

Effets environnementaux du Chlordécone dans les milieux aquatiques - données récentes

Etats des lieux

L'utilisation de pesticides organochlorés dans les bananeraies des Antilles françaises, et notamment du « chlordécone », pose des problèmes majeurs de pollutions environnementales. En Guadeloupe et en Martinique, cet insecticide a été utilisé de 1972 à 1993 pour lutter contre le charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus*. Bien que son utilisation ait été interdite en 1993, la molécule est toujours présente dans les sols agricoles de Guadeloupe et de Martinique. En Guadeloupe, les zones agricoles polluées sont situées dans le sud de la Basse-Terre, sur les flancs du volcan. En Martinique, les zones concernées sont situées au nord-est et au centre de l'île. Le climat tropical des deux îles, caractérisé par des pluies abondantes en saison d'hivernage, induit d'importants épisodes de ruissellement et d'infiltration qui permettent aux molécules de chlordécone de rejoindre le milieu marin par le biais des rivières et des résurgences marines (Cattan et al., 2008 ; Cabidoche, 2011). Alors que la contamination des systèmes dulçaquicoles avait été démontrée depuis de nombreuses années (Kermarrec, 1980), la contamination du milieu marin n'a été étudiée que tardivement (Bocquené et al., 2002 ; Bouchon et Lemoine, 2003 ; Coat et al., 2006 ; Bouchon et Lemoine, 2007 ; Bertrand et al., 2009, 2010a, b, c, 2012, 2013). Ces premières études, menées sur des poissons et des crustacés marins, ont permis de mettre en évidence la présence de la molécule de chlordécone dans le milieu marin, avec cependant des concentrations dépassant la limite maximale des résidus autorisée pour la commercialisation et la consommation des produits halieutiques établie à partir de 2008 à 20 µg.kg⁻¹ de poids frais. Des rapports publiés entre 2003 et 2013, ont permis d'identifier les espèces les plus contaminées, ainsi que les zones côtières les plus touchées par cette pollution (Bouchon et Lemoine, 2003, 2007 ; Bertrand et al., 2009, 2010a, b, c, 2012, 2013). Ces études ont abouti à l'établissement de zones d'interdiction totale et partielle de pêche, ainsi qu'une liste d'espèces, à fort risque de contamination, interdites à la pêche (Anon., 2009, 2013 ; 2010 a,b, 2012, 2013, 2014).

L'impact du chlordécone sur les milieux d'eaux douces a également été étudié, lors de travaux de recherche menés en laboratoire et directement sur le terrain en Guadeloupe et Martinique. La contamination des rivières a en effet des conséquences sur les organismes sauvages qui y vivent et sur les productions et élevages qui en dépendent (ouassous). Les travaux qui ont été menés ont permis de montrer qu'il existait une contamination des espèces sauvages et d'élevage de crustacés corrélée avec le niveau de contamination de leurs habitats, conduisant à des contaminations dépassant les seuils admissibles. Les recherches ont aussi permis de mieux comprendre comment cet insecticide agissait sur les crevettes et qu'il pouvait, sans provoquer de mortalité aiguë, impacter les populations de crevettes tant sauvages que d'élevage, avec un mécanisme d'action de type perturbateur endocrinien.

Enfin des approches in situ sur les habitats et les espèces marines côtières ont permis d'apporter des précisions sur la localisation et l'intensité de leur contamination.

1. Contamination, bioaccumulation, bioamplification, effets démographiques et physiologiques chez les organismes aquatiques dans les milieux dulçaquicoles

*A- Contamination et effets nocifs du chlordécone sur la crevette *Macrobrachium faustinum* (ANR CHLORDEXCO, WP AQUA).*

Une étude réalisée dans la rivière du Pérou (Basse Terre, Guadeloupe) entre 2009 et 2010 sur

