



HAL
open science

Prolifération des punaises de lits en milieu urbain : nouvelle réglementation et traitements des locaux lors d'infestations

Arnaud Glomet

► To cite this version:

Arnaud Glomet. Prolifération des punaises de lits en milieu urbain : nouvelle réglementation et traitements des locaux lors d'infestations. Sciences pharmaceutiques. 2021. hal-03806058

HAL Id: hal-03806058

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03806058v1>

Submitted on 7 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



FACULTÉ
DE PHARMACIE

UNIVERSITE DE LORRAINE
2021

FACULTE DE PHARMACIE

THESE

Présentée et soutenue publiquement

le 03 Mars 2021, sur un sujet dédié à :

PROLIFERATION DES PUNAISES DE LIT EN MILIEU
URBAIN : NOUVELLE REGLEMENTATION ET
TRAITEMENTS DES LOCAUX LORS D'INFESTATIONS
DES PUNAISES DE LITS

pour obtenir

le Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie

par Arnaud GLOMET
né le 21 janvier 1988

Membres du Jury

Président de jury : M. Xavier BELLANGER, Maître de Conférences, en Parasitologie et Mycologie médicale

Directrice de thèse : M. Sandrine CAPIZZI, Maître de Conférences, en Parasitologie médicale

Juges :

Me Claire DOUSSET, Docteur en Pharmacie

M. Bastien Vagner, Docteur en Pharmacie

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ DE PHARMACIE
Année universitaire 2020-2021

DOYEN

Raphaël DUVAL

Vice-Doyen

Julien PERRIN

Directrice des études

Marie SOCHA

Conseil de la Pédagogie

Présidente, Brigitte LEININGER-MULLER

Vice-Présidente, Alexandrine LAMBERT

Collège d'Enseignement Pharmaceutique Hospitalier

Présidente, Béatrice DEMORE

Commission Prospective Facultaire

Président, Christophe GANTZER

Vice-Président, Jean-Louis MERLIN

Commission de la Recherche

Présidente, Caroline GAUCHER

Chargés de Mission

Communication
Innovation pédagogique
Référente ADE
Référente dotation sur projet (DSP)
Référent vie associative

Aline BONTEMPS
Alexandrine LAMBERT
Virginie PICHON
Marie-Paule SAUDER
Arnaud PALLOTTA

Responsabilités

Filière Officine
Filière Industrie
Filière Hôpital
Pharma Plus ENSIC
Pharma Plus ENSALA
Pharma Plus ENSGSI
Cellule de Formation Continue et Individuelle
Commission d'agrément des maîtres de stage
ERASMUS

Caroline PERRIN-SARRADO
Julien GRAVOULET
Isabelle LARTAUD,
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS
Béatrice DEMORE
Marie SOCHA
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS
Xavier BELLANGER
Igor CLAROT
Luc FERRARI
François DUPUIS
Mihayl VARBANOV

DOYENS HONORAIRES

Chantal FINANCE
Francine PAULUS
Claude VIGNERON

PROFESSEURS EMERITES

Jeffrey ATKINSON
Max HENRY
Pierre LEROY
Philippe MAINCENT
Claude VIGNERON

PROFESSEURS HONORAIRES

Jean-Claude BLOCK
Pierre DIXNEUF
Chantal FINANCE
Marie-Madeleine GALTEAU
Thérèse GIRARD
Pierre LABRUDE
Vincent LOPPINET
Alain NICOLAS
Janine SCHWARTZBROD
Louis SCHWARTZBROD

MAITRES DE CONFERENCES HONORAIRES

Monique ALBERT
Marianne BEAUD
François BONNEAUX
Gérald CATAU
Jean-Claude CHEVIN
Jocelyne COLLOMB
Bernard DANGIEN
Marie-Claude FUZELLIER
Françoise HINZELIN
Marie-Hélène LIVERTOUX

ASSISTANTS HONORAIRES

Marie-Catherine BERTHE
Annie PAVIS

Bernard MIGNOT
Blandine MOREAU
Dominique NOTTER
Francine PAULUS
Christine PERDICAKIS
Marie-France POCHON
Anne ROVEL
Gabriel TROCKLE
Maria WELLMAN-ROUSSEAU
Colette ZINUTTI

ENSEIGNANTS

Section CNU *

Discipline d'enseignement

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

Danièle BENSOUSSAN-LEJZEROWICZ	82	<i>Thérapie cellulaire</i>
Béatrice DEMORE	81	<i>Pharmacie clinique</i>
Jean-Louis MERLIN	82	<i>Biologie cellulaire</i>
Jean-Michel SIMON	81	<i>Economie de la santé, Législation pharmaceutique</i>
Nathalie THILLY	81	<i>Santé publique et Epidémiologie</i>

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Ariane BOUDIER	85	<i>Chimie Physique</i>
Christine CAPDEVILLE-ATKINSON	86	<i>Pharmacologie</i>
Igor CLAROT	85	<i>Chimie analytique</i>
Joël DUCOURNEAU	85	<i>Biophysique, Acoustique, Audioprothèse</i>
Raphaël DUVAL	87	<i>Microbiologie clinique</i>
Béatrice FAIVRE	87	<i>Hématologie, Biologie cellulaire</i>
Luc FERRARI	86	<i>Toxicologie</i>
Pascale FRIANT-MICHEL	85	<i>Mathématiques, Physique</i>
Christophe GANTZER	87	<i>Microbiologie</i>
Frédéric JORAND	87	<i>Eau, Santé, Environnement</i>
Isabelle LARTAUD	86	<i>Pharmacologie</i>
Dominique LAURAIN-MATTAR	86	<i>Pharmacognosie</i>
Brigitte LEININGER-MULLER	87	<i>Biochimie</i>
Patrick MENU	86	<i>Physiologie</i>
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS	86	<i>Chimie thérapeutique</i>
Bertrand RIHN	87	<i>Biochimie, Biologie moléculaire</i>

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

Alexandre HARLE	82	<i>Biologie cellulaire oncologique</i>
Julien PERRIN	82	<i>Hématologie biologique</i>
Loïc REPPEL	82	<i>Biothérapie</i>
Marie SOCHA	81	<i>Pharmacie clinique, thérapeutique et biotechnique</i>

MAITRES DE CONFÉRENCES

Xavier BELLANGER ^H	87	<i>Parasitologie, Mycologie médicale</i>
Emmanuelle BENOIT ^H	86	<i>Communication et Santé</i>
Isabelle BERTRAND ^H	87	<i>Microbiologie</i>
Michel BOISBRUN ^H	86	<i>Chimie thérapeutique</i>
Cédric BOURA ^H	86	<i>Physiologie</i>
Sandrine CAPIZZI	87	<i>Parasitologie</i>
Antoine CAROF	85	<i>Informatique</i>
Sébastien DADE	85	<i>Bio-informatique</i>
Dominique DECOLIN	85	<i>Chimie analytique</i>
Natacha DREUMONT ^H	87	<i>Biochimie générale, Biochimie clinique</i>
Florence DUMARCAZ ^H	86	<i>Chimie thérapeutique</i>
François DUPUIS ^H	86	<i>Pharmacologie</i>
Reine EL OMAR	86	<i>Physiologie</i>
Adil FAIZ	85	<i>Biophysique, Acoustique</i>
Anthony GANDIN	87	<i>Mycologie, Botanique</i>
Caroline GAUCHER ^H	86	<i>Chimie physique, Pharmacologie</i>
Stéphane GIBAUD ^H	86	<i>Pharmacie clinique</i>
Thierry HUMBERT	86	<i>Chimie organique</i>
Olivier JOUBERT ^H	86	<i>Toxicologie, Sécurité sanitaire</i>
Alexandrine LAMBERT	85	<i>Informatique, Biostatistiques</i>

Julie LEONHARD	86	Droit en Santé
Christophe MERLIN ^H	87	Microbiologie environnementale
Maxime MOURER ^H	86	Chimie organique
Coumba NDIAYE	86	Epidémiologie et Santé publique
Arnaud PALLOTTA	85	Bioanalyse du médicament
Marianne PARENT	85	Pharmacie galénique
Caroline PERRIN-SARRADO	86	Pharmacologie
Virginie PICHON	85	Biophysique
Sophie PINEL ^H	85	Informatique en Santé (e-santé)
Anne SAPIN-MINET ^H	85	Pharmacie galénique
Marie-Paule SAUDER	87	Mycologie, Botanique
Guillaume SAUTREY	85	Chimie analytique
Rosella SPINA	86	Pharmacognosie
Sabrina TOUCHET	86	Pharmacochimie
Mihayl VARBANOV	87	Immuno-Virologie
Marie-Noëlle VAULTIER	87	Mycologie, Botanique
Emilie VELOT ^H	86	Physiologie-Physiopathologie humaines
Mohamed ZAIYOU ^H	87	Biochimie et Biologie moléculaire

PROFESSEUR ASSOCIE

Julien GRAVOULET	86	Pharmacie clinique
------------------	----	--------------------

PROFESSEUR AGREGE

Christophe COCHAUD	11	Anglais
--------------------	----	---------

^H Maître de conférences titulaire HDR

* Disciplines du Conseil National des Universités :

80 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

81 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

82 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

85 ; Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

86 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

87 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

11 : Professeur agrégé de lettres et sciences humaines en langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes

« LA FACULTE N'ENTEND DONNER AUCUNE
APPROBATION, NI IMPROBATION AUX OPINIONS
EMISES DANS LES THESES, CES OPINIONS DOIVENT
ETRE CONSIDEREES COMME PROPRES A LEUR
AUTEUR ».

SERMENT DE GALIEN

En présence des Maitres de la Faculté, je fais le serment :

D'honorer ceux qui m'ont instruit (e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique, ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles de Déontologie, de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession

De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens

De coopérer avec les autres professionnels de santé

Que les Hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert (e) d'opprobre et méprisé (e) de mes confrères si j'y manque.

Remerciements

Aux enseignants de la faculté, qui ont su me passionner.

A madame Capizzi, pour son encadrement, son aide et sa compréhension.

Aux membres du jury pour avoir accepté de juger mon travail.

A ma famille, qui m'a toujours soutenu et à mes grands-parents disparus, qui seraient fiers de moi.

A mes amis de la fac, Bibi et Cyrielle, Dodo et Juju, Pucò, JB, Ludo (qui ont bien cru que ce moment n'arriverait jamais) pour ces bons moments, passés comme futurs.

A PXI, que la distance qui nous sépare soit proportionnelle à mon affection.

A maman Claire, ma protéine chaperonne depuis le début.

A Yolande, pour l'amour inspirant de ton métier.

A Adrienne, pour tout ce qui me prendrait trop de temps à écrire ici.

A Michèle, pour ton aide.

A Claire, Sandrine, Véronique, Dominique et Karine qui m'ont fait confiance et aidé à appréhender les multiples facettes de ce beau métier.

Aux membres de la scolarité, à qui j'ai donné du fil à retordre.

TABLE DES MATIERES

THESE.....	1
1 INTRODUCTION	14
1.1 L'HISTOIRE DES PUNAISES DE LITS	15
1.1.1 Des origines au Moyen Âge	15
1.1.2 Du Moyen âge a nous jours	17
2 ENTOMOLOGIE DES PUNAISES DE LIT.....	22
2.1 GENERALITES.....	22
2.2 CLASSIFICATION BIOLOGIQUE DE <i>CIMEX LECTULARIUS</i> ET <i>C. HEMIPTERUS</i>	23
2.3 MORPHOLOGIE DES PUNAISES ADULTES	25
2.3.1 Généralités morphologiques des adultes.....	25
2.3.2 Tete.....	26
2.3.3 Thorax.....	26
2.3.4 Abdomen	27
2.3.5 Comparaison avec d'autres punaises de la famille des cimicidés.....	27
2.3.5.1 <i>Cimex hemipterus</i> , l'autre punaise de lit	27
2.3.5.2 Punaises des oiseaux, <i>Cimex columbarius</i> et <i>oeciacus hirundinis</i>	28
2.3.5.3 Punaise des chauves-souris, <i>Cimex pipistrelli</i>	29
2.3.6 Confusions avec d'autres arthropodes	29
2.3.6.1 Larve de blatte germanique <i>Blattella germanica</i> Linnée 1767	29
2.3.6.2 Psoque ou poux des livres, <i>Liposcelis corrodens</i> Heymons, 1909	29
2.3.6.3 Les ptines.....	30
2.3.6.4 Les punaises anthocorides, sous-ordre des hétéroptères.....	30
2.3.6.5 Poux de tête, <i>Pediculus humanus Linnaeus, 1758</i>	31
2.3.6.6 Puces.....	31
2.3.6.7 Tiques dures	32
2.4 ORGANISATION ET ANATOMIE DES PUNAISES DE LIT	33
2.4.1 Cavité générale ou hémocèle.....	33
2.4.2 Système circulatoire.....	33
2.4.3 Système respiratoire.....	33
2.4.4 Système digestif.....	33
2.4.5 Système nerveux.....	34
2.4.6 Glandes odorifères.....	35
2.4.7 Système reproducteur.....	36
2.4.8 Système excréteur	37
2.4.9 Les Mycétomes	37
3 BIOLOGIE DES PUNAISES DE LIT.....	38
3.1 CYCLE DE VIE DES PUNAISES DE LIT	38
3.2 HEMATOPHAGIE.....	39
3.3 INSEMINATION EXTRA-GENITALE TRAUMATIQUE	41
3.3.1 Le Système paragénital.....	42
3.3.2 Comportement sexuel.....	43
3.3.3 Conséquences de l'insémination traumatique.....	44
4 ÉCOLOGIE DES PUNAISES DE LIT.....	46
4.1 OLFACION ET CHIMIOTACTISME	46
4.1.1 Role de l'olfaction et du chimiotactisme dans la recherche de l'hôte.....	46
4.1.2 Role de l'olfaction et du chimiotactisme dans la communication intraspécifique.....	47
4.1.2.1 Les phéromones	47
4.2 ORIENTATION TACTILE ET VISUELLE.....	47
4.3 PHOTOPHOBIE	48
4.4 MODES DE DEPLACEMENT	48
4.5 RESISTANCE AU STRESS HYDRIQUE.....	48
4.6 RESISTANCE A LA TEMPERATURE	49
4.6.1 Hautes températures.....	49
4.6.2 Basses températures	49

4.7	LE SYMBIOTISME	50
4.7.1	<i>Le microbiote symbiotique des punaises de lit</i>	50
4.7.2	<i>Impact du symbiote sur cimex lectularius</i>	50
4.7.3	<i>Le role du symbiote dans la lutte contre les punaises de lit</i>	51
5	LES DIFFERENTS IMPACTS DES PUNAISES DE LIT	52
5.1	IMPACT SUR L'HOMME ET CONSEQUENCES CLINIQUES	52
5.1.1	<i>Réactions cutanées</i>	52
5.1.1.1	Mecanismes immunitaires mis en jeu dans les réactions cutanées	53
5.1.1.2	Traitement des lésions	54
5.1.1.3	Diagnostic différentiel des piqures	54
5.1.2	<i>Problèmes respiratoires</i>	54
5.1.3	<i>Anémie</i>	55
5.1.4	<i>troubles du sommeil</i>	56
5.1.5	<i>Impact psychologique</i>	56
5.1.6	<i>Expositions chimiques</i>	56
5.2	LES PUNAISES DE LITS ET MALADIES INFECTIEUSES	57
5.2.1	<i>Historique du role de vecteur</i>	57
5.2.2	<i>Microorganismes présents dans les punaises de lit</i>	57
5.2.3	<i>Mécanismes de transmission vectorielle</i>	58
5.2.4	<i>Punaises de lit et maladie de Chagas</i>	59
5.2.5	<i>Punaises de lit et hépatite B</i>	60
5.2.6	<i>Punaises de lit et hépatite C</i>	60
5.2.7	<i>Punaises de lits et autres maladies bactériennes</i>	61
5.2.8	<i>Pourquoi les punaises de lit ne semblent pas transmettre de maladies ?</i>	62
5.3	IMPACT ECONOMIQUE	62
6	LA LUTTE CONTRE LES PUNAISES DE LIT	63
6.1	LA SOUDAINE RESURGENCE.....	63
6.2	DONNEES EPIDEMIOLOGIQUES	63
6.3	QUELLES PEUVENT ETRE LES CAUSES DE CETTE RESURGENCE ?	65
6.4	METHODES DE LUTTE CONTRE LES PUNAISES	66
6.4.1	<i>Detection et diagnostic</i>	66
6.4.2	<i>Évaluation de l'infestation : répartition et quantification</i>	67
6.4.2.1	Methodes de detection des punaises de lit.....	68
6.4.3	<i>Lutte mecanique</i>	82
6.4.3.1	Établir des barrières entre l'hôte et les punaises	82
6.4.3.2	Empêcher la création de nouveaux abris	83
6.4.3.3	Éliminer physiquement les punaises	83
6.4.3.4	Créer des conditions environnementales défavorables à l'insecte	88
6.4.4	<i>Lutte chimique</i>	93
6.4.4.1	Les insecticides	94
6.4.4.2	Formulations des insecticides.....	99
6.4.4.3	La résistance aux insecticides	100
6.4.4.4	Autres moyens de lutte chimique	103
6.4.5	<i>Évaluation de la lutte</i>	106
6.4.6	<i>Mise en place de mesures de prévention</i>	107
6.4.6.1	Empêcher l'introduction des punaises	107
6.4.6.2	Limiter leur installation.....	107
6.4.6.3	Empêcher leur multiplication	108
6.4.6.4	Limiter leur dissémination.....	108
6.4.7	<i>Aide au choix d'une entreprise 3D</i>	108
7	PLAN GOUVERNEMENTAL DE PREVENTION ET DE LUTTE CONTRE LES PUNAISES DE LIT ET ASPECTS REGLEMENTAIRES	110
7.1	UN PLAN POUR MIEUX INFORMER	110
7.2	UN PLAN POUR MIEUX AGIR.....	110
7.3	UN PLAN POUR MIEUX PROTEGER	111
9	CONCLUSION	113
	BIBLIOGRAPHIE	114

Liste des figures

Figure 1 : Gravure sur bois ; Hortus Sanitatis (Johannes de Cuba,1485).....	16
Figure 2 : Gravure sur bois, les vermines de l'Homme ; Hortus Sanitatis (Johannes de Cuba,1485)	16
Figure : 3 Affiche de la Seconde Guerre Mondiale incitant les soldats à examiner minutieusement leur couchette et leur entourage immédiat a la recherche de punaises de lits (Potter,The History of Bed Bugs Management, 2011)(7)	19
Figure 4 : Spray de DDT appliqué sur les vêtements d'un soldat américain lors de la Seconde Guerre Mondiale (Public Health Image Library).....	19
Figure 5 : “War on Bed Bugs”. Mise en scène d’une troupe américaine, 1938 (Doggett et al. Advances in the Biology and Management of Modern Bed Bugs, 2018)(14).....	20
Figure 6 : Une punaise de lit, <i>Cimex lectularius</i> . (Naskrecki P, Harvard University, 2007)(14) 22	22
Figure 7 : <i>Nezara viridula</i> ou punaise puante (Hectonichus, 2012).....	22
Figure 8 : <i>Cimex lectularius</i> adulte (M. Muller, 2015).....	25
Figure 9 : Tête de <i>Cimex lectularius</i> , vue de dessous en microscopie électronique. (©National Institutes of Health, Department of Health and Human Services).....	26
Figure : 10 Thorax de <i>Cimex lectularius</i> , vu de dessus au microscope électronique (Janice Haney Carr, 2016).....	27
Figure 11 Individus mâles des deux principales espèces inféodées à l'homme; 1: <i>cimex hemipterus</i> ; 2: <i>cimex lectularius</i> . (Berenger J-M, Pluot-Sigwalt D. Présence en France de la punaise de lit tropicale. Bull Soc Ent Fr. 2017)(27).....	28
Figure 12 : Larve de <i>blattella germanica</i> , vue dorsale (Fédération Suisse des Désinfestateurs, 2017).....	29
Figure 13 : <i>Liposcelis corrodens</i> adulte, vue dorsale (Fédération Suisse des Désinfestateurs, 2017).....	30
Figure 14 : <i>Ptinus fur</i> (Fédération Suisse des Désinfestateurs, 2017).....	30
Figure 15 : <i>Cardiastethus fasciiventris</i> (Fédération Suisse des Désinfestateurs, 2017).....	31
Figure 16 : <i>Pediculus humanus</i> vue dorsale (Fédération Suisse des Désinfestateurs, 2017)...	31
Figure 17 : Puce du chien <i>Ctenocephalides canis</i> (Luis Fernández García, 2007).....	32
Figure 18 : <i>Ixodes Ricinus</i> (Jorn Gabrielsen, 2010)	32
Figure 19 : Schéma de l'anatomie interne de la tete de <i>C. lectularius</i> , vue de profil (Usinger, Monographie des cimicidae, 1967)	34
Figure 20 : Anatomie d'une femelle représentant le système trachéal et digestif (Usinger, Monographie des cimicidae, 1967)	34
Figure 21 : Système nerveux et organes génitaux d'une femelle de <i>C. lectularius</i> (Usinger, Monographie des cimicidae, 1967)	35
Figure 22 : Anatomie interne d'un mâle de <i>Cimex lectularius</i> mettant en évidence les organes génitaux (Usinger, Monographie des cimicidae, 1967)	36
Figure 23 : Cycle biologique des punaises de lit (Centre National d'Expertise sur les Vecteurs. Les punaises de lit <i>Cimex lectularius</i> et <i>Cimex hemipterus</i> - Biologie, Lutte et Santé publique, 2ème édition, 2015)	38
Figure 24 : Oeuf de punaise de lit, scellé au support. Le point rouge représente l'oeil de la nymphe en développement. (Doggett SL. Bed Bugs : Latest Trends and Developments, AEPMA National Conference, 2007).....	39
Figure 25 : Différentes étapes (a, b, c) de la pénétration des stylets dans les tissus de l'hôte (Usinger, Monographie des cimicidae, 1967).....	41

Figure 26 : Accouplement d'un couple de <i>Cimex lectularius</i> (Boase et Naylor, Bed Bugs Management, 2014)	41
Figure 27 : à gauche, localisation du spermalège en vue dorsale ; à droite, le sillon paragénital (Morrow E, Arnqvist G. Costly traumatic insemination and a female counter-adaptation in bed bugs, 2003)	42
Figure 28 : Schéma général du système paragénital chez <i>cimex</i> sp Légende : sc, conceptacle séminal ; cs, corps syncytial ; s, cicatrice ou trace de copulation; es, ectospermalège ; cl, lobe conducteur ; ms, mésospermalège ; w : paroi du mésospermalège ov, ovocyte; ode, oviducte de l'ectoderme; odm, oviducte du mésoderme ; p, pédicelle de l'ovariole ; v, vagin (Usinger, Monographie des Cimicidae, 1967).....	43
Figure 29 : Différentes positions de refus de la punaise de lit femelle Siva-Jothy et al, Female bed bugs anticipate the immunological consequences of traumatic insemination via feeding cues. 2019.....	44
Figure 30 : Reactions bulleuses apparues entre 24 à 36 heures après les piqûres (Doggett SL et al. Bed bugs: clinical relevance and control options. Clinical Microbiology Reviews. 2012	53
Figure 31 : Les piqûres sont souvent alignées (Doggett SL et al,. Bed bugs: clinical relevance and control options. Clinical Microbiology Reviews. 2012).....	53
Figure 32 : Evolution de l'interet pour la requete "punaise de lit" en France entre 2004 et 2020, Google Trends.....	64
Figure 33 : Principales zones à inspecter. 1: latte de sommier; 2: matelas et coutures; 3: linge de lit; 4: mobilier proche du lit; 5: coins inferieurs et supérieurs des pièces (Berenger, ARS PACA, 2014)	68
Figure 34 : K-Othrine® du laboratoire Bayer, a base de deltamethrine	69
Figure 35 : Taches et déjections de punaises (Fédération Suisse des Désinfestateurs, ecoPv2 ; 2017).....	70
Figure 36 : Lampe a uv disponible dans le commerce	70
Figure 37 : Test coloration fécale bed Bug blue®. L'apparition d'une tache bleue signale la présence de sang dans les dejections	71
Figure 38 : Eco-keeper®, un exemple de piège collant à placer sous les pieds de lit	72
Figure 39 : Trappit BB Detector®, un exemple de piège collant à placer sur le chemin des punaises.....	72
Figure 40 : Exemple piége pittfall : le ClimbUp insect interceptor®	73
Figure 41 : Exemple d'emplacements des pièges passifs.Les doubles cercles représentent les pièges. Le chiffre rouge correspond au nombre de punaises capturées (Cooper R, Wang C. The Future of Bed Bugs. NPMA (National Pest Management Association, 2015).....	74
Figure 42 : a) une punaise de lit sur une feuille de haricot vulgaire; b) image au microscope électronique d'une patte de punaise (jaune) coincée dans les trichomes (vert clair). (Szyndler et al. Entrapment of bed bugs by leaf trichomes inspires microfabrication of biomimetic surfaces. Journal of the Royal Society Interface, 2013).....	75
Figure 43 : Gros plan en microscopie electronique d'une patte de punaise sequestrée par un trichome (Szyndler et al. Entrapment of bed bugs by leaf trichomes inspires microfabrication of biomimetic surfaces. Journal of the Royal Society Interface, 2013)	75
Figure 44 : Le dispositif bedbug beacon® par l'entreprise Packtite.....	77
Figure 45 : Nightwatch® de l'entreprise Biosensory.....	77
Figure 46 : Piège fait maison à base de glace sèche (wang et al, Bed bug attraction to pitfall traps baited with carbon dioxide, heat, and chemical lure. Journal of economic entomology,2009)	78
Figure 49 : Suterra monitor® de trappit	80
Figure 50 : First Response Bed Bug Trap, de Biocare	80

Figure 51 : Chien renifleur en action (Cooper R, Wang C. The Future of Bed Bugs. National Pest Management Association, 2012)..... 81

Liste des tableaux

Tableau 1 sous familles et genres des cimicidés (Centre Nationale d’Expertise sur les Vecteurs. Les punaises de lit <i>Cimex lectularius</i> et <i>Cimex hemipterus</i> - Biologie, Lutte et Santé publique, 2ème édition, 2015)	24
Tableau 2 Quelques microorganismes retrouvés chez les punaises de lit (Delaunay P et al. Bedbugs and Infectious Diseases. Clin Infect. 2011)	58

**PROLIFÉRATION DES PUNAISES DE
LIT EN MILIEU URBAIN : NOUVELLE
RÉGLEMENTATION ET
TRAITEMENTS DES LOCAUX LORS
D'INFESTATIONS DES PUNAISES DE
LITS**

1 INTRODUCTION

Les punaises de lit sont des insectes ectoparasites hématophages inféodés à l'espèce humaine depuis des milliers d'années. Cosmopolites, elles étaient très répandues jusqu'à la première moitié du XX^{ème} siècle, avènement de nouveaux moyens de lutte et de l'amélioration globale des conditions de vie et d'hygiène qui permirent de presque les faire disparaître, jusqu'à récemment, où l'on observe un franc retour des infestations. Vivant principalement dans les literies, les canapés et autres tapis de nos habitations, on les retrouve aussi en dehors de nos foyers : hôpitaux, maisons de retraite, hôtels, bateaux de croisière, foyers de personnes handicapées, cinémas et prisons ne sont plus épargnés.

Le terme « punaises de lit », nom vernaculaire aux contours flous, s'applique en réalité à plusieurs taxons distincts dont les deux principaux parasitant l'Homme sont *Cimex lectularius* Linné, 1758 et *Cimex Hemipterus* Fabricius, 1803, vivant dans des zones du globe différentes mais assurant leur présence ubiquitaire à la surface de la Terre.

Les punaises de lits, bien qu'ayant un rôle mineur dans la transmission de maladies, représentent une grave nuisance si elles sont présentes en abondance, comprenant lésions cutanées consécutives aux piqûres avec possible retentissement psychologique.

Les populations de punaises de lits sont restées à un niveau très bas depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Mais, depuis les années 90, on observe une augmentation dramatique du nombre de nouvelles infestations en Europe, Australie, Asie et Amérique du Nord. Cette recrudescence soudaine est probablement due à l'accumulation de plusieurs facteurs facilitant leur survie, leur reproduction et leur diffusion. L'échec des traitements, imputable à des pratiques inappropriées d'élimination des nuisibles, a certainement contribué à ce problème. Nous allons aborder les différents points à connaître pour pouvoir répondre à la question de comment s'en débarrasser, en apprenant d'abord à connaître cet insecte, puis nous verrons les moyens dont nous disposons avant d'envisager leurs limites.

1.1 L'HISTOIRE DES PUNAISES DE LITS

1.1.1 DES ORIGINES AU MOYEN ÂGE

On a d'abord cru que les punaises de lit avaient pour premières proies les chauves-souris vivant dans les cavernes il y a quelques 60 millions d'années (1). Mais une récente étude basée sur une analyse génomique de nombreuses espèces fossiles et actuelles démontre qu'elles leur seraient antérieures de plusieurs dizaines de millions d'années, situant leur apparition il y a au moins 100 millions d'années, en faisant un nuisible ayant côtoyé les dinosaures (2).

Si l'identité exacte de leurs premiers hôtes reste à ce jour toujours inconnue, il semblerait que *Cimex lectularius* est issue d'une lignée ayant parasité les ancêtres des chauves-souris alors que *Cimex hemipterus* viendrait d'une lignée visant les oiseaux.

Il y a 100.000 ans, l'homme maîtrisant déjà le feu pour se défendre, se chauffer et s'éclairer commença à s'aventurer dans les cavernes qui abritaient des colonies de chauves-souris parasitées par les punaises, telles que *Myotis* et *Rhinolophus* (1). Les premiers contacts entre les punaises et l'espèce humaine se seraient produits à cette occasion. Plus tard, vers le huitième millénaire avant JC, l'homme commence à cultiver des céréales et à élever des animaux dans le croissant fertile : il invente l'agriculture et passe progressivement du nomadisme à la sédentarité, sortant de ses cavernes et s'installant dans des villages puis de petites villes, en emportant avec lui les punaises dans les habitations, scellant de la sorte l'union homme-punaise. Une hypothèse suggère que cette dernière fut renforcée par le fait que les hommes n'étaient pas les seuls à sortir des cavernes et à s'installer dans des maisons : les chauves-souris les ont suivis pour se nicher dans les toits et charpentes (1). L'espèce étant aptère, c'est le développement du commerce et du transport de marchandises et des hommes qui permis aux punaises d'étendre leur territoire et ainsi de se répandre dans le monde (3).

En 1996, deux archéologues découvrirent dans un tombeau égyptien d'Akhenaton vieux de 3550 ans, au sud du Caire, des restes remarquablement bien conservés de *Cimex lectularius* (4)

En 423 avant JC, Aristophane, poète et écrivain grec, les mentionne pour la première fois dans sa pièce « Les Nuées ». Elles tourmentent le héros, Tourneboule, -dont le nom viendrait du fait qu'il se retourne en permanence dans son lit sous leurs assauts répétés- en l'empêchant de dormir (5). Aristote en 343 avant notre ère en fait une description dans l'Histoire des animaux, livre V :

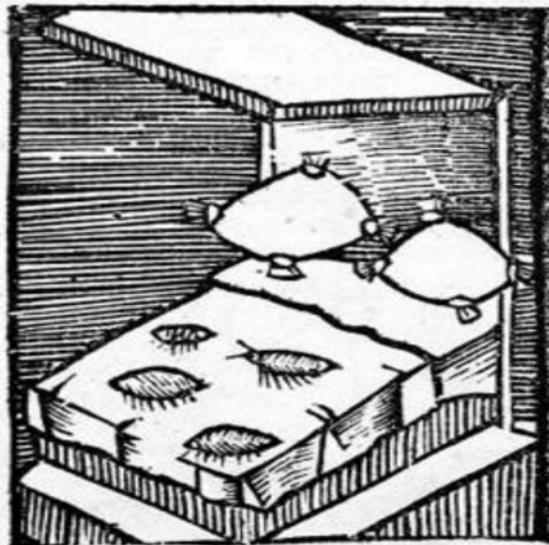
« Les insectes qui, sans être carnivores, vivent cependant des sécrétions de chair vivante, tels que les poux, les puces et les punaises [...] viennent de l'humeur qui sort sur la peau de certains animaux. »

Les punaises étant attirées par la chaleur et le CO₂ dégagés par les organismes à sang chaud, la constatation d'Aristote est surprenante de vérité malgré ses imprécisions, le terme « humeur » faisant ici référence à la Théorie des quatre humeurs de la médecine antique. C'est d'ailleurs cette même médecine qui attribua un éventuel potentiel thérapeutique aux punaises : face à la morsure d'un aspic, serpent venimeux réputé avoir tué Cléopâtre, Pline le Jeune (61-113 après JC) pensait pouvoir sauver la victime du sommeil profond et mortel induit par le venin en appliquant des punaises sur la morsure. Par extension, avalées ou bues avec de l'eau, elles soigneraient aussi l'asthénie. Les premiers écrits européens mentionnant les punaises de lit dateraient du milieu du Moyen Age en Allemagne (figures 1 et 2)



FIGURE 1 : GRAVURE SUR BOIS ; HORTUS SANITATIS (JOHANNES DE CUBA,1485)

peruenit ad etatem . In .li. viij. Circa aut pul-
 lum equinū hoc ultimo animaduertae: qz pas-
 sum suauem vcl durum quem assuecit in iuue-
 tute vix potest dimittere etiam in senectute et
 Superius in ca. liiij. dictum est. quare ibidem
 vide de Equo.



Capitulum. cxviiij
D Alex. Ex li. de na. re. Pulicis vocant
 sunt eo qz in puluere magis nutriunt.
 Pater pulicē esse vermiculū nigrū et
 minutū quidem. sed valde pungitiuū. maxime

FIGURE 2 : GRAVURE SUR BOIS, LES VERMINES DE L'HOMME ; HORTUS SANITATIS (JOHANNES DE CUBA,1485)

Une étude basée sur la linguistique semble indiquer que les punaises de lit ne sont arrivées sur le continent américain que plus tardivement. En effet, si tous les anciens dialectes africains, indo-européens et orientaux comportent un mot pour désigner les punaises de lit, aucun n'a été porté à notre connaissance dans une langue autochtone du Nouveau Monde (1). Certains avancent qu'elles auraient été transportées par les espagnols à la fin du XVIe siècle lors de la colonisation de l'Amérique entamée par le premier voyage transatlantique de Christophe Colomb.

1.1.2 DU MOYEN AGE A NOUS JOURS

Même si depuis Pline le Jeune, la médecine a grandement évolué, Matthioli, médecin et botaniste italien de renom reprendra une partie des formulations du premier dans son ouvrage *Commentarii* de 1554 en y ajoutant d'autres usages plus ou moins surprenants : pour soutenir la fonction urinaire, il recommande d'insérer directement dans l'urètre féminin comme masculin, quelques punaises qui, « marchant par leurs membres naturels, chatouillent et provoquent les conduits de l'urine à s'ouvrir ».

L'utilisation du feu pour le chauffage des habitations a fait de l'homme un hôte encore plus idéal pour la punaise de lit, surtout dans les régions froides et tempérées du globe. La généralisation des cheminées puis des poêles ainsi que les efforts portés sur l'amélioration de l'isolation des maisons au cours des XVIIIe et XIXe siècles furent à l'origine d'une franche augmentation des infestations en Europe, démontrée par Johnson en 1941 (6).

Apparurent alors les premiers « désinsectiseurs » tels Tiffin & Son en Angleterre et John Southall (7). Déjà, la stratégie de lutte contre ces nuisibles s'articule autour de deux axes principaux : la détection précoce et le traitement chimique. Tiffin insistera sur le fait que plus le délai de détection des punaises est long, plus elles ont le temps de se disséminer hors des couchages et ainsi coloniser tout le foyer rendant l'extermination plus difficile et onéreuse. La notion de prévention des infestations est introduite par Southall dans son ouvrage « *Treatise of bugs* » de 1730 qu'il vend accompagné d'une bouteille de sa liqueur secrète et insecticide « Nonpareil ». Il y explicite les éléments à surveiller en cas de changement de maison, de literie, voire même, de servante !

A l'instar de Southall, chaque exterminateur y allait de son propre « produit miracle et secret » aux formulations obscures et plus ou moins toxiques. Certains (« *The complete vermin-killer* » publié en 1777) conseillaient même d'enflammer la poudre à canon préalablement saupoudrée dans les fissures des sommiers (7) !

