

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Évaluation des mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation du nématode du pin dans l'Union européenne

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Septembre 2015

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Évaluation des mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation du nématode du pin dans l'Union européenne

Avis de l'Anses

Rapport d'expertise collective

Septembre 2015

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 24 septembre 2015

AVIS

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

relatif à « la stratégie de lutte imposée par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 relative à la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation dans l'Union Européenne de *Bursaphelenchus xylophilus* »

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 d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

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 rendus publics.

L'Anses a été saisie le 24 avril 2014 par la Direction Générale de l'Alimentation du Ministère en charge de l'Agriculture pour la réalisation de l'expertise suivante : demande d'avis sur la stratégie de lutte imposée par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 relative à la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation dans l'Union Européenne de *Bursaphelenchus xylophilus*.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

La décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 impose aux États Membres, la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation dans l'Union Européenne, de *Bursaphelenchus xylophilus*, le nématode du pin. L'introduction en France de cet organisme nuisible réglementé pourrait occasionner de gros dégâts sur de nombreux résineux. Ces mesures visent en priorité à éradiquer tout foyer de l'organisme nuisible détecté, l'enrayement de tels foyers ne devant être mis en œuvre que dans les zones où l'éradication ne serait pas un objectif réalisable.

Dans ce contexte, les États Membres doivent appliquer des mesures d'éradication pendant au moins quatre ans suite à la détection d'un foyer. Elle consiste notamment en la mise en place de coupes rases (d'un rayon de 500 m réductible sous conditions à 100 m) autour des végétaux infestés et à la mise en place d'une surveillance intensive dans un rayon variant de 6 km à 20 km autour de la zone infestée (rayons supposés suffisants compte tenu de la distance de vol de l'insecte vecteur) (fig.1).

Zone délimitée = zone infestée + zone tampon de 6 à 20 kms

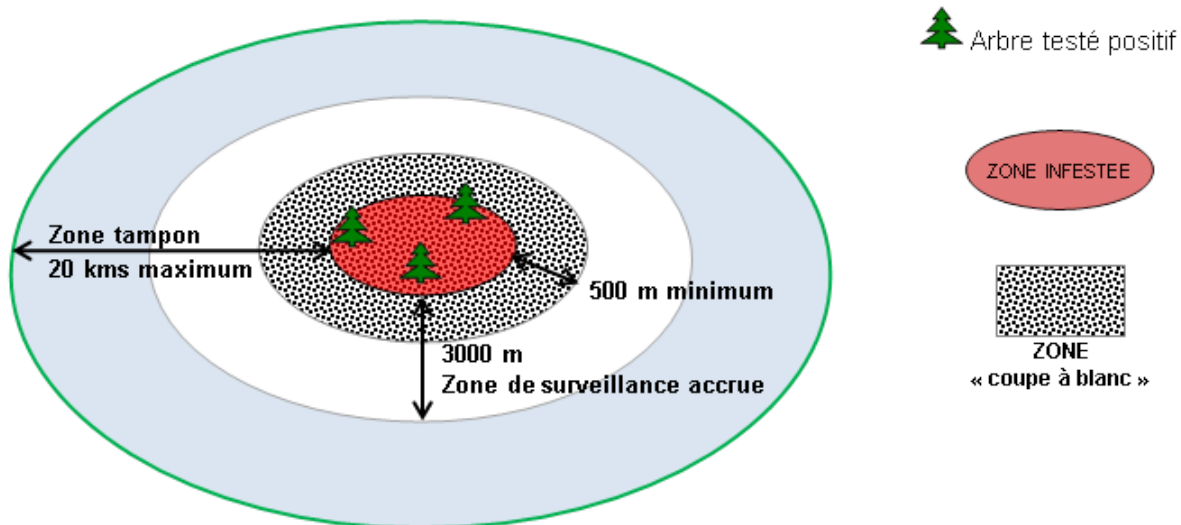


Figure 1 : Schéma décrivant les mesures mises en place dans le cadre de la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012

De telles mesures peuvent avoir des conséquences environnementales importantes et nécessiter des moyens humains conséquents en particulier en cas de détections de multiples foyers. Il est à noter que ces mesures ont été élaborées à l'aide des éléments scientifiques et techniques disponibles à l'époque sur le nématode et son vecteur présent en Asie (insectes du genre *Monochamus*).

Récemment, de nouvelles études ont été publiées. Certaines ont été réalisées en Europe et portent notamment sur :

- la distance de vol de l'insecte vecteur en Europe (*Monochamus galloprovincialis*) qui serait très supérieure à celle de l'insecte vecteur en Asie *Monochamus alternatus* (3 km) qui a servi de référence pour l'élaboration de la décision européenne,
- l'efficacité de la méthode visant à réaliser des micro-injections d'émamectine benzoate pour la réalisation de traitements préventifs (cette molécule aurait à la fois un effet nématocide envers le nématode et insecticide envers les vecteurs).

Dans ce cadre, au regard de ces récentes études, il a été demandé de :

- i) réexaminer la stratégie de lutte telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, afin de déterminer si ces mesures sont toujours adaptées à l'éradication d'éventuels foyers,
- ii) proposer le cas échéant des améliorations de cette stratégie de lutte visant à augmenter le rapport efficacité/impact qui lui est associé.

Les réponses à ces questions pourraient permettre d'engager des discussions à l'échelle européenne visant à faire évoluer, si nécessaire, la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012.

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 (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Risques Biologiques pour la Santé des Végétaux ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail « nématode du pin ». Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 17 juin 2014 et le 8 septembre 2015. Ils ont été adoptés par le CES « Risques Biologiques pour la Santé des Végétaux » réuni le 8 septembre 2015.

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 rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

La saisine 2014-SA-0103 a concerné les mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation, dans l'Union Européenne, du nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus*. Plus précisément, le Groupe de Travail (GT) s'est attaché à : i) réexaminer la stratégie de lutte basée sur les coupes rases telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, afin de déterminer si ces mesures sont toujours adaptées à l'éradication d'éventuels foyers ; ii) proposer le cas échéant des améliorations de cette stratégie de lutte visant à augmenter le rapport efficacité/impact qui lui est associé. Le travail du GT s'est basé à la fois sur une analyse bibliographique approfondie (tenant compte en particulier de données récentes concernant la distance de vol de l'insecte vecteur en Europe et de l'efficacité de la méthode visant à réaliser des micro-injections d'émamectine benzoate pour la réalisation de traitements préventifs) et sur la production de données originales (modélisation permettant de simuler la dispersion de l'insecte vecteur, la transmission du nématode du pin et enfin la coupe des arbres sur une surface de rayon croissant).

Suite à la détection d'un foyer, la décision d'exécution 2012/535/UE préconise des mesures d'éradication pendant au moins quatre ans, consistant notamment en la mise en place : i) de coupes rases d'un rayon de 500 m autour des végétaux infestés et ii) d'une surveillance intensive dans un rayon variant de 6 à 20 km autour de la zone infestée. Pour estimer l'efficacité de ces mesures, un modèle de simulation a été développé et calibré à l'aide de données expérimentales précisant les capacités de dispersion de l'insecte vecteur *Monochamus galloprovincialis*. Ces données ont été obtenues au laboratoire (en manège de vol) et *in natura* (expériences de marquage - lâcher - recapture) dans le contexte de la forêt des Landes de Gascogne, zone forestière parmi les plus exposées au risque d'introduction du nématode du pin en France. Les simulations ensuite réalisées sous différents scénarios (préventifs ou curatifs) montrent que les coupes rases préconisées actuellement dans les réglementations européenne et française ne seraient pas efficaces dans une configuration de paysage de plantations continues de pin maritime. En effet, avec le rayon de 500 m recommandé par la directive européenne, on empêcherait au mieux 11% des transmissions. De plus, pour obtenir un taux de transmission du nématode du pin inférieur à 0.1%, il faudrait mettre en place des coupes rases d'un rayon compris entre 15 et 38 km. Ces simulations, réalisées dans le contexte d'une forêt continue, restent cependant à compléter dans le cas de forêts de pin très fragmentées. À cet égard, il serait

intéressant d'intégrer les données biologiques des forestiers espagnols, directement impliqués dans la lutte contre le nématode dans ce type de paysage.

Dans un second temps, afin de proposer des pistes d'amélioration des mesures de lutte actuelles contre *B. xylophilus*, le GT a envisagé les options suivantes :

- Piégeage de masse de l'insecte vecteur :

Des mesures de piégeage de masse sont parfois envisagées pour éradiquer ou diminuer le niveau des populations d'insectes sous un seuil épidémiologique acceptable. En pratique cela revient à devoir capturer plus de 90%, voire 99%, de la population locale. Trois études récentes, basées sur des dispositifs de marquage - lâcher - recapture des insectes, ont évalué l'efficacité du piégeage de masse de *M. galloprovincialis* en Europe (Espagne et France). Ces trois études s'accordent sur une très faible efficacité de capture dans les pièges à phéromone les plus couramment utilisés, de l'ordre de 0,5 à 1% des insectes circulants. Il faut en outre rappeler que, comme toute méthode « curative », elle devrait être appliquée chaque année, pendant toute la durée de vol de l'insecte. Enfin, et même si cela était techniquement envisageable, il serait éthiquement inacceptable de chercher à éradiquer une espèce indigène comme *M. galloprovincialis*, qui au-delà d'être le vecteur du nématode est partie prenante de la biodiversité des forêts européennes.

- Lutte chimique :

La technique de micro-injection d'une molécule biocide, l'émamectine benzoate (EB), associée à une diffusion systémique du produit dans les troncs injectés, a connu récemment un regain d'intérêt pour lutter contre la maladie du dépérissement du pin due à *B. xylophilus*, suite à des résultats d'efficacité expérimentaux encourageants obtenus à la fois *in vitro* et *in natura*. De fait, cette molécule est actuellement en cours d'évaluation dans l'objectif d'une demande d'autorisation de mise sur le marché en France pour cet usage. Au plan pratique, l'injection d'EB dans les troncs présente certains avantages : absence de phytotoxicité aux doses préconisées, sécurité pour l'applicateur et l'environnement, traitement préventif efficace pendant deux ou trois ans. En revanche, sa mise en œuvre nécessite des opérations manuelles importantes et répétées régulièrement, sans doute incompatibles avec le traitement de massifs forestiers étendus. Pour autant, elle pourrait constituer une solution pertinente pour le traitement d'arbres à forte valeur patrimoniale, de boisements urbains, ou d'arbres localisés près de zones à risques.

- Lutte individu centrée :

Compte tenu du manque d'efficacité des méthodes présentées ci-dessus à l'échelle d'un massif forestier, il apparaît nécessaire d'envisager une autre approche, mieux ciblée. Cette stratégie de lutte dite individu centrée se fonde sur une démarche en trois étapes : i) la détection précoce de l'arrivée du nématode dans une nouvelle région forestière permettant de déclencher un train de mesures visant à réduire son impact avec ii) le repérage précis des arbres individuels symptomatiques, suivi de iii) leur élimination. Sans détailler les actions qui pourraient être entreprises à cet effet, des pistes de réflexion pour la mise en place de cette stratégie individu centrée sont listées ci-après.

- Détecter précocement la présence du nématode reste la priorité de cette stratégie de contrôle. Pour cela, il conviendra de coupler : i) le piégeage des insectes vecteurs (maillage à définir selon le contexte) et la détection (par surveillance au sol et/ou aérienne) des arbres symptomatiques avec ii) une recherche systématique du nématode dans les échantillons (insectes et arbres prélevés).

- Chaque fois que des insectes auront été signalés comme vecteurs de *B. xylophilus*, une triangulation de la position des pièges ayant permis leur capture sera effectuée pour délimiter une zone probable de présence du nématode du pin.

- Chaque fois qu'un arbre contenant le nématode du pin aura été identifié, il sera procédé à son élimination individuelle sur place selon les recommandations actuelles, notamment en procédant entre la fin de l'automne et le début du printemps, quand les insectes vecteurs sont encore dans le bois, et en respectant la réglementation concernant le transport et la gestion du bois coupé dans une zone tampon autour du bois détruit. Compte tenu des résultats de la simulation portant sur les capacités de dispersion de l'insecte vecteur, cette zone tampon devrait être élargie à un rayon 40 km.

En conclusion, Il est considéré que la seule méthode actuellement opérationnelle pour limiter l'extension des dépérissements liés aux infections par le nématode du pin dans un peuplement contaminé, alliant efficacité et coût raisonnable, demeure la combinaison de moyens renforcés (tant techniques que financiers) pour la détection précoce du nématode (sur les insectes vecteurs ou dans les arbres) suivie par des coupes sanitaires au fur et à mesure du développement du foyer. Elle vise à l'élimination ciblée des arbres infectés selon les recommandations ci-dessus. L'objectif de la lutte n'est alors plus d'éradiquer la maladie, mais plutôt d'endiguer sa progression à l'échelle du peuplement. Il est important de rappeler que les mesures détaillées ici, faisant l'objet de la saisine, ciblent essentiellement la dispersion naturelle de l'agent pathogène par son vecteur, autour d'un foyer détecté. L'enrayement de l'épidémie à une large échelle géographique ne pourra être efficace que si ces mesures sont couplées à une application rigoureuse de la réglementation concernant le traitement et le transport des bois, pour éviter les introductions à grande distance.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail rappelle que l'impact du nématode du pin est très préjudiciable au Portugal sur les forêts de pin et pourrait l'être également sur l'ensemble de l'Union Européenne. Des mesures efficaces sur l'ensemble du territoire de l'Union Européenne doivent être mises en œuvre de façon très rigoureuse pour prévenir l'introduction du nématode dans de nouvelles zones.

L'application des mesures de coupes rases telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, ne permet pas l'éradication de *B. xylophilus* dans un paysage de forêts continues de pin.

La seule méthode actuellement opérationnelle pour limiter l'extension des dépérissements liés aux infections par le nématode du pin dans un peuplement contaminé, alliant efficacité et coût raisonnable, demeure la combinaison de moyens renforcés (tant techniques que financiers) pour la détection précoce du nématode (sur les insectes vecteurs ou dans les arbres) suivie par des coupes sanitaires au fur et à mesure du développement du foyer. L'enrayement de l'épidémie à une large échelle géographique ne pourra être efficace que si ces mesures sont couplées à une application rigoureuse de la réglementation européenne en vigueur concernant le traitement et le transport des bois, pour éviter les introductions à grande distance.

Marc Mortureux

MOTS-CLES

Nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus*, *Monochamus galloprovincialis*, Pins, Coupe rase, Modélisation, Gestion alternative.

**Demande d'avis sur la stratégie de lutte imposée par la
décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012
relative à la mise en place de mesures d'urgence destinées
à prévenir la propagation dans l'Union Européenne de
*Bursaphelenchus xylophilus***

Saisine « 2014-SA-0103 Nématode du pin »

**RAPPORT
d'expertise collective**

« Comité d'Expert Spécialisé Risques Biologiques pour la Santé des Plantes »

« Groupe de Travail Nématode du Pin »

Septembre 2015

Mots clés

Nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus*, *Monochamus galloprovincialis*, Pins, Coupe rase, Modélisation, Gestion alternative.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, 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.

GROUPE DE TRAVAIL NEMATODE DU PIN

Président

M. Hervé JACTEL – Directeur de recherche, INRA de Bordeaux, UMR Biodiversité, Gènes & Communautés, Entomologiste forestier.

Membres

M. Philippe CASTAGNONE – Directeur de recherche, INRA PACA, Institut Sophia Agrobiotech, Nématologiste

M. Manuel MOTA – Professeur Université Evora (Portugal), Nématologiste

Mme Christelle ROBINET – Chargée de recherche, INRA Orléans, Modélisatrice

Mme Géraldine ROUX – Maître de conférences, Université d'Orléans, Entomologiste

Mme Corinne SARNIGUET – Responsable technique, Anses Laboratoire de la Santé des Végétaux, Nématologiste

.....

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES Risques Biologiques pour la Santé des Végétaux

Président

M. Philippe REIGNAULT – Professeur des universités, Université du Littoral Côte d'Opale, Unité de Chimie Environnementale et Interactions sur le Vivant

Membres

M. Claude ALABOUVETTE – Retraité (INRA)

Mme. Marie-Hélène BALESDENT – Chargée de recherche, INRA de Versailles-Grignon, UR BIOlogie et GEstion des Risques en agriculture

M. Philippe CASTAGNONE – Directeur de recherche, INRA PACA, Institut Sophia Agrobiotech

M. Bruno CHAUVEL – Chargé de recherche, INRA de Dijon, UMR Agroécologie

M. Nicolas DESNEUX – Chargé de recherche, INRA PACA, Institut Sophia Agrobiotech

Mme Marie-Laure DESPREZ-LOUSTAU – Directrice de recherche, INRA de Bordeaux, UMR Biodiversité, Gènes & Communautés

M. Abraham ESCOBAR-GUTIERREZ – Chargé de recherche, INRA de Lusignan, UR Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères

M. Laurent GENTZBITTEL – Professeur des universités, École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, Laboratoire Écologie Fonctionnelle et Environnement

M. Hervé JACTEL – Directeur de recherche, INRA de Bordeaux, UMR Biodiversité, Gènes & Communautés

M. Xavier NESME – Ingénieur de recherche, INRA, UMR 5557 Écologie microbienne

M. Stéphan STEYER – Attaché scientifique, Centre wallon de Recherches Agronomiques, Département Sciences du Vivant, Unité Biologie des nuisibles et biovigilance

M. Frédéric SUFFERT – Ingénieur de recherche, INRA de Versailles-Grignon, UR BIOlogie et GEstion des Risques en agriculture

Mme Valérie VERDIER – Directrice de recherche, IRD, UMR Résistance des Plantes aux Bioagresseurs

M. Éric VERDIN – Ingénieur de recherche, INRA, Unité de pathologie végétale d'Avignon

M. François VERHEGGEN – Enseignant-chercheur, Université de Liège - Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech, Unité Entomologie fonctionnelle et évolutive

M. Thierry WETZEL – Directeur du laboratoire de Virologie Végétale, RLP Agrosience, AIPlanta – Institute for Plant Research

.....

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

M. Xavier TASSUS – Coordinateur scientifique – Anses, Unité Expertise – Risques Biologiques

.....

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Ministère chargé de l'agriculture – Département Santé des Forêts

M. Dominique PIOU – Entomologiste et Pathologiste Forestier, Expert National Nématode du Pin pour le Ministère en charge de l'Agriculture

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	7
Liste des tableaux	7
Liste des figures	7
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	9
1.1 Contexte	9
1.2 Objet de la saisine	10
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Anses, CES, GT, rapporteur(s)) et organisation	10
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	10
2 Préambule	11
2.1 Répartition géographique de <i>B. xylophilus</i>	11
2.2 Plantes hôtes de <i>B. xylophilus</i>	12
2.3 Cycle de vie du nématode en relation avec son vecteur	12
2.4 Cycle de développement de <i>B. xylophilus</i>	13
2.5 Cycle de développement de <i>Monochamus galloprovincialis</i>	14
2.5.1 Phase de développement larvaire	14
2.5.2 Phase de reproduction de l'adulte	15
2.6 Développement de la maladie	15
2.7 Impact économique	16
2.8 Impact environnemental	17
2.9 Risque d'introduction en France	17
2.10 Probabilité d'installation en France	18
3 Modélisation de la dispersion de <i>Monochamus galloprovincialis</i> agent vecteur du nématode du pin et évaluation de l'efficacité des mesures de coupe rase	19
3.1 Contexte	19
3.1.1 Simulation de l'effet des coupes rases	20
3.1.1.1 Scénario 1 : « action préventive »	20
3.1.1.2 Scénario 2 : « action curative »	21
3.2 Calibration du modèle de dispersion	22
3.2.1 Expérience de lâcher-recapture de <i>Monochamus</i>	22
3.3 Modèle de dispersion de <i>Monochamus</i>	24
3.3.1 Calibration du modèle de dispersion	26
3.3.2 Simulation de la dispersion avec coupes rases.....	27
3.3.2.1 Scénario 1 « préventif »	27
3.3.2.2 Scénario 2 « curatif »	29
3.3.3 Résultats de la simulation de la dispersion et effet des coupes rases	30

4	Autres méthodes de lutte directe	33
4.1	Piégeage de masse de l'insecte vecteur	33
4.2	Lutte "arbre centrée"	34
4.2.1	Surveillance et détection	35
4.2.1.1	Piégeage des insectes vecteurs.....	35
4.2.1.2	Surveillance et détection des arbres symptomatiques	36
4.2.1.2.1	<i>Méthodes de surveillance au sol</i>	36
4.2.1.2.2	<i>Méthodes aériennes</i>	36
4.2.2	Gestion des arbres contaminés	37
4.2.2.1	Exploitation de l'arbre.....	37
4.2.2.2	Émamectine benzoate.....	37
4.2.3	Transport et gestion du bois coupé dans une zone tampon autour du bois détruit	38
4.2.4	Coupes sanitaires	38
5	Conclusions du groupe de travail	40
6	Bibliographie.....	42
6.1	Publications.....	42
6.2	Normes.....	46
6.3	Législation et réglementation.....	46
ANNEXES	47
Annexe 1 : Lettre de saisine.....		48
Annexe 3 : Suivi des actualisations du rapport.....		50

