

SANTÉ
ENVIRONNEMENT

DÉCEMBRE 2021

ÉTUDES ET ENQUÊTES

IMPRÉGNATION DE LA POPULATION
FRANÇAISE PAR LES
ORGANOCHLORÉS SPÉCIFIQUES
ET LES CHLOROPHÉNOLS

Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016

Résumé

Imprégnation de la population française par les organochlorés spécifiques et les chlorophénols

Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016

Les organochlorés spécifiques (OCS) et les chlorophénols appartiennent à la famille des organochlorés (OC), définis comme des polluants organiques persistants (POPs). Ils sont lipophiles, bioaccumulables, très stables et résistants dans l'environnement. Les OCS ont été utilisés dans l'agriculture, dans le traitement du bois et dans la lutte contre les maladies vectorielles, à partir des années 1940, puis progressivement interdits entre 1980 et 2009. Les chlorophénols ont également été utilisés en tant que biocides dans le domaine agricole, ainsi que dans des applications industrielles, domestiques et médicales. Le lindane et le pentachlorophénol (PCP) sont cancérigènes pour l'homme (groupe 1) alors que les autres OC le sont probablement (groupe 2A) ou possiblement (groupe 2B). Les OC pourraient également perturber le système endocrinien et les fonctions reproductives, métaboliques et neurologiques et être en cause dans les retards de développement de l'enfant dès l'âge fœtal.

Dans le cadre du programme national de biosurveillance, l'étude transversale Esteban (2014-2016) a permis de mesurer dans la population française continentale les niveaux d'imprégnation de 18 biomarqueurs organochlorés spécifiques et de 9 biomarqueurs chlorophénols chez des enfants de 6 à 18 ans (n= 255 pour les OCS et n= 500 pour les chlorophénols) et chez des adultes de 18 à 74 ans (n= 759 pour les OCS et n= 900 pour les chlorophénols). Les analyses ont été effectuées sur des prélèvements sanguins pour les OCS et des prélèvements urinaires pour les chlorophénols.

L'étude Esteban est la première étude mesurant, chez les enfants, les niveaux d'imprégnation par les OC en France continentale. Chez les adultes, la comparaison avec l'étude ENNS (2006-2007) a permis de mettre en évidence des niveaux inférieurs dans l'étude Esteban par rapport à l'étude ENNS pour les biomarqueurs étudiés.

Chez les enfants et les adultes, les OCS étaient largement quantifiés alors que les chlorophénols étaient très peu quantifiés. Les niveaux d'imprégnation par les OC étaient inférieurs dans notre étude par rapport aux études étrangères réalisées à des dates antérieures (hormis pour le β -HCH). Pour le β -HCH, les niveaux étaient plus élevés dans notre étude que dans les autres études (allemande, canadienne et étasunienne).

Six OCS quantifiés à plus de 60% ont fait l'objet d'analyses pour rechercher les déterminants de l'exposition : pp'-DDE, β -HCH, cis-heptachlore epoxyde, oxychlorane, trans-nonachlore et dieldrine. Les niveaux d'imprégnation par les OCS augmentaient avec l'âge et l'indice de masse corporelle. La consommation de produits gras, tels que les œufs, les poissons, produits de la mer et les matières grasses (huile, beurre, margarine, crème fraîche), ainsi que la consommation de fruits et de légumes toutes provenances semblaient plutôt favoriser l'imprégnation. La consommation de viande, de laitage (lait, yaourts, fromage) et d'aliments provenant du jardin, du propre élevage, ou de l'agriculture biologique semblaient plutôt être associées à une diminution de l'imprégnation. L'exposition par l'air intérieur dans les habitats (faible aération, utilisation de répulsifs corporels et possession de plantes intérieures) semblait être associée à des niveaux d'imprégnation élevés par les OCS. Le fait de posséder une pelouse ou de résider dans un quartier périphérique plutôt qu'en ville, étaient associés à des niveaux d'imprégnation supérieurs par les OCS, en raison d'une probable exposition par des sols contaminés. Enfin les niveaux d'imprégnation étaient plus élevés chez les personnes exposées professionnellement aux poussières (végétales, animales ou sol arable) et exerçant une activité dans l'agriculture, le maraîchage, la vente de fleurs et autres cultures, l'usinage et le traitement du bois, la production ou utilisation de pesticides.

En raison des niveaux d'imprégnation encore élevés des pesticides organochlorés (particulièrement pp'-DDE et β -HCH), des expositions multiples à ces substances et de leurs effets sanitaires préoccupants, il semble nécessaire de protéger au mieux la population.

MOTS CLÉS : ORGANOCLORES ; CHLOROPHENOLS ; PESTICIDES ; DDE ; DDT ; HCH ; LINDANE ; PCP ; BIOSURVEILLANCE ; ESTEBAN ; IMPRÉGNATION ; EXPOSITION ; SUBSTANCES CHIMIQUES ; ENFANTS ; POPULATION GÉNÉRALE ; ENVIRONNEMENT ; DÉTERMINANT

Abstract

Exposure levels of specific organochlorine pesticides and chlorophenols in the french population

National biomonitoring program, Esteban 2014-2016

Specific organochlorines (OCS) and chlorophenols both belong to the organochlorine pesticides (OCP) family, defined as persistent organic pollutants (POPs). They are lipophilic, bioaccumulative, very stable and resistant in the environment. OCS were used in agriculture, in wood processing and in the fight against vector-borne diseases, since 1940s. Then, they were gradually banned between 1980 and 2009. Chlorophenols were also used as biocides in the agricultural field, as well as in industrial, domestic and medical fields. Lindane and pentachlorophenols (PCP) are carcinogenic to humans while the other OCP are probably (group 2A) or possibly (group 2B) carcinogenic to humans. OCP may also disrupt endocrine, reproductive, metabolic and neurological functions. They are also believed to be a cause in the developmental delays of the child from the fetal age.

Within the national biomonitoring program, the Esteban cross-sectional study (2014-2016), measured in the mainland French population the concentration of 18 specific organochlorine biomarkers and 9 chlorophenol biomarkers in children aged 6 to 17 years (n = 255 for OCS and n = 500 for chlorophenols) and in adults aged 18 to 74 (n = 759 for OCS and n = 900 for chlorophenols). The analyzes were carried out on blood samples for OCS and urine samples for chlorophenols.

Esteban is the first study that measured the levels of OC by children in mainland France. By adults, comparison with the ENNS study (2006-2007) revealed lower levels in Esteban than in ENNS for the biomarkers studied in the 2 studies.

By children and adults, OCS were fairly well quantified while chlorophenols were weakly quantified. Pp'-DDE was the biomarker with the highest serum concentration. OC levels were lower in our study than in earlier foreign studies, except for β -HCH, which were higher in our study than in other studies (German, Canadian and US).

6 OCS quantified at more than 60% were analyzed for determinants of exposure: pp'-DDE, β -HCH, cis-heptachlor epoxy, oxychlordane, trans-nonachlor and dieldrin. The level of OCS increased with age and body mass index. The consumption of fatty products, such as eggs, fish, seafood and fats (oil, butter, margarine, « crème fraîche »), as well as the consumption of fruits and vegetables from all sources seemed to favour the increase in concentration. The consumption of meat, dairy products (milk, yoghurts, cheese) as well as foods from garden, from own breeding or from organic farming seemed to be rather associated with a decrease in concentration. Indoor air exposure in habitats (poor ventilation, use of body repellents and indoor plants) appeared to be associated with high levels by OCS. Having a lawn or living in a peripheral area rather than in the city, were associated with higher levels of OCS, due to probable outside exposure to OCS from contaminated soils. Finally, the higher levels of OCS were associated with occupational exposures: exposure to dust (plant, animal or plant) and in the fields of agriculture, market gardening, flowers retailing and other crops, machining and wood treatment, production or use of pesticides.

Due to the still high levels of OCP (particularly pp'-DDE and β -HCH), the multiple exposures of these substances and the worrying health effects, it seems necessary to protect at best the population.

KEY WORDS: ORGANOCHLORINE ; PESTICIDES ; CHLORPHENOLS ; DDE ; DDT ; LINDANE ; HCH ; PCP ; BIOMONITORING; ESTEBAN; IMPREGNATION; EXPOSURE; CHEMICALS; CHILDREN; GENERAL POPULATION; ENVIRONMENT; DETERMINANTS

Citation suggérée : Imprégnation de la population française par les organochlorés spécifiques et les chlorophénols. Programme national de biosurveillance, Esteban 2014-2016. Saint-Maurice : Santé publique France, 2021. 104 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

ISSN : 2609-2174 / ISBN-NET : 979-10-289-0751-8 - RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE / DÉPÔT LÉGAL : DÉCEMBRE 2021

Auteurs

Anita Balestier¹, Clémence Filloi¹, Jessica Gane², Amivi Oleko¹, Abdessattar Saoudi², Abdelkrim Zeghnoun², Laura Chaperon¹, Johan Spinosi¹

¹ Santé publique France, Direction santé environnement Travail, Saint Maurice, France

² Santé publique France, Direction appui, traitements et analyses des données, Saint-Maurice, France

Ce rapport a été réalisé avec la participation financière de la phytopharmacovigilance de l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentaire de l'environnement et du travail).

L'étude a été réalisée avec la participation des ministères des Solidarités et de la Santé et de la Transition écologique et solidaire, des centres d'examens de santé de l'Assurance maladie et du Cetaf (Centre technique d'appui et de formation des centres d'examen de santé).

Sommaire

Résumé.....	2
Abstract.....	3
Auteurs.....	4
INTRODUCTION	7
1. GÉNÉRALITES SUR LES PESTICIDES ORGANOCHLORÉS	8
1.1 Utilisations et réglementations.....	8
1.1.1 Utilisation des organochlorés spécifiques	8
1.1.2 Utilisation des chlorophénols	9
1.1.3 Réglementation.....	9
1.2 Exposition de la population aux organochlorés spécifiques.....	9
1.2.1 Introduction	9
1.2.2 Exposition alimentaire.....	9
1.2.3 Exposition par l'air intérieur	11
1.2.4 Exposition par l'air extérieur	11
1.2.5 Exposition professionnelle.....	12
1.3 Exposition de la population aux chlorophénols	12
1.4 Devenir dans l'organisme	12
1.4.1 Absorption et distribution	12
1.4.2 Métabolisme	13
1.4.3 Élimination	13
1.5 Effets sanitaires	13
1.6 Mesures et interprétation des niveaux de pesticides organochlorés.....	15
1.6.1 Mesure des niveaux d'imprégnation.....	15
1.6.2 Interprétation.....	15
1.6.3 Valeurs seuils	16
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	18
2.1 Contexte et objectifs	18
2.2 Population	18
2.3 Recueil des données	20
2.4 Collecte et traitement des échantillons biologiques sanguins	20
2.5 Collecte et traitement des échantillons biologiques urinaires	21
2.6 Dosages des pesticides organochlorés, des lipides sériques et de la créatinine urinaire	21
2.6.1 Dosage des organochlorés spécifiques.....	21
2.6.2 Dosage des chlorophénols	21
2.6.3 Dosage des lipides sériques.....	23
2.6.4 Dosage de la créatinine urinaire	23
2.7 Analyses statistiques	23
2.7.1 Plan de sondage et pondérations.....	23
2.7.2 Traitement des données censurées à gauche	24
2.7.3 Analyse descriptive.....	24
2.7.4 Recherche des déterminants des niveaux d'imprégnation.....	24
2.7.5 Construction d'un indicateur géographique	25
2.7.6 Logiciels utilisés.....	25
3. RÉSULTATS DES ANALYSES DESCRIPTIVES CHEZ LES ENFANTS	26
3.1 Résultats des dosages	26
3.1.1 Niveaux des lipides sériques et de la créatinine urinaire	26
3.1.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols chez les enfants de 6 à 17 ans	26
3.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols mesurés dans les études en France et à l'étranger chez les enfants.....	29
3.2.1 Niveaux mesurés en France.....	29
3.2.2 Niveaux mesurés dans les études étrangères	29

4. RÉSULTATS DES ANALYSES DESCRIPTIVES CHEZ LES ADULTES	36
4.1 Résultats des dosages	36
4.1.1 Niveaux des lipides sériques et de la créatinine urinaire	36
4.1.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols chez les adultes de 18 à 74 ans.....	36
4.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols mesurés dans les études en France et à l'étranger chez les adultes	40
4.2.1 Niveaux mesurés en France.....	40
4.2.2 Niveaux mesurés en Outre-mer	40
4.2.3 Niveaux mesurés dans les études étrangères	41
5. DÉTERMINANTS DE L'IMPRÉGNATION PAR LES OCS CHEZ LES ADULTES	50
5.1 Facteurs d'ajustements physiologiques et socio-économiques	50
5.2 Déterminants d'exposition aux organochlorés spécifiques	50
5.2.1 Déterminants alimentaires	50
5.2.2 Déterminants domestiques	52
5.2.3 Déterminants géographiques	52
5.2.4 Déterminants professionnels	52
6. DISCUSSION	57
6.1 Résultats descriptifs chez l'enfant	57
6.2 Résultats descriptifs chez l'adulte	57
6.3 Analyses des déterminants	58
6.3.1 Facteurs physiologiques	58
6.3.2 Déterminants alimentaires	59
6.3.3 Déterminants géographiques	61
6.3.5 Déterminants professionnels	62
7. VALEURS DE RÉFÉRENCE D'EXPOSITION (VRE) DES ORGANOCHLORÉS SPÉCIFIQUES ET DES CHLOROPHÉNOLS, À PARTIR DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE ESTEBAN.....	63
7.1 Méthodologie	63
7.2 Valeurs de références à partir des données de l'étude Esteban	63
CONCLUSION.....	65
Références bibliographiques	66
Annexes.....	72
Annexe 1. Liste des variables testées dans les modèles multivariés chez les adultes	72
Annexe 2. Méthode de construction d'un indicateur de proximité géographique aux zones agricoles.....	74
Annexe 3. Distribution des niveaux d'imprégnation par les organochlorés spécifiques et les chlorophénols par classes d'âge et par sexe	85

INTRODUCTION

Tous les pesticides organochlorés (OC) sont des molécules de synthèse ayant une forte stabilité. En tant qu'insecticides à large spectre, les organochlorés spécifiques (OCS) ont largement été utilisés en agriculture depuis la Seconde Guerre mondiale jusque dans les années 1970-1980, dans le traitement du bois (lutte contre les termites) et dans la lutte contre le paludisme. Les chlorophénols (organochlorés non spécifiques) ont été employés comme biocides (germicides, algicides, anti acariens, antiparasitaires, antimites et fongicides) dans de très nombreuses applications médicales, paramédicales, industrielles et domestiques.

Du fait de leur grande persistance dans les sols, de leur caractère toxique pour l'environnement et pour l'homme, les OC ont progressivement été interdits entre 1978 et 2009.

Cependant, les OC et leurs métabolites étant persistants dans l'environnement, ils ont la capacité de s'accumuler dans les sols, dans les sédiments, et ainsi de contaminer durablement la chaîne alimentaire. Aussi, la remobilisation des OC à partir du sol, de l'eau et du bois traité, contamine l'air intérieur et extérieur et peut être une source d'exposition pour l'homme. Par ingestion, inhalation et par la voie cutanée, les OC peuvent exposer l'homme et être responsables d'effets néfastes sur la santé. La plupart des OC ont été classés cancérogènes possibles pour l'homme (groupe 2B) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). Les OC perturbent potentiellement le fonctionnement métabolique, les fonctions hormonales et sont possiblement neurotoxiques.

Très peu d'études françaises ont évalué en population générale, les niveaux d'imprégnation par les pesticides organochlorés et les déterminants de l'exposition. En 2013, le volet environnemental de l'étude nationale nutrition santé (ENNS) a permis de fournir des premiers niveaux d'imprégnation et a recherché les déterminants de l'exposition à certains organochlorés en population générale en France en 2006-2007 [1, 2]. Une étude menée par l'Anses, [La deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2)] visait à rechercher les différentes substances (dont les organochlorés) susceptibles d'être présentes dans les aliments « tels que consommés » [3].

L'étude transversale Esteban, l'étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition a permis de mesurer les niveaux d'imprégnation par les pesticides OC dans la population française continentale, 10 ans après la réalisation de l'étude ENNS. Les analyses des OC qui font l'objet de ce rapport ont été réalisées sur un sous-échantillon, inclus dans l'étude entre avril 2014 et mars 2016, de 759 adultes et 255 enfants pour les organochlorés spécifiques et de 900 adultes et 500 enfants pour les chlorophénols [4].

Après un rappel des généralités sur les OC, en termes de sources d'exposition et d'effets sur la santé (1), ce document présente la méthode utilisée pour la collecte des données et leur analyse (2), puis les résultats descriptifs des niveaux d'imprégnation observés dans le cadre de l'étude Esteban (3) et enfin l'analyse des déterminants de l'exposition chez les adultes (4).

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES PESTICIDES ORGANOCHLORÉS

1.1 Utilisations et réglementations

Les OCS sont des molécules aromatiques de synthèse composées d'atomes de carbone, d'hydrogène et plusieurs atomes de chlore par molécule [5]. Ils sont classés parmi les polluants organiques persistants (POPs). Fortement adsorbés par les sols riches en matières organiques, les OCS sont peu mobiles dans les sols. À partir des couches superficielles du sol, ils se remobilisent lentement dans l'atmosphère et fixés aux poussières, ils peuvent être transportés sur de longues distances. Peu solubles dans l'eau, les OCS se fixent aux sédiments. Par leur caractère lipophile, ils s'accumulent dans les graisses animales (terrestres et aquatiques) et sont soumis à un processus de biomagnification (ou bioamplification) le long de la chaîne alimentaire [6]. On distingue trois groupes d'insecticides organochlorés spécifiques :

- Le dichlorodiphényltrichloroethane (DDT), ses isomères et métabolites (op'-DDT, pp'-DDT, op'-DDE, pp'DDE, DDD).
- L'hexachlorocyclohexane (HCH) et ses isomères (α -HCH, β -HCH, γ -HCH, δ -HCH, ϵ -HCH)
- Les cyclodiènes, composés eux même par
 - L'heptachlore, ses isomères et métabolites, les cis- et trans heptachlore époxyde
 - Le chlordane, ses isomères et métabolites, les cis- et trans-chlordane, les cis et trans-nonachlore et l'oxychlordane
 - Et les autres cyclodiènes : l'aldrine, le dieldrine, l'endrine, le mirex, l'endosulfan et toxaphène
- L'hexachlorobenzène (HCB).

Les chlorophénols, sont des produits chimiques organiques comprenant un ou plusieurs atomes de chlore sur un phénol (dérivé hydroxylé du benzène). Il existe un total de 19 chlorophénols qui appartiennent à un des 5 types : les mono (MCP), di (DCP), tri (TCP), tétra (TeCP) et pentachlorophénols (PCP). Les composés les moins chlorés (mono-, di-, et trichlorophénols) sont hydrosolubles. Les composés les plus chlorés (comme les PCP) sont moins solubles dans l'eau et contaminent plutôt les sédiments. Du fait de leur faible volatilité, les chlorophénols ne sont pas des polluants atmosphériques préoccupants.

1.1.1 Utilisation des organochlorés spécifiques

Historiquement, les pesticides organochlorés spécifiques ont été largement utilisés pendant la Seconde Guerre mondiale, dans un objectif de santé publique dans la lutte contre le pou de corps, vecteur du typhus et dans la lutte contre les moustiques vecteurs du paludisme en Europe [7]. En médecine vétérinaire et humaine, ils ont également été utilisés contre la gale humaine, les poux, les tiques et les puces.

Parallèlement aux problématiques de santé publique, les OCS, insecticides à large spectre, sont les premiers pesticides de synthèse utilisés à grande échelle en agriculture. Entre 1940 et 1970, ils sont utilisés pour le traitement des semences (céréales, colza, lin), des sols (par exemple cultures de maïs et de betteraves) et des plantes à feuilles (arboriculture, culture maraichères, ornementales et fourragères).

C'est également dans la protection du bois (grumes, charpentes, meubles, poteaux électriques et ballasts des rails) pour la lutte contre les termites, que les OCS ont été appliqués.

Dans une moindre mesure, les OCS ont également été utilisés dans les textiles et pour la protection des revêtements en plastique et en caoutchouc, des câbles électriques et de télécommunication.

1.1.2 Utilisation des chlorophénols

Les chlorophénols ont été employés comme biocides (pesticides et antiseptiques) et en particulier comme germicides, algicides, antiacariens, antiparasitaires, antimites et fongicides, dans de très nombreuses applications médicales, paramédicales, industrielles et domestiques. Les chlorophénols ont également été employés comme intermédiaires de synthèse, notamment dans la synthèse des colorants, des pigments, des résines phénoliques, et comme conservateurs dans les industries des peintures, du textile, des cosmétiques, de médicaments et du cuir. Ils sont produits lors de l'utilisation de chlore pour le blanchiment de la pâte à papier. La chloration de l'eau, quand cette dernière contient des phénols, produit des chlorophénols qui sont, en conséquence, des polluants redoutés des eaux destinées à la consommation humaine, en raison du goût très désagréable qu'ils lui confèrent, même en très faibles concentrations.

1.1.3 Réglementation

Du fait de la rémanence des pesticides organochlorés, de la bioamplification dans la chaîne alimentaire, de leur transport sur de longues distances et de leur toxicité sur la santé et l'environnement à l'échelle mondiale, les OC ont fait l'objet d'interdiction dans le cadre de convention sur les POPs. Le protocole d'Aarhus sur les POPs, signé par la communauté européenne, interdit la production et l'utilisation de certains POPs [8]. S'appuyant sur le protocole d'Aarhus de 1998, la Convention de Stockholm (signé en 2001, ratifié en 2004) a interdit 12 POPs (notamment, aldrine, chlordane, DDT, dieldrine, endrine, héptachlore, hexachlorobenzène, mirex, toxaphène) [9]. Lors de la quatrième Conférence des parties à la Convention sur les polluants organiques persistants (POP) en 2009, 9 nouveaux produits chimiques ont été inscrits à la liste de la Convention de Stockholm (notamment, HCH technique, α -HCH, β -HCH, lindane, endosulfan).

L'utilisation des pentachlorophénols (PCP) a diminué au cours du temps suite au durcissement de la réglementation. Il est interdit dans les produits pour le public depuis 1992, et son usage comme produit phytosanitaire n'est plus autorisé depuis 2003. De plus, les pays signataires de la Convention OSPAR se sont engagés collectivement depuis 2008 à demander à l'Union européenne qu'elle bannisse l'importation de produits contenant des PCP.

1.2 Exposition de la population aux organochlorés spécifiques

1.2.1 Introduction

Bien que les OCS ne soient plus utilisés en France, en Europe et dans un grand nombre de pays dans le monde, le risque d'exposition humaine est encore très présent.

En raison de leur persistance et de leur caractère bio-accumulatif, les anciennes utilisations (dans l'agriculture, dans le traitement du bois et dans la lutte contre le paludisme) rendent ces substances très présentes dans notre environnement, notamment dans les sols (contaminant la chaîne alimentaire) et dans les poussières domestiques.

1.2.2 Exposition alimentaire

L'exposition alimentaire constitue la principale source d'exposition des pesticides organochlorés. Du fait du caractère lipophile des OCS, ces derniers ont tendance à s'accumuler dans les graisses, notamment animales. Ainsi, les poissons, les produits laitiers, les œufs et la viande seraient les principales sources de contamination humaine par les OCS [10]. Les enfants en bas âge peuvent être exposés à ces produits chimiques par le lait maternel, et le fœtus peut être exposé *in utero* via le placenta [1]. L'eau potable est une source mineure d'exposition aux OCS.

Poissons et produits de la mer

La consommation de poisson et plus particulièrement de poissons gras est une des expositions alimentaires les plus étudiées.

La seconde étude de l'alimentation totale française (EAT2) conduite par l'Anses en 2011 a mesuré de fortes teneurs moyennes en DDT dans les produits de la mer [3]. Ces résultats vont dans le même sens que ceux publiés par l'ENNS mettant en évidence qu'une consommation de crustacés était un facteur d'exposition au DDE sérique : la concentration sérique de DDE augmentait d'environ 5,9% [1,1 ; 10,9] lorsque la consommation journalière moyenne de crustacés augmentait d'un gramme [1].

L'association avec les crustacés est rarement signalée dans les études publiées. En revanche, celle avec la consommation de poisson est largement étudiée avec des résultats contradictoires. Deux études réalisées à partir de cohortes de femmes, ne montrent pas de relation avec la consommation de poisson [11, 12]. D'autres études européennes ou internationales, réalisées auprès d'une population générale ou auprès de populations particulières (enfants, femmes, femmes enceintes) ont quant à elles mis en évidence une relation entre la consommation de poisson, notamment de poissons gras et la concentration sérique d'OCS [13-19]. De plus la consommation de poisson chez des femmes primipares belges a été associée avec des concentrations plus élevées en β -HCH dans le lait maternel [20]. Des concentrations élevées en β -HCH dans le sang de cordon a également été associé à une consommation de poisson chez des femmes enceintes de Shanghai [21].

Produits laitiers

Dans EAT2, de fortes teneurs moyennes estimées de DDT ont été retrouvées dans le lait et le groupe ultra-frais laitier [3]. L'ENNS a mis en évidence qu'une consommation de produits laitiers explique environ 1% de la variabilité de la concentration sérique de β -HCH. Celle-ci augmentait d'environ 17,5% [4,6 ; 31,9] lorsque la consommation moyenne journalière de produits laitiers augmentait de 200 grammes [1]. Dans la littérature, on retrouve également que la consommation de produits laitiers est associée à des niveaux d'imprégnation en OCS, notamment en DDE, DDT et β -HCH [13, 17, 21-23].

Les œufs

Dans EAT2, de fortes teneurs moyennes estimées de DDT ont été retrouvées dans les œufs et dérivés. Le lindane a été quant à lui détecté à l'état de traces dans les œufs durs [3]. L'ENNS n'a pas mis en évidence une relation entre la consommation d'œufs et la concentration sérique de DDT ou de β -HCH [1]. Cependant, des études ont montré que la consommation d'œufs contribuait à des concentrations d'OCS dans le sang du cordon de femmes enceintes de Shanghai [21] ou dans le lait maternel de femmes primipares belges [20].

Viande (viande rouge et volailles)

Dans EAT2, le lindane a été détecté dans des échantillons de poulet (0,04 mg/kg) et à l'état de traces dans du rôti de porc tels que consommés [3]. L'ENNS a mis en évidence que la consommation d'abats était associée à une augmentation des niveaux d'imprégnation par le DDE. La concentration sérique en DDE augmentait d'environ 10,7% [3,1 ; 18,8] quand la consommation journalière moyenne d'abats augmentait d'environ trois grammes. L'ENNS n'a pas mis en évidence de relations entre la concentration sérique de β -HCH et la consommation d'autres aliments d'origine animale (viande rouge et volailles) [1].

De nombreuses études signalent une association entre la consommation de viande et le niveau d'imprégnation sérique par les OCS [13, 19, 21, 24-26].

Aliments d'origine végétale

Parmi les différents OCS étudiés dans EAT2, les plus fortes teneurs moyennes estimées de chlordane, DDT, endrine et heptachlore sont retrouvées dans les légumes hors pomme de terre [3]. L'ENNS montre une association entre l'imprégnation par le DDE et celles des fruits, mais ne montre pas d'associations avec d'autres aliments d'origine végétale [1]. La littérature internationale est controversée. Certaines études mettent en évidence une association entre la consommation d'aliments d'origine végétale et le niveau d'imprégnation par les OCS [13, 17, 27], d'autres études montrent un effet inverse [14, 25].

Allaitement maternelle

Le niveau d'imprégnation par les OCS chez les enfants était associé au fait d'avoir été allaité à la naissance [28], et augmente avec la durée d'allaitement : dans une étude espagnole les enfants âgés de 13 mois avaient des niveaux plus élevés en DDE s'ils avaient été allaités pendant longtemps (plus de 16 semaines) que s'ils étaient peu ou pas du tout allaités [29] ; une étude norvégienne a montré que l'augmentation de la concentration plasmatique en DDE des enfants âgés de 3 ans était associée à des durées d'allaitement prolongées [30]. La consommation d'œufs, de poissons gras et de compléments alimentaires à base d'huile de poisson, était associée à des concentrations élevées en DDT et en DDE dans le lait maternel [20].

1.2.3 Exposition par l'air intérieur

Malgré des utilisations anciennes des pesticides OCS dans le cadre d'usages domestiques (insecticides) ou du traitement du bois contre les termites (charpentes, menuiserie et grumes), les pesticides OC persistent dans l'environnement et ont tendance à se retrouver dans les poussières des logements [31-34]. D'après plusieurs études et campagnes françaises sur la qualité de l'air intérieur, le lindane et l'endosulfan seraient les organochlorés les plus retrouvés dans l'air intérieur [35, 36].

Le faible pouvoir de dégradation des OCS dans l'air intérieur (peu de réaction photolytique et de flux d'air) et leur adsorption aux poussières, rendent les OCS plus présents dans les habitats que dans l'air extérieur.

Par l'ingestion et l'inhalation de ces poussières, les pesticides OCS peuvent exposer l'homme [32, 37]. Ainsi, l'exposition aux poussières dans les habitats était associée à des concentrations sériques élevées en OCS, notamment dans les régions où le DDT a fortement été utilisé dans les logements dans le but d'éradiquer le paludisme [38].

1.2.4 Exposition par l'air extérieur

L'interdiction de l'utilisation des OCS étudiés a fortement diminué leurs concentrations dans l'air. Cependant, l'activité agricole et la météorologie (pluie, vent, température, moussons) vont influencer les niveaux de concentrations d'OCS dans l'air extérieur plus ou moins proche de leurs sources.

Les pesticides OCS sont libérés dans l'air ambiant, par remobilisation des substances à partir du sol et de l'eau, favorisée par le travail de la terre (lors des activités agricoles) et par des températures élevées. La récente campagne exploratoire menée par l'Anses [39], analysant les concentrations de 75 pesticides dans l'air ambiant, a mis en évidence que le lindane était la substance la plus quantifiée en France métropolitaine. Bien que cette substance soit interdite, son caractère persistant dans l'environnement et sa volatilité rendent ce polluant ubiquitaire dans l'air ambiant. Dans cette étude, il n'a pas été mis en évidence un gradient de concentration entre les zones urbaines, péri-urbaines ou rurales. Cependant, d'autres études ayant analysé les OCS de façon plus locale, ont identifié des gradients de concentrations des OCS dans l'air ambiant, avec des niveaux plus élevés proches des zones agricoles, le long des rivières et dans les parcs des villes [40-43].

Les OCS peuvent également être transportés sur de longues distances [42]. Adsorbés aux particules de poussières, ils peuvent provenir d'autres continents où ils sont encore utilisés [40]. La pluie et les moussons semblent également transporter les pesticides organochlorés [44, 45].

Ainsi, la présence des pesticides OCS dans l'air ambiant peut être une source d'exposition pour l'homme, par inhalation ou ingestion.

1.2.5 Exposition professionnelle

Les travailleurs peuvent, en principe, être exposés aux pesticides organochlorés lors de leur production, leur formulation et leur conditionnement, ou du fait de leur application. Cependant, ces expositions professionnelles ont à peu près toutes disparu avec le retrait du marché des pesticides OCS. Les expositions professionnelles résiduelles résultent de la manipulation ou de l'usinage de matériaux traités par ces pesticides (charpentes ou meubles anciens traités par du pentachlorophénol), du travail sur des sols pollués par ces pesticides, de l'intervention sur des déchets contaminés [1].

1.3 Exposition de la population aux chlorophénols

La population générale peut être exposée à de très faibles niveaux de chlorophénols par la consommation d'eau et d'aliments. Les eaux sont généralement faiblement contaminées par des chlorophénols (goût très désagréable dès 0,1 µg/L) ; les chlorophénols formés par la chloration de l'eau sont essentiellement des dérivés peu substitués. Des apports alimentaires de chlorophénols fortement substitués sont possibles du fait de la consommation de poisson, en particulier des poissons d'eau douce fousseurs qui se contaminent, eux-mêmes, dans les sédiments.

L'exposition par voie aérienne est généralement négligeable en raison de la faible volatilité des chlorophénols. L'exposition par voie cutanée est possible avec les surfaces traitées ou les sols contaminés.

Une contamination domestique par le 2,5-DCP peut résulter de l'inhalation et de contacts cutanés avec le para-dichlorobenzène, substance volatile qui a été largement employée comme désodorisant et surtout comme antimites et dont le principal métabolite est le 2,5-DCP.

Au niveau professionnel, les agriculteurs et ouvriers impliqués dans l'utilisation d'aérosols biocides, la production de phénoxy-herbicides, la conservation et l'usinage de bois traités par le PCP (exposition aux poussières de matériaux traités) et la fabrication de colorants ont pu être exposés à des chlorophénols.

1.4 Devenir dans l'organisme

1.4.1 Absorption et distribution

Tous les pesticides organochlorés sont absorbés par voie respiratoire, cutanée ou digestive. L'ingestion est la voie d'entrée dominante des OC dans l'organisme. Le passage transcutané est assez variable d'une molécule à l'autre : par exemple, l'absorption de la dieldrine à travers la peau est élevée, celle du DDT est faible. Généralement, les pesticides organochlorés sont présents en faible concentration dans l'atmosphère ; cependant, adsorbés aux poussières (de sol, de bois traité, etc.), les OC peuvent être ingérés ou inhalés.

La lipophilie de ces substances détermine leur distribution dans l'organisme. C'est dans le tissu adipeux que les concentrations en OC les plus élevées sont observées. Le foie (principal site de métabolisme) et les reins (principal site émonctoire) sont quant à eux les tissus privilégiés des chlorophénols. Chez les femmes enceintes, certains OC tels que l'HCH, le DDT et les chlorophénols

peuvent passer la barrière transplacentaire et ainsi perturber potentiellement le développement fœtal.

1.4.2 Métabolisme

En raison de leur lente métabolisation, tous les organochlorés sont susceptibles de s'accumuler. Le principal système enzymatique impliqué dans le métabolisme des OCS est celui des monooxygénases à cytochrome P450. Plusieurs isoenzymes sont impliquées ; elles catalysent la déchloration et parfois la désalkylation des organochlorés. Les autres voies métaboliques concernées pour les OCS sont des conjugaisons (glucuroconjugaison et/ou conjugaison au glutathion avec production de mercapturates) [1].

Des conjugaisons (sulfoconjugaison, glucuronidation) constituent l'essentiel du métabolisme de tous les chlorophénols. Des déchlорations, des hydroxylations et des conjugaisons au glutathion sont également possibles [1].

Les chlorophénols sont métabolisés au niveau hépatique principalement par conjugaison (sulfo- ou glucuro-). Le pentachlorophénol (PCP) et le tétrachlorophénol sont métabolisés pour une petite partie en tétrachlorohydroquinone.