Les pionniers européens partis pour l'Amérique aspergeaient leurs lits d'un mélange d'eau bouillante, d'arsenic et de soufre. Ils utilisaient aussi du bois de *Sassafras albidum* pour la structure des sommiers, dont l'essence est réputée insectifuge (7). Des extraits de cet arbre sont encore retrouvés dans certaines formulations de produits répulsifs commercialisés actuellement.

Les migrants les plus vigilants éloignaient leur couchage des murs et plongeaient les pieds de leur lit dans de grands récipients d'huile, qui servaient ainsi de piège aux punaises qui tentaient d'y grimper. La poudre de pyrèthre, issue du pyrèthre de Dalmatie (*Chrysanthemum cinerariifolium*) et renfermant la pyrèthrine, substance insecticide attaquant le système

nerveux des punaises, était saupoudrée entre les draps à l'aide de poires à poudre à canon dont l'usage était détourné (1).

Au cours du XIXe siècle, les punaises de lits constituaient un problème majeur dans les endroits pauvres à forte densité de population aux conditions d'hygiène limitées. Quant aux foyers les plus privilégiés qui pouvaient se permettre l'aide d'un personnel de maison, même s'ils n'étaient pas épargnés, ils se sont rendus compte qu'un nettoyage régulier des couchages permettait de contrôler les populations de punaises. On démontait lits et sommiers, passait les lattes à l'eau bouillante. Cet entretien régulier présentait en plus l'avantage de détecter la présence de punaises à des stades précoces de l'infestation, et de pouvoir ainsi agir avec une plus grande efficacité : « le remède de référence reste la propreté, la vigilance et l'inspection régulière des crevasses des planchers, couchages et murs » stipule en 1895 le *rapport de la commission d'agriculture des États unis* (8). Ces principes sont repris dans les nombreux manuels de l'époque destinés à la femme au foyer afin de l'aider à garder une maison propre et saine.

Le début des années 1900 marque la recrudescence des infestations de punaises de lit, grâce notamment à l'essor du chauffage central, qui permettait de maintenir des températures élevées et constantes pour toutes les pièces des maisons : une aubaine pour les punaises de lit qui peuvent désormais se développer toute l'année, et non plus seulement de manière saisonnière.

On estime que durant les années 30 et 40, près du tiers des foyers des grandes villes européennes était contaminé (9) et même les rats étaient atteints. Parfois, l'infestation était si importante que les punaises pouvaient être vues rampant en extérieur, de maison en maison et passant par les portes et fenêtres, traversant les murs et les gouttières (10).

Pendant la Première Guerre Mondiale, elles se sont mises à coloniser les abris anti-bombardement, transportées dans les valises des personnes s'y réfugiant. Elles se retrouvaient également au front et jusque dans les casques recouverts de toile des soldats, qui souffraient de piqûres sur le front et dans la nuque (10).

Les punaises ont toujours constitué une véritable plaie pour les militaires, et la Seconde Guerre Mondiale n'y fait pas défaut. Communes sur terre comme en mer, dans les navires de guerre et les sous-marins, elles ne leur laissaient aucun répit. Harassés par les piqûres, les soldats américains étaient invités par leurs supérieurs à la plus grande vigilance durant la nuit dans leurs campements (figure 3). Les baraquements étaient alors traités par fumigation au cyanure d'hydrogène, gaz extrêmement toxique pour les punaises mais aussi pour l'homme générant ainsi de nombreuses contraintes. Il fut rapidement remplacé par le DDT (ou dichlorodiphényltrichloroéthane) aux puissantes propriétés insecticides découvertes par Paul Muller (et qui lui valurent le Prix Nobel de physiologie en 1948), prétendument moins dangereux pour l'homme, ce qui permit un usage massif. Usage d'autant plus massif qu'il permettait de lutter contre bien d'autres nuisibles, comme les moustiques, vecteurs de la malaria, les puces et les poux, vecteurs du typhus, qui décimèrent les troupes sur les fronts de l'est de la Première Guerre. Il était vaporisé directement sur la literie et les vêtements des soldats (figure 4).

Le DDT fut ensuite largement diffusé dans le monde civil et agricole. Il était commercialisé sous la forme d'un liquide ou d'une poudre à appliquer sur les endroits où passent les insectes.

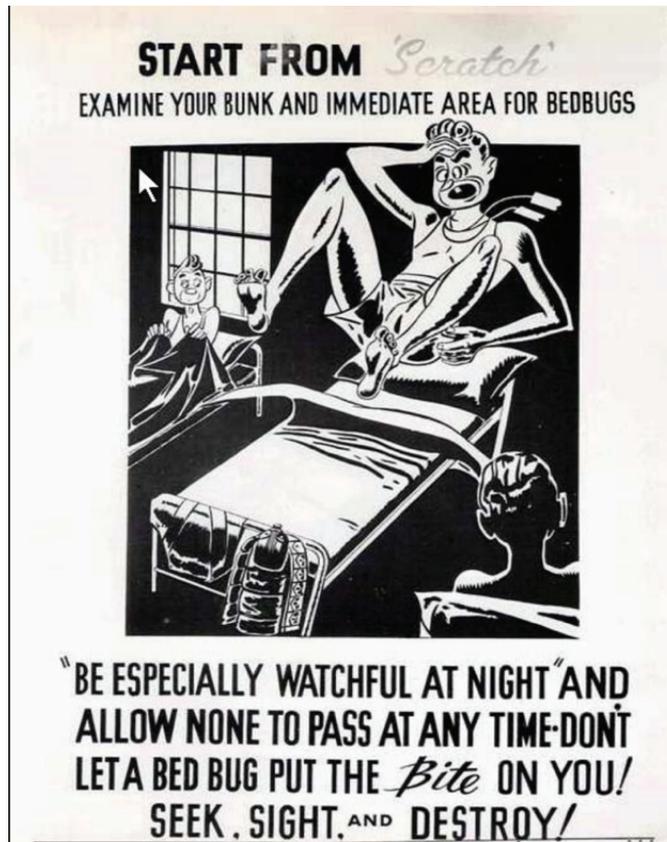


FIGURE : 3 AFFICHE DE LA SECONDE GUERRE MONDIALE INCITANT LES SOLDATS A EXAMINER MINUTIEUSEMENT LEUR COUCHETTE ET LEUR ENTOURAGE IMMEDIAT A LA RECHERCHE DE PUNAISES DE LITS (POTTER, THE HISTORY OF BED BUGS MANAGEMENT, 2011)(7)



FIGURE 4 : SPRAY DE DDT APPLIQUE SUR LES VETEMENTS D'UN SOLDAT AMERICAIN LORS DE LA SECONDE GUERRE MONDIALE (PUBLIC HEALTH IMAGE LIBRARY)

Très largement utilisé dans le monde, il a même été inclus dans le programme d'éradication du paludisme de l'OMS de 1955. Mais des voix se lèvent mettant en doute sa prétendue innocuité pour l'homme et l'environnement. Rachel Carson, biologiste américaine publie en 1962 le pamphlet *Printemps Silencieux* où elle remet en question l'hégémonie du DDT et pointe du doigt ses effets néfastes sur l'environnement de nombreuses espèces d'oiseaux, ainsi que l'apparition de résistances aux organochlorés chez les punaises de lit (11).

Sa forte rémanence environnementale et son accumulation dans les tissus graisseux faillit causer la disparition, par exemple, du faucon pèlerin du territoire des États-Unis dans les années 50-60 (12). Les premiers pays à bannir le DDT seront la Suède et la Norvège en 1970. Il faudra attendre 1972 pour qu'il soit interdit d'emploi sur le sol américain (mais pas d'exportation) et 1984 pour le Royaume Uni !

La lutte chimique s'est alors tournée vers les organophosphorés (comme le malathion) présentant moins de résistances mais une toxicité toujours présente (13). Aujourd'hui, les programmes de gestion des infestations tendent à minimiser l'importance de la lutte chimique au profit de méthodes moins toxiques et polluantes comme les procédés physiques (traitements thermiques) et mécaniques (aspiration), au sein d'une « lutte intégrée ».



FIGURE 5 : "WAR ON BED BUGS". MISE EN SCENE D'UNE TROUPE AMERICAINE, 1938 (DOGGETT ET AL. ADVANCES IN THE BIOLOGY AND MANAGEMENT OF MODERN BED BUGS, 2018)(14)

2 ENTOMOLOGIE DES PUNAISES DE LIT

2.1 GENERALITES

« Punaise de lit » est un terme ambigu utilisé en français pour désigner plusieurs taxons différents du genre *Cimex* dont *Cimex lectularius* (figure 6) et *Cimex hemipterus*, qui parasitent l'Homme. Le nom de « punaise » est lui aussi ambigu puisqu'il regroupe 90 familles et 42.000 espèces du sous-ordre des hétéroptères (15) ; il ne faut donc pas confondre les punaises de lit avec les autres « punaises » comme la punaise verte (*Palomena prasina*) ou la punaise verte ponctuée puante (*Nezara viridula*)(figure 7), probablement les punaises les plus connues car bien présentes dans nos champs et jardins ou elles peuvent causer de sérieux dégâts (16). En effet, ces espèces appartiennent à une famille (Pentatomidae) et des genres différents.



FIGURE 6 : UNE PUNAISE DE LIT, *CIMEX LECTULARIUS*. (NASKRECKI P, HARVARD UNIVERSITY, 2007)(14)



FIGURE 7 : *NEZARA VIRIDULA* OU PUNAISE PUANTE (HECTONICHUS, 2012)

2.2 CLASSIFICATION BIOLOGIQUE DE *CIMEX LECTULARIUS* ET *C. HEMIPTERUS*

D'un point de vue systématique, *Cimex lectularius* et *Cimex hemipterus* appartiennent à :

- L'embranchement des **Arthropodes**, dont le plan d'organisation est caractérisé par un corps articulé constitué de segments, les métamères, et protégé par une carapace rigide qui forme leur exosquelette ;
- Le sous embranchement des **Hexapodes**, caractérisé par la présence de trois paires de pattes ;
- La classe des **Insectes**, qui présentent un corps en 3 parties constitué d'une tête, d'un thorax, d'un abdomen et possèdent des pièces buccales externes ;
- L'ordre des **Hémiptères**, dont les pièces buccales externes sont transformées en rostre piqueur-suceur, réservé à une alimentation exclusivement liquide (sang, lymphe, sève...);
- Le sous ordre des **Hétéroptères**, ou **punaises**, caractérisés par une première paire d'ailes (antérieures) transformée en hémélytres, c'est-à-dire partiellement cornées à leur base ; la seconde paire est membraneuse. A noter que les punaises de lit n'ont pas d'ailes mais des vestiges rudimentaires de ces structures. (17) Les hétéroptères présentent des glandes odorifères. Leur développement post-embryonnaire comporte, le plus souvent, cinq stades (18) ; Ce sous-ordre est très surveillé par le corps médical puisqu'il comprend aussi la sous-famille des Triatominae qui intègre plus d'une centaine d'espèces potentiellement vectrices de *Trypanosoma cruzi*, protozoaire responsable de la maladie de Chagas (19) qui tue plus de 10.000 personnes par an ! (20)
- La super-famille des **Cimicoïdés**, qui pratiquent l'insémination extragénitale traumatique ;
- La famille des **Cimicidés**, ectoparasites temporaires hématophages de petite taille, inféodés aux animaux à sang chaud. La famille des Cimicidés est divisée en 6 sous-familles et compte 94 espèces (tableau 1) ;
- Le genre ***Cimex***.

Les oiseaux et les chauves-souris sont des hôtes primaires de plusieurs espèces de Cimicidés, comme *Cimex columbarius* (la punaise des pigeons), *C. pipistrelli* (la punaise des chauves-souris), *Oeciacus hirundinis* (la punaise des hirondelles ou punaise Martin) *Cimex dissimilis* et aussi *C. lectularius*. Mais l'homme peut aussi occasionnellement servir d'hôte à ces mêmes espèces et en subir les piqûres (voir partie « comparaison avec les autres punaises »).

TABLEAU 1 SOUS FAMILLES ET GENRES DES CIMICIDES (CENTRE NATIONALE D'EXPERTISE SUR LES VECTEURS. LES PUNAISES DE LIT *CIMEX LECTULARIUS* ET *CIMEX HEMIPTERUS* - BIOLOGIE, LUTTE ET SANTE PUBLIQUE, 2EME EDITION, 2015)

Sous familles	Genres	Nombre d'espèces	Hotes principaux	Répartition
AFROCIMICINAE	<i>Afrocimex</i>	3	Chauves-souris	Afrique
LATROCIMICINAE	<i>Latrocimex</i>	1	Chauves-souris	Néotropicale
PRIMICIMICINAE	<i>Bucimex</i> <i>Primicimex</i>	2	Chauves-souris	Néotropicale, États-Unis
CIMICINAE	<i>Bertilia</i> <i>Cimex</i> <i>Oeciacus</i> <i>Propicimex</i>	39	Chauves-souris Oiseaux Homme	Mondiale
CACODMINAE	<i>Cacodmus</i> <i>Crassicimex</i> <i>Loxaspis</i> <i>Passicimex</i> <i>Stricticimex</i>	39	Chauves-souris	Afrique Asie
HAEMATOSIPHONINAE	<i>Caminicimex</i> <i>Cimexopsis</i> <i>Hesperocimex</i> <i>Psitticimex</i> <i>Synxenoderus</i>	10	Oiseaux	Néarctique Néotropicale

2.3 MORPHOLOGIE DES PUNAISES ADULTES

2.3.1 GENERALITES MORPHOLOGIQUES DES ADULTES

La punaise de lit est un insecte qui mesure de 2 à 6 millimètres de long. Son corps, a une forme ovalaire ou arrondie semblable à un pépin de pomme, aplatie dorso-ventralement lorsque la punaise est à jeun. Il présente une couleur allant du jaune fauve au brun (figure 8). Il se met à gonfler et s'allonger alors que la punaise prend un repas sanguin (qui peut représenter jusqu'à 4 fois son poids de corps (21)), et prend une coloration rougeâtre (sang fraîchement prélevé) puis brun-noir (sang digéré) (22). Le dimorphisme sexuel est peu marqué, les mâles ont tendance à être plus petits que les femelles, et n'ont que de légères différences structurales, liées à leur appareil reproducteur (17).

Le corps est en trois parties, composé d'une tête, d'un thorax et d'un abdomen. Son enveloppe externe est appelée cuticule. Composée essentiellement de chitine, un polysaccharide azoté, associée à des protéines tannées, elle forme l'exosquelette rigide des punaises de lit comme de tous les arthropodes. La cuticule possède de nombreux rôles : elle exerce un effet protecteur (telle une « armure »), permet la locomotion via la rigidité des pattes et l'insertion des muscles sur des structures spécifiques (les apodèmes), assure le maintien de la béance des voies respiratoires (ouverture des stigmates), réduit la déperdition en eau grâce à une couche cireuse et sert au captage des informations environnementales (insertion des sensilles) (23). La rigidité de cette cuticule confère à la croissance des punaises de lit un caractère discontinu : elles abandonnent périodiquement leur exosquelette devenu trop petit (l'exuvie) pour s'en fabriquer un plus grand, c'est le phénomène de mue. (24)



FIGURE 8 : *CIMEX LECTULARIUS* ADULTE (M. MULLER, 2015)

2.3.2 TETE

Constituant la partie antérieure du corps, la tête (figure 9) est carrée, courte et trapue. Elle porte sur sa face ventrale l'appareil buccal dont un rostre tri-articulé en trois articles : dressé verticalement et perpendiculairement à son corps pendant la phase d'alimentation, il se replie à l'horizontal du côté ventral en dehors des repas grâce à la souplesse de l'article basilaire en grande partie membraneux. Ce rostre est composé d'un labium articulé en gouttière contenant une paire de stylets mandibulaires qui entaillent la peau de l'hôte et une paire de stylets maxillaires qui pénètrent cette entaille.



FIGURE 9 : TETE DE *CIMEX LECTULARIUS*, VUE DE DESSOUS EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE. (©NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES)

Les yeux, latéraux, saillant et sessiles, sont composés d'ommatidies peu nombreuses et assez grosses par rapport à d'autres hétéroptères. Les deux antennes comportent 4 articles et sont entièrement pubescentes. Elles portent les nombreux organes sensoriels externes (les sensilles) qui permettent aux punaises de communiquer entre elles, de détecter leur hôte et de se repérer dans l'espace.

2.3.3 THORAX

Il se compose de trois segments, d'avant en arrière (figure 10) : le prothorax, le mésothorax et le métathorax. La tête s'insère sur le prothorax, l'abdomen sur le métathorax. Le prothorax, aux bords plus larges que les deux autres parties, est échancré vers l'avant et avance vers les yeux comme deux cornes arrondies, formant une structure typique en « col de Médicis » (25), plus large chez *C. lectularius* que chez *C. hemipterus*. Il est lui aussi recouvert de fins poils. Le mésothorax, beaucoup plus étroit formant comme un corset, est en forme de triangle pointant vers l'arrière. Enfin, le métathorax arbore une forme de croissant concave vers l'avant. Chacun de ces segments thoraciques possède sur sa face ventrale une paire de pattes articulées en 5 articles : la hanche (coxa), le trochanter, le fémur, le tibia puis le tarse, portant deux griffes qui permettent aux punaises de s'accrocher et se déplacer sur les corps de leurs hôtes. Enfin, le thorax porte les ailes vestigiales, au profil trapézoïdal arrondi et couvertes des mêmes poils que le prothorax.

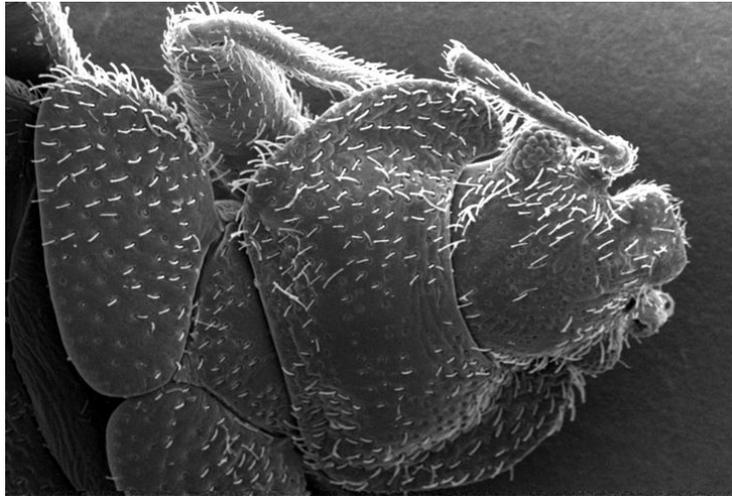


FIGURE : 10 THORAX DE *CIMEX LECTULARIUS*, VU DE DESSUS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE (JANICE HANEY CARR, 2016)

2.3.4 ABDOMEN

Comme chez tous les cimicidés, l'abdomen est la plus volumineuse partie du corps des punaises de lit. Il se décompose en 11 segments dont l'élasticité induite par une zone non sclérifiée sur la face ventrale des segments II à VI lui permet de se déformer et se distendre pendant la phase de succion. Les deux derniers segments (X et XI) sont invaginés l'un dans l'autre et forment le tube anal. Chez les mâles l'abdomen se termine par une pointe saillante, constituée par l'appareil génital supportant un pénis en spicule replié ventralement vers la gauche. Chez les femelles, l'extrémité distale de l'abdomen est plus arrondie et le 4^e segment présente ventralement une échancrure correspondant à l'ectospermalège, destinée à recevoir et guider le pénis du mâle lors de l'insémination traumatique de la copulation (26).

2.3.5 COMPARAISON AVEC D'AUTRES PUNAISES DE LA FAMILLE DES CIMICIDES

Nous l'avons vu, *C. lectularius* et *C. hemipterus* sont les deux espèces inféodées à l'homme. Mais d'autres espèces peuvent aussi occasionnellement piquer l'homme surtout si leur hôte principal vient à manquer. C'est le cas de *Cimex columbarius* (punaise des pigeons), *C. pipistrelli* (punaise des chauves-souris) et *Oeciacus hirundinis* (punaise des hirondelles).

2.3.5.1 *CIMEX HEMIPTERUS*, L'AUTRE PUNAISE DE LIT

Contrairement à *C. lectularius* qui tend à se retrouver partout dans le monde, *C. hemipterus* était jusqu'alors considérée comme une espèce purement tropicale. Une récente observation a cependant été faite en France en 2015 et 2017 à Marseille où au moins deux cas d'infestations ont été recensés (27).

Par rapport à *C. lectularius*, on peut noter chez *C. hemipterus* des marges de prothorax moins larges et remontant moins vers les yeux, une coloration du corps sauf des pattes plus foncée ainsi que des soies plus denses, longues et robustes (28) (figure 11).

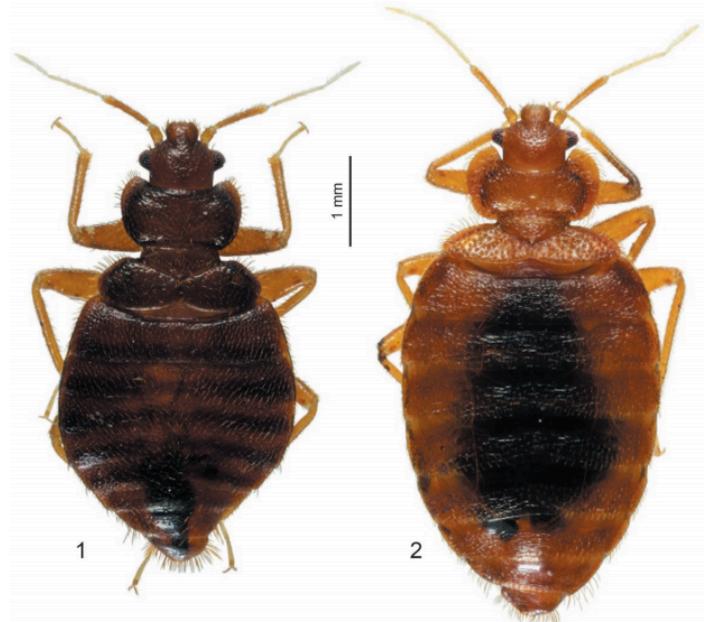


FIGURE 11 INDIVIDUS MALES DES DEUX PRINCIPALES ESPECES INFEODEES A L'HOMME; 1: *CIMEX HEMIPTERUS*; 2: *CIMEX LECTULARIUS*. (BERENGER J-M, PLUOT-SIGWALT D. PRESENCE EN FRANCE DE LA PUNAISE DE LIT TROPICALE. BULL SOC ENT FR. 2017)(27)

2.3.5.2 PUNAISES DES OISEAUX, *CIMEX COLUMBARIUS* ET *OECIACUS HIRUNDINIS*

***Cimex columbarius* Jenyns, 1839**

Espèce européenne morphologiquement très proche de *C. lectularius*, *C. columbarius* se nourrit essentiellement sur les pigeons. Cette espèce est cependant sensiblement plus petite que *C. lectularius* et possède un troisième segment d'antenne lui aussi plus petit proportionnellement aux autres (28). Certains auteurs la considèrent même comme une sous-espèce de *C. lectularius* qui se serait adaptée aux pigeons après leur domestication (29).

***Oeciacus hirundinis* Jenyns, 1839**

Le genre *Oeciacus* regroupe des ectoparasites d'oiseaux qui vivent dans les nids de ces derniers. Pfeiffer en 1931 observa que les punaises du genre *Oeciacus* pouvaient survivre tout l'hiver dans les nids abandonnés des hirondelles des fenêtres (*Delichon urbicum*), ces dernières migrant en Afrique sub-saharienne dès l'automne. C'est probablement dans ces conditions de disette qu'elles sont capables de quitter leur nid pour entrer dans les maisons adjacentes et se comporter temporairement en parasite de l'homme (1). Il est par ailleurs intéressant de noter que malgré l'adaptation parfaite de cette espèce aux oiseaux, elle ne semble pas capable de s'y accrocher sur de longues distances. En effet, Usinger ne trouva aucun spécimen dans les nids des zones de destination des migrations (1).

Semblable aux punaises de lit, *O. hirundinis* est plus petite et pubescente. Les bords latéraux du prothorax formant les deux « cornes » du col de Médicis sont également moins proéminents. Leur pique est réputée plus douloureuse que celle des autres espèces (1).

2.3.5.3 PUNAISE DES CHAUVES-SOURIS, *CIMEX PIPISTRELLI*

***Cimex pipistrelli* Jenyns, 1839**

Bien que cette espèce de punaises européennes soit aussi capable de piquer l'Homme (29), elle n'est pas bien adaptée pour se nourrir correctement sur lui et peu de cas de piqûres ont été rapportés (29). Macroscopiquement, les punaises de chauve-souris semblent identiques aux punaises de lit, mais ont de plus longues soies sur tout leur corps, en particulier sur les marges du prothorax (28).

2.3.6 CONFUSIONS AVEC D'AUTRES ARTHROPODES

D'autres insectes fréquemment rencontrés dans nos habitations pourraient être confondus avec les punaises de lit, qu'elles soient au stade adulte ou larvaire. Lors du constat d'infestation, il est important de ne pas faire de détermination erronée car elle pourrait conduire à un traitement inapproprié.

2.3.6.1 LARVE DE BLATTE GERMANIQUE *BLATTELLA GERMANICA* LINNÉE 1767

La blatte germanique est bien plus grande et rapide, mais leurs petites larves (figure 12) pourraient être confondues avec les punaises de lit. Leurs antennes aux multiples articles, sont bien plus longues que leur corps et leur vitesse de déplacement accrue permettra cependant de facilement les distinguer. Elles ne piquent pas l'Homme.



FIGURE 12 : LARVE DE *BLATTELLA GERMANICA*, VUE DORSALE (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, 2017)

2.3.6.2 PSOQUE OU POUX DES LIVRES, *LIPOSCELIS CORRODENS* HEYMONS, 1909

Les psoques (figure 13) sont de petits insectes discrets particulièrement difficiles à voir du fait de leur coloration cuticulaire terne et leur petite taille. La présence de psoques dans les bâtiments est très commune, particulièrement aux endroits un peu humides. Ils se nourrissent de substances végétales et occasionnent ainsi de gros dégâts dans les bibliothèques. Ils pourraient être confondus avec des larves de punaise de lit, mais s'en distinguent bien par leurs longues et fines antennes en 15 articles, et par la relativement grande taille de leur tête par rapport au corps. Ils ne piquent pas l'Homme.

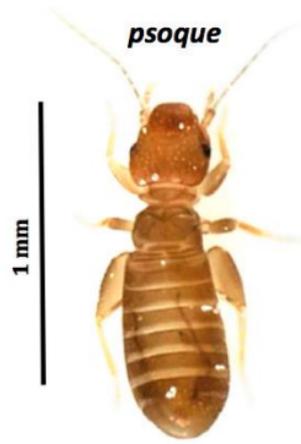


FIGURE 13 : *LIPOSCELIS CORRODENS* ADULTE, VUE DORSALE (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, 2017)

2.3.6.3 LES PTINES

Les ptines (figure 14) représentent une sous-famille de petits coléoptères aux longues antennes et sont de taille similaire aux premiers stades larvaires des punaises de lit dépassant rarement les 3mm. Certains ont même un abdomen rouge brillant, ce qui leur donne l'apparence d'être plein de sang. Ils s'attaquent principalement aux denrées alimentaires stockées telles que les épices ou la farine mais ils ne piquent pas les humains. Encore une fois, les longues antennes présentant de nombreux articles suffisent à les distinguer. Ils ne piquent pas l'Homme.



FIGURE 14 : *PTINUS FUR* (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, 2017)

2.3.6.4 LES PUNAISES ANTHOCORIDES, SOUS-ORDRE DES HETEROPTERES

Les punaises anthocorides, comme *Cardiastethus fasciventris* (figure 15) sont des prédateurs de pucerons et se trouvent naturellement le plus souvent dans les jardins. Bien que très rarement dans les habitations, elles sont signalées à cause de leur ressemblance avec les punaises de lit et de leur capacité de piquer rarement mais douloureusement les humains.



FIGURE 15 : *CARDIASTETHUS FASCIIVENTRIS* (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, 2017)

2.3.6.5 POUX DE TÊTE, *PEDICULUS HUMANUS LINNAEUS, 1758*

Les poux de tête (figure 16) sont des ectoparasites permanents hématophages, pouvant être de taille similaire à un premier stade larvaire de punaise de lit, mais leur corps est beaucoup plus allongé et ils sont comparativement beaucoup plus lents. Même s'ils sont rarement trouvés ailleurs que dans la chevelure humaine, ils peuvent en être délogés par grattage ou brossage et ainsi se trouver dans le lit.

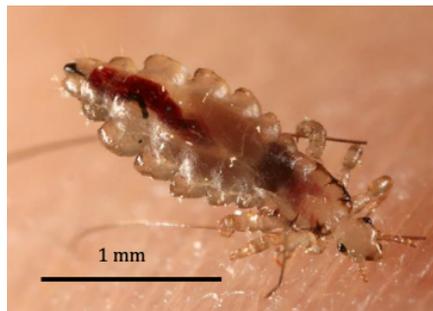


FIGURE 16 : *PEDICULUS HUMANUS* VUE DORSALE (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, 2017)

2.3.6.6 PUCES

Les puces (figure 17) sont d'apparence très différente des punaises de lit et se déplacent en sautant plutôt qu'en rampant. Cependant, elles piquent et leurs piqûres ne peuvent être facilement distinguées de celles des punaises de lit. Elles ont tendance à piquer les pieds et les chevilles bien qu'elles puissent piquer n'importe où ailleurs. Elles peuvent transmettre à l'Homme différents parasites dont occasionnellement le cestode du ténia *Dipylidium caninum*. Historiquement, elles ont été les vecteurs à l'origine des épidémies de peste.



FIGURE 17 : PUCE DU CHIEN *CTENOCEPHALIDES CANIS* (LUIS FERNANDEZ GARCIA, 2007)

2.3.6.7 TIQUES DURES

Les tiques (figure 18) appartiennent à l'ordre des acariens et ont de ce fait quatre paires de pattes, contre trois pour les punaises de lit, ce qui permet une distinction aisée. De plus, contrairement aux punaises de lit qui quittent rapidement leur hôte, les tiques restent attachées à l'hôte pendant un à trois jours. Elles sont actuellement les principaux vecteurs de la borréliose de Lyme.



FIGURE 18 : *IXODES RICINUS* (JORN GABRIELSEN, 2010)

2.4 ORGANISATION ET ANATOMIE DES PUNAISES DE LIT

2.4.1 CAVITE GENERALE OU HEMOCELE

La cavité générale des punaises de lit et plus généralement des arthropodes s'appelle l'hémocœle, et renferme l'hémolymphe. C'est un liquide qui baigne les muscles et les viscères (30). Les muscles, ancrés à la cuticule par l'intermédiaire d'invaginations tégumentaires appelées apodèmes, permettent la mobilisation des différents segments du corps des punaises de lit et des appendices.

2.4.2 SYSTEME CIRCULATOIRE

Le système circulatoire des punaises de lit est un système ouvert : le cœur est un long tubule contractile sous la face dorsale, percé de paires d'orifices appelés ostioles qui permettent à l'hémolymphe de pénétrer dans le cœur où elle est propulsée d'arrière en avant (1). L'hémolymphe est un liquide incolore sans pigment respiratoire, le transport des gaz se faisant par le système trachéal que nous aborderons dans la partie suivante.

Il possède en outre de nombreux rôles comme l'apport de nutriments aux organes, le maintien de la turgescence des organes mous, le transport d'hormones ou la régulation du pH et de la concentration en ions (via les tubes de Malpighi) (31). Il s'étend de la partie postérieure de l'abdomen au ganglion cérébral qui correspond au cerveau de la punaise de lit (32).

2.4.3 SYSTEME RESPIRATOIRE

La cuticule, rigide et cireuse, réduit énormément les échanges gazeux. Les punaises de lit sont donc munies d'organes spécialisés, les trachées, pour assurer les transports et échanges gazeux. Ce sont, à l'instar des apodèmes, des invaginations de la cuticule, mais de forme tubulaire. Elles communiquent avec le milieu extérieur au niveau des stigmates, et s'ouvrent dans deux troncs trachéens bilatéraux qui longent l'axe du corps qui se ramifient en de nombreuses branches jusqu'aux organes, les trachéoles (30) (figure 20). On dénombre deux paires de stigmates au niveau thoracique et sept paires au niveau abdominal (1).

2.4.4 SYSTEME DIGESTIF

Au niveau de la tête, le canal alimentaire des stylets mandibulaires et maxillaires se connecte à la pompe cibariale qui permet d'aspirer le sang de l'hôte et le canal salivaire se connecte aux glandes salivaires situées dans le thorax (figure 19). Une pompe salivaire permet à la salive, riche en protéines anticoagulantes et antiagrégantes plaquettaires, d'être propulsée jusqu'à l'extrémité du rostre dans les tissus cutanés de l'hôte. Grâce à l'action de muscles latéraux et dorsaux, la pompe cibariale se met en action et le sang de l'hôte se met à circuler dans le canal alimentaire puis l'œsophage jusqu'à un premier ventricule large et bulbeux qui fait office d'estomac. Il se rétrécit ensuite subitement pour s'élargir de nouveau sur un second ventricule puis un troisième, avant de se terminer au niveau du rectum (figure 20). Notons qu'à la jonction du troisième ventricule et du rectum, s'abouchent les tubes de Malpighi, qui

excrèteront ainsi l'urine par voie rectale. Ces tubes seront abordés dans le paragraphe sur le système excréteur.

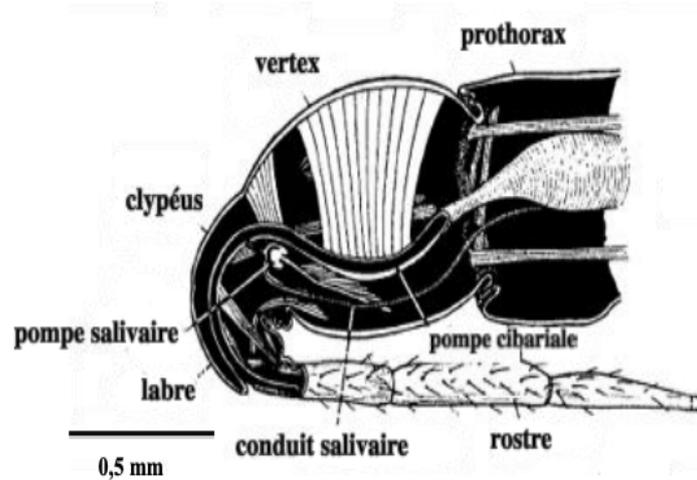


FIGURE 19 : SCHEMA DE L'ANATOMIE INTERNE DE LA TÊTE DE *C. LECTULARIUS*, VUE DE PROFIL (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

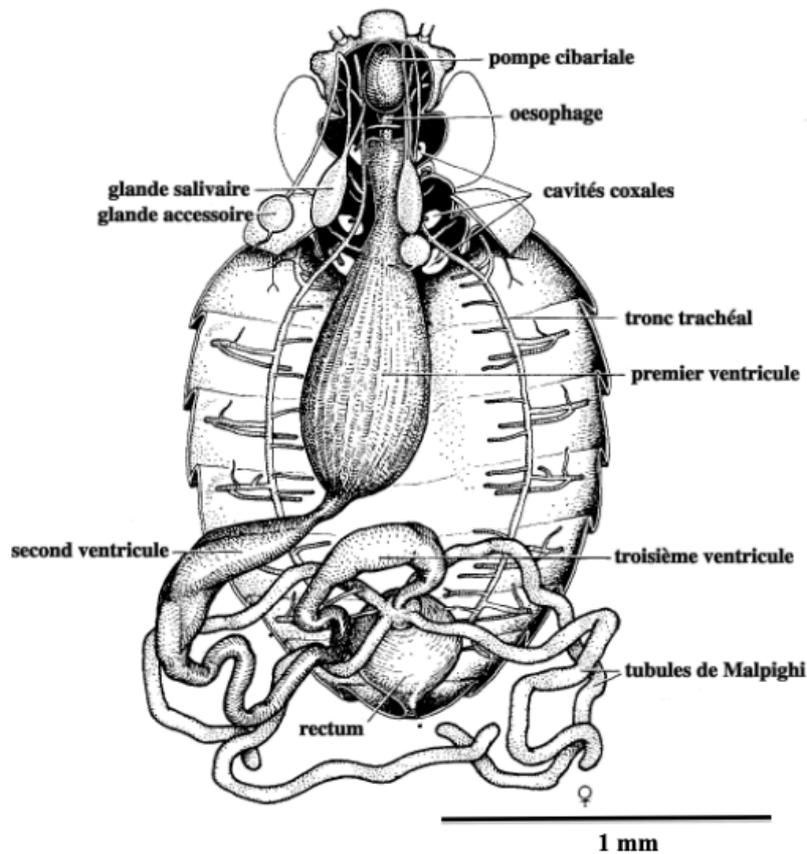


FIGURE 20 : ANATOMIE D'UNE FEMELLE REPRESENTANT LE SYSTEME TRACHEAL ET DIGESTIF (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

2.4.5 SYSTEME NERVEUX

Les punaises de lit n'ont pas de « véritable » cerveau unique mais plutôt une série de cerveaux ou ganglions. Ces différents ganglions sont reliés à une chaîne nerveuse qui descend tout le long du corps en position ventrale (la punaise est dite hyponeurienne) (figure 21). Le ganglion cérébral, bilobé, se situe dans la tête juste au-dessus de la pompe cibariale, légèrement derrière les yeux. Le ganglion sous-œsophagien est situé en dessous et contrôle les pièces

buccales. Au niveau du métathorax se trouve une masse ganglionnaire résultant de la fusion des ganglions thoraciques et abdominaux, d'où partent la plupart des fibres nerveuses innervant les autres organes (32). Les ganglions contrôlent les membres et viscères mais également les organes sensoriels répartis sur le corps.