Sigles et abréviations

Anses : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

B. xylophilus : *Bursaphelenchus xylophilus*

CES : Comité d'expert Spécialisé

cm : centimètre

DSF : Département Santé des Forêts

EB : Emamectine Benzoate

eff : efficacité du piège

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

fig : figure

ha : hectare

km : kilomètre

L : stade larvaire

LNR : laboratoire National de Référence

m : mètre

M. galloprovincialis : *Monochamus galloprovincialis*

NIMP 15: Norme Internationale pour les Mesures Phytosanitaires n° 15

OAV : Office Alimentaire et Vétérinaire

OEPP : Organisation Européenne et Méditerranéenne de la Protection des Plantes

REPHRAME : Research Extending Plant Health Risk And Monitoring Evaluation

tab : tableau

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats de l'expérience en manège de vol pour les *Monochamus* matures (David *et al.*, 2013). _____ 19

Tableau 2 : Rayon de coupe rase recommandé selon les scénarios et le nombre d'insectes portant le nématode à leur envol _____ 32

Liste des figures

Figure 1 : Schéma décrivant les mesures mises en place dans le cadre de la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012. _____ 9

Figure 2 : Symptômes causés par le nématode du pin sur pins _____ 11

Figure 3: Répartition mondiale de *B. xylophilus* (d'après global data base, OEPP : <https://gd.eppo.int/taxon/BURSXY/distribution>) _____ 11

Figure 4 : Cycle biologique de *B. xylophilus*, en relation avec celui de son vecteur _____ 13

Figure 5 : Cycle de développement de *B. xylophilus* _____ 13

Figure 6 : Exemple de cycle de développement de *M. galloprovincialis* sur pin maritime en Aquitaine _____ 15

- Figure 7 : Répartition des principales espèces de pins sensibles au nématode du pin et fréquence des années avec une température moyenne supérieure à 20°C en juin - juillet - août, entre 2000 et 2013. 18
- Figure 8 : Illustration du scénario 1 « action préventive » et scénario 2 « action curative ». 21
- Figure 9 : Illustration de la taille de la coupe rase nécessaire (grand cercle bleu) pour éliminer tous les arbres potentiellement infectés par le nématode dans le cas où cet arbre est situé en périphérie de la zone contaminée (scénario 2 « action curative »). 22
- Figure 10 : Relation entre moyenne des captures de *M. galloprovincialis* par piège à phéromone et distance entre pièges voisins (dans la même paire). Noter que la moyenne des captures tend vers une asymptote pour des valeurs de distances supérieures à 200m, suggérant un rayon d'interception des pièges de l'ordre de 100m. 23
- Figure 11 : Disposition des 9 clusters de 4 pièges pour l'expérience de lâcher-recapture 24
- Figure 12 : Schéma montrant l'évolution des capacités de dispersion des insectes en fonction de leur âge. 25
- Figure 13 : Comparaison entre les moyennes observées et prédites de taux et de durée de recaptures pour les insectes immatures et matures, intra et inter-clusters, avec le modèle de dispersion paramétré comme indiqué dans le texte. 27
- Figure 14 : Illustration de la stratégie d'évitement de la coupe rase (CCZ= Clear Cut Zone) et les angles de vol autorisés (en rouge). 28
- Figure 15 : Taux de transmission du nématode en fonction de l'âge de l'insecte (modifié de Naves et *al.* 2007a) 29
- Figure 16 : Simulation de la dispersion d'insectes et de la transmission du nématode (points rouges) au-delà du rayon de coupe rase (cercle noir). 29
- Figure 17: Nombre relatif de transmissions du nématode en fonction du rayon de coupe rase et calcul de l'intervalle de confiance pour les rayons recommandés. 30
- Figure 18 : Illustration des simulations selon chaque scénario pour un rayon de coupe rase de 3000 m et n = 100 insectes. Les points noirs correspondent à la position des insectes cumulée au fil du temps en fonction de leur capacité et comportement de dispersion, et les points rouges aux arbres où l'insecte a inoculé le nématode. 31
- Figure 19 : Comparaison des trois scénarios en termes de nombre relatif de transmission en dehors de la coupe rase (pour 1000 insectes) en fonction du rayon de la coupe rase. 31

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

La décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 impose aux États Membres, la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation dans l'Union Européenne, de *Bursaphelenchus xylophilus*, le nématode du pin. L'introduction en France de cet organisme nuisible réglementé pourrait occasionner de gros dégâts sur de nombreux résineux. Ces mesures visent en priorité à éradiquer tout foyer de l'organisme nuisible détecté, l'enrayement (application de mesures phytosanitaires dans ou autour d'une zone infestée afin de prévenir la dissémination d'un organisme nuisible) de tels foyers ne devant être mis en œuvre que dans les zones où l'éradication ne serait pas un objectif réalisable.

Dans ce contexte, les États Membres doivent appliquer des mesures d'éradication pendant au moins quatre ans suite à la détection d'un foyer. Elle consiste notamment en la mise en place de coupes rases (d'un rayon de 500 m réductible sous conditions à 100 m) autour des végétaux infestés et à la mise en place d'une surveillance intensive dans un rayon variant de 6 km à 20 km autour de la zone infestée (rayons supposés suffisants compte tenu de la distance de vol de l'insecte vecteur) (fig.1).

Zone délimitée = zone infestée + zone tampon de 6 à 20 kms

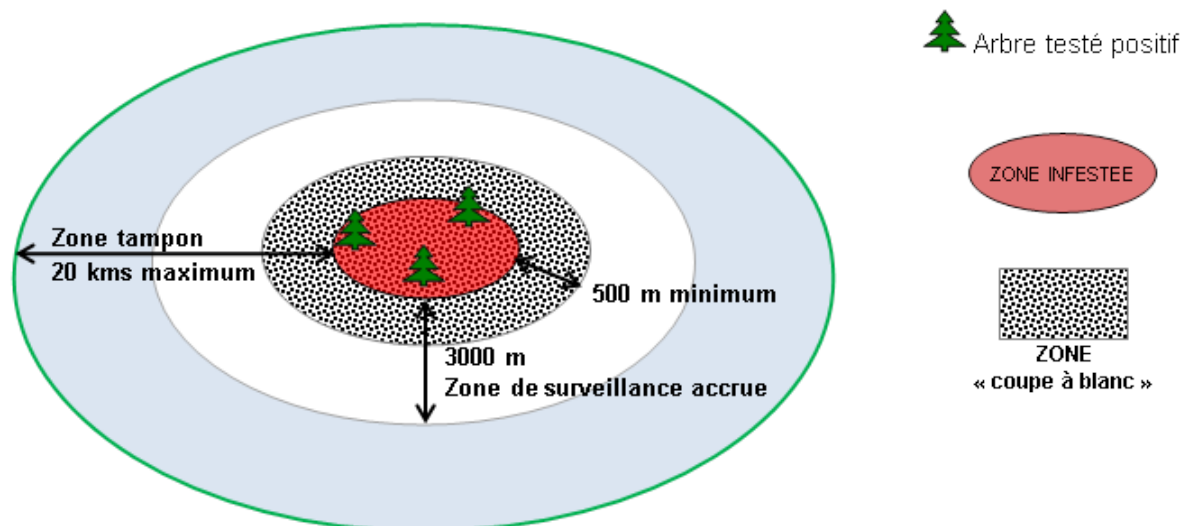


Figure 1 : Schéma décrivant les mesures mises en place dans le cadre de la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012

De telles mesures peuvent avoir des conséquences environnementales importantes et nécessiter des moyens humains conséquents en particulier en cas de détections de multiples foyers. Il est à noter que ces mesures ont été élaborées à l'aide des éléments scientifiques et techniques disponibles à l'époque sur le nématode et son vecteur (insectes du genre *Monochamus*).

1.2 Objet de la saisine

De nouvelles études ont été publiées récemment. Certaines ont été réalisées en Europe et portent notamment sur :

- la distance de vol de l'insecte vecteur en Europe (*Monochamus galloprovincialis*) qui serait très supérieure à celle de l'insecte vecteur en Asie *Monochamus alternatus* (3 km) qui a servi de référence pour l'élaboration de la décision européenne,
- l'efficacité de la méthode visant à réaliser des micro-injections d'émamectine benzoate pour la réalisation de traitements préventifs (cette molécule aurait à la fois un effet nématocide envers le nématode et insecticide envers les vecteurs).

Dans ce cadre, au regard de ces récentes études, il est demandé de :

- i) réexaminer la stratégie de lutte telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, afin de déterminer si ces mesures sont toujours adaptées à l'éradication d'éventuels foyers,
- ii) proposer le cas échéant des améliorations de cette stratégie de lutte visant à augmenter le rapport efficacité/impact qui lui est associé.

Les réponses à ces questions pourraient permettre d'engager des discussions à l'échelle européenne visant à faire évoluer, si nécessaire, la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre (Anses, CES, GT, rapporteur(s)) et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail «nématode du pin», rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) «Risques Biologiques pour la Santé des Végétaux», l'instruction de cette saisine.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

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 (Mai 2003) ».

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

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 rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

2 Préambule

Bursaphelenchus xylophilus est le nématode phytopathogène responsable de la maladie du dépérissement du pin : les arbres atteints rougissent, perdent leurs aiguilles et meurent en quelques semaines (fig. 2).



Photos Setúbal Portugal, G. Roux, INRA Orléans

Figure 2 : Symptômes causés par le nématode *B. xylophilus* sur pins

2.1 Répartition géographique de *B. xylophilus*

B. xylophilus est largement distribué au Canada et aux USA d'où il est originaire (Wingfield *et al.*, 1982 ; Robbins, 1982) et a également été signalé une fois au Mexique en 1992 (Dwinell, 1993). Il est présent depuis le début du XX^e siècle au Japon, très vraisemblablement introduit par du bois contaminé importé des États-Unis d'Amérique (Nickle *et al.*, 1981). Il a ensuite été détecté en Corée, en Chine et à Taiwan dans les années quatre-vingt (OEPP, 1986) et depuis 1999 en Europe au Portugal (Mota *et al.*, 1999), pays dans lequel ce nématode est considéré aujourd'hui comme établi. Il a été trouvé sur l'île de Madère en 2009 et a été détecté plusieurs fois en Espagne depuis 2008 (quatre foyers en cours de gestion) (Abelleira *et al.*, 2011). L'ensemble de ces signalements est reporté sur la carte en figure 3.

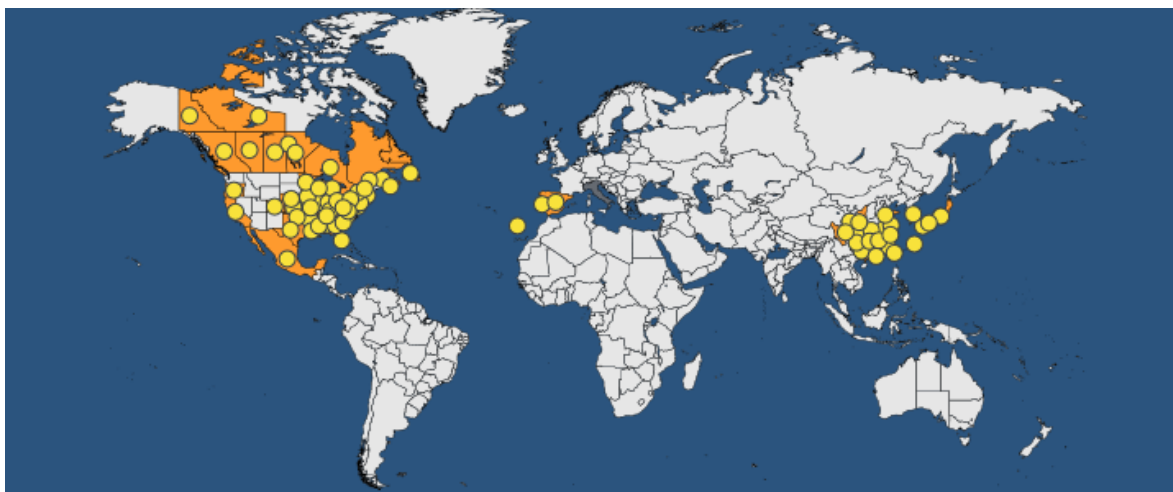


Figure 3 : Répartition mondiale de *B. xylophilus* (d'après global data base, OEPP : <https://gd.eppo.int/taxon/BURSXY/distribution>)

2.2 Plantes hôtes de *B. xylophilus*

B. xylophilus se rencontre principalement sur les pins (*Pinus* spp). Les espèces de pin nord-américaines sont naturellement résistantes ou tolérantes au nématode (Wingfield *et al.*, 1982 ; Rutherford *et al.*, 1987). Cette résistance naturelle résulte d'une longue coévolution entre le nématode et les espèces natives de pin (Lieutier *et al.*, 2009).

Il cause d'importants dégâts en Asie sur *Pinus densiflora*, *P. thunbergii*, *P. luchuensis* et *P. massoniana* (Kwon *et al.*, 2011; Togashi and Jikumaru, 2007; Wang *et al.*, 2014).

Les pins européens sont tous sensibles à *B. xylophilus*, notamment *P. sylvestris*, *P. nigra*, *P. pinaster*, *P. halepensis* et *P. pinea* (Evans *et al.*, 1996 ; OEPP, 2009a). Les pins européens introduits aux USA subissent aussi d'importants dégâts dus au nématode, notamment après des périodes de sécheresse (Randall *et al.*, 2006). Au Portugal, la seule espèce sensible observée est *P. pinaster* (Rodrigues, 2008) mais *B. xylophilus* a aussi été observé sur des pins noirs morts (Inacio *et al.*, 2014). Bien que le nématode puisse se développer sur pin pignon, celui-ci semble particulièrement résistant (Silva *et al.*, 2015) et ne serait pas infecté *in natura* au Portugal (Santos et Vasconcelos, 2012).

B. xylophilus peut être aussi trouvé sur des arbres morts (sans être à l'origine de leur mortalité) des espèces des genres *Abies*, *Chamaecyparis*, *Cedrus*, *Larix*, *Picea* et *Pseudotsuga* ainsi que d'autres conifères à l'exception de *Thuja* spp. (OEPP, 2009b).

2.3 Cycle de vie du nématode en relation avec son vecteur

Dans tous les pays où il a été introduit, le nématode du pin est transmis d'un arbre à un autre par un insecte xylophage longicorne du genre *Monochamus*. Le seul vecteur actuellement connu en Europe est *Monochamus galloprovincialis* (Sousa *et al.*, 2001, 2002) mais *M. sutor* et *M. sartor* sont des vecteurs potentiels, notamment dans les forêts de pin sylvestre (Tomiczek et Hoyer-Tomiczek, 2008). Le cycle biologique montre des interactions complexes entre le nématode et son insecte vecteur (fig. 4).

La transmission des nématodes à un arbre sensible par un insecte porteur est réalisée selon 2 modes :

- soit sur des arbres sains par les blessures occasionnées par les insectes lors de leur repas de maturation sur les pousses vertes,
- soit sur des arbres dépérissant ou morts (ou sur des branches mortes dans le houppier d'arbres vivants) par les insectes femelles lors de la ponte.

Quand il s'agit d'une transmission lors de l'oviposition (partie gauche du cycle, fig. 4), les nématodes quittent l'insecte et pénètrent dans l'arbre par les encoches creusées par la femelle pour pondre. Dans le bois, les nématodes se nourrissent alors exclusivement de mycélium de champignon (*Ceratocystis* spp. ou *Ophiostoma* spp. le plus souvent).

Quand les nématodes sont transmis lors du repas de maturation des jeunes insectes adultes, ils quittent l'insecte (ils sont essentiellement situés dans les trachées) et pénètrent par les blessures de nutrition (Aikawa 2008). Ils se multiplient ensuite dans les tubes criblés du xylème (canaux de sève) où ils se nourrissent de cellules épithéliales (Takemoto 2008).

Bien que la plupart d'entre eux restent autour du point d'inoculation (environ 46 % selon Takemoto, 2008), les nématodes se déplacent aussi très rapidement dans tout l'arbre par les canaux verticaux du xylème et leur action de dessèchement et d'obstruction des canaux provoque le dépérissement par embolie, puis la mort de l'arbre en 4 à 5 semaines en conditions climatiques favorables. L'arbre dépérissant devient alors attractif pour les *Monochamus* et en particulier pour la ponte des femelles.

Ainsi, une relation étroite s'établit entre le nématode et son vecteur : l'insecte véhicule le nématode en assurant sa dispersion (phorésie) et le nématode fournit à l'insecte des sites favorables à l'oviposition en provoquant la mort des arbres.

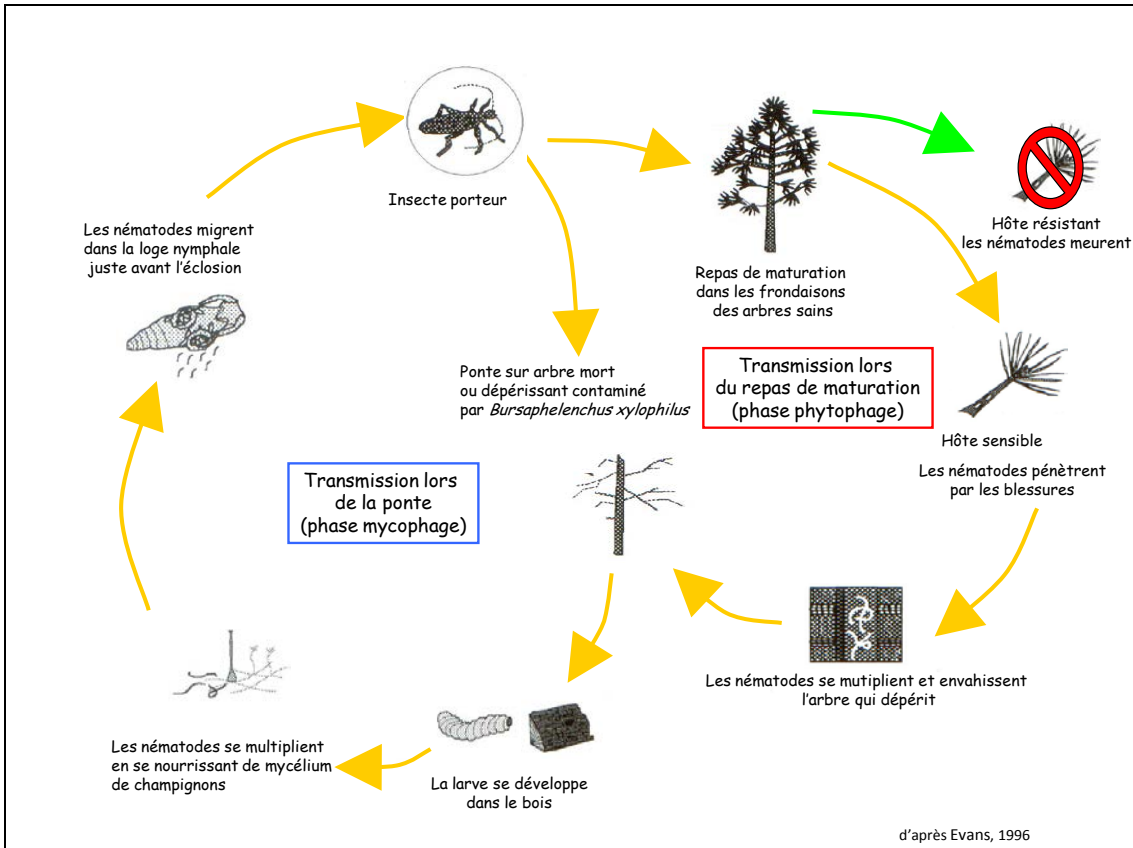


Figure 4 : Cycle biologique de *B. xylophilus*, en relation avec celui de son vecteur *M. galloprovincialis*

2.4 Cycle de développement de *B. xylophilus*

Le cycle de développement de *B. xylophilus* comprend : un cycle de propagation et un cycle de dispersion (Aikawa, 2008) (fig. 5).

Le cycle de propagation permet au nématode de se reproduire rapidement quand les conditions environnementales sont favorables. Le cycle de dispersion facilite la transmission du nématode par le vecteur et permet de longues périodes de quiescence en conditions défavorables.

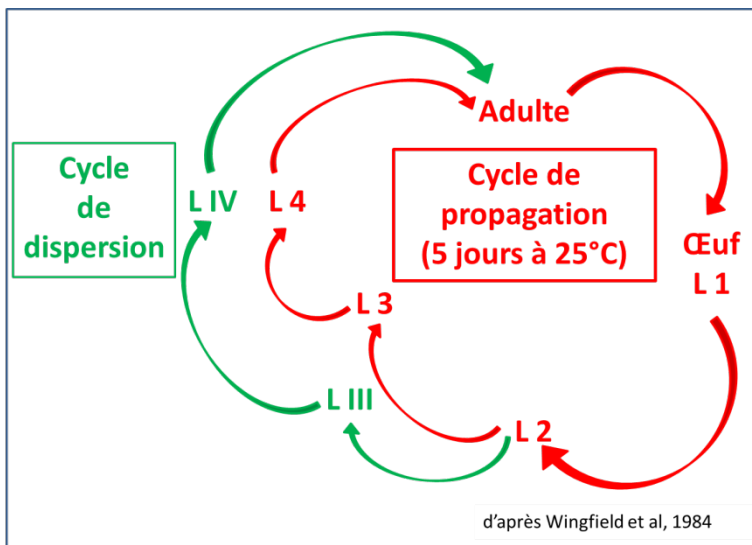


Figure 5 : Cycle de développement de *B. xylophilus*

Le cycle de propagation de *B. xylophilus* comprend six stades de développement : l'œuf, 4 stades larvaires et l'adulte. *B. xylophilus* peut effectuer un cycle en 4 à 5 jours à une température de 25°C, depuis l'œuf jusqu'à l'adulte en passant par les 4 stades larvaires L1 à L4. La durée du cycle de propagation du nématode varie avec la température : les températures les plus favorables se situent entre 20 et 30°C. Ainsi, en culture artificielle, un cycle complet est réalisé en trois jours à 30°C, 6 jours à 20°C, 12 jours à 15°C. Les seuils thermiques de développement de *B. xylophilus* sont 6,5°C pour la limite inférieure et 40 °C pour la limite supérieure. Une exposition à 50°C pendant quelques minutes est létale pour le nématode (Takemoto, 2008).