1.4.3 Élimination

L'efficacité du processus de métabolisation reste très variable d'un composé OCS à l'autre : le DDT a une demi-vie de 4,2 à 5,6 ans alors que le DDE a une demi-vie comprise entre 7 et 8,6 ans dans le corps humain [46-48]. De même, les capacités d'accumulation de l'hexachlorocyclohexane sont très variables d'un isomère à l'autre (demi-vie de 20 à 100 heures pour le lindane et de 7 ans pour le bêta-HCH). La dieldrine (demi-vie de 369 jours) est beaucoup plus lentement métabolisée que son isomère l'endrine.

Les chlorophénols et leurs métabolites sont éliminés rapidement (complètement en quelques heures à quelques jours selon les chlorophénols) dans les urines et les fèces, soit sous forme libre, soit sous forme conjuguée, tant pour le produit parent que pour ses métabolites. Les demi-vies des chlorophénols sont directement proportionnelles au degré de chloration des tri-, tétra- et penta-chlorophénols. En raison de leur caractère plus hydrosoluble que les OCS, ils ont une demi-vie plus courte, de quelques heures à 20 jours chez l'homme [49]. Elle est de 8 jours pour le 2,4,5 TCP [50]. Les OC sont principalement éliminés par le rein dans les urines. Les OC peuvent également être éliminés par la voie biliaire dans les fèces. Du fait de leur lipophilie, les OC ont également une importante excrétion lactée, suffisante pour être une source de contamination des nourrissons allaités [30, 51].

1.5 Effets sanitaires

En raison de l'emploi intensif des OC en circuit ouvert ainsi que de leur rémanence et de leur pouvoir bioaccumulatif, les OC sont encore présents dans l'environnement, et cela malgré leur interdiction en France et en Europe. Ainsi, l'ensemble de la population peut être exposé aux OC. Ils peuvent contaminer l'homme et être la cause de certaines pathologies.

En effet, les OCS peuvent affecter le métabolisme lipidique et glucidique. Ils peuvent également induire un stress oxydatif qui affecte le mécanisme mitochondrial et perturber les fonctions neuronales et hormonales [52, 53]. Ainsi les pesticides OCS sont potentiellement cancérigènes, perturbateurs endocriniens, neurotoxiques et peuvent être la source de perturbations métaboliques.

Les OC sont classés selon leur cancérogénéicité par le CIRC (Centre internationale de recherche sur le cancer) [54]. Le DDT est classé 2A : agent probablement cancérigène pour l'homme. Le lindane (γ -HCH) est classé dans le groupe 1 : agent cancérigène pour l'homme, alors que les autres

isomères HCH sont classés 2B : possiblement cancérigène. L'heptachlore, le chlordane et le mirex sont classés 2B. La dieldrine et l'aldrine sont classés 2A alors que l'endrine est classé 3 (l'agent est inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme). Par ailleurs, la présomption d'un lien fort, moyen ou faible entre l'exposition à des substances et certaines pathologies a été étudiée par l'Inserm [55, 56]. La dernière expertise collective, récemment publiée (2021) [56], a mis en évidence, chez les professionnels (agriculteurs, applicateurs, éleveurs), la présomption forte ou moyenne d'un lien entre l'exposition au DDT, au lindane, à l'HCH ou au chlordane, avec le lymphome non Hodgkinien (LNH), ainsi que la présomption moyenne d'un lien entre l'exposition au DDT, au lindane, au chlordane ou à l'heptachlore, avec un excès de risque de leucémie. Les récentes données ont permis de conclure à une présomption faible d'un lien entre l'exposition au DDT et le myelome multiple, en population générale. Aussi, elles ont permis de mettre en évidence une présomption moyenne d'un lien entre le DDT et l'excès de risque de cancer du sein, en population générale, lors d'une exposition pendant la période périnatale ou avant 18 ans (avant le bannissement du DDT). Une présomption moyenne de lien a également été mise en évidence entre l'aldrine (chez les agriculteurs) ou le DDE (en population générale) et un excès de risque de cancer de la prostate (de forme agressive chez les agriculteurs). Enfin, une présomption moyenne d'un lien a été rapportée entre l'exposition aux pesticides sans distinction (dont le lindane) et les tumeurs du SNC, notamment le gliome, chez les conjointes des applicateurs.

L'expertise collective sur les pesticides et leurs effets sur la santé, menée par l'Inserm, a également pu évaluer les liens potentiels entre l'exposition aux pesticides OCS et les pathologies non cancéreuses. En premier lieu, une présomption forte d'un lien entre l'exposition aux insecticides OC et la maladie de Parkinson chez les professionnels a été établie. L'exposition aux pesticides sans distinction (dont les OC) serait également associée (présomption moyenne) à une altération des fonctions cognitives de l'enfant et de l'adulte, à des troubles dépressifs chez l'adulte et à la maladie d'Alzheimer. Ces liens avaient principalement été retrouvés chez les riverains de zones agricoles, ou chez les professionnels, notamment pour la maladie d'Alzheimer. Aussi, l'exposition aux pesticides OC (DDT, HCH et heptachlore) en population générale ou chez les agriculteurs, serait en rapport (présomption moyenne à faible) avec certaines pathologies respiratoires (l'altération de la fonction respiratoire, l'asthme, la bronchite chronique ou la BPCO). Une présomption moyenne à faible a également été mise en évidence entre l'exposition au DDT/DDE au lindane, à l'aldrine, à l'heptachlore ou au chlordane et l'hypothyroïdie (ou la baisse des niveaux de thyroïdostimuline), chez les agriculteurs et applicateurs, mais aussi en population générale pour le DDT/DDE. Enfin, une présomption faible d'un lien existe entre l'exposition aux pesticides OC et l'endométriose, ainsi qu'entre le β -HCH et l'excès de risque d'endométriose, en population générale.

Les effets toxiques des chlorophénols dépendent de leur degré de chloration (mono-, di-, tri-, tetra-, penta-chlorophénols). En phase aiguë, tous les chlorophénols sont irritants pour les yeux, les voies respiratoires, le tube digestif et la peau. La toxicité systémique des chlorophénols autre que le pentachlorophénol (PCP) est mal caractérisée. Le PCP est un découpleur de la phosphorylation oxydative, ce qui a pour double conséquence d'entraîner la production de chaleur et une crise énergétique intra-cellulaire. Expérimentalement, l'intoxication aiguë aux chlorophénols est principalement responsable d'un coma et de convulsions. Le PCP est considéré cancérigène pour l'homme par le CIRC (Groupe 1). Les di-, tri- et tetra-chlorophénols sont classés 2B par le CIRC : possiblement cancérigène pour l'homme [54]. L'expertise collective de l'Inserm [56] a également mis en évidence la présomption moyenne d'un lien entre l'exposition aux chlorophénols et les sarcomes des tissus mous et des vicères, chez les travailleurs agricoles, les travailleurs du bois, les jardiniers et les éleveurs.

1.6 Mesures et interprétation des niveaux de pesticides organochlorés

1.6.1 Mesure des niveaux d'imprégnation

Les OC étant lipophiles, ils ont tendance à s'accumuler dans les organes riches en lipides [57]. Des études sur l'animal montrent que les OC peuvent être mobilisés à partir des tissus adipeux vers la circulation sanguine et vers les autres tissus et fluides [58, 59]. Les OCS peuvent ainsi être présents dans les compartiments sériques (le plasma des femmes enceintes et le sang du cordon) et tissulaire, mais aussi être présents dans les urines, la transpiration et le lait maternel [60, 61]. Dans notre étude, l'évaluation des niveaux d'imprégnation par les OCS est basée sur des dosages sériques.

Après un passage hépatique, les chlorophénols sont rapidement éliminés par les urines (demi-vie de quelques heures à quelques jours). L'évaluation des niveaux d'imprégnation par les chlorophénols est basée sur des dosages urinaires.

1.6.2 Interprétation

L'indicateur biologique de l'exposition à un pesticide organochloré peut être la molécule parente ou son métabolite dans la matrice biologique appropriée. Les principales métabolisations des pesticides sont résumées dans le tableau 1 ; par exemple, le DDT se métabolise en pp'-DDE. Certains métabolites peuvent être produits par la biotransformation de plusieurs pesticides : par exemple, les chlorophénols peuvent provenir du métabolisme de l'hexachlorobenzène (HCB) et de l'hexachlorocyclohexane (HCH).

Les différences des niveaux d'imprégnation par les OC peuvent refléter plusieurs phénomènes. Il s'agit (1) des interdictions progressives et étalées (entre 1978 et 2009), (2) des demies-vies plus ou moins longues des OC, (3) des caractères lipophiles et bio-accumulatifs des OC (certains étant moins lipophiles et moins bio-accumulateurs que d'autres).

Afin de prendre en compte le caractère lipophile des OCS, les résultats des niveaux d'imprégnation par les OCS sont ajustés sur les niveaux de lipides sériques et donc exprimés en ng g^{-1} de lipides. La littérature nous indique que l'âge, le sexe, l'IMC et la variation du poids pourraient également faire varier les niveaux d'imprégnation par certains OC [1].

Les différences de concentrations entre la substance mère et son métabolite permettent d'estimer si l'exposition est ancienne ou récente. Le tableau 1 ci-dessous, résume les couples substance mère/métabolite. Aussi, les compositions chimiques des pesticides OC sont à considérer afin d'évaluer la cohérence entre l'imprégnation par les OC et les anciens usages des pesticides OC. Les compositions chimiques des pesticides OC les plus utilisés sont les suivantes :

- DDT technique est composé à 85% de pp'-DDT, à 15% de op'-DDT et par des traces de oo'-DDT ;
- La fabrication de dicofol libère le DDT comme impureté ;
- L'HCH technique est composé à 53-70% d' α -HCH, à 3-14% β -HCH, à 11-18% γ -HCH, à 6-10% de δ -HCH, à 3-10% d'autres isomères ;
- Le lindane est composé exclusivement du γ -HCH ;
- Le chlordane technique est composé à 24% de trans-chlordane, à 19% cis-chlordane et à 64 à 70% de produits chlorés dérivés du chlordane ;
- Heptachlore technique est composé à 72% d'heptachlore, à 28% d'impuretés (trans-chlordane, cis-chlordane et nonachlore)

Tableau 1. Les pesticides organochlorés et leurs métabolites

Pesticides organochlorés (numéro CAS)	Substances mères sériques ou métabolite(s) (numéro CAS)	Substances mères urinaires ou métabolite(s) (numéro CAS)
Dichlorodiphényltrichloroethanes DDT	p,p'-DDT (50-29-3) p,p'-DDE (72-55-9) o,p'-DDT (789-02-6)	
Hexachlorocyclohexanes HCH	Beta-hexachlorocyclohexane (319-85-7) Gamma-hexachlorocyclohexane (58-89-9)	Pentachlorophénol (87-86-5) 2,4,6-Trichlorophénol (88-06-2) 2,4,5-Trichlorophénol (95-95-4)
Chlordane (12789-03-6)	Oxychlordane (27304-13-8) Trans-Nonachlor (3734-49-4)	
Heptachlore (76-44-8)	Heptachlore epoxyde (1024-57-3)	
Aldrine (309-00-02)	Aldrine (309-00-02) Dieldrine (60-57-1)	
Dieldrine (60-57-1)	Dieldrine (60-57-1)	
Endrine (72-20-8)	Endrine (72-20-8)	
Mirex (2385-85-5)	Mirex (2385-85-5)	
2,4,5-Trichlorophénol (95-95-4)		2,4,5-Trichlorophénol (95-95-4)
2,4,6-Trichlorophénol (88-06-2)		2,4,6-Trichlorophénol (88-06-2)
Hexachlorobenzène (118-74-1)	Hexachlorobenzène (118-74-1)	Pentachlorophénol (87-86-5) 2,4,6-Trichlorophénol (88-06-2) 2,4,5-Trichlorophénol (95-95-4)

https://www.cdc.gov/biomonitoring/DDT_BiomonitoringSummary.html

1.6.3 Valeurs seuils

Des valeurs de référence d'exposition (RV₉₅) ont été établies par une enquête canadienne [62] et par la commission allemande [63, 64]. Le RV₉₅ correspond au 95^e percentile des niveaux d'imprégnation par les OC de leurs échantillons respectifs : Enquête canadienne sur les mesures de la santé (ECMS) et *German Human Biomonitoring Commission*. Le tableau 2a ci-dessous récapitule les RV₉₅ du β-HCH, du pp'-DDE, du trans-nonachlore et de l'oxychlordane.

Parmi les OC, seul le PCP a fait l'objet de seuil sanitaire (HBM-I et HBM-II), résumé dans le tableau 2b. La Commission allemande de biosurveillance humaine (HBM) a publié en 2007 des valeurs HBM-I pour un chlorophénol : le PCP. La valeur HBM-I correspond à la concentration en dessous de laquelle les données scientifiques du moment permettent d'estimer qu'il n'y a pas de risque d'impact sur la santé [65]. Déterminées à partir d'études chez l'homme et chez l'animal, la commission HBM a établi des valeurs HBM-I pour le PCP en population générale : de 25 µg L⁻¹ dans le sérum et de 40 µg L⁻¹ dans les urines. La valeur HBM-II correspond à la concentration au-dessus de laquelle on peut estimer, en fonction des connaissances scientifiques du moment, qu'il existe un risque pour la santé chez les individus de la population générale. Cette valeur doit être considérée comme un niveau d'action. La commission HBM a établi des valeurs HBM-II pour le PCP en population générale : de 40 µg L⁻¹ dans le sérum et de 70 µg L⁻¹ dans les urines.

Tableau 2a. Valeurs de référence d'exposition (RV95) de certains pesticides organochlorés spécifiques

Biomarqueurs	Enquête canadienne 2007 – 2009 [62] Plasma - RV95 en µg L ⁻¹		Commission allemande 1997 - 1999 [63, 64] Sang total - RV95 en µg L ⁻¹		
			Allemagne de l'Ouest	Allemagne de l'Est	
pp'-DDE	20–39 ans	NC	18-19 ans	1,5	3
	40–59 ans	5,5	20–29 ans	2	5
	60–79 ans	9,1	30–39 ans	4	11
			40–49 ans	7	18
			50–59 ans	8	31
			60–69 ans	11	31
β-HCH	Total	0,33	Allemagne*		
			18-19 ans	0,3	
			20–29 ans	0,3	
			30–39 ans	0,3	
			40–49 ans	0,3	
			50–59 ans	0,5	
Oxychlordane	20–39 ans	0,036			
	40–59 ans	0,074			
	60–79 ans	0,14			
Trans-nonachlore	20–39 ans	0,054			
	40–59 ans	0,11			
	60–70 ans	0,22			

NC : Non communiqué, car le coefficient de variation du P95 était trop élevé (33,3%) pour publier les estimations

*Allemagne de l'Est et de l'Ouest sans distinction

Tableau 2b. Valeurs de référence d'exposition (RV95) et seuils sanitaires du pentachlorophénol (PCP)

Biomarqueur	Commission allemande 1997 - 1999 Sang total [64]		Étude allemande Shultz <i>et al.</i> 2007 [65]	
	RV95 (µg/L)		Valeur HBM I	Valeur HBM II
PCP	<u>PCP Urinaire</u>	5 µg/L	<u>PCP Urinaire</u> : 25 µg/L 20 µg/g de créatinine	<u>PCP Urinaire</u> : 40 µg/L 30 µg/g de créatinine
	<u>PCP sérique*</u>	12 µg/L	<u>PCP sérique</u> 40 µg/L	<u>PCP sérique</u> : 70 µg/L

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Contexte et objectifs

En France, la loi Grenelle de l'environnement (n° 2009-967 du 3 août 2009) a conduit à l'élaboration d'un programme national de biosurveillance de la population française. Ce programme a été inscrit dans les PNSE (Plan national sante environnement) 2 et 3. Ce programme, préparé entre mai 2009 et mars 2010 par un comité de pilotage mis en place et animé par Santé publique France¹, reposait sur la mise en place de deux études :

- Un volet périnatal mis en œuvre au sein de la cohorte Elfe dont les derniers résultats ont été publiés en décembre 2017 ;
- L'étude nationale transversale en population générale nommée Esteban (Étude de Sante sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition) conçue pour estimer l'exposition de la population à diverses substances de l'environnement (y compris dans l'alimentation) et pour améliorer la compréhension des déterminants de l'exposition.

Les objectifs de l'étude Esteban concernant les pesticides organochlorés étaient les suivants :

- Décrire les niveaux d'imprégnation par les pesticides organochlorés de la population française continentale, mesurés à partir des prélèvements recueillis chez les enfants et chez les adultes ;
- Établir des valeurs de références d'exposition;
- Étudier les variations temporelles des niveaux d'imprégnation par les OC par une comparaison avec les résultats d'études antérieures menées en France et à l'étranger ;
- Analyser les déterminants des niveaux d'imprégnation par les OC de la population adulte.

Dans le cadre de l'étude Esteban, 18 biomarqueurs de pesticides OCS et 9 chlorophénols ont été recherchés. La liste détaillée des biomarqueurs analysés est présentée dans le tableau 3.

2.2 Population

Les inclusions des participants se sont déroulées entre avril 2014 et mars 2016, au cours de quatre vagues successives, de durées égales, afin d'équilibrer les inclusions en fonction de la saisonnalité des expositions environnementales et de l'alimentation. La population cible de l'étude Esteban était constituée de l'ensemble des personnes résidant en France continentale âgées de 6 à 74 ans et vivant dans un ménage ordinaire sur la période d'étude.

Pour être éligibles, les individus devaient résider au moins quatre jours par semaine dans leur résidence habituelle, maîtriser suffisamment la langue française, ne pas déménager en dehors des zones géographiques couvertes au cours de la période d'étude et ne pas souffrir d'une pathologie rendant impossible la réalisation de l'étude (alimentation artificielle entérale ou parentérale, contre-indication à un prélèvement sanguin).

¹ Réunissant la Direction générale de la Santé, la Direction générale de la prévention des risques, la Direction générale du Travail, l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments et l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail aujourd'hui regroupées au sein de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

Tableau 3. Liste des pesticides organochlorés étudiés dans Esteban

Pesticides organochlorés	Abréviations	Formule chimique	N°CAS
ORGANOCHLORÉS SPÉCIFIQUES			
Dichlorodiphényltrichloroéthanés et métabolites			
Dichlorodiphényltrichloroéthane	p,p'-DDT	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	50-29-3
	o,p'-DDT	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	789-02-6
Dichlorodiphényldichloroéthylène	p,p'-DDE	C ₁₄ H ₈ Cl ₄	72-55-9
	o,p'-DDE	C ₁₄ H ₈ Cl ₄	3424-82-6
Hexachlorocyclohexanes			
Alpha- hexachlorocyclohexane	α-HCH	C ₆ H ₆ Cl ₆	319-84-6
Beta-hexachlorocyclohexane	β-HCH	C ₆ H ₆ Cl ₆	319-85-7
Gamma-hexachlorocyclohexane	γ-HCH / Lindane	C ₆ H ₆ Cl ₆	58-89-9
Cyclodiènes			
Cis-chlordane (ou α-chlordane)		C ₁₀ H ₆ Cl ₈	5103-71-9
Trans-chlordane (ou γ-chlordane)		C ₁₀ H ₆ Cl ₈	5103-74-2
Oxychlordane		C ₁₀ H ₆ Cl ₈ O	27304-13-8
Cis-nonachlore		C ₁₀ H ₅ Cl ₉	5103-73-1
Trans- nonachlore		C ₁₀ H ₅ Cl ₉	39765-80-5
Epoxyde heptachlore (cis)		C ₁₀ H ₅ Cl ₇ O	1024-57-3
Epoxyde heptachlore (trans)		C ₁₀ H ₅ Cl ₇ O	28044-83-9
Aldrine		C ₁₂ H ₈ Cl ₆	309-00-2
Dieldrine		C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O	60-57-1
Endrine		C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O	72-20-8
Mirex		C ₁₀ Cl ₁₂	2385-85-5
CHLOROPHÉNOLS			
Mono-chlorophénols	4-MCP	C ₆ H ₅ ClO or C ₆ H ₄ ClOH	106-48-9
Di-chlorophénols (DCP)	2,4-DCP	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	120-83-2
	2,5-DCP	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	583-78-8
	2,6-DCP	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	87-65-0
Tri-chlorophénols (TCP)	2,3,4-TCP	C ₆ H ₃ Cl ₃ O	15950-66-0
	2,4,5-TCP	C ₆ H ₃ Cl ₃ O ou C ₆ H ₃ Cl ₃ OH	95-95-4
	2,4,6-TCP	C ₆ H ₃ Cl ₃ O ou C ₆ H ₃ Cl ₃ OH	88-06-2
Tetra-chlorophénols	TeCP	C ₆ H ₂ Cl ₄ O	58-90-2
Penta-chlorophénols	PCP	C ₆ Cl ₅ OH ou C ₆ HCl ₅ O	87-86-5

2.3 Recueil des données

Les données relatives aux trois grands thèmes étudiés dans Esteban ont principalement été recueillies par questionnaires (renseignés en face à face avec un enquêteur se rendant au domicile des participants et par auto-questionnaires papier ou internet selon le choix des participants).

Des informations plus détaillées sur l'ensemble des données recueillies et sur les aspects opérationnels de la réalisation de l'étude Esteban sont disponibles dans un article décrivant le protocole de l'étude [4].

Des données démographiques, socio-économiques, sur l'alimentation, l'activité physique, la sédentarité, l'environnement résidentiel et professionnel, la santé générale et la consommation de soins ont été recueillies à travers la passation de différents questionnaires. D'autre part, l'ensemble des mesures et des prélèvements biologiques (sang veineux, urines, mèche de cheveux) ont été effectués dans le cadre d'un examen de santé. Pour se faire, Santé publique France s'est appuyé sur le réseau des centres d'examen de santé de l'Assurance maladie (CES). Pour les enfants et les adultes qui en avaient exprimé le choix, l'examen de santé était effectué à domicile, avec la venue d'un infirmier diplômé d'état (IDE). Les traitements immédiats des prélèvements biologiques ont été réalisés dans les laboratoires d'analyses rattachés aux CES.

2.4 Collecte et traitement des échantillons biologiques sanguins

Lors de l'examen de santé, le sang veineux était recueilli sur tube sec sans gel séparateur mais avec un activateur de coagulation. Le délai entre les prélèvements et le traitement des tubes (dosages et aliquote) ne devait pas dépasser 4 heures si la centrifugation des tubes de sang n'avait pas été effectuée dans les 2 heures après le prélèvement. Lorsque l'examen de santé était réalisé à domicile, les infirmiers conservaient les tubes de prélèvements dans des glacières contenant des blocs réfrigérants (sans contact direct avec les tubes), permettant leur transport jusqu'aux laboratoires. Les tubes secs ont été laissés à coaguler pendant 30 minutes et conservés à l'abri de la lumière (en vue des dosages nutritionnels ultérieurs). Un relevé de température a été effectué à l'arrivée des prélèvements aux laboratoires pour prendre en compte la température lors du transport des prélèvements. L'intégralité des tubes de prélèvements ont été conservés au laboratoire à une température comprise entre +4°C et +10°C dans l'attente des traitements nécessaires (dosages biologiques immédiats, centrifugation et aliquote des matrices en plus petits volumes et cryoconservation). La centrifugation a été réalisée à 2 500 g pendant 15 minutes environ. Pour la réalisation du dosage des pesticides organochlorés, le sérum obtenu après centrifugation a été aliquote en cryotube en polypropylène (PP) de haute densité en petits volumes.

L'ensemble des échantillons biologiques en provenance des laboratoires ont été transportés par camion réfrigéré au Centre de ressources biologiques (CRB) de l'hôpital Bretonneau au CHU de Tours afin d'y être conservés dans des congélateurs à -80°C. Un transport des échantillons des laboratoires vers le CRB était organisé de façon régulière tout au long de la phase de collecte. Une fiche de suivi et de traçabilité des prélèvements renseignée aux différentes étapes avait permis de connaître les conditions de prélèvements, de traitement et de stockage des échantillons de chaque participant et de prendre en compte les écarts ou anomalies observés.

Ces échantillons ont été transportés congelés entre -80°C et -60°C vers le laboratoire de dosage. Le temps de transport des échantillons de la biothèque vers le laboratoire était inférieur à 24 heures. Les échantillons ont été conservés au sein du laboratoire à l'abri de la lumière et à une température de -20 °C. Le laboratoire a respecté les procédures décrivant les conditions de mise en œuvre pour assurer la conservation des échantillons selon les directives reconnues au plan international, et également en cas de panne (alarmes, groupe de secours, etc.).

2.5 Collecte et traitement des échantillons biologiques urinaires

Le jour de l'examen de santé, le recueil urinaire était effectué au réveil afin de collecter les premières urines du matin. Les participants devaient remplir par miction directe, un pot en polypropylène (PP) de haute densité d'une contenance de 250 mL, remis par les enquêteurs lors de visites préalables au domicile des participants. Un volume de 200 mL était souhaité même s'il était attendu que la quantité prélevée chez les enfants soit moins importante (notamment chez les 6-10 ans). Le pot contenant les urines était ensuite placé dans un sachet opaque puis remis aux infirmiers lors de l'examen de santé, conservé au frais entre +4°C et +10°C et à l'abri de la lumière avant le transport vers les laboratoires.

À l'arrivée des prélèvements urinaires dans les laboratoires, aucun traitement n'était nécessaire hormis leur homogénéisation. Les échantillons ont ensuite été aliquotés en petits volumes (1 mL, 2 mL, 5 mL et 10 mL) à l'aide de pipettes en verre afin d'éviter de potentielles contaminations pouvant impacter les dosages des biomarqueurs.

L'ensemble des échantillons en provenance des laboratoires ont été transportés par camion réfrigéré au centre de ressources biologiques de l'hôpital Bretonneau au CHU de Tours afin d'y être conservés dans des congélateurs à -80°C. Le transport des échantillons des laboratoires vers la biothèque était organisé de façon régulière tout au long de l'enquête.

2.6 Dosages des pesticides organochlorés, des lipides sériques et de la créatinine urinaire

2.6.1 Dosage des organochlorés spécifiques

Le laboratoire Laberca/Oniris disposait d'un volume de 5 mL de sérum pour réaliser l'analyse. Les échantillons de sérum étaient conditionnés dans des cryotubes en polypropylène (PP) de 5 mL. La méthode analytique utilisée par le laboratoire consistait à l'extraction sur cartouche, puis la détection et l'identification par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (GC-HRMS).

La limite de détection (LOD) et la limite de quantification (LOQ) ont été déterminées selon les recommandations de la décision européenne 2002/657/CE. La LOD et la LOQ calculées pour toutes les molécules sont présentées dans le tableau 4. Elles étaient spécifiques à chaque pesticide organochloré.

La courbe de calibration a été réalisée grâce à 6 points de concentration et vérifiée tous les 100 échantillons. De même, la justesse proche de la LOQ a été vérifiée tous les 20 échantillons. Un « blanc méthode » a été analysé tous les 10 échantillons pour garantir la non-contamination du circuit analytique. Des contrôles de qualité internes (CQI) ont été dosés au cours des séries analytiques sur plusieurs niveaux de concentration pour établir des cartes de contrôle et satisfaire aux critères de Westgard. La quantification de l'incertitude a été réalisée par une approche s'appuyant sur le protocole VAM du guide Eurachem/Citac. Les incertitudes ont été calculés en intégrant la fidélité intermédiaire et la justesse à différents niveaux (proche LOQ, moyen et élevé). Ainsi, sur un total de 1 014 dosages d'OCS prévus, 759 échantillons « adultes » et 255 échantillons « enfants » ont été analysés.

2.6.2 Dosage des chlorophénols

Le laboratoire Labocea disposait d'un volume de 5 mL d'urine pour réaliser l'analyse. La méthode analytique utilisée par le laboratoire consistait à l'extraction des chlorophénols en milieu acide. Cet extrait était ensuite purifié puis concentré, et enfin analysé par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse sur une colonne capillaire de phase apolaire.

La limite de détection (LOD) et la limite de quantification (LOQ) ont été déterminées selon les recommandations de la décision européenne 2002/657/CE. Les limites de quantifications étaient déterminées selon la norme NF T90-210, plan B. La LOD et LOQ calculées pour toutes les molécules sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4. Limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) atteintes pour les dosages d'insecticides organochlorés (ng L⁻¹)

Famille/Congénères	LOD (ng L ⁻¹)	LOQ (ng L ⁻¹)
ORGANOCHLORÉS SPÉCIFIQUES		
Dichlorodiphényltrichloroethanes		
pp'DDT	2	10
op'DDT	2	10
pp'DDE	2	10
op'DDE	2	10
Hexachlorocyclohexanes		
Alpha- hexachlorocyclohexane	2	10
Beta-hexachlorocyclohexane	2	10
Gamma-hexachlorocyclohexane	2	10
Cyclodiènes		
Chlordane	2	10
Cis-chlordane	2	10
Trans-chlordane	2	10
Oxychlordane	2	10
Nonachlore	2	10
Cis-nonachlore	2	10
Trans- nonachlore	2	10
Epoxyde heptachlore (cis)	2	10
Epoxyde heptachlore (trans)	2	10
Aldrine	2	10
Dieldrine	2	10
Endrine	2	10
Mirex	2	10
CHLOROPHÉNOLS		
4-MCP	50	150
2,4-DCP	50	150
2,5-DCP	50	150
2,6-DCP	50	150
2,3,4-TCP	50	150
2,4,5-TCD	50	150
2,4,6-TCP	50	150
TeCP	50	150
PCP	50	150

La courbe de calibration a été réalisée grâce à 5 à 6 points de concentration et vérifiée tous les 100 échantillons. De même, l'étalonnage proche de la LOQ a été vérifié tous les 20 échantillons.

Un « blanc méthode » a été analysé tous les 10 échantillons pour garantir la non-contamination du circuit analytique. Des contrôles de qualité internes (CQI) ont été dosés au cours des séries analytiques sur plusieurs niveaux de concentration pour établir des cartes de contrôle et satisfaire aux critères de Westgard.

Afin d'apprécier la fidélité intermédiaire des analyses, 6 réplicats ont été introduits à l'aveugle dans les séries analytiques, c'est-à-dire que deux cryotubes appartenant au même sujet ont fait l'objet d'un dosage, avec des identifiants différents. Ces 6 couples de réplicats ont été analysés, avec des résultats concordants pour l'ensemble des 9 chlorophénols dans l'étude Esteban*.

Ainsi, sur un total de 1 400 dosages de chlorophénols prévus, 900 échantillons « adultes » et 500 échantillons « enfants » ont été analysés.

2.6.3 Dosage des lipides sériques

Le dosage des lipides sériques était réalisé sur une fraction de l'échantillon de sérum transmis au laboratoire (environ 0,5 mL). L'analyse concernait les 4 paramètres lipidiques permettant le calcul des lipides totaux (TL) : cholestérol total (TC), cholestérol non-estérifié (FC), triglycérides (TG) et phospholipides (PL). Le dosage des lipides était réalisé par méthode enzymatique, conformément au protocole présenté dans la publication d'Akins JR en 1989 [66]. Le dosage était effectué indépendamment de la préparation de l'échantillon pour le dosage des OC*.

Les lipides totaux ont été calculés selon l'équation : $TL = 1,677*(TC-FC) + FC + TG + PL$.

2.6.4 Dosage de la créatinine urinaire

Le laboratoire ChemTox disposait d'un volume de 0,5 mL d'urine pour réaliser le dosage de la créatinine urinaire. L'analyse était réalisée par spectrophotométrie à 546 nm selon la méthode de Jaffé qui consiste à mesurer l'intensité de la coloration du complexe rouge-orangé formé par la créatinine et l'acide picrique en milieu basique. La mesure était effectuée en cinétique : la vitesse de formation de la coloration étant proportionnelle à la concentration en créatinine dans l'échantillon. Le domaine de mesure s'étendait de 0,1 à 54 mmol L⁻¹. Les CV de répétabilité et de fidélité intermédiaire étaient inférieurs à 2%. L'incertitude (k=2) était inférieure à 3% et les biais de justesse inférieurs à 4%.

2.7 Analyses statistiques

2.7.1 Plan de sondage et pondérations

Le plan de sondage de l'étude Esteban est un plan de sondage stratifié à trois degrés. Au premier degré, un échantillon stratifié d'unités primaires (communes ou regroupements de communes) a été tiré au sort. Au deuxième degré, dans chaque unité primaire, des ménages ont été tirés au sort par échantillonnage téléphonique. La stratification a été réalisée en fonction de deux variables : la région (8 zones géographiques) et le degré d'urbanisation (5 strates : rural ; < 20 000 habitants ; 20 000 - 100 000 habitants ; > 100 000 habitants, Paris et région parisienne). Le plan d'échantillonnage est décrit de façon détaillée dans l'article du protocole de l'étude [4].

Les dosages des pesticides organochlorés spécifiques et des chlorophénols ont été réalisés sur des sous-échantillons aléatoires de sujets parmi les individus qui avaient accepté de participer au volet biologique de l'étude et disposaient d'une quantité de sérum ou d'urine suffisante dans la collection biologique pour permettre l'analyse biologique. 1 014 échantillons ont été analysés pour les OCS, dont 759 échantillons de sérum adultes et 255 enfants, et de 1 400 échantillons pour les chlorophénols, dont 900 échantillons urinaires adultes et 500 enfants.

Le processus de calcul des pondérations a été effectué en trois étapes. La première étape a consisté à établir des pondérations initiales dues au plan de sondage. En second lieu, les poids ont été ajustés par rapport à la non-réponse totale. Cette étape a été réalisée en utilisant la méthode des scores, méthode basée sur le principe des groupes de réponses homogènes et faisant appel à des informations disponibles à la fois pour les répondants et les non-répondants [67]. Enfin, un calage a été effectué en utilisant les marges issues du recensement permettant à la population d'étude d'être comparable avec la population source selon certains critères (âge, sexe, niveau de diplôme...).

2.7.2 Traitement des données censurées à gauche

Pour chaque biomarqueur mesuré, la LOD et la LOQ étaient constantes pour l'ensemble des échantillons analysés. Certaines concentrations pouvaient être à des niveaux non détectés (inférieurs à la LOD), ou détectés mais non quantifiés (compris entre la LOD et la LOQ).

Pour traiter ce type de données, la méthode d'imputation multiple par équations chaînées (*Multiple Imputation by Chained Equations*, MICE), implémentée sous STATA (ICE) a été utilisée [68].

Cette méthode a l'avantage de prendre en compte l'incertitude liée à l'imputation des données censurées. Elle consiste à générer M bases de données complètes (ici M=10), en utilisant un modèle d'imputation [69]. Chaque base de données complète est analysée séparément par des méthodes standards et fournit M estimateurs du paramètre d'intérêt (moyenne géométrique, percentiles, etc.), qui sont ensuite combinés pour tenir compte de l'incertitude résultant de la méthode d'imputation multiple [70]. L'estimateur combiné du paramètre d'intérêt est obtenu par la moyenne des M estimateurs. La variance combinée de cet estimateur est calculée en prenant en compte les variances inter-et intra-imputation.