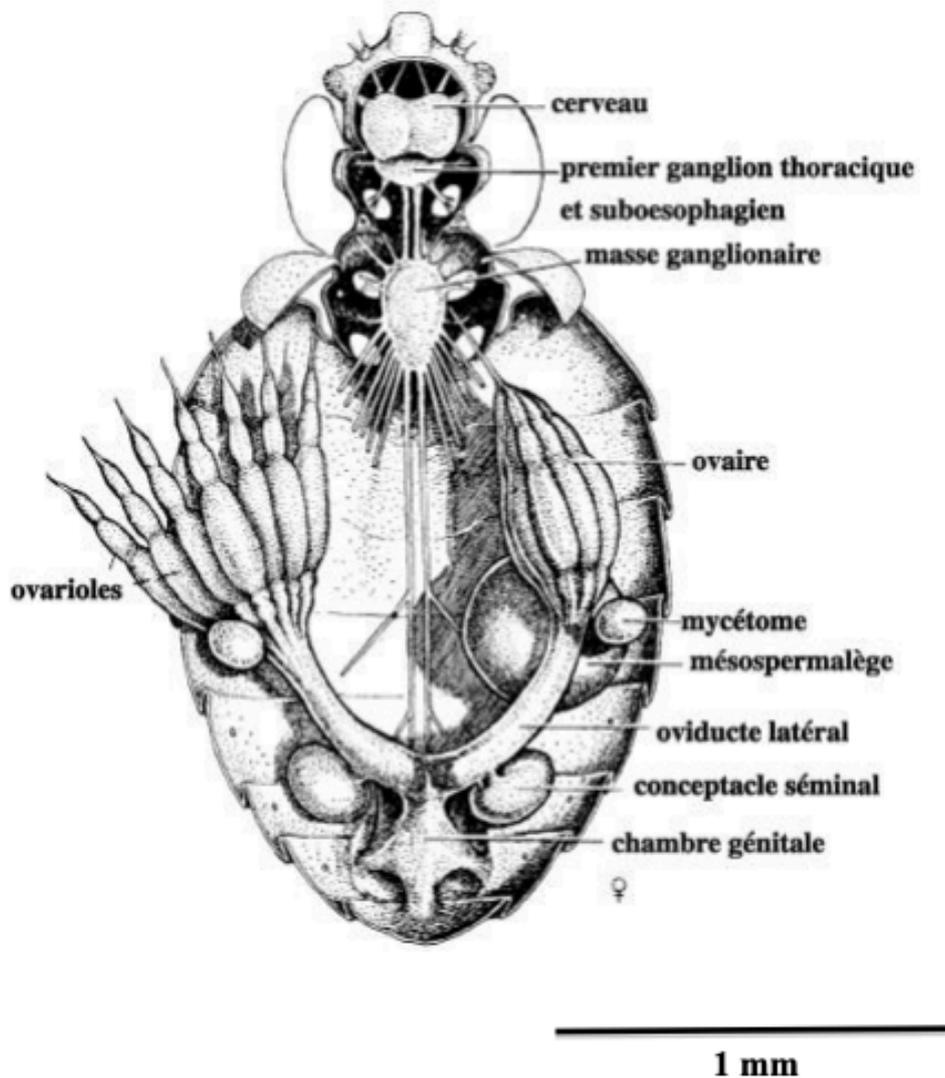


FIGURE 21 : SYSTEME NERVEUX ET ORGANES GENITAUX D'UNE FEMELLE DE *C. LECTULARIUS* (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

2.4.6 GLANDES ODORIFERES

Au niveau métathoracique on retrouve les glandes odorifères (figure 22) qui sécrètent des phéromones, substances chimiques odorantes pouvant agir à grande distance à faible dose. Elles sont un moyen de communication entre les individus (32). Ce système sécrétoire exocrine se compose d'une paire de glandes latérales et d'un réservoir central aux extrémités duquel se branchent les deux glandes, quasiment à l'endroit où le réservoir débouche sur l'extérieur par les gouttières odorifères. Ces gouttières sont entourées d'une zone d'évaporation à la surface ridée caractéristique (32) permettant d'augmenter la surface de contact avec le milieu extérieur.

2.4.7 SYSTEME REPRODUCTEUR

Chez le mâle (figure 22), il est composé des deux testicules, qui présentent sept follicules, où sont élaborés les spermatozoïdes. Chaque testicule est prolongé par un canal déférent qui s'élargit pour donner une vésicule séminale secondée par une glande annexe, au profil filiforme et ramifié, pourvue d'un réservoir qui emmagasine le sperme avant qu'il ne soit propulsé par la pompe du bulbe éjaculateur lors de l'accouplement (32). Cette glande annexe, appelée mésadénie, sécrète le fluide mésadénial qui aura pour rôle d'activer la motilité des spermatozoïdes (33). Le pénis termine l'appareil reproducteur mâle. Il est constitué d'un paramère, organe perforant d'intromission du mâle dans la femelle lors de l'accouplement en forme de spicule. En position de repos, le paramère, articulé à la base, est rabattu sur la gauche dans une sorte de sillon.

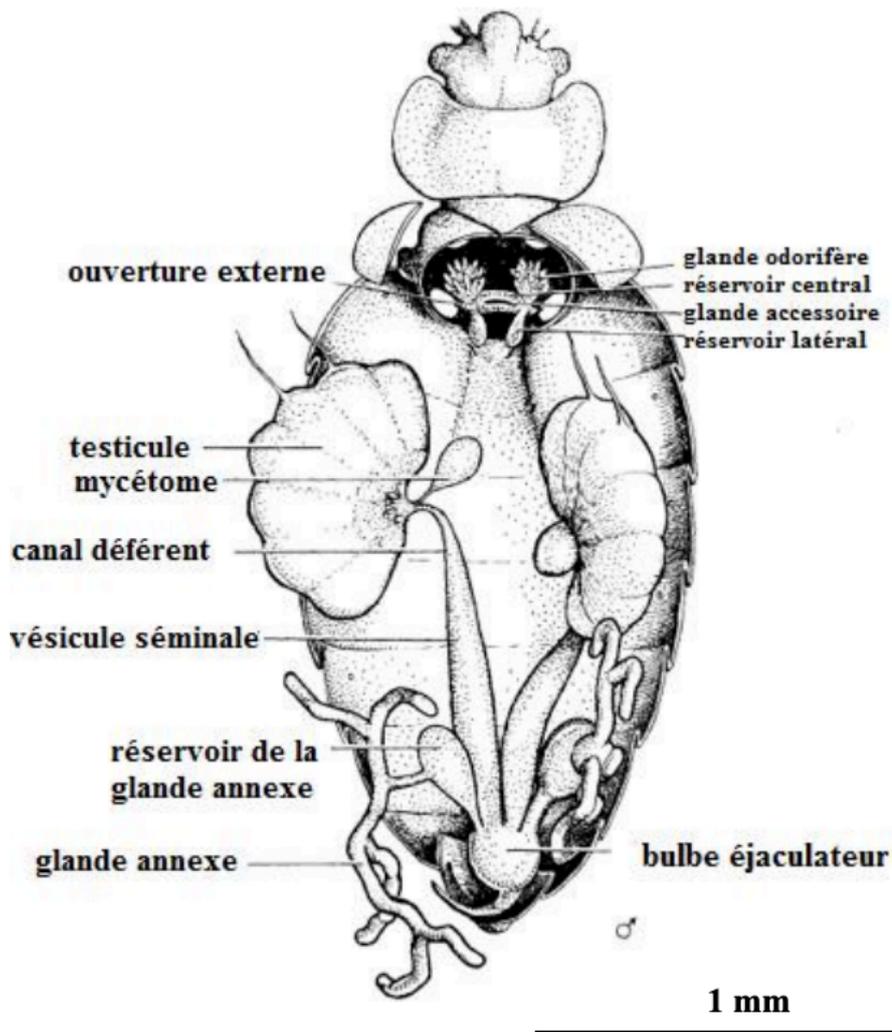


FIGURE 22 : ANATOMIE INTERNE D'UN MALE DE *CIMEX LECTULARIUS* METTANT EN EVIDENCE LES ORGANES GENITAUX (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

La femelle possède deux ovaires, chacun constitué de sept ovarioles dans lesquelles les ovocytes se développent (figure 21). Les ovarioles sont reliées par un fin pédicelle à un oviducte, qui mènera les ovules émis jusqu'à une large chambre génitale, qui joue le rôle d'utérus. Sur l'oviducte, en partie distale à proximité de la chambre génitale, se trouve le conceptacle séminal (32). En vue dorsale, se trouve latéralement sur la droite sous l'ovaire le mésospermalège, structure du système paragénital de la femelle en regard de

l'ectospermalège, destiné à recevoir et à drainer le sperme du mâle après l'accouplement, jusqu'au conceptacle séminal, zone de concentration et de stockage des spermatozoïdes (34). Le stockage par concentration du sperme semblerait permettre une meilleure viabilité et une plus longue conservation des spermatozoïdes, en l'exposant moins au métabolisme de la femelle (35). Enfin, des mécanismes antioxydants seraient aussi mis en œuvre par ces dernières dans la protection de la longévité du sperme : en réduisant les concentrations en flavoprotéines, une classe de transporteurs d'électrons, source d'espèces réactives de l'oxygène ou ROS toxiques pour les structures du vivant, elles préserveraient leur viabilité (35).

2.4.8 SYSTEME EXCRETEUR

Les punaises de lits sont pourvues de Tubes de Malpighi, des organes qui jouent un rôle que l'on peut comparer à celui des reins des vertébrés (figure 20). Ce sont des expansions filiformes du tube digestif débouchant au niveau de la jonction entre le troisième ventricule et le rectum, et sont aveugles à l'autre extrémité. Ils régulent la quantité d'eau et d'ions présents dans le corps et assurent l'excrétion des déchets en produisant l'urine (31). Dans la partie distale des tubes se trouvent des pompes ioniques actives qui assurent le transport d'ions à travers la paroi, d'une zone externe peu concentrée vers une zone interne très concentrée. Cela permet d'augmenter la pression osmotique qui va induire un mouvement d'eau de l'extérieur vers l'intérieur du tube conduisant à la formation d'urine (31).

2.4.9 LES MYCETOMES

Les mycétomes sont des organes renfermant des microorganismes symbiotiques indispensables au développement des punaises de lit. Chez le mâle, on en retrouve un de chaque côté attaché à la base du canal déférent (figure 22). Chez la femelle (figure 21) ils se situent dans la même région anatomique mais ne sont rattachés ni aux ovaires, ni aux oviductes. Ils mesurent environ 0,5 millimètre de long sur 0,3mm de large, présentent une forme ovale (32) et sont un peu plus gros chez les mâles pour une raison inconnue (33). Les espèces de bactéries identifiées appartiennent au genre *Wolbachia* qui s'y trouvent dans une proportion jusqu'à 900.000 fois plus importante que dans les autres organes des punaises; elles fournissent à la punaise des vitamines du groupe B indispensables à son développement et à sa procréation (36). Les *Wolbachia* possèdent d'ailleurs les gènes nécessaires à la synthèse de biotine ou vitamine B8 (37). Les punaises dont on a supprimé les populations de *Wolbachia* souffrent d'un retard de développement des œufs et des stades larvaires, pouvant entraîner des problèmes de fécondité voire une stérilité, réversibles si on supplémente ces punaises de lit en vitamines B (36). Autrement dit, se débarrasser du microbiote des punaises semblerait revenir à se débarrasser des punaises elles-mêmes, et constitue une potentielle piste de traitement à envisager pour l'avenir (38).

Une gamma protéobactérie, identifiée sous l'acronyme BLS pour BEV-like Symbiont, serait aussi présente mais dans une moindre proportion.

Le positionnement anatomique des mycétomes près des ovaires chez la femelle permet une transmission verticale du microbiote qu'ils contiennent, c'est-à-dire directement de la mère à l'embryon (39). En revanche, la raison de leur connexion aux testicules du mâle reste floue, mais elle pourrait expliquer un éventuel rôle des mycétomes dans la sécrétion de certains composants du liquide séminal qui compose le sperme (39).

3 BIOLOGIE DES PUNAISES DE LIT

Dans le cycle biologique des punaises de lits, on retrouve deux caractéristiques centrales : l'hématophagie stricte et l'insémination extra-génitale traumatique. Les deux sexes se nourrissent exclusivement de sang, et le passage d'un stade au suivant nécessite obligatoirement un repas sanguin. De plus, la production d'œuf par la femelle ainsi que probablement la production de spermatozoïdes par le mâle demandent aussi des repas réguliers (33).

En plus d'assurer leur croissance et leur fécondité, ces repas constituent un prérequis essentiel à l'accouplement (40).

3.1 CYCLE DE VIE DES PUNAISES DE LIT

Les punaises de lit sont hémimétaboles c'est-à-dire qu'elle se transforment très progressivement de larve en adulte, et les larves ressemblent beaucoup aux adultes (41). Leur cycle de vie inclut un œuf, cinq stades juvéniles et un stade adulte (l'imago) séparés d'un repas sanguin obligatoire puis d'une mue. (34) Au stade adulte, les punaises se nourriront plusieurs fois avant de mourir (figure 23).

La durée totale du cycle (d'œuf à œuf) peut varier grandement en fonction de la température et de la fréquence des repas sanguins, s'étalant en moyenne de 40 à 70 jours et la durée séparant deux repas sanguins varie de 3 à 15 jours, bien que les adultes puissent jeûner jusqu'à 2 ans. Une punaise de lit au stade adulte a une espérance de vie de 6 à 24 mois, pendant laquelle une femelle pourra pondre jusqu'à 500 œufs (34).

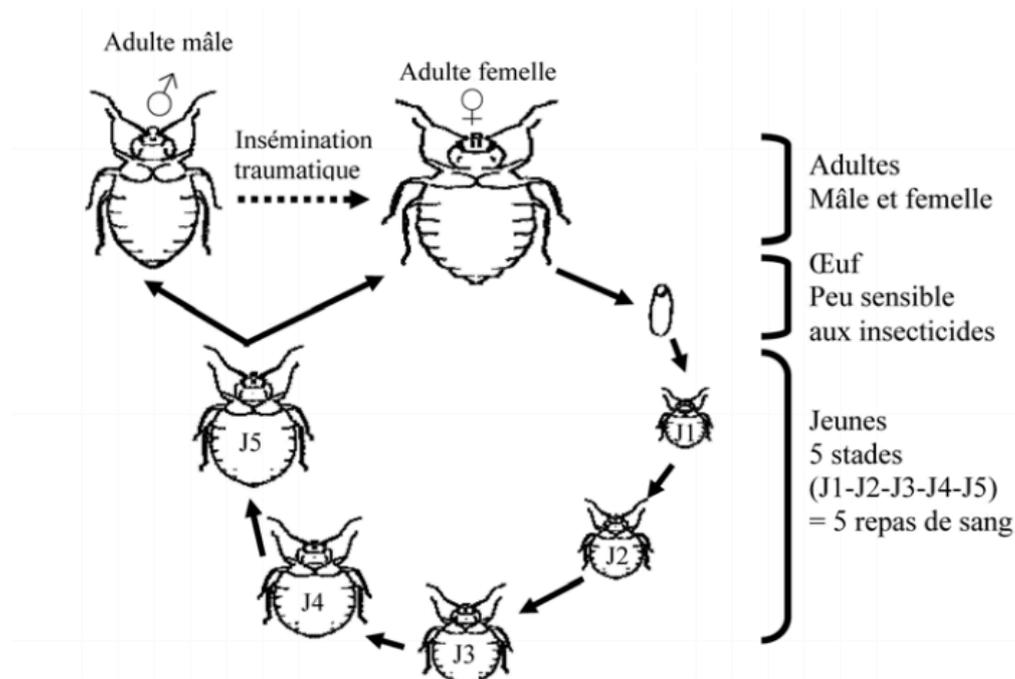


FIGURE 23 : CYCLE BIOLOGIQUE DES PUNAISES DE LIT (CENTRE NATIONAL D'EXPERTISE SUR LES VECTEURS. LES PUNAISES DE LIT *CIMEX LECTULARIUS* ET *CIMEX HEMIPTERUS* - BIOLOGIE, LUTTE ET SANTE PUBLIQUE, 2EME EDITION, 2015)

Les œufs (figure 24) ressemblent à de petits sacs ovoïdes légèrement arqués portant un opercule sur une extrémité et mesurent environ 1 mm de long. Ils sont transparents, légèrement blanchâtres, et laissent apercevoir la larve par transparence, dont se détachent nettement les deux yeux colorés de rouge. On distingue une face ventrale du côté concave et une face dorsale côté convexe. L'opercule, en forme de disque ou d'ellipse, est destiné à s'ouvrir puis se détacher lors de l'éclosion pour laisser sortir la larve. (1) L'éclosion a lieu 7 à 15 jours après la ponte, si la température est maintenue voisine des 25°C, voire jusqu'à 21 jours si celle-ci avoisine les 18°C (1).



FIGURE 24 : OEUF DE PUNAISE DE LIT, SCELLE AU SUPPORT. LE POINT ROUGE REPRESENTE L'OEIL DE LA NYMPHE EN DEVELOPPEMENT. (DOGGETT SL. BED BUGS : LATEST TRENDS AND DEVELOPMENTS, AEPMA NATIONAL CONFERENCE, 2007)

Les stades juvéniles ne sont guère différents les uns des autres et se succèdent séparés d'un repas sanguin puis d'une mue. La dernière mue est dite imaginale car elle donne l'imago, stade définitif du développement des punaises de lit qui diffère des stades juvéniles par le développement complet des organes sexuels de la punaise de lit, une taille plus importante et une couleur plus foncée.

Pendant la mue, la nymphe fait augmenter sa pression interne en aspirant de l'air et en contractant son tube digestif jusqu'à entraîner la rupture de sa cuticule. Sort en premier le thorax, puis l'abdomen et la tête, et enfin les pattes. Le processus ne prend que quelques minutes sous conditions de température et d'hygrométrie favorables, et la nouvelle cuticule, plus souple, peut alors rapidement s'étendre avant de se durcir. Si les conditions ne sont pas optimales, à cause d'une chaleur et/ou d'une sécheresse excessive, ce processus peut entraîner la mort de l'insecte (32, 42).

3.2 HEMATOPHAGIE

L'hématophagie est une stratégie intéressante pour l'alimentation des parasites : le sang est une substance stérile, disponible en abondance, et relativement facile d'accès pour qui est muni des outils pour le prélever. La punaise de lit *C. lectularius* n'a besoin que de 5 à 20 minutes pour s'engorger jusqu'à satiété, mais *C. hemipterus* peut se révéler plus longue à la tâche (39). En outre, le sang est riche en nutriments nécessaires au développement et à la reproduction de l'espèce.

Les punaises de lits peuvent prendre de volumineux repas comparativement à leur taille, qui peuvent représenter jusqu'à 4 fois leur poids de corps (21). On estime qu'une punaise de lit prélève environ 7,4µL de sang par repas (1).

Elles emmagasinent la plus grande partie du sang prélevé dans la partie antérieure de leur système digestif, pendant qu'une plus petite partie est digérée dans la partie postérieure, de 6 à 18 heures après prélèvement (39).

On l'a vu, tous les stades des deux sexes de punaises de lit, et plus largement des espèces de cimicidés sont des hématophages strictes, un repas sanguin est obligatoire pour passer d'un stade au suivant. De la même manière, la production d'œufs et de sperme (1) ainsi que le choix de la femelle par le mâle en recherche d'accouplement sont conditionnés par la prise des repas sanguins. En effet, une étude s'intéressant à l'insémination traumatique observa que les mâles étaient préférentiellement attirés par les femelles dont le dernier repas sanguin remontait à 36 heures ou moins (40). D'autres sources semblent préciser que le mâle est attiré par ce qui est gros et gonflé, comme une femelle fraîchement nourrie. Des expérimentations menées sur des femelles « gonflées » artificiellement ont montré qu'elles étaient aussi souvent montées que les femelles gonflées de sang (43).

En conditions de laboratoire, à des températures comprises entre 25 et 27°C, les punaises de lit s'alimentent environ tous les 7 jours (1). Elles peuvent cependant survivre sans nourriture pendant de longues périodes, jusqu'à deux ans. (34)

Lorsque la punaise cherche à piquer pour se nourrir, elle s'agrippe à l'aide de toutes ses pattes sur la peau de son hôte et étend son rostre initialement replié ventralement jusqu'à atteindre un angle de 90° avec la surface à pénétrer. Elle entame ensuite un mouvement de balancier et bombe son thorax. Les stylets mandibulaires entaillent alors la peau de l'hôte et la paire de stylets maxillaires pénètre cette entaille. Le labium quant à lui ne rentre pas dans la peau mais sert à stabiliser et à guider les stylets. Il se plie, et joue un rôle comparable à un ressort qui permet de jauger et contrôler la profondeur à laquelle vont s'enfoncer les stylets (figure 25). Ces derniers décrivent des mouvements dans toutes les directions de manière à lacérer la chair de l'hôte afin de faciliter le sondage à la recherche d'un vaisseau sanguin. Lorsqu'un vaisseau de calibre suffisant est repéré, il est perforé et la pompe cibariale qui permet l'aspiration entre alors en action. Afin d'éviter en réponse la mise en place d'une cascade de coagulation et la formation d'un clou plaquettaire, la salive de la punaise de lit renferme entre autres :

- Un inhibiteur du facteur X (44)
- Un antiagrégant plaquettaire : une apyrase, enzyme qui hydrolyse l'adénosine triphosphate ou ADP, nécessaire à l'activation plaquettaire (44)
- Une protéine de transport du monoxyde d'azote ou NO qui joue un rôle dans la vasodilatation et l'inhibition plaquettaire, appelée *Cimex* nitrophorin. Cette dernière a été identifiée comme allergène chez les patients présentant des réactions importantes aux piqûres de punaises de lit (44).

Au total, ce sont près de 46 protéines différentes qui ont été identifiées dans le sialome des punaises de lit. Certaines interfèrent avec l'hémostase de l'hôte comme nous venons de le voir, mais d'autres semblent impliquées dans sa protection, probablement par l'intermédiaire d'une activité antiseptique locale (44). De plus, il est admis que la salive renferme aussi des substances anesthésiques (45) permettant aux punaises de piquer leur hôte pendant leur sommeil sans risquer de le réveiller.

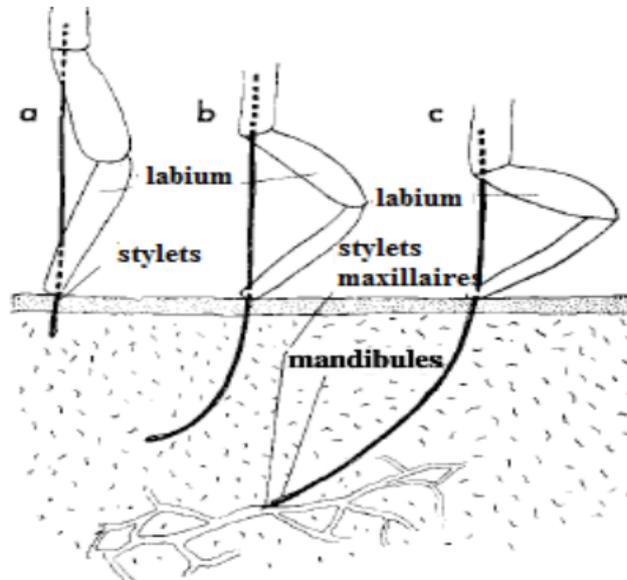


FIGURE 25 : DIFFERENTES ETAPES (A, B, C) DE LA PENETRATION DES STYLETS DANS LES TISSUS DE L'HOTE (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

3.3 INSEMINATION EXTRA-GENITALE TRAUMATIQUE

Bien que les femelles possèdent un tractus génital à proprement parler, les mâles perforent une zone particulière de l'abdomen, l'ectospermalège, avec un organe vulnérant pour déposer leur sperme directement dans une cavité abdominale, le mésospermalège. Ils montent la femelle de côté et courbent leur abdomen pour pouvoir atteindre la zone de pénétration, en position ventrale (figure 26). C'est pour cette raison que l'accouplement des punaises de lit est qualifié d'insémination extra-génitale traumatique. Les femelles ont donc développé un « appareil génital secondaire » appelé système paragénital, au travers duquel les spermatozoïdes vont pouvoir migrer jusqu'aux ovaires.



FIGURE 26 : ACCOUPLEMENT D'UN COUPLE DE *CIMEX LECTULARIUS* (BOASE ET NAYLOR, BED BUGS MANAGEMENT, 2014)

Cette méthode de reproduction peut être lourde de conséquences pour la femelle occasionnant une diminution significative de leur espérance de vie de 25% (40,46). En effet, les multiples lésions causées à l'abdomen pourraient conduire à des pertes liquidiennes importantes et exposent les femelles à un risque infectieux accru (46) surtout lorsque l'insémination a lieu en dehors du spermalège.

3.3.1 LE SYSTEME PARAGENITAL

Le système paragénital des punaises de lit femelles est donc adapté à ce type de copulation. Il comprend deux zones distinctes : une ectodermique, l'ectospermalège et une mésodermique, le mésospermalège. L'ectospermalège est une zone cuticulaire ventrale modifiée localisée sur la face ventrale droite de l'abdomen, le plus souvent au niveau des segments V et VI (32). On y observe une échancrure typique qui forme le sillon paragénital (figure 27). Le mésospermalège consiste en une poche située sous l'ectospermalège. Elle recueille les spermatozoïdes du mâle qui peuvent y rester jusqu'à 4 heures avant de les drainer jusqu'aux conceptacles séminaux (34) pour les y stocker et les concentrer. Les spermatozoïdes vont ensuite quitter ces conceptacles pour rejoindre les ovarioles via des canaux situés dans la paroi des oviductes pour aller féconder les ovocytes (figure 28). Ainsi, ils n'empruntent pas la lumière des voies génitales.

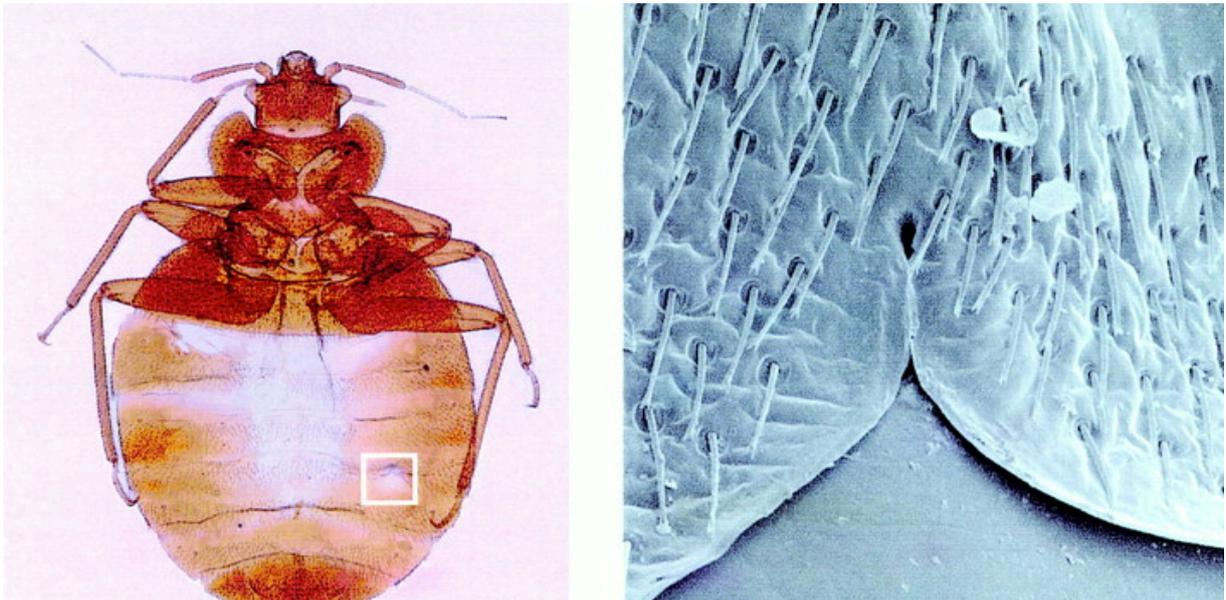


FIGURE 27 : A GAUCHE, LOCALISATION DU SPERMALEGE EN VUE DORSALE ; A DROITE, LE SILLON PARAGENITAL (MORROW E, ARNQVIST G. COSTLY TRAUMATIC INSEMINATION AND A FEMALE COUNTER-ADAPTATION IN BED BUGS, 2003)

Jamais aucun mâle n'a été observé en train d'utiliser les voies génitales « classiques » chez aucune espèce de punaise de lit (39) et leur persistance est justifiée par le fait qu'elles restent utilisées pour la ponte des œufs.

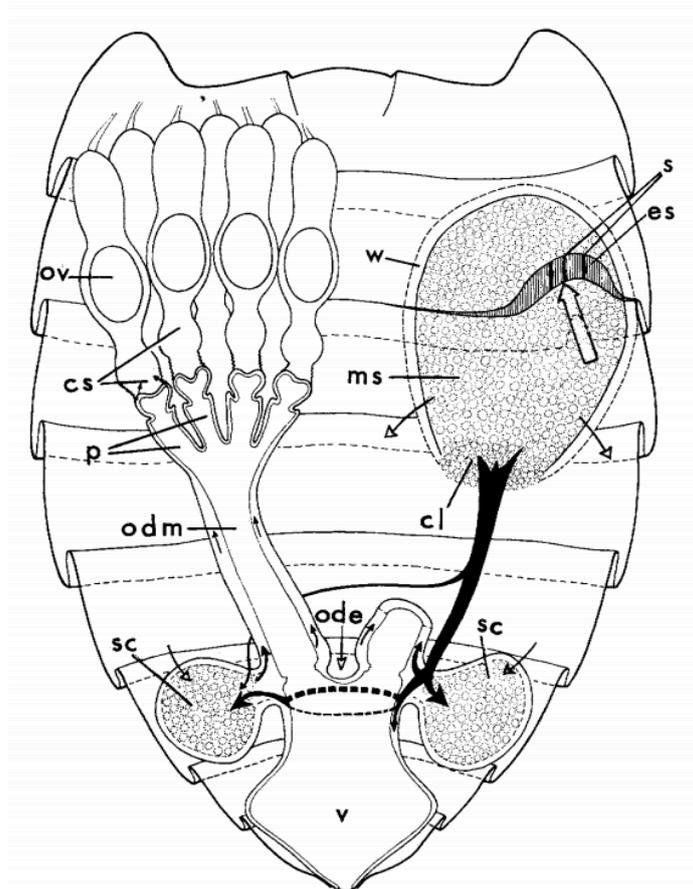


FIGURE 28 : SCHEMA GENERAL DU SYSTEME PARAGENITAL CHEZ *CIMEX* SP LEGENDE : SC, CONCEPTACLE SEMINAL ; CS, CORPS SYNCYTIAL ; S, CICATRICE OU TRACE DE COPULATION; ES, ECTOSPERMALEGE ; CL, LOBE CONDUCTEUR ; MS, MESOSPERMALEGE ; W : PAROI DU MESOSPERMALEGE OV, OVOCYTE; ODE, OVIDUCTE DE L'ECTODERME; ODM, OVIDUCTE DU MESODERME ; P, PEDICELLE DE L'OVARIOLE ; V, VAGIN (USINGER, MONOGRAPHIE DES CIMICIDAE, 1967)

3.3.2 COMPORTEMENT SEXUEL

Ce sont les femelles récemment engorgées qui suscitent l'intérêt des mâles. Elles sont sujettes à de multiples accouplements avec des mâles différents entre deux repas sanguins, chacun quittant rapidement la femelle après insémination (43). On estime qu'elles subissent en moyenne 5 inséminations traumatiques espacées de 17 minutes durant cette période (39). La durée de l'insémination par le premier mâle est significativement plus importante que pour les suivants. De plus, le volume de l'éjaculat du premier mâle serait environ 50% plus important que celui du second ; malgré cela c'est le sperme de ce dernier qui prendrait le dessus en termes de progéniture engendrée et cela pourrait s'expliquer par l'intense phagocytose que subiraient les spermatozoïdes du premier (47).

L'intérêt prépondérant des mâles pour les femelles engorgées tiendrait du fait que ces dernières se déplacent moins vite, facilitant ainsi l'accès par le mâle au spermalège (43).

Les femelles à jeun adoptent un comportement particulier, qui s'assimile à une « posture de refus » envers les mâles (figure 29). En contractant leur abdomen et en pliant les pattes asymétriquement, elles privent d'accès tous les mâles qui tenteraient une copulation (43).

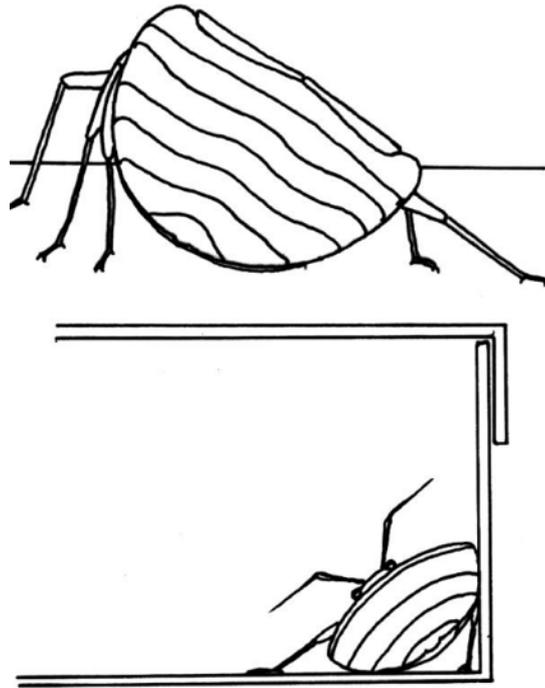


FIGURE 29 : DIFFERENTES POSITIONS DE REFUS DE LA PUNAISE DE LIT FEMELLE SIVA-JOTHY ET AL, FEMALE BED BUGS ANTICIPATE THE IMMUNOLOGICAL CONSEQUENCES OF TRAUMATIC INSEMINATION VIA FEEDING CUES. 2019

3.3.3 CONSEQUENCES DE L'INSEMINATION TRAUMATIQUE

Ce mode de reproduction coûte beaucoup aux femelles car elles vont mobiliser beaucoup d'énergie à la réparation de la zone lésée et déclencher des réponses immunitaires de défense contre l'introduction d'éventuels microorganismes étrangers (48), surtout si le mâle perfore une région autre que le spermalège (49). Six espèces de bactéries et trois mycètes ont été retrouvées sur le paramère des punaises mâles, qui sont autant de candidats potentiellement transmissibles à la femelle (48). Les femelles subissant des assauts répétés de mâles voient d'ailleurs leur espérance de vie diminuer par rapport à celles qui n'ont rencontré qu'un seul mâle (40) notamment car le risque de perforation de l'hémocœle est plus grand. Au cours de l'évolution, le mésospermalège serait alors apparu comme une adaptation à l'insémination traumatique : en évitant que le sperme n'entre directement dans l'hémocœle, et par sa richesse en cellules phagocytaires, il préviendrait un minimum le risque infectieux encouru par les femelles et diminuerait le risque de mort (40).

On a récemment découvert que les punaises de lit femelles étaient capables de réguler à la hausse leur immunité dans le spermalège en augmentant la synthèse de lysozyme lorsqu'elles ont un accès prévisible à la nourriture : elles le feraient en prévision d'une insémination traumatique et du risque d'infection associée (50).

