

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 30 juillet 2024

Appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif au développement d'une méthodologie de suivi des tendances en matière de contamination par le chlordécone des aliments produits localement par les professionnels ou les particuliers détenteurs de jardins familiaux (JaFa) aux Antilles françaises.

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.
Elle contribue également à assurer la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux, l'évaluation des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des aliments et, en évaluant l'impact des produits réglementés, la protection de l'environnement.
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du Code de la santé publique).
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

L'Anses a été saisie le 6 juillet 2023 par la Direction générale de l'alimentation (DGAI) et la Direction générale de la santé (DGS) pour la réalisation de l'appui scientifique et technique suivant : Demande d'un avis relatif au développement d'une méthodologie de suivi des tendances en matière de contamination par le chlordécone des aliments produits localement par les professionnels ou les particuliers détenteurs de jardins familiaux (JaFa) aux Antilles françaises.

Sigles et abréviations	3
1. CONTEXTE ET OBJET DE LA DEMANDE	3
2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE	4
3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ERCA	5
3.1. Aide à la mise en place d'un plan de suivi de la contamination en chlordécone des aliments issus du circuit contrôlé	5
3.1.1. Choix des aliments à suivre	5
3.1.2. Intervalle de temps entre deux périodes de prélèvements	7
3.1.3. Paramètres statistiques du plan de suivi	7
3.1.4. Présentation de l'outil de simulation (R-Shiny)	11
3.1.5. Exemple de configuration d'un plan de suivi possible	13
3.1.6. Conclusions et suite à donner concernant les modalités de prélèvements	15
3.2. Recommandations dans le cadre de l'acquisition de nouvelles données de contamination d'aliments issus du programme des Jardins Familiaux (JAFA)	16
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE	17
MOTS-CLÉS	19
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	19
Annexe 1 : Liste des intervenants	20
Annexe 2 : Exemple – simulation du nombre de prélèvements nécessaires pour des aliments d'intérêt dans le cadre d'un plan de suivi de la contamination des aliments dans le temps.	22
Annexe 3 - Illustration de l'outil informatique interactif développé	30

Sigles et abréviations

AST	: Appui scientifique et technique
CES	: Comité d'experts spécialisés
ERCA	: Evaluation des risques physico-chimiques dans les aliments
DGAL	: Direction générale de l'Alimentation
DGS	: Direction générale de la Santé
DGT	: Direction générale du Travail
JaFA	Jardins Familiaux
LMR	Limite maximale de résidus
LB/UB	Hypothèse de censure « Lower-bound » et « Upper-bound »
LOD/LOQ	Limite de détection / Limite de quantification
PNAC4	Plan National Chlordécone N°4
PSPC	: plans de surveillance et de contrôle
VTR	Valeur Toxicologique de Référence
ZC/ZNC	Zone réputée contaminée / Zone réputée non contaminée ¹

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA DEMANDE

Le plan chlordécone N°4 (PNAC4) 2021-2027 vise à amplifier les mesures de protection de la santé de la population antillaise contre les risques liés au chlordécone, avec, entre autres, des mesures permettant de réduire l'exposition des consommateurs au chlordécone et tendre vers le « zéro chlordécone » dans l'alimentation. La poursuite de cet objectif passe notamment par :

- la mise en œuvre de mesures d'accompagnement des agriculteurs leur permettant de mettre sur le marché des productions végétales non contaminées (diagnostic de l'état de contamination éventuelle des sols et conseil agronomique) ;
- le développement de solutions de décontamination des animaux élevés en zone réputée contaminée ;
- le maintien d'une pression de contrôle élevée sur les denrées alimentaires.

La mesure de l'abaissement au cours du temps du niveau de contamination des aliments par le chlordécone constitue un critère d'évaluation de l'efficacité des actions menées. Cette mesure sera permise au travers du plan de suivi de la contamination en chlordécone des aliments locaux produits, d'une part par les professionnels dans le cadre de circuits formels, d'autre part par les particuliers détenteurs d'un jardin familial, l'autoproduction constituant une pratique d'approvisionnement importante économiquement et socialement aux Antilles.

Ce plan de suivi doit être établi pour les aliments les plus contributeurs à l'exposition tels que définis par l'Anses dans son avis de décembre 2022 (relatif à la réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la construction et la mise à jour de valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone) et sur la base d'un protocole stabilisé dans la durée.

¹ Dans le rapport Kannari, deux zones ont été définies, basées sur les ratios de surface de sol contaminé sur la surface agricole utile de la commune, selon la cartographie effectuée par la DAAF actualisée en 2013 :

- Zones réputées contaminées (ZC) : commune avec plus de 30% de sols contaminés
- Zones réputées non contaminées (ZNC) : commune avec moins de 30% de sols contaminés

Par la suite, les expositions ont été calculées en fonction de ces zones qui ont été utilisées pour caractériser le lieu de résidence des individus mais aussi la zone d'approvisionnement des aliments consommés.

L'information dynamique obtenue par le suivi de l'évolution tendancielle du niveau de contamination des aliments doit permettre d'adapter les mesures de gestion du risque et, le cas échéant, d'adopter des mesures de gestion supplémentaires.

En effet, le dispositif pérenne des plans de surveillance et de contrôle des produits mis sur le marché n'est pas un outil qui permet de mettre en évidence de telles tendances de par sa conception et en particulier de par des stratégies de prélèvements (stratégie de ciblage, nombre variable d'échantillons/an, etc.) visant d'autres objectifs qu'un suivi longitudinal. Il importe donc de réfléchir à une méthodologie adaptée à l'objectif visé de suivi de l'évolution de la contamination en chlordécone des aliments au cours du temps.

Par ailleurs, depuis la réunion interministérielle du 24 avril 2023, dans le cadre du programme des Jardins Familiaux (JaFa), des analyses gratuites des denrées alimentaires contribuant le plus à l'exposition au chlordécone -dont les œufs- sont possibles pour les particuliers. A l'instar de ce qui existe pour les analyses de sols effectuées dans le cadre du programme JaFa qui viennent alimenter la cartographie des sols, il est nécessaire de disposer, lors de la mise en place de ce nouveau service proposé à la population, d'une méthodologie de recueil et d'exploitation de ces nouvelles analyses.

Une expertise de l'Anses est sollicitée afin :

- dans un premier temps, d'évaluer la faisabilité d'une telle méthodologie au regard des données existantes sur les produits commercialisés via les circuits formels (volumes, diversité des catégories de produits, origine des produits...);
- puis, le cas échéant, de développer, pour ces mêmes circuits, une méthodologie de prélèvement visant à évaluer, sur une période pluriannuelle, l'évolution du niveau de contamination par le chlordécone des aliments sélectionnés dans le plan d'échantillonnage ;
- enfin, concernant les productions issues des jardins familiaux, de formuler des recommandations sur la mise en œuvre des analyses gratuites des œufs et des autres denrées alimentaires. L'objectif est que les données qui en seront issues permettent, d'une part, la réévaluation des mesures de gestion (pratiques de jardinage) mises en œuvre par le programme JaFa, d'autre part, d'alimenter en données une réévaluation des risques sanitaires et enfin de suivre l'évolution tendancielle du niveau de contamination des aliments les plus contributeurs à l'exposition provenant des jardins familiaux.

Pour les circuits formels, la saisine mentionne que la méthodologie de prélèvements à mettre en œuvre devra pouvoir être dimensionnée pour ne pas générer un volume de prélèvements annuel de plus de 300 échantillons à analyser auquel s'ajouteront les données issues du programme JaFa.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (janvier 2024) ».

L'expertise réalisée relève du domaine de compétences du CES « Evaluation des risques physico-chimiques dans les aliments » (ERCA). Trois experts rapporteurs ont travaillé à un

argumentaire qui a été présenté au CES ERCA de janvier 2024 à juillet 2024. Le présent AST a été validé par le CES ERCA les 18 juin et 11 juillet 2024.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ERCA

Dans cet AST, un « échantillon » correspond à un aliment donné, prélevé sur le terrain (lieu de production ou d'approvisionnement), puis analysé pour fournir une mesure de contamination individuelle.

3.1. Aide à la mise en place d'un plan de suivi de la contamination en chlordécone des aliments issus du circuit contrôlé

La mise en place d'un plan de suivi de la contamination des aliments en chlordécone dans le temps nécessite plusieurs arbitrages, sur :

- le choix des aliments à suivre ;
- l'intervalle de temps entre deux périodes de prélèvements ;
- les indicateurs de suivi de la contamination ;
- le nombre d'échantillons à prélever ;
- les modalités de prélèvement des échantillons sur le terrain.

Les 2 premiers items font l'objet des paragraphes 3.1.1 et 3.1.2. Les 3 derniers items seront considérés au paragraphe 3.1.3 qui présente l'outil proposé pour aider à la configuration du plan de suivi.

Ces arbitrages appartiennent au gestionnaire au regard des objectifs qu'il souhaite atteindre. Les experts ont souhaité apporter des éclairages scientifiques et un outil de simulation pour aider le gestionnaire à faire des choix éclairés et à configurer ce plan de suivi en fonction de ses objectifs.

Ainsi, cet AST présente :

- les options, recommandations et points de vigilance formulés par les experts pour aider le gestionnaire à configurer son plan de suivi ;
- un outil informatique interactif permettant au gestionnaire de comparer différents types/options/choix de plan de suivi ;
- un exemple de configuration de plan de suivi possible.

3.1.1. Choix des aliments à suivre

Il s'agit d'identifier les aliments à suivre parmi les aliments contributeurs à l'exposition au chlordécone en circuit formel. La contribution d'un aliment correspond au pourcentage de l'exposition attribuable à cet aliment, au regard de son niveau de consommation et de contamination. La contribution est un paramètre qui s'apprécie généralement à l'échelle d'une population. Si elle est considérée à l'échelle de la population dans sa globalité, cela revient à évoquer une **contribution à l'exposition moyenne**. Il est aussi possible de considérer la contribution d'un aliment uniquement pour les individus dont l'exposition dépasse la VTR (0.17 µg/kg pc/j) (Anses, 2022). Dans ce cas, il est question de **contribution au risque**.

Dans le cadre de cet AST, il est proposé de prendre en compte les principaux aliments contributeurs identifiés dans le dernier avis d'évaluation des risques (Anses, 2022), et approvisionnés exclusivement en circuit formel (zone réputée contaminée –ZC- et zone réputée non contaminée –ZNC-). Ont été retenus ceux contribuant au minimum à 2% de l'exposition moyenne et/ou au risque en Guadeloupe et/ou en Martinique pour les enfants comme pour les adultes, sans distinction d'une contribution découlant d'une forte consommation, ou d'une contamination élevée. Le Tableau 1 ci-dessous présente cette liste d'aliments par groupe de population, par zone et par île. Dans certains cas de figure, la somme de ces contributeurs peut s'approcher de 40% de l'exposition.

Les experts estiment pertinent de se placer à l'échelle des aliments plutôt que des groupes d'aliments, afin de limiter la variabilité supplémentaire liée au mélange d'espèces/catégories d'aliments figurant dans un même groupe.

Tableau 1 : Principaux aliments contributeurs à au moins 2% de l'exposition (issus des circuits formels). Le niveau de contribution est indiqué entre parenthèses.

	Contributeur à l'exposition moyenne	Contributeur au risque
Guadeloupe		
Enfants	ZNC : vivaneau (3%), melon/pastèque (4%) ZC : poisson volant (3%)	ZNC : écrevisses ouassous (27%), vivaneau (10%) ZC : -
Adultes	ZNC : poireau cive (10%), madère/dachine (3.5%), melon/pastèque (2%) ZC : poireau cive (4%), madère/dachine (4%)	ZNC : thazard (4%), poireau cive (2.5%), poisson volant (2%) ZC : madère/dachine (2%)
Martinique		
Enfants	ZNC : vivaneau (13%), thon (6%), poisson volant (3%), volaille (3%), cardinal (2%), thazard (2%) ZC : vivaneau (13%), bœuf/veau (3%), thon (3%)	ZNC : - ZC : -
Adultes	ZNC : vivaneau (11%), langoustes (4%), poisson volant (3%), volaille (2.5%) ZC : vivaneau (8%), langoustes (3%), thons (3%), thazard (3%)	ZNC : crabes ciriques (20%), vivaneau (3%), écrevisses ouassous (3%), thazard (2.5%) ZC : écrevisses ouassous (21%), langoustes (9%)

« - »: signifie qu'il n'y a pas d'aliments issus du circuit formel contribuant au minimum à 2%

Le CES attire l'attention du gestionnaire sur le fait que cette liste est susceptible d'évoluer en fonction de l'actualisation des estimations d'expositions des populations antillaises à venir suite à la prise en compte des données de contaminations de l'enquête Chloexpo, actuellement en cours de traitement au sein de l'agence.

3.1.2. Intervalle de temps entre deux périodes de prélèvements

Les propriétés physico-chimiques du chlordécone - solubilité dans l'eau relativement faible, lipophilie, forte adsorption sur la matière organique, forte stabilité chimique, faible biodégradabilité - lui confèrent une forte persistance dans les sols et les sédiments (INERIS, 2024)². Les données disponibles indiquent par exemple que la demi-vie du chlordécone dans les sols est vraisemblablement de l'ordre de quelques décennies (Fernandez-Bayo et al. 2013, Saaidi et al. 2023).

En milieu terrestre, la décroissance des concentrations environnementales en chlordécone est liée d'une part à son absorption par la végétation et à son transfert à l'ensemble du biote via les réseaux trophiques terrestres et d'autre part à son transfert aux eaux superficielles et aux eaux souterraines sous forme soluble et surtout particulaire via les processus érosifs (transport solide).

Les informations disponibles indiquent que la décroissance de la contamination en milieu terrestre est lente, comme en témoignent également les concentrations élevées encore présentes dans les différents compartiments environnementaux plusieurs décennies après l'interdiction de la molécule. Aussi, si l'on souhaite mettre en évidence une diminution de la contamination par le chlordécone dans les denrées alimentaires d'origine terrestre, il convient de prévoir une stratégie d'échantillonnage avec un pas de temps aussi long que possible entre deux campagnes successives de prélèvements.

En milieu aquatique, les transferts au biote s'effectuent à partir des matières en suspension (MES) et des sédiments via des interactions trophiques plutôt que par contact avec l'eau (Dromard et al., 2018). De la même manière qu'en milieu terrestre, un pas de temps aussi long que possible entre deux prélèvements successifs est le plus à même de mettre en évidence une réduction des niveaux de chlordécone dans les organismes aquatiques.