2.7.3 Analyse descriptive

La distribution des niveaux d'imprégnation est décrite sous forme de percentiles (10, 25, 50, 75, 90, 95) et d'une moyenne géométrique (MG), avec les intervalles de confiance à 95% pour la moyenne géométrique et le percentile 95 (P95). Les résultats sont présentés pour la population totale, par sexe et par tranche d'âge. La distribution des niveaux d'imprégnation est présentée en $\mu\text{g L}^{-1}$ et en $\mu\text{g g}^{-1}$ de lipides pour les OCS, et en ng L^{-1} et en ng g^{-1} de créatinine pour les chlorophénols. L'ensemble des résultats étaient pondérés, hormis ceux concernant des OCS chez les enfants, en raison d'un faible effectif (n=255).

2.7.4 Recherche des déterminants des niveaux d'imprégnation

Chez les enfants, la recherche de déterminants pour les OCS et les chlorophénols n'a pas été réalisée, en raison du faible effectif des échantillons et d'un faible taux de quantification.

Chez les adultes, la recherche de déterminants n'a pas non plus été effectuée pour les chlorophénols, mais elle a été réalisée pour certains OCS ayant un taux de quantification supérieur à 60%. Les déterminants de l'imprégnation par les OCS ont été identifiés par régression multivariées. Un modèle linéaire généralisé (*Generalized linear Model*) a été utilisé. Les concentrations en OCS ont été log-transformées afin de favoriser la normalité des résidus du modèle. Certains facteurs de risque et d'ajustement ont été sélectionnés a priori au vu de la littérature. Par ailleurs d'autres facteurs de confusion et d'exposition ont été sélectionnés lors de la modélisation en se basant sur des critères statistiques tels que le critère d'information d'Akaike (AIC). La forme de la relation entre l'imprégnation et les facteurs de risque et d'ajustement quantitatifs a été ajustée en utilisant des fonctions splines cubiques naturelles.

La construction du modèle (choix du nombre de degré de liberté des fonctions splines) et la validation du modèle (vérification de la normalité et de l'homoscédacité des résidus) ont été effectuées sur un

seul jeu de données imputées. Toutes les analyses réalisées ont pris en compte le plan d'échantillonnage de l'étude.

L'estimation des paramètres du modèle final a été réalisée sur 10 jeux de données imputées. Les résultats sont présentés sous forme de pourcentage de variation des concentrations en OC :

- associé à une augmentation interquartile des facteurs de risque quantitatifs ;
- par rapport à une référence pour les facteurs d'expositions qualitatifs.

Six modèles ont été construits pour chacun des OCS quantifiés à plus de 60% chez les adultes : pp'-DDE, β -HCH, oxychlordane, trans-nonachlore, cis-heptachlore epoxyde et dieldrine.

Les variables testées pour les adultes pour les OCS sont listées en annexe 1.

2.7.5 Construction d'un indicateur géographique

Un indicateur de proximité géographique des participants d'Estbean aux zones agricoles, ayant pu faire l'objet d'utilisation intensive par les pesticides OCS, a été construit. Cet indicateur a pour but d'évaluer le lien entre la proximité géographique aux anciennes zones agricoles potentiellement contaminées et l'imprégnation par les OCS.

La création de cet indicateur repose sur la connaissance des cultures homologuées pour les pesticides OCS.

Afin de tenir compte de leurs anciens usages et de la répartition des terres agricoles au moment de l'utilisation des pesticides OCS, l'étude des cultures homologuées pour les pesticides OCS a été réalisée. Nous avons étudié les cultures homologuées pour le DDT, les HCH, le chlordane, l'heptachlore, l'aldrine et la dieldrine en 1970.

Un indicateur final a ensuite été construit en faisant le produit des 2 sous-indicateurs suivants :

- Un indicateur évaluant, à l'échelle cantonale, la part de surface agricole des cultures homologuées, au niveau du canton, pour chacun des pesticides OCS suivants :
 - o Le DDT
 - o Les HCH
 - o Le chlordane
 - o L'heptachlore
 - o L'aldrine et la dieldrine
- Un indicateur évaluant la part de surface agricole (toutes cultures confondues), dans un rayon de 500 m autour des habitats des participants.

Ainsi, pour chaque OCS d'intérêt, un indicateur final d'exposition géographique aux zones agricoles a été construit. Cet indicateur a été intégré dans les analyses multivariées afin d'étudier le lien entre exposition géographique et niveaux d'imprégnation par les pesticides organochlorés.

L'ensemble de la méthodologie de la construction de cet indicateur géographique est détaillé en annexe 2.

2.7.6 Logiciels utilisés

Les analyses statistiques ont été réalisées avec la version 14 de STATA [71] et la version 3.5.2 de R [72] qui, via le package (SURVEY), permet l'analyse des données issues d'un plan de sondage complexe.

3. RÉSULTATS DES ANALYSES DESCRIPTIVES CHEZ LES ENFANTS

3.1 Résultats des dosages

3.1.1 Niveaux des lipides sériques et de la créatinine urinaire

La concentration moyenne de lipides sériques totaux mesurée chez les 255 enfants âgés de 6 à 17 ans et ayant fait l'objet d'un dosage d'organochlorés spécifiques était égale à 5,05 ng L⁻¹.

La concentration moyenne de la créatinine urinaire mesurée chez les 500 enfants âgés de 6 à 17 ans et ayant fait l'objet d'un dosage de chlorophénols était égale à 1,14 µg L⁻¹.

Tableau 5. Valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres lipidiques (ng L⁻¹) et de la créatinine urinaire (µg L⁻¹) des enfants

Paramètre	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum
Lipides totaux chez les enfants	255	5,05 ng L ⁻¹	3,51 ng L ⁻¹	11,51 ng L ⁻¹
Créatinine urinaire chez les enfants	500	1,14 µg L ⁻¹	0,07 µg L ⁻¹	3,00 µg L ⁻¹

3.1.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols chez les enfants âgés de 6 à 17 ans

Les taux de quantification (%>LOQ) des organochlorés dans l'échantillon des enfants de l'étude Esteban étaient variables. Parmi les 18 organochlorés spécifiques, 3 organochlorés avaient des taux de quantification supérieurs à 50%, (100% pour le pp'-DDE, 81,96% pour le β-HCH et 58,04% pour la dieldrine), 5 organochlorés (pp'-DDT, γ-HCH, oxychlordan, trans-nonachlore et cis-heptachlore époxyde) avaient des taux compris entre 14% et 50%, 3 organochlorés (op'-DDT, α-HCH et mirex) avaient des taux compris entre 0,4% et 2,4% et 7 n'avaient pas du tout été quantifiés.

Parmi les 9 chlorophénols étudiés, le PCP avait le taux de quantification le plus élevé (14,6%). Quatre autres chlorophénols (4-MCP, 2,4-DCP, 2,5-DCP et TeCP) avaient des taux de quantifications compris entre 1,6 et 4,8% et 4 chlorophénols n'étaient pas du tout quantifiés.

Les distributions des organochlorés spécifiques (en ng L⁻¹ et ng g⁻¹ de lipides) et des chlorophénols (µg L⁻¹ et µg g⁻¹ de créatinine) sont présentés tableaux 6 et 7. Les moyennes géométriques (MG) étaient de 113,00 ng L⁻¹ (22,70 ng g⁻¹ de lipides) pour le pp'-DDE, de 18,10 ng L⁻¹ (3,64 ng g⁻¹ de lipides) pour le β-HCH et de 11,50 ng L⁻¹ (2,30 ng g⁻¹ de lipides) pour la dieldrine. Le calcul de la MG des chlorophénols n'a pas pu être effectué en raison de leurs faibles taux de quantification.

Pour certains OCS (pp'-DDE et β-HCH), les niveaux d'imprégnation étaient légèrement plus élevés chez les enfants de la classe d'âge [6-10 ans] comparativement aux classes d'âges [11-14 ans] et [15-17 ans]. Les MG des niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE étaient de 129,30 ng L⁻¹ pour les 6-10 ans, de 104,70 ng L⁻¹ pour les 11-14 ans, et de 104,60 ng L⁻¹ pour les 14-16 ans. Pour le β-HCH, elles étaient de 21,40 ng L⁻¹ pour les 6-10 ans, de 16,27 ng L⁻¹ pour les 11-14 ans et de 16,80 ng L⁻¹ pour les 15-17 ans.

Les niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE et le β-HCH étaient plus élevés chez les garçons que chez les filles. Les MG des niveaux d'imprégnation de pp'-DDE et de β-HCH étaient respectivement de 125,00 ng L⁻¹ et de 19,34 ng L⁻¹ chez les garçons et de 101,00 ng L⁻¹ et de 16,79 ng L⁻¹ chez les filles. L'ensemble des distributions des OCS et des chlorophénols par classes d'âge et par sexe est présenté en annexe 3 du document.

Tableau 6. Distribution des concentrations sériques en organochlorés spécifiques (ng L⁻¹) et des concentrations urinaires en chlorophénols (µg L⁻¹) des enfants âgés de 6 à 17 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	%>LOQ	MG	IC à 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC à 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng L⁻¹) - résultats non pondérés											
pp'DDT	255	14,51	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,32	20,06	[13,65; 24,13]
op'DDT	255	2,35	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE	255	100,00	113,00	[112,90; 113,10]	49,57	67,25	102,04	166,35	279,78	444,71	[325,15; 554,51]
op'DDE	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH	255	1,18	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH	255	81,96	18,10	[18,02; 18,17]	<LOQ	11,81	17,80	24,23	43,05	55,68	[44,09; 71,25]
γ-HCH ou Lindane	255	50,20	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,02	12,35	17,09	20,14	[17,90; 25,92]
Cis-chlordane	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans-chlordane	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Oxychlordane	255	19,60	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	13,08	16,43	[14,33; 20,55]
Cis-nonachlore	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans- nonachlore	255	15,69	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,08	15,45	[12,92; 22,58]
Héptachlore époxyde (cis)	255	30,98	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,90	14,59	16,33	[15,18; 17,88]
Héptachlore époxyde (trans)	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine	255	58,04	11,50	[11,41; 11,53]	<LOQ	<LOQ	10,96	15,11	20,84	25,84	[23,41; 31,75]
Endrine	255	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex	255	0,39	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Chlorophénols (µg L⁻¹) - résultats pondérés											
4-MCP	500	1,80	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4-DCP	500	4,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,21]
2,5-DCP	500	4,80	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,15	[<LOQ; 0,42]
2,6-DCP	500	0	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,3,4-TCP	500	0	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,5-TCP	500	0	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,6-TCP	500	0	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
TeCP	500	1,60	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
PCP	500	14,60	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,18	0,34	[0,23; 0,51]

Tableau 7. Distribution des concentrations sériques en organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides) et des concentrations urinaires en chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine) des enfants âgés de 6 à 17 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	MG	IC à 95 % MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	ICà 95 % P95
Organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides) - résultats non pondérés										
pp'DDT	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,36	3,73	[2,52; 5,10]
op'DDT	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE	255	22,70	[22,62; 22,8]	9,58	13,65	20,35	33,80	56,84	82,15	[68,91; 107,81]
op'DDE	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH	255	3,64	[3,56; 3,71]	<LOQ	2,41	3,40	5,07	8,14	11,88	[8,63; 14,80]
γ-HCH ou Lindane	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	2,04	2,56	3,21	4,10	[3,46; 4,60]
Cis-chlordane	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans-chlordane	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Oxychlordane	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,58	3,04	[2,78; 4,42]
Cis-nonachlore	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans- nonachlore	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,41	2,93	[2,63; 4,41]
Héptachlore époxyde (cis)	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,09	2,74	3,25	[2,91; 3,58]
Héptachlore époxyde (trans)	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine	255	2,30	[2,24; 2,37]	<LOQ	<LOQ	2,19	3,04	4,07	5,30	[4,43; 65,47]
Endrine	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine) - résultats pondérés										
4-MCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4-DCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,44]
2,5-DCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,25	[<LOQ; 0,55]
2,6-DCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,3,4-TCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,5-TCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,6-TCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
TeCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
PCP	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,40	0,40	[0,29; 0,62]

3.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols mesurés dans les études en France et à l'étranger chez les enfants

3.2.1 Niveaux mesurés en France

Il n'existe pas d'autres études mesurant les niveaux d'imprégnation par les organochlorés chez les enfants âgés de 6 à 17 ans vivant en France. Ainsi, l'étude Esteban fournit les premiers résultats des niveaux d'imprégnation par les organochlorés spécifiques et les chlorophénols.

3.2.2 Niveaux mesurés dans les études étrangères

En **Allemagne**, l'enquête de surveillance environnementale GerES (*The German Environmental Survey*) est réalisée à intervalles de temps réguliers, depuis le milieu des années 1980, auprès de la population générale allemande. Un des objectifs de la 4^e et de la 5^e version de l'enquête était de mesurer l'exposition à divers polluants de l'environnement [73, 74]. La 4^e version de l'enquête réalisée entre **2003 et 2006** a été effectuée auprès de 1 079 enfants âgés de 7 à 14 ans sur du sang total. La 5^e version de l'enquête réalisée entre **2014 et 2017** a été effectuée auprès de 1 135 enfants âgés de 3 à 17 ans.

Le pp'-DDE était quantifié à 100% dans les 2 enquêtes allemandes et dans l'enquête française, alors que les LOQ différaient : 5 ng L⁻¹ pour GerES IV, 20 ng L⁻¹ pour GerES V et 10 ng L⁻¹ pour Esteban. La moyenne géométrique de pp'-DDE était plus élevée dans GerES IV (206 ng L⁻¹) et GerES V (160 ng L⁻¹) que dans Esteban (113 ng L⁻¹).

Le β-HCH était quantifié à 76% dans GerES IV (LOQ : 4 ng L⁻¹), à 14% dans GerES V (LOQ : 20 ng L⁻¹) et à 81,96% dans Esteban (LOQ : 10 ng L⁻¹). On retrouve des pourcentages de quantification ainsi que des LOQ plus proches entre Esteban et GerES IV, qu'avec son homologue GerES V. La MG de β-HCH était plus basse dans GerES IV (11 ng L⁻¹) que dans Esteban (18 ng L⁻¹). Le percentile 50 (P50) et le percentile 90 (P90) du β-HCH étaient également plus bas dans l'étude allemande (P50 : 10 ng L⁻¹ ; P90 : 40 ng L⁻¹) que dans l'étude Esteban (P50 : 17,8 ng L⁻¹ ; P90 : 43,1 ng L⁻¹). Le P95 du β-HCH était quant à lui 2 fois moins important dans l'étude Esteban (P95 du β-HCH : 55,68 ng L⁻¹) que dans l'étude GerES IV (p95 du β-HCH : 100 ng L⁻¹). Comme pour l'étude Esteban, les biomarqueurs pp'DDT, α-HCH et γ-HCH, mesurés dans GerES IV et V, avaient des taux de quantification trop faibles pour calculer les MG. Quand leurs P95 étaient disponibles, ils étaient plus élevés dans les études allemandes GerES IV et V que dans l'étude Esteban.

Des faibles taux de quantification étaient également retrouvés dans quasiment l'ensemble des chlorophénols étudiés dans GerES IV, hormis pour le 2,4,5-TCP quantifié à 69% (LOQ : 0,10 µg L⁻¹) et le 2,4,6-TCP quantifié à 81% (LOQ 0,10 µg L⁻¹). Leurs MG étaient respectivement de 0,14 µg L⁻¹ et de 0,21 µg L⁻¹.

En Espagne [15], une étude effectuée en mai 2011 a identifié la concentration sérique de 10 OCS chez 133 enfants âgés de 6 à 11 ans, vivants dans des communautés agricoles d'Almería.

Les LOD du pp'DDE et du β-HCH, étaient différentes entre l'étude espagnole (50 ng L⁻¹) et l'étude française (LOD : 2 ng L⁻¹). Le pp'-DDE était très bien détecté dans les 2 études, malgré la valeur élevée de la LOD dans l'étude espagnole. Le taux de détection du β-HCH était plus faible chez les enfants d'Almeria (32%) que chez les enfants français (100%). Les MG de pp'-DDE et de β-HCH, étaient plus élevées dans l'étude Espagnole (pp'-DDE : 360 ng L⁻¹ ; β-HCH : 110 ng L⁻¹) que dans l'étude française (pp'-DDE : 113 ng L⁻¹ ; β-HCH : 18,1 ng L⁻¹).

En Espagne, les niveaux d'imprégnation par 2 chlorophénols ont été évalués chez 30 enfants âgés de 4 ans de la cohorte Granada (INMA project) [75]. Détectés à 100% avec une LOD à 0,2 µg L⁻¹, le 2,4-DCP et le 2,5-DCP avaient respectivement des médianes de 3,1 µg L⁻¹ et de 55,6 µg L⁻¹. Dans l'étude Esteban ces biomarqueurs n'étaient pas suffisamment détectés, avec un taux de détection de 8,6% pour une LOD à 0,05 µg L⁻¹.

Au Danemark [76], des analyses urinaires de chlorophénols ont été effectuées entre 2006 et 2008, chez 129 enfants (6 à 21 ans) issus de la population générale danoise. Le pourcentage de détection de la mesure combinée de 2,4-DCP et de 2,5-DCP était très élevé (88,4%) avec une MG de $1,72 \mu\text{g L}^{-1}$. La MG pour le 2,4,5-TCP était de $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$ avec un taux de détection relativement élevé (38%). Pour ces 3 biomarqueurs (2,4-DCP ; 2,5-DCP ; 2,4,5-TCP), le calcul de la MG n'a pas pu être effectué dans l'étude française en raison d'un faible taux de quantification.

Au Canada, l'enquête ECMS (Enquête canadienne sur les mesures de sante) [77] est réalisée à intervalle de temps régulier, par cycle de deux ans, sur un échantillon représentatif de la population canadienne. Lors du 2^e cycle (2009 – 2011), la concentration moyenne de 2,4 DCP et de 2,5-DCP a été mesurée chez 516 enfants de 6-11 ans et de 512 adolescents de 12 à 19 ans. Pour le 2,4-DCP, la MG était de $1,1 \mu\text{g L}^{-1}$ chez les enfants et de $1,5 \mu\text{g L}^{-1}$ chez les adolescents. Pour le 2,5-DCP, la MG était de $4,7 \mu\text{g L}^{-1}$ chez les enfants et de $5,8 \mu\text{g L}^{-1}$ chez les adolescents. Dans l'étude Esteban, les MG des 2,4,5-TCP, de 2,4,6-TCP et de PCP n'ont pas pu être quantifiées en raison d'un faible taux de quantification.

Aux **États-Unis**, l'enquête NHANES (*National Health and Nutrition Examination Survey*) [78] analyse, tous les deux ans, des biomarqueurs, sur un échantillon représentatif de la population américaine.

Le cycle 2003-2004 a permis de mesurer les concentrations sériques de 12 OCS également étudiés dans Esteban. Le taux de détection n'a pas été communiqué. La MG de pp'-DDE était de 561 ng L^{-1} , soit 5 fois supérieure à celle d'Esteban ($113,00 \text{ ng L}^{-1}$). Les MG de certains biomarqueurs n'étaient pas calculées dans l'étude étasunienne, mais le calcul du P95 a permis la comparaison avec l'étude Esteban. Dans l'enquête NHANES, les P95 de la concentration sérique du pp'-DDT (48 ng L^{-1}), de l'oxychlorane (66 ng L^{-1}), du trans-nonachlore (109 ng L^{-1}) et de la dieldrine (48 ng L^{-1}) étaient 2 à 7 fois plus élevés que dans l'étude Esteban. Le P95 de la concentration sérique du β -HCH de l'enquête NHANES ($48,00 \text{ ng L}^{-1}$) était légèrement inférieur à celui de l'étude Esteban ($55,68 \text{ ng L}^{-1}$). Enfin, les niveaux d'imprégnation par certains OCS n'étaient pas calculés dans l'enquête NHANES : γ -HCH, cis heptachlore epoxyde, op'-DDT, aldrine, endrine, mirex.

Les cycles 2003-2004, 2009-2010 et 2013-2014 ont permis de mesurer les concentrations urinaires de 5 chlorophénols chez des enfants de 6-11 ans et de 12-19 ans. Les MG du 2,4-DCP et du 2,5 DCP étaient respectivement de $0,77 \mu\text{g L}^{-1}$ et de $2,90 \mu\text{g L}^{-1}$ pour les 6-11 ans, et de $0,68 \mu\text{g L}^{-1}$ et de $2,90 \mu\text{g L}^{-1}$ pour les 12-19 ans. Ces biomarqueurs n'étaient pas suffisamment quantifiés dans Esteban. Les MG n'ont pas été calculés pour le PCP en raison d'un faible taux de détection. Le P95 du PCP dans l'enquête NHANES était de $5,67 \mu\text{g L}^{-1}$ pour les 6-11 ans et de $3,80 \mu\text{g L}^{-1}$ pour les 12-19 ans. Celui-ci était nettement plus faible pour Esteban, avec un P95 pour le PCP de $0,34 \mu\text{g L}^{-1}$ (6-17 ans).

Tableau 8. Comparaison des concentrations sériques en organochlorés spécifiques (en ng L⁻¹) observées chez les enfants en France et à l'étranger

Pays / Étude	Année	Population	N	Matrice	%>LOD ou %>LOQ	LOD (ng L ⁻¹)	LOQ (ng L ⁻¹)	MG (ng L ⁻¹)	P95 (ng L ⁻¹)
p,p'-DDT									
France - Esteban	2014-2016	6-17 ans	255	Sérum	98,04% (LOD) ; 14,51 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	20,06
Allemagne, GerES V	2014 - 2017	3-17 ans	1135	Plasma	13% (LOQ)	NC	20	< LOQ	30
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	595	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	< LOD	48
o,p'-DDT									
France - Esteban	2014-2016	6-17 ans	255	Sérum	17,65% (LOD) ; 2,35 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	588	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
p,p'-DDE									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	100,00% (LOD) ; 100,00% (LOQ)	2,00	10,00	113,00	444,71
Allemagne, GerES IV	2003 - 2006	7 - 14 ans	1079	Sang total	100% (LOQ)	NC	5	206	910
Allemagne, GerES V	2014 - 2017	3 - 17 ans	1135	Plasma	100% (LOQ)	NC	20	160	790
Espagne (Almería) Gonza lez-Alzaga 2018	Mai 2011	6 - 11 ans	133	Sérum	99,2% (LOD)	5,00	NC	360	1 330
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	588	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	561	2 510
o,p'-DDE									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0,39% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
α-HCH									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	99,22% (LOD) ; 1,18 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003 - 2006	7 - 14 ans	1063	Sang total	0% (LOQ)	NC	16	NC	NC
Allemagne, GerES V	2014 - 2017	3 - 17 ans	1135	Plasma	0,00% (LOQ)	NC	30	NC	< LOQ
β-HCH									

France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	100% (LOD) ; 81,96 % (LOQ)	2,00	10,00	18,10	55,68
Allemagne, GerES IV	2003 - 2006	7 - 14 ans	1063	Sang total	76%(LOQ)	NC	4	11	100
Allemagne, GerES V	2014 - 2017	3 - 17 ans	1135	Plasma	14% (LOQ)	NC	20	< LOQ	50
Espagne (Almería) Gonza lez-Alzaga 2018	Mai 2011	6 - 11 ans	133	Sérum	32% (LOD)	50	NC	110	760
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	589	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	48
γ-HCH ou Lindane									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	100,00% (LOD) ; 50,20 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	20,14
Allemagne, GerES IV	2003 - 2006	7 - 14 ans	1063	Sang total	0% (LOQ)	NC	76	<LOQ	<LOQ
Allemagne, GerES V	2014 - 2017	3 - 17 ans	1028	Plasma	15% (LOQ)	NC	50	< LOQ	80
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	593	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
Cis-chlordane									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0% (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
Trans-chlordane									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0,39 % (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
Oxychlordane									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	97,65% (LOD) ; 19,60 % (LOQ)	2,00	10	< LOQ	16,43
Espagne (Almería) Gonza lez-Alzaga 2018	Mai 2011	6 - 11 ans	133	Sérum	61,7% (LOD)	50	NC	60	160
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	595	Sérum	NC	7,80 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	66
Cis-nonachlore									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	15,29 % (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ
Trans-nonachlore									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	89,80% (LOD) ; 15,69 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	14,59
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	589	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	109
Cis-Heptachlore epoxyde									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	100,00% (LOD) ; 30,98 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	160,00

Heptachlor Epoxyde										
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	592	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD	
Trans-Heptachlore epoxyde										
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0% (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ	
Aldrine										
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0% (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ	
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	588	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD	
Dieldrine										
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	100,00% (LOD) ; 58,04 % (LOQ)	2,00	10,00	11,50	25,84	
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	587	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	48	
Endrine										
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	0% (LOD) ; 0,00 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ	
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	539	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD	
Mirex										
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	255	Sérum	7,06% (LOD) ; 0,39 % (LOQ)	2,00	10,00	< LOQ	< LOQ	
Espagne (Almería) Gonza lez-Alzaga 2018	Mai 2011	6 - 11 ans	133	Sérum	58,6% (LOD)	50	NC	80	410	
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	12-19 ans	592	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD	

Tableau 9. Comparaison des concentrations urinaires en chlorophénols (en µg L⁻¹) observées chez les enfants en France et à l'étranger

Pays / Étude	Année	Population	N	Matrice	%>LOQ ou %>LOD	LOD (µg/L)	LOQ (µg/L)	MG (µg/L)	P95 (µg/L)
Mono-chlorophénols : 4-MCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	2,80% (LOD) ; 1,80% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	99% (LOQ)	NC	0,10	4,49	15,3
Di-chlorophénols : 2,4-DCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	8,60% (LOD) ; 4,00% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	89,00% (LOQ)	NC	0,10	0,33	2,52
Espagne, Casas <i>et al.</i> 2011	2005-2006	4 ans	30	Urine	100,00% (LOD)	0,2	NC	3,10 (médiane)	NC
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	6 - 11 ans	513	Urine	87,91% (LOD)	0,3	NC	1,1	9,5
		12 - 19 ans	508		93,70% (LOD)			NC	1,5
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2013-2014	6 - 11 ans	409	Urine	NC	0,1	NC	0,77	8,90
		12 - 19 ans	462					0,67	7,30
Di-chlorophénols : 2,5-DCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	8,60% (LOD) ; 4,80% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	98% (LOQ)	NC	0,10	0,85	7,49
Espagne, Casas <i>et al.</i> 2011	2005-2006	4 ans	30	Urine	100% (LOD)	0,2	NC	55,60 (médiane)	NC
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	6 - 11 ans	514	Urine	97,85% (LOD)	0,3	NC	4,70	98
		12 - 19 ans	509		98,04% (LOD)			NC	5,80
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2013-2014	6 - 11 ans	409	Urine	NC	0,1	NC	2,90	369
		12 - 19 ans	462					4,15	236
Somme Di-chlorophénols : 2,4-DCP + 2,5 DCP									
Danemark, Copenhagen Frederiksen <i>et al.</i> 2013	2006 - 2008	6 - 21 ans	129	Urine	88,4% (LOD)	0,07	NC	1,72	8,84
Di-chlorophénols : 2,6-DCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	0,20% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	24,00% (LOQ)	NC	0,10	<LOQ	0,25

Tri-chlorophénols : 2,3,4-TCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	0,20% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	3% (LOQ)	NC	0,10	<LOQ	<LOQ
Tri-chlorophénols : 2,4,5-TCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	1,20% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	69% (LOQ)	NC	0,10	0,14	0,56
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	6 - 11 ans	516	Urine	1,94% (LOD)	0,50	NC	NC	< LOD
		12 - 19 ans	512		1,95% (LOD)		NC	NC	< LOD
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	6-11 ans	415	Urine	NC	0,5	NC	NC	0,20
		12-19 ans	420		NC		NC	NC	0,30
Danemark, Copenhagen Frederiksen <i>et al.</i> 2013	2006 - 2008	6 - 21 ans	129	Urine	38% (LOD)	0,06	NC	0,1	0,38
Tri-chlorophénols : 2,4,6-TCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	0,80% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	598	Urine	81% (LOQ)	NC	0,10	0,21	0,82
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	6-11 ans	515	Urine	6,21% (LOD)	1,00	NC	NC	< LOD
		12-19 ans	512		8,01 % (LOD)		NC	NC	< LOD
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	6-11 ans	415	Urine	NC	0,50	NC	NC	1,30
		12-19 ans	420		NC		NC	NC	1,30
Tétra-chlorophénols : TeCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	10,60% (LOD) ; 1,60% (LOQ)	0,05	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	10,00% (LOQ)	NC	0,10	<LOQ	0,43
Pentachlorophénol : PCP									
France - Esteban	2014-2016	6 -17 ans	500	Urine	45,20% (LOD) ; 14,16% (LOQ)	0,05	0,15	NC	0,34
Allemagne, GerES IV	2003-2006	3 - 14 ans	599	Urine	49% (LOQ)	NC	0,10	<LOQ	1,64
Canada ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	6 - 11 ans	513	Urine	2,44% (LOD)	0,7	NC	NC	< LOD
		12 - 19 ans	512		3,71% (LOD)		NC	NC	< LOD
États-Unis NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	6-11 ans	290	Urine	NC	0,5	NC	NC	5,67
		12-19 ans	690		NC		0,5	NC	NC

4. RÉSULTATS DES ANALYSES DESCRIPTIVES CHEZ LES ADULTES

4.1 Résultats des dosages

4.1.1 Niveaux des lipides sériques et de la créatinine urinaire

La concentration moyenne en lipides sériques totaux mesurée chez les 759 adultes, âgés de 18 à 74 ans et ayant fait l'objet d'un dosage d'organochlorés spécifiques était égale à 6,17 ng L⁻¹.

La concentration moyenne de la créatinine urinaire mesurée chez les 900 adultes, âgés de 18 à 74 et ayant fait l'objet d'un dosage de chlorophénols était égale à 0,89 µg L⁻¹.

Tableau 10. Valeurs moyennes, minimales et maximales des paramètres lipidiques (ng L⁻¹) et de la créatinine urinaire (µg L⁻¹) chez les adultes

Paramètres	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum
Lipides totaux chez les adultes	759	6,17 ng L ⁻¹	3,23 ng L ⁻¹	11,27 ng L ⁻¹
Créatinine urinaire chez les adultes	900	0,89 µg L ⁻¹	0,03 µg L ⁻¹	3,11 µg L ⁻¹

4.1.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols chez les adultes âgés de 18 à 74 ans

Les pourcentages de quantification étaient très élevés (>60%) pour 6 OCS : le pp'-DDE (100%), le β-HCH (99,7%), l'oxychlordane (91,8%), le trans-nonachlore (88,7%), le cis-heptachlore epoxyde (89,5%), la dieldrine (94,8%). Pour 4 autres OCS, le taux était compris entre 13 et 50% : pp'-DDT (50,9%), γ-HCH (49,3%), mirex (19,4%) et cis-nonachlore (13,3%). Les 8 derniers OCS étudiés dans Esteban, étaient très peu quantifiés (op'-DDT : 2,69% ; α-HCH : 2,63%) ou non quantifiés (op'-DDE, cis-chlordane, trans-chlordane, trans-heptachlore epoxyde, aldrine, endrine).

Concernant les chlorophénols, le PCP avait le taux de quantification le plus élevé (17,7%). Parmi les 8 autres chlorophénols, 4 d'entre eux (2,4-DCP, 2,6-DCP, 2,3,4-TCP) avaient des taux de quantification compris entre 3,9 et 11,6% et 4 autres n'étaient quasiment pas quantifiés (entre 0,11 et 0,56%).

Les distributions des organochlorés spécifiques (en ng L⁻¹ et ng g⁻¹ de lipides) et des chlorophénols (µg L⁻¹ et µg g⁻¹ de créatinine) sont présentés tableaux 11 et 12.

Les MG étaient de 393,1 ng L⁻¹ (64,8 ng g⁻¹ de lipides) pour le pp'-DDE, de 79,2 ng L⁻¹ (13,1 ng g⁻¹ de lipides) pour le β-HCH, de 21,5 ng L⁻¹ (3,5 ng g⁻¹ de lipides) pour l'oxychlordane, de 19,1 ng L⁻¹ (3,16 ng g⁻¹ de lipides) pour le trans-nonachlore, de 18,1 ng L⁻¹ (3,99 ng g⁻¹ de lipides) pour le cis-heptachlore epoxyde et de 23,78 ng L⁻¹ (3,92 ng g⁻¹ de lipides) pour la dieldrine. Le calcul de la MG des chlorophénols n'a pas pu être effectué en raison de leur faible taux de quantification.

Les 6 OCS quantifiés à plus de 60% avaient des MG qui augmentaient avec l'âge. La MG de pp'-DDE passait de 181,92 ng L⁻¹ pour les [18-29 ans] à 908,44 ng L⁻¹ pour les [60-74 ans]. La MG du β-HCH passait de 24,47 ng L⁻¹ pour les [18-29 ans] à 235,18 ng L⁻¹ pour les [60-74 ans]. Ainsi, on note qu'entre la MG de la classe la plus jeune et la MG de la classe la plus âgée, il y avait un facteur 5 pour le pp'-DDE et un facteur 10 pour le β-HCH. On pouvait également observer un facteur 10

entre la MG de la classe la plus jeune et la MG de la classe la plus âgée pour l'oxychlordane et le trans-nonachlore et un facteur proche de 3 pour le cis-heptachlore epoxyde et la dieldrine.

Pour ces OCS, les niveaux d'imprégnation entre les hommes et les femmes étaient assez similaires. Les niveaux d'imprégnation étaient légèrement plus élevés chez les femmes que chez les hommes pour le pp'-DDE et le β -HCH, et étaient légèrement plus élevés chez les hommes que chez les femmes pour l'oxychlordane, le trans-nonachlore, le cis-heptachlore epoxyde et la dieldrine. L'ensemble des distributions des OCS et des chlorophénols par classes d'âge et par sexe est présenté en annexe 3 du document.