Le cycle de dispersion se met en place quand l'arbre est dépérissant ou mort et uniquement en présence de nymphes de *Monochamus* dans le bois : un stade de dispersion L III se forme à la place du stade L 3, c'est un stade de survie, le nématode ne se nourrit pas et il est capable de résister à des conditions défavorables telles que sécheresse, manque de nourriture, températures basses (Futai, 2013).

Ces larves L III se rassemblent dans le bois autour de la loge nymphale du *Monochamus* probablement grâce à une attraction due aux substances émises par la nymphe. Juste avant l'émergence de l'insecte adulte de *Monochamus*, les larves L III muent en quatrième stade de dispersion L IV ou larves "dauer" spécialisées dans la survie pendant le transport du nématode par l'insecte (Aikawa, 2008). Ces larves « dauer » se placent dans la loge nymphale et quand le jeune insecte adulte émerge, il se charge de nématodes qui s'installent sous les élytres et pénètrent dans les trachées de l'insecte. L'insecte immature infesté s'envole vers la cime des pins pour se nourrir de jeunes pousses de pins (repas de maturation).

Immédiatement après avoir pénétré dans un pin sensible, les larves « dauer » muent en adultes et se reproduisent extrêmement rapidement.

2.5 Cycle de développement de *Monochamus galloprovincialis*

Le cycle de développement de *Monochamus galloprovincialis* comporte deux phases distinctes, une phase interne correspondant au développement de la larve dans le bois dépérissant ou récemment mort et une phase externe de maturation-dispersion vers un nouvel arbre hôte, phase dédiée essentiellement à la reproduction de l'adulte. De ce fait, la ponte ne s'effectue pas dans la branche où les adultes se sont nourris, mais nécessite la recherche d'arbres hôtes favorables, contribuant ainsi à la dispersion de l'espèce (Futai, 2013).

2.5.1 Phase de développement larvaire:

Durant l'été, les œufs sont déposés individuellement sous l'écorce dans des encoches de ponte qu'effectue la femelle à l'aide de ses mandibules. L'encoche est recouverte d'une substance gélatineuse sécrétée par la femelle, ce qui permet de protéger l'œuf des champignons et de prévenir la ponte d'autres femelles ou le cannibalisme, fréquent chez cette espèce (Naves *et al.*, 2007a). À l'éclosion des œufs, les larves creusent des galeries dans le phloème, entre l'écorce et l'aubier, avant de s'enfoncer, dès le troisième stade larvaire, dans le xylème pour établir une loge nymphale et hiverner. Les premiers stades larvaires se développent durant l'été et le troisième stade larvaire est atteint avant l'hiver (fig. 6). La sciure et les fèces rejetées régulièrement par la larve lors de sa progression dans le bois colmatent les galeries et isolent des variations de température extérieures. La taille, la forme et la disposition de ces débris sont de bons indicateurs de la présence de l'espèce. La nymphose a lieu au printemps suivant. Le développement larvaire, comprenant 4 stades, s'effectue généralement durant une saison, mais peut varier selon des conditions de température, de la date d'oviposition et de la qualité du rondin, pouvant se prolonger jusqu'à deux ans (Tomminen, 1993 ; Koutroumpa *et al.*, 2008).

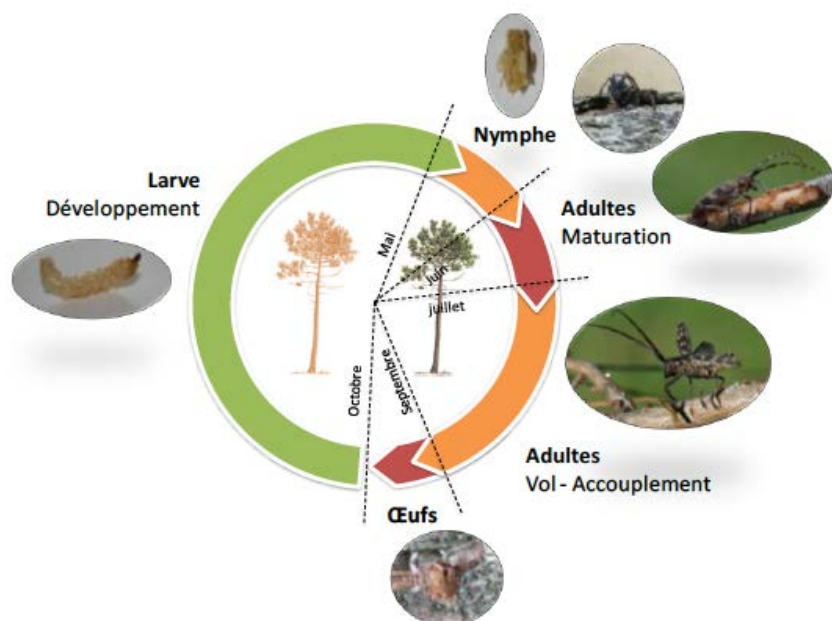


Figure 6 : Exemple de cycle de développement de *M. galloprovincialis* sur pin maritime en Aquitaine

2.5.2 Phase de reproduction de l'adulte:

À la fin du printemps ou au début de l'été en fonction des conditions climatiques, les jeunes adultes (immatures) forent à travers l'écorce un trou de sortie caractéristique de forme circulaire. Les émergences ont lieu tout l'été, jusqu'en septembre parfois, avec un pic entre juin et juillet sous nos latitudes (Naves *et al.*, 2008, Koutroumpa *et al.* 2008). En général les mâles émergent avant les femelles. Les jeunes adultes effectuent alors une première nutrition de maturation en s'alimentant de la sève élaborée présente dans le phloème de jeunes pousses de pin. Les insectes sont attirés par une combinaison de signaux visuels (silhouette de pin) et olfactifs (odeur de résine) (Giffard *et al.*, *in prep.*). Cette période de nutrition, nécessaire au développement des organes reproducteurs, se poursuit pendant une quinzaine de jours (David *et al.*, *soumis*; Naves *et al.*, 2006) (fig. 6). Les adultes sexuellement matures recherchent des sites de ponte sur les arbres dépérissant, guidés à distance par les volatiles émis par les pins affaiblis (exemple alpha-pinène) et par les scolytes attaquant ces arbres (phéromone d'agrégation contenant ipsenol et ipsdienol) (Ibeas *et al.*, 2008 ; Alvarez *et al.*, 2014). En plus de ces substances, la reconnaissance des femelles par les mâles à courte distance s'effectue par l'intermédiaire d'un hydrocarbure produit par les mâles, le 2-méthyl-3-butenol (Ibeas *et al.*, 2008). La fécondité chez cette espèce est élevée, puisqu'une femelle peut déposer jusqu'à 140 œufs tout au long de sa vie adulte, même si plus de 60% des œufs sont déposés durant la première moitié de la période d'oviposition (Koutroumpa *et al.*, 2008). Les adultes vivent environ 4 mois (Giffard *et al.*, 2015). Pendant toute leur vie adulte les insectes sont capables de se disperser en volant. Les capacités de vol augmentent avec l'âge et la dimension des insectes, ainsi qu'avec les réserves lipidiques accumulées pendant les phases de nutrition sur pousses (David *et al.*, 2014). Sur manège de vol, les insectes peuvent parcourir en moyenne 2 km par jour. Des expériences de lâchers-recaptures confirment ces grandes capacités de dispersion avec des insectes fréquemment recapturés dans des pièges situés à plusieurs dizaines de kilomètres du point de lâcher (Gallego *et al.*, 2012; Mas *et al.*, 2013).

2.6 Développement de la maladie

Les nématodes qui ont pénétré dans un arbre sain par les blessures de nutrition se déplacent dans les canaux de résine, se nourrissant de cellules vivantes en décomposant les parois cellulaires

grâce aux cellulases qu'ils sécrètent. Ils migrent très rapidement dans les branches et envahissent le tronc. Ils peuvent se déplacer jusqu'à 1,50 m par jour (Kuroda *et al.*, 1992) dans les canaux horizontaux et verticaux et ainsi envahir un arbre de 8 m en dix à quatorze jours (Takemoto, 2008).

La réduction puis l'arrêt de la production de résine est le premier symptôme détectable. La réaction de défense de l'arbre contre l'agression du pathogène se traduit par une deshydratation des trachéides. Les cavitations induites dans ces trachéides entraînent des embolies, la montée de sève est bloquée (Kuroda, 2008). Environ trois semaines après l'infestation, l'arbre présente les premiers signes de dessèchement : décoloration soudaine des aiguilles anciennes puis décoloration et flétrissement des jeunes aiguilles. L'arbre peut mourir trente à quarante jours après son infestation, renfermant des millions de nématodes essentiellement distribués dans la partie aérienne. L'apparition des symptômes dépend de divers facteurs environnementaux comme la capacité en eau du sol, la sécheresse et la température. Par exemple les symptômes de dépérissement n'ont lieu que lorsque la température moyenne estivale dépasse les 20°C (Rutherford *et al.*, 1987, 1990; OEPP, 2009a). On considère que les arbres ne présenteraient pas de symptôme en dessous de l'isotherme 20°C en été.

Cas des arbres infestés et asymptomatiques :

Certains arbres peuvent cependant survivre à l'infestation, pendant un an, voire plus. Ceci peut être dû entre autres causes à une infection tardive ou insuffisante (faible charge en nématodes), des conditions climatiques fraîches défavorables au développement du nématode, des mécanismes de résistance (non élucidés à ce jour) ou à l'interaction de ces facteurs. Ces arbres infestés sans symptôme (asymptomatiques) peuvent jouer un rôle important dans la dissémination de la maladie car ils agissent comme réservoirs de nématodes (Bergdhal, 1999) et aussi car ils émettent des composés volatils susceptibles d'attirer les femelles de *Monochamus* (Takeuchi *et al.*, 2007 ; Futai *et al.*, 2008).

2.7 Impact économique

Au Japon, la maladie a causé des pertes allant jusqu'à un million de mètres cubes de bois par an, au début du XX^e siècle et deux millions par an depuis que les arbres ne sont plus éliminés (après 1970) (Mamiya, 2004).

En 1986, le budget annuel pour le contrôle de la maladie était de cinquante millions de dollars (US) dont plus de la moitié pour les traitements chimiques.

En Corée, quelques quatre cent millions de dollars (US) ont été dépensés au cours des trois dernières décennies pour les campagnes d'éradication du nématode (FAO, 2015).

En Chine, les dégâts sont évalués à trois cent soixante millions de dollars (US) (coût direct) entre 1982 et 2002 (Shi *et al.*, 2007).

Au Portugal, environ vingt-quatre millions d'euros ont été dépensés entre 2001 et 2009 pour le contrôle du nématode (cinq millions d'arbres abattus ; Rodrigues, 2008). En Espagne, le coût de la gestion et éradication du premier foyer d'Estrémadure a été estimé à neuf millions d'euros (OEPP, 2009a).

Une étude récente estime que les pertes en Europe dues aux dégâts du nématode seraient de l'ordre de vingt milliards d'euros au cours de la période 2008 - 2030 en l'absence de mesures de contrôle efficaces (Soliman *et al.*, 2012).

Durant la période 2001-2012, l'Union Européenne a consacré trente millions d'euros aux mesures de soutien pour la surveillance et la lutte contre le nématode du pin (données Commission Européenne).

Aux États-Unis, malgré l'absence de symptômes occasionnés par le nématode du pin sur les espèces natives, sa seule présence éventuelle dans le bois a eu un impact économique important sur la filière exportation de bois. À partir de 1984, certains pays (Finlande, Suède et Norvège puis la Corée) ont en effet décidé d'un embargo sur le bois en provenance des USA (Bergdahl, 1988). De plus, à partir de 1985, l'OEPP a recommandé à ses pays membres des restrictions d'importations de bois à partir des pays contaminés. Malgré tout, des dégâts directs sont

régulièrement observés sur le pin sylvestre, essence exotique aux États-Unis mais d'intérêt économique (sapin de Noël).

2.8 Impact environnemental

Au Japon, en Chine et en Corée, la rapide propagation de la maladie a détruit de grandes surfaces de forêts de pins, entraînant des changements significatifs de l'écosystème local. Sur l'archipel d'Ogasawara au Japon, pratiquement tous les *Pinus luchuensis* ont été détruits (Mamiya, 1983).

La disparition des arbres a eu un impact non négligeable sur l'érosion des sols, la stabilisation du sable, la protection contre le vent sans parler de la valeur esthétique et spirituelle des lieux. La plupart des forêts impactées par la maladie ont vu les pins remplacés par d'autres essences forestières (exemple *Quercus mongolica* au Japon) entraînant une forte modification de la biodiversité.

2.9 Risque d'introduction en France

Les nématodes peuvent passer d'un arbre à un autre grâce à leur insecte vecteur. L'expansion naturelle du nématode est donc plutôt lente, dépendant des capacités et du comportement de dispersion de son vecteur ainsi que de la dynamique de ses populations. De 2000 à 2007, la zone affectée par le nématode au Portugal est passée de 309000 ha à 510000 ha (Rodrigues, 2008). La chaîne des Pyrénées pourrait constituer une barrière partielle à la migration d'insectes issus de zones contaminées par le nématode (Haran *et al.*, 2015).

Le mode de dispersion à longue distance du nématode est constitué par les échanges de bois provenant de zones infestées. Il y a danger d'introduction si le bois qui transporte le nématode contient ou attire les insectes vecteurs. Ces derniers pourront transmettre les nématodes à des pins après leur émergence (Robinet *et al.*, 2011). Le nématode et son vecteur sont capables de survivre quarante semaines (plus de dix mois) après l'abattage et la transformation du bois (Sousa *et al.*, 2011). Ainsi, du bois non traité à la chaleur (56°C à cœur) ou au bromure de méthyle comme exigé dans la réglementation (norme internationale NIMP15 ; FAO, 2009), utilisé comme matériau d'emballage (caissage, palettes, etc.) ou de calage, pourra contenir une population abondante de *B. xylophilus* capable de survivre suffisamment longtemps pour attendre la fin du développement du vecteur éventuellement présent dans le bois et ayant survécu au processus de sciage.

Les filières potentielles d'introduction du nématode en France sont par ordre d'importance (Evans *et al.*, 1996 ; OEPP, 2009a):

- Bois d'emballage ou de calage : la présence du nématode et de son vecteur est hautement probable dans les bois récoltés dans des zones contaminées, à l'exception des bois traités (selon la norme NIMP15). Le bois infecté peut contenir de grandes quantités de nématodes et de *Monochamus*.
- Bois d'espèces hôtes, sciés ou non, avec ou sans écorce: la présence de *B. xylophilus* et des *Monochamus* dans les troncs non écorchés transportés représente un risque potentiel d'introduction très important, limité par les interdictions d'échanges commerciaux intra UE depuis des zones contaminées.
- Plants pour plantation : risques seulement dans les rares cas où le nématode et son vecteur sont présents. Le risque est limité à des arbres de diamètre supérieur à trois centimètres, le plus souvent d'au moins cinq ans, donc seulement aux plantations ornementales d'arbres développés.
- Déchets de bois : probabilité faible si les mesures de contrôle sont respectées (dimension des copeaux inférieure à trois centimètres assurant la destruction des larves d'insectes), uniquement dans le cas où insectes et nématodes sont présents.
- Écorces isolées : risque quasi inexistant car, si les écorces peuvent porter le nématode, le vecteur ne peut être présent.

Récemment, il a été démontré la possibilité de transmission des nématodes par contact entre planche de bois saines et contaminées si l'humidité du bois est supérieure à 20% (Rephrame Final Report 2015).

2.10 Probabilité d'installation en France

Le nématode du pin peut s'établir potentiellement sur tout le territoire français :

- Le vecteur est présent dans toutes les régions de France, en particulier dans le massif des Landes.
- La surface forestière française occupée par des espèces de pin sensibles au nématode est d'environ 2,5 millions d'ha (Inventaire Forestier National, 2013).
- Les conditions climatiques de la moitié sud de la France où les températures estivales sont supérieures à 20°C sont favorables au développement du nématode, de son hôte et à l'expression de dépérissement (fig. 7).
- La présence d'autres espèces de *Bursaphelenchus* indigènes et non pathogènes pour le pin, tels que *B. mucronatus*, présent sur tout le territoire français et occupant la même niche écologique que *B. xylophilus* ne semble pas être un obstacle à l'installation de *B. xylophilus*. Des travaux menés en laboratoire ont même montré que *B. mucronatus* pourrait être déplacé de sa niche écologique par *B. xylophilus* en cas d'introduction de celui-ci (Vincent *et al.*, 2008).

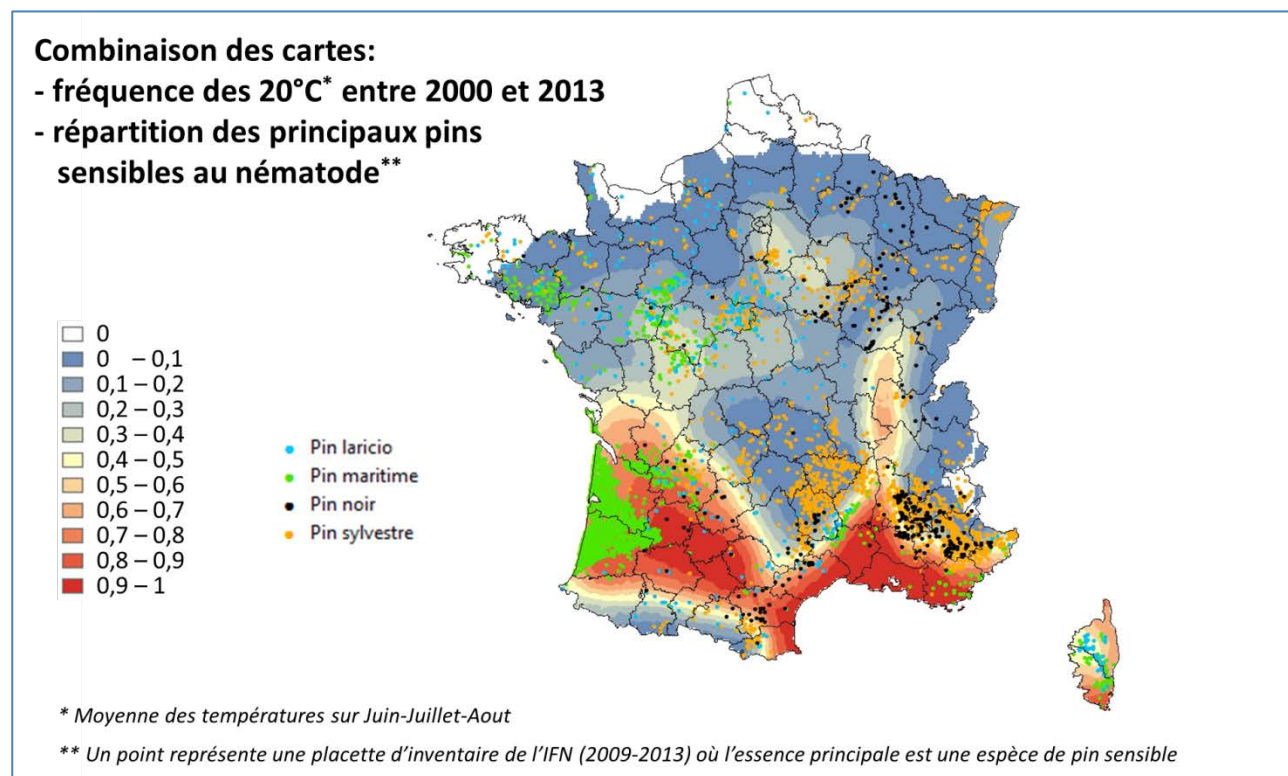


Figure 7 : Répartition des principales espèces de pins sensibles au nématode du pin et fréquence des années avec une température moyenne supérieure à 20°C en juin - juillet - août, entre 2000 et 2013. D'après l'étude d'Hannah Gruffudd et Hugh Evans (rapport final du projet Européen REPHRAME; <http://www.rephrame.eu/pwn.php>), les endroits où les températures moyennes de juin-juillet-août sont $\geq 20^\circ\text{C}$ ont un risque très élevé de développement de la maladie si le nématode s'y trouvait. Ce résultat dérive d'un modèle d'évapotranspiration de l'arbre en tenant compte de l'effet du nématode du pin (modèle ETpN).

3 Modélisation de la dispersion de *Monochamus galloprovincialis* agent vecteur du nématode du pin et évaluation de l'efficacité des mesures de coupe rase

3.1 Contexte

Afin de pouvoir évaluer l'efficacité des coupes rases comme mesure d'éradication du nématode du pin, le GT a développé un modèle permettant de simuler la dispersion de l'insecte vecteur, la transmission du nématode du pin et enfin la coupe des arbres sur une surface de rayon croissant.