Compte tenu du temps de demi-vie du chlordécone dans l'environnement - plusieurs dizaines d'années selon les sources - et eu égard au pas de temps de l'exercice tel que défini par le gestionnaire, si aucune mesure de gestion n'était prise, l'observation d'une potentielle décroissance du chlordécone dans l'environnement, donc dans la plupart des aliments contributeurs et in fine de l'exposition du consommateur antillais, ne serait pas objectivable à court ou moyen terme. Il est donc clair que faire reposer un calcul de périodicité seulement sur le temps de demi-vie du chlordécone n'aurait pas de sens. **En conclusion, cette périodicité et sa détermination reviennent au gestionnaire, l'évaluateur recommandant toutefois d'espacer de plusieurs années les périodes de prélèvement et d'interprétation (e.g. quatre à cinq ans) pour que la décroissance de la contamination consécutive à une ou plusieurs mesures de gestion soit objectivable.**

3.1.3. Paramètres statistiques du plan de suivi

La puissance statistique est souvent utilisée pour la planification expérimentale, dans de nombreux domaines (Fosgate 2009, Wellen et al. 2020). C'est un outil utile pour déterminer le nombre d'échantillons minimal permettant de détecter une différence dans la variable d'intérêt, dans notre cas une différence dans le taux de contamination entre deux périodes d'observation. Le niveau de différence ciblé doit être fixé en fonction des objectifs pratiques de l'utilisateur.

Formellement, la puissance statistique désigne la probabilité d'éviter une erreur de type II dans un test d'hypothèse. Dans notre cas, l'erreur de type II correspond à une situation où il existe une

² <https://substances.ineris.fr/substance/143-50-0>

évolution du taux de contamination dans le temps mais où un test statistique comparant le taux de contamination au cours de deux périodes différentes nous conduit à conclure à tort à une absence d'évolution de ce taux de contamination (Figure 1). Pour limiter ce type d'erreur, il est nécessaire de s'assurer que la puissance du dispositif de surveillance est élevée. En pratique, on cherche souvent à atteindre une puissance d'au moins 80%, de manière à avoir 8 chances sur 10 de détecter une variation qui existe, ce que revient à une erreur de type II de 20% (une chance sur cinq de conclure à tort à une absence d'évolution).

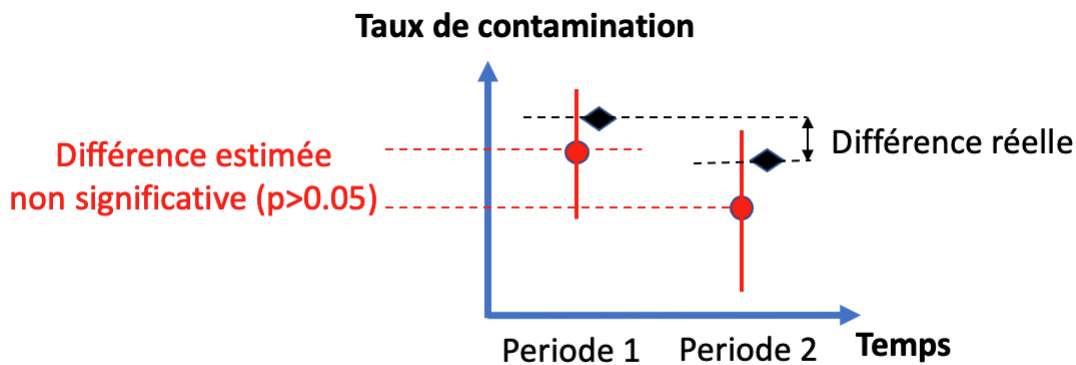


Figure 1. Illustration d'une erreur de type II due à une puissance insuffisante. Les points rouges représentent des moyennes observées à partir de N échantillons à chaque période. Les barres rouges représentent des intervalles de confiance des moyennes observées. Les losanges noirs sont les vraies valeurs du taux de contamination. Ici, il y a bien une différence entre les taux de contaminations aux différentes périodes, mais elle n'est pas détectée par le test statistique.

La puissance augmente avec le nombre d'échantillons (Figure 2). Le choix d'un nombre d'échantillons trop faible peut conduire à une puissance tellement basse que le dispositif mis en place n'aura **quasiment aucune chance de détecter** une évolution temporelle du taux de contamination, même si cette évolution existe en réalité. Il est donc utile de calculer la puissance d'un dispositif de surveillance pour un nombre croissant d'échantillons afin d'identifier le nombre d'échantillons minimal permettant d'atteindre un niveau de puissance élevé. Dans cet AST, on considère une situation où deux lots d'échantillons ont été prélevés à deux périodes différentes, et on souhaite déterminer le nombre d'échantillons minimal permettant de détecter une évolution du taux de contamination entre les deux périodes. Dans ce contexte, la puissance dépend de plusieurs éléments :

- i. le nombre d'échantillons réalisés à la première et à la seconde période,
- ii. la différence minimale que l'on souhaite détecter entre les deux périodes avec le dispositif de surveillance mis en place,
- iii. la variabilité du niveau de contamination des échantillons à chaque période (écart-type),³
- iv. le type de test statistique utilisé pour tester les différences de niveau de contamination entre les deux périodes.

On considère par exemple que l'on souhaite détecter une variation temporelle égale à la moitié de la valeur de l'écart-type du niveau de contamination des échantillons (ex : si l'écart-type du

³ Dans le cas d'une comparaison de moyenne avec un test de Student, la puissance est une fonction du rapport entre la différence détectable et l'écart-type du niveau de contamination des échantillons. La puissance est alors identique avec une différence de 1 et un écart-type de 1 et avec une différence de 5 et un écart-type de 5.

niveau de contamination des échantillons est de $10 \mu\text{g kg}^{-1}$, le dispositif permettra de détecter des variations temporelles de l'ordre de $5 \mu\text{g kg}^{-1}$). Dans ce cas précis, le calcul de puissance montre qu'il faut au moins 64 échantillons à chaque période pour obtenir une puissance de 80%.

Une augmentation du nombre d'échantillons permettra d'augmenter la puissance. Mais il est également possible d'augmenter la puissance en adoptant deux autres stratégies décrites ci-dessous (Figure 2).

Un premier levier est la variation minimale que l'on souhaite détecter entre deux dates d'observation. Plus cette variation est grande, plus la puissance est élevée car on a plus de chance de détecter des variations importantes que des variations faibles pour un nombre d'échantillons donné, ayant une variabilité donnée. Il est donc possible d'augmenter la puissance en diminuant le niveau de détection ciblé par le dispositif de surveillance, c'est-à-dire en ne cherchant à détecter que les fortes variations temporelles du taux de contamination et en ignorant les variations plus faibles.

Un second levier consiste à diminuer la variabilité du niveau de contamination des échantillons, c'est-à-dire diminuer leur écart-type (Figure 2). Dans ce sens, un travail complémentaire sera mené pour définir des protocoles d'échantillonnage par aliment permettant de minimiser la variabilité des résultats de contamination. Des pistes sont déjà identifiées, notamment en fiabilisant les protocoles d'échantillonnage comme suit :

- restreindre l'échantillonnage à une zone très homogène (type de sol, pluviométrie, couvert végétal, cultures...). En effet, des taux de contamination des échantillons collectés dans une grande région très hétérogène auront de grande chance d'être très variables, alors que des échantillons prélevés sur une parcelle unique très homogène présenteront au contraire une variabilité plus faible du taux de contamination. En d'autres termes, la puissance sera plus grande en concentrant les échantillons sur une petite zone géographique homogène. Cependant, cette stratégie a une conséquence importante : la portée de la conclusion dépendra étroitement de la zone sélectionnée ;
- en milieu marin, procéder à une identification précise des espèces, de l'âge des spécimens prélevés (effet lié à l'accumulation surtout sur les hauts niveaux trophiques) ou bien la zone de pêche (compte tenu d'un gradient de contamination du littoral vers le large). Une bioaccumulation peut s'effectuer à partir des organismes s'alimentant au contact des sédiments et des matières en suspension. Les organismes animaux ayant un niveau trophique élevé sont potentiellement les plus contaminés (Dromard et al. 2018) et peuvent le rester assez longtemps eu égard aux fortes contaminations passées et aux transferts continus du milieu terrestre vers le milieu marin et au sein des milieux marins.

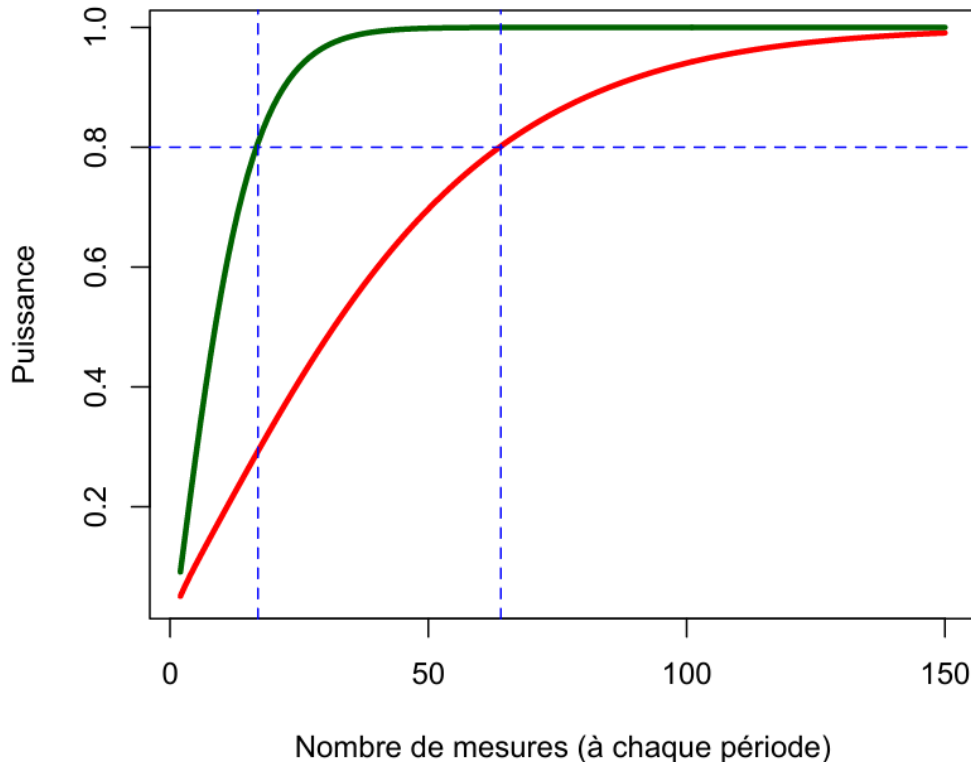


Figure 2. Stratégies d'augmentation de la puissance. La courbe rouge correspond aux valeurs de puissance présentées dans l'exemple initial. La courbe verte est obtenue soit en doublant le niveau de variation temporelle détectable souhaité (ex : variation détectable de $10 \mu\text{g.kg}^{-1}$ au lieu de $5 \mu\text{g.kg}^{-1}$), soit en diminuant de 50% l'écart-type du niveau de contamination des échantillons (ex : écart-type de $5 \mu\text{g.kg}^{-1}$ au lieu de $10 \mu\text{g.kg}^{-1}$).

La puissance d'un dispositif est donc la résultante de différents arbitrages concernant le niveau détectable d'évolution du taux de contamination (différence minimale de taux de contamination que l'on souhaite détecter entre les périodes), l'étendue de la zone géographique ciblée (zone restreinte assez homogène vs. zone large plus hétérogène), l'homogénéité des aliments échantillonnés (taille, catégorie etc.), et les moyens disponibles (en particulier, le nombre d'échantillons). Ces arbitrages doivent être réalisés par le commanditaire du dispositif car il dépend directement de la connaissance terrain des acteurs/filières de la zone géographique ciblée et des objectifs opérationnels visés.

La figure 2 illustre les enjeux de cet arbitrage. Dans cet exemple, on montre que la puissance est fortement augmentée en multipliant par deux le niveau de variation temporelle détectable du dispositif, c'est-à-dire en se contentant de détecter des variations temporelles de $10 \mu\text{g kg}^{-1}$ au lieu de $5 \mu\text{g kg}^{-1}$. En supposant comme précédemment que l'écart-type du niveau de contamination des échantillons est de $10 \mu\text{g kg}^{-1}$, on peut alors atteindre une puissance de 80% avec seulement 17 échantillons à chaque période au lieu de 64 échantillons. Cependant, dans ce cas, le dispositif aura peu de chance de détecter des variations temporelles d'une amplitude inférieure à $10 \mu\text{g kg}^{-1}$. Une autre façon d'obtenir le même niveau de puissance consiste à diminuer l'écart-type du niveau de contamination des échantillons d'un facteur deux (c'est-à-dire, ici, à $5 \mu\text{g kg}^{-1}$), par exemple en restreignant fortement la zone géographique couverte. Dans ce cas, on aura de bonnes chances de détecter des variations temporelles de seulement $5 \mu\text{g kg}^{-1}$ mais la portée de la conclusion sera dépendante du caractère représentatif ou non de la zone couverte.

En pratique, il y a plusieurs manières d'utiliser la puissance statistique. Une première approche consiste à fixer les quatre éléments (i, ii, iii, iv) listés au début de cette partie, puis à calculer la puissance statistique correspondante. Cette première approche est pertinente lorsque l'on dispose d'un dispositif de surveillance préexistant et que l'on souhaite évaluer la puissance de ce dispositif.

Une autre approche consiste à fixer le niveau de puissance souhaité ainsi que les éléments ii, iii, et iv, puis à calculer le nombre d'échantillons minimal permettant d'atteindre la puissance visée. Cette seconde approche est adaptée lorsque l'on souhaite mettre en place un nouveau dispositif de surveillance et que le nombre d'échantillons n'est pas fixé a priori. Elle est illustrée dans la figure 2, et par un exemple (cf 3.1.5).

Enfin, une troisième approche consiste à fixer le niveau de puissance ainsi que les éléments i, iii, iv, puis à déterminer le niveau de diminution de contamination que le dispositif sera capable de détecter avec le nombre d'échantillons disponible et la puissance voulue. Cette approche est particulièrement adaptée lorsque le nombre d'échantillons est très contraint et qu'on n'a pas d'idée a priori sur la différence que l'on souhaite détecter.

Dans notre cas, les deux dernières approches sont les plus pertinentes, une puissance de 80% étant fixée a priori.