Tableau 11. Distribution des concentrations sériques en organochlorés spécifiques (ng L⁻¹) et des concentrations urinaires en chlorophénols (µg L⁻¹), des adultes âgés de 18 à 74 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	%>LOQ	MG	IC 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng L⁻¹) - résultats pondérés											
pp'DDT	759	50,86	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,25	15,00	25,02	38,44	[31,51; 46,61]
op'DDT	759	2,37	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE	759	100	393,14	[350,59; 440,85]	115,44	178,96	355,67	760,06	1583,9	2 540,80	[2 058,83; 3 161,45]
op'DDE	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH	759	2,63	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH	759	99,74	79,23	[69,97; 89,73]	20,96	34,37	70,96	164,36	402,71	596,47	[503,53; 719,94]
γ-HCH ou Lindane	759	49,28	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,75	12,41	17,13	26,74	[20,52; 32,22]
Cis-chlordane	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans-chlordane	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Oxychlordane	759	91,83	21,55	[19,67; 23,60]	7,81	12,2	22,10	37,47	55,81	73,60	[63,18; 83,34]
Cis-nonachlore	759	13,31	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	9,99	13,36	[11,32; 14,73]
Trans-nonachlore	759	88,67	19,15	[17,38; 21,09]	6,56	11,28	19,70	34,52	52,83	62,08	[56,86; 73,84]
Cis-Heptachlore epoxyde	759	89,46	18,1	[16,75; 19,56]	7,71	11,68	17,40	27,33	43,64	58,47	[50,25; 65,51]
Trans-heptachlore epoxyde	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine	759	94,86	23,78	[21,87; 25,87]	10,23	14,69	23,34	36,46	58,05	80,78	[63,86; 97,45]
Endrine	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex	759	19,37	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,45	14,28	[12,58; 16,26]
Chlorophénols (µg L⁻¹) - résultats pondérés											
4-MCP	900	11,6	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,21	[<LOQ; 0,28]
2,4-DCP	900	7,6	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	[<LOQ; 0,22]
2,5-DCP	900	9,67	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,20	[<LOQ; 0,35]
2,6-DCP	900	0,11	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,3,4-TCP	900	0,11	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,5-TCP	900	0,56	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,6-TCP	900	0,56	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
TeCP	900	3,9	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
PCP	900	17,7	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	0,23	[0,19; 0,28]

Tableau 12. Distribution des concentrations en organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides) et des concentrations urinaires en chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine urinaire), des adultes âgés de 18 à 74 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	%>LOQ	MG	IC 95 % MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95 % P95
Organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides) - résultats pondérés											
pp'DDT	759	50,86	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,57	2,36	4,00	5,93	[4,43 ; 7,66]
op'DDT	759	2,37	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE	759	100,00	64,85	[57,97; 72,55]	20,07	30,18	57,76	126,09	242,41	422,18	[331,36 ; 498,38]
op'DDE	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH	759	2,63	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH	759	99,74	13,07	[11,58; 14,76]	3,81	5,94	11,14	24,99	62,74	94,20	[72,77; 122,35]
γ-HCH ou Lindane	759	49,28	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,65	2,15	2,92	4,01	[2,22; 5,18]
Cis-chlordane	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans-chlordane	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Oxychlordane	759	91,83	3,55	[3,26; 3,87]	1,45	2,14	3,48	5,96	8,56	10,53	[9,44; 13,03]
Cis-nonachlore	759	13,31	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,57; 2,00]
Trans- nonachlore	759	88,67	3,16	[2,89; 3,44]	1,21	1,92	3,22	5,36	7,86	9,56	[8,59; 10,76]
Cis-Heptachlore epoxyde	759	89,46	2,99	[1,38; 2,02]	1,38	2,02	2,87	4,34	6,67	8,74	[7,72; 10,03]
Trans-heptachlore epoxyde	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine	759	94,86	3,92	[3,63; 4,24]	1,81	2,52	3,89	5,78	8,86	12,37	[9,69 ; 14,38]
Endrine	759	0,00	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex	759	19,37	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,62	[2,01; 2,42]
Chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine) - résultats pondérés											
4-MCP	900	11,60	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,35	[0,35; 0,43]
2,4-DCP	900	7,60	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,32	[<LOQ; 0,38]
2,5-DCP	900	9,67	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,39	[<LOQ; 0,53]
2,6-DCP	900	0,11	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,3,4-TCP	900	0,11	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,5-TCP	900	0,56	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,6-TCP	900	0,56	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
TeCP	900	3,90	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
PCP	900	17,7	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,27	0,39	[0,33; 0,45]

4.2 Niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols mesurés dans les études en France et à l'étranger chez les adultes

4.2.1 Niveaux mesurés en France

En **France**, deux études ont auparavant mesuré les niveaux d'imprégnation par les OCS et les chlorophénols chez les adultes.

Il s'agit du volet environnemental de l'étude ENNS (Étude nationale nutrition sante) [1] réalisée entre 2006 et 2007. Cette étude a porté sur la surveillance biologique de l'exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement. Parmi ces substances, 5 OCS (α -HCH, β -HCH, γ -HCH, pp'-DDT et pp'-DDE) ont fait l'objet d'analyses à partir d'une population de 386 adultes représentative de la population française. Pp'-DDE et β -HCH étaient les 2 biomarqueurs les plus quantifiés dans ENNS et également dans Esteban, avec des taux de quantifications à 100% ou proche de 100%. Pour pp'-DDE, la MG était près de 2 fois moins importante dans Esteban (393,14 ng L⁻¹) que dans ENNS (760 ng L⁻¹). Pour β -HCH, on note également un facteur de 2,5 entre l'étude Esteban avec une MG de 79,23 ng L⁻¹ (13,07 ng g⁻¹ de lipides) et l'étude ENNS avec une MG de 210 ng L⁻¹ (30 ng g⁻¹ de lipides). Le pourcentage de quantification était pour le pp'-DDT légèrement plus élevé dans l'étude ENNS (71,5% ; LOQ : 15 ng L⁻¹) que dans l'étude Esteban (50,86% ; LOQ : 10 ng L⁻¹). Le P95 de pp'-DDT calculé dans Esteban (38 ng L⁻¹) était 4 fois moins important que dans ENNS (160 ng L⁻¹).

L' α -HCH était assez bien quantifié dans ENNS (40,1% ; LOQ à 6 ng L⁻¹), alors qu'il était faiblement quantifié dans Esteban (2,63% ; LOQ à 10 ng/L). La MG était de 79,23 ng L⁻¹ (13,07 ng g⁻¹ de lipides) dans ENNS, mais non quantifié dans Esteban. Le taux de quantification du γ -HCH était de 3,1% dans ENNS et de 49,8% dans Esteban, avec des LOQ très différentes, respectivement de 30 ng L⁻¹ et 10 ng L⁻¹. La MG n'a pas pu être calculée dans ENNS.

Quatre chlorophénols étaient très bien quantifiés dans l'étude ENNS (100% pour 4-MCP, 2,4 DCP et 2,5-DCP ; 96,8% pour 2,4,6-TCP) et 2 autres assez bien quantifiés également (58,6% pour 2,4,5-TCP et 66,2% pour PCP). 2,6-DCP et 2,3,5-TCP était très peu quantifiés (respectivement, 6,9% et 3,3%). Ces taux de quantifications étaient tous plus élevés dans ENNS que dans Esteban (où seul le PCP était quantifié à 17,7%), avec des LOQ légèrement plus élevées dans Esteban (0,15 μ g L⁻¹) que dans ENNS (0,10 μ g L⁻¹). Des MG ont pu être calculées dans ENNS : 5,56 μ g L⁻¹ (5,42 μ g g⁻¹ de créat) pour 4-MCP ; 1,10 μ g L⁻¹ (1,07 μ g g⁻¹ de créat) pour 2,4-DCP ; 10,56 μ g L⁻¹ (10,30 μ g g⁻¹ de créat) pour 2,5-DCP ; 0,15 μ g L⁻¹ (0,14 μ g g⁻¹ de créat) pour 2,4,5 TCP ; 0,37 μ g L⁻¹ (0,36 μ g g⁻¹ de créat) pour 2,4,6 TCP ; 0,90 μ g L⁻¹ (0,88 μ g g⁻¹ de créat) pour PCP. Le P95 du PCP était près de 10 fois moins important dans Esteban (0,23 μ g L⁻¹ ; 0,39 μ g g⁻¹ de créat) que dans ENNS (2,88 μ g L⁻¹ ; 3,29 μ g g⁻¹ de créat).

En **France**, en 2011, le volet périnatal de la cohorte Elfe [79] a permis de mesurer l'imprégnation par les chlorophénols de 1 036 femmes à l'accouchement, à partir des échantillons d'urines. Les 6 chlorophénols étudiés dans Elfe n'étaient pas assez quantifiés pour mesurer des MG. Avec une LOQ à 0,15 ng L⁻¹ (comme pour Esteban), les chlorophénols étaient quantifiés entre 0,4% (2,4,5-TCP) et 6,2% (2,4%) et à 4,2% pour le PCP.

4.2.2 Niveaux mesurés en Outre-mer

En **Guadeloupe et Martinique**, l'étude Kannari [80] a été réalisée en 2013-2014 auprès d'adultes âgés de 18 ans et plus. Les niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE étaient inférieurs dans l'étude Esteban par rapport à la Guadeloupe (MG : 646 ng L⁻¹) et la Martinique (MG : 440 ng L⁻¹). Les P95 de la concentration sérique en α -HCH et en γ -HCH étaient également plus faible dans l'étude Esteban que dans l'étude Kannari réalisée en Guadeloupe (α -HCH : 781,70 ng L⁻¹ et γ -HCH : 161,10 ng L⁻¹) et en Martinique (α -HCH : 144,20 ng L⁻¹ et γ -HCH : 93,80 ng L⁻¹). Les P95 de la

distribution du β -HCH étaient plus élevés ou équivalents dans l'étude Esteban que les niveaux retrouvés en Guadeloupe (P95 : 524,20 ng L⁻¹) et en Martinique (P95 : 1182 ng L⁻¹).

4.2.3 Niveaux mesurés dans les études étrangères

En **Allemagne**, un des objectifs de la 3^e version de l'enquête de surveillance environnementale GerES (*The German Environmental Survey*) [81, 82] était de mesurer l'exposition aux OCS et aux chlorophénols de l'environnement chez les adultes âgés de 18 à 69 ans. L'enquête GerES III, conduite en 1997-1999, s'est intéressée à 4 OCS et 5 chlorophénols.

Parmi les organochlorés spécifiques, le pp'-DDE était le biomarqueur le plus quantifié dans l'étude allemande [82] (taux de quantification de 99,7%). Sa MG (1 580 ng L⁻¹) était 4 fois plus élevée que celle de l'étude Esteban (393,14 ng L⁻¹). Le taux de détection du β -HCH était faible (33,7%), probablement en raison d'une LOQ assez élevée (100 ng L⁻¹). Le P95 de la concentration sérique de β -HCH était, dans l'étude allemande (500 ng L⁻¹) similaire à celui de l'étude Esteban (596 ng L⁻¹). Les deux autres biomarqueurs étudiés dans GerES III, α -HCH et γ -HCH, étaient très peu quantifiés (respectivement : 1,7% et 5,2%).

Concernant les résultats sur les chlorophénols, l'enquête GerES III [81] révèle des taux de quantification élevés comparativement à ceux de l'étude Esteban. Dans GerES III, le 4-MCP était quantifié à 100%, le 2,4-DCP à 91%, le 2,5-DCP à 99%, le 2,4,5-DCP à 86%, le 2,4,6-DCP à 98%, le TeCP à 55% et le PCP à 75%. Seuls les 2,6-DCP (24%) et 2,3,4-DCP (14%) avaient des niveaux de quantification faible. Parmi les chlorophénols suffisamment quantifiés dans GerES III, la MG était comprise entre 0,24 μ g L⁻¹ (0,20 μ g g⁻¹ de créatinine) et 4,88 μ g L⁻¹ (3,92 μ g g⁻¹ de créatinine).

Au Canada, le premier cycle de l'enquête ECMS (Enquête canadienne sur les mesures de santé) [83] a été réalisé en 2007-2009. Un de ses objectifs était de mesurer les niveaux d'imprégnation par les OCS chez 1 668 adultes de 20 à 70 ans. Parmi les OCS étudiés dans Esteban, 11 ont été étudiés dans ECMS. Quatre OCS (pp'-DDE, β -HCH, Oxychlorodane, Trans-nonachlore) avaient des taux de détections élevés (entre 93,05 et 99,64%). Dans l'ECMS, les MG du pp'-DDE (910 ng L⁻¹), de l'oxychlorodane (30 ng L⁻¹) et du trans-nonachlore (40 ng L⁻¹) étaient 1,5 à 2 fois plus élevées que celles de l'étude Esteban. La MG de β -HCH, était quant à elle 2 fois plus basse dans l'ECMS (40 ng L⁻¹) que dans Esteban (79,23 ng L⁻¹). Le cis-nonachlore et le mirex étaient respectivement détectés à 50,96% et à 52,64%. Leurs P95 étaient (cis-nonachlore : 20 ng L⁻¹ ; mirex : 50 ng L⁻¹) plus élevés que ceux de l'étude Esteban. Le pp'DDT était faiblement détecté (9,36%), avec une LOD élevée (50,00 ng L⁻¹). Le P95 de la concentration sérique du pp'-DDT était plus élevé dans l'ECMS (90,00 ng L⁻¹) que dans l'étude Esteban. Le γ -HCH et le trans-nonachlore n'étaient quasiment pas détectés (taux de détection <1%) ; le cis-nonachlore et l'aldrine ne l'étaient pas du tout.

Le second cycle de l'enquête ECMS [77], a été réalisée en 2009 - 2011, dont un des objectifs était de mesurer les niveaux d'imprégnation par les chlorophénols chez 1 005 adultes. La population était répartie en classes d'âges : 354 adultes étaient âgées de 20 à 39 ans, 360 de 40 à 59 ans et 291 de 60 à 10 ans. Le 2,4-DCP était détecté entre 84 et 86% selon les groupes d'âges (LOD à 0,3 μ g L⁻¹), avec une MG comprise entre 0,96 μ g L⁻¹ et 1,2 μ g L⁻¹ (entre 0,93 et 1,1 μ g g⁻¹ de créatinine). Le 2,5 DCP était détecté entre 95% et 97% selon les tranches d'âges (LOD à 0,3 μ g L⁻¹), avec une MG comprise entre 5,3 μ g L⁻¹ et 6,0 μ g L⁻¹ (entre 0,93 et 1,1 μ g g⁻¹ de créatinine). 2,4,5-DCP, 2,4,6-DCP et PCP n'étaient pas assez quantifiés pour le calcul de MG.

Aux États-Unis, l'enquête NHANES (*National Health and Nutrition Examination Survey*) [78] analyse tous les deux ans, des biomarqueurs, sur un échantillon représentatif de la population étasunienne.

Le cycle 2003-2004 de l'enquête NHANES a permis de mesurer les concentrations sériques de 9 biomarqueurs OCS. Les MG du pp'-DDE (1 690 ng L⁻¹), de l'oxychlorodane (67 ng L⁻¹) et du trans-nonachlore (106 ng L⁻¹) étaient plus élevées (1,5 à 5 fois plus élevés) dans l'étude NHANES que

celles observées dans Esteban. A contrario, la MG du β -HCH était plus faible dans l'étude NHANES (50 ng L^{-1}) que dans l'étude Esteban. Pour le pp'-DDT, le cis-nonachlore, le cis-heptachlore epoxyde, la dieldrine et le mirex, la MG n'étaient pas calculées. Leurs P95 étaient plus élevés que les P95 mesurés dans l'étude Esteban.

Les cycles 2003-2004, 2009-2010 et 2013-2014 de l'enquête NHANES ont permis de mesurer les concentrations urinaires de 5 chlorophénols chez des adultes de 20 ans et plus. Les MG de 2,4-DCP et de 2,5-DCP étaient respectivement de $0,66 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ($0,66 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) et de $2,78 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ($2,78 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine). Le taux de détection était trop faible pour le calcul des MG de 2,4,5-TCP, de 2,4,6-TCP et de PCP. Le P95 du PCP (étudié en 2003-2004) était de $3,11 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ($2,92 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) pour les 20-59 et de $4,77 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ ($4,15 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine) pour les 60 ans et plus, ce qui représentaient des niveaux plus élevés que ceux observés dans l'étude Esteban.

En Corée [84] l'Enquête nationale de biosurveillance humaine coréenne (KNHBS : *Korean National Human Biomonitoring Survey*) a étudié en 2009, les niveaux d'imprégnation par deux chlorophénols, à partir d'une cohorte de 1 865 participants, âgés de 18 à 69 ans. Le 2,4-DCP et le 2,5-DCP étaient bien détectés (respectivement, 63,4% et 97,9%), et leurs MG étaient respectivement de $0,14 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ et de $0,44 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. Les P95 de 2,4-DCP ($3,32 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) et de 2,5-DCP ($6,70 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) étaient plus élevés que ceux de l'étude Esteban.

Tableau 13. Comparaison des concentrations sériques en organochlorés spécifiques (en ng L⁻¹) observées chez les adultes en France et à l'étranger

Pays / Étude	Année	Population	N	Matrice	%>LOQ ou %>LOD	LOD (ng L ⁻¹)	LOQ (ng L ⁻¹)	MG (ng L ⁻¹)	P95 (ng L ⁻¹)
p,p'-DDT									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	99,2% (LOD) ; 50,9% (LOQ)	2,0	10,0	NC	38,4
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	386	Sérum	95,1 % (LOD) ; 71,5% (LOQ)	5	15	25,8	160,0
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1666	Plasma	9,4% (LOD)	50	NC	NC	90
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1370	Serum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	142
o,p'-DDT									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	30,83% (LOD) ; 2,4% (LOQ)	2,0	10,0	NC	<LOQ
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1358	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
p,p'-DDE									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,0% (LOD) ; 100,0% (LOQ)	2,0	10,0	393,1	2 540,8
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	386	Sérum	100 % (LOQ)	2	6	760	4 932
Guadeloupe, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	292	Sérum	99,3 % (LOD) ; 96,2 % (LOQ)	19,6	58,9	646	7 205
Martinique, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	450		90,0 % (LOD) ; 81,8 % (LOQ)	19,6	58,9	440	3 312
Allemagne, GerES III	1998	18-69 ans	2824	Serum	99,7% (LOQ)	NC	100	1 580	8 700
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	99,6% (LOD)	90	NC	910	6 510
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1368	Serum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	1 690	12800
o,p'-DDE									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,0% (LOD) ; 0,0% (LOQ)	2,0	10,0	NC	<LOQ
α-HCH									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	98,7% (LOD) ; 2,6% (LOQ)	2,0	10,0	NC	<LOQ

France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	386	Sérum	80,1 % (LOD) ; 40,1 % (LOQ)	2	6	4,3	10,2
Guadeloupe, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	292	Sérum	31,8 % (LOD) ; 24,0 % (LOQ)	19,6	58,9	NC	781,7
Martinique, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	450	Sérum	36,2 % (LOD) ; 6,4 % (LOQ)	19,6	58,9	NC	144,2
Allemagne, GerES III	1998	18-69 ans	2811	Sérum	1,70% (LOQ)	NC	100	< LOQ (médiane)	<LOQ
β-HCH									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,0% (LOD) ; 99,7% (LOQ)	2,0	10,0	79,2	596,5
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	386	Sérum	100% (LOD) ; 100% (LOQ)	2	6	210	1500
Guadeloupe, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	292	Sérum	62,3% (LOD) ; 48,6 % (LOQ)	19,6	58,9	NC	524,2
Martinique, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	450	Sérum	64,7 % (LOD) ; 56,7 % (LOQ)	19,6	58,9	NC	1182
Allemagne, GerES III	1998	18-69 ans	2749	Sérum	33,7% (LOQ)	NC	100	< LOQ (médiane)	500
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	93,1% (LOD)	10	NC	40	540
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1370	Serum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	50	412
γ-HCH ou Lindane									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,0% (LOD) ; 49,3% (LOQ)	2,0	10,0	NC	26,7
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	386	Sérum	7,0% (LOD) ; 3,1% (LOQ)	10	30	NC	<LOQ
Guadeloupe, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	292	Sérum	91,8 % (LOD) ; 66,1 % (LOQ)	62,3	48,6	58,8	161,1
Martinique, étude KANNARI	2013 - 2014	≥ 18 ans	450	Sérum	93,8 % (LOD) ; 56,4 % (LOQ)	62,3	48,6	NC	93,8
Allemagne GerES III	1998	18-69 ans	2806	Sérum	5,2% (LOQ)	NC	100	< LOQ (médiane)	< LOQ
Canada ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1665	Plasma	0,66% (LOD)	10	NC	NC	<LOD
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1367	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
Cis-chlordane									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,00% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	2,0	10,0	NC	<LOQ

Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1666	Plasma	0% (LOD) 0% (LOD)	10	NC	NC	< LOD
Trans-chlordane (Gamma-chlordane)									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,00% (LOD) ; 0,00% (LOQ)	2,0	10,0	NC	<LOQ
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1666	Plasma	0,2% (LOD)	5	NC	NC	< LOD
Oxychlordane									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,00% (LOD) ; 91,80% (LOQ)	2,0	10,0	21,6	73,6
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	97,4% (LOD)	5	NC	30	90
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1383	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	67	286
Cis-nonachlore									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	83,3% (LOD) ; 13,3% (LOQ)	2,0	10,0	NC	13,4
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	50,96% (LOD)	5	NC	NC	20
Trans-nonachlore									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	99,6% (LOD) ; 88,7% (LOQ)	2,0	10,0	19,2	62,1
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	94% (LOD)	10 ng/L	NC	40	140
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1366	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	106	520
Cis-Heptachlore epoxyde									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,0% (LOD) ; 89,5% (LOQ)	2,0	10,0	18,1	58,5
Heptachlor Epoxyde États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1371	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	135
Heptachlor Epoxyde B Brésil (Nord) - Freire <i>et al.</i> 2017	2010 - 2011	Donneurs 18-65 ans	978	Sérum	0,7% (LOD)	90	NC	< LOD (médiane)	< LOD
Trans-Heptachlore epoxyde									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,0% (LOD) ; 0,0% (LOQ)	2,0	10,0	NC	< LOQ
Aldrine									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,0% (LOD) ; 0,0% (LOQ)	2,0	10,0	NC	< LOQ

Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1666	Plasma	0% (LOD)	10	NC	NC	< LOD
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1358	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
Dieldrine									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	100,0% (LOD) ; 94,9% (LOQ)	2,0	10,0	23,8	80,8
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1365	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC NC	139,0
Endrine									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	0,0% (LOD) ; 0,0% (LOQ)	2,0	10,0	NC	< LOQ
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1286	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	< LOD
Mirex									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	759	Sérum	86,8% (LOD) ; 19,4% (LOQ)	2,0	10,0	NC	14,3
Canada, ECMS (cycle1)	2007 - 2009	20 - 79 ans	1668	Plasma	52,6% (LOD)	10	NC	NC	50
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003 - 2004	≥ 20 ans	1359	Sérum	NC	7,8 ng g ⁻¹ de lipide	NC	NC	106

Tableau 14. Comparaison des concentrations urinaires en chlorophénols (en $\mu\text{g L}^{-1}$) observées chez les adultes en France et à l'étranger

Pays / Étude	Année	Population	N	Matrice	%>LOQ ou %>LOD	LOD ($\mu\text{g L}^{-1}$)	LOQ ($\mu\text{g L}^{-1}$)	MG ($\mu\text{g L}^{-1}$)	P95 ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Mono-chlorophenols : 4-MCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	14,10% (LOD) ; 11,60% (LOQ)	0,05	0,15	NC	0,2
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	100% (LOQ)	0,03	0,1	5,56	29,7
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	1,4 % (LOQ)	NC	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	100 % (LOQ)	NC	0,1	4,88	17
Di-chlorophenols : 2,4-DCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	12,20% (LOD) ; 7,60% (LOQ)	0,05	0,15	NC	0,15
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	99,7% (LOQ)	0,03	0,1	1,10	7,62
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	6,2 % (LOQ)	NC	0,15	NC	0,21
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	91 % (LOQ)	NC	0,1	0,54	4,2
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	20 - 39 ans	351	Urine	86,32% (LOD)	0,3	NC	1,1	NC
		40 - 59 ans	359		85,24% (LOD)			1,2	NC
		60 - 79 ans	291		84,19% (LOD)			0,96	9,4
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2013-2014	20 ans et plus	1815	Urine	NC	0,1	NC	0,66	6,2
Corée, KNHBS	2009	18-69 ans	1865	Urine	63,4% (LOD)	0,05	0,1	0,14	3,32
Di-chlorophenols : 2,5-DCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	13,67% (LOD) ; 9,67% (LOQ)	0,05	0,15	NC	0,2
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	100,00% (LOQ)	0,03	0,10	10,56	216,23
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	4,60 % (LOQ)	NC	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	99,00 % (LOQ)	NC	0,10	1,85	27
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	20 - 39 ans	354	Urine	97,18% (LOD)	0,30	NC	6,00	NC
		40 - 59 ans	358		94,97% (LOD)			5,30	NC
		60 - 79 ans	288		95,49% (LOD)			5,70	98,00
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2013-2014	20 ans et plus	1815	Urine	NC	0,10	NC	2,78	169

Corée, KNHBS	2009	18-69 ans	1865	Urine	97,90% (LOD)	0,05	0,10	0,44	6,70
Di-chlorophenols : 2,6-DCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	0,22% (LOD) ; 0,11% (LOQ)	0,05	0,15	NC	<LOQ
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	6,9% (LOQ)	0,03	0,10	<LOQ	0,12
Allemagne GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	24 % (LOQ)	NC	0,1	<LOQ	0,4
Tri-chlorophenols : 2,3,4-TCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	0,33% (LOD) ; 0,11% (LOQ)	0,05	0,15	NC	<LOQ
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	3,3% (LOQ)	0,03	0,10	<LOQ	<LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	14 % (LOQ)	NC	0,1	<LOQ	0,2
Tri-chlorophenols : 2,4,5-TCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	1,11% (LOD) ; 0,56% (LOQ)	0,05	0,15	NC	<LOQ
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	0,4 % (LOQ)	NC	0,15	NC	< LOQ
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	58,5% (LOQ)	0,03	0,10	0,15	0,67
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	86% (LOQ)	NC	0,1	0,24	0,9
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	20 - 39 ans 40 - 59 ans 60 - 79 ans	357 360 291	Urine	2,52% (LOD) 2,22% (LOD) 4,47% (LOD)	0,5	NC	NC NC NC	< LOD < LOD < LOD
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2009 - 2010	20 ans et plus	1914	Urine	NC	0,1	NC	NC	0,30
Tri-chlorophenols : 2,4,6-TCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	1,22% (LOD) ; 0,33% (LOQ)	0,05	0,15	NC	<LOQ
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	96,4% (LOQ)	0,03	0,10	0,37	1,00
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	0,6 % (LOQ)	NC	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	98% (LOQ)	NC	0,1	0,46	1,3
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	20 - 39 ans 40 - 59 ans 60 - 79 ans	357 360 291	Urine	3,64% (LOD) 3,89% (LOD) 7,66% (LOD)	1,00	NC	NC NC NC	< LOD < LOD NC
États-Unis, NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2009 - 2010	20 ans et plus	1914	Urine	NC	0,5	NC	NC	1,1

Tetra-chlorophenols : TeCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	8,80% (LOD) ; 3,90% (LOQ)	0,05	0,15	NC	<LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	55% (LOQ)	NC	0,3	0,3	1,3
Pentachlorophénol : PCP									
France - Esteban	2014-2016	18-74 ans	900	Urine	37,20% (LOD) ; 17,70% (LOQ)	0,05	0,15	NC	0,23
France, ENNS	2006 - 2007	18-74 ans	393	Urine	66,2% (LOQ)	0,03	0,10	0,90	2,88
France, Volet Périnatal, Elfe	2011	Femmes enceintes	1036	Urine	4,2 % (LOQ)	NC	0,15	NC	< LOQ
Allemagne, GerES III	1997-1999	18 - 69 ans	692	Urine	75 % (LOQ)	NC	0,6	1,04	5,0
Canada, ECMS (cycle 2)	2009 - 2011	20 - 39 ans	354	Urine	2,82% (LOD)	0,7	NC	NC	< LOD
		40 - 59 ans	359		2,23% (LOD)			NC	< LOD
		60 - 79 ans	289		6,92% (LOD)			NC	0,71
États-Unis NHANES (CDC 2019 Vol 2)	2003-2004	20-59 ans	889	Urine	NC	0,5	NC	NC	3,11
		60 ans et plus	501				NC	NC	4,77

5. DÉTERMINANTS DE L'IMPRÉGNATION PAR LES OCS CHEZ LES ADULTES

Parmi les OC étudiés, 6 ont pu faire l'objet d'une recherche de déterminants d'imprégnation, dont les résultats sont présentés tableaux 15, 16, 17 et 18. Les OC étudiés étaient le pp'-DDE, le β -HCH, l'oxychlordan, le trans-nonachlore, le cis-heptachlore epoxyde et la dieldrine.

5.1 Facteurs d'ajustements physiologiques et socio-économiques

Les niveaux d'imprégnation par les organochlorés variaient avec certaines caractéristiques physiologiques comme le sexe, l'âge et l'indice de masse corporelle (IMC).

Les niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE et par le β -HCH, étaient plus élevés chez les femmes que chez les hommes, respectivement de 26,6% et 41,2%. Au contraire, les hommes étaient plus imprégnés que les femmes par le cis-heptachlore epoxyde (21,9%), par le trans-nonachlore (16,0%) et par la dieldrine (27,2%). Le niveau d'imprégnation par l'oxychlordan tendait également à être plus élevé chez les hommes, mais l'association était non significative.

Les personnes âgées avaient des niveaux d'imprégnation plus élevés que les personnes plus jeunes. En effet, les personnes âgées de 59 ans avaient des concentrations sériques en OCS significativement plus élevées que les personnes âgées de 34 ans : cette augmentation de concentration était de 96,5% pour le pp'-DDE, de 193,5% pour le β -HCH, de 49,6% pour le cis-heptachlore epoxyde, de 120,7% pour l'oxychlordan, de 107,0% pour le trans-nonachlore et de 35,4% pour la dieldrine.

Un IMC élevé était également associé à des niveaux d'imprégnation élevés par les OCS. Une différence d'IMC de 22,2 à 28,4 était associée à une augmentation des concentrations sériques de 19,6% pour le pp'DDE, de 27,7% pour le β -HCH, de 32,8% pour le cis-heptachlore epoxyde, de 9,1% pour l'oxychlordan et de 22,7% pour la dieldrine.

Concernant le tabagisme, les personnes ex-fumeurs ou fumeuses avaient des niveaux d'imprégnation moins élevés que les personnes non-fumeurs. On observait des diminutions significatives entre ces 2 catégories (ex-fumeurs versus non-fumeurs) pour le pp'-DDE (-16,4%), le β -HCH (-13,4%), le cis-heptachlore epoxyde (-11,2%) et l'oxychlordan (-9,1%).

5.2 Déterminants d'exposition aux organochlorés spécifiques

La recherche des déterminants chez les adultes de 18 à 74 ans a permis de mettre en évidence plusieurs sources de déterminants d'imprégnation par les OCS : alimentaire, domestique et professionnelle.

5.2.1 Déterminants alimentaires

Plusieurs recueils de données concernant la consommation alimentaire ont permis l'étude des déterminants alimentaires. Il s'agit : (1) du recueil des 24 heures (description de la nature, la composition et les quantités consommées au cours des 24 dernières heures) ; (2) du questionnaire des fréquences de consommation au cours des 12 mois précédent l'étude (pour certains aliments ou groupes d'aliments) à l'aide du *Food Propensity Questionnaire* (FPQ) ; (3) du questionnaire prenant en compte l'origine du produit alimentaire, qu'il soit issu du jardin ou du propre élevage du participant, ou issu de l'agriculture biologique.

Les résultats montrent que les personnes consommant des œufs fréquemment (percentile 75 comparé au percentile 25) avaient des niveaux d'imprégnation plus élevés par le pp'-DDE

(augmentation de 8,4%) et par l'oxychlordane (augmentation de 4,6%). On observe de la même façon, que la consommation assez fréquente (1 à 3 fois par mois) d'œufs provenant du propre élevage des participants, était également associée à des niveaux d'imprégnation plus élevés par le cis-heptachlore epoxyde (20,4%), par le oxychlordane (18,4%) et par le trans-nonachlore (22,5%). La consommation très fréquente (1 à 7 fois par semaine) d'œufs provenant du propre élevage des participants, était également associée à une imprégnation plus élevée (12,8%) par le trans-nonachlore.

La consommation importante de matières grasses, telles que l'huile, le beurre, la margarine et la crème fraîche était significativement associée à une augmentation des niveaux d'imprégnation par le β -HCH (9,2%), l'oxychlordane (8,7%), la dieldrine (6,5%). Cette tendance avait également été retrouvée, pour le cis-heptachlore epoxyde et le trans-nonachlore, mais de façon non significative. A contrario, une consommation importante de produits laitiers (lait, fromage et yaourts) était associée à un faible niveau d'imprégnation par le pp'-DDE (-10,8%). Les produits laitiers 0%, c'est-à-dire sans matière grasse, ne faisaient que très peu varier l'imprégnation par le β -HCH (0,4%).

La consommation importante de poissons et de produits de la mer était associée à une augmentation de 17% de la concentration sérique en trans-nonachlore ; la consommation importante de crustacés, mollusques et coquillages était associée à une augmentation de 3,5% de la concentration sérique en oxychlordane.

La consommation importante de viande bovine, de viande provenant du propre élevage des participants, ou encore de viande issue de l'agriculture biologique, était associée à une diminution des niveaux d'imprégnation par certains organochlorés spécifiques : la consommation de viande bovine (bœuf et veau) était associée à une diminution des concentrations sériques en oxychlordane et en trans-nonachlore; la consommation de viande provenant du propre élevage des participants était associée à une diminution de la concentration sérique en cis-heptachlore epoxyde (-18,2%) ; la consommation de viande issue de l'agriculture biologique était associée à une diminution des concentrations sériques en pp'-DDE (-22,3%).

Une consommation fréquente de légumes était associée à des niveaux d'imprégnation plus élevés par le pp'-DDE (13,2%) et la dieldrine (9,5%). De la même façon, le fait de consommer beaucoup de fruits était également associé à des concentrations sériques élevés en pp'-DDE (18,3%) et en trans-nonachlore (16,7%). A contrario, le fait de consommer fréquemment des fruits du jardin était associé à une faible imprégnation par l'oxychlordane (-10,1%).

De façon plus générale, la consommation régulière de produits issus de l'agriculture biologique (profil biologique) était associée à des concentrations sériques faibles en β -HCH (-10,2%). Les consommateurs de produits biologiques étaient définis comme ceux consommant entre une fois par mois à sept fois par semaine, au moins un des produits suivants issu de l'agriculture biologique : produits laitiers, œufs, viande, volaille, fruits, légumes, céréales et pain complet. Les personnes définies comme n'ayant pas un profil biologique, ne consommaient jamais ou consommaient moins d'une fois par mois les produits issus de l'agriculture biologique énumérés ci-dessus.

L'imprégnation par l'oxychlordane était 8,2% plus élevée chez les personnes consommant des quantités importantes (1 208 mL/jour) d'eau du robinet, pour s'hydrater ou pour la cuisine, que chez les personnes en consommant moins (386,7 mL/jour). La consommation régulière de boissons non alcoolisées (thé, café, infusion, tisane, jus de fruits et jus de légumes) était associée à des niveaux d'imprégnation faibles par le pp'-DDE (-15,2%).

Enfin, les personnes consommant fréquemment des boissons alcoolisées avaient des niveaux d'imprégnation plus élevés par le cis-heptachlore epoxyde (10,9%), le trans-nonachlore (14,4%) et la dieldrine (11,5%).

5.2.2 Déterminants domestiques

Utilisation de pesticides à usage domestique

L'utilisation de répulsifs corporels était significativement associée à une concentration sérique plus élevée en trans-nonachlore (11,8%) et en dieldrine (26,3%).