Pour modéliser les capacités de vol de l'insecte vecteur européen, *Monochamus galloprovincialis*, le GT a d'abord utilisé les données obtenues sur manège de vol (thèse de Guillaume David, 2014 ; David *et al.*, 2013). Deux expériences ont été conduites : une sur les insectes matures (âgés de plus de 30 jours) et une autre sur les immatures (âgés de moins de 20 jours). Cette distinction est importante car l'inoculation du nématode dans l'arbre est surtout accomplie par les insectes immatures, lors de leur repas de maturation sur pousses vertes (voir introduction).

Capacités de vol des insectes vecteurs

Dans la première expérience, les insectes ont été obtenus à partir de bois infestés en forêt des Landes de Gascogne, et élevés au laboratoire pendant 30 jours après émergence. Ils ont été testés sur manège de vol une fois par semaine. Les résultats montrent qu'ils peuvent voler en moyenne 2 km par jour de test (1,93 km pour les femelles et 2,14 km pour les mâles ; tab 1).

	Total cumulated flights for flyers		Cumulated flights per recording session		Individual flights	
	Females n = 20	Males n = 27	Females n = 169	Males n = 197	Females n = 325	Males n = 316
Total distance flown (km)						
Mean (\pm SE)	16.26 \pm 2.70	15.59 \pm 2.90	1.93 \pm 0.12	2.14 \pm 0.14	1.00 \pm 0.05	1.33 \pm 0.08
Median	12.37	10.46	1.53	1.72	0.72	0.81
Maximum	44.85	62.72	6.80	8.54	4.33	8.54
Flight speed (m/s)						
Mean (\pm SE)	1.43 \pm 0.06	1.35 \pm 0.05	1.36 \pm 0.03	1.36 \pm 0.03	1.33 \pm 0.02	1.37 \pm 0.02

Tableau 1 : Résultats de l'expérience en manège de vol pour les *Monochamus* matures (David *et al.*, 2013).

Une deuxième expérience en manège de vol a été conduite sur les insectes immatures. Les individus ont été récupérés après émergence au laboratoire puis testés à 0, 5, 10, 20 et 30 jours (une seule fois chacun, durant 10 minutes). Cette expérience montre que : i) environ 45% des insectes sont capables de voler dès leur émergence, ii) les capacités de vol sont les mêmes pour les mâles et les femelles et iii) les immatures acquièrent progressivement leur capacité de vol jusqu'à atteindre celle des matures. Cette expérience confirme par ailleurs que la maturité sexuelle des femelles est atteinte après environ 3 semaines (Naves *et al.*, 2006, David *et al.*, soumis).

Ce type de mesure au laboratoire présente cependant plusieurs limites. Tout d'abord, les manèges de vol permettent de mesurer une capacité de vol potentielle, de comparer les performances entre individus de différents genres ou états physiologiques, mais ne donnent pas d'indications sur le comportement de vol dans la nature. Par ailleurs, dans les conditions de l'expérience sus-décrite,

un seul test a été réalisé par semaine : il nous est donc impossible de définir la fréquence des vols des insectes, en particulier s'ils sont capables de voler cette distance tous les jours (dans ce cas, ils pourraient voler effectivement 2 km chaque jour) ou sur une semaine (dans ce cas, ils ne pourraient voler en moyenne qu'environ $2/7 = 0,3$ km chaque jour).

Afin de lever ces incertitudes et compléter nos connaissances sur la dispersion des insectes vecteurs, une expérience de marquage-lâcher-recapture a été conduite en forêt des Landes avec des insectes immatures (obtenus par élevage au laboratoire) et matures (obtenus par piégeage en forêt) (voir description plus loin).

Les résultats de ces deux méthodes d'estimation des capacités de dispersion sont complémentaires. Les données en manège de vol surestiment vraisemblablement la dispersion car la distance n'est pas parcourue en ligne droite sur le terrain et l'insecte ne porte pas son propre poids sur le manège de vol. Les données de lâcher-recapture quant à elles sous-estiment vraisemblablement la dispersion car les pièges peuvent capturer des individus qui auraient potentiellement pu voler plus loin, la distance maximale de dispersion mesurable étant égale à la distance entre le point de lâcher et le piège le plus éloigné.

Les données fournies dans les expériences en manège de vol ont été utilisées pour initialiser le modèle numérique de simulation des événements de dispersion de *M. galloprovincialis* en forêt. Celles obtenues par lâcher-recapture ont servi à affiner le paramétrage de ce modèle (voir description plus loin « Modélisation du lâcher-recapture ») afin de le rendre le plus réaliste possible.

Dans un premier temps, nous développons donc cette approche de calibration du modèle, et dans un deuxième temps, nous appliquons le modèle de dispersion pour simuler l'effet des coupes rases.

3.1.1 Simulation de l'effet des coupes rases

Selon la réglementation en vigueur, dès qu'un arbre infesté par le nématode est détecté, il faut procéder à une coupe rase autour de cet arbre. Les dernières directives européennes recommandent un rayon de coupe rase de 500m. Toutefois, il est apparu que l'objectif même de cette mesure n'était pas clair. Deux scénarios ont donc été envisagés, notamment sur la base de discussions avec les experts du Département de la Santé des Forêts du Ministère de l'Agriculture et de la Forêt.

3.1.1.1 Scénario 1 : « action préventive »

Dans ce scénario, on suppose que l'on a détecté précocement un arbre infesté et que l'on a éliminé cet arbre avant même que les insectes vecteurs puissent émerger et se disperser (fig. 8). Toutefois, dans le doute d'avoir véritablement éliminé tout le bois porteur de larves de *Monochamus* provenant de cet arbre (notamment des rémanents de coupe), une coupe rase est faite autour de celui-ci (abattage d'arbres sains) pour empêcher que les quelques insectes restants et portant le nématode puissent se disperser et transmettre le nématode. Le rayon de coupe rase est donc supposé être suffisamment grand pour que les insectes immatures émergents ne puissent sortir vivants de la zone déboisée.

Dans ce premier scénario, l'arbre est infecté par le nématode l'année N, détecté symptomatique et détruit cette même année N. La coupe rase est faite durant l'hiver N - N+1 et les insectes restants sont sensés se disperser l'année N+1 à travers la coupe rase centrée sur l'arbre qui avait été détecté comme infesté. Deux stratégies peuvent alors être envisagées :

- *Scénario 1-1 : Stratégie de non-évitement* de la coupe rase
La coupe rase n'a pas d'effet sur le comportement de dispersion de l'insecte : il vole avec le même comportement en milieu forestier ou en milieu ouvert (ex. en coupe rase).
- *Scénario 1-2 : Stratégie d'évitement* de la coupe rase

L'insecte essaie de sortir de la coupe rase (s'il a effectivement les capacités d'en sortir) et s'il en est déjà sorti, il évite d'y rentrer à nouveau. Ce scénario est inspiré de résultats d'un essai comportemental réalisé au laboratoire d'entomologie forestière de l'INRA de Bordeaux en conditions contrôlées. Dans cette expérience en chambre climatique, des insectes immatures et

matures ont été lâchés en présence de pins maritimes en pot et de pins en plastique de même couleur et dimension. Les insectes des deux sexes et des deux états de développement physiologiques ont montré une tendance significative au déplacement orienté vers les "vrais" pins, traduisant une attraction par les odeurs de branches vertes (Giffard *et al.*, soumis).

3.1.1.2 Scénario 2 : « action curative »

Dans ce scénario, on suppose que des insectes infectés par le nématode se sont dispersés l'année N (par exemple, à partir de bois infestés qui auraient été transportés à un endroit donné), le nématode est transmis à plusieurs arbres durant l'année N et on détecte un arbre infesté cette même année (fig. 8). Dans le doute de ne pas avoir détecté d'autres arbres infestés au même moment, une coupe rase est effectuée durant l'hiver N - N+1 afin d'éliminer d'autres arbres contaminés mais non détectés ou asymptomatiques. Dans ce scénario, la coupe rase est effectuée autour de l'arbre détecté comme infesté mais pas nécessairement à partir du point d'émergence des insectes (qui reste inconnu en réalité). Cet arbre peut donc se situer *a priori* n'importe où dans la zone de dispersion des insectes émergés des bois contaminés (y compris à sa périphérie). De plus, la dispersion des insectes se fait avant la coupe rase, il n'y a donc pas de stratégie d'évitement à considérer.

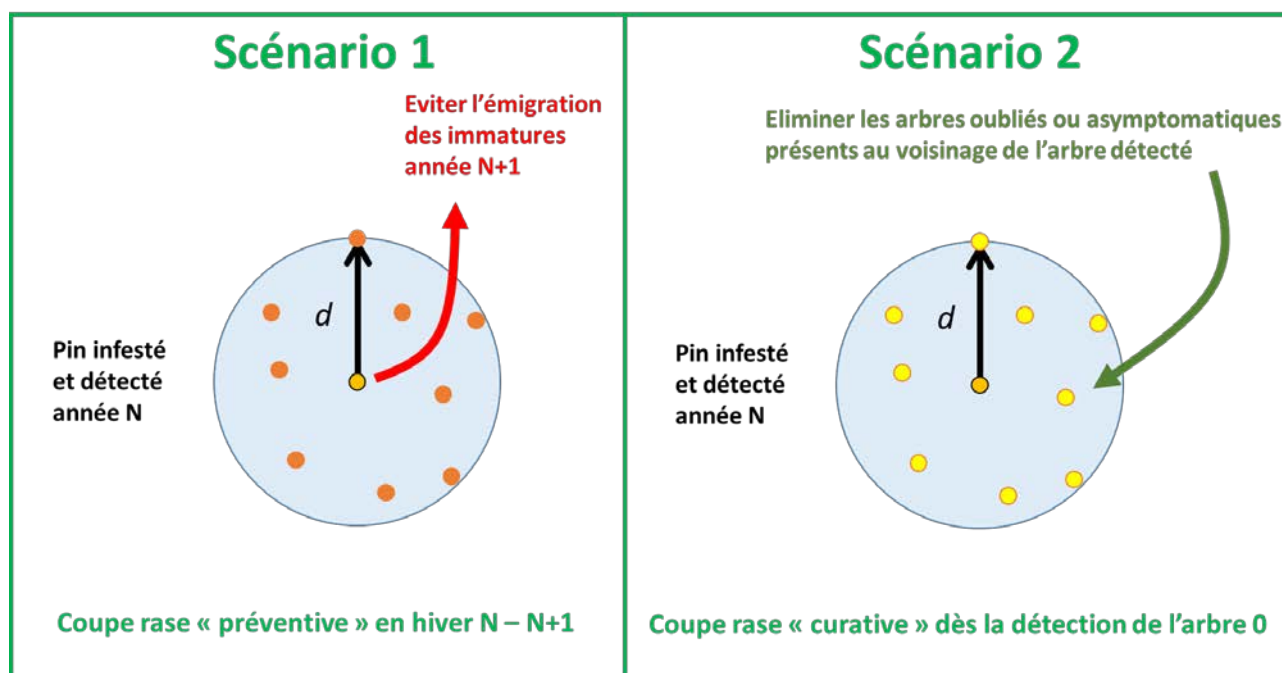


Figure 8 : Illustration du scénario 1 « action préventive » et scénario 2 « action curative ».

En théorie le rayon de coupe rase nécessaire pour éliminer tous les arbres potentiellement infectés dans le scénario 2 est donc d'environ le double de celui nécessaire pour prévenir l'infection d'arbres nouveaux par les insectes "restants" dans le scénario 1 (fig. 9).

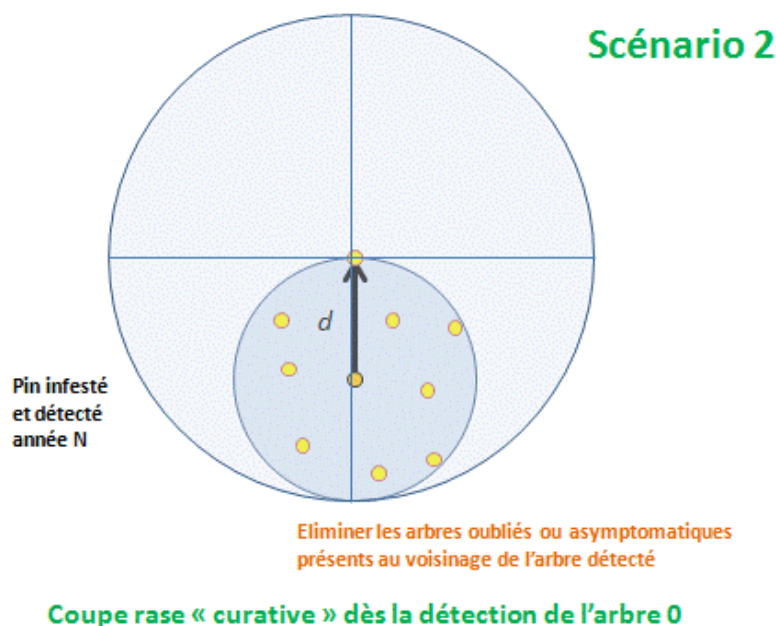


Figure 9 : Illustration de la taille de la coupe rase nécessaire (grand cercle bleu) pour éliminer tous les arbres potentiellement infectés par le nématode dans le cas où cet arbre est situé en périphérie de la zone contaminée (scénario 2 « action curative »).

Le modèle de dispersion a donc été appliqué sous ces différents scénarios afin d'évaluer l'efficacité des coupes rases.

Remarque importante :

Devant la complexité d'intégrer l'effet du paysage dans le modèle, et par manque de données de calibration/validation, nous faisons ici l'hypothèse que les **pins sont présents partout** (même probabilité de présence dans toutes les directions). Cette hypothèse est cohérente avec la méthode de paramétrage du modèle de dispersion qui repose sur des expériences réalisées en forêt des Landes de Gascogne, avec des *M. galloprovincialis* issus de cette forêt. Or cette forêt présente des paysages de couvert continu de pin maritime (environ 90% de l'occupation du sol). Les résultats de cette étude sont donc valables pour le cas des Landes. Leur extrapolation à d'autres régions ou d'autres paysages, où la forêt de pin peut être moins présente et/ou plus fragmentée, doit donc être menée avec grande précaution.

3.2 Calibration du modèle de dispersion

3.2.1 Expérience de lâcher-recapture de *Monochamus*

Dans une expérience préalable réalisée en 2012 dans le cadre du projet européen FP7 REPHRAME, le rayon d'interception des pièges à phéromone de *M. galloprovincialis* a été estimé. Celui-ci permet de définir le cercle à l'intérieur duquel les insectes doivent passer pour pouvoir percevoir et répondre à l'attraction de la phéromone. Les pièges testés sont ceux désormais utilisés en routine par le DSF pour la surveillance de l'insecte : un modèle Cross Vane (Econex®) équipé de la phéromone GalloProtect pack® (Alvarez *et al.*, 2014). Par principe, si deux pièges identiques voisins sont éloignés d'une distance inférieure au double de leur rayon d'interception, ils entrent en concurrence pour la capture des insectes (leurs cercles d'interception se croisent). Les captures moyennes par piège sont donc inférieures aux moyennes de captures obtenues dans des pièges "indépendants" spatialement. À la limite, si les pièges sont rapprochés à l'extrême (positionnés au même endroit), leurs taux de captures sont égaux à la moitié de la moyenne de capture des pièges indépendants spatialement (puisque les insectes interceptés dans leur rayon d'attraction se répartissent alternativement dans les deux pièges). On démontre que la courbe de capture par piège en fonction de la distance entre deux pièges voisins présente une forme

sigmoïde, variant asymptotiquement de $M/2$ à M (avec M la moyenne des captures par piège sans interaction avec ses voisins). Cette courbe atteint la valeur de l'asymptote pour une distance d entre piège égale à $2R$, avec R le rayon d'interception des pièges (fig.10). Une expérience de piégeage en forêt des Landes de Gascogne a été réalisée où les niveaux de capture moyens dans des paires de pièges distants entre eux de 25, 50, 100, 200 et 300m ont été comparés. Il a effectivement été observé une relation sigmoïdale entre la moyenne des captures par piège et la distance entre les pièges et pu ainsi être estimé le rayon d'interception des pièges à une distance d'environ 100m (Jactel *et al.*, 2013).

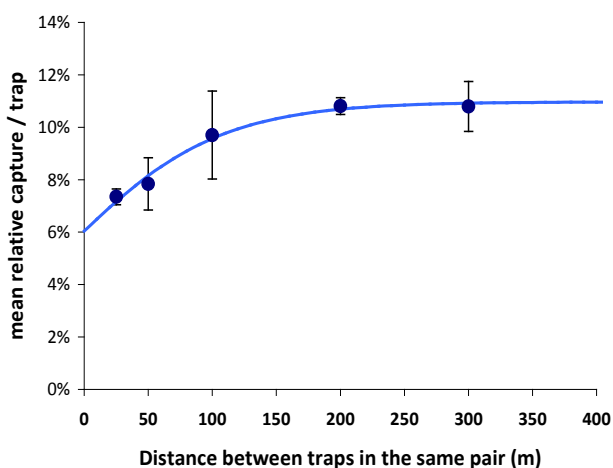


Figure 10 : Relation entre moyenne des captures de *M. galloprovincialis* par piège à phéromone et distance entre pièges voisins (dans la même paire). Noter que la moyenne des captures tend vers une asymptote pour des valeurs de distances supérieures à 200m, suggérant un rayon d'interception des pièges de l'ordre de 100m.

Partant de ces résultats, une expérience de marquage - lâcher - recapture de *M. galloprovincialis* a été mise en place. Les insectes immatures ont été obtenus par élevage au laboratoire de pièces de bois mort infestées par les larves de l'insecte (identifiées par la présence de sciure caractéristique). Les insectes matures ont été obtenus par piégeage phéromonal en forêt des Landes de Gascogne. Les observations préliminaires ainsi que celles des collègues espagnols et portugais du projet REPHRAME ont montré que les insectes immatures ne répondent pas à l'attraction des phéromones à l'émergence et que les premières recaptures interviennent au bout d'environ deux semaines. Ceci indique que la grande majorité des insectes capturés dans les pièges à phéromone sont déjà matures.

Sur le terrain, neuf clusters de quatre pièges ont été installés, de sorte que les pièges d'un même cluster étaient distants de 200m entre eux (double du rayon d'interception). Les clusters étaient disposés au centre et à la périphérie de deux cercles concentriques de 300m et 900m de rayon (fig. 11). Ces pièges étaient les mêmes que dans l'expérience précédente : type Cross Vane® et diffuseur GalloProtect pack®.

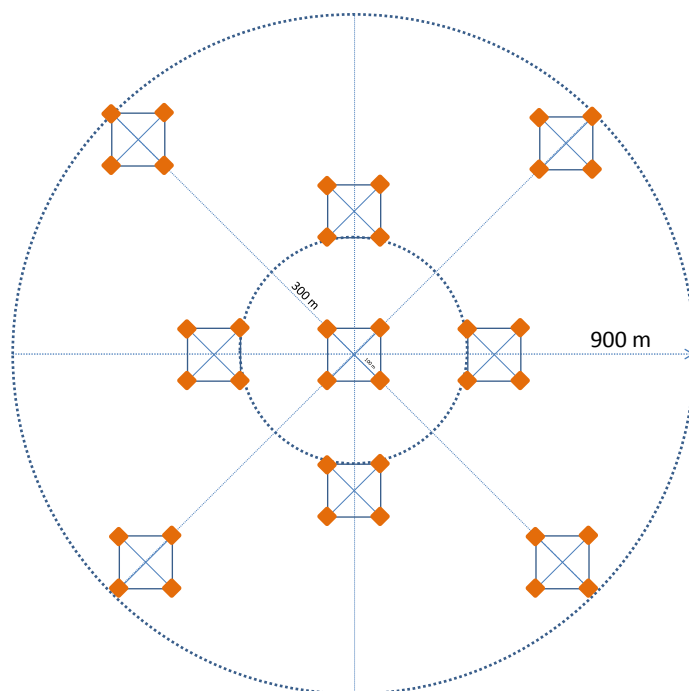


Figure 11 : Disposition des 9 clusters de 4 pièges pour l'expérience de lâcher-recapture

Les insectes ont été marqués individuellement avec des pastilles numérotées (conçues à l'origine pour marquer les abeilles) et des points de peinture sur les élytres de telle sorte que l'on pouvait retracer leur état physiologique (immature vs. mature), leur lieu (au centre de quel cluster) et date de lâcher et leur lieu (dans quel piège) et date de recapture.

Un total de 499 *Monochamus* immatures et 3085 matures ont été marqués et lâchés en juillet - août 2014. Sur la durée de piégeage (150 jours), 17716 *Monochamus* ont été capturés dans les 36 pièges dont 37 immatures marqués et 193 matures marqués. Le taux moyen de recapture des insectes marqués s'est élevé à 6,3% pour les immatures et 5,1% pour les matures. La distance maximale de dispersion enregistrée ("à vol d'oiseau") a été de 1754m pour les immatures (moyenne de 841m) et de 1886m (moyenne de 483m) pour les matures.

3.3 Modèle de dispersion de *Monochamus*

On suppose que cent insectes portant le nématode sont lâchés au centre de chacun des neuf clusters. On considère que la longévité des insectes adultes est de 120 jours (longévité observée dans l'expérience de manège de vol de David *et al.*, 2013).

Pour les insectes matures utilisés dans l'expérience de capture-marquage-lâcher-recapture (capturés au départ par un piège), on suppose qu'ils ont plus de vingt jours mais on ne connaît pas exactement leur âge. Nous tirons donc au hasard l'âge de chacun des cent insectes (en nombre de jours depuis leur émergence) dans une loi uniforme

$U[\text{min} = 20, \text{max} = 120]$.