3.1.4. Présentation de l'outil de simulation (R-Shiny)

Une application de type *R-Shiny* (<https://ers-alim.shinyapps.io/Chld-PlanSuivi/>), disposant d'une interface utilisateur, a été développée afin de rendre accessible et dynamique l'exploration et la visualisation interactive des données de contamination en chlordécone des aliments prélevés aux Antilles. L'annexe 3 présente plus en détails les différentes possibilités offertes par cette application.

Les données utilisées par cette application correspondent :

- aux données utilisées dans le cadre de l'expertise Anses de 2018 (Anses, 2018) en lien avec l'étude Kannari 1, avec des échantillons prélevés au cours de différentes campagnes de prélèvements entre 2009 et 2016 ;
- aux données collectées dans le cadre des plans de surveillance et plans de contrôles (PS/PC), avec des échantillons prélevés entre 2014 et 2021 ; ces données mises à jour ont été utilisées dans le cadre de l'expertise Anses de 2022 (Anses, 2022)⁴ ;
- aux données issues des PS/PC, avec des échantillons prélevés entre 2022 et 2023. Ces données, post expertise Anses de 2022 n'ont à ce jour pas été utilisées.

Ces données de contamination, combinées et harmonisées à partir des différentes sources, concernent 65 aliments (végétaux, produits carnés et produits de la pêche), répartis dans 16 groupes d'aliments.

Deux hypothèses de censure ont été utilisées pour avoir une estimation quantitative de la contamination :

- hypothèse basse dite « lower bound (LB) » où toutes les valeurs non détectées (inférieur à la LOD) sont fixées à zéro et où toutes les valeurs non quantifiées (inférieures à la LOQ) sont fixées à la LOD ;

⁴ Le détail des différentes campagnes de prélèvement est indiqué dans le chapitre « 4.1.1 Description des données utilisées » de l'avis Anses relatif à la réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la construction et la mise à jour de valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone (novembre 2022).

- hypothèse haute dite « upper bound (UB) » où toutes les valeurs non détectées (inférieures à la LOD) sont fixées à la LOD et où toutes les valeurs non quantifiées (inférieures à la LOQ) sont fixées à la LOQ.

L'application permet de distinguer :

- les aliments issus des circuits contrôlés (grande et moyenne surfaces, épiceries, poissonniers, bouchers, marchés...) de ceux provenant des circuits informels (autoproduction, dons, vente en bords de route) ;
- les lieux de prélèvements des aliments (l'île, ZC, ZNC, zone inconnue et hors zone) ;
- les années de prélèvement ;
- les deux hypothèses de censure (LB et UB).

L'application a été développée dans le but d'éclairer les choix pour la configuration du futur plan de suivi. Elle propose ainsi de s'appuyer sur les connaissances existantes (partie descriptive des données de contamination) pour identifier des aliments d'intérêt et, dans un second temps, simuler pour ces aliments, différents scénarios de configuration de plan de suivi. Elle permet ainsi de:

1. visualiser les données de contamination par :

- nombre d'échantillons à prélever en fonction de l'île, de la catégorie ou du groupe d'aliments, du taux de censure, du circuit d'approvisionnement, de la zone de prélèvement (ZC ou ZNC)
- niveau de contamination en affichant :
 - la proportion d'échantillons dont le niveau de contamination dépasse la LMR ;
 - la distribution des données de contamination ;
- une sélection des aliments en fonction de critères, fixés par l'utilisateur, comme par exemple :
 - tous les aliments dont la contamination moyenne par an dépasse une certaine valeur ;
 - tous les aliments dont le pourcentage de fortes contaminations/an (au-delà d'un seuil fixé) dépasse un certain pourcentage ;
 - tous les aliments dont le taux de détection dépasse un certain pourcentage ;
- un classement des aliments contributeurs à l'exposition moyenne et/ou contributeurs au risque ;

2. réaliser des calculs de puissance et de nombre minimum d'échantillons⁵ pour différents types d'aliments produits ou pêchés aux Antilles et pour deux types de comparaison :

⁵ Dans cet outil de simulation, les calculs de puissance/nombre minimal de prélèvements sont réalisés avec les fonctions power.t.test et power.prop.test du logiciel R.

- des comparaisons de moyennes de contamination entre deux périodes de prélèvement (en s'appuyant sur la contamination moyenne – et son écart-type- interannuelle des années passées) ;
- des comparaisons de proportions de dépassement d'une valeur de contamination élevée (ex : nombre d'échantillons dont la valeur dépasse trois fois la LMR) entre deux périodes de prélèvement.

3.1.5.Exemple de configuration d'un plan de suivi possible

Afin d'illustrer plus précisément la configuration d'un plan de suivi possible dans le temps de la contamination des aliments, le CES propose de décrire les différents paramétrages du plan à travers l'exemple suivant.

Concernant tout d'abord le choix des aliments, ont été retenus en priorité les aliments contributeurs au risque présentant des niveaux de contamination encore élevés et pour lesquels une diminution de la contamination dans le temps sera susceptible d'entraîner un impact sur le niveau de risque. La sélection des aliments a aussi pris en compte la nécessité de couvrir :

- la Martinique et/ou la Guadeloupe ;
- les ZC et/ou les ZNC ;
- la nature différente des aliments (végétaux, animaux terrestres et produits de la pêche) ;
- la possibilité ou non d'instaurer ou de renforcer les mesures de gestion en lien avec ces aliments.

Les aliments suivants ont finalement été sélectionnés : écrevisses ouassous, crabes ciriques, langoustes, vivaneaux, thazards, poissons volants, bœuf/veau, poireaux cives et mères/dachines.

Pour ces aliments, et à l'aide de l'outil informatique interactif développé, le nombre d'échantillons nécessaires a été estimé afin de satisfaire les conditions suivantes :

- une puissance statistique de 80% et un risque d'erreur de premier ordre de 5% pour un test statistique de Student bilatéral (c'est-à-dire sans a priori, donc dans l'objectif de pouvoir démontrer aussi bien une évolution à la hausse qu'à la baisse des niveaux de contamination) ;
- un plan d'échantillonnage comprenant au moins 2 aliments par an (voir ci-après la mise en place d'un cycle d'échantillonnage sur 5 années), ce qui implique de ne pas dépasser 150 échantillons par aliment ;
- une variabilité (par l'écart type) de la moyenne de contamination de la première période de prélèvement, estimée par défaut à partir de l'analyse de l'ensemble des données historiques.
- une évolution de la contamination moyenne entre deux périodes de prélèvements fixée à priori entre 5 et 45 % en fonction des aliments ;

Les résultats de ces simulations sont disponibles dans l'annexe 2.

Le nombre d'échantillons ainsi déterminé pour chaque aliment/île/zone a ensuite été « ventilé » sur un cycle de 5 ans correspondant à l'intervalle de temps minimal entre deux périodes de prélèvement pour observer une différence de contamination (voir section 3.1.2). Le Tableau 2

- il existe une **source d'incertitude** sur l'origine des aliments en circuit formel, notamment ceux d'origine aquatique.

3.1.6. Conclusions et suite à donner concernant les modalités de prélèvements

Cet AST a pour objectif de formuler des recommandations et points de vigilance pour aider le gestionnaire à configurer son plan de suivi. Le CES recommande au gestionnaire de préciser les éléments suivant en s'appuyant sur l'outil informatique interactif développé à cet effet :

- Le niveau d'évolution des taux de contamination que le gestionnaire souhaite être en capacité de détecter. Celui-ci doit être défini en tenant compte du fait que le nombre d'échantillons requis sera d'autant plus élevé que le niveau d'évolution détectable sera faible ;
- Les aliments contributeurs retenus (aliments et zone d'approvisionnement). Dans l'objectif de vérifier l'efficacité globale des mesures de gestion sur la contamination des aliments, et puisque les aliments importés ne sont a priori pas concernés par une contamination au chlordécone, le plan de suivi sera orienté exclusivement sur les productions locales ;
- Le nombre d'échantillons par aliment pour chaque période de prélèvements ;
- Le pas de temps entre deux périodes de prélèvements.

L'intervalle de temps entre deux périodes de prélèvement ainsi que la puissance minimale et le risque de première espèce sont fixés par défaut, respectivement à 5 ans, 80% et 5% pour ce type d'exercice. Le CES recommande de maintenir à minima ces paramétrages.

Afin de guider le gestionnaire dans ces choix, un exemple de dispositif a été proposé couvrant plusieurs zones géographiques et différents types d'aliment. Celui-ci montre que la liste en circuit formel des aliments fortement contributeurs à l'exposition au chlordécone est compatible avec la mise en place d'un plan de suivi permettant de couvrir plusieurs situations. Compte-tenu des écart-types assez élevés des mesures historiques, le dispositif proposé pourrait permettre de détecter, avec une puissance statistique de 80%, pour la majorité des aliments, seulement des variations temporelles marquées (jusque -45%). Pour quelques aliments, des variations plus modestes pourraient être détectées.

Il est important de noter que la mise en place de ce plan nécessitera certains ajustements suite à la première phase de prélèvements. En effet, le calcul du nombre d'échantillons nécessite une bonne connaissance de l'écart-type de la contamination des aliments retenus. Cet écart type a été estimé à partir des données connues jusqu'à présent. Il s'agit là d'une estimation nécessairement différente de l'écart-type qui sera observé suite à la première phase de prélèvement du plan, et qui dépendra en particulier des choix opérés en matière d'échantillonnage pour limiter la variabilité des données de contamination à chaque période (hétérogénéité de la zone géographique sélectionnée entres autres). Le calcul du nombre d'échantillons devra probablement être réévalué à la lumière des premières phases de prélèvements.

Par ailleurs, les nouvelles données issues de l'étude ChlorExpo seront prochainement disponibles, permettant d'identifier d'éventuels changements parmi les aliments contributeurs majoritaires cités dans le tableau 1. Ces données seront, le cas échéant, aussi intégrées dans l'outil informatique interactif développé.

Au-delà des aliments à suivre, des objectifs de variation à observer, du nombre d'échantillons par aliment à définir, il conviendra par la suite de préciser les modalités de prélèvement sur le terrain (producteurs, nombre de prélèvements par producteurs, etc.).

Un travail complémentaire pourra être réalisé par l'Anses et en collaboration avec les services de l'état, au niveau central comme local, sur la base d'informations supplémentaires concernant les filières pour les aliments retenus. Ce travail complémentaire permettra d'affiner la configuration du plan de suivi en :

- identifiant les producteurs (toujours les mêmes) à prélever dans le temps, après avoir dressé un plan d'échantillonnage représentatif (stratification par volume de production et localisation – ZC/ZNC - des producteurs, et tirage aléatoire). Cela nécessite de connaître la liste des tous les producteurs locaux et de leurs principales caractéristiques ;
- définissant le nombre d'échantillons à prélever par producteur ;
- définissant précisément le lieu de prélèvement (sur le lieu de production ou d'achat) qui dépendra notamment des caractéristiques de la filière (fiabilité de la traçabilité, répartition et volumétrie des sites de production, etc.) ;
- précisant si besoin certaines modalités de prélèvement pour assurer une plus grande homogénéité et mieux connaître la variabilité des données de contamination recueillies (taille, saisonnalité...) ;
- prévoyant une stratégie de remplacement pour les producteurs que l'on ne pourrait plus suivre dans le temps.

La faisabilité de réalisation de ce plan de suivi pourra être évaluée à cette seconde étape.

3.2. Recommandations dans le cadre de l'acquisition de nouvelles données de contamination d'aliments issus du programme des Jardins Familiaux (Jafa)

Depuis l'arbitrage interministériel du 24 avril 2023, il est possible pour les habitants possédant un jardin familial d'obtenir gratuitement une analyse en chlordécone des aliments qu'ils produisent. Cette nouvelle modalité s'inscrit dans les actions du programme Jafa qui propose par ailleurs des analyses gratuites des sols et de chlordéconémie pour ces habitants.

Au-delà d'apporter des informations utiles pour ajuster les conseils et autres mesures individuelles pour accompagner les propriétaires de ces jardins, si nécessaire, et diminuer leur exposition au chlordécone, ces données pourraient être utilisées à d'autres fins, comme par exemple :

- Une intégration aux bases de données pour les calculs d'exposition et d'évaluation des risques ;
- Une utilisation dans le cadre de questions de recherche comme par exemple l'étude des corrélations entre chlordéconémie, contamination des sols et contamination des aliments issus de l'autoproduction ;
- Le suivi dans le temps de la contamination des aliments autoproduits.

Dans la perspective d'une optimisation de la collecte de ces nouvelles données, le CES ERCA recommande :

- de s'assurer que ces données soient bancarisées dans une base de données unique gérée par une seule et même entité administrative et rassemblant les données de contamination des sols, des aliments autoproduits et des chlordéconémies ;
- de renseigner toute métadonnée susceptible d'être utile pour les différents types d'études cités ci-dessus, par exemple :
 - o des numéros d'identification uniques associés à la mesure, comme un numéro d'identification unique pour l'aliment concerné et un autre pour l'habitant enquêté ;
 - o la localisation du prélèvement (idéalement les coordonnées géographiques) ;

- la date du prélèvement ;
 - noter comment sont gérés les déchets organiques (retours au sol ou non) ;
 - si les informations sont disponibles, toute autre caractéristique historique du sol analysé (s'il s'agit par exemple d'une parcelle reconvertie d'anciennes bananeraies potentiellement très contaminées et pouvant ainsi avoir des répercussion sur les nouvelles cultures) ;
- de s'assurer auprès de la personne enquêtée qu'il sera possible de réaliser a posteriori d'autres prélèvements périodiques en vue de l'observation d'une éventuelle évolution de la contamination ;
 - d'essayer dans la mesure du possible de prélever plusieurs (3 minimum, 6 idéalement) aliments du même type à différents endroits du jardin (contamination hétérogène des sols) pour en faire un échantillon composite avant mesure analytique ;
 - d'éplucher les légumes racines avant analyse de l'échantillon en prévision d'une possible utilisation de ces données d'analyse pour des calculs d'exposition ;
 - d'indiquer, si possible, le type d'eau utilisée pour l'arrosage ou l'abreuvement, et les pratiques culturales ou d'élevage mises en place (type d'alimentation des animaux, nature des sols...).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Le quatrième plan stratégique de lutte contre la pollution par le chlordécone fixe, parmi ses objectifs, celui d'assurer une alimentation locale, saine et durable aux populations locales et de tendre vers le « zéro chlordécone » dans l'alimentation, en s'appuyant sur la mise en œuvre de mesures spécifiques dont l'efficacité pourra être objectivée au travers notamment du suivi de l'abaissement du niveau de contamination des aliments par le chlordécone. Ce suivi nécessite que soit établi le plan de suivi de la contamination en chlordécone des aliments locaux produits, d'une part par les professionnels dans le cadre de circuits formels, d'autre part par les particuliers détenteurs d'un jardin familial.