Les personnes qui déclaraient posséder des plantes intérieures et ne pas utiliser de pesticides, étaient plus imprégnées par les 6 OC que celles qui déclaraient ne pas en posséder : l'augmentation d'imprégnation était de 25,8% pour le pp'-DDE, de 23,4% pour le β -HCH, de 21% pour le cis-heptachlore epoxyde, de 15% pour l'oxychlordane, de 10% pour le transnonachlore et de 14% pour la dieldrine. Les personnes déclarant utiliser des pesticides sur une pelouse privative étaient plus imprégnées par le β -HCH (17,8%) que celles qui n'avaient pas de pelouse.

Habitat

Une tendance à une augmentation de l'imprégnation par le cis-heptachlore epoxyde et par la dieldrine, était observée chez les personnes résidant à proximité (200 mètres) d'un jardin public, sans que cette association soit significative.

En ce qui concerne la fréquence d'aération des habitats au cours du printemps et de l'été, les personnes qui aèrent leur habitat, tous les jours une à deux fois, avaient des niveaux d'imprégnation plus élevés par le cis-heptachlore epoxyde (13%) et le trans-nonachlore (18,8%), par rapport à ceux qui aèrent très souvent (tous les jours plus de deux fois). Cependant, aucun gradient n'a pu être mis en évidence en raison du faible effectif de la troisième catégorie « les personnes qui aèrent moins d'une fois à plusieurs fois par semaine » (n=39).

5.2.3 Déterminants géographiques

Les personnes qui vivaient en quartier périphérique avait une imprégnation par le pp'-DDE significativement plus élevée de 21,4% que les personnes résidant en centre-ville. Les personnes résidant dans un boug ou un village, avaient au contraire une imprégnation plus faible par le pp'-DDE (-14,6%).

La proximité des habitats aux anciennes zones agricoles pour lesquelles les OCS étaient homologuées, n'était pas associée aux niveaux d'imprégnation par les OCS.

5.2.4 Déterminants professionnels

Plusieurs domaines professionnels sont concernés par l'exposition aux organochlorés. Les personnes exposées aux poussières végétales, animales ou au sol arable avaient des niveaux d'imprégnation significativement plus élevés en β -HCH (30,8%), que ceux qui n'étaient pas en contact avec ces poussières. Les personnes qui travaillaient dans un domaine professionnel lié au milieu agricole, aux plantes, aux pesticides ou au bois avaient des niveaux d'imprégnation plus élevés par le cis-heptachlore epoxyde (16,6%) et la dieldrine (43,1%).

Tableau 15. Déterminants associés aux concentrations sériques en pp'-DDE et en β -HCH, en ng g⁻¹ de lipides - données chez les adultes (18-74 ans) de l'enquête continentale française Esteban (2014-2016)

Variables quantitatives	p50 [p25; p75]	Variation entre le P25 et le P75 % [IC95%]	
		pp'-DDE	β -HCH
Données physiologiques			
Âge (années)	47 [34 ; 59]	96,5 [79,0 ; 115,7]	193,5 [166,1 ; 223,7]
IMC (kg/m ²)	24,8 [22,2 ; 28,4]	19,6 [12,9 ; 26,7]	27,7 [19,2 ; 36,9]
Expositions alimentaires			
Œufs (g/jour)	11,7 [8,8 ; 15,7]	8,4 [1,5 ; 15,6]	3,8 [-1,6 ; 9,5]
Produits laitiers (g/jour)	152,2 [93,6 ; 227,6]	-10,8 [-16,2 ; -5,1]	
Produits laitiers 0% (g/jour)	0 [0 ; 2,5]		0,4 [0,2 ; 0,6]
Matières grasses (g/jour)	30,6 [24,3 ; 36,7]		9,2 [3,1 ; 15,7]
Tous les légumes (g/jour)	250,2 [202,5 ; 307,7]	13,2 [5,0 ; 22,0]	3,9 [-1,4 ; 9,5]
Tous les fruits (g/jour)	160,1 [80,2 ; 246,6]	18,3 [4,8 ; 33,4]	
Eau du robinet (mL/jour)	726,9 [386,7 ; 1208,0]	3,2 [-7,0 ; 14,5]	
Boissons non alcoolisées (mL/jour)	360,5 [197,7 ; 543,9]	-15,2 [-22,6 ; -7,1]	5,2 [-2,0 ; 12,9]
Indicateur de proximité géographiques aux zones agricoles			
Proximité aux zones agricoles de 1970 et notamment celles ayant une homologation pour le DDT (%)	0,02 [0,00 ; 0,05]	6,8 [-4,6 ; 19,5]	
Proximité aux zones agricoles de 1970 et notamment celles ayant une homologation pour des substances HCH (%)	0,01 [0,00 ; 0,23]		-1,28 [-12,2 ; 10,9]

Tableau 16. Déterminants associés aux concentrations sériques en cis-hetachlore epoxyde, en oxychlordanne, en trans-nonachlore et en dieldrine, en ng g⁻¹ de lipides - données chez les adultes (18-74 ans) de l'enquête continentale française Esteban (2014-2016)

Variables quantitatives	p50 [p25; p75]	Variation entre le P25 et le P75 % [IC95%]			
		Cis-heptachlore Epoxyde	Oxychlordanne	Trans-nonachlore	Dieldrine
Données physiologiques					
Âge (années)	47 [34,0 ; 59,0]	49,6 [37,0 ; 63,2]	120,7 [101,5 ; 141,6]	107,0 [89,7 ; 125,9]	35,4 [21,2 ; 51,2]
IMC (kg/m ²)	24,8 [22,2 ; 28,4]	32,8 [26,8 ; 39,1]	9,1 [3,5 ; 15,1]		22,7 [16,3 ; 29,4]
Expositions alimentaires					
Œufs (g/jour)	11,7 [8,8 ; 15,7]		4,6 [1,4 ; 7,8]		
Produits laitiers 0% (g/jour)	0 [0 ; 2,5]			0,02 [-0,2 ; 0,3]	
Matières grasses (g/jour)	30,6 [24,3 ; 36,7]	7,2 [-0,4 ; 15,3]	8,7 [3,3 ; 14,3]	5,9 [-0,9 ; 13,1]	6,5 [0,4 ; 12,9]
Tous les poissons et produits de la mer	26,3 [21,1 ; 33,7]			17,0 [8,0 ; 26,8]	
Crustacés, mollusques et coquillages (g/jour)	2,1 [2,1 ; 5,3]		3,5 [0,9 ; 6,2]		
Viandes bovines (g/jour)	36,5 [28,2 ; 49,7]		-6,7 [-11,1 ; -2,0]	-6,6 [-11,2 ; -1,7]	
Tous les légumes (g/jour)	250,2 [202,5 ; 307,7]		3,4 [-1,5 ; 9,3]		9,5 [2,5 ; 17,0]
Tous les fruits (g/jour)	160,1 [80,2 ; 246,6]			16,7 [8,0 ; 26,0]	
Eau (mL/jour)	726,9 [386,7 ; 1208,0]		8,2 [1,2 ; 15,7]		
Boissons non alcoolisées (mL/jour)	360,5 [197,7 ; 543,9]				0,5 [-7,6 ; 9,2]
Boissons alcoolisées (mL/jour)	53,6 [17,8 ; 127,6]	10,9 [0,8 ; 22,0]		14,4 [5,1 ; 24,5]	11,5 [1,8 ; 22,0]
Indicateur de proximité géographiques aux zones agricoles en 1970					
Proximité aux zones agricoles de 1970 et notamment celles ayant une homologation pour le chlordane, l'heptachlore, l'aldrine ou la dieldrine (%)	0,13 [0,01 ; 0,3]	-2,9 [-13,4 ; 8,9]	-1,0 [-9,7 ; 8,6]	-7,3 [-16,3 ; 2,6]	-7,0 [-17,5 ; 7,9]

Tableau 17. Déterminants associés aux concentrations sériques en pp'-DDE et en β -HCH, en ng g⁻¹ de lipides – données chez les adultes (18-74 ans) de l'enquête continentale française Esteban (2014-2016)

Variables qualitatives	n (%) [*]	% de variation et IC 95%	
		pp'-DDE	β -HCH
Statut socio-économique			
Sexe			
Homme	338 (47,7)	Reference	Reference
Femme	421 (52,3)	26,6 [15,6 ; 35,5]	41,2 [28,5 ; 55,1]
Présence d'enfants de moins de 18 ans dans le foyer [*]			
Non	492 (63,9)	Reference	Reference
Oui	267 (36,1)	2,7 [-7,1 ; 13,5]	-18,7 [-25,2 ; -11,6]
Diplôme			
2 ^e cycle	207 (16,6)	Reference	Reference
1 ^{er} cycle	191 (15,3)	-9,0 [-20,4 ; 4,0]	1,78 [-8,3 ; 13,0]
BAC Techno BAC général	146 (19,6)	-0,1 [-12,0 ; 13,5]	15,9 [2,3 ; 31,3]
Aucun diplôme, CEP, BEP, BEPC, CAP, Brevet élémentaire, brevet de compagnon	215 (48,5)	-1,8 [-14,0 ; 12,2]	8,2 [-2,3 ; 19,8]
Tabagisme			
non-fumeur	399 (51,9)	Reference	Reference
Ex-fumeur	215 (26,5)	-16,4 [-27,0 ; -4,3]	-13,4 [-21,5 ; -4,5]
Fumeur	145 (21,6)	-6,6 [-16,8 ; 5,0]	4,4 [-4,9 ; 14,7]
Exposition alimentaire			
Consommation de viande issue de l'agriculture biologique			
jamais ou moins d 1 fois par mois	516 (74,9)	Reference	
1 à 3 fois par mois	98 (13,5)	14,8 [-7,0 ; 41,7]	
1 à 7 fois par semaine	83 (11,6)	-22,3 [-36,9 ; -4,3]	
Consommation de produits biologiques			
Non	373 (61,7)		Reference
Oui	322 (38,3)		-10,2 [-19,1 ; -0,3]
Exposition domestique			
Lieu d'habitation			
Centre-ville	234 (30,0)	Reference	
Quartier périphérique	230 (28,8)	21,4 [6,8 ; 38,1]	
Bourg village	214 (31,8)	-14,6 [-26,8 ; -0,5]	
Habitat dispersé	77 (9,4)	11,2 [-12,1 ; 40,5]	
Utilisation de pesticides pour les plantes intérieures			
pas concerné	236 (37,3)	Reference	Reference
non	459 (59,3)	25,8 [9,7 ; 44,1]	23,4 [12,0 ; 36,0]
oui	38 (3,5)	18,8 [-17,3 ; 70,8]	23,0 [-5,6 ; 60,8]
Utilisation de pesticides pour les animaux			
pas concerné	385 (50,3)	Reference	
non	97 (14,9)	-14,9 [-28,7 ; 1,6]	
oui	256 (34,8)	-10,4 [-20,5 ; 0,9]	
Utilisation de pesticides pour la pelouse			
pas concerné	211 (34,5)		Reference
non	283 (33,0)		17,8 [4,1 ; 33,4]
oui	237 (32,5)		8,8 [-3,9 ; 23,3]
Exposition professionnelle			
Exposition à des poussières végétales ou animales (bois, farines, céréales, poussières textiles, autres) ou poussières minérales (seulement sol arable)			
non exposé	704 (91,1)		Reference
exposé	51 (8,9)		30,8 [8,1 ; 58,2]

^{*} Les effectifs correspondent aux données brutes avant imputation ; les pourcentages ont été estimés après imputation des données manquantes

Tableau 18. Déterminants associés aux concentrations sériques en cis-heptachlore epoxyde, en Oxychlordane, en Trans-nonachlore et en Dieldrine, en ng g⁻¹ de lipides – données chez les adultes (18-74 ans) de l'enquête continentale française Esteban (2014-2016)

Variables qualitatives	n (%) [*]	% de variation et IC 95%			
		Cis-heptachlore Epoxyde	Oxychlordane	Trans-nonachlore	Dieldrine
Statut socio-économique					
Sexe					
Homme	338 (47,7)	Référence	Référence	Référence	Référence
Femme	421 (52,3)	-21,9 [-28,7 ; -14,6]	-2,33 [-9,1 ; 5,0]	-16,0 [-23,4 ; -7,8]	-27,2 [-33,9 ; -19,8]
Présence d'enfant dans le foyer					
Non	492 (63,9)	Référence	Référence	Référence	Référence
Oui	267 (36,1)	-0,7 [-8,3 ; 7,4]	-2,7 [-10,0 ; 5,3]	-3,1 [-10,4 ; 4,8]	-8,6 [-16,1 ; -0,4]
Diplôme					
2 ^e cycle	207 (16,6)	Référence	Référence	Référence	Référence
1 ^{er} cycle	191 (15,3)	-6,0 [-13,9 ; 2,6]	-1,9 [-8,9 ; 5,7]	-5,3 [-13,5 ; 3,8]	-8,4 [-16,0 ; -0,2]
BAC Techno BAC général	146 (19,6)	-3,2 [-12,1 ; 6,7]	6,7 [-2,8 ; 17,2]	2,1 [-7,6 ; 12,7]	-9,6 [-17,0 ; -1,5]
Aucun diplôme, CEP, BEP, BEPC, CAP, Brevet élémentaire, brevet de compagnon	215 (48,5)	-15,8 [-24,7 ; -5,9]	-3,9 [-12,3 ; 5,3]	-6,2 [-15,4 ; 4,1]	-21,0 [-29,0 ; -12,1]
Tabagisme					
non-fumeur	399 (51,9)	Référence	Référence		
Ex-fumeur	215 (26,5)	-11,2 [-18,5 ; -3,2]	-9,1 [-16,2 ; -1,5]		
Fumeur	145 (21,6)	-4,3 [-14,0 ; 6,5]	-0,6 [-9,1 ; 8,7]		
Exposition alimentaire					
Consommation d'œufs provenant du jardin ou de l'élevage					
jamais < d'1 fois par mois	571 (77,6)	Référence	Référence	Référence	
1 à 3 fois par mois	49 (9,2)	20,4 [0,5 ; 44,2]	18,4 [0,6 ; 39,5]	22,5 [5,9 ; 41,6]	
1 à 7 fois par semaine	67 (13,2)	11,5 [-4,6 ; 30,4]	6,8 [-6,6 ; 22,2]	12,8 [0,3 ; 26,9]	
Consommation de viande ou de volaille provenant du jardin ou de l'élevage					
non	596 (86,1)	Référence			
oui	58 (13,9)	-18,2 [-31,4 ; -2,4]			
Consommation de fruits provenant du jardin ou de l'élevage					
jamais ou < d'1 fois par mois	477 (66,9)		Référence	Référence	
1 à 3 fois par mois	99 (15,4)		-10,1 [-19,1 ; -0,1]	-9,6 [-19,5 ; 1,7]	
1 à 7 fois par semaine	99 (17,8)		-2,1 [-11,3 ; 8,1]	-2,1 [-11,0 ; 7,7]	
Exposition domestique					
Aération de l'habitat au printemps et en été					
Tous les jours >2 fois	606 (80,6)	Référence	Référence	Référence	
Tous les jours une à deux fois	110 (15,7)	13,0 [2,8 ; 24,3]	9,0 [-0,7 ; 18,6]	18,8 [7,2 ; 31,6]	
< d'1 fois à plusieurs fois/sem	39 (3,7)	-8,9 [-17,7 ; 1,0]	3,7 [-7,1 ; 15,7]	7,7 [-4,5 ; 21,5]	
Présence d'un jardin public à 200m autour de l'habitat					
non	533 (73,4)	Référence			Référence
oui	222 (26,6)	10,05 [-0,1 ; 21,3]			6,36 [-1,87 ; 15,28]
Utilisation de répulsif corporel					
Non	504 (70,1)			Référence	Référence
Oui	230 (29,9)			11,8 [3,5 ; 20,7]	26,3 [15,2 ; 38,5]
Utilisation de pesticides pour les plantes intérieures					
pas concerné	236 (37,4)	Référence	Référence	Référence	Référence
non	459 (59,2)	21,0 [10,8 ; 32,1]	15,0 [5,6 ; 25,0]	10,0 [1,2 ; 19,7]	14,0 [3,2 ; 26,0]
oui	38 (3,4)	5,3 [-16,1 ; 32,1]	14,9 [-6,8 ; 33,9]	14,6 [-6,0 ; 39,7]	-4,8 [-23,8 ; 15,4]
Exposition professionnelle					
Domaine d'activités sélectionnées : Agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides, arboriculture, cultures céréalières, en tant que fleuriste, jardinerie, pépinière, maraîchage, autre agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides, production de pesticides, traitement du bois, usinage de bois traités					
non	703 (89,5)	Référence			Référence
oui	52 (10,5)	16,6 [0,1 ; 35,9]			43,1 [17,9 ; 73,7]

* Les effectifs correspondent aux données brutes avant imputation ; les pourcentages ont été estimés après imputation des données manquantes

6. DISCUSSION

Parmi les 18 organochlorés spécifiques et les 9 chlorophénols étudiés, 3 étaient bien quantifiés chez les enfants (pp'-DDE, β -HCH et dieldrine) et 6 chez les adultes (pp'-DDE, β -HCH l'oxychlordane, le trans-nonachlore, le cis-heptachlore epoxyde et la dieldrine). Parmi ces six organochlorés, cinq correspondent aux métabolites de substances mères utilisés dans les formules chimiques de pesticides, comme décrit dans le tableau 1 : le DDT se métabolise en pp'-DDE, le chlordane en oxychlordane et en trans-nonachlore, l'heptachlore en cis-heptachlore epoxyde et l'aldrine en dieldrine. Le β -HCH est quant à lui, à la fois un isomère appartenant à la formule chimique de l'HCH technique et à la fois un sous-produit lors de la fabrication du lindane. Une fois émises dans l'environnement, ces substances se bio-accumulent dans les compartiments végétaux et animaux, deviennent rémanentes et sources d'exposition pour l'Homme.

6.1 Résultats descriptifs chez l'enfant

L'étude Esteban est la première enquête française à analyser les niveaux d'imprégnation par les organochlorés chez les enfants. Les enfants de la tranche d'âge [6-10 ans] avaient des niveaux légèrement plus élevés que les enfants des tranches d'âges supérieurs, possiblement en raison d'une exposition plus importante des jeunes enfants, aux poussières domestiques contenant des OC. Aussi, le fait que les jeunes enfants aient une masse corporelle plus faible que les enfants plus âgés, peut également expliquer cette différence d'imprégnation par rapport à leur prise alimentaire.

Les niveaux d'imprégnation par les OC (excepté pour le β -HCH) étaient, chez les enfants, plus faibles dans Esteban que dans les enquêtes étrangères (allemandes, espagnoles, canadiennes ou américaines). Ces études étaient réalisées pour la plupart à des dates antérieures (entre 2003 et 2011) à l'étude Esteban (2014-2016), excepté pour l'étude allemande GerES V (2014-2017), qui a été réalisée à la même période que l'étude Esteban.

Le niveau d'imprégnation par le β -HCH dans l'étude Esteban était équivalent ou supérieur par rapport aux enquêtes étrangères réalisées en population générale : GerES IV (2003 et 2006), GerES V (2014-2017) et NHANES (2003-2004). Seule l'étude espagnole (2011) a observé un niveau d'imprégnation par le β -HCH, plus élevé que celui mesuré dans Esteban.

6.2 Résultats descriptifs chez l'adulte

Chez les adultes, l'enquête ENNS réalisée en 2006-2007 permet d'étudier l'évolution de l'exposition dans le temps. La diminution des concentrations sériques en pp'-DDE et en β -HCH entre les études ENNS et Esteban est cohérente avec l'interdiction progressive de ces substances entre les années 1978 et 2009. Cependant, il est à noter que les concentrations observées dans la présente étude restent encore élevées, comparativement aux études étrangères, réalisées pour la plupart à des dates antérieures. Comme ce qui a été observé chez les enfants, le niveau d'imprégnation par le β -HCH de l'étude Esteban était équivalent ou légèrement supérieur par rapport aux enquêtes étrangères réalisées en population générale, à des dates antérieures : en 1998 pour GerES III (Allemagne), en 2007-2009 pour ECMS (Canada) et en 2003-2004 pour NHANES (États-Unis).

L'ensemble des autres OC (organochlorés spécifiques et chlorophénols) présente des niveaux d'imprégnation plus faibles dans notre étude que dans les études étrangères, réalisées à des dates antérieures.

Que ce soit chez les adultes ou chez les enfants, on observe que les niveaux d'imprégnation par les OCS (hormis le β -HCH) et les chlorophénols sont inférieurs dans l'étude Esteban par rapport aux autres études réalisées précédemment.

Ainsi, nous pouvons supposer que plusieurs facteurs ont contribué à une baisse du niveau d'imprégnation (si l'on compare à ENNS) ou à un faible niveau d'imprégnation (si l'on compare aux autres études étrangères) par les biomarqueurs dans l'étude Esteban :

- 1) La législation sur les interdictions d'utilisations de pesticides organochlorés (1978-2009) a permis d'annihiler l'exposition directe (absence d'utilisation) et de diminuer drastiquement les rejets de ces derniers dans l'environnement ;
- 2) La dégradation progressive des OC déjà présents dans l'environnement (sol, eau) et chez l'animal, a permis de diminuer l'exposition humaine. Les demi-vies d'élimination de ces molécules dans notre environnement sont très variables : entre quelques minutes à plusieurs années.

Bien que l'usage de ces OC soit principalement ancien, les concentrations sériques en pp'-DDE et en β -HCH sont les plus élevées parmi l'ensemble des OC étudiés. En effet, le pp'-DDE et le β -HCH sont très résistants dans l'environnement, et ont des demi-vies longues dans les différents compartiments de l'environnement. Le DDT, substance mère du pp'-DDE, a une demi-vie de 4 à 30 ans dans le sol et de moins de 50 heures dans l'eau [85]. Parmi les isomères HCH, le β -HCH est l'isomère le plus persistant, avec une demi-vie de 184 jours dans les terres cultivées et de 100 jours dans les terres non cultivées [86, 87]. Ensuite, ces substances se bioaccumulent et se bio-amplifient le long de la chaîne trophique jusqu'à s'accumuler chez l'être humain où le DDE a une demi-vie de 7 à 8,6 ans et le β -HCH, une demi-vie de 7 ans. Ces demi-vies longues permettent d'expliquer en partie les niveaux d'imprégnation encore élevés par le pp'-DDE et le β -HCH. Le niveau d'imprégnation par le pp'-DDE étant le plus important, il semble nécessaire de protéger les personnes les plus exposées, notamment en raison des effets cancérogènes probables pour l'Homme (classé 2A par le CIRC) [54] ainsi que la présomption d'un lien entre les pesticides OC (notamment le DDT) et de plusieurs pathologies (cf : chapitre « Effets sanitaires ») [56].

Concernant le β -HCH, d'autres éléments sont à considérer pour expliquer des niveaux plus élevés (ou équivalents) en France par rapport à d'autres pays dont les études ont été réalisées à des dates plus anciennes. Tout d'abord, le β -HCH est un des isomères de l'HCH-technique, pesticide largement utilisé en France jusqu'à sa date d'interdiction en 1988. Le β -HCH est également un sous-produit lors de la fabrication du lindane, pesticide dont la production a été interdite par la convention de Stockholm en 2009. Par ailleurs, la gestion des stockages et de destructions des déchets de produits dangereux tels que le β -HCH n'étaient pas réglementés dans la plupart des pays signataires avant la convention de Stockholm de 2009 [88-90]. Enfin, le β -HCH est l'isomère HCH le plus persistant dans les sols et a une longue demi-vie chez l'homme [86, 87, 91, 92]. Ainsi, l'utilisation intensive de l'HCH technique, l'absence de gestion de produits dangereux (notamment lors de la fabrication du lindane en France) et la persistance du β -HCH dans les sols, contribuent à exposer l'Homme à l'isomère β -HCH. Il semble donc nécessaire de protéger les personnes les plus exposées au β -HCH, notamment en raison de son effet cancérogène possible pour l'Homme, le β -HCH étant classé 2B par le CIRC.

6.3 Analyses des déterminants

L'étude des déterminants a permis de mettre en évidence certaines associations. Elles doivent toutefois être interprétées avec précaution car les études transversales ne permettent pas à elles-seules de déterminer la causalité entre les sources d'exposition potentielles étudiées et les niveaux d'imprégnation mesurés.

6.3.1 Facteurs physiologiques

Dans notre étude nous avons mis en évidence une imprégnation par le pp'-DDE et le β -HCH, plus élevée chez les femmes que chez les hommes. L'étude ENNS [1], l'étude Kannari réalisée en Guadeloupe et Martinique [80], ainsi que l'enquête canadienne ECMS [83], avaient également mis en évidence une imprégnation plus élevée par ces biomarqueurs chez les femmes. Les niveaux

d'imprégnation par le cis-heptachlore epoxyde, le trans-nonachlore et la dieldrine étaient cependant plus élevés chez les hommes. Peu d'études ont mis en évidence des associations entre le genre et certains biomarqueurs OCS, hormis une étude suédoise [93], qui a observé une imprégnation par la somme de quatre isomères ou métabolites chlordane, plus élevée chez les hommes que chez les femmes.

Comme pour l'étude ENNS [1] et d'autres études étrangères [12, 14], Esteban met en évidence une augmentation des concentrations en OCS avec l'âge. Pour la plupart des 6 OCS étudiés, la concentration sérique augmentait en fonction de l'âge. Par exemple, pour une augmentation de l'âge du premier au dernier quartile (P25 à P75), la concentration sérique en β -HCH augmentait de 192%. Cet effet âge peut s'expliquer par des demi-vies longues des OCS dans l'organisme humain, associées au processus de bio-accumulation. Plus une personne est âgée, plus elle a un risque d'avoir accumulé des OCS dans son organisme, via différentes expositions. Parmi les OCS, le DDE et le β -HCH sont ceux ayant les demi-vies les plus longues dans l'organisme humain : de 7 et 8,6 ans pour le DDE et de 7 ans pour le β -HCH. Ces longs processus d'élimination favorisent l'accumulation des OCS ce qui explique que les personnes âgées soient plus imprégnées en OCS que les plus jeunes adultes. En parallèle, il est probable que les personnes les plus âgées aient été directement exposées aux OCS, lors de leurs utilisations autorisées, et de ce fait, l'exposition de ces personnes a pu être plus importante.

On note également que les concentrations sériques en OCS étudiés (excepté le trans-nonachlore), augmentaient significativement avec l'IMC. L'étude ENNS ainsi que d'autres études étrangères ont mis en évidence cette association [12, 14, 93, 94]. Plusieurs hypothèses de cette relation ont été décrites dans la littérature. Le tissu adipeux est considéré comme un lieu de stockage des OCS chez l'homme [94]. Les concentrations en OCS sont plus importantes chez les personnes obèses [95]. Ainsi, les personnes ayant un IMC élevé ont probablement accumulé des OCS dans leur tissu adipeux via une alimentation importante en lipides, potentiellement contaminée par ces molécules [93, 94]. Le relargage des OCS dans le sang, à partir des tissus adipeux, est sans doute une explication de l'association de l'IMC avec la concentration sérique en OCS. Lorsque ce relargage est massif, notamment en cas de perte de poids, des études ont mis en évidence une association avec l'augmentation de la concentration en OCS dans la circulation sanguine [96-98].

6.3.2 Déterminants alimentaires

L'exposition prédominante aux OCS décrite dans la littérature est celle de la consommation alimentaire, principalement en raison de la rémanence, de la lipophilie et du caractère bio-accumulatif des OCS, ainsi que de leur présence ubiquitaire dans l'environnement.

Dans l'étude Esteban, les personnes consommant régulièrement du poisson et des produits de la mer avaient des niveaux d'imprégnation par l'oxychlordane et le trans-nonachlore, plus élevés que les autres. Ces résultats étaient concordants avec les études françaises EAT2 et ENNS ainsi qu'avec d'autres études européennes ou internationales en population générale [13-15, 23]. De la même façon que ce qui a été observé dans EAT2 et dans des études étrangères, l'étude Esteban a mis en évidence que la consommation d'œufs était associée à une augmentation des niveaux d'imprégnation par certains OCS (pp'-DDE, cis-heptachlore epoxyde, oxychlordane et trans-nonachlore). Il est à noter que l'étude ENNS n'avait pas mis en évidence d'association entre la consommation d'œufs et les niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE et le β -HCH. Les résultats Esteban sont cohérents avec les résultats de certaines études qui mettent également en évidence la consommation d'œufs comme déterminant des niveaux d'imprégnation par les OC, dans des populations particulières : étudiants et employés d'une université [16], femmes enceintes [21] population vivant proche d'une usine chimique [99]. En revanche, certaines études ne mettent pas en évidence ces associations [14, 100].

Au même titre que les produits de la mer et les œufs, les études françaises (EAT2 et ENNS) [1, 3] et internationales [13, 19, 21, 23] ont décrits des associations entre la consommation de laitages et les niveaux d'imprégnation par les OCS. Certaines études ne montrent quant à elles aucune

tendance particulière de la consommation régulière de laitages [16] ; d'autres montrent une tendance plutôt protectrice [51], ce qui est également le cas pour l'étude Esteban. Par ailleurs, il est important de noter que certaines études ont pu mettre en évidence à la fois une association positive avec certains produits laitiers (beurre, fromage) et une absence d'association ou une association négative avec d'autres produits laitiers moins gras tels que le lait et les yaourts [19, 100]. Une étude analysant la concentration en OCS dans les produits laitiers, a également pu mettre en évidence une variabilité des niveaux d'OC en fonction du type de laitage (DDT présent dans le beurre mais pas dans le lait ou les yaourts) [101] et en fonction de sa composition en acide gras [102]. Ainsi la composition des produits laitiers, notamment en proportion de matières grasses, semble importante à considérer. Les résultats Esteban vont également dans ce sens-là : une consommation importante de produits laitiers (lait, yaourts et fromage) était associée à une faible concentration sérique en pp'-DDE ; une consommation importante de matières grasses (huile, beurre, margarine et crème fraîche) était associée à des concentrations sériques élevées en β -HCH, en oxychlordane et en dieldrine. Ainsi les consommations d'huile et de produits laitiers gras sont des possibles déterminants d'imprégnation par les organochlorés.

Les aliments riches en lipides, tels que les poissons et certains fruits de mer, les œufs ou les matières grasses, sont susceptibles d'augmenter les concentrations sériques des pesticides organochlorés.

Dans l'étude française ENNS et dans d'autres études internationales [13, 19, 21], la consommation de viande a été observée comme un déterminant d'exposition aux OCS. Cette relation n'a pas été retrouvée dans l'étude Esteban : la consommation de viande était associée à une diminution des niveaux d'imprégnation par les OCS. Cette association négative était d'autant plus marquée quand la viande provenait du propre élevage des participants ou quand celle-ci était issue de l'agriculture biologique.

Les études internationales nous montrent que la consommation de poissons et de produits de la mer [13, 14, 16, 18, 19, 21], ainsi que les laitages sont les produits les plus associés à des niveaux élevés en OCS [13, 19, 21, 23]). La viande rouge est également associée à une augmentation des niveaux d'imprégnation par certains OCS [13, 19, 24]. De façon générale, on observe que les produits d'origine animale sont plus considérés comme des facteurs d'expositions que les produits végétaux [14, 24, 25].

Pourtant, dans certaines études, les produits végétaux semblent également jouer un rôle sur les niveaux d'imprégnation par les OCS, notamment par le pp'-DDE comme décrit dans une étude espagnole en population générale [13]. Le rôle des aliments d'origine végétale, dans l'exposition aux OCS est controversé dans la littérature [13, 14, 16, 24]. L'enquête française EAT2 effectuée par l'Anses a mis en évidence la présence d'OC dans les légumes hors pomme de terre. Aussi la consommation de fruits était associée à une augmentation de DDE dans l'enquête ENNS. Dans l'étude Esteban, ces relations ont également été observées : la consommation de légumes et de fruits était associée à une augmentation de l'imprégnation par les OCS (pp'-DDE, trans-nonachlore et dieldrine).

Par ailleurs, lorsque les fruits provenaient du jardin, un effet inverse a été observé : la consommation de fruits provenant du jardin était associée à une diminution des niveaux d'imprégnation par l'oxychlordane et par le trans-nonachlore. Ainsi la consommation de viande ou de fruits en provenance du jardin, du propre élevage des participants ou en provenance de l'agriculture biologique, était associée à une diminution des niveaux d'imprégnation par certains organochlorés. Le fait de consommer des produits biologiques était également associé à une faible concentration sérique en OCS. A contrario, le fait de consommer des œufs provenant du jardin ou d'un élevage propre étaient un déterminant de l'imprégnation par les OCS. Peu d'études se sont intéressées à la provenance des aliments (jardin/propre élevage ou biologique). Elles concernent principalement des populations particulières, telles que des femmes primipares belges [20], des familles de fermes laitières [103] ou des habitants de régions industrielles [99]. Les résultats de ces études ont mis en évidence que la consommation des produits provenant d'une culture ou d'un élevage propre

(notamment les œufs et la viande de bœuf), était associée à une augmentation de l'imprégnation par certains organochlorés spécifiques, en raison de la contamination probable des sols au niveau local et d'une auto-production d'aliments non contrôlés.

La composition des aliments (proportion de matières grasses dans les laitages) et de leur provenance (jardin / propre élevage / biologique) semblent nécessaires à considérer si l'on souhaite préciser les résultats des déterminants alimentaires pour les OCS.

6.3.3 Déterminants géographiques

Notre étude n'a pas mis en évidence de lien entre l'indicateur de proximité géographiques aux zones agricoles et l'imprégnation par les OCS. Cet indicateur géographique a l'avantage de prendre en compte différents paramètres mesurant les surfaces agricoles en 1970 homologuées pour les OCS au niveau cantonal et les parts de surfaces agricoles dans un rayon de 500 mètres autour des habitations. Cependant cet indicateur présente plusieurs limites, dont voici les principales :

- Certaines données sont anciennes et donc peu précises. Il s'agit notamment des photos aériennes prises entre 1950 et 1965, permettant d'évaluer la part des surfaces agricoles à 500 mètres autour des habitats des participants d'Esteban.
- Bien que l'homologation des cultures pour les OCS soit connue, la quantité de pesticides épandues sur les cultures n'est pas référencé. Ainsi la quantité réelle de pesticides dans les sols n'a pas pu être prise en compte pour l'évaluation de l'exposition.
- Les surfaces agricoles sont référencées en fonction du canton où est située l'adresse de l'exploitant, ce qui implique un biais de classement potentiel.

Ainsi, bien que cet indicateur avait pour but d'évaluer les expositions agricoles en fonction des anciens usages de pesticides OCS, les limites précédemment citées nous incitent à évaluer avec précaution les résultats obtenus. L'ensemble des avantages et limites de l'indicateur géographique est détaillé en annexe 2.

D'autres déterminants géographiques, tels que le fait de résider en quartier périphérique ou de posséder une pelouse étaient associés à l'imprégnation par certains OCS, ce qui peut s'expliquer par la contamination des terres par les OCS, en raison des usages agricoles ou domestiques. En effet, les quartiers périphériques sont construits dans une grande majorité des cas, sur d'anciennes terres agricoles, potentiellement contaminées. Aussi, les pelouses peuvent avoir fait l'objet d'anciens traitements par des pesticides OCS. Enfin, les souterrains des habitats ont pu être traités par les OCS (lutte contre les termites souterrains). Ainsi, l'exposition aux OCS pourraient s'effectuer dans les quartiers périphériques et à partir des pelouses, notamment par inhalation des OCS remobilisés à partir des sols [40, 41, 43], par contact direct avec la terre contaminée, ou encore par ingestion d'aliments contaminés (les OCS étant très stables dans les sols riches en matières organiques).

