusted Odds Ratio* (rapport de cotes ajusté) ; AUC : *Area Under the Curve* (surface sous la courbe ROC) ; ROC : *Receiver Operating Characteristic* ; IC95 % : intervalle de confiance à 95 % ; p : valeur de significativité ; NS : non significatif ; n : taille d'échantillon ; AG : âge gestationnel ; BMI ou IMC : indice de masse corporelle ; FCS répétées : fausses couches spontanées à répétition ; HAIG : hypertension artérielle induite par la grossesse ; MyD88 : *Myeloid differentiation primary response 88* ; NF-κB : *Nuclear Factor kappa B* ; IGF2 : *Insulin-like Growth Factor 2* ; POP : polluants organiques persistants.

AUTEUR : Nom : BAILLEUX

Prénom : Timothé

Date de soutenance : 31 octobre 2025

Titre de la thèse : Exposition prénatale aux micro- et nanoplastiques : quels enjeux pour la santé périnatale ? *Une revue critique des données scientifiques à destination des professionnels de santé.*

Thèse - Médecine - Lille 2025

Cadre de classement : Médecine, Santé publique, risques environnementaux et périnatalité

DES + FST/option : Gynécologie obstétrique

Mots-clés : microplastiques, nanoplastiques, origine développementale de la santé et de la maladie, santé périnatale, grossesse, allaitement, exposition, environnement, prévention et, promotion de la santé

Résumé :

Les micro- et nanoplastiques (MNPs), particules issues de la dégradation ou de la synthèse directe de polymères, sont omniprésents dans l'environnement, notamment dans l'environnement domestique où l'Homme y est exposé quotidiennement par ingestion, inhalation ou contact cutané. Leur présence dans le placenta, le liquide amniotique et le lait maternel soulève des interrogations sur les effets sanitaires des expositions aux MNPs durant les 1 000 premiers jours, période clé du concept de l'origine développementale de la santé et de la maladie. L'objectif principal est de faire le bilan des données scientifiques disponibles chez l'Homme concernant les liens entre exposition précoces aux MNPs et la santé périnatale.

Une revue systématique (PRISMA 2020) a été conduite sur les bases PubMed, Embase et ScienceDirect (2010–2025), incluant les études épidémiologiques humaines portant sur les femmes enceintes, allaitantes ou les dyades mère–enfant. La qualité du reporting (STROBE), le risque de biais (ROBINS-E) et le niveau de preuve ont été évalués qualitativement.

Trente études ont été retenues : vingt-six études descriptives et quatre études cas-témoins. Les MNPs – polyéthylène, polypropylène, polychlorure de vinyle, polyéthylène téréphtalate, polyamide et polyuréthane – ont été détectés dans toutes les matrices périnatales humaines, sous forme de fragments de 10 à 400 µm. Plusieurs études ont rapporté des associations avec la prématurité, le retard de croissance intra-utérin, l'hypertension induite de grossesse et les fausses couches répétées inexpliquées, ainsi qu'avec des altérations hépatiques, endocriniennes et télomériques fœtales. Des perturbations du microbiote placentaire, méconial et lacté ont également été observées. Le niveau global de preuve demeure modéré, limité par l'hétérogénéité méthodologique et l'absence d'analyse de la fraction nanométrique qui présente le plus fort potentiel de toxicité.

En conclusion, les MNPs sont identifiés dans l'ensemble des matrices périnatales humaines, témoignant d'une imprégnation foetale précoce et ubiquitaire. Ces résultats constituent des signaux préoccupants pour la santé périnatale, suggérant un rôle possible dans la survenue de complications obstétricales et fœtales. Ils appellent à une standardisation internationale des méthodes, à des études longitudinales multicentriques incluant les nanoplastiques et les effets sanitaires à long terme et à une vigilance clinique raisonnée, fondée sur le principe de précaution: réduire le contact alimentaire avec le plastique et privilégier des matériaux alternatifs durables.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Damien Subtil

Assesseurs : Madame le Professeur Véronique DEBARGE,

Monsieur le Docteur Geoffroy CHEVALIER

Directeur de thèse : Madame le Docteur Lydia NIKASINOVIC