La construction de ce plan de suivi doit tenir compte en particulier des aliments à considérer, de la périodicité des prélèvements et du nombre de ces prélèvements tout en garantissant la puissance statistique du dispositif de suivi pour détecter les évolutions des niveaux de contamination des aliments.

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) endosse les conclusions du CES ERCA.

Le paramétrage du plan de suivi à mettre en œuvre pour les aliments des circuits contrôlés appartenant au gestionnaire au regard des objectifs qu'il souhaite atteindre, un outil de simulation a été développé pour lui permettre d'optimiser les paramètres de ce plan selon ces objectifs. Un exemple de plan de suivi basé sur une périodicité d'échantillonnage de 5 ans et dans le cadre du nombre maximal de prélèvements annuel fixé dans la saisine à 300 est proposé. L'agence souligne l'impact limitant que ce nombre maximal peut avoir sur les matrices alimentaires pouvant être suivies et les niveaux d'évolution de la contamination pouvant être mis en évidence. En effet, dans l'exemple illustratif intégré dans la note, le suivi longitudinal de la contamination d'une dizaine d'aliments d'intérêts peut être effectué sur une période de cinq ans. A cet égard, et sans minimiser les coûts que représentent une telle action de surveillance, l'Anses recommande que les ressources allouées – et partant le nombre maximal - soient réexaminées en fonction du rôle

et de la visibilité attendus du dispositif de suivi. Lorsque les paramètres principaux du plan de suivi auront été établis, les modalités de prélèvement sur le terrain pourront être précisées.

S'agissant des analyses de contamination des aliments issus des jardins familiaux déjà mises en œuvre dans le cadre du programme Jardins Familiaux (JaFa), l'Agence souligne que les futures données collectées dans ce cadre, telles que proposées dans le présent avis, permettront, au-delà de conseiller les particuliers pour limiter leur exposition, de mieux estimer, suivre et réduire, si besoin, la contribution des aliments autoproduits au risque global d'exposition au chlordécone.

Pr Benoît Vallet

MOTS-CLÉS

Chlordécone, contamination, aliments, surveillance

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anses (2018). Avis du 31 mai 2018. Avis révisé de l'Anses relatif à l'actualisation des données d'exposition par voie alimentaire afin d'évaluer les risques des populations antillaises et émettre des recommandations de consommation dans le cadre du projet Kannari « Santé, nutrition et exposition à la chlordécone aux Antilles » et aux limites maximales de résidus (LMR) pour la chlordécone. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2017SA0029.pdf>

Anses (2022). Avis du 28 novembre 2024. Avis relatif à la réévaluation des risques sanitaires prenant en compte la construction et la mise à jour de valeurs sanitaires de référence (externe et interne) du chlordécone. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2018SA0166.pdf>

Dromard CR, Bouchon-Navaro Y, Cordonnier S, Guéné M, Harmelin-Vivien M, Bouchon C (2018) Different transfer pathways of an organochlorine pesticide across marine tropical food webs assessed with stable isotope analysis. PLoS ONE 13(2): e0191335. <https://doi.org.inee.bib.cnrs.fr/10.1371/journal.pone.0191335>

Fernández-Bayo J-D, Saison C, Voltz M, Disko U, Hofmann D, Berns A-E (2013). Chlordecone fate and mineralisation in a tropical soil (andosol) microcosm under aerobic conditions. Science of The Total Environment (463–464): 395-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.044>

Fosgate GT. Practical sample size calculations for surveillance and diagnostic investigations. J Vet Diagn Invest. 2009 Jan;21(1):3-14. <https://doi.org/10.1177/104063870902100102>

Saaidi P-L, Grünberger O., Samouëlian A., Le Roux Y., Richard Damien A., Devault A., Feidt C., Benoit P., Evrard O., El Imfeld G., Mouvet C., Voltz M. Is a dissipation half-life of 5 years for chlordecone in soils of the French West Indies relevant? Environmental Pollution 324 (2023) 121283

Wellen C., Van Cappellen P., Gospodyn L., Thomas J.L., Mohamed M.N. An analysis of the sample size requirements for acceptable statistical power in water quality monitoring for improvement detection. Ecological Indicators. 2020 (118), 106684. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106684>.

ANNEXE 1 : LISTE DES INTERVENANTS

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, intuitu personae, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

M. Pierre-Marie BADOT – Professeur des universités – Compétences en transfert des contaminants

M. Jean-Charles LEBLANC – Chef d'unité- Compétences en évaluation des expositions et des risques

M. David MAKOWSKI – Directeur de recherche – Compétences en statistiques, modélisation

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

CES « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » (mandature 2022-2026)

Président

M. Bruno LE BIZEC – Professeur des universités – Compétences en chimie analytique et évaluation des risques

Vice-président

Mme Marie-Louise SCIPPO – Professeur des universités – Compétences en chimie analytique et évaluation des risques

Membres

M. Claude ATGIE – Professeur des universités – Compétences en toxicologie

M. Pierre-Marie BADOT – Professeur des universités – Compétences en transfert des contaminants

Mme Marie-Yasmine BOTTEIN – Chercheur en toxicologie environnementale – Compétences en biotoxines marines

Mme Rachida CHEKRI – Responsable de laboratoire – Compétences en chimie analytique

M. Nicolas DELCOURT – Maître de conférences des universités, pharmacien hospitalier - Compétence en toxicologie clinique

Mme Christine DEMEILLIERS – Professeure des universités – Compétences en toxicologie

Mme Virginie DESVIGNES – Ingénieure de Recherche – Compétences en évaluation des expositions et des risques

M. Erwan ENGEL – Directeur de recherche – Compétences en chimie analytique

M. Gautier EPPE – Professeur des universités – Compétences en chimie analytique

Mme Anne-Sophie FICHEUX – Ingénieur de recherche – Compétences en toxicologie

M. Eric HOUDEAU – Directeur de recherche – Compétences en toxicologie

M. Jean-Philippe JAEG – Maître de conférences – Compétences en toxicologie et alimentation animale

Mme Emilie LANCE – Maître de conférences des universités – Compétences en écotoxicologie et toxines

M. Olivier LAPREVOTE – Professeur des universités et Praticien Hospitalier – Compétences en toxicologie

M. Michel LAURENTIE – Directeur de recherche – Compétences en pharmacocinétique

M. Ludovic LE HEGARAT – Chef d'unité adjoint – Compétences en toxicologie

M. Jean-Charles LEBLANC – Chef d'unité- Compétences en évaluation des expositions et des risques

M. Nicolas LOISEAU – Chargé de recherche – Compétences en biochimie

M. David MAKOWSKI – Directeur de recherche – Compétences en statistiques, modélisation

Mme Francesca MANCINI – Chargée de recherche – Compétences en épidémiologie

M. Eric MARCHIONI – Professeur des universités – Compétences en chimie analytique

M. Jean-François MASFARAUD – Maître de conférences des universités – Compétences en transfert des contaminants

Mme Mathilde MUNIER – Chercheur hospitalier – Compétences en toxicologie

Mme Isabelle OSWALD – Directrice de recherche – Compétences en toxicologie

Mme Anne PLATEL – Maître de conférences des universités – Compétences en toxicologie

M. Yann SIVRY – Maître de conférences des universités – Compétences en transfert des contaminants

Mme Paule VASSEUR – Professeur émérite – Compétences en toxicologie

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

M. Julien JEAN – Chef de projets scientifiques – Anses

M. Ngoc-Du LUONG – Coordinateur d'expertise – Anses

Mme Ariane DUFOUR - Chef de projets scientifiques – Anses

Mme Anne THEBAULT - Chef de projets scientifiques – Anses

Secrétariat administratif

Armelle VIGNERON - Anses

ANNEXE 2 : EXEMPLE – SIMULATION DU NOMBRE DE PRELEVEMENTS NECESSAIRES POUR DES ALIMENTS D'INTERET DANS LE CADRE D'UN PLAN DE SUIVI DE LA CONTAMINATION DES ALIMENTS DANS LE TEMPS.

Le tableau ci-dessous présente la sélection d'aliments contributeurs retenus dans le cadre de l'exemple du plan suivi présenté dans le chapitre 3.1.5. Chaque ligne décrit une simulation possible, en détaillant :

- Les raisons qui ont conduit à retenir cet aliment parmi la liste de tous les aliments contributeurs ;
- Le type d'indicateur de suivi (moyenne ou pourcentage de fortes contaminations – considérées à deux fois supérieures à la LMR) ;
- La situation de référence qui a été considérée et qui indique la contamination moyenne (ou le pourcentage moyen de fortes contaminations) et l'écart-type associé. Ces 2 paramètres sont estimés à partir des données historiques disponibles.
- Le pourcentage de variation que l'on souhaite pouvoir objectiver
- Le pas de temps entre 2 périodes de prélèvements
- Les paramètres statistiques : puissance et p value
- Le nombre d'échantillons nécessaires pour atteindre cet objectif
- Des points de vigilance si cette matrice et cet objectif était retenu pour le plan de suivi

Matrice	Île	Pourquoi cette matrice ?	Indicateur retenu	Situation de référence considérée (hypothèse de départ)	Objectif visé Quelle évolution souhaite-t-on être en mesure de pouvoir observer ?	Sur quel pas de temps ?	Avec quel risque de premier ordre et de 2 nd ordre ?	Nombre d'échantillons par période	Vigilance
Produits de la pêche									

Ecrevisses Ouassous ZC	M	Premier contributeur au risque chez les adultes (21%) Niveau de contamination très élevé. Très forte variabilité	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 714 +/- 291 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 15% (variation de 108 µg/kg pour une moyenne de 714 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	117 par période de prélèvement	Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=52). Incertitude sur la provenance des ouassous
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 31% (pourcentage moyen sur 8 années)	Diminution de 50% (évolution de 31% à 15%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	107 par période de prélèvement	Vérifier si la filière est suffisamment développée en Martinique pour autant de prélèvements.
Ecrevisses Ouassous ZNC	G	Premier contributeur au risque chez les enfants (27%) Niveau de contamination parfois très élevé. Une année atypique (2013) avec une mesure très élevée	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 227 +/- 11 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 5% (variation de 11 µg/kg pour une moyenne de 227 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	11 par période de prélèvement	Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=13). Année 2013 atypique
			Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 2,46 +/- 1 µg/kg (moyenne sur toutes les années sauf 2013)	Diminution de 20% (variation de 0,5 µg/kg pour une moyenne de 2,46 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	64 par période de prélèvement	Incertitude sur la provenance des ouassous Vérifier si la filière est suffisamment développée en Martinique pour autant de prélèvements.

			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 20% (pourcentage moyen toutes les années)	Diminution de 60% (évolution de 20% à 8 %)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	130 par période de prélèvement	
Langoustes ZC	M	<p>Chez les adultes, contributeur important au risque (9%) et plus faible à l'exposition moyenne (3%)</p> <p>Pas de mesure de gestion particulière (à mettre en place éventuellement)</p> <p>Espèce aquatique assez sédentaire inféodée à un territoire restreint</p>	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 12.2 +/- 4.6 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 15% (variation de 1.8 µg/kg pour une moyenne de 12.2 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	100 par période de prélèvement	<p>Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=48). Moyenne nettement plus élevée en 2017. Vérifier si la filière est suffisamment développée en Martinique pour autant de prélèvements.</p>
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 15,6% (pourcentage moyen toutes les années)	Diminution de 60% (évolution de 15,6 % à 6,3 %)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	176 par période de prélèvement	
Crabes ciriques ZNC	M	<p>Premier contributeur au risque chez les adultes (20%)</p> <p>Moyenne de contamination parfois très élevée</p> <p>Pas de mesure de gestion particulière (à</p>	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 50.8 +/- 20.4 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 15% (variation de 7.6 µg/kg pour une moyenne de 50.8 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	114 par période de prélèvement	Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=66).

		mettre en place éventuellement) Espèce aquatique assez sédentaire inféodée à un territoire restreint	Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 22% (pourcentage moyen sur 11 années)	Diminution de 50% (évolution de 22% à 11%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	178 par période de prélèvement	Moyenne nettement plus élevée en 2017. Vérifier si la filière est suffisamment développée en Martinique pour autant de prélèvements.
Thazard ZNC	M	Contributeur au risque chez les adultes (2.5%) et à l'exposition moyenne chez les enfants (2%) Une contamination moyenne proche de la LMR (sauf 2016)	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 13.8 +/- 11.8 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 30% (variation de 4.1 µg/kg pour une moyenne de 13.8 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	128 par période de prélèvement	Ecart type élevé par rapport à la moyenne. « Potentiel de diminution » faible.
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 8 % (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 80% (évolution de 8% à 1,6%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8		
Thazard ZNC	G	Premier contributeur au risque chez les adultes (4%)	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue (LB) = 7 +/- 1 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 5% (variation de 0.35 µg/kg pour une moyenne de 7 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	129 par période de prélèvement	Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=22).