La remobilisation des pesticides OC à partir du sol, peut être augmentée en cas de travail de la terre ou lorsque les températures extérieures sont élevées (notamment en période estivale) [40]. L'étude de l'Anses [39] explorant les pesticides dans l'air ambiant en France a mis en évidence des niveaux élevés de lindane dans l'air, alors que ce pesticide est interdit aujourd'hui. Cela confirme l'exposition aérienne possible de certains OCS, via la remobilisation à partir du sol. D'autres études ont également mis en évidence un gradient urbain-rural [43] et une corrélation entre la concentration en DDT mesurée dans l'air et celle mesurée dans le sol dans les zones récréatives urbaines [41].

6.3.4 Déterminants domestiques

L'étude Esteban met en évidence une augmentation des niveaux d'imprégnation par certains OCS lors d'utilisation de répulsifs corporels. Bien que les pesticides OCS soient interdits, il est possible que les habitats soient imprégnés par ces molécules anciennement pulvérisés. En raison de leur

résistance dans l'environnement et des conditions faibles de dégradation dans un milieu intérieur (faible photolyse), ces molécules persistent dans les habitats et exposent leurs résidents.

Aussi, les participants qui possédaient des plantes intérieures avaient tendance à avoir des niveaux d'imprégnation plus élevés par les OCS. L'information au sujet de l'utilisation des pesticides sur les plantes intérieures n'est pas interprétable en raison du faible effectif des personnes déclarant utiliser des pesticides.

L'exposition à l'intérieur des habitats est considérée par la littérature comme un déterminant de l'imprégnation par les OCS. Différentes études ont mis en évidence des concentrations en OCS dans l'air et dans les poussières au domicile [31, 104]. Les mesures de DDT et ses isomères dans l'air et dans les poussières des habitations canadiennes et tchèques, ont mis en évidence que les niveaux étaient beaucoup plus élevés dans l'air intérieur que dans l'air extérieur, et que les concentrations en DDT étaient plus élevées dans des bâtiments anciens que dans des bâtiments construits plus récemment [31]. Ainsi la mesure des OCS dans les poussières domestiques permet de quantifier l'exposition au long terme dans les habitats [38]. La contamination de ces habitats peut provenir de la remobilisation de ces substances à partir du bois traité ou à partir de matériaux de constructions ou de rénovations. L'association entre ces niveaux mesurés dans l'environnement et les concentrations sériques des résidents a été mis en évidence dans une étude, notamment pour le pp'-DDT et le pp'-DDE [38]. Les résultats Esteban sur la fréquence d'aération des habitats au printemps et en été confirment également l'importance de l'exposition par l'air intérieur : le fait d'aérer moins souvent (tous les jours, une à deux fois versus tous les jours, plus de deux fois) a tendance à influencer à la hausse les niveaux d'imprégnation par certains OCS. Cela signifie qu'un renouvellement fréquent de l'air intérieur pourrait diminuer les niveaux d'imprégnation par certains OCS.

Ainsi l'inhalation des OCS via les poussières domestiques et l'air intérieur semble être un des déterminants de l'imprégnation par les pesticides OCS.

6.3.5 Déterminants professionnels

Comme décrit dans ENNS, la manipulation de matériaux anciennement contaminés par les OCS, favorise leurs remobilisations et expose les professionnels à ces substances par inhalation, par ingestion ou par contact. Dans Esteban, les niveaux d'imprégnation plus élevés par les OCS parmi les personnes en contact avec ces matériaux, résulte de la grande persistance des OCS dans le sol agricole et le bois traité. Ainsi les personnes qui travaillent dans les domaines ci-après, sont susceptibles d'être plus exposés à certains OCS :

- Agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides,
- Arboriculture,
- Cultures céréalières,
- En tant que fleuriste,
- Jardinier, pépinière,
- Maraîchage,
- Autre agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides,
- Production de pesticides,
- Traitement du bois, usinage de bois traités.

De nombreuses études mettent également en évidence ces associations [55, 56]. Elles ont pu montrer que les professionnels en contact avec les pesticides organochlorés, comme les applicateurs, les agriculteurs ou ceux travaillant dans des industries de pesticides, avaient un risque accru de développer des pathologies, comparativement à la population générale.

7. VALEURS DE RÉFÉRENCE D'EXPOSITION (VRE) DES ORGANOCHLORÉS SPÉCIFIQUES ET DES CHLOROPHÉNOLS, À PARTIR DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE ESTEBAN

7.1 Méthodologie

D'une manière générale, la valeur de référence d'exposition (VRE) renseigne sur un niveau particulier d'imprégnation de la population générale française (population de référence) au-delà duquel on peut vraisemblablement considérer l'imprégnation comme anormalement élevée. Les VRE ne renseignent pas sur un quelconque effet sanitaire et ne doivent pas être confondues avec les valeurs limites biologiques d'imprégnation. La VRE établie à partir des données d'exposition permet de comparer les résultats mesurés chez un individu ou un sous-groupe de population par rapport à l'imprégnation de la population de référence. Ainsi, il est possible d'identifier des individus surexposés par rapport à la population de référence. En France, les seules VRE existantes pour la population générale sont celles produites à partir des résultats de l'étude ENNS en 2006-2007. L'étude Esteban, réalisée en 2014-2016, fournit pour la première fois des VRE pour 8 substances de pesticides OCS chez l'adulte. La multiplicité des méthodes disponibles pour produire des VRE a conduit Santé publique France à définir et publier une stratégie nationale de production des VRE [105, 106].

La méthode de production des VRE françaises a été inspirée des travaux de la Commission allemande de biosurveillance [65]. C'est donc la valeur arrondie du percentile 95, comprise dans l'intervalle de confiance à 95%, qui a été choisie.

7.2 Valeurs de références à partir des données de l'étude Esteban

En raison du faible effectif de l'échantillon d'enfants et de la non-représentativité de ce dernier, nous ne pouvons pas établir des valeurs de références pour les organochlorés chez l'enfant. Chez l'adulte, les résultats de notre étude nous montrent que les niveaux d'imprégnation par les OCS varient avec l'âge, ce qui nous amène à construire des VRE par classes d'âges, (tout en préservant des effectifs assez grands au sein des classes). Concernant les chlorophénols, seul le PCP était assez quantifié permettant d'établir une valeur de référence chez l'ensemble des adultes. L'ensemble des VRE sont présentées dans le tableau 18.

Les seules valeurs de références établies à l'étranger proviennent d'une enquête canadienne (2007-2009) [62] et d'une enquête allemande (1997-1999) [63, 64] (tableau 19).

On observe que les VRE du pp'-DDE définies suite à l'enquête Esteban sont inférieures aux VRE des 2 enquêtes canadiennes et allemandes. La VRE française du β -HCH pour la classe d'âge 18-45 ans est inférieure aux VRE allemandes pour les classes d'âges entre 20 et 49 ans. Cependant, la VRE française du β -HCH pour la classe d'âge 45-74 ans est similaire aux VRE allemandes pour les classes d'âges 50-59 ans et 60-69 ans. Les VRE françaises pour l'oxychlorane sont similaires aux VRE canadiennes pour chacune des classes d'âges. Les VRE françaises du trans-nonachlore sont inférieures aux VRE canadiennes pour les différentes classes d'âges. Concernant le PCP, on observe que la VRE est bien plus faible dans l'étude Esteban que la VRE publiée dans la commission allemande (1997-1999).

Tableau 19. Valeurs de références d'exposition chez les adultes à partir des niveaux d'imprégnation par les organochlorés spécifiques (ng L⁻¹) et les chlorophénols (µg L⁻¹)

Biomarqueurs	Effectifs	Classes d'âge	P95	IC à 95%	VRE95
Organochlorés spécifiques (ng L⁻¹)					
pp'DDT	523	18-59	34,28	[26,38; 43,88]	34
	236	60-74	55,03	[46,52; 64,32]	55
pp'DDE	248	18-44	1 190,40	[739,78 ; 1 987,62]	1 190
	511	45-74	3 113,70	[2 336,52; 3 725,81]	3 114
β-HCH	248	18-44	127,45	[102,77; 165,61]	127
	511	45-74	799,51	[638,52; 959,67]	800
γ-HCH ou Lindane	248	18-44	17,44	[14,51; 20,81]	17
	511	45-74	32,18	[23,49; 55,34]	32
Oxychlordane	248	18-44	32,26	[25,64; 43,03]	32
	275	45-59	69,62	[57,61; 85,30]	70
	236	60-74	113,48	[90,52; 153,34]	113
Cis-nonachlore	248	18-44	7,21	[4,95; 9,96]	7
	511	45-74	16,17	[14,02; 17,46]	16
Trans-nonachlore	248	18-44	31,61	[24,05; 39,03]	32
	511	45-74	77,86	[65,07; 92,34]	78
Cis-Heptachlore epoxyde	248	18-44	31,60	[27,46; 37,77]	32
	511	45-74	72,66	[60,98; 86,31]	73
Dieldrine	248	18-44	49,56	[37,22; 57,85]	50
	511	45-74	103,00	[78,08; 123,17]	103
Mirex	248	18-44	6,08	[5,04; 6,79]	6
	511	45-74	17,87	[14,60; 20,59]	18
Chlorophénols (µg L⁻¹)					
PCP	900	18-74	0,23	[0,19; 0,28]	0,23

Tableau 20. Comparaison des valeurs de références Esteban chez les adultes avec ceux de l'enquête canadienne et ceux de la commission allemande

Biomarqueurs	Étude Esteban 2014 - 2016		Enquête canadienne		Commission allemande	
	Sérum - VRE95 en µg L ⁻¹		2007 – 2009 [62]		1997 - 1999 [63, 64]	
			Plasma - VRE95 en µg L ⁻¹		Sang total- VRE95 en µg L ⁻¹	
Pp'-DDE	18-44 ans	1,190	20-39 ans	NA	20-29 ans	2
	45-70 ans	3,114	40-59 ans	5,5	30-39 ans	4
			60-79 ans	9,1	40-49 ans	7
					50-59 ans	8
					60-69 ans	11
β-HCH	18-44 ans	0,127	Total	0,33	20-29 ans	0,3
	45-74 ans	0,799			30-39 ans	0,3
					40-49 ans	0,3
					50-59 ans	0,5
					60-69 ans	0,9
Oxychlordane	18-44 ans	0,032	20-39 ans	0,036		
	45-59 ans	0,070	40-59 ans	0,074		
	60-74 ans	0,113	60-79 ans	0,14		
Trans-nonachlore	18-44 ans	0,032	20-39 ans	0,054		
	45-74 ans	0,078	40-59 ans	0,11		
			60-70 ans	0,22		
PCP	18-74 ans	0,230			20-69 ans	5

CONCLUSION

Les pesticides organochlorés sont lipophiles, stables et sont soumis à un processus de bioaccumulation. La présente étude a décrit pour la première fois les niveaux d'imprégnation par certains organochlorés spécifiques et par les chlorophénols chez les enfants, dont les niveaux étaient plus faibles que dans d'autres études étrangères réalisées à des dates antérieures. Chez les adultes, les OCS bien quantifiés (pp'DDE, le β -HCH, l'oxychlorane, le trans-nonachlore, l'heptachlore et la dieldrine) étaient des métabolites ou des substances mères de pesticides largement utilisés historiquement. Leurs niveaux d'imprégnation avaient nettement diminué comparativement à l'enquête ENNS (2006-2007), notamment en raison de la législation sur les OC, interdisant progressivement l'utilisation et la production des OC en France, en Europe et au niveau international entre les années 1978 et aujourd'hui. Parmi l'ensemble des biomarqueurs étudiés, le pp'-DDE et le β -HCH étaient ceux dont les concentrations sériques étaient les plus élevées. L'ensemble des OC quantifiés avaient des niveaux d'imprégnation plus bas par rapport aux études étrangères réalisées précédemment, sauf pour le β -HCH, dont les niveaux étaient similaires ou plus élevés dans notre étude que dans les enquêtes étrangères. Ainsi, il semblerait essentiel de continuer à mesurer les niveaux d'imprégnation par le pp'-DDE et le β -HCH lors de prochaines enquêtes de biosurveillance en population générale, afin de surveiller leurs évolutions au cours du temps, notamment en raison d'effets sanitaires carcinogènes avérés (lindane), probable (DDT) ou possible (β -HCH).

Les niveaux d'imprégnation des organochlorés sont très associés à l'âge et à l'IMC. La consommation de matières grasses, d'œufs et de poissons semblent être des déterminants potentiels d'imprégnation par les OCS. La provenance de l'aliment (issu du jardin/propres élevages ou de l'agriculture biologique) pourrait nous informer davantage sur les déterminants des niveaux d'imprégnation par les organochlorés. L'exposition domestique par les poussières de l'air intérieur, serait également un déterminant d'exposition, notamment si les habitats sont anciennement contaminés. Aussi, l'exposition professionnelle est très associée à l'augmentation des pesticides organochlorés, en raison de la rémanence de ces derniers ainsi que de leur remobilisation à partir du sol lors du travail de la terre. Il est prouvé que l'exposition des travailleurs aux OCS a des effets importants sur leur santé, avec un risque probable de développer un cancer (lymphome non Hodgkinien, leucémie...), de perturber les fonctions neurologiques ou métaboliques, ou d'être un perturbateur endocrinien. Il paraît donc évident de protéger au mieux ces travailleurs dans leurs métiers, notamment par un suivi médical rapproché, afin de tenir compte de leur exposition quotidienne à des substances rémanentes, ubiquitaires et cancérigènes.

Bien qu'interdites, ces substances étant très stables dans les sols, elles continuent de jouer un rôle préoccupant pour la santé de la population. Leurs surveillances méritent d'être poursuivies, notamment en continuant d'évaluer les niveaux d'imprégnation et en poursuivant les recherches sur les déterminants.

Références bibliographiques

1. Fréry N GL, Saoudi A, Garnier R, Zeghnoun A, Bidondo ML. Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement Tome2 - Polychlorobiphényles (PCB-NDL) et pesticides. 2013 [Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/rapport-synthese/exposition-de-la-population-francaise-aux-substances-chimiques-de-l-environnement.-tome-2-polychlorobiphenyles-pcb-ndl.-pesticides>].
2. Saoudi A, Frery N, Zeghnoun A, Bidondo ML, Deschamps V, Goen T, et al. Serum levels of organochlorine pesticides in the French adult population: the French National Nutrition and Health Study (ENNS), 2006-2007. *Sci Total Environ*. 2014;472:1089-99.
3. Anses. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2). Tome 2 : résidus de pesticides, additifs, acrylamide, hydrocarbures aromatiques polycycliques. 2011 [2011: 405 p.:[Available from: <http://www.anses.fr/Documents/PASER2006sa0361Ra2.pdf>].
4. Balicco A, Oleko, A., Szego, E., Boschat, L., Deschamps, V., Saoudi, A., Zeghnoun, A., Fillol, C. Protocole Esteban: une Étude transversale de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (2014–2016) [Esteban design: a cross-sectional health survey about environment, biomonitoring, physical activity and nutrition (2014—2016)]. *Toxicol Anal Clin*. 2017;29:517-37.
5. Mrema EJ, Rubino FM, Brambilla G, Moretto A, Tsatsakis AM, Colosio C. Persistent organochlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity. *Toxicology*. 2013;307:74-88.
6. Jones KC, de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. *Environ Pollut*. 1999;100(1-3):209-21.
7. WHO. La toxicité des pesticides pour l'homme - Douzième rapport du comité d'experts des insecticides. 1962;n°227.
8. Nations_Unis. Protocole Aarhus - Convention sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement. 1998.
9. Stockholm_Convention. Persistent Organic Pollutants (POPs) [Available from: <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/tabid/673/Default.aspx>].
10. Smith AG, Gangolli SD. Organochlorine chemicals in seafood: occurrence and health concerns. *Food Chem Toxicol*. 2002;40(6):767-79.
11. Glynn AW, Granath F, Aune M, Atuma S, Darnerud PO, Bjerselius R, et al. Organochlorines in Swedish women: determinants of serum concentrations. *Environ Health Perspect*. 2003;111(3):349-55.
12. Ibarluzea J, Alvarez-Pedrerol M, Guxens M, Marina LS, Basterrechea M, Lertxundi A, et al. Sociodemographic, reproductive and dietary predictors of organochlorine compounds levels in pregnant women in Spain. *Chemosphere*. 2011;82(1):114-20.
13. Arrebola JP, Castano A, Esteban M, Bartolome M, Perez-Gomez B, Ramos JJ, et al. Differential contribution of animal and vegetable food items on persistent organic pollutant serum concentrations in Spanish adults. Data from BIOAMBIENT.ES project. *Sci Total Environ*. 2018;634:235-42.
14. Brauner EV, Raaschou-Nielsen O, Gaudreau E, Leblanc A, Tjonneland A, Overvad K, et al. Predictors of adipose tissue concentrations of organochlorine pesticides in a general Danish population. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2012;22(1):52-9.
15. Gonzalez-Alzaga B, Lacasana M, Hernandez AF, Arrebola JP, Lopez-Flores I, Artacho-Cordon F, et al. Serum concentrations of organochlorine compounds and predictors of exposure in children living in agricultural communities from South-Eastern Spain. *Environ Pollut*. 2018;237:685-94.
16. Harmouche-Karaki M, Mahfouz Y, Salameh P, Matta J, Helou K, Narbonne JF. Patterns of PCBs and OCPs exposure in a sample of Lebanese adults: The role of diet and physical activity. *Environ Res*. 2019;179(Pt B):108789.

17. Mariscal-Arcas M, Lopez-Martinez C, Granada A, Olea N, Lorenzo-Tovar ML, Olea-Serrano F. Organochlorine pesticides in umbilical cord blood serum of women from Southern Spain and adherence to the Mediterranean diet. *Food Chem Toxicol.* 2010;48(5):1311-5.
18. McGraw JE, Waller DP. Fish ingestion and congener specific polychlorinated biphenyl and p,p'-dichlorodiphenyldichloroethylene serum concentrations in a great lakes cohort of pregnant African American women. *Environ Int.* 2009;35(3):557-65.
19. Rivas A, Cerrillo I, Granada A, Mariscal-Arcas M, Olea-Serrano F. Pesticide exposure of two age groups of women and its relationship with their diet. *Sci Total Environ.* 2007;382(1):14-21.
20. Aerts R, Van Overmeire I, Colles A, Andjelkovic M, Malarvannan G, Poma G, et al. Determinants of persistent organic pollutant (POP) concentrations in human breast milk of a cross-sectional sample of primiparous mothers in Belgium. *Environ Int.* 2019;131:104979.
21. Cao LL, Yan CH, Yu XD, Tian Y, Zhao L, Liu JX, et al. Relationship between serum concentrations of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides and dietary habits of pregnant women in Shanghai. *Sci Total Environ.* 2011;409(16):2997-3002.
22. Gasull M, Bosch de Basea M, Puigdomenech E, Pumarega J, Porta M. Empirical analyses of the influence of diet on human concentrations of persistent organic pollutants: a systematic review of all studies conducted in Spain. *Environ Int.* 2011;37(7):1226-35.
23. Harmouche-Karaki M, Matta J, Helou K, Mahfouz Y, Fakhoury-Sayegh N, Narbonne JF. Serum concentrations of selected organochlorine pesticides in a Lebanese population and their associations to sociodemographic, anthropometric and dietary factors: ENASB study. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018;25(15):14350-60.
24. Kim JT, Kang JH, Chang YS, Lee DH, Choi SD. Determinants of serum organochlorine pesticide and polychlorinated biphenyl levels in middle-aged Korean adults. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018;25(1):249-59.
25. Lee S-A, Dai Q, Zheng W, Gao Y-T, Blair A, Tessari JD, et al. Association of serum concentration of organochlorine pesticides with dietary intake and other lifestyle factors among urban Chinese women. *Environment international.* 2007;33(2):157-63.
26. Llop S, Ballester F, Vizcaino E, Murcia M, Lopez-Espinosa MJ, Rebagliato M, et al. Concentrations and determinants of organochlorine levels among pregnant women in Eastern Spain. *Sci Total Environ.* 2010;408(23):5758-67.
27. Henríquez-Hernández LA, Luzardo OP, Zumbado M, Serra-Majem L, Valerón PF, Camacho M, et al. Determinants of increasing serum POPs in a population at high risk for cardiovascular disease. Results from the PREDIMED-CANARIAS study. *Environmental research.* 2017;156:477-84.
28. Gascon M, Vrijheid M, Garí M, Fort M, Grimalt JO, Martinez D, et al. Temporal trends in concentrations and total serum burdens of organochlorine compounds from birth until adolescence and the role of breastfeeding. *Environment international.* 2015;74:144-51.
29. Caspersen IH, Kvalheim HE, Haugen M, Brantsaeter AL, Meltzer HM, Alexander J, et al. Determinants of plasma PCB, brominated flame retardants, and organochlorine pesticides in pregnant women and 3 year old children in The Norwegian Mother and Child Cohort Study. *Environ Res.* 2016;146:136-44.
30. Ribas-Fito N, Grimalt JO, Marco E, Sala M, Mazon C, Sunyer J. Breastfeeding and concentrations of HCB and p,p'-DDE at the age of 1 year. *Environ Res.* 2005;98(1):8-13.
31. Audy O, Melymuk L, Venier M, Vojta S, Becanova J, Romanak K, et al. PCBs and organochlorine pesticides in indoor environments - A comparison of indoor contamination in Canada and Czech Republic. *Chemosphere.* 2018;206:622-31.
32. Booij P, Holoubek I, Klanova J, Kohoutek J, Dvorska A, Magulova K, et al. Current implications of past DDT indoor spraying in Oman. *Sci Total Environ.* 2016;550:231-40.

33. Chandra Yadav I, Devi NL, Li J, Zhang G. Examining the role of total organic carbon and black carbon in the fate of legacy persistent organic pollutants (POPs) in indoor dust from Nepal: Implication on human health. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;175:225-35.
34. Holt E, Audy O, Booij P, Melymuk L, Prokes R, Klanova J. Organochlorine pesticides in the indoor air of a theatre and museum in the Czech Republic: Inhalation exposure and cancer risk. *Sci Total Environ.* 2017;609:598-606.
35. Bouvier G, Blanchard O, Momas I, Seta N. Pesticide exposure of non-occupationally exposed subjects compared to some occupational exposure: a French pilot study. *Sci Total Environ.* 2006;366(1):74-91.
36. Anses. Recommandations et perspectives pour une surveillance nationale de la contamination de l'air par les pesticides 2010 [Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ORP-Ra-2010AirPesticide.pdf>].
37. Dirtu AC, Ali N, Van den Eede N, Neels H, Covaci A. Country specific comparison for profile of chlorinated, brominated and phosphate organic contaminants in indoor dust. Case study for Eastern Romania, 2010. *Environ Int.* 2012;49:1-8.
38. Gaspar FW, Chevrier J, Bornman R, Crause M, Obida M, Barr DB, et al. Undisturbed dust as a metric of long-term indoor insecticide exposure: Residential DDT contamination from indoor residual spraying and its association with serum levels in the VHEMBE cohort. *Environ Int.* 2015;85:163-7.
39. Anses. Campagne nationale exploratoire des pesticides dans l'air ambiant. 2020.
40. Scheyer A, Graeff C, Morville S, Mirabel P, Millet M. Analysis of some organochlorine pesticides in an urban atmosphere (Strasbourg, east of France). *Chemosphere.* 2005;58(11):1517-24.
41. Skrbic BD, Marinkovic V. Occurrence, seasonal variety of organochlorine compounds in street dust of Novi Sad, Serbia, and its implication for risk assessment. *Sci Total Environ.* 2019;662:895-902.
42. Teil MJ, Blanchard M, Chevreuil M. Atmospheric deposition of organochlorines (PCBs and pesticides) in northern France. *Chemosphere.* 2004;55(4):501-14.
43. Harner T, Shoeib M, Diamond M, Stern G, Rosenberg B. Using passive air samplers to assess urban-rural trends for persistent organic pollutants. 1. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides. *Environmental science & technology.* 2004;38(17):4474-83.
44. Wang C, Wang X, Gong P, Yao T. Long-term trends of atmospheric organochlorine pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons over the southeastern Tibetan Plateau. *Sci Total Environ.* 2018;624:241-9.
45. Zhang W, Ye Y, Hu D, Ou L, Wang X. Characteristics and transport of organochlorine pesticides in urban environment: air, dust, rain, canopy throughfall, and runoff. *J Environ Monit.* 2010;12(11):2153-60.
46. Kirman CR, Aylward LL, Hays SM, Krishnan K, Nong A. Biomonitoring equivalents for DDT/DDE. *Regul Toxicol Pharmacol.* 2011;60(2):172-80.
47. Smith D. Worldwide trends in DDT levels in human breast milk. *Int J Epidemiol.* 1999;28(2):179-88.
48. ATSDR. Toxicological Profile for DDT, DDE, and DDD Atlanta,GA2019 [Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp35.pdf>].
49. Uhl S, Schmid P, Schlatter C. Pharmacokinetics of pentachlorophenol in man. *Arch Toxicol.* 1986;58(3):182-6.
50. Ineris. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : 2,4,5 trichlorophénol. 2005.

51. Chávez-Almazán LA, Saldarriaga-Noreña HA, Díaz-González L, Garibo-Ruiz D, Waliszewski SM. Dietary habits associated with the presence of organochlorine pesticides in human milk. *J Environ Sci Health B*. 2020;55(8):756-66.
52. Karami-Mohajeri S, Abdollahi M. Toxic influence of organophosphate, carbamate, and organochlorine pesticides on cellular metabolism of lipids, proteins, and carbohydrates: a systematic review. *Hum Exp Toxicol*. 2011;30(9):1119-40.
53. Saeedi Saravi SS, Dehpour AR. Potential role of organochlorine pesticides in the pathogenesis of neurodevelopmental, neurodegenerative, and neurobehavioral disorders: A review. *Life Sci*. 2016;145:255-64.
54. IARC. Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. 2020.
55. Inserm. Pesticides, effets sur la santé. 2013 [Available from: <http://www.ipubli.inserm.fr/handle/10608/4819>].
56. Inserm. Pesticides et effets sur le santé. 2021.
57. Gulden M, Morchel S, Tahan S, Seibert H. Impact of protein binding on the availability and cytotoxic potency of organochlorine pesticides and chlorophenols in vitro. *Toxicology*. 2002;175(1-3):201-13.
58. Yordy JE, Pabst DA, McLellan WA, Wells RS, Rowles TK, Kucklick JR. Tissue-specific distribution and whole-body burden estimates of persistent organic pollutants in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). *Environ Toxicol Chem*. 2010;29(6):1263-73.
59. You L, Gazi E, Archibeque-Engle S, Casanova M, Conolly RB, Heck HA. Transplacental and lactational transfer of p,p'-DDE in Sprague-Dawley rats. *Toxicol Appl Pharmacol*. 1999;157(2):134-44.
60. Genus SJ, Lane K, Birkholz D. Human Elimination of Organochlorine Pesticides: Blood, Urine, and Sweat Study. *Biomed Res Int*. 2016;2016:1624643-.
61. Müller MHB, Polder A, Brynildsrud OB, Grønnestad R, Karimi M, Lie E, et al. Prenatal exposure to persistent organic pollutants in Northern Tanzania and their distribution between breast milk, maternal blood, placenta and cord blood. *Environmental research*. 2019;170:433-42.
62. Haines DA, Khoury C, Saravanabhavan G, Werry K, Walker M, Malowany M. Human biomonitoring reference values derived for persistent organic pollutants in blood plasma from the Canadian Health Measures Survey 2007-2011. *Int J Hyg Environ Health*. 2017;220(4):744-56.
63. Schulz C, Wilhelm M, Heudorf U, Kolossa-Gehring M, Human Biomonitoring Commission of the German Federal Environment A. Update of the reference and HBM values derived by the German Human Biomonitoring Commission. *Int J Hyg Environ Health*. 2011;215(1):26-35.
64. Wilhelm M, Ewers U, Schulz C. Revised and new reference values for some persistent organic pollutants (POPs) in blood for human biomonitoring in environmental medicine. *Int J Hyg Environ Health*. 2003;206(3):223-9.
65. Schulz C, Angerer J, Ewers U, Kolossa-Gehring M. The German Human Biomonitoring Commission. *Int J Hyg Environ Health*. 2007;210(3-4):373-82.
66. Akins JR, Waldrep K, Bernert JT, Jr. The estimation of total serum lipids by a completely enzymatic 'summation' method. *Clin Chim Acta*. 1989;184(3):219-26.
67. Haziza D, Beaumont J-F. On the Construction of Imputation Classes in Surveys. *International Statistical Review*. 2007;75:25-43
68. Royston P, White I. Multiple imputation by chained equations (MICE): Implementation in Stata. *Journal of Statistical Software*. 2011;45:1-20.
69. Hornung R, Reed L. Estimation of Average Concentration in the Presence of Nondetectable Values. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 1990;5(1):46-51.
70. Little RJA, Rubin DB. Statistical analysis with missing data. 2 ed. New York: Wiley Series in Probability and Statistics; 2002.

71. StataCorp. Stata Statistical Software : Release 14. College Station, TX: StataCorp LP. . 2015.
72. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna Australia 2017.
73. Becker K, Müssig-Zufika M, Conrad A, Lüdecke A, Schulz C, Seiwert M, et al. German Environmental Survey for Children 2003/06 - GerES IV. Human Biomonitoring. Levels of selected substances in blood and urine of children in Germany. [En ligne]. Berlin: Federal Environment Agency; 2008.
74. Bandow N, Conrad A, Kolossa-Gehring M, Murawski A, Sawal G. Polychlorinated biphenyls (PCB) and organochlorine pesticides (OCP) in blood plasma - Results of the German environmental survey for children and adolescents 2014-2017 (GerES V). International journal of hygiene and environmental health. 2020;224:113426-.
75. Casas L, Fernandez MF, Llop S, Guxens M, Ballester F, Olea N, et al. Urinary concentrations of phthalates and phenols in a population of Spanish pregnant women and children. Environ Int. 2011;37(5):858-66.
76. Frederiksen H, Aksglaede L, Sorensen K, Nielsen O, Main KM, Skakkebaek NE, et al. Bisphenol A and other phenols in urine from Danish children and adolescents analyzed by isotope diluted TurboFlow-LC-MS/MS. Int J Hyg Environ Health. 2013;216(6):710-20.
77. ECMS. Second Report on Human Biomonitoring of Environmental Chemicals in Canada. Résultats de l'Enquête canadienne sur les mesures de la santé Cycle 2 (2009 à 2011): Santé Canada; 2013 [Available from: www.santecanada.gc.ca/biosurveillance].
78. CDC. Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals, Updated Tables,. Atlanta: National Center for Environmental Health; 2019.
79. Dereumeaux C, Abdesattar S, Oleko A, Pecheux M, Vandentorren S, Fillol C, et al. Surveillance biologique de l'exposition des femmes enceintes françaises aux polluants de l'environnement : résultats du volet périnatal du programme national de biosurveillance mis en œuvre au sein de la cohorte Elfe. Toxicologie Analytique et Clinique. 2017.
80. Dereumeaux C, Saoudi A. Imprégnation de la population antillaise par la chlordécone et certains composés organochlorés en 2013/2014. Étude Kannari. Saint-Maurice : Santé publique France. 2018.
81. Becker K, Schulz C, Kaus S, Seiwert M, Seifert B. German Environmental Survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in the urine of the German population. Int J Hyg Environ Health. 2003;206(1):15-24.
82. Becker K, Kaus S, Krause C, Lepom P, Schulz C, Seiwert M, et al. German Environmental Survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in blood of the German population. Int J Hyg Environ Health. 2002;205(4):297-308.
83. ECMS. Rapport sur la biosurveillance humaine des substances chimiques de l'environnement au Canada Résultats de l'Enquête canadienne sur les mesures de la santé Cycle 1 (2007 à 2009). Santé Canada; 2010.
84. Park H, Kim K. Concentrations of 2,4-Dichlorophenol and 2,5-Dichlorophenol in Urine of Korean Adults. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(4).
85. Ineris. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : DDT, 17 p. 2007.
86. Heinisch E, Jonas K, Klein S. HCH isomers in soil and vegetation from the surroundings of an industrial landfill of the former GDR, 1971–1989. Science of The Total Environment. 1993;134:151-9.
87. Ashizawa A, Dorsey A, Wilson JD. Toxicological profile for alpha-, beta-, gamma, and delta-hexachlorocyclohexane. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2005.
88. Nations_Unis. Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants - quatrième réunion. 2009.

89. Vijgen J, Li Y-F, Forter M, Lal R, Weber R. The legacy of lindane and technical HCH production. *Organohalog Comp.* 2005;68.
90. Vijgen J, Abhilash PC, Li YF, Lal R, Forter M, Torres J, et al. Hexachlorocyclohexane (HCH) as new Stockholm Convention POPs--a global perspective on the management of Lindane and its waste isomers. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2011;18(2):152-62.
91. Ineris. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Hexachlorocyclohexane, 22p. 2007.
92. Juc L. Étude des risques liés à l'utilisation des pesticides organochlorés et impact sur l'environnement et la santé humaine. Université Claude Bernard - Lyon I, 2007. Français. tel-00330431 2008.
93. Hardell E, Carlberg M, Nordström M, van Bavel B. Time trends of persistent organic pollutants in Sweden during 1993-2007 and relation to age, gender, body mass index, breast-feeding and parity. *Sci Total Environ.* 2010;408(20):4412-9.
94. Arrebola JP, Ocana-Riola R, Arrebola-Moreno AL, Fernandez-Rodriguez M, Martin-Olmedo P, Fernandez MF, et al. Associations of accumulated exposure to persistent organic pollutants with serum lipids and obesity in an adult cohort from Southern Spain. *Environ Pollut.* 2014;195:9-15.
95. La Merrill M, Emond C, Kim MJ, Antignac JP, Le Bizec B, Clement K, et al. Toxicological function of adipose tissue: focus on persistent organic pollutants. *Environ Health Perspect.* 2013;121(2):162-9.
96. Chevrier J, Dewailly E, Ayotte P, Mauriege P, Despres JP, Tremblay A. Body weight loss increases plasma and adipose tissue concentrations of potentially toxic pollutants in obese individuals. *Int J Obes Relat Metab Disord.* 2000;24(10):1272-8.
97. Hue O, Marcotte J, Berrigan F, Simoneau M, Dore J, Marceau P, et al. Increased plasma levels of toxic pollutants accompanying weight loss induced by hypocaloric diet or by bariatric surgery. *Obes Surg.* 2006;16(9):1145-54.
98. Brown RH, Ng DK, Steele K, Schweitzer M, Groopman JD. Mobilization of Environmental Toxicants Following Bariatric Surgery. *Obesity (Silver Spring).* 2019;27(11):1865-73.
99. Narduzzi S, Fantini F, Blasetti F, Rantakokko P, Kiviranta H, Forastiere F, et al. Predictors of Beta-Hexachlorocyclohexane blood levels among people living close to a chemical plant and an illegal dumping site. *Environ Health.* 2020;19(1):9.
100. Boada LD, Sangil M, Alvarez-León EE, Hernández-Rodríguez G, Henríquez-Hernández LA, Camacho M, et al. Consumption of foods of animal origin as determinant of contamination by organochlorine pesticides and polychlorobiphenyls: results from a population-based study in Spain. *Chemosphere.* 2014;114:121-8.
101. Pandit GG, Sharma S, Srivastava PK, Sahu SK. Persistent organochlorine pesticide residues in milk and dairy products in India. *Food Addit Contam.* 2002;19(2):153-7.
102. Pietrzak-Fiećko R. Relationship Between the Content of Chlorinated Hydrocarbons and Fatty Acid Composition of Milk Fat. *J Vet Res.* 2018;62(1):71-8.
103. Stehr-Green PA, Farrar JA, Burse VW, Royce WG, Wohlleb JC. A survey of measured levels and dietary sources of selected organochlorine pesticide residues and metabolites in human sera from a rural population. *Am J Public Health.* 1988;78(7):828-30.
104. Tan J, Cheng SM, Loganath A, Chong YS, Obbard JP. Selected organochlorine pesticide and polychlorinated biphenyl residues in house dust in Singapore. *Chemosphere.* 2007;68(9):1675-82.
105. Rambaud L, Saoudi A, Zeghnoun A, Dereumeaux C, Fillol C. Elaboration de valeurs de références d'exposition à partir de données de biosurveillance. *Santé publique France.* 2017:26 p.
106. Rambaud L, Fillol C. Élaboration de valeurs de référence en population générale à partir d'études avec biomarqueurs. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement.* 2016;77:473.