D'après l'expérience de manège de vol, tous les insectes ne volent pas au cours d'un jour de test. On suppose donc qu'il y a une probabilité journalière $pf = 0.61$ de voler (David, 2013). On teste également un temps de repos initial « **délai de réponse** » avant réponse à l'attraction des pièges (pouvant être nécessaire à la récupération du stress imposé par la manipulation des insectes) ainsi qu'un temps de repos après un vol pour pouvoir s'alimenter « **repos entre deux vols** ».

Pour chaque jour allant de 1 (jour de lâcher) à 70 (durée maximale observée entre le lâcher et la recapture) :

- On sélectionne les individus qui volent (c'est-à-dire : ceux n'ayant pas atteint l'âge maximal de 120 jours, ceux n'ayant pas déjà été capturés, ceux qui volent effectivement ce jour-là

choisis de manière aléatoire dans une loi binomiale de probabilité pf , ceux qui ne sont pas en repos initial et ceux qui ne sont pas en repos pour s'alimenter).

- Pour ces individus « volants », on connaît leur position (P1) et on choisit la direction dans laquelle ils vont voler de manière aléatoire dans une loi uniforme $U[\min = 0, \max = 2\pi]$ et la distance de manière aléatoire dans une **loi exponentielle négative de moyenne α** :

$$k_M(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\left|\frac{x}{\alpha}\right|\right)$$

On calcule la nouvelle position (P2) de chaque individu et on regarde si sa trajectoire (entre P1 et P2) passe à proximité d'un piège. On considère un rayon d'interception des pièges de 100 m (cf expérience décrite plus haut) c'est-à-dire que si un insecte passe à moins de 100 m d'un piège, on considère qu'il peut répondre à son attraction. Pour les insectes passant dans ce rayon d'interception, on considère qu'ils ont seulement une certaine probabilité d'être capturé qui dépend de l'**efficacité du piège, eff** . On choisit donc de manière aléatoire les insectes capturés dans une loi binomiale de probabilité eff parmi ceux qui passent à proximité.

- Pour les insectes non capturés, on considère qu'ils sont arrivés à leur position P2.

Pour les insectes immatures, nous appliquons un modèle très proche du précédent à l'exception des points suivants :

- L'âge initial des individus (en nombre de jours depuis leur émergence) est choisi de manière aléatoire dans une loi uniforme $U[\min = 1, \max = 7]$ car il y a un lâcher par semaine. On lâche donc les individus qui ont émergé au cours de la semaine écoulée.
- Le délai de réponse correspond ici plutôt au délai de maturité pour répondre à l'attractif car la perturbation est réduite étant donné que les individus n'ont pas déjà été capturés et ramenés au laboratoire mais qu'ils ont directement émergé au laboratoire.
- La probabilité journalière de voler est $pf = 0.45$.
- Les insectes lâchés sont immatures au départ, mais ils vont devenir matures au cours de leur dispersion. Selon leur âge j (en jours), on calcule la distance moyenne de dispersion **$\delta(j) \alpha$** sachant qu'au-delà de 20 jours ils sont matures et que leur capacité de dispersion a atteint la valeur des matures (**α**) (fig. 12). On choisit donc la distance dans la loi exponentielle négative de moyenne **$\delta(j) \alpha$** :

$$k_I(x, j) = \frac{1}{\delta(j)\alpha} \exp\left(-\left|\frac{x}{\delta(j)\alpha}\right|\right)$$

$$\delta(j) = 0.67 + 0.016 \times j \text{ (cette équation est tirée de David } et \text{ al., soumis)}$$

$$\text{avec } \delta(j = 20) = \alpha$$

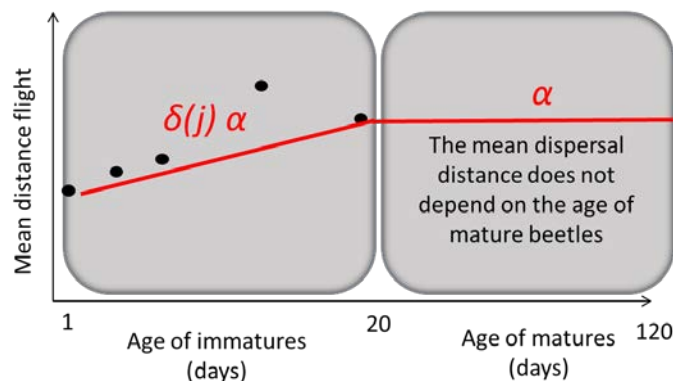


Figure 12 : Schéma montrant l'évolution des capacités de dispersion des insectes en fonction de leur âge.

3.3.1 Calibration du modèle de dispersion

Pour chaque cluster, nous pouvons calculer à l'aide du modèle de dispersion le taux de capture moyen ainsi que la moyenne des dates de capture afin de les comparer aux observations. L'objectif est de trouver la meilleure estimation des paramètres du modèle, c'est-à-dire du nombre de jours de repos entre deux vols et de la distance de dispersion moyenne journalière, α . Pour cela, nous devons également estimer le délai de réponse (inhérent à l'expérience) ainsi que l'efficacité du piège (paramètres que nous n'utiliserons pas dans la deuxième partie de l'étude pour évaluer l'efficacité des coupes rases).

Au total nous testons cinq valeurs de α x trois valeurs de *eff* x trois valeurs de délai de réponse x quatre valeurs de repos entre deux vols = 180 différentes combinaisons afin de choisir la meilleure. Nous testons en effet :

- α = 500, 1000, 1500, 2000, 2500 m
- *eff* = 0.5, 1, 2%
- **délai de réponse** = 4, 8, 12 jours
- **repos entre 2 vols** = 0, 1, 2, 3 jours

Comme ce modèle a une composante stochastique, nous réalisons cent répétitions pour chaque combinaison (180 x 100 = 18000 simulations).

Les données de recaptures observées permettent de calculer :

- le pourcentage de recapture à l'intérieur d'un même cluster (nombre d'insectes lâchés et recapturés dans cluster *i* / nombre total des insectes lâchés dans un cluster *i*), aussi bien pour les insectes immatures que matures : soit **%-immat-intra** (9 valeurs) et **%-mat-intra** (neuf valeurs)
- la durée moyenne de recapture de ces mêmes insectes (différence entre les dates de lâcher et de recapture) : **durée-immat-intra** (neuf valeurs) et **durée-mat-intra** (neuf valeurs)
- le pourcentage de recapture dans les autres clusters (nombre d'insectes lâchés et recapturés dans les clusters $j \neq i$ / nombre total des insectes lâchés dans un cluster *i*) : soit **%-immat-inter** (72 valeurs) et **%-mat-inter** (72 valeurs)
- la durée moyenne de recapture de ces mêmes insectes (différence entre les dates de lâcher et de recapture) : **durée-immat-inter** (72 valeurs) et **durée-mat-inter** (72 valeurs)

Pour estimer l'ajustement des données prédites par le modèle et les données observées, nous avons calculé :

- le biais relatif = |moyenne prédite - moyenne observée| / moyenne observée
- l'erreur quadratique moyenne : $\sqrt{[\text{moyenne (valeur prédite - valeur observée)}^2]}$

Au total, nous avons donc 8 variables x 2 estimateurs = 16 critères pour choisir la meilleure des 180 combinaisons de paramètres. Pour mener à bien cette optimisation nous avons utilisé une méthode d'analyse multicritères fondée sur l'algorithme PROMETHEE et développée sur la plateforme Visual-PROMETHEE 1.4 ®. Nous avons considéré que l'objectif du classement des 180 combinaisons (ranking) était de minimiser les critères (recherche du biais le plus faible et de l'erreur la plus faible), nous avons utilisé des fonctions de préférence linéaires et accordé le même poids à tous les critères.

Le meilleur ajustement du modèle de dispersion des immatures a été obtenu avec la combinaison des paramètres suivants (fig. 13) :

- α = 2000m
- *eff* = 1%
- **délai de réponse** = 12 jours
- **repos entre 2 vols** = 1 jour

Le meilleur ajustement du modèle de dispersion des matures a été obtenu avec la combinaison des paramètres suivants (fig. 13):

- α = 2000m

- **eff** = 1%
- **délai de réponse** = 8 jours
- **repos entre 2 vols** = 1 jour

Les deux paramétrages sont donc cohérents entre eux. Ils sont également cohérents avec les données de distance de vol estimées sur manège de vol (David *et al.*, 2013) qui sont de 1.93 km pour les femelles et 2.14 km pour les mâles (Tab1).

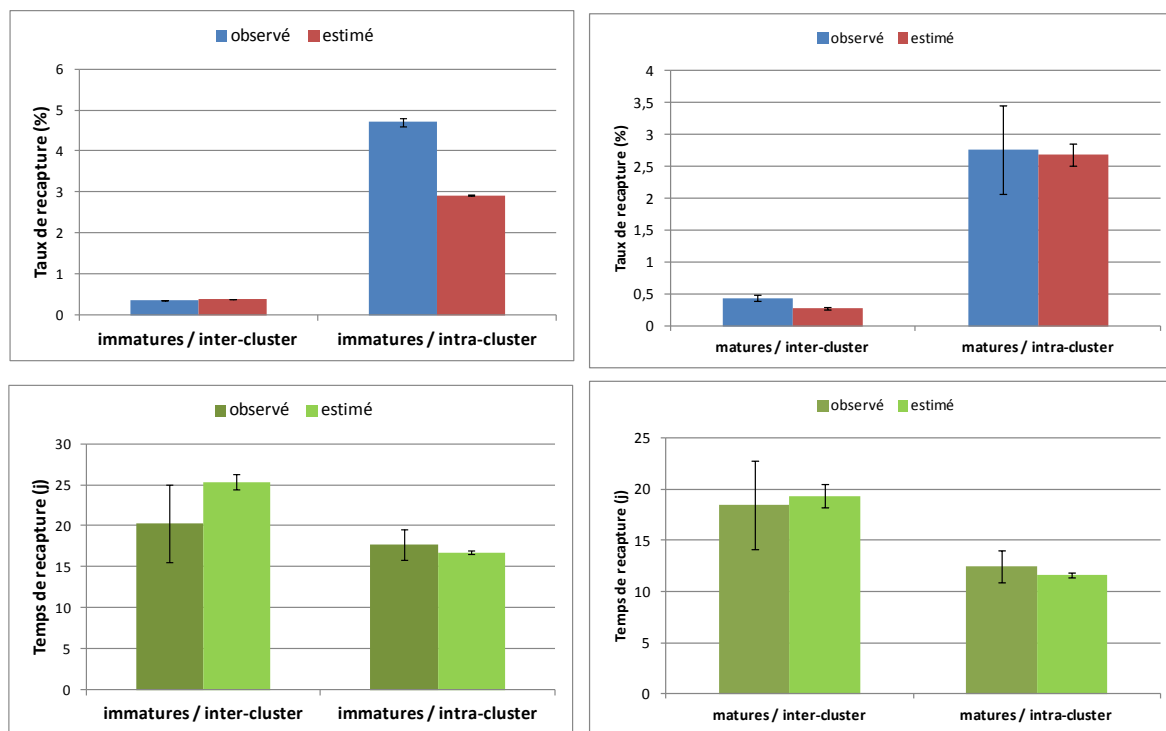


Figure 13 : Comparaison entre les moyennes observées et prédites de taux et de durée de recaptures pour les insectes immatures et matures, intra et inter-clusters, avec le modèle de dispersion paramétré comme indiqué dans le texte.

3.3.2 Simulation de la dispersion avec coupes rases

3.3.2.1 Scénario 1 « préventif »

Dans le modèle de dispersion simulant l'effet d'une coupe rase, nous considérons la dispersion d'un **nombre variable d'insectes (n)** et nous prenons en compte la meilleure combinaison obtenue précédemment ($\alpha = 2000$ m, *temps de repos entre chaque vol* = 1 jour). Au temps initial, les individus émergent de l'arbre, leur âge est donc fixé à 1 jour pour tous. On suppose que la moitié des individus sont des mâles et l'autre moitié sont des femelles.

Pour chaque jour allant de 1 (jour de lâcher) à 120 (longévité moyenne de *Monochamus* en Aquitaine, Giffard *et al.*, soumis) :

- On considère qu'ils sont immatures jusqu'à vingt jours puis deviennent matures
- On sélectionne les individus qui volent (c'est-à-dire : ceux n'ayant pas atteint l'âge maximal de 120 jours, ceux qui volent effectivement ce jour-là, choisis de manière aléatoire dans une loi binomiale de probabilité pf , et ceux qui ne sont pas en repos pour s'alimenter).
- Pour ces individus « volants », on choisit la distance de manière aléatoire dans une **loi exponentielle négative de moyenne $\delta(j) \alpha$** :

$$k_j(x, j) = \frac{1}{\delta(j)\alpha} \exp\left(-\left|\frac{x}{\delta(j)\alpha}\right|\right)$$

- *Sans stratégie d'évitement* :
- On choisit la direction de vol de manière aléatoire dans une loi uniforme $U[\min = 0, \max = 2\pi]$

Avec stratégie d'évitement :

- On détermine les directions de vol autorisées de manière à ce que l'insecte sorte de la coupe rase le plus vite possible ou n'y rentre pas si la distance de dispersion lui permet de franchir le bord de la coupe rase. On choisit alors la direction de manière aléatoire dans une loi uniforme $U[\min = 0, \max = 2\pi]$ en retirant les angles interdits (fig. 14).

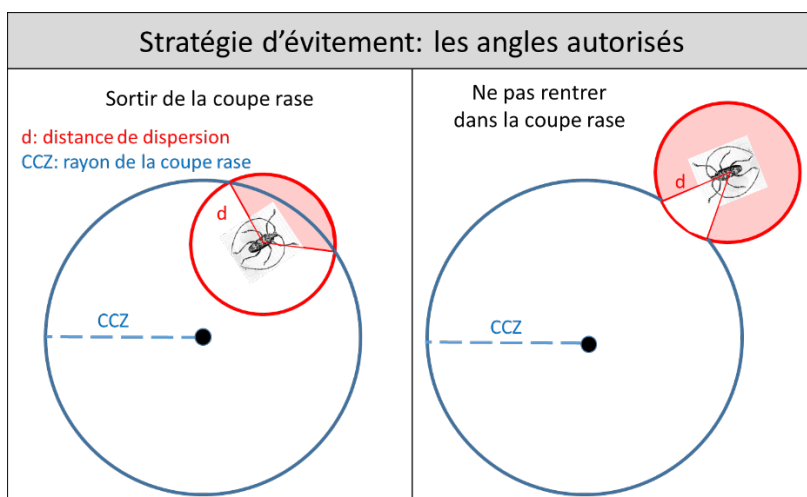


Figure 14 : Illustration de la stratégie d'évitement de la coupe rase (CCZ= Clear Cut Zone) et les angles de vol autorisés (en rouge).

- Si la distance de dispersion de l'insecte ne lui permet pas de sortir de la coupe rase, on comptabilise le nombre de jours qu'il passe dans la coupe rase. On considère qu'au bout de 12 jours il y a famine et qu'il meurt. Cette valeur est observée en laboratoire (Com. Pers. Guillaume David, Sanchez *et al.*, 2013)
- Grâce à la direction et la distance de vol, on peut calculer la nouvelle position de l'insecte. S'il se trouve en dehors de la coupe rase, on considère qu'il peut alors transmettre le nématode du pin soit en se nourrissant soit, pour les femelles, en pondant. Pour la transmission du nématode lors du repas de maturation, on utilise le taux de transmission observé au Portugal (Naves *et al.*, 2007a ; fig. 15). Dans le modèle, on considère uniquement le nombre de transmissions, car nous n'avons pas suffisamment d'information sur le nombre de nématodes portés et transmis. D'après ces données (fig. 15), il peut donc y avoir un maximum de 70 transmissions par insecte lors de l'alimentation.

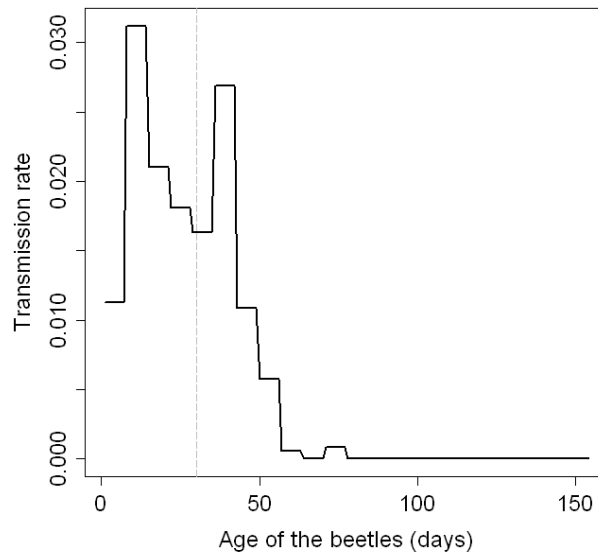


Figure 15 : Taux de transmission du nématode en fonction de l'âge de l'insecte (modifié de Naves et al., 2007a)

On considère aussi que les femelles peuvent transmettre le nématode lors de leur ponte, mais ce taux est très faible (Naves *et al.*, 2007b). On suppose que les femelles peuvent pondre 2 œufs par jour sur la période de ponte, supposée s'étendre du jour 20 au jour 53, et qu'elles ont une probabilité de 0.37 de transmettre le nématode lors de ces pontes.

- On calcule ensuite le nombre total de transmissions effectuées (fig. 16).

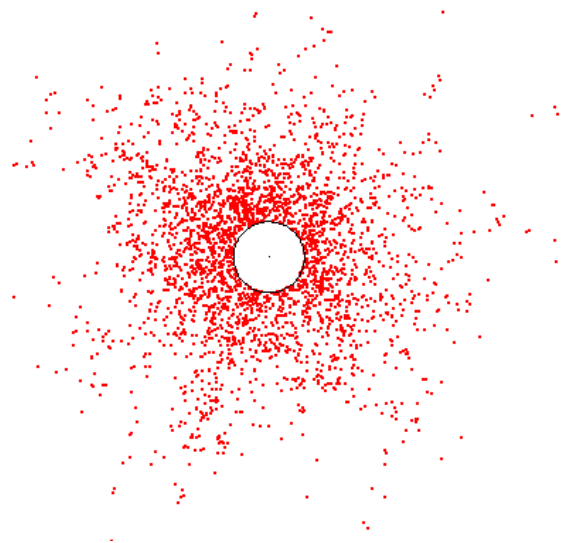


Figure 16 : Simulation de la dispersion d'insectes et de la transmission du nématode (points rouges) au-delà du rayon de coupe rase (cercle noir).

- Comme ce modèle est stochastique, nous faisons 100 répétitions.
- Nous testons des coupes rases d'un rayon de 0, 100, 500, 1000, 1500, ... 29500, 30000 m, avec un nombre d'insectes $n = 1, 10, 100, \text{ et } 1000$.

3.3.2.2 Scénario 2 « curatif »

Dans ce scénario, on utilise le même modèle à l'exception de quelques points.

- Il n'y a pas de stratégie d'évitement car la coupe rase est effectuée après dispersion de l'insecte. Il n'y a donc pas non plus de phénomène de famine.

- Après avoir fait disperser les insectes et simuler les transmissions du nématode, nous avons un ensemble de points où le nématode a été transmis. Ces points représentent des arbres infectés. On choisit alors un de ces arbres au hasard et l'on suppose que seul cet arbre symptomatique a été détecté. La coupe rase est alors centrée sur ce point et non sur le point de départ initial des insectes.
- Nous calculons ensuite le nombre total de transmissions effectuées en dehors de cette coupe rase.
- Comme le choix de l'arbre symptomatique autour duquel va être effectuée la coupe rase ajoute une composante stochastique, nous faisons 10 répétitions pour le choix de l'arbre pour une même simulation de dispersion.
- Comme ce modèle est stochastique, nous faisons 100 répétitions de ces simulations de dispersion.
- Nous testons des coupes rases d'un rayon de 0, 100, 500, 1000, 1500, ... 39500, 40000 m, avec un nombre d'insectes $n = 1, 10, 100, \text{ et } 1000$.

Pour chacun des scénarios, on calcule l'intervalle de confiance à 99% du nombre relatif de transmissions du nématode. Ce nombre relatif est calculé comme le nombre de transmissions simulé avec une coupe rase d'un rayon donné, divisé par le nombre de transmissions sans coupe rase (rayon = 0). Puis, on identifie l'intervalle de confiance correspondant aux rayons de coupe rase pour une valeur de 0.001 transmission relative (0.1%), de façon à s'assurer que la coupe rase permet d'éliminer 99.9% des arbres infectés (fig. 17).

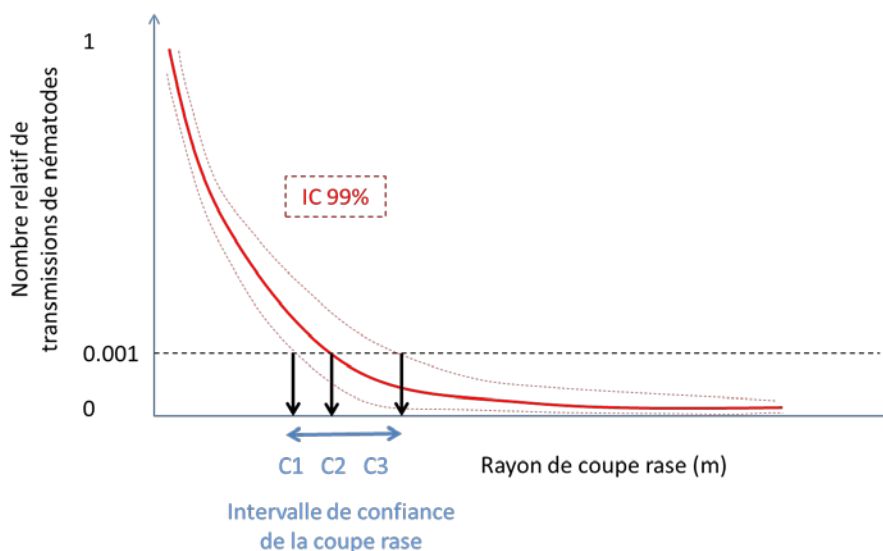


Figure 17 : Nombre relatif de transmissions du nématode en fonction du rayon de coupe rase et calcul de l'intervalle de confiance pour les rayons recommandés.