			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 12,5% (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 70% (évolution de 12,5% à 3,75%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	152 par période de prélèvement	Moyenne nettement plus élevée en 2017. « Potentiel de diminution » faible.
Vivaneau ZNC	M	Contributeur au risque chez les adultes (3%) et premier contributeur à l'exposition moyenne des enfants (13%) et des adultes (11%) Beaucoup de données disponibles Contamination proche de la LMR	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue : Moyenne de 11.8 +/-16.5 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 45% (variation de 5.3 µg/kg pour une moyenne de 11.8 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	153 par période de prélèvement	Ecart type élevé par rapport à la moyenne. « Potentiel de diminution » faible.
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 4,1% (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 80% (évolution de 4,1% à 0,8%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	350 par période de prélèvement	
Vivaneau ZNC	G	Contributeur au risque chez les enfants (10%) et à l'exposition moyenne des enfants (3%) Beaucoup de données disponibles	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue : Moyenne de 4.6 +/- 3.8 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 30% (variation de 1,4 µg/kg pour une	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	120 par période de prélèvement	« Potentiel de diminution » faible.

					moyenne de 4.6 µg/kg)				
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 1,75 % (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 80 % (évolution de 1,75% à 0,35%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	831 par période de prélèvement	
Poisson volant ZNC	G	Contributeur au risque chez les adultes (2%). Données relativement récentes Niveau de contamination proche de la LMR et proche de celui observé en Martinique.	Moyenne de contamination	Valeur de référence retenue : Moyenne de 11 +/- 5.4 µg/kg (moyenne sur toutes les années)	Diminution de 30% (variation de 3.3 µg/kg pour une moyenne à 11 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	43 par période de prélèvement	Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=64).
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 4,3% (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 80% (évolution de 4,3% à 0,87%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	335 par période de prélèvement	
Produits issus d'animaux terrestres									

Bœuf/veau ZC	M	<p>Contributeur à l'exposition moyenne des enfants (3%).</p> <p>Seule matrice contributrice issue d'animaux terrestre avec suffisamment de données historiques</p> <p>Mise en place récente d'une mesure de gestion pour l'élevage des bovins (outil d'aide à la décision)</p>	Moyenne de contamination	<p>Moyenne retenue (LB) : 21 +/- 18 µg/kg</p> <p>(moyenne sur toutes les années)</p>	<p>Diminution de</p> <p>30%</p> <p>(variation de 6,3 µg/kg pour une moyenne à 21 µg/kg)</p>	5 ans	<p>P = 0.05</p> <p>Puissance = 0.8</p>	129	Ecart type élevé par rapport à la moyenne.
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	<p>Pourcentage de référence retenu (LB) = 15%</p> <p>(pourcentage moyen sur toutes les années)</p>	<p>Diminution de</p> <p>60%</p> <p>(évolution de 15% à 6%)</p>	5 ans	<p>P = 0.05</p> <p>Puissance = 0.8</p>	181	
Produits issus d'espèces végétales									
Poireau cive ZNC	G	<p>Espèce végétale</p> <p>Contributeur au risque chez les adultes (2.5%) et premier contributeur à l'exposition moyenne des adultes (10%).</p>	Moyenne de contamination	<p>Moyenne retenue de 39.6 +/- 8.7 µg/kg (sur les 5 années avant 2015)</p>	<p>Diminution de</p> <p>10%</p> <p>(variation de 3.9 µg/kg pour une moyenne de 39.6 µg/kg)</p>	5 ans	<p>P = 0.05</p> <p>Puissance = 0.8</p>	77	<p>Moyenne et écart-type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=20) et sur des données antérieures à 2015.</p> <p>Moyenne nettement plus élevée en 2011 (n=1)</p>
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	<p>Pourcentage de référence retenu (LB) = 24%</p> <p>(pourcentage moyen sur 5 années)</p>	<p>Diminution de</p> <p>50%</p> <p>(évolution de 24% à 12%)</p>	5 ans	<p>P = 0.05</p> <p>Puissance = 0.8</p>	160	

Madère_Dachine ZC	G	Espèce végétale Premier contributeur au risque chez les adultes (2%) et à l'exposition moyenne des adultes (4%).	Moyenne de contamination	Moyenne retenue de 14 µg/kg +/- 12 µg/kg (sur les 5 années avant 2013)	Diminution de 30% (variation de 4 µg/kg pour une moyenne de 14 µg/kg)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	142 par période de prélèvement	Moyenne et écart- type retenus, estimés à partir d'un faible nombre d'échantillons (n=50) et sur des données antérieures à 2013.
			Pourcentage de fortes contaminations (2 x LMR)	Pourcentage de référence retenu (LB) = 10% (pourcentage moyen sur toutes les années)	Diminution de 70% (évolution de 10% à 3%)	5 ans	P = 0.05 Puissance = 0.8	194 par période de prélèvement	

ANNEXE 3 - ILLUSTRATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE INTERACTIF DEVELOPPE

L'outil informatique interactif développé dispose d'une interface utilisateur de type *R-Shiny* afin de rendre accessible et dynamique l'exploration et la visualisation interactive des données de contamination en chlordécone des aliments prélevés aux Antilles en vue de l'établissement d'un plan de suivi temporel de cette contamination. L'outil est accessible avec le lien suivant :

<https://ers-alim.shinyapps.io/Chld-PlanSuivi/>

L'outil est conçu alors avec plusieurs modules (notés de 1 à 6, cf. lien ci-dessus) permettant de décrire et de visualiser les données disponibles pour identifier des aliments d'intérêt pour le suivi temporel et de proposer ensuite différents outils d'aide à la configuration du plan d'échantillonnage. Les principaux modules et fonctionnalités de l'application disponibles à ce jour⁶ sont illustrés dans les parties suivantes.

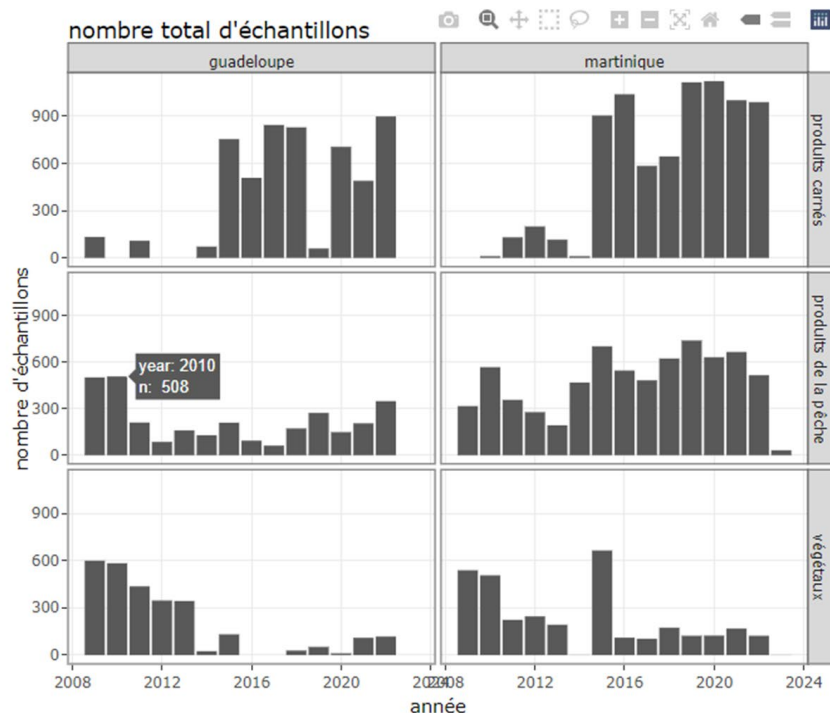
Module 1 - Présentation générale de la base de données

Le module « 1. Présentation générale » de l'application décrit brièvement les bases de données utilisées et intégrées dans l'application. La liste des aliments et groupes d'aliments étudiés dans ces bases est présentée.

Module 2 - Visualisation des données – Nombre de prélèvements

Module 2.1 - Nombre de prélèvements par catégories d'aliments

La Figure 4 ci-dessous illustre la visualisation interactive du nombre de prélèvements annuels pour les différentes catégories de denrées (produits carnés, produits de la pêche et végétaux) et pour les deux îles (Guadeloupe et Martinique). Le nombre de prélèvements pour une année considérée peut être affiché en passant le curseur au-dessus du graphique à barres correspondant.



⁶ Dernière mise à jour : 27 mai 2024

Figure 4 – Module 2.1 – Visualisation interactive du nombre de prélèvements annuels pour chaque catégorie d'aliments.

Module 2.2 - Nombre de prélèvements par groupes d'aliments

La Figure 5 ci-dessous illustre la visualisation interactive du nombre de prélèvements annuels pour les différents groupes d'aliments des trois catégories denrées (produits carnés, produits de la pêche et végétaux) sous forme de diagramme à point (*dotplot*). Un bouton permet de sélectionner la visualisation spécifique pour une île considérée (Guadeloupe/Martinique). Le nombre de prélèvements pour une année et un groupe d'aliment considéré est affiché en passant le curseur au-dessus du graphique correspondant.

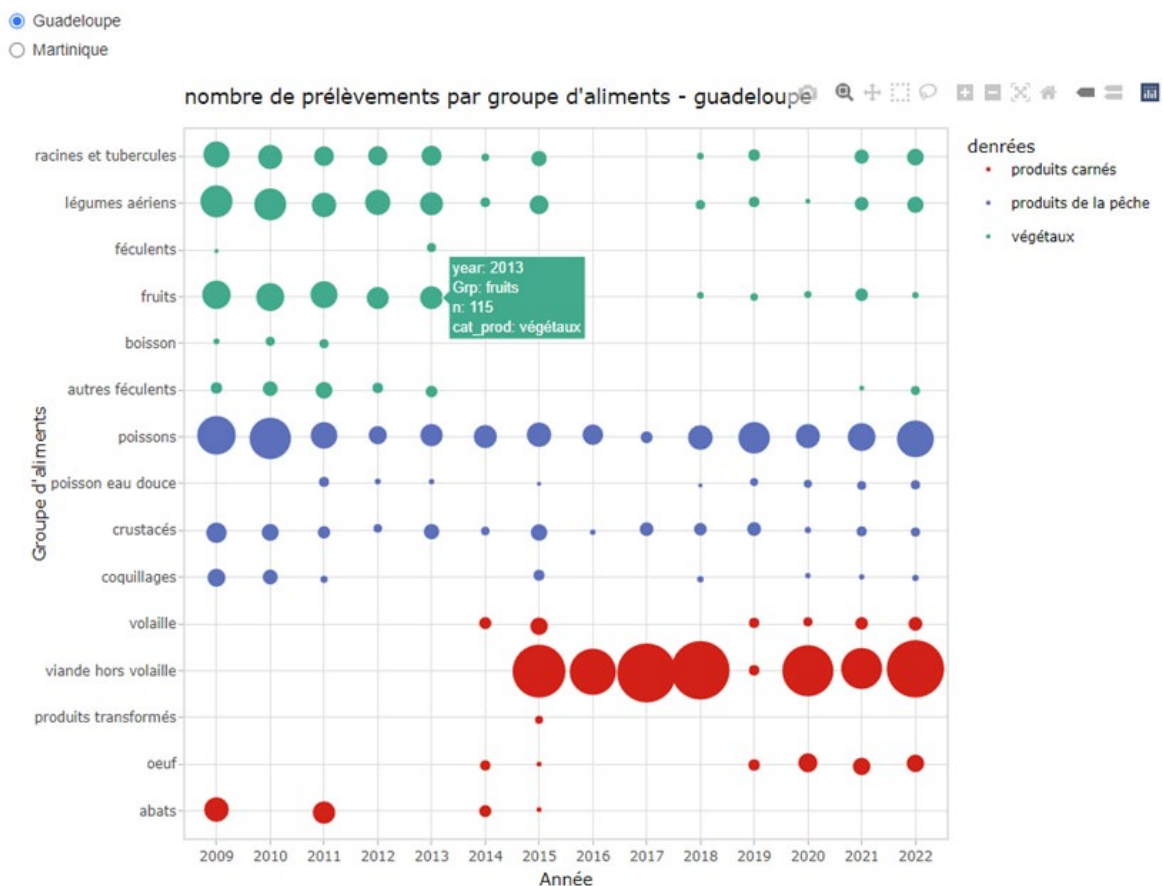


Figure 5 – Module 2.2 – Visualisation interactive du nombre de prélèvements annuels pour les différents groupes d'aliments.

Module 2.3 - Taux de censure

Le graphique ci-dessous (Figure 6) illustre la visualisation du nombre de prélèvements annuels présentant des différents niveaux qualitatifs de contamination (non détecté, traces, quantifié ou inconnu) pour les différentes catégories de denrées (produits carnés, produits de la pêche et végétaux) et pour les deux îles (Guadeloupe et Martinique). Le nombre de prélèvements est affiché en passant le curseur au-dessus du graphique à barres correspondant.

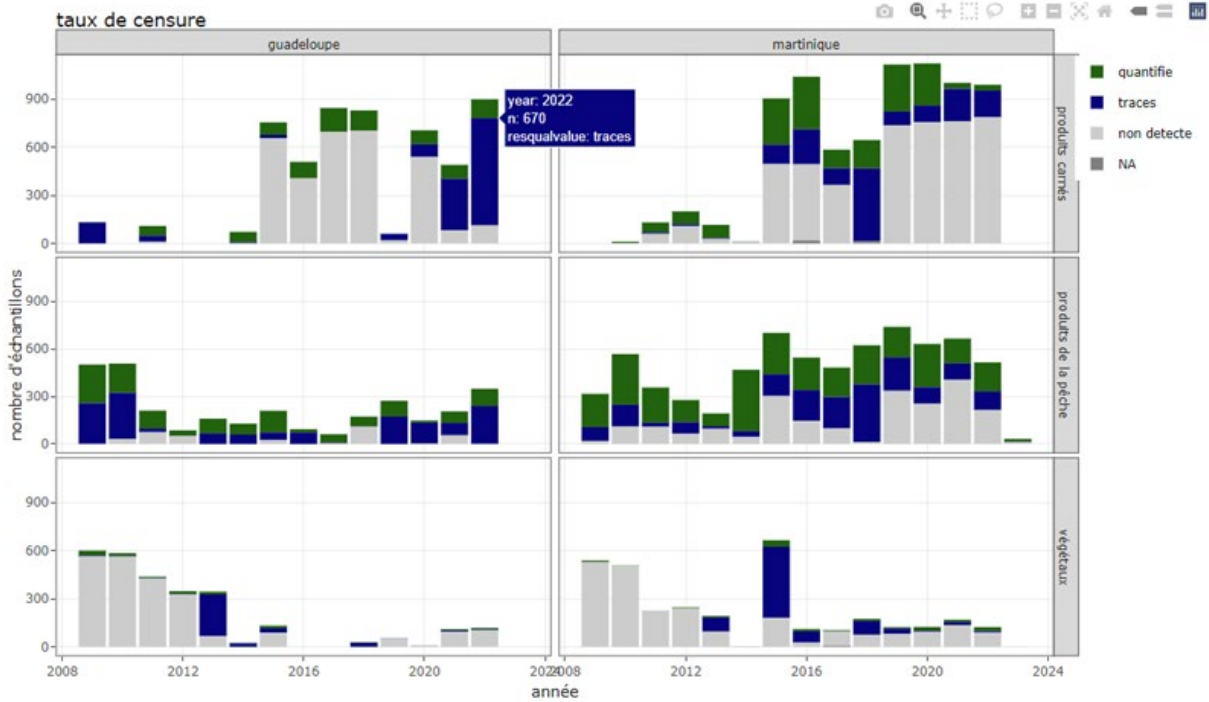


Figure 6 – Module 2.3 – Visualisation interactive des taux de censures dans les prélèvements annuels pour chaque catégorie d'aliments.