Annexes

Annexe 1. Liste des variables testées dans les modèles multivariés chez les adultes

Variables

FACTEURS D'AJUSTEMENTS

Sexe
Âge
Indice de masse corporelle
Diplôme
Enfants de moins de 18 ans dans le foyer
Statut tabagique
Lipides totaux
Fluctuation de poids sur la dernière année

DÉTERMINANTS

Déterminants alimentaires

Pain et céréales
Toutes les viandes
Viandes bovines
Viande volailles
Tous les poissons et produits de la mer
Tous les poissons gras (y compris ceux en conserves)
Crustacées mollusques et coquillages
Œufs
Produits laitiers (lait fromage yaourts)
Produits laitiers 0%
Matières grasses : huile, beurre, margarine et crème fraîche
Légumes racines d'autrefois, tubercules tropicaux
Tous les légumes
Tous les fruits
Boissons non alcoolisées
Boissons alcoolisées
Consommation d'œufs provenant du jardin ou d'un élevage propre
Consommation de produits de viande ou de volailles provenant du jardin ou d'un élevage propre
Consommation de fruits provenant du jardin ou d'un élevage propre
Consommation de légumes provenant du jardin ou d'un élevage propre
Consommation de produits d'origine végétale (fruits, légumes et céréales) provenant du jardin ou d'un élevage propre
Consommation de lait en provenance de l'agriculture biologique
Consommation d'œufs en provenance de l'agriculture biologique
Consommation de volaille en provenance de l'agriculture biologique
Consommation de viande en provenance de l'agriculture biologique
Consommation de fruits en provenance de l'agriculture biologique
Consommation de légumes en provenance de l'agriculture biologique
Consommation de céréales en provenance de l'agriculture biologique
Type d'eau : 1) seulement eau du robinet ; 2) seulement eau embouteillée ; 3) les 2 (rob. ou emb.) ou autres types d'eau
Eau du robinet filtrée

Déterminants domestiques et géographiques

Lieu d'habitation :

Une ferme

Une maison individuelle

Un appartement dans un immeuble ou un foyer collectif (d'étudiants...) ou autre (hôtel, caravane, mobile home...)

Zone d'habitation : zone agricole versus les autres zones (résidentielle ou commerçante / industrielle / naturelle)

À 200 m autour de l'habitation, il y a une voie ferrée (hors métro et tramway)

À 200 m autour de l'habitation, il y a une zone de culture (champs, vergers, serres)

À 200 m autour de l'habitation, il y a un jardin public (à l'intérieur de votre résidence, square ou jardin public à proximité...)

À 200 m autour de l'habitation, il y a un incinérateur ou une décharge de déchets

Type d'habitat

Revêtements du sol ou des murs du séjour ou de la chambre en bois (bois massif, stratifié, lambris)

Fréquence d'aération du logement en automne et en hiver

Fréquence d'aération du logement au printemps et en été

Utiliser des pesticides pour le potager

Utiliser des pesticides pour la pelouse

Utiliser des pesticides pour les plantes intérieures

utilisation de pesticides contre les insectes volants

Utilisation de pesticides contre les insectes rampants

Utilisation de pesticides contre les acariens

Utilisation de pesticides pour le traitement de bois

Utilisation de pesticides dans le traitement antiparasitaire

Utilisation de pesticides contre les poux

Utilisation de pesticides en tant que répulsif corporels

Activité : utilisation insecticides

Type d'activité de bricolage : usinage, manipulation de bois traités (poutres, meubles anciens...)

Type d'activité de bricolage : travaux dans habitat ancien (ponçage, décapage de vieilles peintures, travaux avec émissions de poussières)

Rénovation du bois : "Pose de parquet" ou "Ponçage et vitrification ou vernissage du parquet" ou "Réparation ou changement des fenêtres / portes" ou "Pose de lambris (ou panneaux de bois)"

Proximité géographique aux terres agricoles ayant pu faire l'objet d'anciennes utilisations de pesticides OCS

Déterminants professionnels

Domaine d'exposition actuelle ou passée :

0 - Agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides

1 - Arboriculture

2 - Cultures céréalières

3 - En tant que fleuriste

4 - Jardinerie/Pépinière

5 - Maraîchage

7 - Autre agriculture ou milieu professionnel avec exposition possible aux pesticides

22 - Production de pesticides

33 - Traitement du bois, usinage de bois traités

Exposition aux substances sur le lieu de travail actuel : poussières végétales

Exposition aux substances sur le lieu de travail actuel : poussières minérales

Exposition aux substances sur le lieu de travail actuel : pesticides

Exposition aux substances sur le lieu de travail actuel : poussières végétales ou sol arable

Annexe 2. Méthode de construction d'un indicateur de proximité géographique aux zones agricoles

Contexte

Les organochlorés spécifiques (OCS) sont des pesticides appartenant à la famille des organochlorés. Ils ont été massivement utilisés dans l'agriculture entre 1940 et 1998 en France.

Ils sont très résistants dans l'environnement en raison de leurs demi-vie longues. Ils sont également lipophiles et sont soumis à un processus de bio-accumulation chez les animaux et chez l'homme. Ainsi, l'exposition aux pesticides OCS, via l'environnement et la chaîne alimentaire, est toujours présente et ce malgré les interdictions d'utilisations et de production à partir des années 1980.

L'exposition principale des OCS est alimentaire [1, 2] (en raison de la grande stabilité des OCS dans les sols), mais l'exposition aérienne est également possible par inhalation de particules en suspension dans l'air ou dans les poussières. Certains OCS sont remis en suspension dans l'air par remobilisation des pesticides à partir des matériaux et terres anciennement traitées, notamment en cas de manipulation du bois traité, du travail de la terre, ou en cas de températures élevées (période estivale) [3, 4]. Ainsi, nous nous intéressons à identifier la possible exposition des participants d'Esteban aux anciennes zones agricoles, qui ont pu faire l'objet d'utilisation intensive de pesticides OCS.

Notre objectif était de créer un indicateur de proximité géographique des participants d'Esteban, aux zones agricoles ayant pu faire l'objet d'utilisation intensive de pesticides organochlorés.

Cet indicateur nous permet, par la suite, d'étudier le lien entre cette exposition géographique et les niveaux d'imprégnation des pesticides organochlorés des sujets de l'étude Esteban.

Matériels et méthode

Les pesticides OCS dans le cadre de l'étude Esteban

Dans le cadre de l'étude Esteban réalisée entre 2014-2016, l'analyse sérique de 18 biomarqueurs OCS a été effectuée chez 759 adultes âgés de 18-74 ans habitant en France métropolitaine (données de géolocalisation connues). L'analyse descriptive des résultats a permis de mettre en évidence 6 OCS suffisamment quantifiés pour faire l'objet d'analyses multivariées à la recherche de déterminants.

Cinq OCS sont des métabolites sériques de substances mères utilisées comme pesticides en agriculture. Le β -HCH est quant à lui un isomère contenu dans la préparation de l'HCH-technique, pesticide largement utilisé. Le tableau 1 ci-dessous indique les substances organochlorés (métabolites ou isomères) suffisamment quantifiées dans le sérum dans l'étude Esteban (colonne de droite), et leurs pesticides organochlorés utilisés en agriculture (colonne de gauche).

Tableau 1 : Métabolites sériques des OCS quantifiés chez plus de 60% des sujets de l'étude Esteban et substances mères correspondantes

Pesticides organochlorés	Organochlorés (métabolites ou isomères) suffisamment quantifiés dans le sérum dans l'étude Esteban
DDT	pp'-DDE
HCH technique	β -HCH
Chlordane	Oxychlordane
Chlordane	Trans-nonachlore
Heptachlore	Cis-Heptachlore epoxyde

Dieldrine et Aldrine	Dieldrine
----------------------	-----------

Dans le cadre de la construction d'un indicateur géographique basé sur les anciennes utilisations de pesticides OCS, nous nous intéressons aux cultures agricoles homologuées pour les 6 pesticides organochlorés définis dans le tableau :

- Le **DDT** qui appartient à la famille des dichlorodiphényltrichloroéthane
- L'**HCH technique**, dont les isomères le constituant (α -HCH, β -HCH, γ -HCH, δ -HCH, ϵ -HCH) appartiennent à la famille des hexachlorocyclohexanes
- Le **chlordane**, l'**heptachlore**, la **dieldrine** et l'**aldrine** qui appartiennent à la famille des cyclodiènes

Définition de l'indicateur géographique

L'indicateur géographique doit refléter de manière suffisamment fine les expositions aux OCS liées aux cultures agricoles d'intérêt, potentiellement soumises à d'anciens épandages de pesticides OCS. Les bases de données disponibles pour documenter ces cultures agricoles souffrent de limites qui nous ont amenés à définir 2 indicateurs.

Indicateur 1

L'**indicateur 1** se mesure à l'échelle cantonale. Il représente la part de la surface agricole spécifique aux OCS par rapport à la SAU (Surface agricole utile) totale du canton pour une année donnée.

$$\text{Indicateur 1} = \frac{\text{Surface des cultures agricoles homologuées pour les OCS dans le canton}}{\text{Surface totale des cultures agricoles dans le canton}}$$

Exemple : La figure 1 ci-dessous représente un canton avec des zones urbaines, forestières et agricoles. L'indicateur 1 se calcule de cette façon :

Indicateur 1 = Surfaces de cultures homologuées pour les OCS (jaune foncé) / Surfaces de cultures totale (jaune clair + jaune foncé)

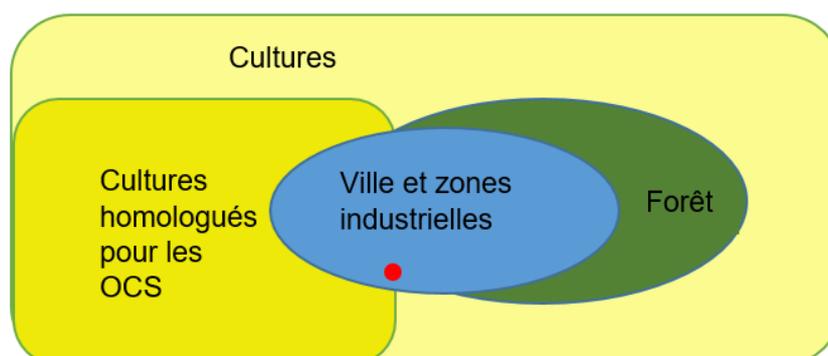


Figure 1 : Représentation d'un canton avec les différentes zones d'intérêt pour le calcul de l'indicateur 1 : la zone de cultures spécifiques aux OCS et la zone de cultures totale du canton

L'indicateur 1 est donc une **densité de la surface agricole spécifique aux OCS**, à l'échelle de la SAU cantonale. Elle permet d'estimer l'exposition agricole (spécifique aux OCS) des participants d'Esteban au niveau cantonal.

Indicateur 2

L'**indicateur 2** se définit comme la part de la surface agricole (toutes cultures) à 500 mètres autour de chaque habitat des participants Esteban.

$$\text{Indicateur 2} = \frac{\text{Surface des cultures agricoles dans le rayon de 500 m autour de l'habitat}}{\text{Superficie totale dans un rayon de 500 m}^*}$$

* à noter que la superficie totale dans un rayon de 500 m est constante, quelque soit le lieu d'habitation du participant

Exemple : Le schéma ci-dessous représente la localisation de l'habitat (point rouge) du participant Esteban ainsi que le rayon de 500 m autour de son habitat. L'indicateur 2 se mesure de cette façon :

Indicateur 2 = Surface agricole (jaune) dans le cercle rouge (rayon de 500 m) / superficie totale dans le cercle rouge (rayon de 500 m)

Dans l'exemple ci-dessous, le participant Esteban a dans les 500 m autour de son habitat, approximativement 50% de surface agricole.

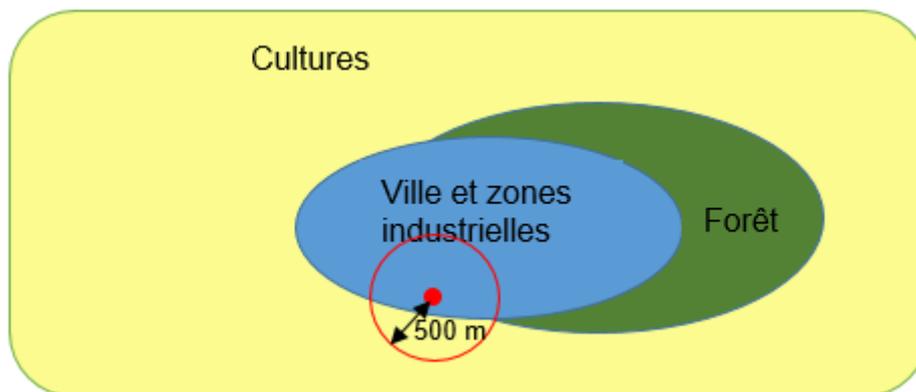


Figure 2 : Représentation d'un canton avec le rayon d'intérêt autour de l'habitat du participant d'Esteban, dans le cadre du calcul de l'indicateur 2

L'indicateur 2 permet de différencier les personnes résidant plutôt dans une zone urbaine de celles résidant plutôt dans une zone rurale.

Indicateur géographique final

L'indicateur 1 permet de connaître dans quelle proportion, l'ensemble des cultures agricoles ont pu être traitées par des OCS. Il permet d'attribuer aux participants d'Esteban un niveau de risque d'exposition aux OCS en fonction de la répartition des cultures agricoles, au niveau du canton. L'indicateur 2 permet d'affiner l'exposition en prenant en compte les zones agricoles et non agricoles autour de l'habitat de chaque participant.

L'indicateur final de proximité géographique des participants d'Esteban aux zones agricoles liées aux OCS se calcule en multipliant l'indicateur 1 par l'indicateur 2. Ainsi, l'indicateur final prend en compte les cultures sur lesquelles l'usage des OCS était homologué (issu de l'indicateur 1) ainsi que la proximité des habitats des participants aux zones agricoles (issue de l'indicateur 2).

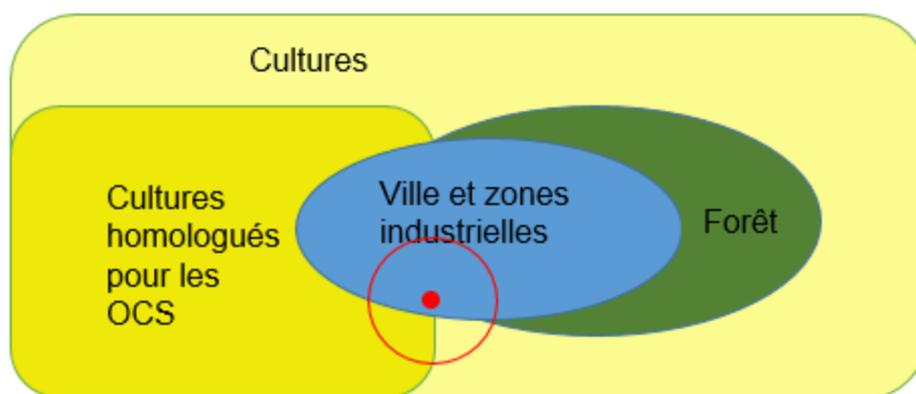


Figure 3 : Représentation d'un canton avec les données d'intérêt pour le calcul de l'indicateur final (Indicateur 1 x Indicateur 2)

Méthodologie pour la création des indicateurs

Choix des dates d'études

Les pesticides OCS sont résistants dans les sols et dans l'eau, où ils ont des demi-vies très longues. Par exemple le DDT a une demi-vie de 4 à 30 ans dans les sols et de 50 heures dans l'eau [5]. Parmi les isomères HCH, le β -HCH est l'isomère le plus persistant [6, 7]. Ainsi l'exposition actuelle aux OCS, via la remobilisation à partir des sols agricoles peut résulter de la proximité du lieu d'habitation du participant Esteban à d'anciennes zones agricoles. Par exemple, un habitant en région parisienne, peut résider aujourd'hui dans une zone urbaine, qui était auparavant une zone rurale avec de nombreuses cultures ayant fait l'objet d'usage intensif d'OCS.

En fonction des données disponibles des homologations et interdictions pour les OCS, nous avons fait le choix de nous intéresser aux cultures homologuées pour les OCS en 1970. C'est une date historique, où les pesticides OCS étaient tous autorisés pour l'usage agricole en France. Ce sont les données les plus anciennes que nous disposons concernant les surfaces agricoles des différentes cultures en France.

Indicateur 1 : densité SAU-OCS / SAU-totale au niveau du canton

Choix de la base de donnée géographique

Nous avons choisi d'utiliser les données du Recensement Agricole (RA), mises à disposition par l'Agreste (données du ministère de l'agriculture et de l'alimentation) [8], en raison :

- De la disponibilité des données publiques directement sur le site de l'Agreste ;
- Du détail des surfaces agricoles pour les différentes cultures au niveau cantonal ;
- De la disponibilité des données historiques (1970)
- De l'absence du secret statistique pour les données du RA en 1970 (il y a prescription).

Sélection des cultures concernées par l'usage des OCS

À partir des matrices culture-exposition du programme Matphyto [9], nous avons identifié pour chaque OCS, les cultures sur lesquelles l'usage des OCS était homologué pour l'année 1970. Les différents OCS sont parfois homologués pour les mêmes groupes de cultures. Nous avons ainsi déterminé 3 catégories d'OCS homogènes en termes d'utilisation agricole en 1970.

- Les dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT),
- Les hexachlorocyclohexanes (HCH)
- Les cyclodiènes : chlordane, heptachlore, aldrine et dieldrine

Le tableau 2 résume les 3 catégories d'OCS avec la liste des cultures pour chacune des catégories.

Tableau 2 : Liste des cultures pour lesquels les OCS ou les groupes d'OCS étaient homologués en 1970

1970		
DDT	HCH	Chlordane, Heptachlore, Aldrine et Dieldrine (cyclodiènes)
Oléagineux	Céréales sauf riz	Céréales sauf riz
Pois protéagineux	Oléagineux	Oléagineux
	Pois protéagineux	Pois protéagineux
	Betterave industrielle	Betterave industrielle
	Tabac	Tabac
	Semences grainières	Semences grainières
	Autres cultures industrielles	Autres cultures industrielles
Maïs fourrage et ensilage	Maïs fourrage et ensilage	Maïs fourrage et ensilage
Pommes de terre et tubercules	Pommes de terre et tubercules	Pommes de terre et tubercules
	Légumes secs	Légumes secs
	Légumes frais, fraises, melons	Légumes frais, fraises, melons
	Fleurs et plantes ornementales	Fleurs et plantes ornementales
Vignes à raisin de cuve		
Vignes à raisin de table		
Fruits à noyaux	Fruits à noyaux	
Fruits à pépins	Fruits à pépins	

Nous avons ainsi pu calculer les sommes des surfaces agricoles par catégorie d'OCS utilisé, et cela pour chaque canton. La densité a ensuite été calculée par le rapport entre la SAU spécifique pour chaque catégorie d'OCS au niveau du canton sur la SAU totale du canton. Cela a permis d'obtenir la densité des SAU spécifiques pour chaque catégorie d'OCS.

Ainsi l'indicateur 1 a pu être calculé pour les 3 catégories d'OCS, au niveau cantonal :

Indicateur 1 DDT 1970 = SAU [cultures DDT] / SAU [totale] du canton
 Indicateur 1 HCH 2000 = SAU [cultures HCH] / SAU [totale] du canton
 Indicateur 1 cyclodiènes 1970 = SAU [cultures cyclodiènes] / SAU [totale] du canton

Indicateur 2 : Part SAU-total sur un rayon de 500 m

L'indicateur 2 permet d'évaluer si le lieu d'habitation actuel du participant d'Esteban, était, en 1970, situé plutôt en milieu rural ou en milieu urbain.

Choix du rayon d'étude autour des habitants des participants

Afin de choisir la distance adéquate pour le calcul de l'indicateur de proximité géographique aux zones agricoles autour des habitations, nous avons pris en compte les caractéristiques des OCS une fois émis dans l'environnement (notamment dans les sols), et la façon dont les habitants peuvent y être exposés.

Les pesticides OCS, sont rémanents dans l'environnement et toujours présents dans les sols. Ils peuvent ainsi contaminer la chaîne alimentaire et être remobilisés à partir des sols contaminés, sous l'effet de la chaleur ou du travail agricole [4]. Une étude a notamment montré une corrélation entre la concentration en DDT mesurée dans l'air et celle mesurée dans le sol dans les zones récréatives urbaines [10]. Des études ont également mis en évidence qu'il existait un gradient urbain rural des niveaux de concentrations de pesticides OCS dans l'air ambiant [11]. Ces études nous montrent qu'il peut y avoir des différences d'expositions au sein même d'une commune, notamment si les habitations sont situées à proximité ou éloigné de sols contaminés. Ainsi, l'exposition principale des OCS à partir des sols contaminés s'effectue en partie près du lieu de vie. Les sols agricoles étant les plus contaminés, nous nous sommes intéressés à une distance assez courte, soit de 500 mètres entre les cultures et les habitations.

Par ailleurs, d'autres études évaluant l'exposition de proximité géographique aux cultures avaient également analysé des expositions à des distances plus courtes ou plus longues : de 50 m à 1 km [12, 13].

Ainsi, le choix d'un rayon de 500 m de distance entre le lieu d'habitation et les cultures nous paraissaient pertinent, notamment au vu des caractéristiques de remobilisation des OCS à partir des sols contaminés. C'est aussi en raison d'une plus grande aisance à identifier, sur les photos aériennes, les parts de surfaces agricoles sur un rayon de 500 m que sur un rayon plus large, que nous avons fait le choix de ce rayon d'étude.

Choix des bases de données géographiques

Pour la période de 1970, seules des photos aériennes étaient disponibles. Nous avons donc interprété visuellement les photos aériennes, fournies par l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) et prises entre 1950 et 1965, en estimant, la part de la surface agricole (toutes cultures) à 500 m autour de chaque habitat des participants d'Esteban. L'interprétation visuelle a été réalisée par deux personnes simultanément pour l'ensemble des lieux d'habitations des participants. En raison des difficultés d'interprétations, nous avons choisi de définir ces parts agricoles, selon 5 catégories : 0% de la part de surface agricole, 25%, 50%, 75% et 100%. Ce sont des ordres de grandeurs, permettant d'estimer l'exposition agricole à proximité des lieux d'habitations. Pour les valeurs extrêmes, telles que 0% et 100%, nous avons définis qu'il y avait 0% de part agricole, lorsque qu'il n'y avait aucune ou quasiment aucune (approximativement < 10%) surface agricole dans un rayon de 500 m. Nous estimions qu'il y avait 100% de part agricole s'il y avait l'intégralité ou proche de l'intégralité (approximativement >90%) de surface agricole dans un rayon de 500 m. Pour les valeurs intermédiaires, telles que 25%, 50% et 75%, nous discutons de la part de surface agricole la plus proche des catégories préalablement définies.

Indicateur Final

L'indicateur final prend en compte l'indicateur 1 et l'indicateur 2 pour la création de 3 indicateurs, correspondant aux 3 catégories d'OCS. Ces 3 indicateurs sont créés en multipliant l'indicateur 1 par l'indicateur 2. Chaque indicateur final permet ainsi d'évaluer l'exposition de proximité géographique des participants d'Esteban, aux zones agricoles de 1970, pour chaque catégories d'OCS : le DDT, l'HCH et les cyclodiènes (chlordane, heptachlore, aldrine et dieldrine). Le tableau 4 résume les calculs permettant la construction de ces indicateurs.

Tableau 4 : Construction des 3 indicateurs finaux

Indicateur 1 : Part SAU-OCS / SAU-total		Indicateur 2 : Part de la SAU totale à 500m	Indicateur final		Pour l'étude des OCS suivants
Densité cultures (DDT)	x	Part SAU 500m	Indic final DDT	=>	pp'DDE
Densité cultures (HCH)	x	Part SAU 500m	Indic final HCH	=>	β-HCH
Densité cultures (cyclodiènes)	x	Part SAU 500m	Indic final cyclodiènes	=>	Oxychlorane Heptachlore epoxyde Trans-nonachlore Dieldrine

*Exemple du calcul de l'indicateur géographique au DDT pour un participant Esteban : 50% [densité SAU-DDT] * 20% [Part SAU en à 500 m] = 10%*

Discussion : avantages et limites de la méthode

L'atout principal de cette méthode est la prise en compte d'une utilisation ancienne de pesticides OCS, dans le calcul de l'exposition géographique. La construction de l'indicateur final par l'intermédiaire des indicateurs 1 et 2, présente des avantages et des limites.

Avantages et limites de l'indicateur 1

Limites

Les surfaces agricoles référencées au canton où se trouve le siège de l'exploitation

Nous avons noté un possible biais de classement en raison de la manière dont les données du RA ont été organisées. En effet, les surfaces agricoles d'une exploitation sont référencées dans le canton où est localisé le siège de l'exploitation agricole. Certaines parcelles agricoles peuvent se situer sur un canton limitrophe du canton où est situé le siège de l'exploitation. Il peut donc il y avoir une légère différence entre la surface agricole d'un canton indiqué dans la base de données Agreste et celle qui a réellement existé sur le canton.

Quantités des pesticides OCS réellement épandues dans les cultures

Bien que le RA fournisse des données très précises (surfaces agricoles pour de nombreuses cultures) et que nous connaissons les dates d'homologations des pesticides OCS sur les différentes cultures, nous n'avons pas d'informations précises au sujet de l'utilisation réelle des OCS sur les cultures. Nous ne pouvons pas distinguer les quantités de pesticides épandues par cultures. Cependant, nous savons que les pesticides étaient massivement utilisés entre 1940 et 1978 en France. Une étude montre par ailleurs que la France fait partie des pays ayant un nombre important de déchets résiduels d'HCH [15, 16]. Ces éléments nous permettent de partir de l'hypothèse, que de nombreuses exploitations agricoles françaises ont fait l'objet d'une utilisation importante de pesticides OCS.

Avantages

Parallèlement à ces limites, le RA dispose de nombreux avantages. Tout d'abord, les données du RA sont nationales. Elles sont exhaustives grâce à une enquête homogène sur l'ensemble du territoire. Les données fournis par le RA sont très précises, grâce au recensement détaillé des

cultures et de leurs surfaces. Cette finesse permet de pouvoir exploiter un grand nombre de cultures et sélectionner précisément les cultures d'intérêts pour les calculs des indicateurs géographiques. Ainsi, l'avantage principal de l'indicateur 1 repose sur la sélection des cultures ayant pu faire l'objet d'une utilisation de pesticides OCS. Cet indicateur permet donc une évaluation d'une exposition spécifique aux OCS. La disponibilité des données anciennes (1970) est également un atout majeur pour le calcul d'un indicateur géographique d'exposition aux OCS.

Avantages et limites de l'indicateur 2

Limites

Photos aériennes 1950-1965 (IGN) : antérieures à 1970

Les photos aériennes prises entre 1950 et 1965, sont les plus anciennes données fournies par l'IGN et correspondent au plus près à l'année 1970. Ces données, les seules disponibles pour cette période, présentent des limites.

- Les photos aériennes sont prises dans un intervalle de temps de 15 ans, qui suppose une hétérogénéité des mesures en raison d'une probable évolution des surfaces agricoles au cours du temps.
- Il peut exister une différence des surfaces agricoles entre les données des photos aériennes 1950-65 et les données du RA en 1970.

Toutefois, la connaissance des surfaces agricoles avant 1970 donne des renseignements supplémentaires quant à la probable exposition aux surfaces agricoles. Les pesticides OCS étaient en effet largement utilisés dans les années 1950, c'est pourquoi l'information des surfaces agricoles sur les 2 dizaines d'années précédant 1970 ne présente pas une problématique majeure dans l'évaluation de l'indicateur géographique. Elle permet au contraire d'accéder à des données encore plus anciennes, qui reflètent davantage les zones agricoles françaises, soumis aux usages des OCS.

Photos aériennes 1950-1965 (IGN) : interprétation visuelle

L'estimation de la part de surface agricole à 500 m autour des habitations des participants d'Esteban, a été réalisée par interprétation visuelle des photos aériennes prises entre 1950 et 1965. Cette interprétation visuelle implique un risque d'erreur de classement, en raison de la difficulté d'interprétation sur d'anciennes photos, parfois de mauvaise qualité, et également en raison de l'interprétation humaine et non automatisée. Toutefois, l'ensemble des interprétations a été réalisé par deux personnes simultanément, afin de réduire le risque de classement.

Rayon de 500 m autour des habitats

La taille du rayon à 500 m permet de prendre en compte l'exposition à proximité du domicile indiqué pendant l'enquête Esteban.

- Ce rayon a été choisi en raison de l'exposition locale des pesticides organochlorés via leurs remobilisations à partir des sols d'anciennes terres agricoles (qui sont pour une partie urbanisée aujourd'hui). Cet indicateur ne prend cependant pas en compte les cultures au-delà de ce rayon, et pourrait sous-estimer ou sur-estimer le niveau d'exposition. Cependant, au vu des résultats des études sur la remobilisation des OCS, ainsi que de la corrélation entre les concentrations des OCS dans l'air et dans le sol, l'exposition se fait principalement sur le lieu de vie qui est dans la grande majorité des cas, le lieu d'habitation.
- Toutefois, cet indicateur ne prend pas en compte, ni la durée d'habitation sur le lieu de vie indiqué, ni les potentielles expositions géographiques au niveau des lieux de vie précédents,

ou l'exposition géographique sur le lieu du travail. Seul le type d'activité professionnelle sera pris en compte dans l'analyse multivariée.

Avantages

Le principal avantage de l'indicateur est la précision de l'information géographique à proximité du lieu d'habitation, au moyen de la connaissance précise du lieu d'habitation du participant au moment de l'enquête.

Cet indicateur permet ainsi d'affiner l'indicateur géographique en établissant une cartographie d'exposition agricole à proximité du lieu d'habitation.

Indicateur final

Malgré les limites décrites, l'indicateur final permet de prendre en compte plusieurs éléments d'expositions géographiques : 1) la part des cultures potentiellement contaminés par les OCS au niveau du canton et 2) le risque d'exposition localement autour de l'habitat.

Rémanence des pesticides OCS

L'indicateur final tel qu'il a été construit répond à la problématique des anciennes utilisations de pesticides OCS, toujours exposantes à ce jour pour l'homme. La rémanence des pesticides OCS, c'est-à-dire la persistance de leurs caractéristiques, même des années après leurs utilisations, est donc l'élément principal sur lequel repose la construction de l'indicateur de proximité géographique.

L'intérêt de cet indicateur repose également dans la connaissance de l'environnement de l'habitat du participant, 50 ans avant la réalisation de l'étude. Cela permet ainsi d'évaluer le niveau de contamination des sols où vit aujourd'hui le participant de l'étude et ainsi d'estimer sa potentielle exposition aux pesticides OCS. En raison de l'urbanisation des territoires, la répartition des cultures a beaucoup évolué depuis 1950. Ainsi un grand nombre de villes se situe aujourd'hui sur des terres contaminées par des pesticides OCS très rémanent et persistants dans les sols. Cette évolution de l'urbanisation explique davantage l'intérêt d'étudier les territoires au moment de l'utilisation des pesticides, soit, des années précédant la réalisation de l'étude.

Prise en compte de deux années d'études

Bien que les pesticides OCS soient rémanent, leurs demi-vies ne sont pas éternelles (par exemple de 4 à 30 ans dans les sols pour le DDT), ce qui contribue à une diminution des concentrations en OCS dans les sols au cours du temps. Cependant, si l'on considère que les personnes habitent depuis plusieurs décennies sur des terres contaminées, elles ont plus de risques d'être exposés aux OCS sur les dizaines d'années précédant l'étude. Ces personnes ont pu également être directement exposées à l'utilisation des pesticides OCS.

Ainsi l'évaluation de la proximité géographique aux cultures est un indicateur sur une exposition indirecte, via les sols contaminés, mais également sur une ancienne exposition directe, via l'utilisation des pesticides OCS.

Distinction des cultures dans un rayon de 500m

La précision de notre indicateur repose sur 2 indicateurs intermédiaires, l'un distinguant les cultures spécifiques aux OCS au sein du canton, l'autre évaluant la part agricole autour des habitats. Nous n'avons cependant pas la possibilité de distinguer précisément le type de cultures présentes dans le rayon de 500 m : la part des cultures OCS est calculée au niveau du canton et cette proportion est conservée de facto dans le périmètre de l'habitation des participants. On ne peut exclure que les cultures agricoles ne soient pas réparties de façon uniforme sur le canton et que les participants ne

soient, en réalité, exposés à seulement certaines cultures. Toutefois, le rayon de 500 m représente une superficie de près de 80 ha, ce qui est relativement important, permettant de diminuer ce risque de répartition hétérogène des cultures.

Seules des bases de données plus précises permettraient d'affiner ces expositions, mais elles ne sont pas disponibles pour l'année considérée.

Conclusion

L'indicateur géographique tel qu'il est défini permet d'estimer l'exposition par le sol agricole contaminé aux OCS via une ancienne utilisation de ces pesticides.