1700 crustacés appartenant à l'espèce endémique *Macrobrachium faustinum* a permis de mettre en évidence la contamination en chlordécone de ces organismes. Cette contamination mesurée dans l'abdomen (cuticule plus muscle) est proportionnelle à la concentration en chlordécone (CLD) dans l'eau, et à masse égale, la cuticule contient environ 4 fois plus de chlordécone que le muscle. Des effets démographiques ont été observés sur la population échantillonnée dans la rivière du Pérou. La comparaison des proportions juvénile/adulte montre une nette différence entre station amont et aval. La station sous impact est caractérisée par un plus faible quantité de grands individus et une dominance de juvéniles. La taille des individus vivants en milieu pollué, mesurée d'avril à juillet est inférieure à celle vivant en eau non polluée. Un panel de biomarqueurs a été analysé au cours de cette étude. Ils permettent de signer l'activité du chlordécone sur les organismes. L'inhibition de l'activité glutathion S-transférase (GST) conforte l'hypothèse selon laquelle le chlordécone serait séquestré par ces enzymes, sans pour autant être métabolisé, comme l'ont suggéré Belfiore et al. (2007). Des variations en 20 hydroxy-ecdysone (20-HE) suivant les expositions en Chlordécone mettent en évidence l'intérêt du dosage de la 20-HE comme biomarqueur de perturbation endocrinienne sur la mue notamment. La stimulation de la synthèse de 20-HE chez les femelles laisse supposer des mécanismes de perturbation endocrinienne induits par la chlordécone, confortant les nombreuses études qui ont démontré ce phénomène chez les vertébrés ; de façon surprenante, les acétylcholinestérases (AChE) et les carboxyestérases (CbE), qui ne sont pas censées interagir directement avec la chlordécone, sont inhibées par la présence de la molécule, alors qu'à l'inverse, la Na⁺/K⁺-ATPase, qui est une cible connue de la chlordécone (Guzelian, 1982) n'est pas affectée. Ces résultats amènent à considérer que les mécanismes d'action du chlordécone décrits chez les vertébrés ne sont pas systématiquement transposables aux invertébrés, et qu'il est nécessaire de caractériser spécifiquement l'action de cette molécule chez ces derniers.

B) Transfert du chlordécone dans la chaîne trophique (Coat et al, 2011)

Une étude réalisée sur la rivière Grande Anse en Guadeloupe a également révélé la contamination généralisée du réseau trophique de ce cours d'eau, du phytoplancton aux poissons, et le potentiel de bioamplification du chlordécone le long de ce réseau, depuis l'amont du cours d'eau jusqu'à son embouchure. Les organismes (poissons, crustacés ...) se contaminent essentiellement par leur nourriture (phyto et zooplancton) mais aussi, selon leur habitat par l'eau et les matières en suspension chargées en chlordécone ; les individus les plus contaminés provenant des milieux les plus calmes. Cette étude, menée en 2009, avait mis en évidence l'importance de la contamination, avec des concentrations au-delà des limites admises pour la consommation des produits de la pêche.

*C) - Contamination et effets nocifs du chlordécone sur la crevette d'élevage *Macrobrachium rosenbergii* (ANR MACHLOMA, Lafontaine et al, 2016 a et b, 2017)*

Les effets du chlordécone sur *M. rosenbergii* ont été étudiés sur le terrain durant 8 mois en 2012 dans le cadre du projet MACHLOMA Deux étangs utilisés pour l'élevage de *M. rosenbergii* ont été choisis pour cette étude, un premier étang témoin dépendant de la ferme aquacole de

¹ La bioamplification, ou biomagnification (anglicisme), est l'augmentation de concentration d'un polluant au sein d'organismes du bas vers le haut de la chaîne trophique

Pointe-Noire, alimenté par la rivière Petite Plaine qui présente une concentration en chlordécone inférieure à la limite de détection de $0.01 \mu\text{g L}^{-1}$ et un second bassin, situé à Saint-Claude, au sud de la Basse-Terre, sur les contreforts de la Soufrière. Ce bassin est alimenté par la Rivière Aux Herbes, qui fait partie des rivières les plus contaminées de Guadeloupe. Il appartient à une ancienne ferme aquacole qui a dû interrompre l'élevage de *M. rosenbergii* en raison de la présence de chlordécone dans les produits commercialisés à des concentrations supérieures à la LMR ($20 \mu\text{g kg}^{-1}$). Des individus *Macrobrachium rosenbergii*, non contaminés au chlordécone ont été mis en grossissement durant 8 mois dans les deux bassins. Les cinétiques de contamination, puis de décontamination des individus élevés à Sainte Claude, ainsi que les conséquences de l'exposition sur la physiologie des organismes ont été étudiées.