Cependant, d'autres arguments montrent que les multiples inséminations infligées aux femelles pourraient leur conférer certains avantages qui compenseraient les coûts : en multipliant les sources de gamètes disponibles dans les conceptacles séminaux, la diversité allélique en serait augmentée ce qui rendrait la descendance plus viable (40).

Si la théorie génétique peut laisser penser que de multiples inséminations subies par une femelle lui permettent d'amplifier le brassage génétique et conférer une plus grande viabilité

à la descendance, les études qui se sont intéressées à cette hypothèse n'ont pu la démontrer (40).

4 CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DES PUNAISES DE LIT

On s'intéressera dans cette partie aux leurs caractéristiques biologiques utilisées pour trouver leur proie.

4.1 OLFACION ET CHIMIOTACTISME

Chez la punaise de lit comme chez tous les insectes hématophages, l'olfaction et le chimiotactisme de contact sont d'une importance capitale dans la recherche de l'hôte et la communication intraspécifique. Les récepteurs sensoriels, appelés sensilles, sont surtout localisés au niveau des antennes principalement sur les deux derniers segments et on en dénombre plusieurs milliers. Ils servent de capteurs aux molécules odorantes qui les traversent par des pores situés à leur surface, et les transportent via des protéines spécifiques de transport jusqu'à un système d'intégration neuronal qui déclenche une réponse comportementale (39). Les sensilles de *C. lectularius* sont divisées en trois catégories : olfactives, gustatives et mécaniques. Ces organes sensoriels peuvent également être munis de récepteurs à la chaleur et à l'humidité (51).

4.1.1 ROLE DE L'OLFACION ET DU CHIMIOTACTISME DANS LA RECHERCHE DE L'HOTE

La recherche de l'hôte ne se fait pas au hasard : elle est médiée par des signaux issus de l'hôte comme l'émission de dioxyde de carbone et d'autres molécules odorantes, et la chaleur. Ces signaux permettent aux punaises de s'orienter depuis une position éloignée que l'on estime comprise en fonction des études, entre 1.5 mètre (51) et 6 mètres (32).

Le CO₂, dont le potentiel d'attraction peut être modulé par d'autres molécules, est considéré comme le signal le plus important dans le comportement de recherche de l'hôte (52).

Les punaises de lit sont aussi capables d'utiliser la chaleur émise par leurs hôtes pour s'orienter vers eux lorsque celle-ci est supérieure à la température ambiante mais semble jouer un rôle bien moins important que le CO₂ (52). Les punaises sont capables de détecter des différences de température de 1 à 2 degrés ainsi que toute source produisant une chaleur supérieure à la température ambiante (53).

Enfin, les punaises de lits sont équipées pour détecter certains des 104 composés volatiles présents dans l'odeur dégagée par le corps humain, comme les aldéhydes et l'acide lactique (54). Les études qui s'y sont intéressées ont conclu que les punaises de lit n'utilisaient isolément pas ou très peu ces produits pour localiser leur hôte (52,55) mais qu'ils agissaient peut-être en synergie avec le CO₂ et la chaleur (55). Cependant, il leur a été attribué un certain pouvoir attracteur : les vêtements sales, imprégnés des odeurs des hôtes sont significativement plus attractifs que les vêtements propres, et les punaises y élisent bien plus volontiers refuge (56).

4.1.2 RÔLE DE L'OLFACTION ET DU CHIMIOTACTISME DANS LA COMMUNICATION INTRASPECIFIQUE

4.1.2.1 LES PHEROMONES

Les phéromones constituent des signaux chimiques émis par les glandes odorifères des punaises de lit pour assurer la communication entre les individus. Les glandes odorifères se trouvent sur les côtés du métathorax chez l'adulte. Elles mènent au milieu extérieur par des gouttières qui conduisent les sécrétions jusqu'à une zone d'évaporation qui permet leur diffusion dans l'atmosphère pour pouvoir être captées par les autres individus.

On distingue deux types de phéromones :

- Une phéromone d'alarme, qui déclenche la dispersion des punaises ;
- Une phéromone d'agrégation, qui déclenche le regroupement des punaises dans leurs abris

Jusqu'à aujourd'hui, aucune phéromone sexuelle n'a été mise en évidence (39) chez la punaise de lit.

PHÉROMONE D'ALARME : en cas de danger, juvéniles comme adultes produisent des signaux chimiques qui déclenchent l'agitation et la dispersion des punaises groupées. L'analyse de ces sécrétions a montré qu'elles renfermaient une large proportion de (E)-2-hexenal et de (E)-2-octenal, ainsi que de l'acétaldéhyde, du 2-butanone en plus petites quantités (39). Cette phéromone d'alarme aurait aussi des propriétés défensives, car les punaises données à manger à des chauves-souris sont aussitôt recrachées (33). Enfin, chez les juvéniles, elle assure une protection contre les assauts sexuels des mâles (57).

PHÉROMONE D'AGREGATION : les punaises de lit se regroupent dans leurs abris, et y retournent directement après la prise d'un repas sanguin. Sensibles à la dessiccation, cette posture leur permet de conserver un taux d'hydratation correct (58). Dans les années 50, ce comportement de regroupement et d'agrégation était attribué à « l'odeur du nid », désormais identifiée comme une phéromone (39). C'est un mélange complexe de nombreuses molécules volatiles d'aldéhydes, de cétones, de composés sulfurés et d'histamine récemment identifié (59), que les punaises de lit sécrètent dans leur refuge. Il est intéressant de noter que l'on y retrouve le (E)-2-hexenal et le (E)-2-octenal dans des concentrations plus faibles que dans la phéromone d'alarme. Ainsi, en fonction de leur concentration, ces deux composés exercent un effet répulsif et dispersant ou un effet attracteur (59,60) laissant entrevoir la complexité des paramètres qui influencent les réponses comportementales des punaises de lit à leur environnement.

La phéromone d'agrégation concentre de nombreux efforts de recherche car elle pourrait être intégrée dans un leurre pour appâter puis piéger les punaises de lit (59) dans un but de détection et de contrôle des populations.

4.2 ORIENTATION TACTILE ET VISUELLE

L'orientation des punaises de lit grâce aux autres sens n'est pas encore bien élucidée. Des récepteurs mécaniques disposés sur ses antennes lui permettent d'appréhender les reliefs et la texture du terrain sur lequel elles évoluent. Les punaises de lit évitent de se déplacer sur les surfaces trop rugueuses qui entravent leurs mouvements et les surfaces trop lisses qui ne leur offrent pas d'accroche (61).

Elles ont un champ de vision frontal qui leur permet une vue en trois dimensions de l'environnement et distinguent les objets verticaux jusqu'à une certaine hauteur, même dans l'obscurité (61). Le spectre lumineux que couvrent les photorécepteurs des punaises de lit est encore inconnu, mais elles semblent être préférentiellement attirées par les objets de couleur noire ou rouge. Certains auteurs avancent l'hypothèse sur cette préférence que ces deux couleurs contrastent mieux avec les arrière-plans clairs que les autres couleurs, suggérant que si les punaises ne voient pas « directement » toutes les couleurs, elles sont sensibles au contraste entre les différentes couleurs, comme cela a été démontré chez l'abeille (61).

4.3 PHOTOPHOBIE

Les punaises de lit sont photophobes. Elles fuient la lumière, du jour comme artificielle, et augmentent considérablement leur activité à l'extinction des sources lumineuses de l'habitation où elles résident, avec un pic d'activité entre 3h et 5h du matin. Laisser les lumières allumées durant toute la nuit semble ralentir cette activité sans pour autant la stopper, et une période d'obscurité de 45 heures ne modifie en rien leur cycle (1).

4.4 MODES DE DEPLACEMENT

L'expansion mondiale des punaises de lit observée ces dernières années est due à deux types de déplacement :

- Actif, qui intervient dans la recherche de l'hôte pour la prise d'un repas sanguin, du refuge au lieu de repas. Ces déplacements peuvent couvrir de quelques dizaines de centimètres (si le refuge se trouve dans le matelas par exemple) à presque 6 mètres (32). Après le repas, la punaise retourne dans son refuge, pour digérer, muer ou pondre. Mais une nouvelle cachette rencontrée sur le chemin de retour peut devenir un nouveau lieu d'agrégation (34).
- Passif : Il correspond au transport par l'homme vers un nouveau lieu de vie situé à quelques kilomètres voire milliers de kilomètres, lors d'un voyage, d'un déménagement, de l'introduction dans son domicile de vieux meubles ou d'objets d'occasion. Hôtels, bateaux de croisière, maisons de retraite, auberges de jeunesse, foyers d'hébergements, prisons sont autant de lieux à fort risque de contamination par les punaises de lit. Ces dernières ont une tendance naturelle à s'agréger dans le linge sale non rangé, car il est imprégné des odeurs des hôtes (56). Par conséquent, le linge utilisé et laissé dans une valise ouverte ou à même le sol attirera les punaises de lit ; enfermées dans la valise, elles accompagneront l'hôte jusqu'à son retour à domicile. Il est sage de rappeler qu'un niveau social supérieur n'est pas un gage de protection. Les spécialistes et les sociétés de désinsectisation ont tous en mémoire des sites contaminés allant du plus luxueux au plus précaire (34).

4.5 RESISTANCE AU STRESS HYDRIQUE

Les punaises de lits, contrairement à d'autres insectes qui peuvent absorber de l'eau sous forme liquide ou de vapeur, n'ont pour seuls apports hydriques les repas sanguins effectués sur leur hôte. Par conséquent, entre deux repas elles doivent compter sur l'eau retenue lors de leur dernier engorgement jusqu'à ce qu'un nouvel hôte soit prélevé. Elles peuvent supporter une perte nette de 30 à 40% de leur volume total en eau avant d'en mourir, en fonction de leur stade de développement. Les plus sensibles sont les nymphes, qui ne

survivront que quelques jours à une humidité relative (HR) extrême, en dessous de 10%, à cause d'un rapport surface/volume élevé et un important métabolisme (62). Les adultes sont plus résistants et sous les conditions fréquemment rencontrées dans la majorité des foyers humains, ils peuvent survivre facilement au moins 6 mois avant qu'un repas sanguin ne soit nécessaire à leur survie et le comportement d'agrégation adopté dans leur refuge contribue à diminuer les pertes en eau (58).

Les inséminations traumatiques qui ont lieu en dehors du spermalège ont tendance à augmenter mécaniquement les pertes hydriques par fuite de l'hémocœle et à augmenter la mortalité des femelles (46).

Les punaises de lits sont aussi vulnérables en cas de surhydratation : l'exposition à des valeurs de HR proches de 100% est associée à une diminution de leur espérance de vie (63). Par ailleurs l'immersion dans l'eau pendant 24 heures des stades juvéniles et adultes augmente drastiquement leur mortalité, alors qu'elle est sans effet sur les œufs.

4.6 RESISTANCE A LA TEMPERATURE

4.6.1 HAUTES TEMPERATURES

Les études de résistance à la température et de létalité liée est une question compliquée à traiter. Par exemple, la mortalité dépendra de la rapidité avec laquelle les températures peuvent être transférées à la punaise de lit, du temps d'exposition des punaises aux températures et d'éventuels mécanismes de défense de l'insecte. Cette complexité se retrouve dans la grande variabilité des données publiées, dont nous tenterons un résumé général.

La punaise de lit se développe de manière optimale dans une gamme de températures s'étalant entre 20°C et 30°C (64). De manière générale, *C hemipterus* est plus résistante à la chaleur que *C lectularius*, ce qui n'est pas surprenant puisque la première est une espèce tropicale. Pour leurs œufs, le temps d'incubation diminue avec l'augmentation de la température, jusqu'à une limite de 37° à partir de laquelle les œufs perdent en viabilité (63).

Les stades adultes et juvéniles présentent une relativement bonne tolérance aux hautes températures : ils peuvent supporter de courtes expositions à des températures pouvant monter jusqu'à 48°C, mais l'exposition continue à 40°C entraîne une baisse significative de leur survie (42). Notons par ailleurs que dès 38°C, certaines punaises de lit ne parviennent pas à muer correctement et restent incarcérées dans leur ancien exosquelette ce qui peut entraîner leur mort (42).

La température pour laquelle on observe 99% de mortalité (TL₉₉) chez les adultes est de 48,3°C et de 54,8 pour les œufs. A des températures inférieures, le temps d'exposition devient une donnée capitale. Il faut exposer les punaises adultes 94 minutes à 45°C pour obtenir une mortalité de 99% et 428 minutes pour les œufs (65).

4.6.2 BASSES TEMPERATURES

Sous les 10°C, l'embryogenèse chez la femelle adulte est altérée et les œufs produits ne seront pas viables, alors qu'une exposition rapide à -15°C induit simplement une baisse de leur viabilité (63).

Le point de congélation des punaises de lit, température à laquelle elles gèlent entièrement, est atteint entre -20 et -25°C pour l'ensemble des stades de développement. En fonction des études, les températures létales observées s'étalent de -14°C à -25°C (39,66,67). Les différences observées seraient imputables aux protocoles utilisés pour le refroidissement, à l'origine du sang dont étaient nourries les punaises ainsi qu'à l'âge des colonies étudiées (39).

4.7 LE SYMBIOTISME

La symbiose concerne toutes les formes de coopération entre différentes espèces vivantes, depuis l'union profitable aux deux espèces en jeu jusqu'au parasitisme. Tous les intermédiaires existent, entre la symbiose au sens propre et le parasitisme, celui-ci pouvant évoluer vers la symbiose, et inversement. Mais, le plus généralement, on réserve l'appellation de symbiose aux cas d'associations coopératives, dans lesquelles les relations entre les deux partenaires tendent, pour l'un comme pour l'autre, à un équilibre entre les profits et les pertes, ou sont favorables à l'un des partenaires sans être délétère pour l'autre (68).

4.7.1 LE MICROBIOTE SYMBIOTIQUE DES PUNAISES DE LIT

De nombreux microorganismes ont été retrouvés au fil des études à l'intérieur des punaises de lit. A l'heure actuelle, seulement deux sont considérés comme ayant un rôle symbiotique au sein des cimicidés. Le plus connu et étudié est une bactérie du genre *Wolbachia*, que l'on retrouve dans de nombreuses autres espèces d'invertébrés comme les termites ou certains vers nématodes (69). Nous l'avons vu, cette bactérie est concentrée au sein d'organes spécifiques appelés mycétomes, mais vit aussi au sein des œufs et du mésospermalège de la femelle (36). Le second symbiote est une gamma-protéobactérie encore mal connue désignée sous l'acronyme BLS (pour BEV-like symbiont, en référence à sa similarité avec un autre symbiote retrouvé chez *Euscelidius variegatus*, un insecte de la famille des cicadellidae) (70). Sa présence n'est pas certifiée chez toutes les espèces de punaises, mais elle est régulière chez toutes les populations de *C. lectularius* à travers le monde. Elle se localise dans les mêmes organes que *Wolbachia*, dans des proportions moindres, ainsi que dans les Tubes de Malpighi et l'hémolymphe. Elle est très mobile et peut facilement être observée au microscope à contraste de phase (71).

4.7.2 IMPACT DU SYMBIOTE SUR *CIMEX LECTULARIUS*

Pour prospérer, les insectes qui se nourrissent exclusivement de matériaux déficitaires en certains nutriments (le sang chez les hématophages ou le xylème chez les phytophages) doivent posséder une source capable de leur fournir les vitamines ou acides aminés essentiels absents de leur alimentation, comme cela a été démontré chez les poux ou les mouches tsétsé (72,73). Tout laissait alors penser que chez les punaises de lit, au moins un des deux symbiotes précités apportait les nutriments manquants, mais ce n'est que récemment que cette supposition fut démontrée (36). Les populations de punaises de lit auxquelles on avait détruit le microbiote présentaient une baisse notable de la fécondité et des retards du développement, associés à une carence en riboflavine (vitamine B2) et en biotine (vitamine B8). Ces mêmes populations recouvraient une biologie normale lorsqu'on les supplémentait en ces mêmes vitamines (37). L'étude du génome de *Wolbachia* finit par démontrer qu'elle possédait des gènes permettant de synthétiser ces vitamines.

Si le rôle de BLS semble moins important pour la survie des punaises de lit, sa suppression ne semble pas perturber profondément le développement des punaises de lit tant que *Wolbachia* est présente. En revanche, chez les femelles dont on a totalement supprimé le microbiote, sa

réintroduction restaure en partie la fécondité, laissant penser qu'elle joue tout de même un rôle bénéfique dans la reproduction des punaises de lit (71).

En conclusion, le symbiote des punaises de lit revêt une importance capitale dans le développement et la survie des populations de punaises de lit.

4.7.3 LE ROLE DU SYMBIOTE DANS LA LUTTE CONTRE LES PUNAISES DE LIT

On sait que la résistance aux insecticides est attribuée à la présence d'une bactérie symbiotique chez *Riptortus pedestris*, une punaise phytophage ravageuse de cultures agricoles en Asie (74). Alors que la résistance aux insecticides pyréthroïdes est de plus en plus importante dans les populations de punaises de lit, on retrouve *Wolbachia* et BLS aussi bien chez les populations résistantes que sensibles, rendant l'hypothèse d'une résistance induite par le symbiote peu probable (71).

Compte tenu de l'importance essentielle du symbiote chez la punaise de lit, son éradication est une idée séduisante que certains voudraient inclure dans les stratégies de lutte contre les punaises. Mais cette idée a peu de chances d'être applicable tant qu'il faudra passer par l'administration d'antibiotiques aux punaises via leur alimentation, qui ne peut être, de surcroît, qu'artificielle (36).

5 LES DIFFERENTS IMPACTS DES PUNAISES DE LIT

5.1 IMPACT SUR L'HOMME ET CONSEQUENCES CLINIQUES

Les conséquences cliniques des infestations de punaises de lit sont d'ordres multiples : outre les réactions cutanées liées aux piqures elles-mêmes, on peut retrouver des problèmes respiratoires causés par des allergènes produits par les punaises, des cas d'anémie ferriprive, des troubles du sommeil, un retentissement psychologique potentiellement important, voire dans certains cas une surexposition chimique aux insecticides lorsque ceux-ci sont mal utilisés.

5.1.1 REACTIONS CUTANÉES

Lors de la piqure, la punaise injecte dans la peau de l'hôte sa salive renfermant une grande variété de protéines (44) pouvant provoquer une réaction cutanée inflammatoire plus ou moins importante car le système immunitaire de l'hôte va reconnaître ces protéines comme des antigènes et déclencher une réponse humorale et cellulaire conduisant à la sécrétion de cytokines pro-inflammatoires (75).

On estime que 30 à 90% des victimes vont déclencher une réaction allant d'une simple macule, à la papule (œdème) en passant par la plaque d'urticaire allergique (76) voire même une éruption bulleuse (figure 30). Peuvent ensuite se développer une infection secondaire des plaies surtout si la victime se gratte beaucoup, et une altération du sommeil en cas de prurit associé important (45,77).

Les principales lésions observées sont de petites lésions circulaires de 2 à 5 millimètres de diamètre avec un point hémorragique au centre, le plus souvent sur les zones découverte du corps comme les membres ou le visage (45) et disposées en lignes (figure 31) Elles sont souvent œdémateuses et plus ou moins résistantes à la vitropression et peuvent persister plus de 24 heures. Prurigineuses, elles apparaissent souvent en ligne indiquant que plusieurs punaises sont venues piquer ou que la même s'y est reprise à plusieurs fois. En cas de très nombreuses piqures, les lésions peuvent se rejoindre au point de former des plaques étendues (45)

Le délai d'apparition des réactions cutanées et leur sévérité varie d'un individu à l'autre et dépend du degré d'exposition subi auparavant et de son statut immunologique (75,78,79) : plus un hôte a été exposé à des piqures répétées, moins le délai d'apparition des réactions est long (79) pouvant être immédiat ou différé. Certains individus peuvent ne jamais en développer (78). De manière générale, les lésions disparaissent en une à deux semaines.

Cependant elles exposent les victimes à un risque de surinfection de type impétigo, ecthyma (une forme ulcérée d'impétigo) ou folliculite (une infection du follicule pileux) surtout si elles se grattent (45).



FIGURE 30 : REACTIONS BULLEUSES APPARUES ENTRE 24 A 36 HEURES APRES LES PIQUES (DOGGETT SL ET AL. BED BUGS: CLINICAL RELEVANCE AND CONTROL OPTIONS. CLINICAL MICROBIOLOGY REVIEWS. 2012)



FIGURE 31 : LES PIQUES SONT SOUVENT ALIGNEES (DOGGETT SL ET AL., BED BUGS: CLINICAL RELEVANCE AND CONTROL OPTIONS. CLINICAL MICROBIOLOGY REVIEWS. 2012)

5.1.1.1 MECANISMES IMMUNITAIRES MIS EN JEU DANS LES REACTIONS CUTANÉES

Les signes cliniques observés lors de la pique résultent de l'effraction cutanée par les pièces buccales, et de l'injection de salive dans les tissus de l'hôte.

La douleur qui peut être ressentie au moment de l'insertion du rostre est due à l'activation des nocicepteurs cutanés présents dans le derme. Cependant elle est rarement rapportée par les victimes et ne génère en général pas de réponse de leur part.

Les rôles respectifs de l'immunité innée et adaptative sont relativement mal connus dans les mécanismes des réactions provoquées par les piques :

Les protéines de la salive provoquent localement le relargage par les mastocytes d'histamine, de prostaglandines, et de monoxyde d'azote qui augmente localement la perméabilité vasculaire, et engendrent ainsi l'œdème observé.

Les réactions cutanées de type bulleuses seraient en lien avec la mise en place d'une réaction allergique à la *cimex* nitrophorin médiée par les IgE (immunoglobuline E) (77) et les réactions papuleuses d'urticaire seraient médiées par des IgG (immunoglobuline G) (76).

5.1.1.2 TRAITEMENT DES LÉSIONS

Le traitement des lésions est principalement symptomatique et il est recommandé en première intention de désinfecter les plaies avec un antiseptique et d'éviter de se gratter pour limiter le risque de surinfection. En cas d'inflammation et/ou de prurit, l'utilisation de dermocorticoïdes d'activité faible à modérée une à deux fois par jour peut s'avérer judicieuse, en fonction de l'intensité des symptômes (80–82). En cas de réaction plus sévère, des antihistaminiques ou des corticoïdes par voie orale pourront alors être prescrits (82), surtout si les lésions impactent la qualité du sommeil (80). Lorsque les lésions s'infectent, des antibiotiques locaux (acide fusidique, mupirocine) voire systémiques seront indiqués (39,81–83).

Des espoirs concernant une immunothérapie de désensibilisation des patients hypersensibles sont permis, notamment depuis l'identification précise des protéines (44) induisant les réactions allergiques que subissent ces patients et la meilleure compréhension des mécanismes immunologiques mis en jeu dans ces réactions (76,77).

5.1.1.3 DIAGNOSTIC DIFFÉRENTIEL DES PIQURES

Différencier avec certitude une piqure de punaise de lit de celle d'un autre insecte peut être difficile tant les signes cliniques varient d'un patient à l'autre. Des insectes différents peuvent provoquer des réactions similaires, un même insecte peut provoquer des réactions différentes. Il n'y a qu'à voir, au comptoir de nos officines, le nombre de patients sortant de consultation pour piqure d'insecte qui ignorent totalement par quoi ils ont été attaqués, et nous présentent des ordonnances de traitements symptomatiques « génériques » comportant antihistaminiques per os et dermocorticoïdes.

Le plus souvent, l'apparition de macules ou papules suivant un motif plus ou moins linéaire sur les parties découvertes du corps comme les membres inférieurs et supérieurs constitue une bonne orientation de diagnostic vers les punaises de lit, mais de nombreuses causes peuvent compliquer l'observation de ces lésions. Lorsqu'un patient se fait piquer par un grand nombre de punaises, il n'est pas rare que les lésions au départ isolées se rejoignent en formant de larges plaques pouvant ressembler à un exanthème généralisé, ou une crise d'urticaire aiguë (84). Si le patient se gratte beaucoup, la lichénification (épaississement de la peau dû au grattage ou à diverses dermatoses) ou l'excoriation (écorchure, perte de la substance superficielle de la peau) peuvent modifier l'aspect des lésions et compliquer le diagnostic (45), sans même parler de l'éventuelle purulence associée.

La confusion avec d'autres pathologies n'est pas rare, et la méprise avec une gale, une réaction allergique aux antibiotiques, à la nourriture ou aux végétaux, une morsure d'araignée ou d'aoutat, est possible.

Après la découverte chez certains patients de la sécrétion d'immunoglobulines spécifiques en réaction aux piqures de punaises des tests sérologiques à visée diagnostique sont en cours de développement depuis 2015 (81).

5.1.2 PROBLÈMES RESPIRATOIRES

De nombreuses espèces d'insectes et d'acariens sont connues pour produire des allergènes susceptibles de déclencher des réactions asthmatiques allergiques. Les personnes à tendance atopique sont plus enclines à se sensibiliser à ces particules qui peuvent être inhalées lorsqu'elles flottent dans l'air de la maison et ainsi déclencher un asthme allergique.

Si le lien entre les punaises de lit et l'apparition de tels symptômes n'a pas été démontré de manière formelle, de nombreuses pistes laissent penser qu'elles peuvent dans certains cas et chez certains patients les faire apparaître. Un premier rapport datant de 1929 raconte qu'un homme de 37 ans souffrant d'asthme allergique saisonnier s'est montré sensible à des extraits de punaises de lit. Partant de cette observation, les auteurs ont instauré une stratégie d'éviction des allergènes en nettoyant régulièrement sa literie et sa chambre. Peu de temps après, les crises d'asthmes auraient disparu (85).

Une seconde étude de 1935 s'est intéressée au cas d'une patiente espagnole de 28 ans, elle aussi sujette à des crises d'asthme saisonnier. Exposée à des extraits de punaises, elle aurait manifesté de graves difficultés à respirer. Après un programme de désensibilisation à base d'extraits de *C. lectularius*, elle serait devenue insensible aux allergènes de punaises de lit (86).

Plus récemment, en Chine une étude sur 320 patients asthmatiques à qui on présentait des extraits de punaises de lit rapporta que 63% d'entre eux auraient manifesté des symptômes contre seulement 11% dans le groupe contrôle constitué de non asthmatiques (87). Les auteurs conclurent que les punaises de lit étaient un facteur aggravant de l'asthme bronchique.

Il semble important de préciser que ces études comportent de nombreux biais : dans la première, il est fort probable que le nettoyage intensif a permis l'éviction d'autres allergènes comme les acariens de poussière par exemple, et l'étude chinoise ne précise pas la nature des réactions aux extraits de punaises.

5.1.3 ANEMIE

On sait qu'une punaise peut prélever 7,4µL de sang par repas et qu'elle se nourrit plusieurs fois durant son cycle de vie (1). En cas d'infestation extrême, notamment dans les groupes de personnes très défavorisées ou les refuges pour sans-abris, jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de punaises peuvent être retrouvées (88) au sein d'un même foyer. Par conséquent, les volumes sanguins prélevés peuvent être théoriquement importants.

Un rapport indien de 1962 suspecta les punaises de lit d'être à l'origine d'une vague d'anémie ferriprive touchant des nourrissons et de jeunes enfants dans la région d'Hyderabad. Les auteurs affirmèrent, prudemment, que 200 punaises de lit pouvaient prélever 1 à 2 ml de sang et ont réussi à trouver pas moins de 2000 punaises adultes au sein d'un même foyer (39,89)

Au Canada en 2009, un ancien toxicomane 60 ans se présenta à son médecin de famille en expliquant subir une grande fatigue et une léthargie depuis deux mois. Il portait de nombreuses lésions cutanées de type papules sur les bras et le cuir chevelu. Ses analyses sanguines ont révélé un taux d'hémoglobine à 8,0g/dL puis 5,2g/dL trois semaines plus tard. Il expliqua avoir observé l'apparition de punaises de lit chez lui quelques mois avant l'apparition des symptômes. Lors de l'inspection de sa maison, des milliers d'individus ont effectivement été retrouvés. Après l'éradication de l'infestation et une supplémentation en fer, son taux d'hémoglobine était rentré dans la norme, à 13,2g/dL (90).

En Autriche en 2011, l'admission à l'hôpital d'un couple de sexagénaires pour pneumopathie et infarctus du myocarde révéla une anémie sévère à 5,2 et 5,3g/dL. L'homme était porteur d'une prothèse de jambe qui hébergeait de très nombreuses punaises de lit cachées dans les articulations et le couple présentait de multiples traces de piqûres (91). Après traitement de la cause de l'admission, transfusion sanguine et supplémentation en fer, l'anémie fut résolue.

En France, une malade d'Alzheimer de 82 ans fut admise à l'hôpital pour malaise, les vêtements infestés de punaises de lit et présentait des plaques érythémateuses et maculo-papulaires. Sa biologie révélait une anémie sévère à 5,4g/dL sans autres facteurs particuliers compte tenu de son âge. Son appartement était infesté de punaises de lit, du matelas à sa

garde-robe. Les auteurs conclurent que l'infestation et les piqures des punaises étaient à l'origine de l'anémie sévère (92).

Dans chacun des cas cités, les victimes se présentaient toutes dans des contextes particuliers : d'insalubrité en Inde, de toxicomanie pour l'étude cas canadien, de précarité pour le cas autrichien et de santé mentale altérée pour le cas français, appelant à la plus grande prudence dans l'interprétation des conclusions.

5.1.4 TROUBLES DU SOMMEIL

Elle peut résulter du prurit provoqué par les réactions cutanées aux piqures. Un sondage réalisé sur 474 sujets aux États-Unis a révélé en 2010 que près de 30% des patients souffraient de troubles du sommeil liés aux piqures de punaises de lit (93). Après une piqure dont la réaction est immédiate, l'hôte se réveille pour se gratter, amplifiant de la sorte la sensation de démangeaison ; il entretient de la sorte un cycle de « démangeaison-grattage » qui réduit considérablement la qualité de son sommeil et peut même impacter sa santé mentale (39).

5.1.5 IMPACT PSYCHOLOGIQUE

L'exposition aux environnements infestés par les punaises de lits peut être associé à l'apparition de nombreux désordres psychologiques. De nombreux articles font référence à une détresse psychologique causée par une infestation en cours ou par le souvenir d'une infestation passée : peuvent se développer une fragilité de l'humeur, de l'anxiété, une dépression, de l'insomnie, un syndrome de stress post traumatique (94), voire un « délire parasitaire » caractérisé par la conviction délirante d'être infesté d'insectes ou de parasites cutanés (95). L'infestation peut déclencher de novo de tels symptômes, ou bien empirer une santé mentale déjà fragile. C'est le cas d'une jeune femme souffrant d'un « trouble de la personnalité borderline » que les infestations répétées de punaises de lit ont conduite au suicide (96).

Certains auteurs font remarquer l'impact social que peuvent aussi avoir les infestations de punaises, lié à la stigmatisation des personnes infestées car souvent associées à tort à de mauvaises conditions d'hygiène ou une vie précaire. Perte de confiance, isolement et dépression peuvent en découler (94).

Enfin, l'éradication des punaises de lits requiert souvent une fastidieuse et coûteuse stratégie de lutte qui peut angoisser financièrement les victimes. Par conséquent, les impacts négatifs des infestations de punaises sur la santé mentale pourraient être plus intenses chez les personnes à faibles ressources financières ou les personnes âgées (94)

5.1.6 EXPOSITIONS CHIMIQUES

L'état de détresse dans lequel peuvent se retrouver certaines personnes dont le domicile est infesté de punaises peut parfois les conduire à des agissements dangereux pour leur santé. Enflammer de l'alcool ou du propane pour se débarrasser de punaises de lit ne devrait jamais sembler être une bonne idée et peut avoir des conséquences désastreuses : les cas d'accidents domestiques engageant le pronostic vital ne manquent pas (97,98).

De la même manière, le mésusage ou l'utilisation abusive d'insecticides peut avoir de graves conséquences sur la santé et l'environnement. Afin de documenter l'importance des problèmes liés à l'utilisation des insecticides visant à contrôler des infestations par les punaises de lit, les « Centres pour le contrôle et la prévention des maladies » (CDC) de divers états américains ont passé en revue les cas déclarés d'intoxication aux insecticides sur leur

territoire. Ont été rapportés 111 cas associés à la lutte contre les punaises de lit entre 2003 et 2010, et dans la plupart des cas concernaient des insecticides de la famille des pyréthroïdes et des pyrèthres (99). Bien que la majorité des cas recensés furent considérés comme peu graves, on dénombra quand même un décès. Les principaux symptômes rencontrés étaient d'ordres neurologique, respiratoire et gastro-intestinaux (99). Le plus souvent, les victimes étaient non formées aux recommandations d'emploi. Le cas du décès illustre très bien ces observations : une femme de 65 ans, qui remarqua la présence de punaise de lits à son domicile, demanda à son époux d'y remédier. Il appliqua autour du lit un premier insecticide, puis un second sur le matelas. Il a été montré qu'aucun des deux produits utilisés n'était adapté à un usage intérieur. Dix-huit bombes de type fogger ont ensuite été utilisées dans le reste de la maison, et la victime s'aspergea même les bras et la tête d'un quatrième produit. Tous étaient à base de pyréthroïdes et son décès fut rapporté 9 jours après (99).

En Thaïlande en 2011, suite à une probable mauvaise manipulation de la part de désinsectiseurs dans un hôtel, 7 touristes exposés dans leur chambre à un puissant biocide, ont trouvé la mort (100). A Bangkok, en 2015, l'autopsie du corps de deux sœurs canadiennes retrouvées mortes dans leur chambre d'hôtel conclut en une très probable intoxication au DEET et au phosphine, un gaz biocide extrêmement toxique (101).

Si l'information des populations sur le bon usage des insecticides revêt une importance capitale dans la lutte contre l'apparition de résistances acquises chez les insectes, elle l'est aussi plus que jamais dans la préservation de la santé de ceux qui les utilisent et de leur environnement.

5.2 LES PUNAISES DE LITS ET MALADIES INFECTIEUSES

5.2.1 HISTORIQUE DU ROLE DE VECTEUR

Par analogie avec d'autres arthropodes hématophages vecteurs de maladies infectieuses bien connus tels que les moustiques, les tiques ou les triatomes (transmission par les déjections), les punaises de lit ont naturellement été suspectées de pouvoir transmettre des agents infectieux à l'homme.

Bien que de nombreux pathogènes pour l'Homme aient été isolés des punaises, aucun cas réel de contamination n'a pu être observé à ce jour (39)

Mais le doute est en droit de persister : les punaises de lit sont-elles incompetentes dans la transmission de maladies ? Ou bien n'a-t-on simplement pas encore confondu les cas de transmission ? Peut-être est-ce la maladie qui n'a pas été identifiée ? Pourraient-elles transmettre des agents pathogènes, que d'autres facteurs extérieurs aux punaises ou propres aux hôtes empêchent de s'exprimer ? Autant de questions qui agitent encore le secteur de la recherche en infectiologie et qui lui promettent un avenir certain.

5.2.2 MICROORGANISMES PRESENTS DANS LES PUNAISES DE LIT.

De nombreuses études ont eu pour objectif d'identifier les microorganismes vivant au sein des punaises de lit (102–104). Actuellement on en dénombre près de 45, répartis entre les bactéries, les virus, les champignons et les parasites.

Le tableau 2 répertorie quelques représentants de ces microorganismes et les maladies qui leur sont habituellement associées

TABLEAU 2 QUELQUES MICROORGANISMES RETROUVES CHEZ LES PUNAISES DE LIT (DELAUNAY P ET AL. BEDBUGS AND INFECTIOUS DISEASES. CLIN INFECT. 2011)

Bactéries	<i>Bacillus anthracis</i>	Maladie du charbon
	<i>Bartonella quintana</i>	Fièvre des tranchées
	<i>Borrelia recurrentis</i>	Fièvre récurrente mondiale
	<i>Mycobacterium leprae</i>	Lèpre
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculose
	<i>Rickettsia</i>	Rickettsioses
	<i>Salmonella typhi</i>	Fièvre typhoïde
	<i>Staphylococcus aureus</i>	Infections cutanées, endocardites, ...
	<i>Streptococcus pneumoniae</i>	Pneumonies, méningites
	<i>Yersinia pestis</i>	Peste
Virus	<i>Poliovirus</i>	Poliomyélite
	VHB	Hépatite B
	VHC	Hépatite C
	VIH	SIDA
Parasites	<i>Leishmania</i>	Leishmanioses
	<i>Plasmodium</i>	Paludisme
	<i>Trypanosoma cruzi</i>	Maladie de chagas
	<i>Trypanosoma gambiense</i>	Maladie du sommeil
	<i>Wuchereria bancrofti</i>	Filariose lymphatique
Champignons	<i>Aspergillus flavus</i>	Sécrète l'aflatoxine B1 (cancer du foie)
	<i>Penicillium</i>	Diverses

5.2.3 MECANISMES DE TRANSMISSION VECTORIELLE

La transmission vectorielle d'un agent pathogène biologique se définit comme l'action de faire passer ce pathogène d'un hôte à un sujet réceptif par l'intermédiaire d'un vecteur. Cette transmission peut se faire de manière mécanique, quand le vecteur n'a qu'un rôle de support passif n'assurant pas la multiplication du pathogène, ou de manière biologique, quand le vecteur a servi à la multiplication du pathogène. Les vecteurs sont en général des arthropodes

hématophages qui assurent la transmission d'un vertébré vers un autre, provoquant chez ce dernier des maladies. L'agent pathogène peut être :

- Bactérien, il engendrera des maladies bactériennes comme la borréliose de Lyme, les rickettsioses, ou la peste ;
- Viral, et provoque des viroses, comme la dengue, le zika ou le chikungunya. Un virus transmis par un arthropode est un arbovirus, terme issu de la contraction d'« arthropod borne virus » ;
- Parasitaire, et conduit à des parasitoses comme la maladie de Chagas ou le paludisme.