3.3.3 Résultats de la simulation de la dispersion et effet des coupes rases

Les résultats sont relativement différents selon les scénarios. Le scénario 1 sans évitement est le plus optimiste et le scénario 2 est le plus pessimiste (fig. 18 et 19, tab. 2).

- Dans le scénario 1 sans stratégie d'évitement de la coupe rase par l'insecte, il faudrait un rayon de coupe rase d'environ 15 km pour obtenir une efficacité de 99.9%
- Dans le scénario 1 avec stratégie d'évitement de la coupe rase par l'insecte, il faudrait un rayon de coupe rase d'environ 18 km
- Dans le scénario 2 sans stratégie d'évitement de la coupe rase par l'insecte, il faudrait un rayon de coupe rase d'environ 38 km, soit environ le double du scénario 1 comme prévu en théorie.

Si l'on considère une coupe d'un rayon de 500 m, on éviterait dans le meilleur des cas seulement 11% des transmissions (scénario 1 sans évitement de la coupe rase par les insectes vecteurs) et dans le pire des cas moins de 1% (scénario 2).

Les résultats d'efficacité (pourcentage relatif d'arbres contaminés éliminés) sont pratiquement indépendants du nombre d'insectes à l'envol (entre un et mille insectes), sans doute dû au fait des itérations du modèle (simuler dix répétitions du modèle pour dix insectes revient au même résultat qu'une seule répétition pour cent insectes).

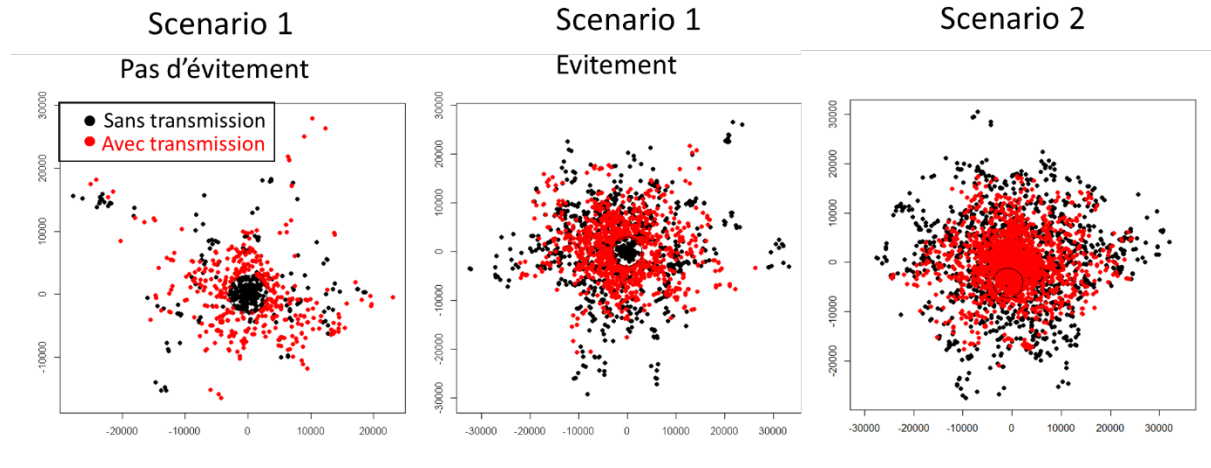


Figure 18 : Illustration des simulations selon chaque scénario pour un rayon de coupe rase de 3000 m et n = 100 insectes. Les points noirs correspondent à la position des insectes cumulée au fil du temps en fonction de leur capacité et comportement de dispersion, et les points rouges aux arbres où l'insecte a inoculé le nématode.

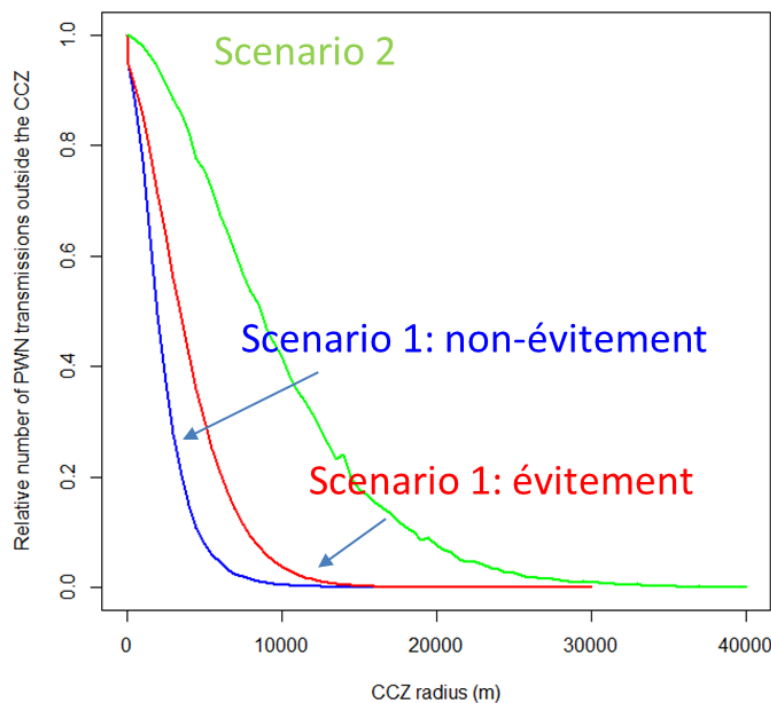


Figure 19 : Comparaison des trois scénarios en termes de nombre relatif de transmission en dehors de la coupe rase (pour 1000 insectes) en fonction du rayon de la coupe rase.

Tableau 2 : Rayon de coupe rase recommandé selon les scénarios et le nombre d'insectes portant le nématode à leur envol

(R = rayon de la coupe rase, m = moyenne, IC = intervalle de confiance à 99%)

Nombre d'insectes à l'envol	Scénario 1 : pas d'évitement R = m [IC]	Scénario 1 : évitement R = m [IC]	Scénario 2 R = m [IC]
1	R = 10 500 m [7000 ; 10500]	R = 12 500 m [9000 ; 12500]	R = 27 500 m [22500 ; 27500]
10	R = 14 500 m [10000 ; 16000]	R = 16 500 m [13500 ; 17500]	R = 36 500 m [35500 ; 36 500]
100	R = 14 000 m [14000 ; 15500]	R = 17 500 m [16500 ; 19000]	R = 38 000 m [37000 ; 40000]
1000	R = 14 500 m [14000 ; 14500]	R = 17 500 m [17500 ; 18500]	R = 38 500 m [36500 ; 39500]

Il faut rappeler ici que le Portugal a tenté d'appliquer la méthode des coupes rases préventives pour prévenir l'extension du foyer découvert en 1999. La stratégie de lutte a consisté en 4 types d'actions: i) éliminer les arbres dépérissants à l'issue de programme de détections intensifs menés (automne - hiver); ii) capturer les insectes vecteurs avec des pièges (printemps - été); iii) contrôler le transport de bois de conifères sur les routes et dans les ports; iv) établir en 2007 une ceinture de coupes rases de 3 km de large autour de la zone contaminée (Péninsule de Sétubal) grâce à des fonds européens (Rodrigues *et al.*, 2008). Ces réalisations n'ont cependant pas empêché l'émergence de nouveaux foyers de nématodes à plus de 200 km au nord, dans la région de Coïmbra. Ces introductions à longue distance sont probablement liées au transport de bois contaminé (Robinet *et al.*, 2009).

4 Autres méthodes de lutte directe

4.1 Piégeage de masse de l'insecte vecteur

Même si cela était techniquement envisageable, il serait éthiquement inacceptable de chercher à éradiquer une espèce indigène comme *M. galloprovincialis*, qui, au-delà d'être le vecteur du nématode invasif *B. xylophilus*, appartient au patrimoine naturel européen.

Les quelques exemples d'éradication réussie d'insectes ravageurs ou vecteurs de maladie portent sur des espèces elles-mêmes exotiques et dans des cas où leur arrivée a été détectée suffisamment tôt pour intervenir rapidement et sur des populations à faible densité (Brockerhoff *et al.*, 2010 ; Pluess *et al.*, 2012).

Dans un contexte où l'éradication n'est pas recherchée mais où l'on souhaite diminuer le niveau des populations d'insectes sous un seuil épidémiologique (ou économique) acceptable, des mesures de piégeage de masse sont parfois envisagées. Très peu d'exemples de piégeage de masse réussi sur des insectes forestiers ont été documentés et encore moins en ce qui concerne les coléoptères xylophages (Brockerhoff *et al.*, 2010). Ainsi le piégeage de masse des scolytes est une méthode abandonnée pratiquement partout dans le monde. L'échec de ces méthodes tient essentiellement au manque d'efficacité des techniques de piégeage. En effet pour atteindre un effet de réduction durable des niveaux de populations des insectes, il convient de faire chuter les densités locales suffisamment bas pour passer sous le seuil de reproduction viable, afin de bénéficier de l'effet "Allee". En pratique cela revient à devoir capturer plus de 90% voire 99% de la population locale. Or les pièges attractifs ont la plupart du temps des capacités limitées de capture, soit pour des raisons techniques (attractivité des phéromones, saturation des pièges en cas de fortes captures) soit pour des raisons biologiques (compétition avec l'attraction naturelle par les congénères, vol ou maturation obligatoire avant de répondre à l'attraction du piège).

En ce qui concerne le piégeage de masse de *M. galloprovincialis* en Europe, nous disposons de trois études pour en apprécier l'efficacité. Toutes les trois utilisent la méthode de "marquage - lâcher - recapture" des insectes car elle permet de connaître la quantité d'insectes présents dans le milieu et donc d'estimer un taux relatif de piégeage.

Sanchez-Husillos *et al.*, (2015) ont opéré en Castille (Espagne) en 2010, dans un peuplement principalement composé de pins noirs. Un total de 353 individus immatures obtenus par élevage sur rondins de pins maritimes ont été marqués et lâchés au centre d'une grille de 52 pièges à phéromone (multi-funnel traps et attractif Galloprotect Plus) positionnés tous les 200 m (0,25 piège/ha). Au total 102 insectes ont été recapturés soit un taux de piégeage de 29%, soit en moyenne 0,56% par piège. Une seconde expérience a été conduite en Castille en 2013 dans un peuplement de pin maritime qui consistait à faire varier la densité des pièges (0,02, 0,11, 0,25 et 0,44 piège/ha). Pour évaluer l'efficacité du piégeage, un modèle a été développé pour estimer le nombre total d'insectes et la proportion d'individus capturés à partir du nombre d'insectes natifs capturés (5113) dans ce dispositif. Le piégeage a ensuite été simulé sur 5 années consécutives en faisant diverses hypothèses. Le nombre de captures est plus élevé pour la densité la plus élevée de pièges (2065 insectes capturés dans le dispositif avec 0,44 piège/ha, avec une estimation de 21319 insectes présents, soit une estimation d'environ 10% d'insectes capturés). Pour obtenir la densité de piégeage nécessaire pour capturer 95% des insectes, les auteurs extrapolent les résultats sur une gamme de valeurs non testées et en concluent qu'un piégeage répété 5 années consécutives avec une densité de 0,82 piège/ha pourrait réduire le nombre d'insectes de 95%. Selon nous, cette estimation de l'efficacité de piégeage montre plusieurs faiblesses : i) elle est basée sur une série d'hypothèses et d'estimations dont la validité et le degré de confiance ne sont pas donnés (en particulier le modèle d'estimation du nombre total d'insectes repose sur la méthode de Jolly-Seber qui nécessite de recapter deux fois de suite les mêmes insectes ; ici seulement 3 insectes ont été recapturés deux fois sur 2836 lâchés initialement (0.1%) ; ii) elle n'a

pas été mesurée sur le terrain et repose au final sur une extrapolation très incertaine ; et iii) s'il s'avérait que cette valeur soit confirmée, la densité de pièges (environ tous les 100 m) serait difficile à mettre en œuvre à grande échelle. Pour la comparaison des études, nous considérons donc la première expérience uniquement, la seule pour laquelle nous avons une mesure directe que nous pouvons véritablement comparée aux autres études.

Torres-Vila *et al.*, (2015) ont réalisé leurs expériences de lâcher - recapture en 2012 et 2013, dans une plantation de 4 ha de pin maritime en Estrémadure (Espagne) avec des pièges Crosstrap Econex ® et des attractifs Galloprotect Plus. Les pièges étaient installés selon une grille de 25 pièges distants de 50 m (soit une densité de 4 pièges/ha). Les insectes ont d'abord été capturés dans les pièges (donc probablement des individus matures), marqués et relâchés sur l'arbre le plus proche du piège où ils avaient été capturés (1 à 3 m de distance du piège). Le taux de recapture à l'échelle du peuplement était de 14%, soit 0,56% par piège. Dans cette étude, l'efficacité du piégeage de masse (36% au mieux) est considérée comme trop faible pour pouvoir être mis en place, et contredit donc l'efficacité trouvée dans l'étude de Sanchez-Husillos, malgré une densité de pièges beaucoup plus élevée (4 pièges/ha versus 0,82 piège/ha).

Jactel *et al.*, (2015, ce rapport) ont réalisé leur expérience de lâcher recapture dans une forêt de pin maritime en Aquitaine, utilisant les mêmes pièges (Crosstrap et Galloprotect Plus) selon un protocole décrit plus haut (cf 3.2.1). Au total, 499 individus immatures marqués ont été lâchés dans 9 clusters de 4 pièges distants de 200m (0,25 piège/ha) pour un taux de recapture de 4,7% à l'échelle du cluster (ou 1,18% à l'échelle du piège). Par ailleurs le modèle de simulation développé pour rendre compte des processus de dispersion de l'insecte (cf. 3.3) a permis d'estimer une efficacité de piégeage de 1%, soit une valeur proche des 1,18% observés (la différence pouvant tenir au fait que des insectes ont pu "traverser" la zone d'attraction du piège sans être attirés, voler à sa périphérie puis revenir dans cette zone et cette fois-ci être capturés). Un total de 3805 insectes matures ont été lâchés dans les mêmes conditions. Le taux de recapture intra-cluster s'est élevé à 2,8%, soit 0,7% par piège. Ce nombre est plus faible que pour les immatures, sans doute en raison des mortalités subies par les insectes plus âgés entre le moment du lâcher et le moment de la recapture.

Ces trois études convergent donc pour indiquer une très faible efficacité de capture dans les pièges à phéromone les plus couramment utilisés (pièges à interception avec la phéromone standard Galloprotect ®), puisqu'elle est de l'ordre de 0,5 à 1% des insectes circulants. A moins d'augmenter considérablement la densité de pièges par ha, cette méthode n'apparaît donc pas crédible pour obtenir une diminution significative des populations locales de *Monochamus*. De plus, les deux études espagnoles évaluant l'efficacité du piégeage de masse concluent à deux résultats contradictoires. Il faut en outre rappeler que comme toute méthode "curative" elle devrait être appliquée chaque année, pendant toute la durée de vol de l'insecte (environ 4 mois, soit 4 renouvellements des diffuseurs d'attractifs).

4.2 Lutte individu centrée

Compte tenu du manque d'efficacité des méthodes de réduction massive des arbres potentiellement contaminés (cf. méthode des "coupes rases préventive", cf 3.3.2.1) ou des insectes vecteurs (cf. 4.1) pour éviter la dispersion naturelle du nématode, il apparaît nécessaire d'envisager une autre approche, mieux ciblée. Cette stratégie de lutte dite individu centrée se fonde sur une démarche en 3 étapes: i) détection précoce de l'arrivée du nématode du pin dans une nouvelle région forestière (i.e. "early warning") permettant de déclencher un train de mesures visant à réduire son impact avec ii) le repérage précis des arbres individuels symptomatiques suivi de iii) leur élimination.

Sans détailler les actions qui pourraient être entreprises nous présentons ci-après des pistes de réflexion pour la mise en place de cette stratégie individu centrée.

4.2.1 Surveillance et détection

4.2.1.1 Piégeage des insectes vecteurs

Alors que l'efficacité du piégeage de masse de l'insecte vecteur est incertaine pour limiter la propagation du nématode (voir paragraphe précédent), le piégeage de l'insecte vecteur dans le but de détecter précocement la présence du nématode reste un moyen indispensable dans la stratégie de contrôle. Cette méthode de surveillance est applicable aussi bien :

- dans les zones où la maladie ne peut pas se développer en raison des contraintes climatiques (fig. 7) : les arbres infestés par le nématode étant asymptomatiques, il est d'autant plus important de s'assurer que les vecteurs ne portent pas le nématode car les méthodes de surveillance visuelle des arbres ne sont pas possibles;
- dans les zones où la maladie peut se développer, en complément de la surveillance des arbres présentant des symptômes de flétrissement du houpier.

Cette méthode de piégeage des insectes vecteurs dans un but de surveillance et de détection précoce du nématode du pin est possible car :

- i) l'attractif (Galloprotect®; Ibeas *et al.*, 2007, Pajares *et al.*, 2010) permettant d'attirer les *M. galloprovincialis* matures et le piège (Crosstrap, Alvarez *et al.*, 2014) destiné à les capturer sont disponibles et opérationnels ;
- ii) la méthode de détection du nématode dans les insectes piégés (Anses, 2015) a été mise au point, validée et elle est utilisée en routine par le laboratoire national de référence (LNR) de l'Anses (unité de nématologie du Laboratoire de la santé des végétaux, Le Rheu-35);
- iii) la surveillance des peuplements de résineux s'effectue déjà en partie à l'aide d'un réseau de piégeage de *M. galloprovincialis* (Notes de Service DGAL/SDQPV/N2013-8132 et N2013-8102).

Le fait que l'insecte est capable de se déplacer sur de grandes distances avant d'être capturé dans un piège à phéromone semble paradoxalement constituer un atout pour cette approche. En effet les pièges "drainent" ainsi des insectes issus d'une large zone alentours, permettant de limiter le nombre de pièges à installer pour couvrir un grand massif forestier.

Selon les instructions actuelles, les correspondants observateurs du Département Santé des Forêts (DSF) privilégient les zones sensibles à fort risque d'introduction du nématode (sites de stockage du bois ou de palettes en bois, pépinières, jardinerie, scieries, ports, gares ferroviaires, aires de parking, DGAL/SDQPV/N2013-8132) comme sites de piégeage. Les pièges sont installés au minimum sur une durée de 40 jours entre le 15 mai et le 15 octobre et peuvent être ensuite déplacés. Les individus capturés sont envoyés au LNR (Anses) pour la détection du nématode. Un minimum de 89 piégeages est imposé sur toute la France.

La procédure actuelle sur le choix des sites de piégeage et sur la fenêtre de temps de piégeage sur chacun des sites rend cependant cette méthode de surveillance aléatoire. D'après les simulations de dispersion de *M. galloprovincialis*, il s'avère que l'insecte peut potentiellement disperser très loin (plusieurs dizaine de kilomètres de son point d'émergence; cf 3.3.3). Par conséquent, même si les sites sensibles offrent des conditions propices à la présence de *M. galloprovincialis* et du nématode du pin, le vecteur infesté peut se disperser bien plus loin. Un maillage régulier de pièges permettrait sans doute de mieux couvrir le territoire et d'assurer une surveillance plus systématique.

Laisser les pièges sur toute la saison de vol de *M. galloprovincialis* permettrait également de réduire la part d'incertitude due à la fenêtre de temps de piégeage. De même, un maillage plus fin serait préférable pour détecter avec plus de certitude un insecte qui serait infesté par le nématode et aussi pour réduire, par triangulation, le périmètre de surveillance renforcée en cas de détection du nématode sur un insecte capturé. Cependant un compromis entre l'efficacité de la surveillance et la faisabilité doit être trouvé. Un maillage plus fin et une durée de piégeage plus longue impliquent un plus grand nombre de pièges à installer et à relever ainsi qu'un plus grand nombre

d'insectes à analyser par le laboratoire. Les limites dues à ces capacités d'analyse et de travail de terrain doivent être prises en compte dans l'élaboration du protocole. On pourrait par exemple envisager de regrouper une partie des captures pour une analyse préliminaire et revenir au grain du piège individuel en cas de détection.

La mise en place d'un maillage régulier ne remet pas en cause le piégeage sur les sites sensibles, notamment les ports. En plus de ces piégeages ciblant les insectes circulant sur le territoire français et potentiellement infestés lors de leur émergence d'un bois infesté, des insectes migrant d'Espagne pourraient également porter le nématode et l'introduire en France. Les résultats récents sur les flux d'individus migrants de *M. galloprovincialis* sur l'ensemble de la chaîne pyrénéenne montrent la présence de corridors de dispersion à l'Ouest et à l'Est des Pyrénées (Haran *et al.*, 2015). Un renforcement du piégeage le long des principales voies de communications routières, notamment les autoroutes de part et d'autre des Pyrénées, permettrait de surveiller l'arrivée du nématode via la dispersion du vecteur depuis la Péninsule Ibérique.