Parallèlement une exposition au chlordécone de post-larves de *Macrobrachium rosenbergii*, issues de l'élevage de Pointe Noire (zone non contaminée) a été menée durant 30 jours en conditions contrôlées

Lors de ces études, les résultats obtenus in situ ou en conditions contrôlées ont montré que le chlordécone présent dans le milieu aquatique s'accumulait rapidement dans les organismes (dès 6 heures d'exposition via l'eau et la nourriture présente. Les résultats obtenus pour les individus témoins mettent en évidence la bioaccumulation du chlordécone dans les organismes, même lorsque la concentration dans le milieu est très faible et sous la limite de quantification ($0.01 \mu\text{g L}^{-1}$).

La distribution du chlordécone dans l'organisme a également été mesurée dans quatre compartiments anatomiques : hépatopancréas, cuticule du céphalothorax, muscle de l'abdomen, cuticule de l'abdomen. Les quantités et les concentrations en chlordécone varient entre les différents compartiments. En effet, quel que soit le temps d'exposition, le muscle demeure la partie la moins contaminée par le chlordécone, à l'inverse des viscères et de la cuticule. Cette accumulation dans la cuticule pourrait s'apparenter à un mécanisme de dépuration permettant aux crustacés d'éliminer le chlordécone lors des mues.

Une diminution des concentrations en chlordécone dans les tissus de *M. rosenbergii* a été mise en évidence lors d'une expérience de décontamination. Après 45 jours, il ne reste que 15% de la concentration initiale en chlordécone. Ainsi cette diminution de la concentration en chlordécone pourrait être due aux mues successives des crustacés, l'élimination du chlordécone contenu dans la cuticule (Dittman and Buchwalter, 2010). La dépuration du chlordécone pourrait se produire également grâce aux processus de détoxification et de biotransformation qui se déroulent dans l'hépatopancréas des organismes. Dans notre étude, l'analyse protéomique a mis en évidence une surexpression des enzymes de détoxification à cytochrome P450 chez *M. rosenbergii* contaminé par le chlordécone. Chez les crustacés, l'accroissement des mécanismes de détoxification (augmentation de la quantité d'enzymes ou de leur activité) a été observé chez *Homarus americanus* exposés à l'heptachlore, chez *Procambarus clarki* exposés au fénitrothion ou encore chez *Callinectes sapidus* exposés aux PCBs (Escartín and Porte, 1996; Lee et al., 1981; Snyder and Mulder, 2001). Néanmoins, étant donné que la demi-vie du chlordécone peut atteindre plusieurs mois dans un organisme, son élimination est donc très lente et le processus de détoxification ne peut pas expliquer entièrement la diminution des concentrations observée dans les organismes contaminés (Newhouse et al., 2009; Toppari et al., 1996). Celle-ci pourrait également être due à une métabolisation du chlordécone par les crustacés. Toutefois, aucune information n'est disponible quant à la présence de chlordécone-réductase ou d'autres enzymes capables de métaboliser le chlordécone chez les crustacés.