L'infection est transmise à l'hôte par le vecteur qui s'est lui-même infecté pendant son repas sanguin sur l'hôte. L'agent pathogène va alors se multiplier et se développer dans le vecteur pendant une durée variable, appelée cycle d'incubation extrinsèque à l'issue duquel le vecteur pourra transmettre la maladie. Il existe différents modes de transmission, par pique (maladie de Lyme, paludisme, maladie du sommeil) par les déjections (maladie de Chagas) voire par des régurgitations (dégorgements de la puce dans la transmission de la peste bubonique) (105)

La transmission biologique d'un agent infectieux est un processus relativement complexe car le pathogène doit outrepasser différentes barrières biologiques et survivre dans différents milieux pour compléter son cycle de réplication dans le vecteur. Si l'on s'intéresse par exemple à la transmission d'un arbovirus comme celui de la dengue, ce dernier doit pouvoir traverser la paroi du système digestif du moustique après que le moustique a prélevé son repas sanguin, pour aller dans l'hémolymphe. Il doit ensuite être capable de pénétrer les cellules des glandes salivaires, et une fois réinjecté dans l'hôte, doit pouvoir infecter ses cellules. Cette chaîne d'événements implique pour le virus d'être assez évolué pour pouvoir reconnaître, pénétrer et sortir de différents types cellulaires de deux organismes vivants (le moustique et l'Homme). Ces trois entités sont donc unies par des relations très spécifiques, ce qui explique que les pathogènes sont en général transmis à l'hôte par une seule espèce ou un groupe d'espèces très proches de vecteurs. A titre d'exemple, en Nouvelle Calédonie, parmi toutes les espèces de moustiques présentes, *Aedes aegypti* est le seul moustique vecteur de la dengue (106). Le principal vecteur de la borréliose de Lyme en Europe est la tique *Ixodes ricinus* (107).

5.2.4 PUNAISES DE LIT ET MALADIE DE CHAGAS

La maladie de Chagas, ou trypanosomiase américaine, est une maladie vectorielle endémique en Amérique latine dont les complications chroniques tardives peuvent être fatales. Elle est principalement transmise par les déjections d'un triatome, une sous-famille de punaises (hétéroptères), infectées par *Trypanosoma cruzi*, un protozoaire flagellé. Cette maladie fait des ravages en Amérique latine, mais des cas sont de plus en plus souvent observés en Europe, comme à Paris (108). L'Organisation mondiale de la santé estime qu'elle tue près de 13.000 personnes dans le monde chaque année.

Cette punaise hématophage excrète dans ses déjections de grandes quantités de trypanosomes au moment de ses repas sanguins sur son hôte. A la faveur d'un grattage des lésions dues aux piqûres, les parasites vont pouvoir pénétrer dans la peau ou les muqueuses et contaminer l'homme. Mais d'autres modes de transmission sont possibles, notamment par transfusion de sang de donneurs infectés (108). La maladie de Chagas se présente en 2 phases. La première, la phase aiguë, est le plus souvent asymptomatique et dure environ 2 mois, durant laquelle un grand nombre de parasites circulent dans le sang. Pendant la seconde phase, chronique, les parasites se cachent principalement dans le muscle cardiaque et le

système digestif. Les patients souffrent alors de troubles cardiaques, digestifs et neurologiques. L'infection peut conduire au décès soudain dû à l'atteinte des systèmes cardiaque et nerveux (20,109).

La découverte de ce parasite chez *C. lectularius* ainsi que la relative proximité des deux espèces de punaises a poussé les chercheurs à s'intéresser au potentiel de transmission du trypanosome à l'Homme par les punaises de lit. En 2015, une expérience en laboratoire a permis de démontrer qu'il existait une transmission bidirectionnelle du parasite entre les souris et les punaises de lit : la plupart des punaises nourries sur des souris infectées ont acquis le parasite, et des souris saines furent infectées par le trypanosome lorsque des déjections de punaises porteuses du parasite étaient appliquées sur des plaies cutanées (110). Il apparaît alors que, dans les conditions idéales que représentent celles d'un laboratoire, *C. lectularius* est compétente dans la transmission du parasite à un hôte par l'intermédiaire de ses selles. Sur le terrain, il est cependant exceptionnel que les punaises produisent des déjections sur leur hôte.

Face à l'importante résurgence des infestations de punaises de lit partout dans le monde, une réflexion au niveau international et un approfondissement des connaissances s'imposent afin de faire face à l'émergence de la maladie de Chagas dans les régions non endémiques (111,112), même s'il n'existe, pour le moment, aucune preuve de transmission à l'Homme.

5.2.5 PUNAISES DE LIT ET HEPATITE B

Le virus de l'hépatite B (VHB) est un virus hépatotrope, capable de provoquer des infections et des insuffisances hépatiques aiguës et chroniques chez l'homme. Le virus se transmet facilement par le sang, le sperme et les sécrétions vaginales.

Dès que le virus atteint le foie, il pénètre dans les hépatocytes, et s'y multiplie ce qui provoque l'inflammation du foie. Les porteurs chroniques, qui seraient 280.000 en France, sont exposés à un risque élevé de décès par cirrhose ou cancer du foie, qui font près d'un million de morts chaque année dans le monde (113).

En conditions de laboratoire, le virus a été retrouvé dans les déjections de punaises de lit où il serait capable de persister plusieurs semaines après un repas sanguin contaminé (104,114), mais aucune étude n'a pu prouver sa réplication au cours de cette période (102,104). Le virus n'est pas détectable dans les glandes salivaires des punaises, renforçant l'hypothèse de l'incapacité des punaises de lit à transmettre le virus. Des expériences menées sur des chimpanzés n'ont par ailleurs montré aucune transmission du virus par les punaises de lit (115). Une étude s'est intéressée au lien supposé entre incidence de l'hépatite B chez les enfants en Gambie et les infestations de punaises de lit. Si les vaporisations d'insecticides a permis d'éradiquer les punaises de lit des maisons, elles se révélèrent sans effets concluants sur l'incidence de l'hépatite B dans cette population (102). Il n'y a donc à ce jour aucune preuve tangible de la capacité des punaises de lit à transmettre le virus.

5.2.6 PUNAISES DE LIT ET HEPATITE C

L'hépatite C est une maladie infectieuse du foie qui se transmet essentiellement par voie sanguine, due au virus de l'hépatite C ou VHC. L'hépatite C aiguë peut devenir chronique dans 80 % des cas et entraîner une fibrose du foie, une cirrhose voire un cancer, dont elle serait un

déclencheur (116). L'Organisation Mondiale de la Santé estime que 71 millions de personnes en sont porteuses chroniques dans le monde.

Les punaises de lit nourries en laboratoire sur un sang contaminé par le virus de l'hépatite C ont depuis longtemps été identifiées comme porteuses de ce dernier (103) mais très peu d'études se sont intéressées aux colonies de punaises sur le terrain, jusqu'à récemment. En 2020, des chercheurs se sont penchés sur l'analyse du virome des punaises sauvages et ont découvert le virus chez des punaises de lit récemment nourries et collectées dans des résidences en Europe (117). Le virus était détectable dans les 24 heures après le repas sanguin. Sans en faire une démonstration de la transmission du virus, et s'appuyant sur le fait qu'aucun cas de transmission biologique n'ait jamais été rapporté (102), cette étude met en garde sur le risque potentiel encouru par les populations à haute susceptibilité d'infection : principalement les usagers de drogues injectables qui résident dans des zones à haute densité de population. En effet, une telle situation sociale offrirait la possibilité aux punaises de lit d'interrompre un repas commencé sur un hôte et de le poursuivre sur un autre, augmentant le risque de transmission mécanique du virus (117).

5.2.7 PUNAISES DE LITS ET AUTRES MALADIES BACTERIENNES

Les punaises de lit ont été suspectées de pouvoir transmettre des bactéries résistantes aux antibiotiques, notamment des *staphylococcus aureus* résistants à la méthicilline ou SARM (118). Si les études préliminaires ont hâtivement conclu que ces cocci pouvaient coloniser les glandes salivaires des punaises et s'y multiplier, suscitant un grand intérêt dans la communauté scientifique, elles ont cependant rapidement été contredites. En fait, il semblerait que de nombreux biais d'études aient été passés sous silence ou du moins, qu'une mauvaise interprétation des résultats en avait été faite. Aucune dissection des glandes salivaires n'avait été réalisée, et les seules traces de SARM retrouvées l'ont été dans des extraits homogénéisés de punaises entières (45). On ne pouvait donc exclure le fait que ces bactéries étaient présentes à l'extérieur des punaises et non dans les glandes salivaires. Ainsi, si le risque de transmission biologique du SARM par les punaises reste considéré comme extrêmement faible et mal documenté, le risque de transmission mécanique reste plausible, compte tenu des effractions cutanées qu'occasionnent les piqûres de punaises de lit (118).

Une autre étude de 2013 a isolé des bactéries gram-positives de punaises prélevées sur le terrain (*staphylococcus arlettae*, *S. epidermidis*, *micrococcus* et *Kocuria kristinae*), mais aucune n'était présente dans le contenu du système digestif des punaises de lit (119)

Des punaises de lit nourries artificiellement sur un sang contaminé par *Rickettsia parkeri*, responsable d'une fièvre associée à des maux de tête, des éruptions cutanées et d'une nécrose au site d'inoculation, a montré qu'elle pouvait survivre près de 14 jours dans les punaises de lit mais leur viabilité n'a pas pu être déterminée (120).

Bartonella quintana, responsable de la fièvre des tranchées, peut persister 18 jours dans des punaises nourries sur sang contaminé en laboratoire, peut se transmettre d'un stade à l'autre en survivant aux mues, et être détectée viable dans leurs déjections (121) mais les potentiels mécanismes de transmission à l'Homme n'ont pas été étudiés.

En résumé, si à l'heure actuelle aucune preuve n'a pu être avancée sur le potentiel de transmission de maladie infectieuse à l'homme par les punaises de lit, il sera sage de garder à l'esprit qu'absence de preuve de transmission ne signifie pas preuve de non-transmission, et que des travaux supplémentaires seront nécessaires afin de mieux comprendre l'ensemble des mécanismes impliqués.

5.2.8 POURQUOI LES PUNAISES DE LIT NE SEMBLENT PAS TRANSMETTRE DE MALADIES ?

Face à cette apparente incapacité des punaises de lit à être vecteur de maladies sur le terrain, certains auteurs avancent quelques hypothèses. Les punaises de lit renfermeraient tout un attirail de « substances neutralisantes » qui réduiraient leur potentiel de transmission (44,102).

Par exemple, la salive de *C. lectularius* renferme du lysozyme (44), une protéine aux propriétés antibactériennes prêtées à sa capacité à déstabiliser les membranes bactériennes. Dans une étude visant à étudier le risque de transmission microbienne pendant l'insémination traumatique, lors des cultures des espèces microbiennes en présence, aucune ne provenait du rostre des punaises (48), ce qui tendrait à confirmer le pouvoir antiseptique de la salive.

Le sperme des punaises mâles montrerait des propriétés bactériolytiques (122) et le mésospermalège des femelles aurait une forte activité phagocytaire qui lui assurerait une protection contre la pénétration de microbes pendant l'accouplement (49). Le mésospermalège serait en outre une zone de forte expression de protéines antibactériennes, anti-oxydantes et stimulantes du système immunitaire (49,123) : c'est le cas de *cimex lectularius defensin*, une protéine qui a montré une action antibactérienne sur de nombreuses bactéries telles que *SA*, *S epidermidis*, ou *pseudomonas aeruginosa* (124).

Certains avancent que l'ensemble de ces mécanismes de défense ont en plus permis aux punaises de lit de prospérer dans les milieux riches en microbes, tel que leurs refuges (39). En effet, ce sont des lieux de très forte promiscuité, où les punaises déposent leurs déjections, s'accouplent et muent, où l'exposition aux microbes est logiquement importante et justifiant la présence de mécanismes de défense.

D'autres rappellent que ces mécanismes ne sont pas foncièrement différents de ceux des autres arthropodes vecteurs de maladies, notamment la production de lysozyme, largement répandue (44,125), et ne peuvent pas expliquer à eux seuls le fait que les punaises ne transmettent pas de maladies.

5.3 IMPACT ECONOMIQUE

Il ne fait aucun doute que l'aspect le plus douloureux de la résurgence des punaises de lit, mis à part les piqûres de démangeaisons, a été l'atteinte financière que ces parasites ont causée aux foyers et aux acteurs du tourisme qui ont tenté de contrôler les infestations tout en maintenant leur réputation. Il est tout à fait envisageable que depuis le début de la résurgence des punaises de lit modernes, l'économie mondiale ait subi des milliards d'euros de dommages causés par les punaises de lit (39). L'incapacité à réagir de manière proactive aux infestations a entraîné une augmentation du nombre de punaises de lit, une perte de réputation, une perte de clients, des poursuites judiciaires et une explosion des coûts de contrôle.

En 2011, il a été estimé de manière très prudente que les punaises de lit ont coûté à l'économie australienne au moins 200 millions de dollars australiens depuis le début de la résurgence (102). Peut-être que ces chiffres pourraient fournir des estimations brutes des

coûts pour d'autres pays. Par exemple, la France a une population près de 2,5 fois supérieure à celle de l'Australie et, par conséquent, l'estimation brute du coût financier devient 300 millions d'euros.

Depuis que les punaises de lit sont devenues un sujet populaire dans les médias, les touristes ont pris conscience des régions et des villes du monde gravement touchées par les punaises de lit et évitent de se rendre dans ces régions. Une enquête menée en 2010 auprès de voyageurs a révélé que 12% des répondants étaient tellement préoccupés par les punaises de lit qu'ils ont modifié ou annulé leurs projets de voyage par peur de rencontrer l'insecte (39). Dans certains cas, les voyageurs ont vu leurs vacances perturbées par des punaises de lit et certaines agences de voyage ont dû rembourser leurs dépenses aux clients. Par exemple, une chaîne d'hôtels à Hawaï a dû rembourser à ses clients leur hébergement, leurs billets d'avion ainsi que les frais médicaux lorsqu'ils étaient piqués par des punaises de lit (126). De plus, l'atteinte de la réputation d'un établissement infesté par les punaises de lit peut engendrer de grandes baisses de fréquentation, majorant le manque à gagner.

Pour les particuliers, ces dépenses sont représentées par les frais de désinsectisation (estimés entre 250 et plus de 1500€) (127,128) et le remplacement du mobilier jeté (literie, fauteuils, tapis et autres).

Les espaces publics comme les hôpitaux, les écoles, les cinémas peuvent dépenser de grosses sommes dans la lutte contre les infestations (39)

6 LA LUTTE CONTRE LES PUNAISES DE LIT

6.1 LA SOUDAINE RESURGENCE

Comme nous l'avons vu, *C lectularius* et *C hemipterus* ont depuis presque toujours côtoyé l'Homme jusqu'au fort déclin de leurs populations après la seconde guerre mondiale. Et l'émergence du génie chimique et des nouveaux insecticides ont rapidement initié ce déclin. Mais une soudaine résurgence est observée avec une augmentation des populations, des cas d'infestation et de leur ampleur depuis plus de 20 ans. Les premiers cas rapportés aux États-Unis remontent à 1998 (129), puis en 2000 pour le Royaume Uni et explosent à partir de 2001 en Australie (130) : en trois ans, une entreprise a connu une augmentation de son activité liée aux punaises de lit de 700%. Les premiers signes annonciateurs de la vague sont apparus en 2007 avec 4 rapports d'infestation, contre 67 en 2012 (131).

6.2 DONNEES EPIDEMIOLOGIQUES

Les cas d'infestations sont en augmentation mondiale dans toutes les zones à forte densité humaine : en Asie du Sud-est, au Japon, en Australie ainsi que sur les continents américains, africain et européen (132). Aux États-Unis, ils ont même fait les grands titres de journaux mondialement connus, notamment lorsqu'ils arrivent jusque dans les hauts lieux des grandes villes comme l'Empire State Building ou le siège des Nations Unies à New York (133). Dans l'état du New Jersey, on estime qu'en 2016 plus de 12% des bâtiments abritant des populations à faibles revenus étaient infestés par les punaises de lit (134).

En 2010, la National Pest Management Association a signalé que 95% des sociétés de désinsectiseurs avaient été confrontées à un problème de punaises de lit, contre seulement

25% dix ans plus tôt. Elles étaient 98% au Canada, 92% en Europe et plus de 90% en Afrique et au Moyen Orient (132).

Au Royaume Uni, entre 2010 et 2013, les interventions des autorités locales pour infestation de punaises de lit ont augmenté de 21% (39) et des rapports privés présentent des chiffres en adéquation : la société Ecolab, spécialisée dans l'hygiène, aurait vu une augmentation de 158% de son activité liée aux punaises de lit. Une étude menée dans sept quartiers de Londres a montré une augmentation de 25% du nombre d'appels aux autorités locales concernant les punaises de lit.

En Norvège, en 2007 l'Institut National de Santé Publique rapportait 392 interventions de sociétés de désinsectisation en lien avec les punaises de lit contre 1600 en 2013 et plus de 2500 en 2015 (39).

En France, une enquête menée en 2014 auprès de 68 agences des Services Communaux d'Hygiène et de Santé SCHS et de 51 entreprises spécialisées dans le traitement des locaux (dites entreprises 3D pour Dératisation, Désinfection et Désinsectisation) a indiqué que toutes ont rencontré au moins 1 cas d'infestation par les punaises de lit, et que la tendance était à la hausse (135). En 2020, l'étude PULI a cherché à estimer le taux d'incidence annuel des cas d'infestations vus en consultation de médecine générale en France. Elle a recensé près de 72.000 consultations en lien avec les punaises de lit entre avril 2019 et mars 2020, pour un taux d'incidence estimé à 109 consultations pour 100.000 habitants (136). Des cas sont rapportés de toutes les grandes villes, Paris, Nice et Marseille sont les plus citées. D'après la CS3D (Chambre Syndicale de Désinfection, Désinsectisation et Dératisation), en 2018 pas moins de 400 000 sites, contre 200.000 en 2016-17, étaient infestés (un site peut correspondre à un studio ou un hôtel de 400 chambres).

De manière plus légère et moins formelle, l'utilisation du module Google Trends qui permet de quantifier le nombre de recherches effectuées sur le moteur de recherche le plus utilisé en France apporte des données en adéquation avec l'augmentation des cas : on y voit une croissance nette du nombre de recherches effectuées pour le terme « punaise de lit » signe de l'intérêt croissant du grand public pour cette problématique (figure 32). Je soulignerais l'apparente saisonnalité des recherches, qui connaissent un pic en période printanière et estivale, à mettre probablement en lien avec le cycle de développement des punaises de lit.



FIGURE 32 : EVOLUTION DE L'INTERET POUR LA REQUETE "PUNAISE DE LIT" EN FRANCE ENTRE 2004 ET 2020, GOOGLE TRENDS.

6.3 QUELLES PEUVENT ETRE LES CAUSES DE CETTE RESURGENCE ?

Essayer d'établir les causes de cette importante résurgence est un élément crucial à la mise en place d'une stratégie de lutte efficace. Si elle est due à une méconnaissance de la part du public ou à un faible taux de déclaration auprès des agences spécialisées, alors l'accent devra être mis sur l'information de la population, notamment par la création de campagnes de communication. S'il apparaît qu'elle serait plutôt liée à une augmentation des cas d'importation via l'intensification du tourisme et du transport des marchandises, alors faudrait-il augmenter le nombre d'agents désinsectiseurs et améliorer l'information aux populations aux endroits de forte attractivité touristique ou commerciale. En revanche si le nombre des infestations augmente à cause de la résistance croissante aux traitements insecticides, alors l'attention sera focalisée sur la mise en place de stratégies visant à ne pas l'aggraver, et sur le développement de nouvelles molécules et de moyens de lutte non chimiques. A n'en point douter, la réalité est plus complexe et de nombreux facteurs peuvent entrer en jeu, mais essayons d'en évoquer quelques-uns que nous distinguerons en facteurs humains et facteurs environnementaux.

- Facteurs humains : l'augmentation globale du trafic touristique ne peut se faire sans augmentation du transport passif des punaises de lit. Les punaises de lit peuvent se répandre sur des distances de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres en se glissant dans les valises des voyageurs internationaux, qu'ils prennent l'avion, le train ou le bateau. La punaise de lit tropicale, *C hemipterus*, est d'ailleurs de plus en plus fréquemment retrouvée en dehors de la zone intertropicale, à Marseille (27) comme en Australie (137).

Notons aussi depuis quelques années la croissance du marché de la seconde main : avec un essor de 12% par an, ce sont de plus en plus de vêtements et objets d'ameublement et de décoration qui sont échangés chaque année entre particuliers, avec un risque accru d'infestation.

Il existe très peu de données relatives au niveau de connaissance de la population générale sur les punaises de lit et une thèse de 2015 circonscrite à la région de Poitiers montre que l'échantillon traité n'a qu'une « connaissance partielle de la biologie et de la morphologie » de l'insecte (138). Un sondage mené en Allemagne en 2018 précise que seuls 8,8% des 364 personnes interrogées savaient identifier correctement une punaise de lit et une étude anglaise similaire sur 351 personnes avance 10,2% (139,140). Un bon niveau de connaissance de la population est important afin que les cas d'infestation soient reconnus le plus vite possible : plus les délais d'action sont longs, plus les punaises ont le temps de s'installer et se multiplier, plus le risque de dissémination est important et plus les traitements seront difficiles et coûteux.

- Facteurs environnementaux : si l'augmentation globale de la température moyenne des habitations due aux systèmes de chauffage central a été évoquée au début de cette thèse, elle reste à relativiser car elle n'a pas entraîné l'augmentation de toutes les autres populations d'insectes. Mais il est certain que la régularité des températures thermostatées de nos foyers est adaptée au bon déroulement du cycle de développement des punaises de lit.

Il est probable que le changement des stratégies de lutte contre certains insectes puisse avoir des répercussions sur les populations d'autres insectes : l'abandon d'insecticides à large spectre pour lutter contre les cafards au profit de moyens ciblés aurait été bénéfique à l'expansion des colonies de punaises de lit (141). Enfin, l'apparition de résistances aux insecticides chez les punaises de lit reste considérée

comme une des causes majeures de l'augmentation des cas d'infestation dans le monde (11).

6.4 METHODES DE LUTTE CONTRE LES PUNAISES

Les connaissances sur les punaises de lit s'accroissent et les stratégies de lutte disponibles évoluent. Elles favorisent toutes la mise en place d'une lutte intégrée des insectes qui mise sur un ensemble de moyens mécaniques et chimiques pour se débarrasser des insectes dans le respect de la santé humaine et de l'environnement, abandonnant l'idée de l'utilisation de biocides comme seuls outils disponibles.

La lutte « intégrée » a trouvé racine dans l'incertitude des scientifiques concernant les effets néfastes de l'emploi massif des pesticides et insecticides à larges spectres sur l'équilibre des écosystèmes (142). Ils ont d'abord proposé comme alternative, la lutte biologique, qui emploie des organismes vivants dits antagonistes pour lutter contre certains ravageurs de culture par exemple. En 1948 l'Europe crée la Commission Internationale de Lutte Biologique (CILB), devenue plus tard Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB), pour stimuler la recherche et coordonner les travaux.

L'objectif à atteindre est la suppression totale des punaises du site de l'infestation. Il n'existe pas de notion de seuil résiduel à atteindre (34).

La lutte intégrée prend en considération le recours à une expertise (agence sanitaire ou entreprise privée 3D) qui garantit le bon diagnostic et le bon choix des traitements à conduire, les exigences du clients (notamment les contraintes liées au budget) et le suivi s'assurant du succès des traitements. Pour être efficace, elle doit s'articuler en 6 étapes :

- Détection et diagnostic
- Évaluation de l'infestation : répartition et quantification
- Mise en place d'une lutte mécanique
- Mise en place d'une lutte chimique
- Évaluation de la lutte
- Mise en place d'une prévention

6.4.1 DETECTION ET DIAGNOSTIC

Il convient avant tout de détecter la présence des insectes et de s'assurer qu'il s'agit bien de punaises de lit. Il faut donc savoir ce que l'on cherche et où les trouver. Les punaises de lit sont photophobes, c'est-à-dire qu'elles fuient les sources de lumière, elles ne prennent donc leurs repas que la nuit, les rendant difficiles à voir. De plus, ce ne sont pas des parasites permanents, elles quittent ainsi leurs hôtes entre chaque repas, pour aller se cacher dans leurs refuges, ne facilitant pas leur détection. Enfin, le comportement cryptique leur assure des cachettes quasiment invisibles à nos yeux.

L'interrogatoire épidémiologique du patient, portant sur l'historique des nuisances (date d'apparition des symptômes, date des pics de nuisances) complètera l'interrogatoire clinique, sur le nombre de piqûres, leur localisation et leur fréquence. Ces informations constitueront

une orientation diagnostique et une aide au ciblage des pièces à traiter : si les nuisances sont apparues récemment, l'hypothèse d'une faible infestation sera privilégiée, au contraire si elles datent, on suspectera une infestation plus importante. Les notions de voyage ou déménagement récent, d'introduction de meubles d'occasion ou de fripes sont également importantes à évoquer. La localisation des piqûres constitue une précision utile pour situer dans l'espace les foyers les plus importants : des piqûres récurrentes sur le bras gauche fera penser que les punaises arrivent par le côté gauche du lit. Des piqûres disséminées sur l'ensemble du corps soutiendront l'hypothèse d'une infestation importante.

Le diagnostic de l'infestation ne pourra se faire qu'en présence de l'identification formelle des punaises de lit.

L'ensemble des connaissances requises (identification morphologique de l'insecte, notions d'écologie pour trouver les lieux de cachette, données cliniques sur l'apparence des piqûres, ...) sont autant de freins pour le grand public qui appuie l'importance du recours à l'expertise des sociétés 3D dans leur accompagnement.

6.4.2 ÉVALUATION DE L'INFESTATION : REPARTITION ET QUANTIFICATION

Le professionnel devra s'investir dans une exploration minutieuse et systématique de tous les sites de trajet et de repos, souvent longue et fastidieuse (figure 33).

La première zone d'investigation devra se concentrer sur les lits et autre mobilier de couchage, surtout en cas d'infestation de faible envergure : les punaises de lit étendent leur zone de dissémination avec la taille de la colonie. Elles peuvent se cacher dans les coutures, les plis et fissures du matelas, du sommier, du cadre de lit et de la tête de lit, justifiant souvent un démontage et l'utilisation de matériel spécifique comme une loupe et une lampe torche. Les éléments à rechercher sont les punaises adultes ou juvéniles et les exuvies. Des taches de sang ponctiformes sur les draps sont parfois relevées comme étant indicatrices de la présence des punaises de lit. Leurs excréments, qui sèchent en laissant des taches noires, s'accumulent souvent le long des coutures des matelas et partout ailleurs où les punaises ont résidé.

Les sommiers offrent de nombreuses cachettes, en particulier le long des coutures et aux jointures avec les pieds. Si une protection anti-poussière est présente, elle peut masquer l'accumulation des punaises entre le cadre et la protection et devrait être retirée. Si le cadre est en bois, chaque anfractuosité, trou de visserie et crevasse sera examinée, les punaises ayant une affinité supérieure pour le bois que pour les matériaux synthétiques.

Les canapés, fauteuils et autres chaises rembourrées sont les autres lieux de choix pour l'accueil des punaises de lit. Le démontage des garnitures doit être réalisé quand il est possible et l'inspection des coutures, doublures et éventuelles jupes sera aussi minutieuse qu'avec les couchages. Les tables de nuit, armoires et commodes des chambres pourront être vidées pour être examinées. Les plinthes, les rideaux et leurs tringles, les bibliothèques seront aussi inspectés.

Une attention particulière sera portée au fait que les punaises peuvent tout à fait se déplacer sur les murs ; ainsi les tableaux, les appliques murales, les miroirs, les prises électriques et plaques d'interrupteurs sont autant d'autres cachettes potentielles. Le lambris, les angles supérieurs des pièces sont aussi des lieux privilégiés par les punaises, au même titre que les trous dans le plafond (emplacement des détecteurs de fumée, passage de gaine électrique, ...).

Les professionnels peuvent s'aider dans leur inspection de plusieurs outils :

- des produits débusquants, qui provoquent l'agitation des punaises de lit et les poussent à sortir de leur cachette;
- lampes à UV pour visualiser la fluorescence de certaines protéines, des tests colorimétriques fécaux ;
- des pièges attractifs, pour détecter les punaises passées inaperçues ;
- de chiens formés à la détection canine des punaises de lit : en cas d'infestation importante, une odeur âcre caractéristique peut être émise par les punaises et détectable par un chien entraîné et son maître-chien ;

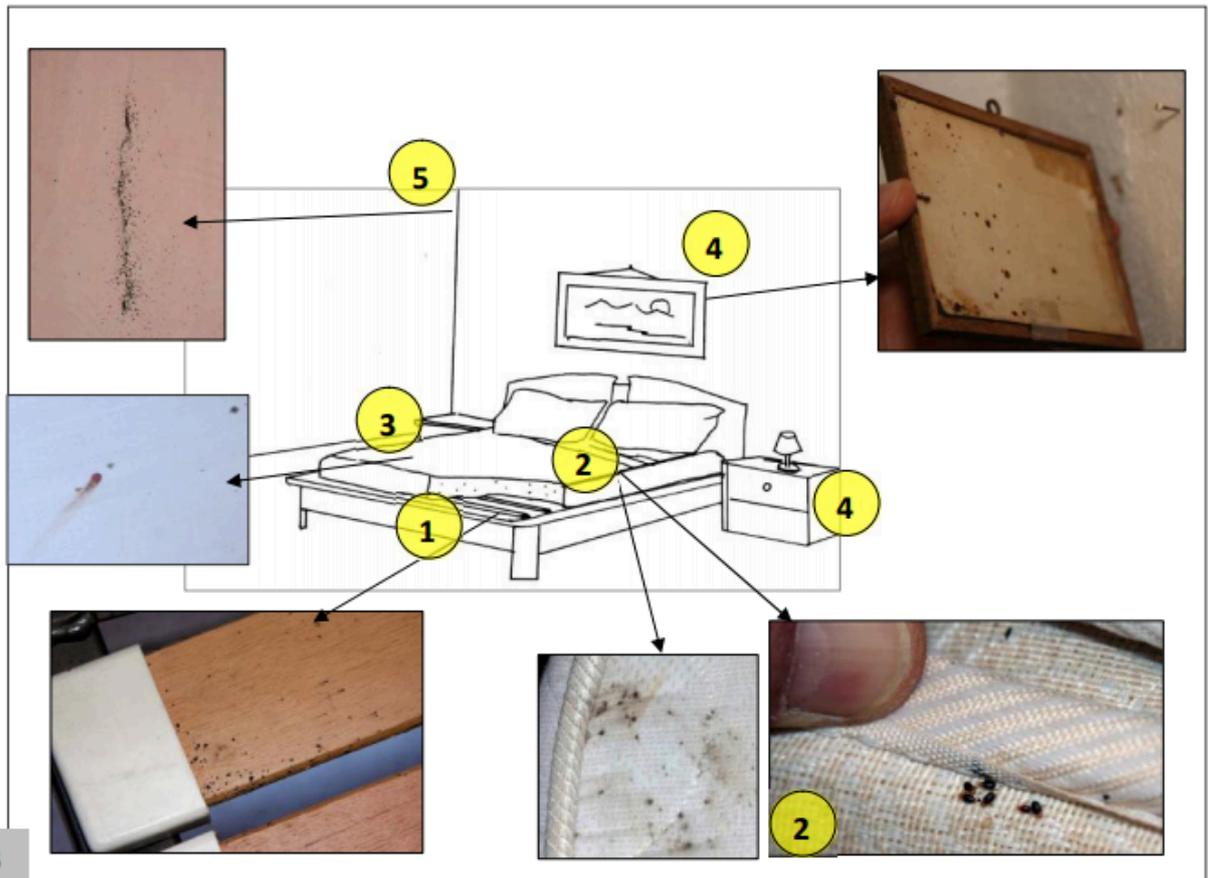


FIGURE 33 : PRINCIPALES ZONES A INSPECTER. 1: LATTE DE SOMMIER; 2: MATELAS ET COUTURES; 3: LINGE DE LIT; 4: MOBILIER PROCHE DU LIT; 5: COINS INFÉRIEURS ET SUPÉRIEURS DES PIÈCES (BERENGER, ARS PACA, 2014)

6.4.2.1 METHODES DE DETECTION DES PUNAISES DE LIT

L'inspection visuelle est un processus long et fastidieux, et en cas d'infestation faible ou débutante il est possible qu'elle ne permette pas la détection des insectes. La personne réalisant cette inspection peut alors d'aider de produits débusquants, de lampes à UV, de pièges attractifs voire même de chiens renifleurs.

6.4.2.1.1 LES PRODUITS DEBUSQUANTS

Les produits débusquants ont pour vocation de provoquer une agitation et une levée de l'agrégation des punaises de lit qui y sont exposées : en sortant de leur refuge, la personne réalisant l'inspection va pouvoir détecter leur présence. Formulés à base de pyréthroides, ils

ont aussi une action insecticide : les punaises débusquées progressent rapidement en dehors de leur cachette pour ensuite mourir. Le K-Othrine du laboratoire Bayer (figure 34) est composé à 25% de deltaméthrine, un insecticide pyréthroïde de synthèse parmi les plus puissants, mais aussi un des plus toxiques pour l'homme et l'environnement (143).



FIGURE 34 : K-OTHRINE® DU LABORATOIRE BAYER, A BASE DE DELTAMETHRINE

6.4.2.1.2 LES LAMPES A UV ET COLORANTS FECAUX

La fluorescence est une émission de lumière provoquée par l'excitation des électrons d'une molécule par absorption d'un photon suivie de l'émission spontanée d'un autre. La cuticule des arthropodes est composée de résiline, une protéine riche en tyrosine qui a la particularité d'émettre une fluorescence lorsqu'elle est stimulée par de la lumière noire (144) (longueur d'onde inférieure à 400nm). Cette protéine est retrouvée à tous les stades vivants de punaises, et reste présente dans les exuvies. Elle a un rôle constitutif majeur, et confère des propriétés élastiques aux tissus qu'elle intègre. Les lampes à UV ne permettent qu'une identification à faible spécificité compte tenu du caractère ubiquitaire de la résiline. Son caractère discriminant sur les punaises de lit ne peut être établi.

Il est possible d'utiliser des colorants fécaux pour une plus grande spécificité. Comme de nombreux autres insectes, les punaises de lit laissent des déjections principalement constituées de sang digéré qui ressemblent à de petites taches de 1 à 3 mm brun-foncé à noirâtre au niveau de leurs refuges et sur les matelas (figure 35). Elles sont émises liquides, de sorte qu'elles sont absorbées par les tissus, et forment de petits amas sur les surfaces non absorbantes.



FIGURE 35 : TACHES ET DEJECTIONS DE PUNAISES (FEDERATION SUISSE DES DESINFESTATEURS, ECOPV2 ; 2017)

L'activité peroxydase de l'hémoglobine du sang contenu dans les fèces va catalyser la réaction d'oxydation du réactif (par exemple la phénolphtaléine) en un produit de couleur différente, révélatrice de la positivité du test. En 2001, le test Kastle-Meyer utilisé en chimie médico-légale a prouvé son efficacité dans la distinction entre les déjections des punaises de lit et celles d'autres insectes, notamment des mouches, cafards, criquets et scarabées (145). Le test consiste en l'oxydation de la phénolphtaléine réduite, incolore, en sa forme oxydée, rose vif. Il est important de préciser qu'un tel test est en fait plutôt spécifique des insectes hématophages, puisqu'il fonctionnera aussi sur les déjections des triatomés. Ce test n'est donc pertinent et spécifique aux punaises qu'à partir du moment où elles ne vivent pas avec d'autres arthropodes hématophages sous le même toit.