En raison des niveaux d'imprégnation élevés par ces pesticides chez les participants de l'étude Esteban (représentative de la population générale), de la rémanence de ces pesticides dans le sol et de la possible remobilisation de ces derniers dans l'air, l'exposition géographique semble importante à étudier. En effet, bien que les OCS soient interdits, il semble important de prendre en compte les expositions sur le long terme, notamment en raison des conséquences sanitaires des pesticides OCS : le DDT étant probablement cancérigène pour l'Homme et le β -HCH possiblement cancérigène pour l'Homme [17].

L'intégration des indicateurs dans les modèles multivariés permettra d'évaluer si la proximité géographique aux cultures spécifiques aux OCS est un déterminant d'exposition à l'imprégnation par ces substances.

Bibliographie – Méthodologie indicateur géographique

1. Anses. Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2). Tome 2 : résidus de pesticides, additifs, acrylamide, hydrocarbures aromatiques polycycliques. 2011 [2011: 405 p. [Available from: <http://www.anses.fr/Documents/PASER2006sa0361Ra2.pdf>
2. Fréry N GL, Saoudi A, Garnier R, Zeghnoun A, Bidondo ML. Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement Tome2 - Polychlorobiphényles (PCB-NDL) et pesticides. 2013 [Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/exposition-a-des-substances-chimiques/pesticides/documents/rapport-synthese/exposition-de-la-population-francaise-aux-substances-chimiques-de-l-environnement.-tome-2-polychlorobiphenyles-pcb-ndl.-pesticides>
3. Meijer S, Shoeib M, Jantunen L, Jones K, Harner T. Air-Soil Exchange of Organochlorine Pesticides in Agricultural Soils. 1. Field Measurements Using a Novel in Situ Sampling Device. *Environmental Science & Technology - Environ Sci Technol.* 2003;37.
4. Scheyer A, Graeff C, Morville S, Mirabel P, Millet M. Analysis of some organochlorine pesticides in an urban atmosphere (Strasbourg, east of France). *Chemosphere.* 2005;58(11):1517-24.
5. Ineris. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : DDT, 17p. 2007.
6. Heinisch E, Jonas K, Klein S. HCH isomers in soil and vegetation from the surroundings of an industrial landfill of the former GDR, 1971-1989. *Science of The Total Environment.* 1993;134:151-9.
7. Ashizawa A, Dorsey A, Wilson JD. Toxicological profile for alpha-, beta-, gamma, and delta-hexachlorocyclohexane. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2005.8. Agreste. Recensement Agricole - Ministère de l'agriculture et de l'alimentation [Available from: https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/RA_3013/detail/
9. Spinosi J, Févotte J. Le programme Matphyto. Matrices cultures-expositions aux produits phytosanitaires Saint-Maurice (Fra): Institut de veille sanitaire. 2008.
10. Skrbic BD, Marinkovic V. Occurrence, seasonal variety of organochlorine compounds in street dust of Novi Sad, Serbia, and its implication for risk assessment. *Sci Total Environ.* 2019;662:895-902.
11. Harner T, Shoeib M, Diamond M, Stern G, Rosenberg B. Using passive air samplers to assess urban-rural trends for persistent organic pollutants. 1. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides. *Environmental science & technology.* 2004;38(17):4474-83.
12. Brouwer M, Kromhout H, Vermeulen R, Duyzer J, Kramer H, Hazeu G, *et al.* Assessment of residential environmental exposure to pesticides from agricultural fields in the Netherlands. *J Expo Sci Environ Epidemiol.* 2018;28(2):173-81.
13. Bukalasa JS, Brunekreef B, Brouwer M, Vermeulen R, de Jongste JC, van Rossem L, *et al.* Proximity to agricultural fields as proxy for environmental exposure to pesticides among children: The PIAMA birth cohort. *Sci Total Environ.* 2017;595:515-20.
14. CLC. Corine Land Cover - Guide d'utilisation [Available from: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/clc-guide-d-utilisation-02_0.pdf.
15. Vijgen J, Li Y-F, Forter M, Lal R, Weber R. The legacy of lindane and technical HCH production. *Organohalog Comp.* 2005;68.
16. Vijgen J, Abhilash PC, Li YF, Lal R, Forter M, Torres J, *et al.* Hexachlorocyclohexane (HCH) as new Stockholm Convention POPs--a global perspective on the management of Lindane and its waste isomers. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2011;18(2):152-62.
17. IARC. Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. 2020.

Annexe 3. Distribution des niveaux d'imprégnation par les organochlorés spécifiques et les chlorophénols par classes d'âge et par sexe

Tableau 21. Distributions des concentrations sériques des OCS (ng L⁻¹) et des concentrations urinaires des chlorophénols (µg L⁻¹) des enfants âgés de 6 à 17 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	MG	IC 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng L⁻¹)										
pp'DDT										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,32	20,06	[13,65; 24,13]
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	13,00	15,05	[12,96; 102,02]
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,85	17,20	[10,85; 24,07]
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	8,50	21,38	[8,50; 71,17]
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,21	16,72	[12,54; 28,46]
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,70	20,99	[12,47; 34,78]
op'DDT										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE										
Total	255	113,00	[112,9; 113,1]	49,57	67,25	102,04	166,35	279,78	444,71	[325,15; 554,51]
Âge (ans)										
6-10 ans	93	129,30	[127,20; 131,50]	52,14	69,55	113,67	197,90	380,20	584,40	[383,10; 988,50]
11-14 ans	110	104,70	[102,60; 106,70]	46,44	62,99	96,76	157,00	240,80	301,80	[243,70; 356,90]
15-17 ans	52	104,60	[102,40; 106,70]	58,13	70,98	91,49	136,00	228,90	401,10	[207,70; 479,10]
Sexe										
Garçon	135	125,00	[122,88; 127,00]	51,41	70,88	118,52	173,20	325,90	446,50	[329,20; 510,40]
Fille	120	101,00	[98,87; 103,10]	45,39	60,95	91,21	141,00	240,80	305,60	[239,50; 632,50]
op'DDE										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH										
Total	255	18,10	[18,02; 18,17]	<LOQ	11,81	17,80	24,23	43,05	55,68	[44,09; 71,25]

Âge (ans)											
6-10 ans	93	21,40	[19,30; 23,49]	<LOQ	13,70	19,25	27,77	51,55	79,08	[51,13; 139,77]	
11-14 ans	110	16,27	[14,19; 18,34]	<LOQ	10,01	15,46	23,25	37,81	49,51	[37,18; 64,43]	
15-17 ans	52	16,80	[14,69; 18,90]	<LOQ	11,47	17,77	21,50	29,44	40,84	[28,02; 55,18]	
Sexe											
Garçon	135	19,34	[17,27; 21,42]	<LOQ	12,77	18,19	25,16	47,37	57,54	[51,85; 84,72]	
Fille	120	16,79	[14,72; 18,86]	<LOQ	10,33	16,00	23,30	37,93	43,90	[37,63; 72,59]	
γ-HCH ou Lindane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,02	12,35	17,09	20,14	[17,90; 25,92]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,70	13,41	17,87	23,34	[17,82; 27,48]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,67	11,94	14,83	19,71	[14,83; 31,43]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,75	11,54	14,31	18,15	[13,93; 23,91]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,32	12,17	16,80	18,48	[17,16; 25,60]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,75	12,63	17,64	24,17	[17,04; 29,67]	
Cis-chlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Trans-chlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Oxychlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	13,08	16,43	[14,33; 20,55]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	16,42	21,16	[16,33; 33,55]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,28	13,17	[11,30; 17,79]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,51	12,14	[10,12; 16,38]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	14,05	16,44	[14,33; 21,92]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,47	16,07	[11,38; 24,23]	
Cis-nonachlore											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Trans-nonachlore											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,08	15,45	[12,92; 22,58]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,67	18,13	[12,66; 31,30]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	9,53	14,14	[9,38; 21,38]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,24	14,28	[11,60; 26,05]	

Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,08	16,2	[12,15; 21,62]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,65	15,1	[11,63; 24,37]	
Cis-Heptachlore epoxyde											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,90	14,59	16,33	[15,18; 17,88]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,34	15,44	17,50	[15,29; 18,01]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	9,72	13,92	15,43	[13,92; 32,21]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,39	13,61	14,97	[12,84; 17,77]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,10	15,22	16,71	[15,27; 21,52]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,22	13,71	16,22	[13,56; 17,92]	
Trans-heptachlore epoxyde											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Aldrine											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Dieldrine											
Total	255	11,5	[11,41; 11,53]	<LOQ	<LOQ	10,96	15,11	20,84	25,84	[23,41; 31,75]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	12,19	[10,13; 14,26]	<LOQ	<LOQ	11,34	15,79	20,54	25,88	[20,27; 57,43]	
11-14 ans	110	10,58	[8,51; 12,64]	<LOQ	<LOQ	10,11	13,23	22,95	26,29	[23,02; 38,28]	
15-17 ans	52	12,20	[10,11; 14,28]	<LOQ	<LOQ	12,33	16,07	19,35	22,58	[18,55; 42,54]	
Sexe											
Garçon	135	11,45	[9,40; 13,50]	<LOQ	<LOQ	11,09	14,70	18,98	24,76	[19,90; 41,95]	
Fille	120	11,50	[9,43; 13,56]	<LOQ	<LOQ	10,41	15,95	22,95	27,47	[21,96; 33,88]	
Endrine											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Mirex											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Chlorophénols (µg L-1)											
4-MCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	

Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,21]						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,21]						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,69]						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,31]						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]						
2,5-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,152	[<LOQ; 0,42]
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,21	[<LOQ; 1,66]
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,25	[<LOQ; 0,95]
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,38]						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,17	[<LOQ; 0,88]
Fille	262	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,48]						
2,6-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,3,4-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4,5-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4,6-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						

TeCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
PCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,18	0,34		[0,23; 0,51]
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,27		[<LOQ; 0,32;]
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,33	0,62		[0,33; 1,06]
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,15		[<LOQ; 0,18]
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,15	0,32		[0,16; 0,86]
Fille	262	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,20	0,38		[0,21; 0,53]

Tableau 22. Distributions des concentrations sériques des OCS (ng g⁻¹ de lipides) et des concentrations urinaires des chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine) des enfants âgés de 6 à 17 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	MG	IC 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides)										
pp'DDT										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,36	3,73	[2,52; 5,10]
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,42	2,85	[2,42; 17,02]
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,30	3,71	[2,23; 5,24]
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,03	4,58	[2,00; 18,65]
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,25	3,74	[2,30; 5,65]
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,43	3,70	[2,42; 6,76]
op'DDT										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE										
Total	255	22,70	[22,62; 22,8]	9,58	13,65	20,35	33,8	56,84	82,15	[68,91; 107,81]
Âge (ans)										
6-10 ans	93	25,31	[23,16; 27,45]	9,30	14,42	24,15	38,26	75,31	108,66	[71,75; 195,99]
11-14 ans	110	21,21	[19,12; 23,30]	9,20	12,34	18,93	32,88	48,83	69,41	[49,40; 77,97]
15-17 ans	52	21,62	[19,48; 23,75]	11,63	13,68	17,62	28,33	41,74	92,99	[40,88; 123,70]
Sexe										
Garçon	135	25,62	[23,54; 27,70]	10,60	14,66	25,90	38,13	65,80	91,46	[68,88; 109,5]
Fille	120	19,83	[17,73; 21,93]	9,20	11,89	17,02	27,52	48,83	76,21	[48,83; 126,1]
op'DDE										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH										
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH										
Total	255	3,64	[3,56; 3,71]	<LOQ	2,41	3,4	5,07	8,14	11,88	[8,63; 14,80]
Âge (ans)										
6-10 ans	93	4,19	[2,02; 6,28]	<LOQ	2,69	3,92	5,70	9,60	14,87	[9,20; 26,34]
11-14 ans	110	3,30	[1,22; 5,37]	<LOQ	1,97	3,12	4,78	7,79	9,97	[7,77; 12,55]
15-17 ans	52	3,43	[1,36; 5,58]	<LOQ	2,41	3,23	4,95	6,65	8,94	[6,05; 13,72]

Sexe											
Garçon	135	3,96	[1,89; 6,04]	<LOQ	2,52	3,75	5,56	10,10	10,46	[10,46; 15,37]	
Fille	120	3,30	[1,23; 5,36]	<LOQ	2,17	3,12	4,60	6,91	6,80	[6,80; 14,80]	
γ-HCH ou Lindane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	2,04	2,56	3,21	4,10	[3,46; 4,60]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	2,13	2,69	3,21	4,13	[3,19; 5,88]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,96	2,45	3,18	4,12	[3,17; 7,12]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	2,00	2,57	3,16	3,87	[3,00; 4,35]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,32	2,56	3,18	4,02	[3,24; 4,32]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,75	2,55	3,25	4,16	[3,18; 6,08]	
Cis-chlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Trans-chlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Oxychlordane											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,58	3,04	[2,78; 4,42]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,98	4,14	[2,96; 6,89]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,27	2,69	[2,27; 3,71]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,29	2,60	[2,16; 3,07]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,75	3,08	[2,84; 4,47]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,12	2,04	[2,04; 4,46]	
Cis-nonachlore											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Trans- nonachlore											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,41	2,93	[2,63; 4,41]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,41	3,70	[2,63; 5,26]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,01	2,78	[2,00; 4,43]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,62	2,86	[2,57; 4,92]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,58	3,11	[2,60; 4,40]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,20	2,87	[2,20; 4,89]	
Cis-Heptachlore epoxyde											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,09	2,74	3,25	[2,91; 3,58]	

Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,33	2,74	17,50	[2,72; 3,30]	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	1,91	2,53	15,43	[2,54; 6,15]	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,31	3,08	14,97	[2,74; 3,74]	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,30	2,92	16,71	[3,06; 5,12]	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	1,94	2,59	16,22	[2,59; 3,33]	
Trans-heptachlore epoxyde											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Aldrine											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Dieldrine											
Total	255	2,3	[2,24; 2,37]	<LOQ	<LOQ	2,19	3,04	4,07	5,3	[4,43; 6,47]	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	2,39	[0,33; 4,44]	<LOQ	<LOQ	2,27	3,10	3,85	4,92	[3,81; 9,78]	
11-14 ans	110	2,14	[0,08; 4,21]	<LOQ	<LOQ	2,03	2,78	3,54	5,85	[3,55; 7,54]	
15-17 ans	52	2,52	[0,43; 4,61]	<LOQ	<LOQ	2,57	3,28	4,61	5,22	[4,21; 8,62]	
Sexe											
Garçon	135	2,35	[0,30; 4,40]	<LOQ	<LOQ	2,32	3,05	3,75	5,21	[4,01; 8,41]	
Fille	120	2,26	[0,20; 4,32]	<LOQ	<LOQ	2,03	3,03	4,12	5,96	[4,08; 6,52]	
Endrine											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Mirex											
Total	255	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	110	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	135	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	120	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Chlorophénols (µg g-1 de créatinine)											
4-MCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	

Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,44]						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,44]						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 1,60]						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,45]						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]						
2,5-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,254	[<LOQ; 0,55]
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,43	[<LOQ; 5,27]
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,33	[<LOQ; 1,08]
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,69]						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,29	[<LOQ; 1,08]
Fille	262	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,77]						
2,6-DCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,3,4-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4,5-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4,6-TCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
TeCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	NC						

Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	NC						
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	NC						
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	262	NC	NC	<LOQ	NC						
PCP											
Total	500	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,40	0,40		[0,29; 0,62]
Âge (ans)											
6-10 ans	206	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,34		[<LOQ; 0,47;]
11-14 ans	201	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,33	0,57		[0,31; 0,75]
15-17 ans	93	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,19		[<LOQ; 0,40]
Sexe											
Garçon	238	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,19	0,34		[0,20; 0,60]
Fille	262	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,27	0,44		[0,30; 0,60]

Tableau 23. Distributions des concentrations sériques des OCS (ng L⁻¹) et des concentrations urinaires des chlorophénols (µg L⁻¹) des adultes âgés de 18 à 74 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	MG	IC 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng L⁻¹)										
pp'DDT										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,25	15	25,02	38,44	[31,51; 46,61]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	6,03	11,74	17,64	38,74	[16,55; 69,01]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	7,49	11,67	19,87	28,77	[17,31; 44,28]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,36	14,80	24,62	32,82	[25,02; 39,35]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	13,96	19,96	36,63	55,03	[41,47; 63,48]
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,60	15,02	23,74	35,54	[26,11; 46,58]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	8,87	14,92	28,55	43,92	[29,53; 55,32]
op'DDT										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE										
Total	759	393,14	[350,59; 440,85]	115,44	178,96	355,67	760,06	1 583,90	2 540,80	[2 058,83; 3 161,45]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	181,92	[145,61; 227,3]	84,95	104,32	140,23	247,91	615,27	1 013,10	[429,25; 1 648,45]
30-44 ans	196	271,06	[231,32; 317,63]	114,37	155,64	239,58	398,09	673,00	1 432,90	[664,77; 3 239,82]
45-59 ans	275	452,32	[388,71; 526,35]	165,89	237,85	414,21	765,97	1 425,30	2 375,10	[1 438,33; 3 242,30]
60-74 ans	236	908,44	[770,07; 1 071,68]	316,34	530,16	872,22	1 533,00	2 590,50	3 975,60	[2 469,71; 5 981,58]
Sexe										
Homme	338	356,96	[308,21; 413,41]	111,84	171,04	330,76	647,53	1 248,70	1 785,10	[1 365,84; 2 247,23]
Femme	421	429,30	[364,75; 505,27]	118,35	186,13	390,46	876,54	2 085,20	3 041,90	[2 322,06; 3 619,30]
op'DDE										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH										
Total	759	79,23	[69,97; 89,73]	20,96	34,37	70,96	164,36	402,71	596,47	[503,53; 719,94]

Âge (ans)											
18-29 ans	52	24,47	[21,02; 28,49]	12,42	15,81	21,64	31,92	49,94	72,2		[43,77; 102,70]
30-44 ans	196	47,34	[41,44; 54,08]	22,93	30,33	43,09	68,68	109,21	171,97		[108,98; 430,60]
45-59 ans	275	107,83	[92,60; 125,56]	40,40	60,66	94,35	164,29	368,13	540,15		[384,55; 943,09]
60-74 ans	236	235,18	[197,70; 279,77]	75,81	149,38	222,72	462,34	738,33	890,14		[714,80; 1 081,84]
Sexe											
Homme	338	70,93	[59,57; 84,46]	20,81	31,45	64,40	140,52	311,5	450,4		[346,28; 609,12]
Femme	421	87,63	[73,18; 104,93]	21,03	37,11	76,57	186,75	497,44	687,97		[564,98; 886,76]
γ-HCH ou Lindane											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,75	12,41	17,13	26,74		[20,52; 32,22]
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	8,95	10,46	12,94	14,00		[12,84; 24,10]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,43	11,74	15,24	19,35		[15,60; 33,77]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,05	12,66	17,57	23,71		[16,52; 51,03]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	10,81	15,11	28,41	39,61		[28,24; 57,54]
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,80	12,71	20,27	32,10		[21,47; 54,65]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	9,72	12,37	15,56	20,32		[16,81; 27,05]
Cis-chlordane											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Trans-chlordane											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ		NC
Oxychlordane											
Total	759	21,55	[19,67; 23,60]	7,81	12,20	22,1	37,47	55,81	73,6		[63,18; 83,34]
Âge (ans)											
18-29 ans	52	8,14	[7,28; 9,09]	4,56	6,25	8,36	10,48	12,55	14,33		[12,37; 16,52]
30-44 ans	196	15,28	[13,66; 17,09]	7,83	10,9	15,05	21,14	28,88	39,24		[26,99; 49,51]
45-59 ans	275	28,79	[26,36; 31,45]	14,62	20,53	28,62	38,85	56,95	69,51		[57,63; 84,92]
60-74 ans	236	45,83	[41,06; 51,14]	26,74	33,93	43,45	57,40	89,26	113,27		[90,40; 143,20]
Sexe											
Homme	338	22,36	[19,63; 25,48]	8,14	12,85	22,77	37,29	57,69	75,49		[61,61; 85,81]
Femme	421	20,83	[18,18; 23,87]	7,41	11,47	21,45	37,61	54,50	70,14		[58,23; 90,10]
Cis-nonachlore											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	1,00	13,36		[11,32; 14,73]
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	3,01	3,44		[2,91; 6,04]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	6,77	8,52		[6,44; 12,49]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	9,31	13,40		[9,58; 17,43]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	14,09	16,95		[14,29; 22,26]
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,18	14,79		[12,81; 17,46]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	8,18	11,31		[8,98; 12,77]
Trans-nonachlore											
Total	759	19,15	[17,38; 21,09]	6,56	11,28	19,7	34,52	52,83	62,08		[56,86; 73,84]

Âge (ans)											
18-29 ans	52	7,35	[6,25; 8,65]	3,57	5,23	7,53	10,55	13,22	14,53		[12,39; 15,83]
30-44 ans	196	13,04	[11,33; 15,02]	6,13	9,46	13,16	18,43	28,76	35,95		[29,72; 43,05]
45-59 ans	275	25,68	[23,56; 28,00]	13,72	18,50	24,89	35,08	49,92	62,89		[51,56; 77,04]
60-74 ans	236	42,03	[38,35; 46,06]	23,16	30,10	42,38	55,46	71,28	97,02		[72,16; 119,72]
Sexe											
Homme	338	22,55	[19,47; 26,13]	8,09	12,50	23,46	40,30	55,30	68,81		[57,60; 85,88]
Femme	421	16,49	[14,36; 18,95]	5,47	9,77	16,82	30,01	47,24	57,37		[54,57; 65,57]
Cis-Heptachlore epoxyde											
Total	759	18,10	[16,75; 19,56]	7,71	11,68	17,4	27,33	43,64	58,47		[50,25; 65,51]
Âge (ans)											
18-29 ans	52	9,82	[8,3; 11,61]	4,66	6,45	10,45	14,58	17,16	18,72		[16,58; 21,51]
30-44 ans	196	15,24	[13,59; 17,09]	7,47	11,07	15,35	22,03	29,53	36,41		[28,45; 52,45]
45-59 ans	275	20,65	[18,54; 23,00]	10,22	13,62	19,98	27,96	45,24	58,51		[45,02; 72,77]
60-74 ans	236	29,44	[25,68; 33,75]	12,05	18,87	29,32	43,60	65,06	97,48		[65,34; 142,01]
Sexe											
Homme	338	21,60	[19,22; 24,27]	9,30	13,94	20,83	32,95	49,96	61,31		[53,45; 78,02]
Femme	421	15,41	[13,85; 17,15]	6,37	10,48	14,68	23,37	35,65	51,50		[40,27; 63,19]
Trans-heptachlore epoxyde											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine											
Total	759	23,78	[21,87; 25,87]	10,23	14,69	23,34	36,46	58,05	80,78		[63,86; 97,45]
Âge (ans)											
18-29 ans	52	14,53	[11,90; 17,74]	5,87	8,73	15,63	21,57	29,53	39,02		[26,63; 55,06]
30-44 ans	196	19,21	[16,82; 21,94]	9,55	12,74	19,46	27,99	38,93	53,31		[38,01; 79,49]
45-59 ans	275	27,66	[24,21; 31,61]	13,07	17,02	25,61	38,93	66,21	108,27		[59,54; 158,51]
60-74 ans	236	36,34	[32,46; 40,69]	15,13	25,31	36,61	55,13	76,43	92,94		[77,28; 98,92]
Sexe											
Homme	338	29,46	[25,86; 33,57]	12,31	19,07	28,66	45,20	68,82	99,38		[75,34; 120,87]
Femme	421	19,57	[17,68; 21,66]	8,78	12,78	19,47	29,33	44,14	60,06		[50,37; 76,31]
Endrine											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex											
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,45	14,28		[12,58; 16,26]

Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,37	2,77	[2,25; 3,68]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	5,75	6,74	[7,19; 12,30]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	11,95	14,91	[12,25; 24,30]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	14,71	18,38	[15,21; 20,98]
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	12,81	14,68	[13,87; 19,38]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	10,06	12,19	[11,34; 13,76]
Chlorophénols (µg L-1)											
4-MCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,21	[<LOQ; 0,28]
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,23]
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,37	[<LOQ; 1,41]
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,19	[<LOQ; 0,27]
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	[<LOQ; 0,20]
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,16]
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,28	[0,20; 0,37]
2,4-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	[<LOQ; 0,22]
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,21]
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	[<LOQ; 0,27]
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,22]
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,21	[<LOQ; 0,44]
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,17]
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,19	[<LOQ; 0,28]
2,5-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,20	[<LOQ; 0,35]
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,25	[<LOQ; 1,33]
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,23]
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	1,47	[0,24; 4,97]
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,17	[<LOQ; 0,22]
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,39	[<LOQ; 1,27]
2,6-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,3,4-TCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
2,4,5-TCP											

Total	900	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						

2,4,6-TCP

Total	900	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						

TeCP

Total	900	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						

PCP

Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	0,23	[0,19; 0,28]
Âge (ans)										
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,26]
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,21	[0,16; 0,29]
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,18	0,28	[0,19; 0,52]
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,17	0,23	[0,18; 0,27]
Sexe										
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,16	0,26	[0,18; 0,38]
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,15	0,20	[0,18; 0,25]

Tableau 24. Distributions des concentrations sériques des OCS (ng g⁻¹ de lipides) et des concentrations urinaires des chlorophénols (µg g⁻¹ de créatinine) des adultes âgés de 18 à 74 ans, France continentale (2014-2016)

Biomarqueurs	n	MG	IC 95% MG	P10	P25	P50	P75	P90	P95	IC 95% P95
Organochlorés spécifiques (ng g⁻¹ de lipides)										
pp'DDT										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,57	2,36	4,00	5,93	[4,43;7,66]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,18	2,00	3,69	6,50	[3,53; 13,03]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,30	1,88	3,60	5,26	[2,79; 6,20]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,52	2,33	3,13	4,86	[3,41; 6,46]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	2,14	3,05	5,30	8,15	[5,85; 11,84]
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,66	2,27	3,95	5,19	[4,13; 6,55]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,46	2,39	3,99	6,59	[5,11; 9,42]
op'DDT										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
pp'DDE										
Total	759	64,85	[57,97; 72,55]	20,07	30,18	57,76	126,09	242,41	422,18	[331,36; 498,38]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	34,22	[27,15; 43,15]	14,10	19,16	26,75	46,16	120,67	231,15	[77,45; 408,84]
30-44 ans	196	46,10	[38,87; 54,67]	19,54	27,67	38,53	65,48	117,86	251,16	[114,88; 571,82]
45-59 ans	275	70,49	[60,60; 81,99]	23,27	38,11	67,56	124,69	213,66	346,08	[221,91; 523,93]
60-74 ans	236	142,04	[120,92; 166,85]	46,98	81,10	140,69	223,39	409,29	653,96	[415,89; 1 395,33]
Sexe										
Homme	338	59,32	[51,53; 166,29]	20,20	30,18	51,82	103,83	205,22	296,58	[216,55; 418,25]
Femme	421	70,34	[59,86; 82,64]	20,08	30,22	65,14	143,35	319,61	499,20	[359,35; 640,97]
op'DDE										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
α-HCH										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
β-HCH										
Total	759	13,07	[11,58; 14,76]	3,81	5,94	11,14	24,99	62,74	94,20	[72,77; 122,35]

Âge (ans)										
18-29 ans	52	4,59	[3,92; 5,36]	2,21	2,82	4,30	5,83	10,14	15,61	[7,36; 22,38]
30-44 ans	196	8,05	[7,07; 9,16]	3,90	5,16	7,49	10,90	17,74	29,22	[17,62; 67,61]
45-59 ans	275	16,79	[14,39; 19,6]	6,31	9,54	15,74	24,98	56,03	81,46	[57,42; 143,04]
60-74 ans	236	36,86	[31,21; 43,55]	12,30	21,94	36,15	68,85	121,4	143,69	[122,40; 172,79]
Sexe										
Homme	338	11,79	[10,02; 13,87]	3,67	5,58	9,90	22,33	48,10	71,83	[52,89; 93,39]
Femme	421	14,38	[12,03; 17,13]	3,83	6,29	12,21	28,45	75,41	111,1	[88,06; 138,61]
γ-HCH ou Lindane										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,65	2,15	2,92	4,01	[2,22; 5,18]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,79	2,17	2,54	3,02	[2,44; 3,77]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,64	2,06	2,61	3,05	[2,69; 4,86]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,56	1,99	2,87	3,80	[2,89; 10,73]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,75	2,36	4,09	7,38	[3,83; 8,65]
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,68	2,17	3,23	3,82	[3,82; 7,93]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	1,64	2,11	2,75	2,83	[2,83; 3,78]
Cis-chlordane										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Trans-chlordane										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Oxychlordane										
Total	759	3,55	[3,26; 3,87]	1,45	2,14	3,48	5,96	8,56	10,53	[9,44; 13,03]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	1,52	[1,36; 1,70]	0,81	1,15	1,57	1,99	2,41	2,90	[2,21; 3,44]
30-44 ans	196	2,59	[2,37; 2,84]	1,48	2,00	2,56	3,33	4,62	5,83	[4,73; 8,20]
45-59 ans	275	4,48	[4,09; 4,90]	2,31	3,18	4,58	6,29	8,59	10,05	[8,79; 13,81]
60-74 ans	236	7,18	[6,50; 7,93]	4,30	5,34	6,76	8,86	13,97	17,55	[14,62; 24,65]
Sexe										
Homme	338	3,72	[3,30; 4,19]	1,53	2,21	3,74	5,81	8,79	11,53	[9,37; 14,49]
Femme	421	3,41	[3,01; 3,87]	1,35	2,05	3,29	6,09	8,38	9,95	[8,84; 11,45]
Cis-nonachlore										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,57; 2,00]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[0,49; 2,00]
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,10; 2,00]
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,44; 2,00]
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,10	2,64	[2,31; 4,15]
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,34	[2,00; 2,77]
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,31; 2,00]
Trans- nonachlore										
Total	759	3,16	[2,89; 3,44]	1,21	1,92	3,22	5,36	7,86	9,56	[8,59; 10,76]

Âge (ans)										
18-29 ans	52	1,38	[1,17; 1,62]	0,65	0,96	1,42	2,00	2,46	2,89	[2,21; 3,51]
30-44 ans	196	2,21	[1,96; 2,50]	1,16	1,68	2,17	3,10	4,29	5,13	[4,38; 6,27]
45-59 ans	275	4,00	[3,66; 4,37]	2,19	2,84	4,05	5,51	7,57	9,35	[7,73; 12,52]
60-74 ans	236	6,58	[6,06; 7,14]	3,91	4,85	6,47	8,26	11,05	14,17	[10,96; 22,37]
Sexe										
Homme	338	3,75	[3,29; 4,27]	1,49	2,25	3,92	6,06	8,61	10,86	[9,12; 12,67]
Femme	421	2,70	[2,37; 3,07]	0,98	1,69	2,75	4,66	7,08	8,33	[7,62; 9,26]
Cis-Heptachlore epoxyde										
Total	759	2,99	[1,38; 2,02]	1,38	2,02	2,87	4,34	6,67	8,74	[7,72; 10,03]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	1,84	[1,56; 2,17]	0,84	1,23	2,01	2,73	3,15	3,41	[3,05; 4,06]
30-44 ans	196	2,59	[2,34; 2,87]	1,38	1,98	2,65	3,54	4,75	5,60	[4,66; 7,11]
45-59 ans	275	3,22	[2,88; 3,60]	1,59	2,21	3,04	4,52	6,88	8,64	[7,16; 11,24]
60-74 ans	236	4,61	[4,04; 5,26]	1,93	2,88	4,56	6,63	10,28	15,03	[10,37; 27,76]
Sexe										
Homme	338	3,59	[3,23; 3,40]	1,70	2,43	3,38	5,22	7,37	9,45	[7,74; 12,49]
Femme	421	2,53	[2,29; 2,80]	1,12	1,80	2,50	3,48	5,54	7,94	[6,20; 9,88]
Trans-heptachlore epoxyde										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Aldrine										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Dieldrine										
Total	759	3,92	[3,63; 4,24]	1,81	2,52	3,89	5,78	8,86	12,37	[9,69; 14,38]
Âge (ans)										
18-29 ans	52	2,73	[2,25; 3,31]	1,09	1,69	3,11	3,94	5,51	7,02	[5,19; 9,58]
30-44 ans	196	3,26	[2,89; 3,68]	1,80	2,28	3,25	4,56	7,05	7,82	[7,45; 8,21]
45-59 ans	275	4,31	[3,78; 4,91]	2,09	2,70	4,13	5,94	9,82	15,34	[9,03; 24,28]
60-74 ans	236	5,69	[5,90; 6,36]	2,53	3,92	5,57	8,55	12,43	14,36	[12,57; 17,71]
Sexe										
Homme	338	4,90	[4,35; 5,52]	2,17	3,32	4,74	7,25	10,69	14,61	[11,88; 19,72]
Femme	421	3,20	[2,92; 3,51]	1,55	2,20	3,13	4,63	6,95	8,95	[7,60; 11,87]
Endrine										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Âge (ans)										
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Sexe										
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC
Mirex										
Total	759	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2	2,62	[2,01; 2,42]

Âge (ans)											
18-29 ans	52	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[0,49; 2,00]	
30-44 ans	196	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[0,95; 2,00]	
45-59 ans	275	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,38	[2,08; 3,40]	
60-74 ans	236	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,34	3,09	[2,35; 3,93]	
Sexe											
Homme	338	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,08	2,39	[2,19; 2,79]	
Femme	421	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	2,00	2,00	[1,42; 2,00]	
Chlorophénols ($\mu\text{g g}^{-1}$ de créatinine)											
4-MCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,354	[0,35; 0,43]	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,26]	
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,79	[<LOQ; 2,53]	
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,36	[<LOQ; 0,43]	
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,36	[<LOQ; 0,45]	
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,33]	
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,46	[0,35; 0,71]	
2,4-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,323	[<LOQ; 0,38]	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,58]	
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,24	[<LOQ; 0,37]	
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,35]	
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,47	[<LOQ; 0,76]	
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,31]	
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,42	[<LOQ; 0,60]	
2,5-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,387	[<LOQ; 0,53]	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; <LOQ]	
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,39	[<LOQ; 1,30]	
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	[<LOQ; 0,35]	
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,52	2,85	[0,54; 7,82]	
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,28	[<LOQ; 0,38]	
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,71	[<LOQ; 1,65]	
2,6-DCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
2,3,4-TCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	
2,4,5-TCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	NC	

Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						
2,4,6-TCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						
TeCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	NC						
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	NC						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	NC						
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	NC						
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	NC						
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	NC						
Fille	507	NC	NC	<LOQ	NC						
PCP											
Total	900	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,27	0,39	[0,33; 0,45]	
Âge (ans)											
18-29 ans	54	NC	NC	<LOQ	[<LOQ; 0,31]						
30-44 ans	213	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,31	0,41	[0,21; 0,41]
45-59 ans	334	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,30	0,42	0,42	[0,33; 0,54]
60-74 ans	299	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,36	0,42	0,42	[0,38; 0,45]
Sexe											
Garçon	393	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,25	0,34	0,34	[0,27; 0,51]
Fille	507	NC	NC	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	0,29	0,39	0,39	[0,33; 0,42]