Le chlordécone est un perturbateur endocrinien de type oestrogénique avéré chez les vertébrés, et plusieurs études ont montré que les composés chimiques capables de se lier au récepteur des oestrogènes chez les vertébrés peuvent interférer avec le récepteur des ecdystéroïdes chez les invertébrés (Zou and Fingerman, 1999a). De plus, la capacité des organochlorés à inhiber les

voies de signalisation des ecdystéroïdes a déjà été démontrée chez *U. pugilator* exposé à l'Aroclor 1242 et à l'endosulfan (Meng and Zou, 2009). De plus une modulation de l'hormone de mue a été mise en évidence au cours des premiers travaux effectués sur macrobrachium. Aussi des effets sur les fonctions de croissance, de développement et de reproduction chez *M. rosenbergii* ont été recherchés. Dans un premier temps, l'hormone de mue 20-Hydroxyecdysone (20-HE) a été étudiée chez les crustacés exposés au chlordécone en situation réelles et en conditions contrôlées. Cette hormone, est impliquée dans de nombreux processus physiologiques tels que la mue et la reproduction (LeBlanc, 2007). En parallèle, l'activité de la chitobiase, une des enzymes chitinolytiques et impliquée dans le processus de mue, a été mesurée. Les résultats ont montré une diminution de la concentration en 20-HE, ainsi qu'une diminution de l'activité de la chitobiase dans les tissus de *M. rosenbergii* exposé au chlordécone. Ces résultats suggèrent que le chlordécone pourrait perturber le processus de mue de *M. rosenbergii*, et donc avoir un impact sur sa croissance.

En résumé, les résultats issus du projet MACHLOMA ont montré l'accumulation rapide du chlordécone dans les tissus des *M. rosenbergii*, qui se répartit dans les différents compartiments anatomiques et principalement dans l'hépatopancréas et la cuticule ; le muscle étant le tissu le moins contaminé. Le chlordécone semble avoir une activité anti-ecdystéroïdes, mise en évidence par la diminution du niveau d'hormone 20-hydroxyecdysone chez les individus exposés, même à de faibles concentrations en chlordécone (0,02µg/L). Les résultats sont moins pertinents en ce qui concerne la chitobiase, mais une diminution de son activité a néanmoins été observée. Enfin, lors d'une expérience de dépuraison de 45 jours, une diminution de la concentration en chlordécone a été observée lorsque les organismes n'étaient plus exposés.

2- Contamination, bioaccumulation, bioamplification chez les organismes aquatiques dans les milieux marins

A - Contamination du milieu marin (Projet CHLOHAL², Dromard *et al.* 2016))

Le projet CHLOHAL, conduit entre 2013 et 2014, avait pour objectif d'une part d'améliorer la cartographie de la contamination des écosystèmes marins autour de la Guadeloupe et de la Martinique, et d'autre part de préciser les voies de transfert du chlordécone dans ces écosystèmes, mangroves, herbiers et récifs coralliens.

Un nombre important d'échantillons de poissons et de crustacés ont été collectés dans différentes zones d'eau autour des deux îles, en ciblant les zones et les espèces les moins bien représentées par les plans d'échantillonnage précédents. L'ensemble des informations obtenues a permis de compléter l'analyse cartographique et d'établir des cartes synthétiques de la contamination des espèces, halieutiques. Celles-ci confirment la sensibilité à la contamination des zones déjà identifiées. De telles cartes sont nécessaires à la révision des restrictions de pêche voire d'interdictions de consommation pour certaines espèces. Il conviendrait de suivre l'évolution spatiotemporelle de cette contamination aux limites des zones d'interdiction, grâce à des espèces sentinelles comme le poisson lion (*Pterois volitans*) dans les zones récifales ou l'huître de palétuvier (*Crassostrea rizophorae*) en mangrove.

Par ailleurs, parmi les espèces à risque, qui ont été interdites à la pêche dans les zones de restriction partielle en Guadeloupe, l'oursin blanc (*Tripneustes ventricosus*) devrait être ajouté à la liste, du fait du niveau de contamination élevé de ses gonades (c'est à dire la partie

² Consolidation des connaissances sur la contamination de la faune halieutique par la chlordécone autour de la Martinique et de la Guadeloupe (2013-2014)

consommée de l'animal).