Les lampes à UV (figure 36) et les colorants fécaux (figure 37) sont disponibles dans le commerce pour le grand public.



FIGURE 36 : LAMPE A UV DISPONIBLE DANS LE COMMERCE



FIGURE 37 : TEST COLORATION FÉCALE BED BUG BLUE®. L'APPARITION D'UNE TACHE BLEUE SIGNALE LA PRESENCE DE SANG DANS LES DEJECTIONS

6.4.2.1.3 PIEGES ATTRACTIFS

L'utilisation de pièges attractifs est intéressante car elle permet de détecter les punaises passées inaperçues à l'inspection visuelle ou dont on n'a retrouvé que des traces. Dans le cas d'infestations de plus grande ampleur, ils permettent de réduire le nombre d'individus de la colonie et d'améliorer l'efficacité des autres traitements. On distingue deux catégories de pièges : les pièges passifs pour lesquels l'hôte sert d'appât et les pièges actifs, qui renferment un leurre qui va attirer directement la punaise dans le piège (146).

6.4.2.1.3.1 PIEGES PASSIFS

Pour être efficaces, les pièges passifs sont à placer sur le chemin de la punaise entre son refuge et son hôte. Les endroits à privilégier sont donc les pieds du lit, sous les canapés et fauteuils, à proximité des meubles et des rideaux (147). Ce type de piège est muni d'un dispositif s'assurant que les punaises ne peuvent pas s'en échapper : bande collante, agent lubrifiant ou mouillant (146).

6.4.2.1.3.1.1 CARTON GLUANT

Ces pièges en carton aux formes étudiées, sont munis de surfaces collantes qui séquestrent les punaises qui s'y aventurent. Certains ont une forme adaptée pour être placés sous les pieds de lit et de meubles (figure 38), d'autres pour offrir de potentiels nouveaux abris aux punaises (figure 39). Ces pièges uniquement mécaniques sont assez peu efficaces pour lutter contre une infestation de punaises, mais ont l'avantage d'être peu coûteux, faciles à utiliser et à

remplacer (146). Placés en quantité suffisante aux endroits stratégiques, ils permettent de cartographier et quantifier assez précisément les principaux foyers d'infestation.



FIGURE 38 : ECO-KEEPER®, UN EXEMPLE DE PIEGE COLLANT A PLACER SOUS LES PIEDS DE LIT



FIGURE 39 : TRAPPIT BB DETECTOR®, UN EXEMPLE DE PIEGE COLLANT A PLACER SUR LE CHEMIN DES PUNAISES

6.4.2.1.3.1.2 LES SYSTEMES « PITT-FALL »

Très utilisé dans les pays anglo-saxons, ce système simple se compose schématiquement de deux bols de diamètre différent qui s'emboîtent en formant deux zones concentriques, une interne formée par le petit bol et une externe formée par la différence de diamètre entre les deux bols (figure 40). On place le pied de lit ou de meuble au centre, et on remplit les deux zones d'une substance empêchant la fuite des punaises qui y tombent, souvent du talc (son pouvoir extrêmement lubrifiant va empêcher les punaises de remonter les parois du piège) ou de l'eau savonneuse. En effet, le savon mis en solution joue un rôle de tensioactif : il va diminuer la tension superficielle de l'eau exercée sur les punaises à la surface et les empêcher

de flotter. Les punaises coulent alors au fond du piège et se noient. Les punaises qui quittent le lit pour retourner au refuge vont devoir descendre le long du pied du lit et se retrouveront piégées dans la zone centrale tandis que celles qui cherchent à monter vont être captives de la zone externe. Cette méthode possède de nombreux avantages car elle permet de détecter, de quantifier et cartographier la population de punaises, de diminuer le nombre de piqûres et d'évaluer l'efficacité des traitements (146). Stratégiquement placés et numérotés, ils permettent de savoir où se trouvent les refuges les plus importants et de mieux connaître les déplacements des punaises (figure 41). De plus, la structure en deux zones distinctes permet de distinguer les punaises issues de refuges situés dans le lit de ceux situés ailleurs dans la maison.

Ce type de piège est considéré comme plus efficace que l'inspection visuelle (148) pour détecter les faibles infestations et une alternative moins coûteuse et toxique que les pièges actifs, en plus d'être simples d'emploi et écologiques : 7 jours de pièges passifs récoltent le même nombre de punaises qu'une journée de piège à la glace carbonique (149). Ils pourraient représenter un outil particulièrement intéressant dans l'évaluation et le suivi de l'efficacité des traitements : des pièges de moins en moins remplis au fil des renouvellements serait un indicateur du succès de la lutte. En contrepartie, l'utilisateur doit s'assurer que le lit soit isolé dans la chambre et totalement décollé de tout mur ou table de nuit, et qu'aucun drap ne touche le sol pour garantir leur efficacité.



FIGURE 40 : EXEMPLE PIEGE PITTFALL : LE CLIMBUP INSECT INTERCEPTOR®

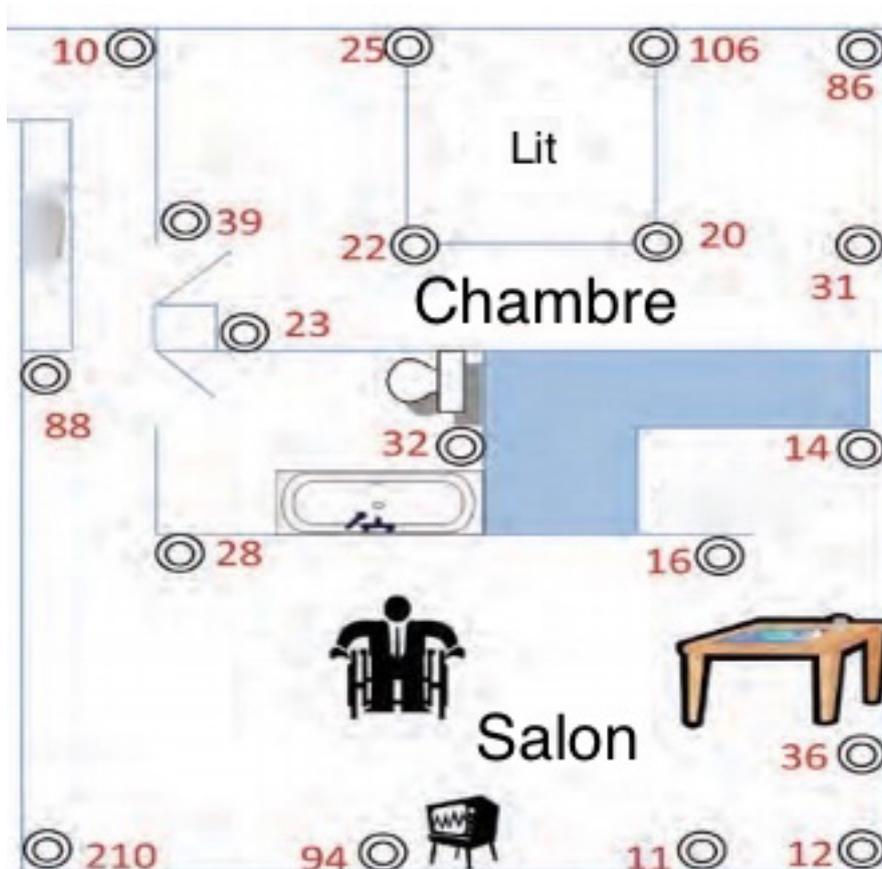


FIGURE 41 : EXEMPLE D'EMPLACEMENTS DES PIEGES PASSIFS. LES DOUBLES CERCLES REPRESENTENT LES PIEGES. LE CHIFFRE ROUGE CORRESPOND AU NOMBRE DE PUNAISES CAPTUREES (COOPER R, WANG C. THE FUTURE OF BED BUGS. NPMA (NATIONAL PEST MANAGEMENT ASSOCIATION, 2015)

6.4.2.1.3.1.3 BANDES ADHESIVES DOUBLE FACE

Certaines bandes adhésives double face existent dans le commerce pour capturer les punaises. En enserrant les pieds de lit et de meuble avec plusieurs tours de cet adhésif, l'accès au lit comme sa descente en seront entravés par l'obstacle collant. Si l'intérêt de ces produits est relatif, notamment car les punaises peuvent parfois traverser la bande sans y rester collées, une étude de 2013 a montré qu'elles pouvaient se révéler très efficaces si elles étaient imprégnées d'une substance insecticide (151)

6.4.2.1.3.1.4 UNE PISTE SURPRENANTE ISSUE DE LA BIO INGENIERIE

En 2013 une équipe pluridisciplinaire de chercheurs s'est intéressée à la capacité de rétention des punaises de lit qu'ont certaines feuilles de fabacées, en partant du constat qu'historiquement dans les pays des Balkans, certaines populations utilisaient les feuilles de haricot vulgaire (*Phaseolus vulgaris*) pour piéger les punaises de lit (152). Ces feuilles étaient dispersées au sol à proximité des lits au moment du coucher et changées tous les lendemains matins, afin d'être brûlées (153). A l'origine de cette propriété naturelle de piège, on trouve sur la surface des feuilles de haricot des trichomes à la forme particulière. Dans le règne végétal, les trichomes sont des excroissances d'origine épidermique aux diverses formes et fonctions, glandulaires ou non, ressemblant le plus souvent à des poils (154). Chez le haricot vulgaire, ces trichomes ont une forme de crochet faisant en sorte qu'ils agrippent et percent les pattes des punaises évoluant sur ces feuilles, les piégeant définitivement (figures 42 et 43).

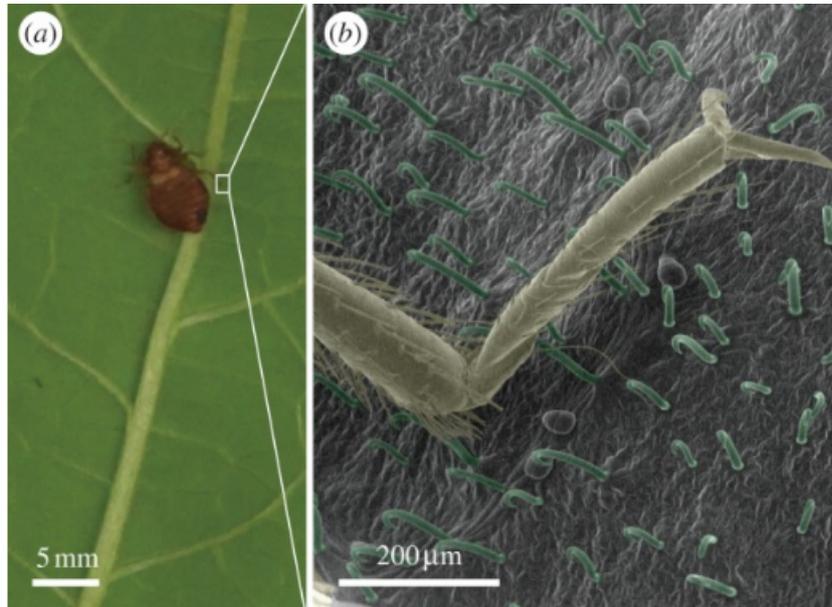


FIGURE 42 : A) UNE PUNAISE DE LIT SUR UNE FEUILLE DE HARICOT VULGAIRE; B) IMAGE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE D'UNE PATTE DE PUNAISE (JAUNE) COINCEE DANS LES TRICHOMES (VERT CLAIR). (SZYNDLER ET AL. ENTRAPMENT OF BED BUGS BY LEAF TRICHOMES INSPIRES MICROFABRICATION OF BIOMIMETIC SURFACES. JOURNAL OF THE ROYAL SOCIETY INTERFACE, 2013)

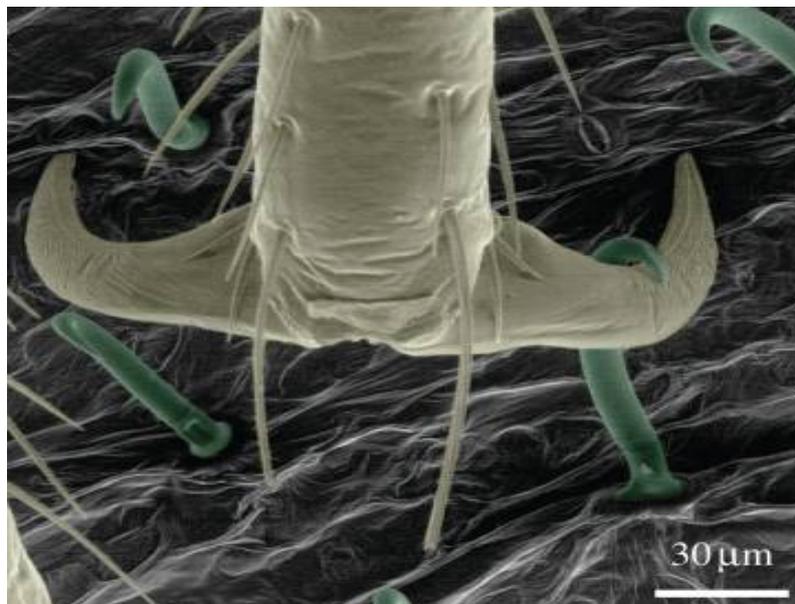


FIGURE 43 : GROS PLAN EN MICROSCOPE ELECTRONIQUE D'UNE PATTE DE PUNAISE SEQUESTREE PAR UN TRICHOME (SZYNDLER ET AL. ENTRAPMENT OF BED BUGS BY LEAF TRICHOMES INSPIRES MICROFABRICATION OF BIOMIMETIC SURFACES. JOURNAL OF THE ROYAL SOCIETY INTERFACE, 2013)

L'équipe de chercheurs s'est alors inspirée de ce mécanisme pour tenter de recréer un dispositif artificiel en polymère qui pourrait reproduire les propriétés de ces feuilles pour en faire des pièges commercialisables et réutilisables. Ils ont réussi à fabriquer des surfaces synthétiques qui imitaient avec précision la géométrie, l'orientation et la disposition des trichomes mais ces surfaces se sont révélées moins efficaces que les feuilles naturelles (153).

Des travaux complémentaires ont été effectués afin d'identifier les zones de faiblesse des pattes des punaises de lit, ainsi que les forces nécessaires au perçage de la cuticule de ces zones (155), autant d'informations utiles au développement de surfaces plus efficaces.

6.4.2.1.3.2 PIEGES ACTIFS

Les travaux de différentes études ont permis d'identifier les différents signaux reconnus par les punaises pour les utiliser à leurs dépens comme leurres dans les pièges actifs. A l'heure actuelle, une bonne partie des différents signaux est connue, parmi lesquels on compte :

- Le CO₂
- La chaleur
- Des phéromones
- Des molécules odorantes de l'hôte

6.4.2.1.3.2.1 LE CO₂

Chaque minute, un être humain adulte produit en moyenne 250 millilitres de CO₂ (156). Le CO₂ est considéré comme le signal attracteur ayant la plus grande influence sur le comportement de recherche de l'hôte chez les punaises de lit (51). Ce gaz expiré par l'hôte pendant son sommeil serait l'indice le plus révélateur de sa présence, en effet la substitution de l'hôte par un générateur de CO₂ provoque une mobilisation des punaises en direction de cette source artificielle. C'est ainsi qu'est née l'idée d'utiliser des sources artificielles de CO₂ dans l'élaboration de pièges attracteurs. Des dispositifs existent dans le commerce, mais il est également possible d'en confectionner soi-même. Le potentiel d'attraction du CO₂ semble lié à son débit de diffusion dans l'atmosphère : plus le débit est élevé, plus l'efficacité des pièges semble importante (156)

6.4.2.1.3.2.1.1 DISPOSITIFS COMMERCIAUX

- Nightwatch© (figure 45) est un dispositif d'émission de CO₂ et de chaleur, sensé mimer la présence d'un hôte humain. Le CO₂ est diffusé à partir de petites bombonnes d'un demi-litre avec un débit variable et la chaleur à partir d'une petite résistance chauffante. Le piège est muni d'un système type Pitt-fall tapissé d'un matériau extrêmement poli interdisant aux punaises piégées de s'en échapper. L'appareil fonctionne branché sur le secteur et est assez coûteux (aux alentours de 500€ sur internet) compte tenu de son efficacité discutable (157) et il faut régulièrement changer les recharges de gaz, qui ne durent que 4 jours. Enfin, il perd son efficacité s'il est utilisé dans une pièce occupée.
- CDC3000® associe la production de CO₂ et de chaleur à d'autres produits attractifs non renseignés. Il n'est actuellement plus distribué.
- Bedbug Beacon® (figure 44) est un système de production de CO₂ sans émission de chaleur, dont le fonctionnement repose sur la production de gaz carbonique par une réaction chimique en mélangeant les réactifs fournis avec de l'eau. Le CO₂ synthétisé est alors conduit à travers un tuyau jusqu'à un système de Pitt-fall sous cloche, qui piègera les punaises leurrées. Ce système est plus économique que le Nightwatch® (on le trouve pour 50€ sur internet) et plus écologique car ne crée pas de déchets ni ne consomme de courant électrique, mais plusieurs pièges doivent être utilisés pour couvrir la surface d'une simple chambre (158).



FIGURE 44 : LE DISPOSITIF BEDBUG BEACON® PAR L'ENTREPRISE PACKTITE



FIGURE 45 : NIGHTWATCH® DE L'ENTREPRISE BIOSENSORY

6.4.2.1.3.2.1.2 DISPOSITIFS MAISON

En se basant sur le principe de fonctionnement du Bedbug Beacon® il est possible de fabriquer soi-même des pièges au CO₂ à partir du moment où l'on peut fabriquer soi-même du CO₂.

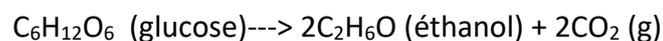
- La glace carbonique ou glace sèche est la forme solide du dioxyde de carbone. Lorsqu'elle se réchauffe et atteint -78°C, sa température de sublimation, le CO₂ qui la

compose passe directement de son état solide à gazeux : on obtient une source inépuisable de gaz carbonique tant qu'il y a de la glace. En mettant cette glace dans une thermos non hermétiquement fermée, elle va lentement se réchauffer et produire du CO₂ en quantité significative. La thermos se justifie par le fait qu'elle permet un réchauffement plus lent de la glace pour une durée d'action plus longue. Il suffit ensuite de placer la thermos sur une gamelle de nourriture pour animaux de compagnie simplement renversée : elle fera office de puits type pitt-fall, qu'un peu de talc saupoudré au fond complètera (figure 46). Dans une étude menée en 2011, Wang et al, ont utilisé un thermos de 1,2L rempli de 400g de glace sèche capable de produire du CO₂ en continu pendant 8 heures à un débit approximatif de 400mL/min. Ce système « fait maison » s'est montré plus efficace que le Nightwatch® et le CDC3000® dans son rôle de détection des punaises de lit (157) pour un coût bien moindre (la glace carbonique est disponible dans le commerce, les prix varient autour d'une moyenne se situant à 30€ les 10 kilogrammes).



FIGURE 46 : PIEGE FAIT MAISON A BASE DE GLACE SECHE (WANG ET AL, BED BUG ATTRACTION TO PITFALL TRAPS BAITED WITH CARBON DIOXIDE, HEAT, AND CHEMICAL LURE. JOURNAL OF ECONOMIC ENTOMOLOGY,2009)

- La fermentation alcoolique est une autre source de CO₂ facilement réalisable à la maison. Elle repose sur la capacité qu'ont certaines levures à transformer les sucres en éthanol et CO₂, selon la réaction suivante :



En mélangeant de l'eau, du sucre de table et de la levure de boulanger (*saccharomyces cerevisiae*) dans un seau, il est possible de produire en continu du CO₂ pendant 8 heures à un débit proche de 400mL/min (159) à l'instar du piège à glace carbonique. Selon le même principe, on place le seau au-dessus d'une gamelle à nourriture retournée pour faire office de piège en y ajoutant un peu de talc. On notera qu'en théorie, la réaction de fermentation étant exothermique, la production de CO₂ sera accompagnée d'une élévation de la température, mais il n'y a aucune preuve qu'elle soit suffisante pour constituer un leurre supplémentaire. L'inconvénient principal de cette méthode réside dans la taille des récipients à utiliser pour pouvoir produire assez de CO₂ : plus on en produit plus le potentiel attracteur sera important.

Dans une étude comparative sur l'influence du débit de CO₂ sur le piégeage des punaises, pour des débits compris entre 100mL/min et 800ml/min, à chaque fois qu'on double le débit, le nombre de punaises attrapées est multiplié par 1,5 (52) soulignant l'importance à apporter à la quantité de CO₂ produite par unité de temps. L'efficacité de ces deux systèmes faits maison est cependant comparable tant que les débits de production du CO₂ sont proches (159) et ils constituent une solution efficace et peu onéreuse dans la détection des punaises de lit.

6.4.2.1.3.2.2 LA CHALEUR

Si la température occupe un rôle important dans la recherche de l'hôte par les punaises, les études de piégeage réalisées jusqu'ici tendent toutes à montrer qu'elle n'a qu'un faible impact comparé aux autres stimuli utilisés par les punaises (52,160,161). Utilisée conjointement avec une source de CO₂, elle n'apporterait même aucun bénéfice dans la capture des punaises (52). Il existe cependant certains dispositifs utilisant des éléments chauffants (souvent une petite résistance électrique) placés au-dessus de coupelles recouvertes de colle (figure 47), voire de simples « chauffeuses » qui produisent de la chaleur au contact de l'oxygène de l'air (figure 48).



FIGURE 47 BUG DOME®, DISPOSITIF EQUIPE D'UNE RESISTANCE ELECTRIQUE



FIGURE 48 : BB ALLER®, "CHAUFFERETTE" ATTRACTIVE

6.4.2.1.3.2.3 LES PHEROMONES ET ODEURS SPECIFIQUES

Il existe de nombreux pièges commercialisés qui utilisent des substances chimiques attractives. Les études qui montrent une efficacité pour ces pièges n'utilisaient pas ces substances seules, mais en combinaisons avec d'autres signaux attractifs comme le CO₂ ou la chaleur : l'utilisation de telles substances (comme l'acide lactique) semble améliorer l'efficacité des autres types de pièges (156).

Un produit comme le First Response Bed Bug Trap® (figure 50) conjugue production de chaleur, de CO₂ et diffusion d'un mélange propriétaire de molécules sensées mimer la présence d'un hôte humain. Une étude de 2012 a estimé que ce type de piège était efficace, mais avait tendance à attirer préférentiellement les punaises juvéniles (162).

De nombreuses recherches portent sur la phéromone d'agrégation des punaises dans le but de pouvoir la reproduire et l'inclure dans des pièges. En 2014 l'analyse de cette phéromone a mis en évidence cinq substances volatiles qui incitent les punaises à se regrouper (163) dont certains fabricants s'inspirent pour concevoir leurs pièges : le Suterra Monitor® (figure 49) utilise un mélange propriétaire de certaines molécules identifiées dans la phéromone pour attirer les punaises vers une zone couverte d'adhésif. Un récent travail vient de découvrir de

nouveaux constituants de la phéromone jouant un rôle dans le comportement d'agrégation, et les interactions entre les différentes molécules composant cette phéromone sont de mieux en mieux connues (59).

Les travaux actuels se concentrent sur les interactions restant mal connues et sur le développement d'une formulation appropriée pour permettre une vitesse optimale de diffusion du leurre pour garantir l'efficacité des pièges dans le temps (59).

On peut penser que de nouveaux mélanges synthétiques mimant au plus près cette phéromone pourront voir le jour et seront intégrés aux pièges déjà existants pour les rendre encore plus efficaces.



FIGURE 48 : SUTERRA MONITOR® DE TRAPPIT



FIGURE 49 : FIRST RESPONSE BED BUG TRAP, DE BIO CARE

6.4.2.1.3.3 LA DETECTION CANINE

Les chiens ont un odorat extrêmement développé par rapport à l'homme : leur épithélium olfactif regroupe jusqu'à 200 millions de récepteurs sur près de 150 cm² contre environ 5 millions sur 5cm² pour l'homme (164). Ces prédispositions font qu'ils peuvent détecter des odeurs à des concentrations très faibles, et sont utilisés à cet effet par l'homme pour l'aider à détecter bon nombre de substances : des armes, des explosifs ou des stupéfiants (164), des personnes ensevelies dans des décombres ou des avalanches (164), certaines maladies comme les cancers colorectaux (165) voire des bactéries comme certaines souches très pathogènes de *Clostridium difficile* (166).

On l'a vu plus tôt, l'inspection visuelle en cas de faibles infestations peut donner de faux négatifs, et l'utilisation de pièges attractifs peut prendre beaucoup de temps puisqu'il faut les poser et attendre que les punaises s'y emprisonnent. C'est pour palier à ces deux défauts que

l'idée de l'inspection canine comme outil de détection a émergé (figure 51). Les punaises dégagent une odeur âcre caractéristique facilement reconnaissable par les chiens entraînés, qui leur permet de ne pas les confondre avec d'autres insectes. Un chien bien entraîné pourra faire la différence entre les punaises et œufs vivants et les punaises mortes, exuvies et amas de déjections qui ne sont pas représentatifs d'une infestation actuelle. Selon les sources, on estime que leur taux de détection varie de 50 à 95% indépendamment du niveau de l'infestation (167). Ces résultats semblent provenir du fait que l'interprétation des signaux du chien est basée sur une méthode observationnelle et comportementale qui implique un haut degré de variabilité dans la pertinence de l'interprétation d'une équipe à une autre (167). D'autres facteurs peuvent entrer en jeu comme la fatigue du maître-chien ou du chien. De plus, les études présentant les plus hauts taux de détection ont été conduites en milieu contrôlé, celles avec les plus faibles taux ont été conduites sur le terrain : il semblerait donc que les conditions environnementales lors de l'inspection influent sur les résultats probablement car d'autres odeurs présentes sur le terrain peuvent interférer.

Compte tenu de leur supériorité dans leur taux de détection et la rapidité à laquelle ils s'exécutent, l'inspection canine se révèle particulièrement adaptée à l'inspection de grandes surfaces comme les hôtels, les cinémas ou des immeubles entiers infestés. Le service est accessible aux professionnels comme aux particuliers mais peut s'avérer coûteux : compter en moyenne 200€ pour un appartement particulier d'une superficie inférieure à 60m².

Le maître-chien doit avoir suivi une formation pour à la fois connaître les punaises de lit et leurs comportements, et savoir reconnaître et gérer correctement les réactions de son chien. Très peu de normes officielles sur la formation et la certification des chiens existent actuellement, seule l'Association Nationale de Lutte Antiparasitaire d'Amérique (NPMA) a publié des textes encadrant ces pratiques (168).



FIGURE 51 : CHIEN RENIFLEUR EN ACTION (COOPER R, WANG C. THE FUTURE OF BED BUGS. NATIONAL PEST MANAGEMENT ASSOCIATION, 2012)

6.4.3 LUTTE MECANIQUE

Les techniques non chimiques ont toujours fait partie de la lutte contre les punaises de lit. La simplification de l'habitat, par exemple en bouchant les fissures, potentiels abris de punaises de lit, en rangeant régulièrement son intérieur et en utilisant un mobilier plus simple et plus durable, en évitant le bois, est une méthode de lutte non chimique historique dont on trouve des traces anciennes (1).

Actuellement, les méthodes de lutte non chimiques contre les punaises de lit comprennent un ensemble diversifié de techniques physiques et mécaniques :

- Établir des barrières entre le parasite et l'hôte
- Empêcher les insectes d'établir des abris
- Éliminer physiquement les punaises de lit
- Créer des conditions environnementales défavorables à l'insecte et qui conduisent à la mort

La définition du terme « non chimique » peut cependant prêter à confusion : certains auteurs considèrent les insecticides naturels, les huiles essentielles et les agents biologiques tels que les bactéries ou les champignons comme moyens de lutte « non chimique » (142). Dans d'autres cas, le contrôle des conditions environnementales pour mettre en synergie des produits insecticides synthétiques peut aussi être considéré comme une méthode non chimique (169). La définition du « non chimique » peut de plus être compliquée par certains aspects réglementaires : par exemple en Europe, la terre de diatomée n'est plus considérée comme substance chimique depuis la révision de la liste des pesticides en 1997 (170) mais reste considérée comme telle aux États-Unis, au Canada et en Australie. Nous considérerons que toute manipulation qui affecte une population de punaises de lit sans l'utilisation de liquide, poudre ou gaz insecticide est « non chimique ».

La lutte non chimique est un volet primordial de tout programme de lutte intégrée (88). Ce type d'intervention nécessite très souvent de manipuler le mobilier et de rendre accessible l'ensemble des recoins infestés.

6.4.3.1 ÉTABLIR DES BARRIERES ENTRE L'HOTE ET LES PUNAISES

L'établissement de barrières physiques entre l'hôte et l'insecte lui assure une privation d'accès à sa nourriture entraînant à terme la mort. A cet effet, si le matelas héberge des punaises de lit, des housses spéciales pourront être recommandées (148). L'enveloppe doit être correctement déployée, résistante aux morsures et rester en bon état pour que les punaises de lit meurent de faim, ce qui peut nécessiter plusieurs mois (62,171). Les systèmes de fermeture éclair qui les équipent doivent avoir des dents de petites tailles assurant le moins de jeu possible. La fermeture doit en plus être sécurisée aux extrémités car les jeunes stades de punaises de lit peuvent s'échapper au point de fermeture de la glissière. En 2012 une évaluation de produit d'une marque de housses de matelas a révélé que lorsque la housse était utilisée conformément aux instructions sur l'étiquette (en d'autres termes, qu'elle était correctement placée, adaptée à la taille du matelas et complètement fermée), les punaises de lit juvéniles et adultes étaient incapables de s'échapper de la housse pendant la période d'essai de quatre semaines (172).

Les pièges attractifs placés sous les pieds des meubles et du lit évoqués plus tôt comme détecteurs contribuent aussi à jouer un rôle de barrière entre les insectes et l'hôte.

6.4.3.2 EMPECHER LA CREATION DE NOUVEAUX ABRIS

Le comportement cryptique des punaises de lit fait qu'elles sont attirées par les endroits tortueux et reclus, peu accessibles et souvent cachés : fissures dans les meubles, les plinthes ou le sol, anfractuosités dans les murs pour le passage de gaines de ventilation ou du réseau électrique. Historiquement, on conseillait de garder son intérieur rangé, d'éviter les amoncellements d'objets ou encore de privilégier des cadres et pieds de lit en métal plutôt qu'en bois (1). Actuellement, on recommande, en plus, de sceller les fissures et autres supports de prises électriques murales avec un joint de silicone (173). Des recommandations supplémentaires pour simplifier l'espace de vie comprennent l'utilisation de revêtements de sol et de murs scellables, tels que du carrelage au lieu de la moquette et d'éviter les lambris et autres tapis (88). Puisqu'on sait maintenant que les punaises de lit sont très attirées par les vêtements sales ou utilisés et ont tendance à s'y agréger pour former un nouveau refuge (56) il conviendra de ne jamais laisser de vêtements au sol ; le voyageur qui utilise sa valise pour y stocker son linge sale veillera à la surélever et à la refermer. On considère utile que les hôtels et structures accueillant des voyageurs fournissent des supports pour les bagages et encouragent leurs clients à les utiliser. Ces supports permettent de ne pas laisser les bagages à même le sol en les maintenant à distance du lit (173).

Puisque le matelas est probablement l'emplacement de prédilection des refuges de punaises de lit, les housses précédemment évoquées vont aussi permettre de protéger un matelas non infesté ou neuf, des tentatives d'installation de punaises de lit, notamment en cas de déménagement dans un nouvel appartement.

6.4.3.3 ELIMINER PHYSIQUEMENT LES PUNAISES

L'utilisation de méthodes mécaniques, comme le brossage, le lavage et l'aspiration des sols et surfaces assure l'élimination « du gros » des infestations mais ne seront pas suffisantes. Il pourra être recommandé de se débarrasser totalement des objets infestés, d'utiliser de la terre de diatomée. L'utilisation de prédateurs naturels des punaises de lit est une piste à envisager bien qu'elle ne soit pas encore développée.

6.4.3.3.1 ASPIRATION

Cette méthode a démontré son efficacité notamment dans les programmes de lutte contre les blattes allemandes (174). Elle permet d'éliminer les stades larvaires, adultes et les exuvies mais est peu efficace sur les œufs puisque ces derniers sont scellés à leur support par des sécrétions de la mère au moment de la ponte. En débarrassant les sols des poussières et des débris organiques, l'aspiration permet en outre la simplification et l'assainissement des microhabitats, ce qui permettra d'optimiser la diffusion d'éventuels insecticides et d'améliorer leur effet résiduel (88). Un autre avantage potentiel de l'aspiration est la réduction des allergènes issus des insectes, comme les fragments d'exuvie, suspectés de pouvoir déclencher des réactions d'asthme allergique (85,87). Il faut pour cela que l'aspirateur soit équipé d'un filtre HEPA (Haute Efficacité pour les Particules Aériennes), type de filtre à air capable d'éliminer 99,97% des particules de 0,3 microns de diamètre.

L'utilisation d'une buse d'aspiration est préconisée pour aspirer efficacement le long des tapis et des murs, les coutures des matelas, les jupes du mobilier, les chutes de rideaux et dans les fissures ou anfractuosités peu accessibles.

Si l'aspirateur est muni de sacs de récupération, ceux-ci seront immédiatement retirés après usage et scellés dans un sac plastique hermétique, puis idéalement incinérés (88). Si l'incinération est impossible, on pourra éventuellement saupoudrer dans les sacs une poudre

insecticide ou de la terre de diatomée, voire du talc (127). Il est important que l'aspirateur ne devienne pas une source d'autres infestations : il doit donc être correctement « désinsectisé » après son utilisation, tubulures comprises, et n'être utilisé dans l'idéal qu'uniquement pour la lutte contre les punaises. Pour ce faire, on pourra aspirer une petite quantité d'insecticide en poudre ou de terre de diatomée (127). Enfin, l'aspirateur devrait être stocké lui aussi dans un sac plastique hermétique entre chaque utilisation (88).

6.4.3.3.2 LE BROSSAGE DES SOLS ET SURFACES

Si le brossage des sols et surfaces peut avoir l'avantage de décrocher les œufs et les amas de déjections séchées en vue d'une aspiration, il peut être la source d'une dispersion de l'infestation s'il dissémine des œufs viables aux quatre coins de la pièce (88). Lorsque les surfaces à brosser sont facilement déplaçables, il est recommandé d'effectuer le brossage dans une zone tenue à distance du site de l'infestation comme le jardin, ou plus idéalement dans la salle de bain au-dessus de la baignoire à moitié remplie d'eau savonneuse (127). Le savon agit comme un agent tensioactif qui va réduire la flottabilité des éventuels œufs qui tomberaient à la surface de l'eau.

6.4.3.3.3 LE LAVAGE DES SOLS

Le lavage à l'eau est rarement mis en œuvre, mais permet de se débarrasser des résidus de déjections séchées et des œufs non décrochés par le brossage ou l'aspiration. Compte tenu que le lavage peut aussi contribuer à la dispersion des œufs, il faudrait qu'il soit suivi d'une aspiration supplémentaire et ne soit pas effectué sur de trop grandes surfaces. Dans le cas où les meubles ont été enlevés et où le sol est résistant, un lavage total à grande eau avec récupération des eaux usées peut être envisagé (127).

6.4.3.3.4 ÉVICTION DES OBJETS INFESTES

L'élimination complète des meubles et objets infestés simplifie à la fois la zone et élimine les punaises de lit de l'espace de vie. C'est une pratique très couramment utilisée par les particuliers qui agissent souvent hâtivement par peur des coûts engendrés par l'intervention de professionnels. Cependant, cette méthode peut se révéler être une source de contamination secondaire si les objets jetés sont récupérés et réintroduits dans d'autres domiciles (175). Tous les objets infestés ne doivent pas être systématiquement jetés, certains pouvant être traités. Par exemple, un matelas en bon état sujet à une infestation de punaises de lit peut facilement être désinsectisé, d'autant plus que les punaises ne peuvent se réfugier qu'à sa surface. En effet, elles n'ont pas la possibilité de creuser ni de percer les tissus et ne pourront pas se disperser à l'intérieur du matelas. L'utilisation d'une housse spécifique évoquée plus haut peut permettre d'assainir le matelas.