4.2.1.2 Surveillance et détection des arbres symptomatiques

4.2.1.2.1 *Méthodes de surveillance au sol*

Dans les zones où la maladie peut se développer (fig. 7), le nématode induit des symptômes de flétrissement du houppier essentiellement en fin d'été et en automne. Ces symptômes de flétrissement peuvent également apparaître en fin d'hiver au Portugal. Ils traduisent un envahissement des tissus conducteurs par les nématodes, et un défaut d'alimentation en eau du houppier. Ils ne sont malheureusement pas spécifiques et d'autres parasites (scolytes, pourridiés..) peuvent induire des symptômes similaires. Seule une analyse du bois réalisée par des laboratoires agréés pour la détection et l'identification des nématodes selon des méthodes officielles (Anses, 2011a et b), permettent de confirmer ou non la présence de *Bursaphelenchus xylophilus* dans des arbres symptomatiques. La note de service DGAL/SDQPV/N2013-8132 définit les modalités des prélèvements en peuplements forestiers à la fois dans et hors des zones sensibles. Les prélèvements doivent être réalisés i) en priorité dans les peuplements présentant des signes de dépérissement ou morts depuis moins d'un an, quelle que soit la cause du dépérissement ou de la mortalité, ou présentant des symptômes d'attaque par des *Monochamus* ii) en deuxième priorité dans des peuplements ayant subi des dégâts d'incendie notamment, ou à défaut sur des arbres abimés ou affaiblis. Cette note ne préconise cependant pas une augmentation des prélèvements en cas de dépérissements importants suite à des sécheresses ou à des chablis par exemple, alors qu'ils peuvent "masquer" des mortalités liées à une arrivée simultanée du nématode rendant sa détection beaucoup plus aléatoire.

La majeure partie des signalements d'arbres dépérissants sont le fait des correspondants observateurs du DSF, lors de leurs déplacements professionnels. De fait, ces signalements sont majoritairement réalisés à proximité de voies de circulation, ce qui est cohérent avec le fait que les zones de fortes activités humaines coïncident avec les zones de plus fort risque d'introduction (Robinet *et al.*, 2009). Il n'empêche que dans le cas du massif landais, seuls 16% des surfaces forestières sont visibles depuis les pistes et les routes (Samalens, 2009). Une grande partie de l'espace forestier, ne fait donc pas l'objet d'une surveillance attentive alors qu'un *Monochamus* vecteur peut facilement contaminer un arbre au centre d'une parcelle en un seul vol depuis un essaimage sur le bord d'une route par exemple. Il y a donc nécessité de développer des méthodes de détection des mortalités par des moyens plus efficaces et moins onéreux que la détection au sol.

4.2.1.2.2 *Méthodes aériennes*

Les méthodes de surveillance aérienne ("sketch mapping") se révèlent les plus précises et les moins onéreuses lorsqu'il s'agit de détecter et de cartographier les dommages forestiers sur de grandes surfaces (Ghent *et al.*, 1998).

En ce qui concerne la détection des arbres infestés par le nématode du pin, deux difficultés majeures apparaissent : i) les arbres contaminés sont en principe dispersés, tout au moins au début de la phase de colonisation d'une nouvelle région, et ii) les symptômes de dépérissement

(rougissement des aiguilles puis mortalité de l'arbre) ne sont pas spécifiques d'une attaque de nématode et peuvent donc être confondus avec ceux d'une attaque de pourridié racinaire (ex. Fomes, armillaire) ou de scolytes (ex. *Ips sexdentatus*). Pour obtenir une bonne fiabilité de la détection, il conviendrait donc de combiner à la fois des outils permettant le repérage d'arbres morts récemment (ou très dépérissants) isolés et des méthodes d'analyses d'images capables de renseigner sur la cause du dépérissement. En ce qui concerne les outils de prise d'image, il faudra comparer les avantages respectifs de méthodes classiques par ULM ou avion avec les développements récents permis par le progrès en termes d'images satellitaires à très haute résolution et de caméras embarquées sur des drones (Park *et al.*, 2014). Pour ce qui est de l'analyse de ces images, une piste prometteuse est la prise en compte de la dynamique spatio-temporelle des dommages causés par le nématode. Il est en effet probable que le type de distribution spatiale des arbres morts diffère entre ceux atteints par les scolytes (distribution agrégée résultant des attaques en masse) et par le nématode (distribution diffuse résultant d'attaques aléatoires). De même la dynamique temporelle dans l'apparition des symptômes, soit à l'échelle de la saison (dépendant de la phénologie de l'insecte vecteur par exemple) soit à l'échelle de l'année (extension centrifuge des taches de mortalité liées aux pourridiés racinaires par exemple) doit permettre de distinguer entre différentes causes de mortalité.

4.2.2 Gestion des arbres contaminés

4.2.2.1 Exploitation de l'arbre

Comme dans toutes les zones d'introduction récente de *B. xylophilus*, chaque fois qu'un arbre contenant le nématode du pin est identifié (après confirmation par une méthode d'analyse moléculaire), il doit être détruit sur place selon les recommandations actuelles, notamment en procédant entre la fin de l'automne et le début du printemps, quand les insectes vecteurs sont encore dans le bois (Sousa *et al.*, 2011).

En ce qui concerne le devenir du matériel ligneux exploité, il convient de distinguer trois catégories :

- les parties de l'arbre pouvant contenir des larves de l'insecte vecteur : ce sont les branches et le haut du tronc compris entre 3 cm et 20 cm de diamètre sur pin maritime (Sousa *et al.*, 2011 ; Schröder *et al.*, 2009 et Piou, comm. pers.). Ces morceaux doivent être détruits sur place.
- la partie du tronc supérieur à 20 cm de diamètre pouvant contenir du nématode mais pas son insecte vecteur : elle peut donc être introduite dans la chaîne de production à condition d'être traitée par la chaleur (NIMP 15). Il faudrait cependant vérifier que cette limite de 20 cm, qui correspond probablement à une épaisseur d'écorce trop importante pour permettre la ponte de *M. galloprovincialis*, est toujours valide pour d'autres espèces de *Monochamus* (notamment *sartor* et *sutor*) et pour des espèces autres que le pin maritime (notamment pin noir et pin sylvestre).
- la souche et les racines ne sont jamais attaquées par l'insecte vecteur (*M. galloprovincialis*); elles peuvent rester sur place et ne nécessitent pas de traitement particulier car il n'a pas été démontré de transmission de la maladie aux arbres voisins par le sol.

Il serait utile d'envisager des prélèvements de branches et tronc au niveau du houppier de l'arbre contaminé afin de vérifier la présence de galeries larvaires de *Monochamus*. En effet, en absence de traces de développement du vecteur, l'arbre contaminé peut être considéré comme une "impasse" pour le nématode qui n'a pas été "repris" par les insectes émergents pour être éventuellement transporté plus loin. Le risque de dissémination peut donc être qualifié de moindre dans ce cas. C'est d'ailleurs peut-être ce qui s'est passé lors des deux détections en Espagne, et qui pourrait expliquer l'efficacité (non prouvée) des coupes rases effectuées alors.

4.2.2.2 Émamectine benzoate

La technique de micro-injection de molécules biocides dans les troncs, associée à une diffusion systémique des produits injectés, a connu récemment un regain d'intérêt pour protéger certaines essences arbustives contre divers insectes ravageurs. Parmi les produits testés, l'épimectine

benzoate (EB) a été ciblée pour lutter contre la maladie du dépérissement du pin due à *B. xylophilus*.

L'EB est une matière active semi-synthétique appartenant à la famille des avermectines, qui sont des substances naturelles produites par les bactéries telluriques. Cet insecticide présente un mode d'action original en mimant l'action du neurotransmetteur GABA sur les récepteurs GABA et les récepteurs glutamate H. Ces fixations induisent l'ouverture permanente des canaux ions chlore, provoquant une décontraction musculaire irréversible. L'EB présente une activité ovo-larvicide lors de l'éclosion et sur les larves plus âgées par ingestion, provoquant rapidement et de manière irréversible l'arrêt de la mobilité (plus de creusement de galerie) et de la nutrition (perte importante de poids) des insectes. L'efficacité insecticide de l'EB contre des scolytes et des cérambycidés a été démontrée aux États-Unis après des injections réalisées *in situ* dans des plantations de *Pinus taeda* sur des arbres âgés d'environ 20 ans (Grosman et Upton, 2006). En conditions de laboratoire, l'EB affecte l'activité de nutrition et la longévité de *M. galloprovincialis* (Sousa *et al.*, 2013).

De manière intéressante, une activité contre *B. xylophilus* a également été démontrée *in vitro* pour l'EB (Takai *et al.*, 2000). De plus, une inhibition de la propagation du nématode a été observée dans des branches de pin noir du Japon (*P. thunbergii*) préalablement traitées à l'EB et inoculées artificiellement avec des suspensions de nématodes (Takai *et al.*, 2003b).

Les effets préventifs de l'injection d'EB dans les troncs contre le dépérissement des pins ont été évalués *in situ*. Au Japon, des tests sur *P. thunbergii* et *P. densiflora* ont montré une absence de symptômes pendant trois ans pour 91% des arbres traités à l'EB (dosée à 10g/m³) et soumis à des inoculations annuelles du nématode (Takai *et al.*, 2003a). Au Portugal, aucune mortalité n'a été observée 26 mois après le traitement d'arbres sains (*P. pinaster*) localisés dans une forêt fortement infestée par le nématode, alors que le tiers des arbres témoins est mort au cours de cette période (Sousa *et al.*, 2013).

Ces résultats encourageants dans la lutte contre le dépérissement du pin dû à *B. xylophilus*, et le risque important de dissémination de la maladie en Europe, font que l'EB est actuellement en cours d'évaluation dans l'objectif d'une demande d'autorisation de mise sur le marché en France pour cet usage (Bourdrez *et al.*, 2014). Au plan pratique, l'injection d'EB dans les troncs présente certains avantages : absence de phytotoxicité (aux doses préconisées), sécurité pour l'applicateur et l'environnement, traitement préventif efficace pendant deux ou trois ans. En revanche, sa mise en œuvre nécessite des opérations manuelles importantes (injections arbre par arbre) et répétées régulièrement, sans doute incompatible avec le traitement de massifs forestiers étendus. Pour autant, elle pourrait constituer une solution pertinente pour le traitement d'arbres à forte valeur patrimoniale, de boisements urbains, ou d'arbres localisés près de zones à risques (ports, scieries).

4.2.3 Transport et gestion du bois coupé dans une zone tampon autour de l'arbre détruit

En ce qui concerne l'exploitation courante des peuplements de pin situé à proximité d'un arbre détecté porteur du nématode du pin, il convient de suivre les recommandations actuelles (décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012) mais la zone concernée doit être élargie à un rayon 40 km compte tenu des résultats de la simulation portant sur les capacités de dispersion de l'insecte vecteur.

4.2.4 Coupes sanitaires

Pour limiter l'extension des dépérissements liés aux infections par le nématode du pin dans un peuplement contaminé, la seule méthode actuellement opérationnelle, combinant efficacité et coût raisonnable (restant cependant à chiffrer dans les conditions françaises), demeure l'approche par coupe sanitaire (Waring et O'Hara, 2005).

Elle est actuellement couramment pratiquée au Portugal (Sousa *et al.*, 2011). Elle a notamment été expérimentée avec succès sur le site de Troia Peninsula en combinant trois actions

complémentaires après identification des arbres symptomatiques: i) abattage des arbres individuels, ii) élimination du matériau ligneux contaminé, iii) activation de pièges à phéromone contre l'insecte vecteur (Sousa *et al.*, 2011). Ces actions de lutte ont été régulièrement soumises à inspection par l'Office Alimentaire et Vétérinaire (OAV) de l'Union Européenne et ses recommandations ont été suivies au Portugal. Plus récemment une "Task Force" sur le nématode du pin impliquant des experts de 8 pays européens a travaillé de concert avec les autorités portugaises pour limiter l'extension du foyer de nématode. Parmi ses recommandations figure la nécessité de sensibiliser les populations locales et les gestionnaires forestiers pour qu'ils mettent en œuvre ces actions de lutte sylvicole.

Des essais menés en Corée du Sud ont par ailleurs montré l'efficacité de petites coupes sanitaires autour de l'arbre contaminé pour endiguer la progression de la maladie à l'échelle du peuplement (Kwon *et al.*, 2011).

5 Conclusions du groupe de travail

La saisine 2014-SA-0103 a concerné les mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation, dans l'Union Européenne, du nématode du pin, *Bursaphelenchus xylophilus*. Plus précisément, le Groupe de Travail (GT) s'est attaché à : i) réexaminer la stratégie de lutte basée sur les coupes rases telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, afin de déterminer si ces mesures sont toujours adaptées à l'éradication d'éventuels foyers ; ii) proposer le cas échéant des améliorations de cette stratégie de lutte visant à augmenter le rapport efficacité/impact qui lui est associé. Le travail du GT est basé à la fois sur une **analyse bibliographique approfondie** (tenant compte en particulier de données récentes concernant la distance de vol de l'insecte vecteur en Europe et de l'efficacité de la méthode visant à réaliser des micro-injections d'émamectine benzoate pour la réalisation de traitements préventifs) et sur la **production de données originales** (modélisation permettant de simuler la dispersion de l'insecte vecteur, la transmission du nématode du pin et enfin la coupe des arbres sur une surface de rayon croissant).

Suite à la détection d'un foyer, la décision d'exécution 2012/535/UE préconise des mesures d'éradication pendant au moins quatre ans, consistant notamment en la mise en place : i) de coupes rases d'un rayon de 500 m autour des végétaux infestés et ii) d'une surveillance intensive dans un rayon variant de 6 à 20 km autour de la zone infestée. Pour estimer l'efficacité de ces mesures, un **modèle de simulation** a été développé et calibré à l'aide de données expérimentales précisant les capacités de dispersion de l'insecte vecteur *Monochamus galloprovincialis*. Ces données ont été obtenues au laboratoire (en manège de vol) et *in natura* (expériences de marquage - lâcher - recapture) dans le contexte de la forêt des Landes de Gascogne, zone forestière parmi les plus exposées au risque d'introduction du nématode du pin en France. Les simulations ensuite réalisées sous différents scénarios (préventifs ou curatifs) montrent que **les coupes rases préconisées** actuellement dans les réglementations européenne et française ne seraient **pas efficaces** dans une configuration de paysage de plantations continues de pin maritime. En effet, avec le rayon de 500 m recommandé par la directive européenne, on empêcherait au mieux 11% des transmissions. De plus, pour obtenir un taux de transmission du nématode du pin inférieur à 0.1%, il faudrait mettre en place des coupes rases d'un rayon compris entre 15 et 38 km. Ces simulations, réalisées dans le contexte d'une forêt continue, restent cependant à compléter dans le cas de forêts de pin très fragmentées. À cet égard, il serait intéressant d'intégrer les données biologiques des forestiers espagnols, directement impliqués dans la lutte contre le nématode dans ce type de paysage.

Dans un second temps, afin de proposer des pistes d'amélioration des mesures de lutte actuelles contre *B. xylophilus*, le GT a envisagé les options suivantes :

- Piégeage de masse de l'insecte vecteur :

Des mesures de piégeage de masse sont parfois envisagées pour éradiquer ou diminuer le niveau des populations d'insectes sous un seuil épidémiologique acceptable. En pratique cela revient à devoir capturer plus de 90%, voire 99%, de la population locale. Trois études récentes, basées sur des dispositifs de marquage - lâcher - recapture des insectes, ont évalué l'efficacité du piégeage de masse de *M. galloprovincialis* en Europe (Espagne et France). Ces trois études s'accordent sur une **très faible efficacité de capture** dans les pièges à phéromone les plus couramment utilisés, de l'ordre de 0,5 à 1% des insectes circulants. Il faut en outre rappeler que, comme toute méthode « curative », elle devrait être appliquée chaque année, pendant toute la durée de vol de l'insecte. Enfin, et même si cela était techniquement envisageable, il serait éthiquement inacceptable de chercher à éradiquer une espèce indigène comme *M. galloprovincialis*, qui au-delà d'être le vecteur du nématode est partie prenante de la biodiversité des forêts européennes.

- Lutte chimique :

La technique de micro-injection d'une molécule biocide, l'émamectine benzoate (EB), associée à une diffusion systémique du produit dans les troncs injectés, a connu récemment un regain d'intérêt pour lutter contre la maladie du dépérissement du pin due à *B. xylophilus*, suite à des résultats expérimentaux encourageants obtenus à la fois *in vitro* et *in natura*. De fait, cette molécule est actuellement en cours d'évaluation dans l'objectif d'une demande d'autorisation de mise sur le marché en France pour cet usage. Au plan pratique, l'injection d'EB dans les troncs présente certains avantages : absence de phytotoxicité aux doses préconisées, sécurité pour l'applicateur et l'environnement, traitement préventif efficace pendant deux ou trois ans. En revanche, sa mise en œuvre nécessite des opérations manuelles importantes et répétées régulièrement, sans doute **incompatibles avec le traitement de massifs forestiers étendus**. Pour autant, elle pourrait constituer une solution pertinente pour le traitement d'arbres à forte valeur patrimoniale, de boisements urbains, ou d'arbres localisés près de zones à risques.

- Lutte individu centrée :

Compte tenu du manque d'efficacité des méthodes présentées ci-dessus à l'échelle d'un massif forestier, il apparaît nécessaire d'envisager une autre approche, mieux ciblée. Cette stratégie de lutte dite individu centrée se fonde sur une démarche en trois étapes : i) la détection précoce de l'arrivée du nématode dans une nouvelle région forestière permettant de déclencher un train de mesures visant à réduire son impact avec ii) le repérage précis des arbres individuels symptomatiques, suivi de iii) leur élimination. Sans détailler les actions qui pourraient être entreprises à cet effet, des pistes de réflexion pour la mise en place de cette stratégie individu centrée sont listées ci-après.

- **Détecter précocement la présence du nématode** reste la priorité de cette stratégie de contrôle. Pour cela, il conviendra de coupler : i) le piégeage des insectes vecteurs (maillage à définir selon le contexte) et la détection (par surveillance au sol et/ou aérienne) des arbres symptomatiques avec ii) une recherche systématique du nématode dans les échantillons (insectes et arbres prélevés).

- Chaque fois que des insectes auront été signalés comme vecteurs de *B. xylophilus*, **une triangulation de la position des pièges** ayant permis leur capture sera effectuée pour délimiter une zone probable de présence du nématode du pin.

- Chaque fois qu'un arbre contenant le nématode du pin aura été identifié, il sera procédé à son **élimination individuelle sur place** selon les recommandations actuelles, notamment en procédant entre la fin de l'automne et le début du printemps, quand les insectes vecteurs sont encore dans le bois, et en respectant la réglementation concernant le transport et la gestion du bois coupé dans une zone tampon autour du bois détruit. Compte tenu des résultats de la simulation portant sur les capacités de dispersion de l'insecte vecteur, cette **zone tampon** devrait être **élargie à un rayon 40 km**.

En conclusion, le GT considère que la seule méthode actuellement opérationnelle pour limiter l'extension des dépérissements liés aux infections par le nématode du pin dans un peuplement contaminé, alliant efficacité et coût raisonnable, demeure la combinaison de **moyens renforcés (tant techniques que financiers) pour la détection précoce du nématode** (sur les insectes vecteurs ou dans les arbres) suivie par des **coupes sanitaires au fur et à mesure du développement du foyer**. Elle vise à l'élimination ciblée des arbres infectés selon les recommandations ci-dessus. L'objectif de la lutte n'est alors plus d'éradiquer la maladie, mais plutôt d'endiguer sa progression à l'échelle du peuplement. Il est important de rappeler que les mesures détaillées ici, faisant l'objet de la saisine, ciblent essentiellement la dispersion naturelle de l'agent pathogène par son vecteur, autour d'un foyer détecté. L'enrayement de l'épidémie à une large échelle géographique ne pourra être efficace que si ces mesures sont couplées à une application rigoureuse de la réglementation concernant le traitement et le transport des bois, pour éviter les introductions à grande distance.

6 Bibliographie

6.1 Publications

Abelleira A., Picoaga A., Mansilla JP. and Aguin O. (2011). Detection of *Bursaphelenchus xylophilus*, causal agent of pine wilt disease on *Pinus pinaster* in Northwestern Spain. *Plant Disease*, 95(6), 776.

Alvarez G., Etxebeste I., Gallego D., David G., Bonifacio L., Jactel H., Sousa E. and Pajares JA. (2014). Optimization of traps for live trapping of pine wood nematode vector *Monochamus galloprovincialis*. *Journal of applied entomology*. First published online.

Aikawa T. (2008). Transmission biology of *Bursaphelenchus xylophilus* in relation to its insect vector. In: *Pine wilt disease* (Ed. by Zhao B.G., Futai K., Sutherland J.R. and Takeuchi Y.), pp. 123-138. Tokyo Springer: 459 p.

Anses. (2015). Détection de *Bursaphelenchus xylophilus* par PCR temps réel dans un groupe d'insectes vecteurs. Méthode officielle d'analyse. MOA 020 partie C version 1a.

Anses. (2011a). Détection de *Bursaphelenchus xylophilus* par PCR temps réel sur bois de conifère. Méthode officielle d'analyse. MOA 020 partie A version 1a.