Module 2.4 - Circuits d'approvisionnement

De la même manière que précédemment, le graphique illustré dans la Figure 7 montre l'évolution du nombre de prélèvements issus des différents circuits d'approvisionnement au cours du temps.



Figure 7 – Module 2.4 – Visualisation interactive du nombre de prélèvements en fonction des différents circuits d'approvisionnement.

Module 2.5 - Cartographie du nombre de prélèvements

Une cartographie est intégrée dans l'application (Figure 8) permettant de visualiser l'évolution du nombre de prélèvements dans les différentes communes / zones et pour les trois grandes catégories de denrées (produits carnés, produits de la pêche et végétaux). Deux curseurs sont disponibles afin de sélectionner l'île étudiée (Guadeloupe/Martinique) et l'année de prélèvement sur la période 2009-2023. *NB : les communes d'origine et/ou de prélèvements ne sont pas renseignées pour tous les échantillons, la cartographie inclut uniquement les échantillons pour lesquels les communes sont connues. Cette cartographie doit être interprétée avec précaution.*

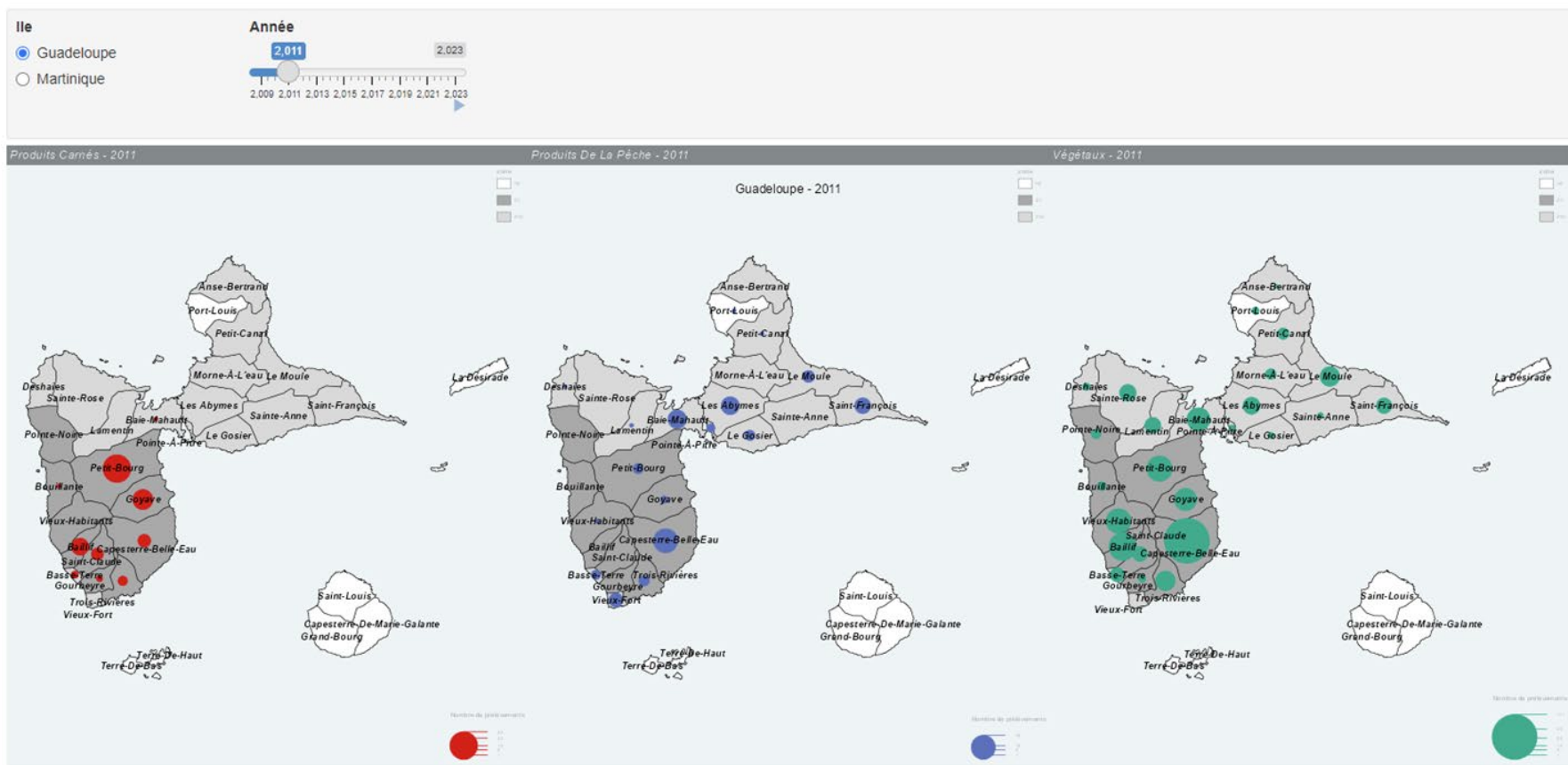


Figure 8 – Module 2.5 – Visualisation interactive de la cartographie du nombre de prélèvements annuels pour les différentes catégories de denrées : produits carnés (rouge), produits de la pêche (bleu) et végétaux (vert). La taille des points est proportionnelle au nombre de prélèvements. La cartographie indique les communes dans les zones réputées contaminées (gris foncé), les zones réputées non contaminées (gris clair) et hors zone (blanc).

Module 3 - Visualisation des niveaux de contamination

Module 3.1 - Proportion de détection

La proportion de détection, pour un aliment et/ou groupe d'aliments donné et pour une année considérée, correspond au ratio entre le nombre de prélèvements présentant un niveau de contamination *a minima* supérieur à la limite de détection (LOD) et le nombre total de prélèvement pour l'année considérée.

Un module est intégré dans l'application (cf. Figure 9, module 3.1) permettant la visualisation interactive de la proportion de détection au cours du temps (sous forme de graphiques à barres empilées, *stacked bar chart*, présentant le nombre de prélèvements avec ou sans détection) en fonction des groupes d'aliments et/ou pour un aliment spécifique ainsi que la visualisation de l'évolution de la LOD pour l'aliment considéré.

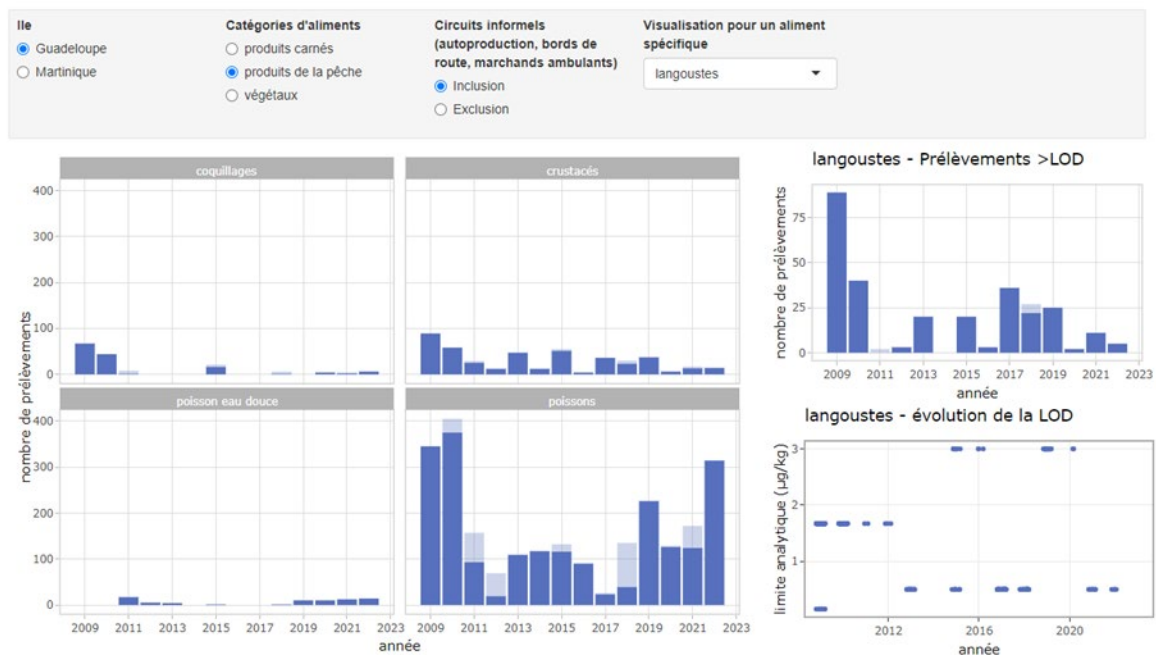


Figure 9 – Module 3.1 – Visualisation interactive de la proportion de détection dans les prélèvements annuels en fonction des groupes d'aliments et pour un aliment spécifique.

Différents curseurs sont disponibles permettant de paramétrer les filtres de sélection sur :

- l'île étudiée (Guadeloupe ou Martinique) ;
- la catégorie d'aliments considérée ;
- la possibilité d'exclure les données de contamination issues des circuits informels ;
- un aliment spécifique.

Module 3.2 – Distribution de la contamination

Un module est intégré dans l'application (cf. Figure 10 ci-dessous) permettant la visualisation interactive de la distribution de la contamination au cours du temps (sous forme de différentes courbes représentant la contamination moyenne, médiane et les intervalles inter-quantiles prédéfinis) pour les différents groupes d'aliments, ainsi que l'évolution du niveau de variabilité inter-échantillons intra-annuelle, pour un aliment spécifique considéré.

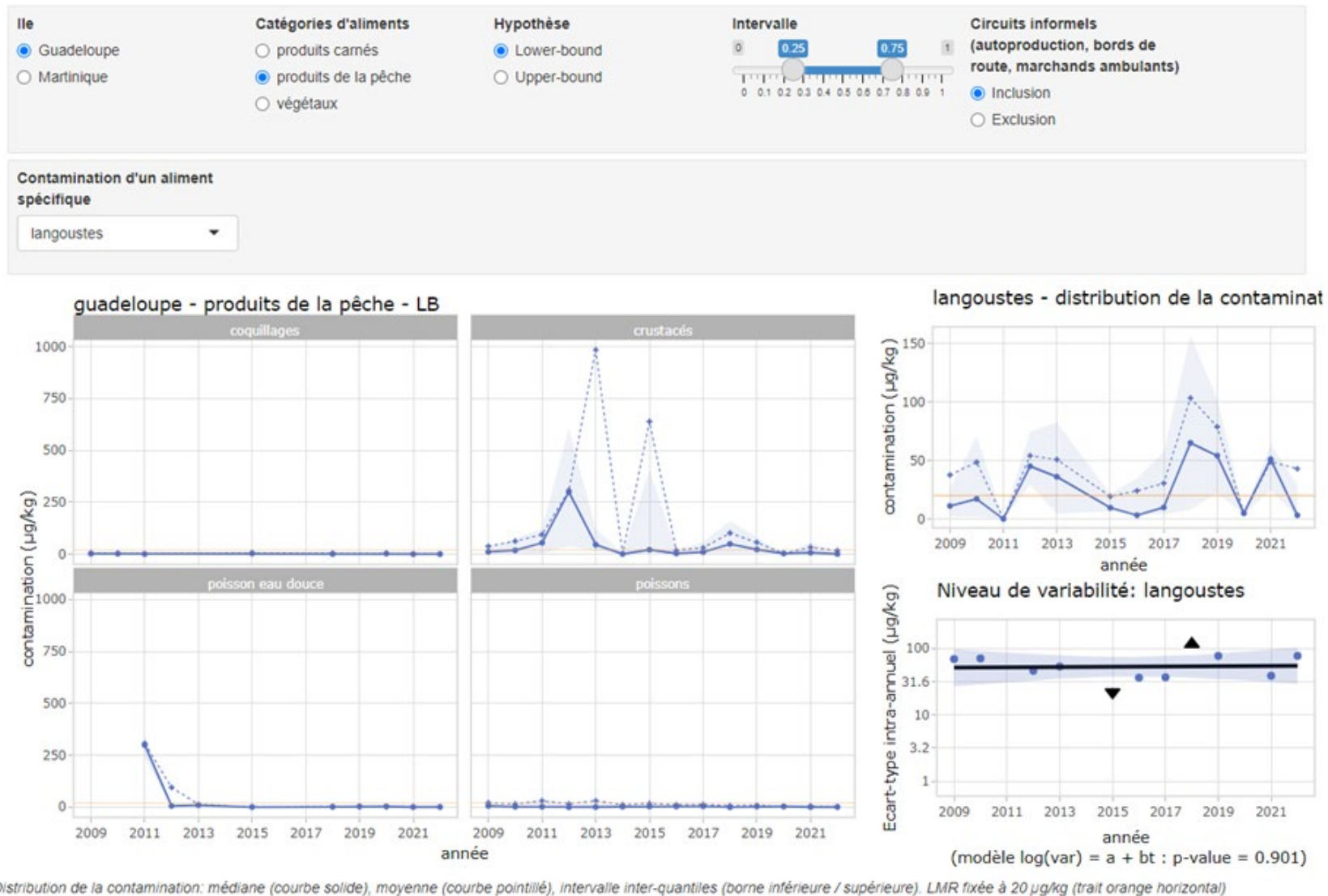


Figure 10 – Module 3.2 – Visualisation interactive de la distribution (moyenne, médiane, intervalle interquartile) de la contamination en fonction des différentes catégories/groupes d'aliments et pour un aliment spécifique.

Dans ce module, différents curseurs sont disponibles permettant de paramétrer les filtres de sélection sur :

- l'île étudiée (Guadeloupe ou Martinique) ;
- la catégorie d'aliments considérée ;
- le choix de l'hypothèse de censure pour l'estimation de la contamination ;
- l'intervalle inter-quantiles défini pour la visualisation (par défaut, l'intervalle entre les percentiles P25 et P75) ;
- la possibilité d'exclure les données de contamination issues des circuits informels ;
- un aliment spécifique à visualiser.

La limite maximale de résidus (LMR) dans les aliments, fixée à 20 µg/kg, est également intégrée aux visualisations (cf. Figure 10, droite horizontale en orange).

Pour un aliment donné, l'écart-type intra-annuel (écart-type calculé sur les différents échantillons prélevés dans la même année) est sélectionné comme estimateur du niveau de variabilité. L'évolution de cet écart-type au cours du temps est représentée, un modèle log-linéaire est ajusté aux données permettant de déterminer une éventuelle tendance du niveau de variabilité (cf. Figure 10, graphique en bas à droite).