L'éviction en bonne et due forme d'un meuble infesté, quand elle est non évitable, doit respecter certaines conditions : le meuble doit être emballé dans des sacs hermétiques et si possible être étiqueté comme impropre à sa réutilisation, ou rendu comme tel en le cassant ou le démontant. Quand l'emballage est impossible ou que l'encombrement est important, prévenir les services municipaux en charge de la collecte des encombrants de la nature de cette éviction est un prérequis assurant une bonne prise en charge et un temps d'exposition sur les trottoirs réduit, limitant le risque de récupération.

6.4.3.3.5 UNE PISTE A EXPLORER : LA LUTTE BIOLOGIQUE

On entend par lutte biologique l'ensemble des méthodes utilisant l'introduction de prédateurs, de parasites ou de microorganismes pour diminuer ou éradiquer des espèces considérées comme nuisibles.

La punaise de lit connaît de nombreux prédateurs et parasites naturels (177), dont les plus connus appartiennent à la classe des arachnides ou la famille des réduves ou des fourmis pour les prédateurs et aux champignons et bactéries pour les parasites. (Figure 52)

1. PARASITES

<p>RICKETTSIAE</p> <p><i>Wolbachia lectularia</i> (= <i>Rickettsia lectularia</i>) <i>Cimex lectularius</i> (in gut, not pathogenic) (Arkwright, Atkin & Bacot, 1921).</p> <p>BACTERIA</p> <p><i>Bacillus anthracis</i> <i>Cimex</i> sp. (penetrates gut wall, causing generalized infection of haemolymph with resultant heavy mortality) (Rosenholz & Owsjannikova, 1929). <i>Salmonella avium</i> <i>Cimex lectularius</i> (some die shortly after feeding on septicaemic animal) (Oye, 1942).</p> <p>FUNGI</p> <p><i>Aspergillus flavus</i> <i>Cimex lectularius</i> (causes death of immature and adult</p>	<p>bugs; at 30°C a colony was destroyed in 18 days) (Cockbain & Hastie, 1961).</p> <p>PROTOZOA</p> <p>MASTIGOPHORA</p> <p><i>Herpetomonas donovani</i> <i>Cimex lectularius</i>; <i>C. rotundatus</i> (Patton, 1913). <i>H. tropica</i> <i>Cimex hemipterus</i> (has intracellular stage in gut) (Patton, LaFrenais & Rao, 1921). <i>Trypanosoma rangeli</i> <i>Cimex lectularius</i> (highly pathogenic; invasion of haemolymph is rapid) (Grewal, 1957).</p> <p>SPOROZOA</p> <p><i>Nosema adiei</i> <i>Cimex rotundatus</i> (in gut and salivary glands) (Christophers, 1922; Shortt & Swaminath, 1924; Weiser, 1961).</p>
---	---

2. PREDATORS

<p>CHILOPODA</p> <p><i>Scutigera forceps</i> <i>Cimex lectularius</i> (Marlatt, 1916).</p> <p>PSEUDOSCORPIONIDA</p> <p><i>Chelifer cancroides</i> <i>Cimex lectularius</i> (Chevalier, 1929; Frickhinger, 1919).</p> <p>INSECTA</p> <p>(1) HYMENOPTERA</p> <p>FORMICIDAE</p> <p><i>Monomorium pharaonis</i> <i>Cimex lectularius</i> (Marlatt, 1916). <i>Solenopsis geminata rufa</i> <i>Cimex</i> sp. (ants used to free clothing and furniture of bedbugs) (Negi, 1933). <i>Thanatus flavidus</i> <i>Cimex lectularius</i> (controlled bedbugs in rooms) (Hase, 1930, 1933, 1934). <i>Cimex</i> (completely eradicated bedbugs in Greek refugee camps in 1925) (Lorando, 1929).</p>	<p>(2) HEMIPTERA</p> <p>PENTATOMIDAE</p> <p><i>Picromerus bidens</i> <i>Cimex lectularius</i> (recommended for bedbug control in Europe in 1776) (Clausen, 1940).</p> <p>REDUVIIDAE</p> <p><i>Ploiaria domestica</i> <i>Cimex</i> sp. (Roubaud & Weiss, 1927). <i>Reduvius personatus</i> (larvae) <i>Cimex lectularius</i> (Chevalier, 1929).</p> <p>(3) LEPIDOPTERA</p> <p>PYRALIDAE</p> <p><i>Pyrallis pictalis</i> <i>Cimex hemipterus</i> (preys on eggs; in India, control by DDT as side effect of malaria eradication programme is associated with increase in bedbug incidence) (Wattal & Kalra, 1960).</p>
---	---

FIGURE 52 : LISTE DES PARASITES ET PREDATEURS DES PUNAISES DE LIT (BULLETIN WORLD HEALTH ORGANISATION, 1964, PMC2554706)

La mise en place de programmes de lutte biologique nécessite de comprendre les interactions entre les organismes vivants entre eux, et avec leur environnement. L'introduction d'un auxiliaire de lutte biologique devrait toujours se faire après une étude préalable des conséquences potentielles de cette introduction sur le milieu et les habitants humains ou animaux qui l'occupent.

6.4.3.3.5.1 QUELQUES PREDATEURS

Steatoda bipunctata (figure 53), une araignée des zones tempérées, est citée par Povolny en 1966 pour avoir détruit une colonie de punaises de lit infestant des chauves-souris dans un château près d'Austerlitz (1). Une autre araignée, *Thanatus flavidus* (figure 54), possède une réputation de « mangeuse de punaises de lit » fondée sur l'observation d'une diminution

drastique de la population de punaises après l'introduction de l'araignée au sein de deux appartements infestés (178). On trouve régulièrement aux USA des pétitions soumises à la Maison Blanche en faveur de l'introduction sur le sol américain de cette espèce d'araignée pour lutter contre la résurgence des infestations de punaises (179).



FIGURE 53 : STEATODA BIPUNCTATA (DONALD HOBERN, 2009, LICENCE LIBRE)



FIGURE 54 : THANATUS FLAVIDUS (JESSE RORABAUGH, 2013, LICENCE LIBRE)

Reduvius personatus L., ou le réduve masqué (figure 55), est une espèce de punaise carnivore prédatrice de nombreuses autres espèces d'arthropodes dont les punaises de lit (1,180), les mouches ou les mites. Ce comportement de prédation est connu depuis longtemps, Linnée l'a décrit dès 1758 et de nombreux autres ont également pu l'observer (180). Le papillon *Pyralis pictalis* (figure 56) se nourrit des œufs de punaises de lit, mais cet insecte est également un ravageur courant du secteur de l'agriculture (181). Dans la nature, la prédation des fourmis (divers espèces) sur les punaises des hirondelles, *Oeciacus vicarius*, a été observée (182), et la fourmi de feu *solenopsis invicta* (figure 57) , dont la morsure occasionne des brûlures et démangeaisons très douloureuses chez l'homme, aurait éliminé une colonie entière de punaise de lit infestant un matelas mis au rebut (39).



FIGURE 55 : *Reduvius personatus*, (CRADLEY M, 2012, LICENCE LIBRE)



FIGURE 56 : *Pyralis pictalis* (BERNARDO B, LICENCE LIBRE)



FIGURE 57 : *Solenopsis invicta* (APRIL NOBILE, 2016, LICENCE LIBRE)

L'utilisation des prédateurs contre les punaises de lit dans les résidences reste limitée car bien souvent les prédateurs sont également considérés comme des nuisibles et dans le cas de la fourmi de feu, un nuisible invasif à fort impact sur les écosystèmes (183)

6.4.3.3.5.2 QUELQUES PARASITES

Des documents historiques ont répertorié de nombreuses espèces de bactéries, de champignons et de prédateurs qui affectent les punaises (184) mais certains des agents pathogènes cités comme efficaces sont également des agents pathogènes graves pour l'homme.

Aspergillus flavus peut infecter et provoquer la mort des stades mobiles de punaises de lit si les conditions environnementales le permettent : à 30°C une colonie a été décimée en 18 jours (177). Plus récemment, les champignons entomopathogènes *Beauveria bassiana* (185) et

Metarhizium anisopliae (186) ont été testés in vitro et se sont révélés efficaces contre les punaises de lit mais des essais sur le terrain doivent être menés afin de déterminer les plages d'humidité auxquelles les spores fongiques seraient actives. Alors que *M. anisopliae* n'était efficace qu'à des taux très importants d'humidité relative (98%), *B. bassiana* a montré une activité à 50% HR, un niveau d'humidité plus proche de celui de nos espaces de vie. Parasites des punaises de lit de longue date, les champignons auraient conduit les punaises à développer des moyens de défense spécifiques : la phéromone d'alarme des punaises de lit aurait d'intéressantes propriétés d'inhibition de la croissance de *M. anisopliae* (186).

Serratia marcescens, *Pseudomonas fluorescens*, et *Bacillus thuringiensis israelensis* sont trois bactéries considérées comme pathogènes mortels pour les punaises de lit (187). *Bacillus anthracis* peut traverser la barrière intestinale et provoquer des infections massives de l'hémolymph entrainant une forte mortalité (177).

En l'état actuel des connaissances, la complexité de la relation entre les champignons entomopathogènes, les bactéries, l'environnement et l'insecte nécessite des études supplémentaires pour pouvoir devenir une méthode pratique de lutte contre les punaises de lit, d'autant plus que certains agents pathogènes des punaises de lit peuvent provoquer de graves infections chez l'homme.

6.4.3.4 CREER DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DEFAVORABLES A L'INSECTE

Un certain nombre de méthodes ont été développées pour créer des conditions environnementales défavorables aux punaises de lit pour le contrôle des infestations à petite et à grande échelle, en agissant principalement sur le paramètre « température ».

L'utilisation de la vapeur a été l'une des premières techniques utilisées pour compléter ou remplacer les insecticides lors de la résurgence des punaises de lit, à partir du début des années 2000. Plus tard, des méthodes utilisant une chaleur sèche ont été développées. D'autres techniques existantes ont ensuite été adaptées pour lutter contre les punaises de lit comme la congélation ou l'utilisation de la machine à laver le linge et du sèche-linge.

Tous les insectes ont une gamme de température et d'hygrométrie optimales pour la croissance et le développement, et pour la punaise de lit cette plage va d'environ 20 à 30°C. Au-dessous ou au-dessus de cette fourchette optimale, les punaises de lit peuvent survivre, mais la croissance, le développement et la fécondité seront affectés (64).

Le but de ces méthodes sera soit d'exposer les punaises à un environnement défavorable à sa survie suffisamment longtemps pour provoquer la mort, soit de les exposer à un environnement extrême, directement létal.

6.4.3.4.1 UTILISATION DE LA CHALEUR

6.4.3.4.1.1 VAPEUR

Les générateurs de vapeur (également appelés « nettoyeurs à vapeur ») ont été adaptés pour lutter contre les punaises de lit dès 2001 en réponse aux échecs de traitements dus à la résistance des punaises de lit aux pyréthrinés et aux pyréthrinoides. Le principal avantage de la chaleur réside dans sa capacité à tuer aussi bien les stades mobiles que les œufs.

Les températures atteintes immédiatement après le passage de la buse à vapeur doivent être comprises entre 70 et 80°C (88) de manière à s'assurer que la température létale de la punaise soit atteinte à l'intérieur de l'insecte. Différents appareils existent dans le commerce et sont principalement conçus pour nettoyer les sols ou défroisser le linge. Les nettoyeurs de sol permettent en général d'atteindre des températures de vapeur plus élevées mais sont aussi plus onéreux.

Le professionnel pourra s'aider d'un thermomètre à infrarouge pour vérifier périodiquement la température des surfaces exposées à la vapeur et s'assurer qu'elles restent dans la gamme voulue. Des accessoires plus gros (comme une brosse de sol plutôt qu'une brosse triangulaire plus petite comme on en trouve sur les défroisseurs de linge) diffusent en général la vapeur à travers une plus grande surface et risquent d'être moins efficaces. Il faudra être vigilant à ralentir les mouvements ou augmenter le débit de vapeur. Le débit de vapeur doit être contrôlé pour éviter de souffler les punaises de lit et les exuvies qui peuvent contenir des œufs et des nymphes et veiller à l'orientation de la buse de vapeur. Utilisée sur des matelas, la buse doit toujours être dirigée vers le centre du matelas où les insectes propulsés peuvent être vus et passés à la vapeur s'ils sont encore vivants. Pour réduire le risque de souffler des punaises de lit, dans la mesure du possible toutes les zones destinées au traitement à la vapeur devraient d'abord être aspirées (88).

Il est important que la vapeur soit appliquée directement sur les insectes car même une fine couche de tissu peut les protéger.

Comme pour toute technologie, la vapeur a ses limites. Étant à base d'eau, l'électrocution est un problème potentiel et, par conséquent, les prises électriques et autres équipements électriques ne doivent pas être traités à la vapeur. La vapeur peut endommager les matériaux sensibles à la chaleur et à l'eau. De plus, la vapeur augmentera drastiquement l'humidité dans une pièce, ce qui peut entraîner la croissance de moisissures et d'autres problèmes de santé. Enfin, l'augmentation de température dans les pièces traitées à la vapeur expose au risque de propagation de l'infestation car les punaises chercheront à rejoindre des espaces plus frais (45).

6.4.3.4.1.2 CHAUFFAGE DES MEUBLES ET OBJETS OU DE L'HABITATION

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un appareillage de chauffage qui diffusera la chaleur dans toute une pièce d'une habitation (figure 58), ou dans un container séparé voire une petite étuve transportable semblable à une tente.

Le chauffage de toute une pièce présente des avantages certains, car cela demande une préparation minimale et une grande partie des meubles peut être simplement laissée en place, y compris la plupart des vêtements des résidents. Ces traitements thermiques nécessitent généralement un temps de fonctionnement de 6 à 8 heures, bien que cette estimation dépende de la puissance du système de chauffage, du volume de la pièce à chauffer, de l'efficacité de la diffusion de la chaleur et du système de ventilation. (39)

Cette méthode est déconseillée aux particuliers compte tenu du risque d'incendie associé, surtout lorsque le système de production de la chaleur utilise la combustion de liquides inflammables. Si elle est mal faite, l'augmentation de la température fera fuir les punaises vers des zones plus fraîches exposant à un risque de dissémination de l'infestation. Des mesures de diminution de ce risque devront être mises en place comme le calfeutrage des issues et des systèmes de ventilation des habitations. De plus, la principale cause d'échec des traitements de pièces entières à la chaleur réside dans le fait que les punaises se sont réfugiées

dans des coins où la température n'a pas pu atteindre le seuil requis, au sein même de la pièce. Des systèmes de ventilation adaptés seront nécessaires. Ainsi le fait de simplement chauffer l'air ambiant à plus de 45°C et de laisser le temps faire n'est pas une méthode de contrôle efficace.



FIGURE 58 : TRAITEMENT THERMIQUE D'UNE PIECE ENTIERE AVEC UN GENERATEUR DE CHALEUR ELECTRIQUE (DOGGETT ET AL, ADVANCES IN THE BIOLOGY AND MANAGEMENT OF MODERN BED BUGS, 1ERE EDITION, JOHN WILEY & SONS ED. 2018)

L'utilisation d'un box ou d'un container implique de déplacer les objets infestés de leur emplacement et de les placer dans une enceinte close ou un conteneur renfermant des radiateurs et des ventilateurs. Différents types d'enceintes sont utilisés allant du conteneur d'expédition à la tente hermétique portable (figure 59). Le volume d'air à chauffer est fixe et bien moins important que pour une pièce entière, facilitant la garantie de températures élevées et stables. De plus, la concentration des objets infestés dans une même enceinte permet d'éviter le chauffage inutile de grands espaces où peu d'objets seront infestés (halls d'hôtels par exemple). Enfin, le risque de dissémination est réduit puisque les enceintes sont étudiées pour limiter la fuite des insectes.



FIGURE 59 : ZAPPBUG ROOM®, UNE TENTE HERMETIQUE ET TRANSPORTABLE

6.4.3.4.1.3 UTILISATION DE LA MACHINE A LAVER ET DU SECHE LINGE

Le lavage à chaud des vêtements à des températures supérieures à 60 ° C, ou le placement des vêtements dans un sèche-linge à plus de 40 ° C pendant au moins 30 minutes, est recommandé (189). Il faudra veiller à ne pas surcharger les machines pour permettre une bonne diffusion de la chaleur.

6.4.3.4.2 UTILISATION DU FROID

Les températures froides peuvent également être mortelles pour les punaises de lit. Les premières estimations des conditions létales pour les punaises de lit décrivaient des expositions à -17 ° C pendant 2 h et à -18 ° C pendant 1 h (6). Les études qui suivirent ont établi que le point de congélation des punaises de lit se situait aux alentours des -20°C et que les adultes ne survivaient pas à -16 ° C pendant 1 h (190). Une étude plus complète sur l'exposition des punaises de lit au froid a révélé que les œufs et les nymphes de premier stade à jeun avaient un point de congélation de -29 ° C, et la survie pouvait survenir après de courtes expositions à des températures aussi basses que -25°C (66)

Le froid présente l'avantage que les matériaux sensibles à la chaleur ne seront pas endommagés. Tout article à congeler doit être placé dans un sac qui sera mis au congélateur. Pendant une durée qui dépend de la taille de l'article ; plus il est gros, plus le temps de congélation est long. Si le congélateur fonctionne à -20 ° C, on estime que deux heures à cette température tueront tous les stades (67). Cependant, le temps d'exposition étant une donnée cruciale, si les objets peuvent le supporter, on conseillera de les laisser 24H voire 48h pour s'assurer que la température soit la même en tout point de l'enceinte du congélateur.

Il existe aussi des systèmes de refroidissement par pulvérisation d'azote liquide ou de glace sèche (figure 60). Le dioxyde de carbone ou l'azote appliqué sur les surfaces expose les punaises de lit à des températures inférieures à -78,5 ° C, ce qui est bien en dessous de ce qu'elles peuvent supporter. Cette méthode ne laisse pas de résidus sur les surfaces traitées et permet de désinsectiser les appareils électroniques. Le principal inconvénient de ces

méthodes est que le froid est diffusé sous pression, ce qui peut là encore disperser par soufflage les punaises visées et disséminer l'infestation si elles survivent (191). Cette méthode est par conséquent de moins en moins utilisée.

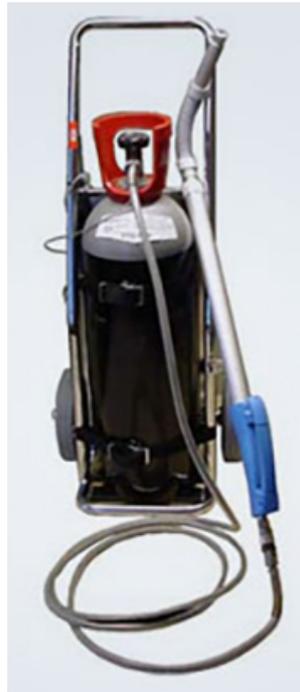


FIGURE 60 : LE SYSTEME PORTATIF CRYONITE® DELIVRE DU CO₂ GAZEUX A -78°C

6.4.3.4.3 ATMOSPHERES PARTICULIERES

6.4.3.4.3.1 FAVORISER L'ANOXIE

Ces méthodes cherchent à priver les punaises de lit de dioxygène pour les faire mourir d'anoxie. Faire le vide dans un sac hermétique contenant des objets infestés à l'aide d'un aspirateur n'est cependant pas une méthode qui a fait ses preuves.

Saturer l'atmosphère en CO₂ est une autre stratégie plus efficace et la saturation doit atteindre 90% pour agir sur les juvéniles et les adultes et presque 100% pour atteindre les œufs (192). C'est une méthode qui ne dégrade pas le mobilier et qui peut permettre de traiter des objets fragiles ou électroniques qui ne supporteraient pas le traitement thermique. Cependant, les hautes concentrations en CO₂ étant toxiques pour l'homme, cette méthode peut présenter certains risques qu'il faudra anticiper.

6.4.3.4.3.2 FUMIGATION

Une méthode de désinsectisation par fumigation au dioxyde de chlore a été proposée pour des structures confinées ou particulières telles que les chambres d'hôpital (193). C'est un gaz très volatile initialement utilisé pour la désinfection de matériel médical ou le blanchiment du papier. Il a un fort pouvoir oxydant à l'origine de ses propriétés. Il présente l'avantage de pouvoir atteindre tous les recoins d'une même enceinte et de ne laisser aucun résidu nocif, mais présente une toxicité chez l'homme qui fait que son usage est très réglementé (194). La méthode est complexe à mettre en place et coûteuse, en plus d'être interdite aux particuliers (127).

Avec la résurgence des punaises de lit dans la société, les méthodes de lutte non chimiques ont reçu une attention toute particulière. Les premiers échecs des insecticides à contrôler les infestations et la prise de conscience que les insecticides ne pouvaient pas être appliqués à tous les endroits possibles où les punaises de lit pouvaient se cacher, ont conduit au développement rapide d'autres techniques de lutte. Ces nouvelles méthodes ont fourni des options pratiques pour la lutte contre d'autres ravageurs et des moyens pour mieux gérer la résistance aux insecticides. Mais leur absence d'effet résiduel continue de justifier l'emploi de méthodes chimiques plus traditionnelles.

6.4.4 LUTTE CHIMIQUE

La découverte de substances ayant une action mortelle sur les insectes nuisibles remonte à l'Antiquité. Ce n'était au départ que des substances naturelles, minérales et végétales comme les huiles minérales, l'arsenic, le pyrèthre, ou la nicotine. Ces méthodes étaient surtout empiriques et utilisaient ces substances sous forme de poudres, d'huiles minérales voire des décoctions et infusions de plantes. Ce n'est qu'à partir de la moitié du XX^{ème} siècle, que sont apparus les premiers insecticides chimiques. Pour la plupart, ce sont des molécules plus actives et stables que les composés naturels (les pyréthrinés, par exemple, sont très photosensibles), mais aussi plus toxiques pour l'homme et son environnement (195).

Malgré les problèmes de résistance, les produits chimiques sont souvent nécessaires pour éradiquer complètement une infestation. L'utilisation du bon insecticide dans la bonne formulation (spray, poudre, fumigation...) est un élément crucial pour une éradication réussie des punaises de lit. Plusieurs classes d'insecticides ont été utilisées contre les punaises. Cependant, certains des insecticides les plus efficaces ne sont plus autorisés pour des raisons de sécurité environnementale et humaine. Il existe au moins 12 classes d'insecticides qui ont été évalués pour le contrôle de *C. lectularius* et *C. hemipterus* et l'OMS a publié en 2006 une liste d'insecticides recommandés pour cet usage (figure 61).

L'objectif de la lutte chimique est de se débarrasser des punaises ayant résisté aux traitements physiques déjà conduits et devrait toujours être considérée comme la dernière alternative dans un programme de lutte (127).

Insecticide	Chemical type	Concentration (g/l or g/kg)	WHO hazard classification of ai ¹⁹
Bendiocarb	Carbamate	2.4	II
Flufenoxuron	Insect growth regulator	0.3	U
Methoprene	Insect growth regulator	0.9	U
Chlorpyrifos	Organophosphate	2-5	II
Malathion	Organophosphate	20	III
Pirimiphos-methyl	Organophosphate	10	III
α -Cypermethrin	Pyrethroid	0.3-0.6	II
β -Cyfluthrin	Pyrethroid	0.25-0.5	II
Bifenthrin	Pyrethroid	0.48-0.96	II
Cyfluthrin	Pyrethroid	0.4	II
Cypermethrin	Pyrethroid	0.5-2.0	II
Cyphenothrin	Pyrethroid	0.5-1.0	II
Deltamethrin	Pyrethroid	0.3 (0.5b)	II
λ -Cyhalothrin	Pyrethroid	0.03	II
Permethrin	Pyrethroid	1.25	II
D-Phenothrin	Pyrethroid	1.0-2.0	U
Resmethrin	Pyrethroid	3	III
Tetramethrin	Pyrethroid	1-2	U

FIGURE 61 : Recommandations insecticides de l'oms dans la lutte contre les punaises de lit ; u : utilisation sans danger ; ii : modérément dangereux ; iii dangereux. Insect growth factor : régulateur de croissance d'insectes; organophosphate : organophosphoré, pyrethroid : pyréthriinoïde (world health organization. Pesticides and their application : for the control of vectors and pests of public health importance, 6eme edition. 2006)

6.4.4.1 LES INSECTICIDES

6.4.4.1.1 LES PYRETHRINOÏDES

Les pyréthriinoïdes sont divisés en 2 groupes : les pyréthriinoïdes naturels, extraits de plantes comme le chrysanthème (elle renferme 6 alcaloïdes pyréthriinoïdes : les pyréthrines I et II, les cinérines I et II puis les jasmolines I et II) , et les pyréthriinoïdes de synthèse, dont la structure et le mode d'action sont similaires aux naturels mais dont les propriétés physicochimiques ont été modifiées pour les rendre plus stables, plus sélectifs et plus puissants (196).

Ces derniers sont eux aussi séparés en deux groupes : le type I rassemble les premiers pyréthriinoïdes historiquement synthétisés. Ils ont une structure analogue à une molécule de pyrèthre enrichie d'une fonction alcoolique 3-phenoxybenzylique qui améliore grandement la photostabilité. Le type II, arrivé plus tard, ajoute un groupement nitrile à l'ensemble ce qui augmente la puissance de l'insecticide (196,197)

Les pyréthriinoïdes sont parmi les composés les plus couramment utilisés (ils représentaient en 2007 plus de la moitié du marché mondial des insecticides avec plus de 100 000 tonnes et dix milliards de dollars par an (197)) pour lutter contre les punaises de lit aujourd'hui, malgré le niveau élevé de résistance à ce groupe de molécules (11). Parmi ces composés, la deltaméthrine et la perméthrine sont probablement les pyréthriinoïdes les plus utilisés et se présentent sous diverses formulations (sprays liquides, aérosols sous pression, poudres, etc.)

Les pyréthriinoïdes sont non volatils et non hydrosolubles, mais sont solubles dans les solvants organiques, et très lipophiles. Ils s'adsorbent sur des particules au sol, sont métabolisés par les micro-organismes qui s'y trouvent et ne laissent pas de résidus significatifs (199).

- Mécanisme d'action : les pyréthriinoïdes sont des insecticides neurotoxiques qui ciblent le canal sodium des cellules nerveuses de l'insecte. Ce canal est responsable de la dépolarisation de la membrane des neurones qui permet la génération d'un potentiel d'action (PA). Il est formé d'un complexe de protéines qui laissent passer passivement les ions sodium en fonction de leur gradient de concentration. En changeant sa conformation chimique, ce canal peut se fermer (inactivation du canal) pour permettre la repolarisation des membranes pour pouvoir recréer un autre PA. Les pyréthriinoïdes vont agir sur le canal sodium en augmentant la fréquence des PA (type I) ou le temps d'ouverture des canaux (type II) (196). Cette action neurotoxique provoque une transmission répétée ou continue du signal nerveux, ce qui provoque des convulsions puis la tétanie des punaises. De plus, ces insecticides vont également provoquer une perturbation des flux en ions calcium et magnésium ce qui aura pour effet la libération massive de neurohormones qui perturbent le fonctionnement de l'organisme tout entier (200). La mort survient plus ou moins vite suivant la concentration de l'insecticide et la molécule utilisée.

Des problèmes de résistance aux pyréthriinoïdes sont de plus en plus rapportés (132) ce qui pousse les industriels à les associer à d'autres classes d'insecticides (comme les néonicotinoïdes) les rendant plus efficaces (201) ou à des molécules, comme le piperonyl butoxide (PBO). Le PBO n'a pas d'effet pesticide mais il inhibe la sécrétion de certaines enzymes et potentialise les propriétés insecticides du produit auquel il est associé. Le PBO présente cependant des effets néfastes sur les fonctions endocriniennes humaines et sur l'environnement (202). Malgré l'émergence croissante des cas de résistance aux pyréthriinoïdes, il restent massivement employés et souvent mal utilisés par les particuliers qui ne peuvent pas se permettre les services fournis par les entreprises spécialisées (134).

Pour l'homme, la majorité des pyréthriinoïdes est faiblement toxique car leur biodisponibilité est faible quelle que soit la voie d'exposition. Ils ne sont pas irritants pour la peau et les muqueuses et ne sont pas sensibilisants. On estime qu'ils sont près de 2250 fois moins toxiques pour les mammifères que pour les insectes (203) et globalement, les composés du type I sont moins toxiques que le type II (. Cependant des cas d'empoisonnement ont déjà été rapportés : l'ingestion accidentelle d'importantes quantités de pyréthriinoïdes provoque rapidement un mal de gorge, des nausées, des vomissements et des douleurs abdominales. Il peut y avoir une ulcération buccale et une augmentation des sécrétions salivaires. Des effets systémiques apparaissent 4 à 48 heures après l'ingestion et provoquent des étourdissements, des maux de tête et de la fatigue. Des palpitations, une oppression thoracique et une vision trouble, un état convulsif voire un coma peuvent survenir (203).

6.4.4.1.2 LES CARBAMATES ET ORGANOPHOSPHORES

Les organophosphorés (OP) et les carbamates (CARB) ont été largement utilisés pour lutter contre les punaises de lit dans le passé, mais ils sont nombreux à avoir été retirés dans beaucoup de pays et ne sont plus recommandés en France (39). L'Europe a d'ailleurs très fortement réduit leurs homologations depuis la directive 91/414/EEC de 2011 compte tenu

de leur toxicité et de leur manque de spécificité (204). Ils partagent le même mécanisme d'action, en ciblant l'acétylcholine estérase (AChE).

- Mécanisme d'action : les OP et les CARB sont des inhibiteurs irréversibles (pour les OP) et réversibles (pour les CARB) de l'AChE. Cette enzyme, centrale dans le monde du vivant, catalyse l'hydrolyse de l'acétylcholine (ACh) en choline et acide acétique, entraînant ainsi son inactivation. Dans les neurones cholinergiques, l'ACh doit être très rapidement dégradée pour être recyclée, sous forme de choline, qui sera recaptée par le neurone présynaptique pour permettre la transmission d'un nouveau signal. L'inhibition de l'AChE va provoquer une accumulation de l'ACh dans la fente synaptique entraînant une stimulation intense et continue des récepteurs à l'ACh aboutissant au blocage de la transmission (205).

La résistance aux PO chez les punaises de lit n'a été que rarement documentée. Ce n'est que récemment en 2011 que des cas de résistance ont été rapportés pour *C. lectularius* en Thaïlande et au Danemark (207). La résistance aux CARB chez *C. lectularius* a d'abord été signalée une fois en 2006 puis une seconde en 2009 en Australie (208).

Ils présentent une assez grande toxicité pour de nombreux organismes vivants. Certains, comme le dichlorvos, sont des cancérogènes probables de l'homme et d'autres sont supposés foetotoxiques.

Les OP sont peu irritants pour la peau et les muqueuses, sont rarement sensibilisants et leur pénétration dans l'organisme est possible par toutes les voies : digestive, respiratoire, conjonctivale et percutanée. Une intoxication aiguë se manifestera par un ensemble de symptômes liés au mécanisme d'inhibition de l'AChE entraînant une intrication de signes clinique aussi différents que les AChE inhibées concernent le système sympathique ou parasympathique (sueurs, nausées, vomissement, troubles de la vision, troubles neuromusculaires...) et à la dose ingérée. Chez l'Homme, les OP vont aussi inhiber d'autres AChE que celles retrouvées au niveau du système nerveux, sans conséquences cliniques apparentes, notamment l'AChE des globules rouges et la pseudo cholinestérase du plasma mais on ne connaît toujours pas la totalité des protéines cibles des OP (197). Les OP, comme le dichlorvos, sont suspectés d'être en lien avec l'apparition de syndromes neurotoxiques graves avec démyélinisation, en interagissant avec certaines enzymes comme la neuropathy target esterase (NTE), intervenant dans le métabolisme des lipides des neurones (209).

Les CARB ne sont pas irritants pour la peau et les muqueuses et ne sont que très rarement sensibilisants. Les cas d'intoxications retrouveront le même tableau clinique que celui de l'intoxication aux OP car le mécanisme d'action reste inchangé. Cependant, ils sont réputés de meilleur pronostic compte tenu de la réversibilité de l'inhibition de l'AChE qu'ils entraînent (197).

Les seuls organophosphorés encore recommandés par l'OMS pour la lutte chimique contre les punaises de lit sont le chlorpyrifos, le malathion et le primipho-méthyl. Le seul carbamate recommandé est le bendiocarbe.

6.4.4.1.3 LES INHIBITEURS DE CROISSANCE

Les régulateurs de croissance (IGR pour Insect growth factor) perturbent les processus de développement des insectes, soit en :

- Empêchant les insectes juvéniles de devenir adultes ou en affectant la reproduction des adultes ; ceux-ci sont appelés « analogues d'hormones juvéniles » (JHA pour

Juvenile hormone analogues) et sont représentés par le méthoprène dans la lutte contre les punaises de lit.

- Inhibant la chitine synthétase, enzyme impliquée dans la synthèse de la chitine de la cuticule ; ceux-ci sont appelés « inhibiteurs de la synthèse de la chitine » (CSI pour Chitine Synthase Inhibitor). Ils sont représentés pour la lutte contre les punaises par le flufénoxurone.

Les JHA miment l'action de l'hormone juvénile (JH pour Juvenile Hormone). C'est une hormone nécessaire à certains moments du développement de l'insecte. Il a été démontré que maintenir le taux de JH à un niveau élevé entraîne un développement anormal ou des conséquences mortelles (210). Les juvéniles exposés présenteront des anomalies morphologiques et ne pourront pas muer correctement. Les JHA présentent une faible toxicité pour les mammifères (211). Le méthoprène s'est avéré efficace dans les essais en laboratoire contre les souches sensibles et résistantes de *C. lectularius* aux insecticides neurotoxiques comme les pyréthriinoïdes, chez qui il entraîne des complications mortelles au moment de la mue. Chez certaines nymphes, le contenu de l'intestin semble avoir fuité dans l'hémolymphe, suggérant des dommages internes à la paroi intestinale (212). Une récente étude de 2020 a évalué le potentiel de l'hydroprène et du méthoprène incorporés dans un appât ingérable. Les femelles se sont montrées plus sensibles que les mâles aux deux JHA, et le méthoprène était plus efficace par ingestion que l'hydroprène (213). Cette étude suggère que le méthoprène pourrait être incorporé dans les programmes de lutte intégrée dans des appâts liquides en combinaison avec d'autres substances actives.

Les CSI inhibent l'étape finale de la synthèse de la chitine affectant ainsi l'élasticité et la fermeté de la cuticule. Par conséquent, cette dernière est incapable de supporter l'insecte et de résister aux contraintes de la mue ce qui entraîne la mort de l'insecte. Des malformations sont généralement associées aux punaises qui parviennent à muer comme l'extrusion de certains viscères (figure 62) (214). Le mécanisme d'action exact n'a pas encore été élucidé par manque de connaissances approfondies sur la synthèse de la chitine chez les insectes. Une récente étude a montré que le flufénoxurone provoque des anomalies morphologiques de l'appareil locomoteur des punaises qui ne peuvent plus se déplacer correctement et environ 82% de mortalité 35 jours après le traitement sur des papiers filtres imprégnés de l'insecticide (214).

Certains soulignent cependant des problèmes éthiques concernant l'utilisation des IGR (191) : ils exercent une grande partie de leur toxicité au moment des mues, ce qui exige comme prérequis un repas sanguin. Cela signifie que le succès de l'insecticide repose fondamentalement sur les piqures, ce que peut ne pas apprécier la victime d'une infestation.



FIGURE 62 : PUNAISE AU 5EME STADE MORTE AU COURS DE LA MUE, AVEC EXTRUSION DES ORGANES DIGESTIFS (CAMPBELL ET AL, LOCOMOTION INHIBITION OF *CIMEX LECTULARIUS* L. FOLLOWING TOPICAL, SUBLETHAL DOSE APPLICATION OF THE CHITIN SYNTHESIS INHIBITOR LUFENURON. INSECTS. 2017)

6.4.4.1.4 LES NEONICOTINOÏDES

Les néonicotinoïdes agissent comme des analogues de l'ACh et se lient et activent les récepteurs nicotiques à l'acétylcholine au niveau post-synaptique des cellules nerveuses. Cette activation provoque un afflux d'ions sodium et la génération de potentiels d'action. Dans des conditions physiologiques normales, l'action de l'acétylcholine est interrompue par l'AChE, qui hydrolyse rapidement le neurotransmetteur. Parce que ces insecticides ne sont pas détruits par l'ACHE, l'activation continue produit un excès de stimulation entraînant une hyperexcitation, une désensibilisation, des convulsions, une paralysie et, finalement, la mort de l'insecte (196).