Les résultats de l'étude montrent l'existence d'importantes variations intra et interspécifiques des concentrations en chlordécone mesurées, mais que le gradient de contamination des organismes décroît depuis la côte (source de la pollution) vers le large. Dans le cadre de cette étude, une élévation de la contamination des organismes en fonction de leur niveau dans la chaîne alimentaire a été également observée. La bioamplification du chlordécone le long de la chaîne alimentaire apparaît modérée mais elle reste à étudier plus précisément. En effet les résultats ne permettent pas encore d'élucider totalement les voies de transfert vers les organismes, qui peuvent varier avec les espèces et leur niveau trophique. Des approches basées sur les rapports isotopiques (C, N) sont encore nécessaires pour comprendre le fonctionnement des chaînes alimentaires et l'identification précise des sources de contamination.

Compte tenu de leur niveau de contamination relativement élevé, il semble que les matières en suspension dans l'eau (MES) jouent un rôle important dans l'introduction de la molécule par la voie alimentaire dans les écosystèmes marins. Prise en compte d'une façon globale dans le projet CHLOHAL, cette source de carbone mériterait une étude plus détaillée, en fonction de ses divers constituants, pour mieux appréhender son rôle et celui des apports sédimentaires dans la contamination des organismes par voie trophique. L'étude des cinétiques de contamination et de décontamination des organismes est une perspective particulièrement intéressante pour la compréhension des processus et envisager la possibilité de décontamination des espèces à haute valeur commerciale (langoustes...) en les faisant stabuler en eau propre.

Enfin, il serait également nécessaire d'étudier les impacts de la chlordécone sur la biologie des organismes marins (reproduction, recrutement larvaire, croissance...), afin d'évaluer les conséquences à long terme de cette pollution sur le fonctionnement général des écosystèmes marins côtiers.

Ce qu'il faut retenir

- L'importante capacité du chlordécone à s'accumuler dans les organismes impose de définir des normes de concentration admissible dans les milieux aquatiques dulcaquicoles et marins, sans risque pour les écosystèmes et la santé
- La diminution des concentrations en chlordecone observée lors de l'expérience de dépuration constitue néanmoins une information importante pour les aquaculteurs, puisque la contamination de cette espèce de décapode ne semble pas être irréversible. D'autres études doivent cependant encore être menées afin de déterminer si le chlordécone est métabolisé, en quels métabolites et quelle est la toxicité de ceux-ci.
- Chez les crevettes d'eaux douce *macrobrachium* l'accumulation du chlordécone est limité dans le muscle, ce qui représente une indication importante pour les aquaculteurs et les consommateurs puisque le muscle est la partie consommée par les populations

Références

Anon. (2009). Arrêté préfectoral N°2009-1478 du 23 septembre 2009 suspendant à titre temporaire la pêche et la commercialisation de certaines espèces de poissons issues de certaines zones maritimes de la Guadeloupe. Préfecture, Pointe-à-Pitre.

Anon. (2010a). Arrêté préfectoral N°2010-721 du 23 juin 2010 réglementant la pêche et la commercialisation des espèces dans certaines zones maritimes de Guadeloupe. Préfecture, Pointe-à-Pitre.

Anon. (2010b). Arrêté préfectoral N°2012-335 du 30 novembre 2012 réglementant la pêche et la mise sur le marché des espèces de la faune marine dans certaines zones maritimes de la Martinique en lien avec les bassins

versants contaminés par la chlordécone. Préfecture, Fort de France.

Anon. (2012). Arrêté préfectoral N°2010-3275 du 7 octobre 2010 réglementant la pêche et la mise sur le marché des espèces de la faune marine dans certaines zones maritimes de la Martinique en lien avec les bassins versants contaminés par la chlordécone. Préfecture, Fort de France.

Anon. (2013). Arrêté préfectoral N°2013-057 du 26 juin 2013 réglementant la pêche et la commercialisation des espèces de la faune marine dans certaines zones maritimes de la Guadeloupe. Préfecture, Pointe-à-Pitre.

Anon. (2014). Arrêté préfectoral N°2014-012 du 28 février 2014 portant modification de l'arrêté N°2013-057 du 26 juin 2013 réglementant la pêche et la commercialisation des espèces de la faune marine dans certaines zones maritimes de la Guadeloupe. Préfecture, Pointe-à-Pitre.