Module 4 – Critères de sélection d'aliments à analyser

L'idée principale de cette étape est de sélectionner des aliments pertinents à inclure dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage permettant de mettre en évidence une éventuelle tendance de la contamination par le chlordécone en se basant sur des critères de sélection prédéfinis appliqués sur les données de contamination disponibles. Deux principaux critères de sélection sont abordés : (i) la récurrence de dépassement de la LMR de la contamination moyenne annuelle et (ii) le pourcentage de fortes contaminations dans les prélèvements annuels. Deux modules de visualisation sont intégrés dans l'application (module « 4.1 Récurrence » et « 4.2 Pourcentage de forte contamination ») permettant de filtrer les aliments remplissant ces deux critères et représentent donc un outil d'aide à la décision pour la sélection d'aliments pertinents.

Module 4.1 – Récurrence de dépassement de la LMR

Le critère de récurrence de dépassement de la LMR est divisé en différents sous-critères qui peuvent être prédéfinis pour la sélection des aliments pertinents, notamment :

- la contamination moyenne annuelle de l'aliment (en hypothèse LB ou UB) doit être supérieure à la LMR (fixée à 20 µg/kg) ;
- cette contamination moyenne annuelle doit être estimée avec un nombre minimal de prélèvements annuels prédéfini (*par exemple : prise en compte uniquement de la contamination des années avec au moins 10 prélèvements*) ;
- avec une récurrence minimale prédéfinie (*par exemple : sélection uniquement des aliments dont la contamination dépasse la LMR au cours d'au moins 3 années différentes*) ;
- sur une période prédéfinie (*par exemple : sélection uniquement des aliments dont la contamination dépasse la LMR entre 2015 et 2022*).

Le module associé à ce critère intégré dans l'application (Module « 4.1 Récurrence de dépassement », Figure 11) présente plusieurs curseurs disponibles afin paramétrer les différents sous-critères ci-dessus. Un curseur supplémentaire permet d'inclure ou non les données issues des circuits informels. En fonction du paramétrage, les visualisations s'adaptent et montrent les aliments remplissant les critères choisis sous forme hiérarchique (catégories/groupes/aliments). Un tableau de résultats est montré de manière interactive permettant d'indiquer les détails sur les niveaux de contamination des aliments filtrés, notamment le nom des aliments filtrés, les années au cours desquelles la contamination moyenne dépasse la LMR, le nombre total des prélèvements pour les années identifiées et enfin la contamination moyenne annuelle globale ainsi que dans les différentes zones.

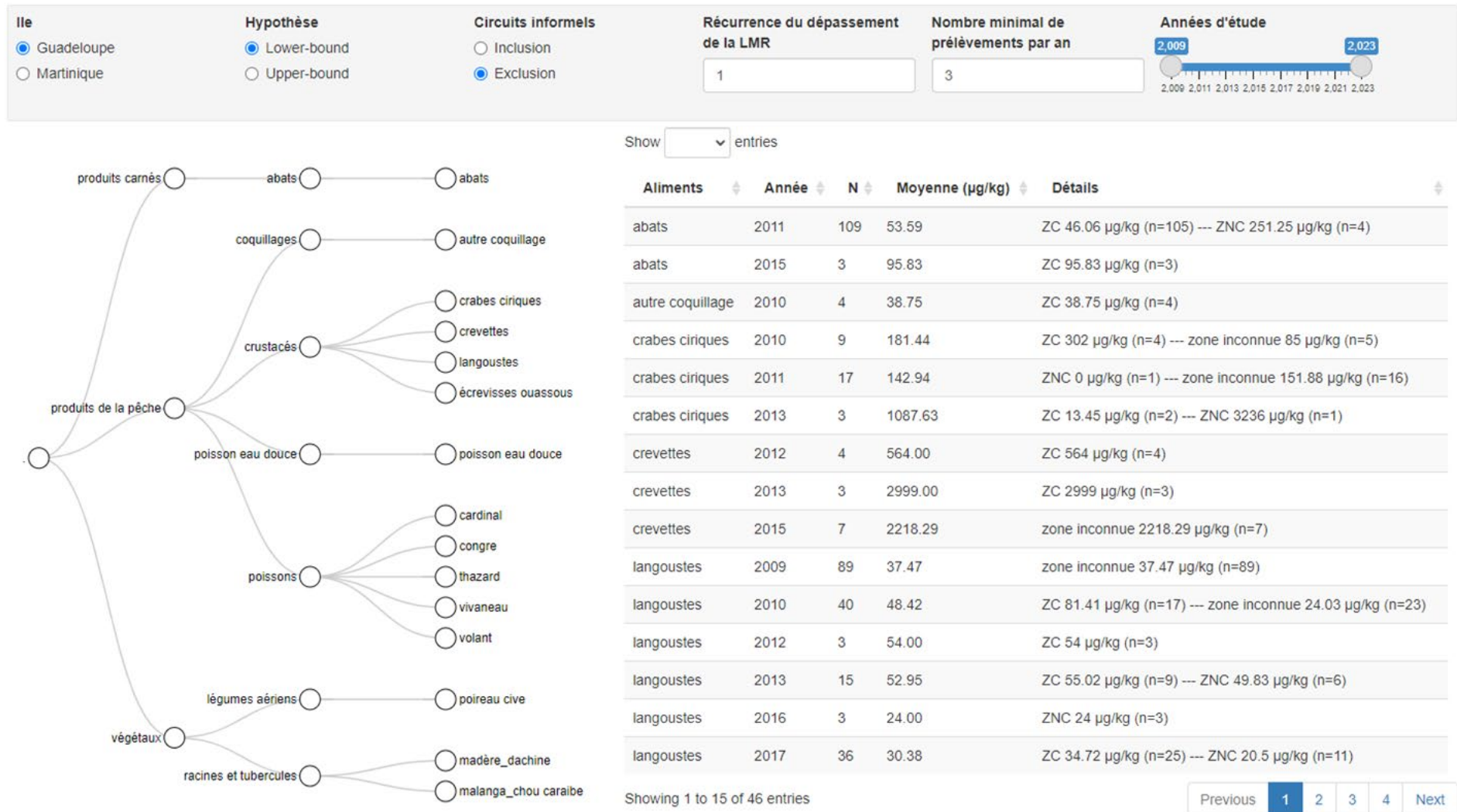


Figure 11 – Module 4.1 – Sélection d'aliments avec des critères basés sur la récurrence du dépassement de la limite maximale résiduelle (LMR) de la contamination moyenne annuelle sur une période pluriannuelle donnée.

Module 4.2 - Pourcentage de fortes contaminations

Le critère sur le pourcentage de fortes contaminations est divisé en différents sous-critères qui peuvent être prédéfinis pour la sélection des aliments pertinents. Il s'agit :

- d'un seuil *a priori* de fortes contaminations, défini comme un facteur multiplicatif de la LMR (*par exemple : sélection des aliments dont la contamination est a minima égale à 5 fois la LMR, soit 100 µg/kg*) ;
- de la prise en compte uniquement des contaminations estimées avec un nombre minimal de prélèvements annuels prédéfini (*par exemple : prise en compte uniquement de la contamination des années avec au moins 10 prélèvements*) ;
- d'un niveau minimal de la proportion de fortes contaminations (*par exemple : sélection des aliments présentant au moins 20% de fortes contaminations parmi les prélèvements annuels*) ;
- sur une période prédéfinie (*par exemple : sélection uniquement des aliments avec des fortes contaminations entre 2015 et 2022*).

Comme pour le critère sur la récurrence de dépassement de la LMR, un module associé au critère de pourcentage de fortes contaminations est intégré dans l'application permettant la visualisation des aliments sélectionnés (Module « 4.2 Pourcentage de fortes contaminations », voir illustration Figure 12). Plusieurs curseurs sont disponibles permettant le paramétrage des sous-critères par l'utilisateur. En fonction du paramétrage de l'utilisateur, les visualisations s'adaptent et montrent les aliments remplissant les critères choisis sous forme hiérarchique (catégories / groupes / aliments).

Un tableau de résultats est également montré de manière interactive permettant d'indiquer les détails sur le pourcentage de fortes contaminations pour les aliments identifiés, y compris :

- le noms des aliments filtrés ;
- les années au cours desquelles de fortes contaminations ont été observées ;
- le nombre total des prélèvements pour les années identifiées ;
- le pourcentage de fortes contaminations globale ainsi que dans les différentes zones.

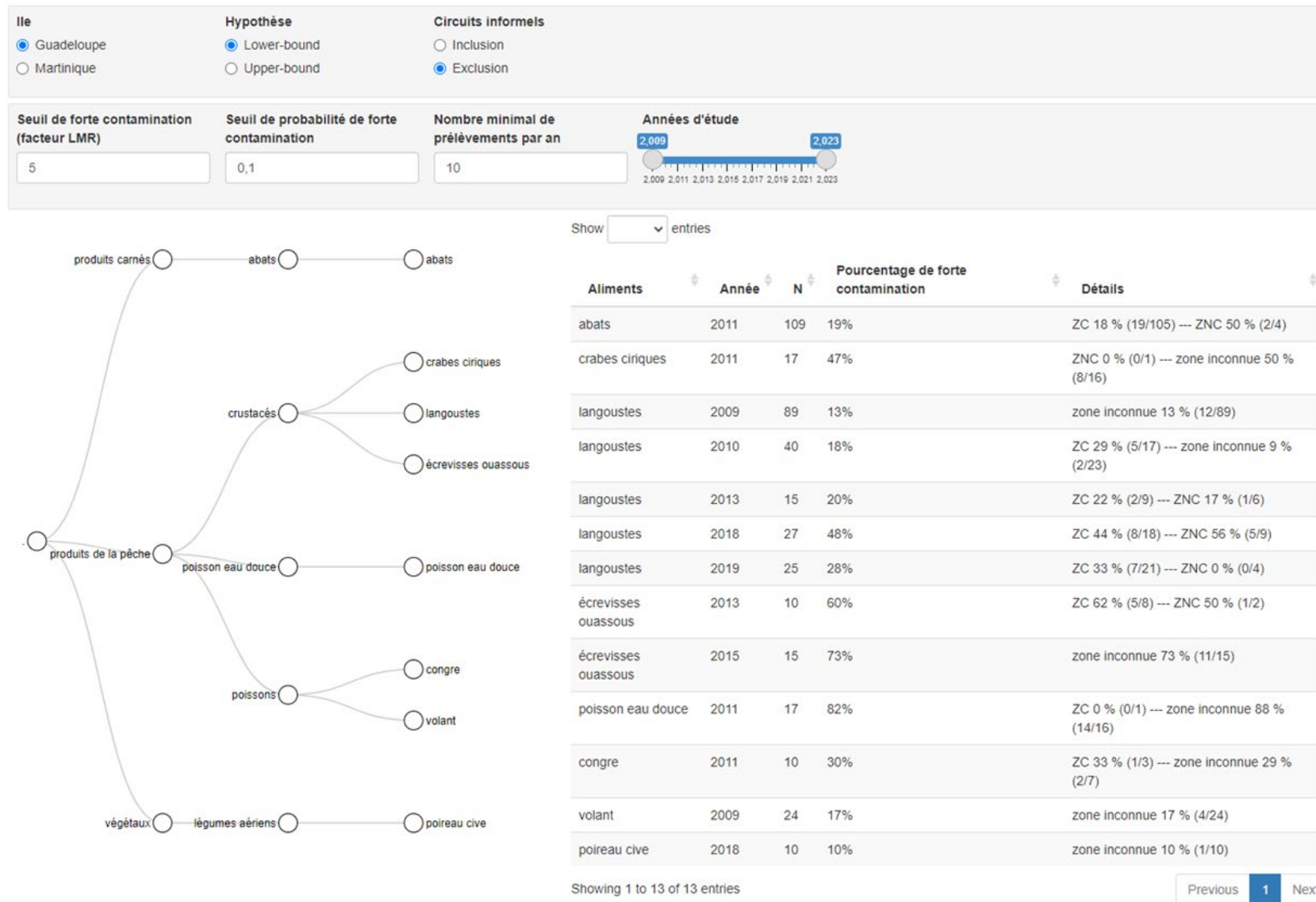


Figure 12 – Module 4.2 – Sélection d'aliments avec des critères basés sur la proportion annuelle de forte contamination sur une période pluriannuelle donnée.

Module 4.3 - Proportion de détection

En complément des deux critères décrits précédemment, un autre critère de sélection est également intégré dans un module de visualisation portant sur la proportion de détection. Ce critère prend en compte un ratio minimal de détection prédéfini, estimé avec un nombre minimal de prélèvements annuels sur une période donnée. Il est toutefois important de noter que la limite de détection évolue de manière importante au cours des années et ce pour les différents aliments, ce critère peut alors avoir un biais pour la sélection d'aliments.

Module 5 – Aliments contributeurs

Toujours dans l'objectif d'identifier des aliments pertinents pour le suivi, en complément des critères décrits précédemment s'appuyant uniquement sur les données de contamination, un module de visualisation des aliments contributeurs majoritaires à l'exposition de la population est intégré dans l'application. Ces aliments contributeurs ont été déterminés dans le cadre de l'expertise Anses de 2022 (Anses, 2022). Différents curseurs sont intégrés dans ce module de visualisation (cf. illustration Figure 13) :

- l'île étudiée (Guadeloupe ou Martinique),
- la population ciblée : adultes ou enfant, dans population générale ou chez les individus dont l'exposition dépasse la valeur toxicologique de référence,
- zone réputée contaminée ou non contaminée,
- type de classement : groupement par couple aliment – circuit d'approvisionnement ou par couple groupe d'aliments – circuits d'approvisionnement.