Anses (2011b). Détection et identification par analyse morphologique et biomoléculaire du nématode du pin *Bursaphelenchus xylophilus*. MOA020 partie B version 1a

Bergdahl DR. and Halik S. (1999). Inoculated *Pinus sylvestris* serve as long-term hosts for *Bursaphelenchus xylophilus*. In *Sustainability of pine forests in relation to pine wilt and decline*. Proceedings of International Symposium, Tokyo, Japan, 27-28 October, 1998. (pp. 73-78). Shokado Shoten.

Bergdahl DR. (1988). Impact of pinewood nematode in North America: present and future. *Journal of Nematology*, 20 (2), 260-265.

Bourdrez P., Delgado R. et Wyss P. (2014). Micro-injection sur pin, palmier, chêne et marronnier. *Phytoma - La santé des végétaux* 678, 21-25.

Brockerhoff EG., Liebhold AM., Richardson B. and Suckling DM. (2010). Eradication of invasive forest insects: concepts, methods, costs and benefits. *New Zealand Journal of Forestry Science* Vol. 40, No. Suppl, pp. S117-S135

David G. (2014). Étude des capacités de dispersion de *Monochamus galloprovincialis* vecteur du nématode du pin *Bursaphelenchus xylophilus*. Thèse, Université de Bordeaux, 173 pp.

David G., Giffard B., Piou D. and Jactel H. (2014). Dispersal capacity of *Monochamus galloprovincialis*, the European vector of the pine wood nematode, on flight mills. *Journal of Applied Entomology*, 138 : 566–576.

David G., Giffard B., van Halder I., Piou D., Jactel H. (2015). Energy allocation during the maturation of a long-lived insect : implications for dispersal and reproduction. *Bulletin of Entomological Research* (in review).

David G., Giffard B., Piou D., Roques A. and Jactel H. (2015). Potential effects of climate warming on the survivorship of adult *Monochamus galloprovincialis*, vector of the pine wood nematode. *Entomologia Experimentalis et Applicata* (in review).

Dwinell LD. (1993). First report of pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) in Mexico. *Plant Disease* , 77, 846.

Evans HF., MacNamara DG., Braasch H., Chadoeuf J. and Magnusson C. (1996). Pest Risk Analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vectors in the genus *Monochamus*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 26, 199-249.

- FAO (2015). Pour garder à distance ravageurs et maladies des plantes, les experts prennent la mesure de la mondialisation. FAO-Nouvelles-16 mars 2015, Rome. www.fao.org/news/story/fr/item/280565/icode/.
- FAO. (2009). NIMP 15 Réglementation des matériaux d'emballage en bois utilisés dans le commerce international. Rome, CIPV, FAO. https://www.ippc.int/static/media/files/publications/fr/2014/04/28/ispm_15_2009_fr_2014-04-28.pdf
- Futai K. (2013). Pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Annual Review of Phytopathology 51, 61-83.
- Futai K. and Takeuchi Y. (2008). Field diagnosis of the asymptomatic carrier of pinewood nematode. In: Pine wilt disease: A worldwide threat to forest ecosystems. Mota M. and Vieira P., Eds. Springer, 279-289.
- Gallego D., Sanchez-Garcia FJ., Mas H., Campo MT. and Lencina YJL. (2012). Estudio de la capacidad de vuelo a larga distancia de *Monochamus galloprovincialis* (Olivier 1795). (Coleoptera: Cerambycidae) en un mosaico agro-for-estal. Bol. Sanid. Veg. Plagas. 38, 109 – 123.
- Ghent J., Onken A. (1998). Aerial Sketch Mapping. FAO report, 7 pp.
- Giffard B., David G., Joubard B., Piou D. and Jactel H. (2015). How does sex and sexual maturation influence the response of *Monochamus galloprovincialis* to live host odors? (in prep).
- Grosman DM. and Upton WW. (2006). Efficacy of systemic insecticides for protection of loblolly pine against southern pine engraver beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) and wood borers (Coleoptera: Cerambycidae). Journal of Economic Entomology 99, 94-101.
- Haran JM, Roques A, Bernard A, Robinet C, Roux G (2015). Altitudinal barrier to the spread of an invasive species: Could the Pyrenean chain slow the natural spread of the pine wood nematode? PLoS ONE 10(7) : e0134126, doi:10.1371/journal.pone.0134126
- Ibeas F., Diez JJ., Pajares JA. (2008). Olfactory Sex Attraction and Mating Behaviour in the Pine Sawyer *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera : Cerambycidae). Journal of Insect Behaviour 21, 101-110
- Ibeas F, Gallego D, Diez JJ, Pajares JA, (2007). An operative kairomonal lure for managing pine sawyer beetle *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerymbycidae). Journal of Applied Entomology 131, 13–20.
- Inacio ML., Nobrega F., Vieira P., Bonifacio L., Naves P., Sousa E. and Mota M. (2014). First detection of *Bursaphelenchus xylophilus* associated with *Pinus nigra* in Portugal and in Europe. Forest Pathology First published online
- Jactel, H. (2013). Effective attraction radius of pheromone traps for *Monochamus galloprovincialis* insect vector of the pine wood nematode. In: Schröder, T. (ed.), Pine Wilt Disease Conference 2013, Braunschweig,
- Koutroumpa FA., Vincent B., Roux Morabito G., Martin C., Lieutier F. (2008). Fecundity and larval development of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera Cerambycidae) in experimental breeding." Annals of Forest Science 65, 707. DOI:10.1051/forest:2008056
- Kuroda K. and Ito S. (1992). Migration speed of pine wood nematodes and activities of other microbes during the development of pine-wilt disease in *Pinus thunbergii*. J. Jpn. For. Soc. 74 : 383-389
- Kuroda K. (2008). Physiological incidences related to symptom development and wilting mechanism. In: Zhao BG, Futai K, Sutherland JR, Takeuchi Y. eds Pine wilt disease. Springer, Tokyo, pp 204–222.
- Kwon TS., Shin JH., Lim JH., Kim YK., Lee EJ. (2011). Management of pine wilt disease in Korea through preventative silvicultural control. Forest Ecology and Management 261 : 562-569.

- Lieutier F., Vincent B. and Koutroumpa F. (2009). Le nématode du pin et sa dissémination : le point sur les connaissances. Actes Colloque DSF de Beaune 11-12 mars 2009, Quatrième session.
- Mamiya Y. (2004). Pine wilt disease in Japan. In: Mota M, Viera P, editors. The pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Proceedings of an International Workshop. University of Evora, Portugal August 20–22, 2001. Nematology Monographs and Perspectives, Volume 1. Leiden, Brill.
- Mamiya Y. (1983). Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. Annual review of Phytopathology, 21, 201-220.
- Mas H., Hernandez R., Villaroya M., Sanchez G., Perez-laorga E., Gonzalez E., Ortiz A., Lencina JL., Rovira J., Marco M., Perez V., Gil M., Sanchez-garcia FJ., Bordon P., Pastor C., Biel MJ., Montagud L. and Gallego D. (2013). Comportamiento de dispersión y capacidad de vuelo a larga distancia de *Monochamus galloprovincialis* (Olivier 1795). 6 Congreso forestal español. 6CFE01-393.
- Mota M., Braasch H., Bravo MA., Penas AC., Burgermeister W., Metge K. and Sousa E. (1999). First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. Nematology, 1, 727-734.
- Naves PM., Camacho S., de Sousa EM. And Quartau JA. (2007a). Transmission of the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* through feeding activity of *Monochamus galloprovincialis* (col., Cerambycidae). Journal of Applied Nematology 131(1), 21-25.
- Naves PM, Camacho S, de Sousa EM, Quartau JA (2007b). Transmission of the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* through oviposition activity of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerambycidae). Entomologia Fennica 18 : 193-198
- Naves P., De Sousa E., and Quartau JA. (2006). Reproductive traits of *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerambycidae) under laboratory conditions. Bulletin of entomological research, 96(03), 289-294.
- Nickle WR., Golden AM., Mamiya Y. and Wergin WP. (1981). On the taxonomy and morphology of the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner 1934) Nickle 1970. Journal of Nematology, 13 (3), 385-392.
- OEPP/EPPO (1986). Data sheets on quarantine organisms, n° 158, *Bursaphelenchus xylophilus*. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 16, 55-60.
- OEPP/EPPO (2009a). Pest analysis for *Bursaphelenchus xylophilus*. 09-15449 version 2 http://www.eppo.int/QUARANTINE/Pest_Risk_Analysis/PRA_intro.htm
- OEPP/EPPO (2009b). Diagnostics, *Bursaphelenchus xylophilus* . PM7/4 (2). Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 39, 344-353.
- Pajares JA., Alvarez G., Ibeas F., Gallego D., Hall DR., Farman DI. (2010). Identification and field activity of a male-produced aggregation pheromone in the pine sawyer beetle, *Monochamus galloprovincialis*. Journal of Chemical Ecology 36, 570–583.
- Park JK. and Kim MG. (2014). Application of unmanned aerial vehicle for detection of pine wilt disease. Asia Life Sciences, 191-202.
- Pluess T., Cannon R., Jarosik V., Pergl J., Pysek P. and Bacher S. (2012). When are eradication campaigns successful ? A test of common assumptions. Biological Invasions 14: 1365-1378.
- Randall J., Tisserat N., Todd T. (2006). Prevention of Pine Wilt of Scots Pine (*Pinus sylvestris*). Arboriculture and Urban Forestry 32(5), 195-201
- Robbins K. (1982). Distribution of the pinewood nematode in the United States. In: Appelby J.E. and malek R.B., Eds. Proceedings of the national pine disease workshop III. Natural history survey, Champaign, IL, USA, 3-6.
- Robinet C., Van Opstal N., Baker R. and Roques A. (2011). Applying a spread model to identify the entry points from which the pine wood nematode, the vector of pine wilt disease, would spread most rapidly across Europe. Biological Invasions, 13, 2891-2995.

- Robinet C., Roques A., Pan H., Fang G., Ye J., Zhang Y. and Sun J. (2009). Role of human-mediated dispersal in the spread of the pinewood nematode in China. *PLoS One*, 4(2), e4646.
- Rodrigues J. (2008). National eradication program for the pinewood nematode in Portugal. In: Pine wilt disease: A worldwide threat to forest ecosystems. Mota M. and Vieira P., Eds. Springer, 5-14.
- Rutherford TA. and Webster JM. (1987). Distribution of pine wilt disease with respect to temperature in North America, Japan and Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 1050-1059.
- Rutherford TA., Mamiya Y. and Webster JM. (1990). Nematode-Induced Pine Wilt Disease: Factors Influencing Its Occurrence and Distribution. *Forest Science*, 36 (1), 145-155.
- Samalens JC. (2009). Stratégies d'échantillonnage des dommages forestiers à l'échelle du paysage : application aux forêts cultivées de pin maritime (*Pinus pinaster*, Ait.). Thèse de L'Université de Bordeaux 1; 216 p.
- Sanchez-Husillos E., Etxebeste I. and Pajares J. (2015). Effectiveness of mass trapping in the reduction of *Monochamus galloprovincialis* Olivier (Col.: Cerambycidae) populations. *Journal of Applied Entomology*.
- Sánchez-Husillos E., Etxebeste I., Álvarez-Baz G. and Pajares J. (2013). Physiological development of *Monochamus galloprovincialis* immature adults through shoot feeding. In: Schröder, T. (ed.), Pine Wilt Disease Conference 2013, pp. 26-27, Braunschweig, ISSN: 1866-590X
- Santos CS. and Vasconcelos MW. (2012). Identification of genes differentially expressed in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* after infection with the pine wood nematode. *European journal of plant pathology* 132(3), 407-418
- Schröder T., McNamara DG. and Gaar V. (2009). Guidance on sampling to detect pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* in trees, wood and insects. *EPPO bulletin*, 39(2), 179-188.
- Shi J., Luo YQ, Song JY, Wu HW., Wang L. and Wang GZ. (2007). Traits of Masson Pine Affecting Attack of Pine Wood Nematode. *Journal of Integrative Plant Biology* 49(12), 1763-1771
- Silva MN., Solla A., Sampedro L., Zas R. and Vasconcelos. (2015). Susceptibility to the pinewood nematode (PWN) of four pine species involved in potential range expansion across Europe. *Tree Physiology Advance Access*. 00, 1-13.
- Soliman T., Mourits MCM., van der Werf W., Hengeveld GM., Robinet C. and Oude Lansik AGJM. (2012). Framework for modeling economic impacts of invasive species, applied to pine wood nematode in Europe. *PLoS ONE* 7(9).
- Sousa E., Naves P. and Vieira M. (2013). Prevention of pine wilt disease induced by *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* by trunk injection of emamectin benzoate. *Phytoparasitica* 41, 143-148.
- Sousa E., Rodrigues J., Bonifácio L., Naves P. and Rodrigues A. (2011). Management and control of the Pine Wood Nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Portugal. In *Nematodes: Morphology, Functions and Management Strategies*, Editors F. Boeri & A. Chung, Nova Science Publishers, ch. 6, 21pp.
- Sousa E., Bravo MA., Pires J., Naves P., Penas AC., Bonifacio L. and Mota M. (2001). *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) associated with *Monochamus galloprovincialis* (Coleoptera: Cerambycidae) in Portugal. *Nematology*, 3(1): 89-91.
- Sousa E., Naves P., Bonifacio L., Bravo MA., Penas AC., Pires J. (2002). Preliminary survey for insects associated with *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 32, 499-502.
- Sousa E., Naves P., Bonifacio L., Inacio L., Henriques J. and Evans H. (2011). Survival of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* in pine branches and wood packaging material. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 41, 203-207.

- Takai K., Suzuki T. and Kawazu K. (2003a). Development and preventive effect against pine wilt disease of a novel liquid formulation of emamectin benzoate. *Pest Management Science* 59, 365-370.
- Takai K., Suzuki T. and Kawazu K. (2003b). Distribution and persistence of emamectin benzoate at efficacious concentrations in pine tissues after injection of a liquid formulation. *Pest Management Science* 60, 42-48.
- Takai K., Soejima T., Suzuki T. and Kawazu K. (2000). Emamectin benzoate as a candidate for a trunk-injection agent against the pinewood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. *Pest Management Science* 56, 937-941.
- Takemoto S. (2008). Population ecology of *Bursaphelenchus xylophilus*. In: Pine wilt disease (Ed. by Zhao B.G., Futai K., Sutherland J.R. and Takeuchi Y.), pp. 105-122. Tokyo Springer: 459 p.
- Takeuchi Y. and Futai K. (2007). Asymptomatic carrier trees in pine stands naturally infected with *Bursaphelenchus xylophilus*. *Nematology*, 9(2), 243-250.
- Takeuchi Y., Kansaki N. and Futai K. (2005). A nested PCR-based method for detecting the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*, from pine wood. *Nematology*, 7, 775-782.
- Togashi K., Jikumaru S. (2007). Evolutionary change in a pine wilt system following the invasion of Japan by the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Ecological Research* 22 : 862-868.
- Tomiczek C. and Hoyer-Tomiczek U. (2008). Biology studies relevant to the vector role of *Monochamus* species for pine wood nematode. In: MM Mota & P Vieira (eds). Pine Wilt Disease: a Worldwide Threat to Forest Ecosystems. Springer : 215-220.
- Tomminen J. (1993). Development of *Monochamus galloprovincialis* Olivier (Coleoptera : Cerambycidae) in cut trees of young pines (*Pinus sylvestris* L.) and log bolts in southern Finland. *Entomologica Fennica* 4, 137-142.
- Torres-Vila LM., Zugasti C., De-Juan JM., Oliva MJ., Montero C., Mendiola FJ., Conejo Y., Sanchez A., Fernandez F., Ponce F. and Espárrago G. (2015). Mark-recapture of *Monochamus galloprovincialis* with semiochemical-baited traps: population density, attraction distance, flight behaviour and mass trapping efficiency. *Forestry*, 88(2), 224-236.
- Vincent B., Altemayer V., Roux-Morabito G., Naves P., Sousa E. and Lieutier F. (2008). Competitive interaction between *Bursaphelenchus xylophilus* and the closely related species *Bursaphelenchus mucronatus*. *Nematology*, 10(2), 219-230.
- Wang Z., Luo YQ., Shi J., Gao RH., Wang GM. (2014). Quantitative Classification and Environmental Interpretation of Secondary Forests 18 Years After the Invasion of Pine Forests by *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) in China. *Journal of Insect Science* 14 : 296.
- Waring KM., and O'Hara KL. (2005). Silvicultural strategies in forest ecosystems affected by introduced pests. *Forest Ecology and Management*, 209(1), 27-41.
- Wingfield MJ. and Blanchette RA. (1982). The pine wood nematode: a comparison of the situation in the United States and Japan. *Canadian Journal of Forest Research*, 12, 71-75.

6.2 Normes

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

6.3 Législation et réglementation

Décision d'exécution de la commission du 26 septembre 2012 relative aux mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation, dans l'Union, de *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhner) Nickle *et al.* (nématode du pin) [notifiée sous le numéro C(2012) 6543] (2012/535/UE). *Journal Officiel de l'Union Européenne* L 266 du 02.10.2012, pages 42-52.

Note de service DGAL/SDQPV/ N2013-8102 du 25 juin 2013 - Méthode de piégeage de coléoptères du genre *Monochamus* à mettre en oeuvre dans le cadre de la surveillance du nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*).

Note de service DGAL/SDQPV/N 2013-8132 du 31 juillet 2013 - Plan annuel de surveillance relatif au nématode du pin (*Bursaphelenchus xylophilus*) en France.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2014 -SA- 0 1 0 3



COURRIER ARRIVE

2 8 AVR. 2014

DIRECTION GENERALE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT

Direction générale de l'alimentation

Service de la prévention des risques sanitaires de la production primaire

Sous-direction de la qualité et de la protection des végétaux

Bureau des semences et de la santé des végétaux

Adresse : 251 rue de Vaugirard
75 732 PARIS CEDEX 15Suivi par : Emmanuel Koen
Tél : 01 49 55 57 54
Fax : 0149 55 59 49
bssv.sdqpv.dgal@agriculture.gouv.frM. Marc MORTUREUX
Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
(ANSES)27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort cedex

Copie : Mme. Nathalie FRANQUET

Réf. interne : BSSV / 2014 -

Paris, le

24 AVR. 2014

Objet : Demande d'avis sur la stratégie de lutte imposée par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 relative à la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation, dans l'Union, de *Bursaphelenchus xylophilus*.

La décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012 (annexe 1) impose aux États Membres, la mise en place de mesures d'urgence destinées à prévenir la propagation dans l'Union, de *Bursaphelenchus xylophilus*, le nématode du pin, un organisme nuisible réglementé dont l'introduction en France pourrait occasionner de gros dégâts sur de nombreux résineux.

Ces mesures visent en priorité à éradiquer tout foyer du nuisible détecté, l'enrayement de tels foyers ne devant être mis en œuvre que dans les zones où l'éradication ne serait pas un objectif réalisable. Dans ce contexte, les États membres doivent appliquer des mesures d'éradication pendant au moins quatre ans suite à la détection d'un foyer. Elle consiste notamment en la mise en place de coupes rases (d'un rayon de 500m réductible sous conditions à 100m) autour des végétaux infestés et à la mise en place d'une surveillance intensive dans un rayon variant de 6Km à 20km autour de la zone infestée (rayon supposés suffisant compte tenu de la distance de vol de l'insecte vecteur). De telles mesures peuvent avoir des conséquences environnementales importantes et nécessiter des moyens humains conséquents en particulier en cas de détections multiples. Il est à noter que ces mesures ont été élaborées à l'aide des éléments scientifiques et techniques disponibles à l'époque sur le nématode et son vecteur (insectes du genre *Monochamus*).

Récemment, de nouvelles études ont été publiées. Certaines ont été réalisées en Europe et portent notamment sur :

- la distance de vol de l'insecte vecteur en Europe (*Monochamus galloprovincialis*) qui serait très supérieure à celle de l'insecte vecteur en Asie *Monochamus alternatus* (3Km) qui a servi de référence pour l'élaboration de la décision européenne
- l'efficacité de la méthode visant à réaliser des micro-injections de benzoate d'émamectine pour la réalisation de traitements préventifs (cette molécule aurait à la fois un effet nématocide envers le nématode et insecticide envers les vecteurs)

Dans ce cadre, au regard de ces récentes études, je vous prie de bien vouloir :

- i) réexaminer la stratégie de lutte telle que décrite par la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012, afin de déterminer si ces mesures sont toujours adaptées à l'éradication d'éventuels foyers.
- ii) proposer le cas échéant des améliorations de cette stratégie de lutte visant à augmenter le rapport efficacité/impact qui lui est associé.

Les réponses à ces questions pourraient permettre d'engager des discussions à l'échelle européenne visant à faire évoluer, si nécessaire, la décision d'exécution 2012/535/UE du 26 septembre 2012. Dans ce cadre, je vous prie de bien vouloir réaliser ce travail pour le 15 décembre 2014, afin que nous puissions disposer d'éléments sur le sujet avant le déroulement du prochain panel de la quarantaine forestière de l'organisation européenne et méditerranéenne pour la protection des végétaux (OEPP).

En cas de difficulté rencontrée dans l'accomplissement de cette mission, je vous prie de m'en informer dans les meilleurs délais.

Mes services se tiennent à votre disposition pour vous apporter toute information complémentaire. Je vous remercie de bien vouloir m'accuser réception de la présente demande.

Le Directeur Constantin Angot
Chef du Service de la Coordination
des Actions Sanitaires - C. V. O.



Jean-Luc ANGOT

Notes





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

14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr

www.anses.fr / [@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)