Belfiore C.J., Yang R.S.H., Chubb L.S., Lohitnavy M., Lohitnavy O.S. & Andersen M.E., 2007. Hepatic sequestration of chlordecone and hexafluorocetone evaluated by pharmacokinetic modeling. *Toxicology*, 234 : 59-72.

Bertrand J.A., A. Abarnou, G. Bocquené, J.F. Chiffolleau et L. Reynal (2009). Diagnostic de la contamination chimique de la faune halieutique des littoraux des Antilles françaises. Campagnes 2008 en Martinique et en Guadeloupe. Ifremer, Martinique. 136 p.

Bertrand J.A., A. Abarnou et L. Reynal (2010a). Diagnostic de la contamination chimique de la faune halieutique des littoraux des Antilles françaises. Campagne complémentaire 2009 en Guadeloupe. Ifremer, Martinique. 23 p.

Bertrand J.A., A. Abarnou et L. Reynal (2010b). Diagnostic de la contamination chimique de la faune halieutique des littoraux des Antilles françaises. Campagne complémentaire 2009 en Martinique. Ifremer. 26 p.

Bertrand J.A., X. Bodiguel, A. Abarnou, L. Reynal et G. Bocquené (2010c). Chlordecone in the marine environment around the French West Indies: from measurement to pollution managements decisions. *ICES, CM 2010/F07*. 9 p.

Bertrand J.A., C. Dromer et L. Reynal (2012). Etude de la contamination de la langouste blanche *Panulirus argus* et de la langouste brésilienne *P. guttatus* par la chlordécone le long de la côte atlantique de la Martinique. Campagnes 2011. Ifremer, Martinique. 37 p.

Bertrand J.A., O. Guyader et L. Reynal (2013). Caractérisation de la contamination de la faune halieutique par la chlordécone autour de la Guadeloupe. Résultats des campagnes de 2008 à 2011. Ifremer, Martinique. 39 p.

Bocquené G., F. Akcha, A. Franco, P. Grosjean, S. Coat et E. Godard (2002). Bilan ponctuel de la présence et des effets des pesticides en milieu littoral martiniquais en 2002. Ifremer, Martinique. 42 p.

Bouchon C. et S. Lemoine (2003). Niveau de contamination par les pesticides des chaînes trophiques des milieux marins côtiers de la Guadeloupe et recherche de biomarqueurs de génotoxicité. Rapport UAG-DIREN, Pointe-à-Pitre. 33 p.

Bouchon C. et S. Lemoine (2007). Contamination par les pesticides des organismes marins de la baie du Grand Cul-de-Sac Marin (île de la Guadeloupe). Rapport UAG-DIREN, Pointe-à-Pitre. 39 p.

Cabidoche Y.M. (2011). Risques de contamination par la chlordécone des baies du Grand et du Petit Cul-de-Sac Marin à la Guadeloupe. Note de cadrage pour le Port Autonome de la Guadeloupe. INRA, Guadeloupe. 7 p.

Cattan P., E. Barriuso, Y.M. Cadidoche, J.B. Charlier et M. Voltz (2008). Quelques éléments clés sur l'origine et le mode de pollution des eaux par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture. Les cahiers du PRAM N°7. Décembre 2007 : 12-19.

Coat S., G. Bocquené et E. Godard (2006). Contamination of some aquatic species with the organochlorine pesticide chlordecone in Martinique. *Aquatic Living Resources*. 19: 181- 187

Coat S., Monti D., Legendre P., Bouchon C., Massat F. & Lepoint G. (2011) Organochlorine pollution in tropical rivers (Guadeloupe) : Role of ecological factors in food web accumulation ; *Environmental Pollution* 159 : 1692-1701

Dittman, E.K., Buchwalter, D.B., 2010. Manganese bioconcentration in aquatic insects: Mn oxide coatings, molting loss, and Mn(II) thiol scavenging. *Environ. Sci. Technol.* 44, 9182-8. doi:10.1021/es1022043

Guzelian P.S., 1982. Comparative toxicology of chlordecone (Kepone) in humans and experimental animals. *Annual Reviews of Pharmacology and Toxicology*, 22 : 89-113.