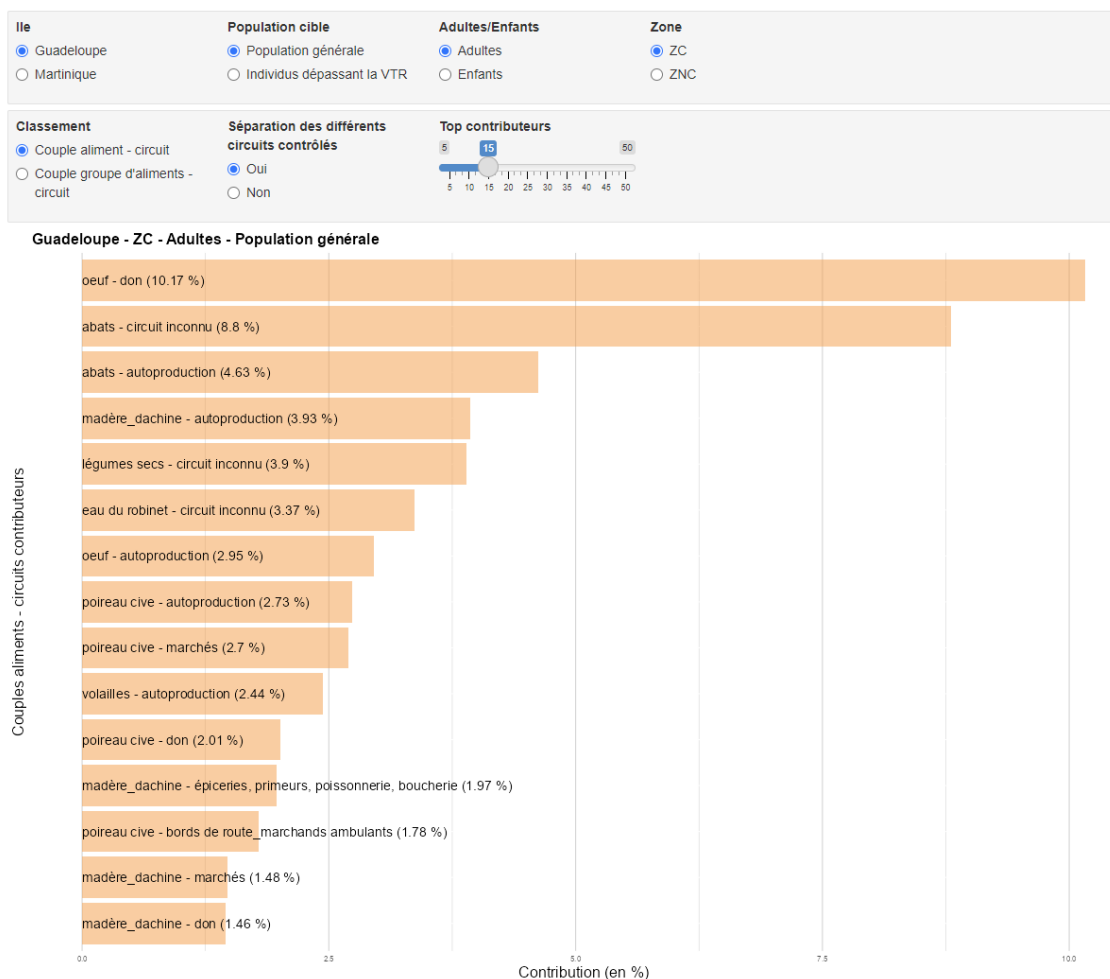


Figure 13 – Module 5 – Visualisation interactive des circuits d'approvisionnement et aliments contributeurs majoritaires à l'exposition totale.

Module 6 - Plan d'échantillonnage

L'objectif de cette étape était d'estimer un nombre minimal de prélèvements nécessaires, pour un aliment sélectionné avec un ou plusieurs critères décrits précédemment, en vue de l'élaboration d'un plan d'échantillonnage permettant de mettre en évidence une éventuelle tendance de la contamination avec l'utilisation de tests statistiques comparant deux campagnes de prélèvements. Le ou les tests statistiques à utiliser pour la comparaison ainsi que les paramètres nécessaires pour le calcul du nombre d'échantillons dépendent de la variable d'intérêt, c'est-à-dire la mesure ou l'indicateur de contamination sur lesquels se base la comparaison. Deux variables sont considérées ici pour la comparaison : (i) la contamination moyenne annuelle et (ii) le pourcentage de fortes contaminations dans les prélèvements annuels. Deux modules de visualisation et de simulation sont alors intégrés dans l'application calcul (Modules « 6.1 Comparaison de la contamination moyenne » et « 6.2 Comparaison de la probabilité de fortes contaminations ») permettant de paramétrer le test statistique envisagé en s'appuyant sur les données disponibles et d'estimer *in fine* le nombre d'échantillons nécessaires.

Module 6.1 – Indicateur 1 – Comparaison de la contamination moyenne

La mise en évidence d'une tendance de la contamination moyenne, c'est-à-dire une différence significative de cette contamination moyenne entre deux campagnes de prélèvement, peut s'effectuer avec un test statistique de comparaison de moyenne de Student (appelé aussi *Student t-test*). Le calcul du nombre d'échantillons avec ce test nécessite plusieurs paramètres :

- l'amplitude de l'évolution (baisse/hausse) attendue ou visée ;
- le risque statistique de première espèce fixé *a priori* (noté α), ici, la probabilité de conclure qu'il y a une tendance alors qu'il n'y en a pas. Ce risque est classiquement fixé à 5%. Il est possible de choisir le mode « bilatéral » ou « unilatéral » ;
- la puissance du test statistique (notée $1 - \beta$), ici, la capacité du test à détecter l'amplitude attendue lorsqu'elle existe;
- le niveau de variabilité de la contamination.

Un module associé au paramétrage de ce test statistique est intégré dans l'application (Module « 6.1 Comparaison de la contamination moyenne », cf. illustration Figure 14). Une partie du module propose des visualisations de la distribution de la contamination pour un aliment considéré selon les curseurs implémentés. L'évolution de la contamination est présentée (graphique avec courbes moyennes, médianes et intervalle inter-quantile) ainsi que l'évolution du niveau de variabilité de la contamination (écart-type intra-annuel à chaque date et plusieurs métriques résumés pour le niveau de variabilité interannuelle). Deux tableaux synthétisant les valeurs de moyennes et d'écart-type intra ou inter-annuels sont également fournis. Ces visualisations appuient ainsi le paramétrage du test statistique, implémenté dans la deuxième partie du module², permettant alors de calculer le nombre d'échantillons minimal nécessaires pour chaque campagne de prélèvements.

² La fonction R *power.t.test()* est utilisée pour implémenter ce module de calcul.

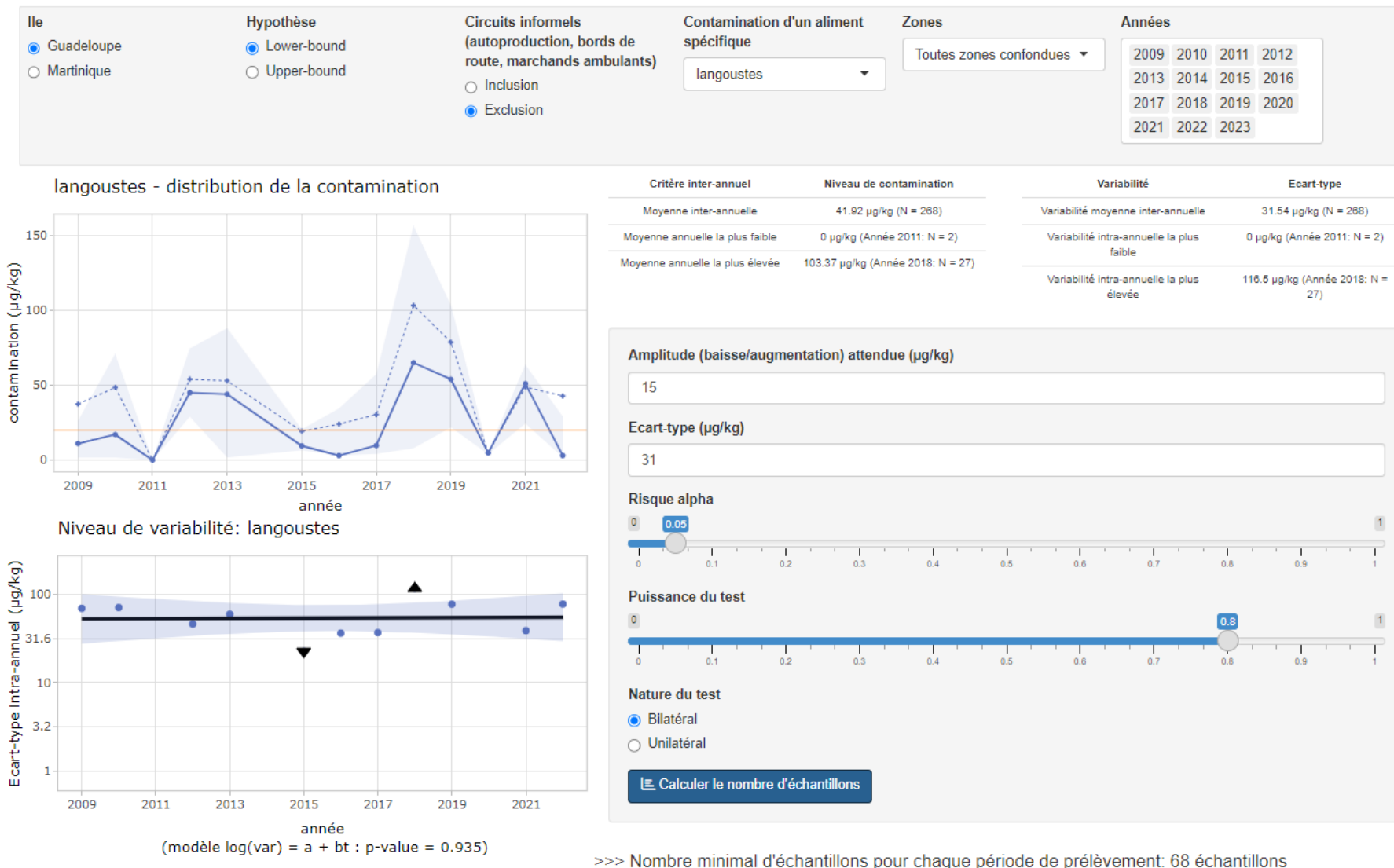


Figure 14 – Module 6.1 – Calcul du nombre d'échantillons en se basant sur la comparaison de la contamination moyenne entre deux prélèvements en tenant compte de l'amplitude de l'évolution de la contamination attendue, de la puissance du test et risque statistique ainsi que du niveau de la variabilité.

Module 6.2 – Indicateur 2 – Comparaison de proportion de fortes contaminations

La mise en évidence d'une tendance de la contamination s'effectue ici en comparant la proportion de fortes contaminations utilisée comme variable d'intérêt. Cette comparaison peut être faite avec un test statistique de comparaison de proportion, et de la même manière que pour la comparaison des moyennes décrite précédemment, le nombre d'échantillons nécessaires dépend de plusieurs paramètres :

- une amplitude de l'effet attendue, exprimée ici par une estimation attendue de la proportion de forte contamination de chacune des deux campagnes de prélèvement (*par exemple : 30% de forte contamination attendue pour la première période et 20% pour la deuxième période*) ;
- le risque statistique de première espèce α ;
- et la puissance du test $1 - \beta$;

Comme pour la comparaison des moyennes, un module est intégré dans l'application permettant le calcul du nombre d'échantillons⁸ pour la comparaison de fortes contaminations (cf. illustration Figure 15).

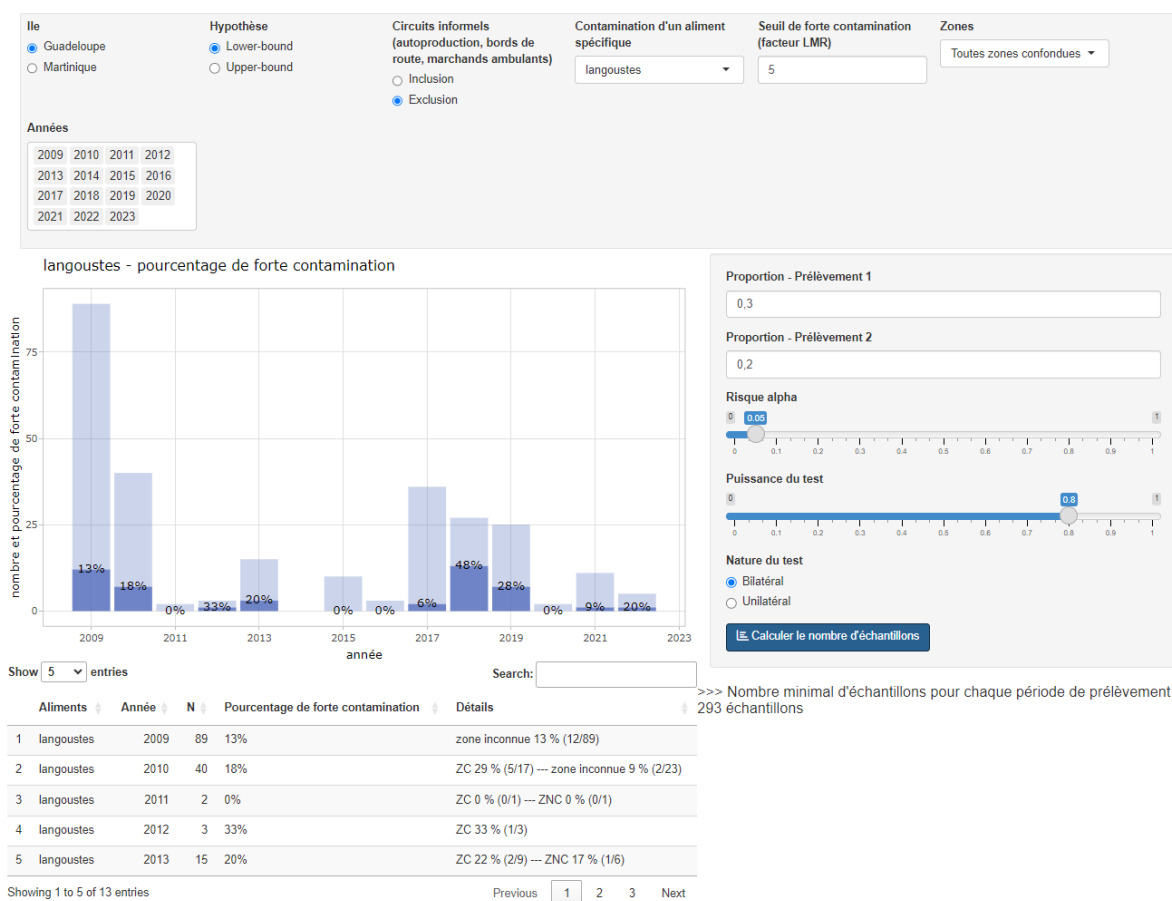


Figure 15 – Module 6.2 – Calcul du nombre d'échantillons en se basant sur la comparaison du pourcentage de fortes contaminations entre deux périodes de prélèvements.

⁸ La fonction $R_{power.prop.test()}$ est utilisée pour implémenter ce module de calcul