Dromard, C.R., Bodiguel, X., Lemoine, S., Bouchon-Navaro, Y., Reynal, L., Thouard, E., Bouchon, C., 2016. Assessment of the contamination of marine fauna by chlordecone in Guadeloupe and Martinique (Lesser Antilles). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 73-80. doi:10.1007/s11356-015-4732-z

Escartín, E., Porte, C., 1996. Bioaccumulation, metabolism, and biochemical effects of the organophosphorus pesticide fenitrothion in *Procambarus clarkii*. *Environ. Toxicol. Chem.* 15, 915-920. doi:10.1002/etc.5620150613

Kermarrec A. (1980) Level of contamination of trophic food chains in Guadeloupe: pesticides and heavy metals 1979-1980. Rapport INRA. 155 p.

Lafontaine A., Gismondi E., Boulangé-Lecomte C., Gerraudie P., Lagadic L., Caupos F., Dodet N., Lemoine S., Thomé J-P. & J. Forget-Leray (2016a) Effects of chlordecone on 20-hydroxyecdysone concentrations and chitinase activity in a decapod crustacean, *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquat. Toxicol.* 176 : 53-63.

Mis en forme : Anglais (Royaume-Uni)

Lafontaine, A., Hanikenne, M., Boulangé-Lecomte, C., Forget-Leray, J., Thomé, J.-P., Gismondi, E., 2016b. Vitellogenin and vitellogenin receptor gene expression and 20-hydroxyecdysone concentration in *Macrobrachium rosenbergii* exposed to chlordecone. Environ. Sci. Pollut. Res. 1–11. doi:10.1007/s11356-016-7273-1

Lafontaine, A., Gismondi, E., Dodet, N., Boulangé-Lecomte, C., Caupos, F., Lemoine, S., Lagadic, L., Forget-Leray, J. and Thomé, J.-P. (2017) Bioaccumulation, distribution and depuration of chlordecone in the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*: field and laboratory studies. Chemosphere 185 : 888-898

LeBlanc GA (2007). Crustacean endocrine toxicology: a review. *Ecotoxicology* **16**: 61-81.

Lee, R.F., Singer, S.C., page, D.S., 1981. Responses of cytochrome P-450 systems in marine crab and polychaetes to organic pollutants. Aquat. Toxicol. 1, 355–365. doi:10.1016/0166-445X(81)90028-X

Meng, Y., Zou, E., 2009. Impacts of molt-inhibiting organochlorine compounds on epidermal ecdysteroid signaling in the fiddler crab, *Uca pugnator*, in vitro. Comp. Biochem. Physiol. - C Toxicol. Pharmacol. 150, 436–441. doi:10.1016/j.cbpc.2009.06.009

Newhouse, K., Berner, T., Mukerjee, D., Rooney, A., 2009. IRIS Toxicological Review of Chlordecone (Kepone), U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.

Snyder, M.J., Mulder, E.P., 2001. Environmental endocrine disruption in decapod crustacean larvae: hormone titers, cytochrome P450, and stress protein responses to heptachlor exposure. Aquat. Toxicol. 55, 177–190. doi:10.1016/S0166-445X(01)00173-4 .

Toppari, J., Larsen, J.C., Christiansen, P., Giwercman, a, Grandjean, P., Guillelte, L.J., Jégou, B., Jensen, T.K., Jouannet, P., Keiding, N., Leffers, H., McLachlan, J. a, Meyer, O., Müller, J., Rajpert-De Meyts, E., Scheike, T., Sharpe, R., Sumpter, J., Skakkebaek, N.E., 1996. Male reproductive health and environmental xenoestrogens. Environ. Health Perspect. 104 Suppl , 741–803. doi:10.1289/ehp.96104s4741

Zou, E., Fingerman, M., 1999a. Chitinase activity in the epidermis and hepatopancreas of the fiddler crab *Uca pugnator* during the molting cycle. Mar. Biol. 133, 97–101. doi:10.1007/s002270050447

Mis en forme : Anglais (Royaume-Uni)