L'imidaclopride a été testé efficacement contre des souches résistantes aux pyréthrinoïdes de *C. lectularius* et *C. hemipterus*, et aucune résistance à cet insecticide n'a été trouvée (208) mais une autre source le déclare moins efficace que d'autres classes d'insecticides, comme les pyréthrinoïdes contre *C. hemipterus* (215). À l'heure actuelle, les néonicotinoïdes sont surtout testés en association avec des pyréthrinoïdes. On a signalé un niveau élevé de résistance aux néonicotinoïdes dans deux souches de *C. lectularius* (216). Si une telle résistance est répandue, cela aura des implications majeures sur la manière dont les mélanges pyréthrinoïdes-néonicotinoïdes sont utilisés contre des populations résistantes aux pyréthrinoïdes, déjà largement répandues.

Dans le respect des conditions d'emploi fixées dans les autorisations de mise sur le marché les néonicotinoïdes ne montrent pas d'effet nocif pour la santé humaine (217) : ils sont légèrement à modérément toxiques par voie orale et faiblement toxiques par voie respiratoire et cutanée. Ils sont non irritants pour la peau et les muqueuses et non sensibilisants. Au début des années 1990, avec les premières autorisations d'insecticides néonicotinoïdes, des inquiétudes ont été exprimées dans plusieurs pays européens quant à leur effet délétère sur la santé des abeilles lorsqu'ils sont utilisés en agriculture, ce qui a poussé l'Europe à drastiquement renforcer les conditions d'utilisation de ces produits (217).

6.4.4.1.5 DERIVES HALOGENES DU PYRROLE

Le pyrrole est une molécule cyclique aromatique à quatre atomes de carbone et un atome d'azote, que l'on retrouve dans de nombreuses structures biologiques comme l'hème, la vitamine B12 ou la chlorophylle. Les dérivés halogénés du pyrrole ont des propriétés insecticides marquées. Le seul à avoir été testé sur les punaises de lit est le chlorfénapyr, un dérivé tri fluoré du pyrrole. Il s'agit d'un insecticide à action lente qui doit d'abord être converti en une forme active, avant d'agir sur l'insecte en altérant la capacité des mitochondries à produire de l'ATP, source d'énergie de toutes les cellules (196). De nombreuses études discordantes sur son intérêt dans la lutte contre les punaises de lit sont parues, et des cas de résistance ont été rapportés.

Il est modérément toxique pour l'homme mais se révèle extrêmement délétère pour une partie de la faune, surtout les oiseaux et les poissons.

6.4.4.1.6 DES INSECTICIDES HISTORIQUES, LES ORGANOCHLORES

Les organochlorés sont les premiers insecticides synthétiques à avoir été développés, mais aussi les plus puissants, rémanents et toxiques. Apparus vers la fin de la Seconde Guerre Mondiale avec le DDT en chef de file, ils ont été massivement utilisés pour lutter efficacement contre de nombreuses espèces de nuisibles, et sont réputés être à l'origine du déclin des infestations de punaises au niveau mondial qui suivit. Neurotoxiques, très lipophiles donc très rémanents dans l'environnement ils sont responsables de nombreuses catastrophes écologiques et sanitaires comme le scandale du chlordécone aux Antilles françaises dans les cultures bananières (220). Ils sont désormais interdits en France.

6.4.4.2 FORMULATIONS DES INSECTICIDES

Lors du choix d'un insecticide, une attention particulière doit être apportée à la manière dont il sera formulé et appliqué. La formulation d'un insecticide influence grandement l'efficacité des molécules actives qu'il renferme, sa sécurité d'emploi et sa conservation.

6.4.4.2.1 LES SPRAYS LIQUIDES

Les sprays liquides ont été la formulation la plus couramment utilisée, principalement pour l'application d'un résidu toxique sur une surface, visant à tuer les punaises de lit pendant des jours à des semaines lorsque l'insecte marche sur une surface traitée. Ils sont également utilisés pour une application directe sur les insectes visibles. L'application d'insecticides rémanents était la principale méthode de traitement pour lutter contre les punaises de lit depuis le début de l'utilisation du DDT il y a environ 70 ans, et elle continue d'être la méthode la plus courante (39). Les sprays liquides font appel à des concentrés émulsionnables, des concentrés en suspension, des microémulsions, des micro-encapsulations et des poudres mouillables (196) qui sont normalement dilués dans l'eau et sont appliqués à l'aide d'un pulvérisateur. En règle générale, un jet en éventail sera utilisée pour les surfaces planes telles que les lits, les canapés et les bords de tapis, tandis qu'une buse produisant un jet plus précis est utilisée pour les fissures et les crevasses, et d'autres ouvertures servant d'abris aux punaises (88).

6.4.4.2.2 AEROSOLS PRESSURISES

Les aérosols pressurisés émettent un spray sous forme de très fines gouttelettes sous l'action d'un gaz propulseur. Ils sont utiles pour l'application dans les fissures et les crevasses, ainsi que dans d'autres ouvertures étroites où les punaises de lit s'abritent. Normalement, une buse d'extension est incluse avec l'aérosol, ce qui permet une distribution précise. Fait intéressant, les formulations en aérosol à base de pyréthroïdes appliquées directement sur les punaises de lit semblent plus efficaces que leurs homologues à pulvérisation liquide (même avec le même ingrédient actif : dans des travaux menés en 2012, l'aérosol était capable de tuer complètement les insectes de test en 120 minutes (191) alors que la pulvérisation de liquide entraînait souvent une destruction minimale. La raison de l'écart d'efficacité entre les deux formulations est inconnue.

Les aérosols à libération totale (de type « fogger ») se sont cependant révélés inefficaces contre les punaises de lit car les particules en aérosol étaient incapables de pénétrer dans les abris de punaises de lit (221).

6.4.4.2.3 POUDRES

Les poudres sont des mélanges secs d'insecticides et d'un diluant (comme du talc). Les poudres peuvent être disposées sur les lieux de passage des punaises ou soufflées dans les cachettes pour un effet durable. Les poudres sont utiles dans les endroits où les pulvérisations ne sont pas possibles. Cependant, la poudre peut laisser un dépôt blanc disgracieux, limitant leur utilisation aux zones cachées. Lorsqu'elles sont formulées avec des insecticides pour lutter contre les punaises de lit, les poussières contiennent principalement des pyréthrinoïdes comme la deltaméthrine, la perméthrine ou des insecticides botaniques (39).

6.4.4.2.4 TISSUS IMPREGNES DE PERMETHRINE

Les tissus imprégnés de perméthrine ont été fabriqués dans le but de tuer les punaises de lit. Ils peuvent se présenter sous deux formes : la trame du matelas (en d'autres termes, le tissu du matelas lui-même) ou les housses de matelas. La plupart des fabricants affirment que le produit tue tous les insectes dans les 24 à 48 h, tandis que certains fabricants affirment qu'ils repoussent les punaises de lit. Différentes évaluations ont été menées sur divers tissus imprégnés de perméthrine mais la variabilité des conclusions ne permet pas d'affirmer leur efficacité (222,223).

À en juger par le nombre de populations de punaises hautement résistantes aux pyréthrinoïdes, il est probable que l'utilisation de ces produits pour lutter contre les infestations de punaises de lit sur le terrain ne présente qu'un avantage limité.

6.4.4.3 LA RESISTANCE AUX INSECTICIDES

La résistance est une réponse évolutive des organismes vivants à des changements environnementaux, tels que l'exposition aux insecticides. Elle se développe grâce à la survie sélective de quelques individus qui ont hérité de mécanismes biologiques qui les ont rendus capables de résister à l'action des insecticides. Si les populations de ces individus sont continuellement exposées à des insecticides, les individus sensibles meurent tandis que les

résistants survivent, se reproduisent et transmettent les caractères de résistance à leur descendance.

Différentes classes d'insecticides (à savoir les organochlorés, les organophosphorés, les carbamates, les pyréthrinoïdes, les pyrroles et les néonicotinoïdes) ont été utilisées contre les punaises de lit. L'utilisation d'insecticides pour lutter contre les punaises de lit a été généralement suivie par l'émergence de populations résistantes. Une résistance à diverses classes chimiques a été signalée dans au moins 22 pays (39) et ce phénomène devrait augmenter en raison de la forte dépendance aux quelques insecticides disponibles pour lutter contre les infestations de punaises de lit aujourd'hui, en particulier les pyréthrinoïdes. L'étude et le suivi de la résistance des populations sur le terrain sont essentiels pour développer des stratégies qui réduisent l'impact de ce phénomène. Pour atteindre cet objectif, une meilleure compréhension des mécanismes régissant la résistance aux insecticides chez les punaises de lit est essentielle, tout comme le développement de méthodes pour contourner la résistance. Les mécanismes de résistance identifiés chez les punaises de lit à ce jour empruntent 3 voies : la résistance métabolique, la pénétration réduite de l'insecticide et la résistance du site cible de l'insecticide (11).

6.4.4.3.1 LA RESISTANCE METABOLIQUE

Les enzymes jouent un rôle important dans le métabolisme des substrats endogènes ainsi que dans le catabolisme des xénobiotiques tels que les toxines végétales, les médicaments et les insecticides. Une détoxification métabolique accrue par les cytochromes P450 (CYP450) est un mécanisme par lequel les insectes deviennent résistants aux insecticides (11,224), mais d'autres molécules comme des estérases, la glutathion S-transférase (GST) et les transporteurs ABC seraient impliquées. Par rapport aux souches sensibles, les punaises de lit résistantes aux pyréthrinoïdes ont montré une activité accrue des estérases, des GST et des CYP450 (11,216,225). L'utilisation de techniques moléculaires a permis aux chercheurs de faire des progrès significatifs dans l'identification des gènes et des mécanismes impliqués dans la résistance métabolique des punaises de lit et dans la compréhension du fonctionnement de ces gènes (226). Une surexpression de gènes associés à la résistance a été détectée chez des punaises de lit résistantes aux pyréthrinoïdes (226,227)

6.4.4.3.2 DIMINUTION DE LA PENETRATION DE L'INSECTICIDE

La réduction de la pénétration cuticulaire des insecticides a depuis longtemps été proposée comme un autre mécanisme jouant un rôle dans la résistance aux insecticides au départ chez la mouche. Ce mode de résistance implique des changements structurels et biochimiques au niveau cuticulaire de l'insecte qui réduisent la capacité de l'insecticide à atteindre son site cible (11). Les premières études de l'expression génique chez *C. lectularius* ont montré une expression plus élevée des gènes des protéines cuticulaires chez une souche résistante aux pyréthrinoïdes que chez une souche sensible (228,229). La surexpression de gènes cuticulaires chez les souches résistantes pourrait entraîner un dépôt plus important de protéines cuticulaires et donc un épaissement de celle-ci qui limiterait la pénétration des insecticides (230). Le temps que mettent les punaises de lit à mourir est proportionnel à l'épaisseur de la cuticule dans une étude testant des pyréthrinoïdes (231).

Dans une étude sur *C. lectularius*, les ARN messagers de quatre CYP450 (CYP397A1, CP398A1, CYP6DN1 et CYP4-CM1), d'une estérase et de deux transporteurs ABC, étaient surexprimés dans le tégument des souches résistantes aux pyréthrinoïdes (226). Les transporteurs ABC (pour ATP Binding Cassette) sont des protéines transmembranaires servant au transport de

molécules au travers des membranes cytoplasmiques ; chez les insectes elles servent à expulser l'insecticide des cellules. La désactivation des gènes dont sont issus ces ARN messagers a permis d'augmenter significativement la sensibilité des souches résistantes utilisées (226).

Ces résultats montrent que différents mécanismes de résistance liés à la difficulté de pénétrer la cuticule peuvent coexister : une surexpression des protéines de la cuticule conduisant à son épaissement (rôle de barrière plus efficace), une intense activité enzymatique au niveau de la cuticule (dégradation ou inactivation des insecticides) et une augmentation des transporteurs d'efflux (évacuation de l'insecticide). A ce titre, l'amélioration des formulations des insecticides conduisant à une meilleure pénétration de l'insecticide à travers la cuticule constitue donc un axe majeur de la recherche.

6.4.4.3.3 LA RESISTANCE DES SITES CIBLES

Les insecticides neurotoxiques exercent leur effet toxique sur les punaises de lit en se liant aux canaux sodiques voltage-dépendants des membranes nerveuses et en modifiant leur fonctionnement. Un mécanisme de résistance fréquemment trouvé chez les insectes résistants aux pyréthriinoïdes et au DDT consiste à modifier certaines séquences d'acides aminés des canaux sodiques auxquelles ces insecticides se lient (232) conduisant à une perte d'affinité de l'insecticide pour les canaux sodiques. Ces mutations sont appelées « kdr resistance » pour knock down resistance. C'est un phénomène largement signalé chez de nombreux arthropodes, entraînant une perte d'efficacité des insecticides qui a conduit à la résurgence des ravageurs et à une augmentation de l'incidence de nombreuses maladies à transmission vectorielle (39). Longuement étudiées, il apparaît que ces mutations portent sur les gènes codant pour la sous-unité α du canal sodique : ces mutations provoquent la substitution de la valine 419 par une leucine (V419L) et de la leucine 925 par une isoleucine (L925I) (225) chez *C. lectularius*. Ainsi modifiée, la sous-unité α du canal sodique perd son affinité pour l'insecticide qui ne pourra plus s'y lier.

Des sources font état de l'apparition de ces mutations au début des années 2000, à l'époque où les infestations de punaises de lit ont commencé à devenir perceptibles dans de nombreuses régions du monde et probablement à la suite d'une sélection avec des insecticides (39).

Contrairement à *C. lectularius*, les données scientifiques sur la résistance aux insecticides de *C. hemipterus* sont beaucoup plus limitées. Mais une récente étude a montré que cette espèce n'était pas épargnée par les mutations kdr, qui concernent d'autres acides aminés (225) déjà signalés comme associés à ce type de résistance chez d'autres insectes, comme la M918I (substitution de la méthionine 918 par une leucine) et la L1014F (substitution de la leucine 1014 par une phénylalanine) (232)

Depuis les premiers rapports de résistance des punaises de lit aux insecticides organochlorés dans les années 1940, les scientifiques ont tenté d'élucider les mécanismes régissant l'évolution de la résistance aux insecticides. La recherche sur la résistance des punaises de lit a considérablement progressé au cours de la dernière décennie (39). Les résultats de ces études ont fourni non seulement une compréhension plus claire de la variété des mécanismes de résistance, mais aussi une base de départ pour le développement de stratégies de gestion de la résistance aux insecticides chez les punaises de lit.

6.4.4.4 AUTRES MOYENS DE LUTTE CHIMIQUE

6.4.4.4.1 ANTIPARASTAIRES ET ANTIBIOTIQUES DETOURNES

6.4.4.4.1.1 IVERMECTINE

L'ivermectine est un antiparasitaire actif sur le sarcopte de la gale (*Sarcoptes scabiei*) et sur certains vers responsables de maladies chez l'Homme (la strongyloïdose intestinale et la microfilarémie à *Wuchereria bancrofti*). Il est commercialisé en France sous le nom de marque Stromectol® (laboratoire MSD). L'ivermectine se lie au canal chlorure glutamate-dépendant des invertébrés, provoquant une hyperpolarisation cellulaire conduisant à la paralysie et à la mort (196).

L'ivermectine n'est actuellement pas utilisée dans la lutte contre les punaises de lit, mais il a été démontré en que l'ivermectine tuait les punaises de lit nourries artificiellement avec du sang en contenant à des concentrations qui sont celles retrouvées habituellement chez les humains prenant le médicament (233,234). Une étude de 2019 a cherché à étudier l'impact sur la survie des punaises de lit nourries avec un sang prélevé chez des volontaires après une prise unique d'ivermectine (à la dose de 0,2mg/kg, soit la même que celle préconisée dans les indications du médicament). L'ivermectine a considérablement réduit la population globale de punaises de lit, augmenté les taux de mortalité et réduit le nombre d'œufs pondus par les femelles (235). Ces résultats encouragent des études complémentaires : des expériences à des concentrations plasmatiques plus fortes (jusqu'à 2mg/kg) et avec des administrations de dose répétées (J1, 2, 8, 9, 15, 22 et 29) seraient envisagées. On peut imaginer qu'à l'avenir l'ivermectine fasse partie des insecticides recommandés dans des situations précises et médicalement encadrées (au même titre que la doxycycline, voir ci-après)

6.4.4.4.1.2 DOXYCYCLINE

La doxycycline est un antibiotique de la famille des tétracyclines. Des travaux récemment publiés affirment qu'elle a une activité insecticide directe particulièrement forte contre les punaises de lit juvéniles qui semble être indépendante de l'activité antimicrobienne (236). Des études futures visant à déterminer les mécanismes derrière cette propriété pourraient être utiles pour le développement d'insecticides actifs par voie orale.

6.4.4.4.2 FUMIGATIONS

Les gaz toxiques, tels que le fluorure de sulfuryle et le bromure de méthyle ont été utilisés comme fumigants pour lutter contre les punaises de lit (237). Ces gaz ont le grand avantage de pouvoir pénétrer profondément dans toutes les zones cachées et abris de l'insecte, et peuvent tuer les œufs et tous les stades des punaises en 18 à 24 h, selon la concentration du gaz. On peut atteindre des taux de mortalité de 100% chez les adultes, et de 98% chez les œufs. Les nymphes issues des œufs survivants mourraient dans les 2 jours suivant l'éclosion (237). Le fluorure de sulfuryle, moins toxique, est généralement le choix privilégié dans la plupart des pays actuellement. Le bromure de méthyle (ou bromométhane), un gaz dangereux pour la couche d'ozone (238), est toujours utilisé comme fumigant dans plusieurs pays pour lutter contre les punaises de lit dans les avions de ligne (39). Son utilisation a été interdite en 2017 en Europe et aux États-Unis, à l'exception de certaines situations particulières (mises en quarantaine de marchandise par exemple). Le gaz phosphine a également été utilisé contre les punaises de lit par des personnes non formées et a malheureusement entraîné un certain nombre de décès (101,239). Il est totalement proscrit pour la lutte contre les punaises de lit en Europe.

Depuis peu, des travaux ont été initiés pour trouver des alternatives moins toxiques aux gaz existants, et le benzoate de méthyle semble être une piste intéressante. Le benzoate de méthyle est un composé organique à la saveur agréable d'amande, qui est, fait intéressant, aussi utilisé comme appât par les chercheurs en entomologie pour attirer et capturer certaines espèces d'insectes comme l'abeille à orchidées (240). Les résultats des tests en laboratoire avancent une mortalité supérieure à 90% en 24 heures d'exposition en flasque mais doivent être confirmés sur le terrain (241)

La fumigation ne fournit aucun effet résiduel pour lutter contre les punaises de lit qui pourraient être réintroduites une fois le traitement terminé. Comme elle présente un risque élevé pour l'homme, la fumigation ne peut être effectuée que par du personnel spécialement formé. La fumigation est un exercice coûteux et fastidieux, en particulier lors du traitement d'immeubles entiers, lorsqu'il faut s'assurer que tous les résidents et animaux de compagnie sont absents pendant le traitement. Lors du traitement d'un bâtiment entier, une extrême prudence doit être utilisée pour s'assurer qu'il est bien scellé.

6.4.4.4.3 LA TERRE DE DIATOMÉE

La terre de diatomée, ou diatomite, a démontré sa grande efficacité dans le cadre de la lutte contre les punaises de lit (242). C'est une roche sédimentaire formée par la concrétion de restes de fossiles de diatomées, des algues unicellulaires caractérisées par la présence d'une frustule, c'est-à-dire une enveloppe externe siliceuse rigide, responsable du mécanisme d'action de cette roche (figure 63). Une fois pulvérisée, elle présente une multitude de micro-fragments de frustule perforants et tranchants qui occasionneront des dommages irréversibles aux punaises qui entreront en contact avec la terre de diatomée : elles succomberont aux fuites liquidiennes occasionnées par leurs blessures (39). De plus, la poudre absorbe la couche cireuse de la cuticule des punaises qui ne peuvent plus maintenir leur niveau d'hydratation normal, ce qui empire leurs pertes en eau (243). Enfin, cette poudre absorbe l'humidité ambiante rendant les conditions environnementales moins favorables au développement des insectes. Il a été démontré que la terre de diatomée pouvait être transmise horizontalement aux autres individus d'une même colonie jusque dans les refuges, ce qui améliore d'autant plus son efficacité dans les endroits très difficiles d'accès (244). Il est possible de maximiser son efficacité par l'ajout à la poudre de molécules retrouvées dans la phéromone d'alarme : en provoquant une agitation des punaises, celles-ci augmentent leur temps de contact avec la terre de diatomées et donc le nombre de blessures (245). Celles qui regagneront leur refuge en seront d'autant plus recouvertes et augmenteront sa dissémination.

Si son mode d'action est purement mécanique, la terre de diatomée reste considérée par l'Europe comme une substance active et n'est pas exempte de toxicité pour l'homme ou les animaux. Il faut savoir qu'elle se présente dans le commerce sous deux formes : dans son état naturel (silice amorphe) (figure 64), simplement broyée, ou calcinée, c'est-à-dire qu'elle a subi une étape de chauffe importante après broyage. Les deux formes sont prévues pour des usages différents. Si la forme naturelle n'est pas ou très peu toxique (246) (on la retrouve sous une forme très proche dans l'industrie agroalimentaire comme additif sous l'appellation E551 ou dioxyde de silicium) la forme calcinée est reconnue comme carcinogène probable pour l'homme, pathogène chez l'animal et ne devrait jamais être utilisée comme insecticide (247). Il convient donc de faire la différence entre les deux produits, car se tromper pourrait avoir de graves conséquences sur la santé de l'utilisateur ou de ses animaux.

La toxicité de la terre de diatomée est principalement respiratoire et en lien avec son mode d'application : l'application de la poudre disperse dans l'air ambiant des particules de silice qui peuvent rester en suspension pendant de nombreuses heures après le traitement (248). Il convient donc de porter un masque et des gants de protection lorsqu'on l'utilise. Pour limiter ce risque, il existe des formulations de terre de diatomée associée à des agents de fixation, distribuées sous forme de gel ou de crème.

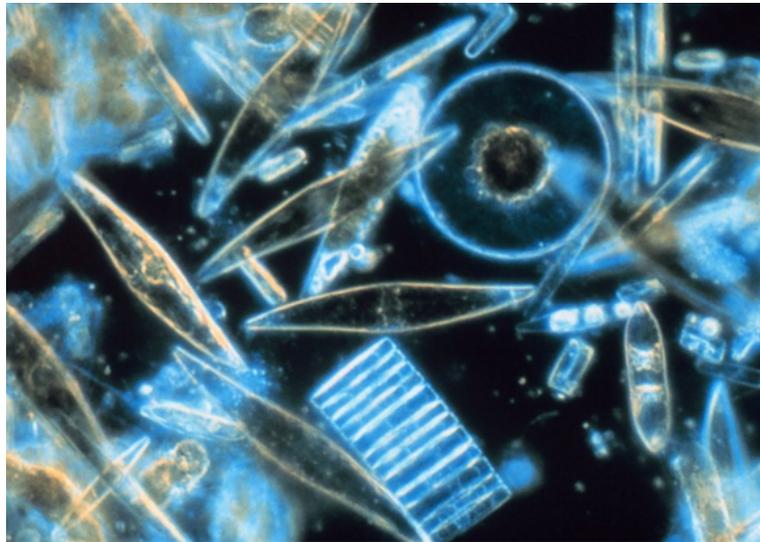


FIGURE 63 : DIATOMES ET LEURS EXOSQUELETTE AU MICROSCOPE OPTIQUE (T.GORDON, LICENCE LIBRE)



FIGURE 64 : TERRE DE DIATOMEE EN VRAC (AUTEUR NON CONNU, LIBRE DE DROIT)

6.4.4.4

6.4.4.4.5 LES HUILES ESSENTIELLES (HE)

Les formulations d'insecticides à base d'extraits botaniques sont de plus en plus populaires, en particulier celles contenant des HE de cèdre, de menthe poivrée, de clou de girofle, de géranium, de citronnelle, de cannelle, de romarin et de thym; Les évaluations ont d'abord montré que la plupart de ces produits étaient inefficaces en vaporisation directe (249) comme en diffusion (250). Mais une étude plus précise s'est intéressée aux composants de ces huiles essentielles, et a montré une activité insecticide pour deux phénols qui entrent dans la

composition des HE de thym et d'origan : le thymol, le carvacrol. Les punaises de lit aux stades mobiles traitées ont montré une gamme de symptômes d'empoisonnement tels que l'hyperactivité, la paralysie et des tremblements des pattes, entraînant la mort (251). Cette même étude suggère que les huiles essentielles contenant du thymol peuvent être intégrées aux méthodes de lutte contre les punaises de lit. Par exemple, les petits articles infestés de punaises de lit peuvent être scellés dans des chambres ou des sacs en plastique avec un papier ou un tissu imprégné d'huiles essentielles contenant du thymol.

Il existe de nombreux produits déjà commercialisés formulé à partir d'HE, mais leur évaluation a révélé que seuls deux d'entre eux étaient efficaces sur le terrain, bien qu'ils ne contiennent pas de thymol ni de carvacrol (EcoRaider® et le Bed Bug Patrol®) (251). Des études complémentaires devront être menées pour confirmer la place des huiles essentielles dans l'arsenal des traitements chimiques disponibles.

6.4.4.4.6 LES PRODUITS REPULSIFS

La question de l'efficacité des produits couramment utilisés comme insectifuges a été étudiée sur les punaises de lit. Les chercheurs ont évalué un certain nombre de molécules et ont constaté que le DEET (N, N- diéthyl - m - toluamide), l'isolongifolanone, le di - hydrojasmonate de propyle et la gamma - méthyl tridécylalactone étaient hautement répulsifs contre *C. lectularius* pendant au moins 8h (252). Ce potentiel insectifuge mérite d'être exploré comme outil de protection personnelle pour prévenir les piqûres de punaises de lit. L'application d'un répulsif sur les bagages, les chaussures ou les vêtements pourrait être une méthode efficace pour éviter les infestations de punaises de lit par les visiteurs à domicile, les voyageurs et le personnel désinsectiseur qui ont besoin de visiter ou de travailler dans des environnements infestés de punaises de lit.

6.4.5 ÉVALUATION DE LA LUTTE

L'évaluation de la lutte entreprise est capitale, elle permet de s'assurer du succès de la désinsectisation. L'objectif à atteindre étant le « zéro punaise », une inspection de contrôle doit ainsi être effectuée à la recherche de la moindre punaise vivante. Elle doit être aussi détaillée que l'inspection initiale, voire plus. Tous les emplacements précédemment identifiés comme abritant des punaises de lit doivent être réexaminés, les fissures et les crevasses doivent être vérifiées, si possible rebouchées et les zones environnantes inspectées au cas où des punaises se seraient échappées pendant le traitement. Si des punaises de lit vivantes sont observées, un traitement supplémentaire et une inspection ultérieure seront alors effectués. Cela ne doit pas forcément être considéré comme un échec, mais plutôt comme une opportunité de réorienter le traitement, d'identifier les éventuelles défaillances et de se poser les bonnes questions : les méthodes de lutte employées étaient-elles adaptées à la situation ? Le choix des insecticides, s'ils ont été utilisés, était-il bon ? Leurs conditions d'utilisation ont-elles été respectées ? Dans l'immense majorité des cas, le traitement complet d'une infestation de punaises de lit s'étale sur plusieurs semaines et il est important que l'occupant des lieux ne perde pas espoir pour ne pas relâcher la rigueur qu'exige la réussite des traitements.

En conditions de laboratoire, il est possible d'affirmer qu'une méthode de lutte est efficace à 100%. Mais sur le terrain, les conditions sont si variées et les paramètres à prendre en compte si nombreux qu'aucune méthode ne peut garantir les mêmes résultats. L'évaluation du succès

d'un traitement repose donc sur l'absence de punaises vivantes détectables et sur l'absence de nouvelle pique pendant les 1 à 2 mois suivants. Les outils de détection que l'on a précédemment décrits pourront également servir à évaluer la population résiduelle de punaises pour adapter les futurs traitements à cette nouvelle situation.

6.4.6 MISE EN PLACE DE MESURES DE PREVENTION

Les mesures de prévention sont d'une importance cruciale. C'est un ensemble de méthodes qui visent à minimiser le risque d'infestation et à minimiser l'impact des punaises de lit qui réussiraient à se réintroduire, dont le leitmotiv est « détecter tôt, agir rapidement » (39). Ces méthodes reposent en grande partie sur l'éducation du public et des victimes d'une infestation.

En règle générale, une infestation de punaises de lit se fait en quatre temps : 1) introduction des punaises par déplacement passif ou actif ; 2) installation des punaises dans leurs endroits de prédilection à savoir principalement près ou dans le lit ; 3) multiplication des punaises ; 4) dissémination dans l'ensemble de l'habitation ou du site voire extension à des sites voisins (88). On va pouvoir agir sur chacune de ses étapes :

6.4.6.1 EMPECHER L'INTRODUCTION DES PUNAISES

L'occupant des lieux doit avoir conscience du risque d'introduction de punaises de lit lorsqu'il ramène chez lui des meubles ou vêtements d'occasion, des objets cédés, récupérés dans la rue ou dans un vide-grenier. Les objets qui présentent un plus haut risque d'infestation sont ceux qui intègrent des textiles et/ou des matières naturelles telles que le bois. Ainsi, les lits, sommiers à lattes, matelas, canapés et fauteuils sont les plus à craindre et il est inconscient de les ramener au domicile sans les avoir minutieusement inspectés. Dans tous les cas, il sera fortement recommandé de ne pas réutiliser ce type d'objet par mesure de précaution. Le cas échéant, tout ce qui peut être lavé en machine à 60°C ou congelé à -18°C sera traité de la sorte.

L'introduction des punaises peut aussi se faire à l'occasion d'un retour de voyage dans une zone infestée. Les bagages sont le principal moyen par lequel les punaises de lit sont transférées d'un endroit à l'autre et il faut toujours aviser le voyageur du risque pour envisager des moyens de réduire le risque de punaises infestant les bagages. Dans une chambre d'hôtel ou un hébergement hors du domicile, le voyageur procèdera à une inspection du matelas et du lit à la recherche d'indices de présence des punaises (taches de déjections, traces de sang, exuvies ou punaises vivantes). Il est déconseillé de laisser sa valise ou des vêtements utilisés au sol, l'utilisation d'un porte bagage ou tout autre moyen de surélever la valise est préconisé. Les sacs de voyage souples, avec de nombreuses poches sont plus susceptibles d'accueillir des punaises de lit que les valises rigides en matières synthétiques. Il est possible d'utiliser des sprays répulsifs à base de DEET à vaporiser sur les vêtements ou les bagages. Au retour au domicile, il est préférable de les vider intégralement, de laver tous les vêtements même propres avec le sac de voyage si possible. Les valises rigides devraient être systématiquement inspectées et aspirées ou nettoyées, hermétiquement emballées dans des sacs plastiques et laissées en quarantaine plusieurs jours. L'ajout de terre de diatomée dans le sac ou d'une poudre insecticide est possible si le doute persiste.

6.4.6.2 LIMITER LEUR INSTALLATION

Lorsque les mesures visant à limiter leur introduction ne suffisent pas, l'objectif sera de rendre les pièces moins adaptées aux punaises par une simplification de l'environnement : éviter les meubles superflus, les étagères seront préférées aux armoires. Les revêtements de sols sont à limiter au strict minimum (moquette et tapis), les revêtements des murs doivent éviter les matières naturelles comme le lambris, le papier peint doit être entretenu (il ne doit pas gondoler, les « bulles » ou poches d'humidité du papier pouvant accueillir des punaises. Les différents joints au niveau des murs, des prises électriques ou du carrelage doivent être scellés. Le lit devrait être fait « au carré » afin d'éviter que draps et couverture ne touchent le sol. Il conviendra d'éviter les accumulations de câbles électriques au sol (câbles d'alimentation des appareils ménagers, électroniques et des luminaires). Un nettoyage régulier des sols par lavage ou aspiration permettra une simplification des micro-habitats qui défavorisera l'installation d'éventuelles punaises.

Le lit est généralement le premier endroit où s'installent les punaises de lit. Agir sur le design du lit et ses matériaux de construction peuvent aider à limiter une installation. Ainsi les cadres métalliques présenteront moins de cachettes et des pieds de lit en métal peint offriront moins d'accroche aux pattes des punaises qui tenteraient de grimper. Une tête de lit sans revêtement intégrée au cadre permet de décoller ce dernier du mur et de diminuer la surface d'échanges potentiels. Idéalement, le lit devrait être placé de sorte à former un îlot avec le moins de contacts possibles avec le reste de la pièce et éviter les matériaux creux pour les pieds, dans lesquels les punaises pourraient se réfugier. La simplification des formes du matelas est aussi une piste intéressante à suivre puisque les différentes coutures extérieures offrent de parfaits refuges aux punaises. Une housse intégrale, munie d'une fermeture, permettra de lisser l'apparence externe et de limiter l'installation des punaises.

6.4.6.3 EMPECHER LEUR MULTIPLICATION

Si les punaises de lit réussissent à se multiplier au point d'être détectables, l'éducation du public pour le rendre apte à identifier une punaise ou leur activité prend une importance capitale pour réagir rapidement et contacter au besoin une entreprise 3D. Dans les lieux d'hébergement de loisir, le personnel d'entretien devrait être formé à reconnaître les signes de punaises de lit, y compris les taches de sang sur les draps, les matelas et les murs, et les punaises de lit elles-mêmes, et inspecter régulièrement les lits à la recherche de signes d'activité.

6.4.6.4 LIMITER LEUR DISSEMINATION

Les poudres asséchantes peuvent être appliquées comme barrières physiques entre les pièces, les bureaux ou les appartements communicants. La terre de diatomées est très efficace pour tuer les punaises de lit qui se déplacent. Elle peut être appliquée sur les cadres de lit, les sommiers à ressorts, les meubles rembourrés. Quand la décision de se débarrasser d'un meuble infesté est prise, celui-ci devrait être scellé dans un sac hermétique et/ou rendu impropre à sa réutilisation avant d'être jetés en décharge ou incinérés. Dans le cas des encombrants, les services communaux responsables de la collecte des déchets devraient être prévenue.

6.4.7 AIDE AU CHOIX D'UNE ENTREPRISE 3D

Lorsqu'un particulier fait de la découverte de punaises de lit à son domicile, il est important de réagir rapidement pour les éliminer et éviter que l'infestation ne progresse. La meilleure

façon de s'assurer que les mesures de désinsectisation soient effectuées correctement reste de contacter une entreprise référencée par la CS3D.

Les raisons qui poussent les particuliers à ne pas contacter des professionnels peuvent être diverses. S'ils ignorent leur existence, une simple information pourra pallier le manque. Lorsque les particuliers pensent pouvoir traiter eux-mêmes, leur expliquer les contraintes et la difficulté de la lutte suffira le plus souvent à leur faire changer d'avis. En revanche c'est plus problématique lorsqu'il s'agit de craintes financières, car le coût total d'un traitement peut s'élever rapidement en fonction de la sévérité de l'infestation et de la surface à traiter. Rappeler à ces personnes que plus elles agissent tôt, moins la facture sera importante, est un élément capital dans leur prise de décision. Parfois, c'est l'offre dans le choix du professionnel à contacter qui peut rebuter.

Pour tenter de palier à tout cela et pour aider les particuliers à mieux lutter contre les punaises et choisir une entreprise 3D, les Agences Régionales de Santé (ARS) ont mis à disposition du public des brochures d'information (format papier ou numérique) et de recommandations.

Le choix d'une entreprise 3D compétente est un prérequis capital à la bonne conduite et à l'efficacité d'un traitement de lutte contre les punaises de lit. L'ARS PACA a publié une note regroupant les informations à connaître pour aider le particulier à faire son choix (253) :

- L'entreprise devrait être agréée par la Chambre syndicale de désinfection, désinsectisation et dératisation (CS3D)
- Le professionnel doit effectuer au moins deux passages, à 15 jours d'intervalle, compte tenu de l'impossibilité d'éliminer tous les œufs et de leur résistance accrue à certains insecticides. Les passages multiples permettent de répéter les traitements, et d'éliminer les punaises qui auraient éclos entre deux visites.
- Il doit faire une inspection poussée et rechercher l'origine de l'infestation. L'interrogatoire du particulier est une étape obligatoire pour ne pas démarrer un traitement à l'aveugle.
- La certification CertiBIOCIDE garantit que le professionnel est habilité à manipuler et utiliser des insecticides destinés uniquement aux professionnels.
- Pour un appartement moyen, le coût total de l'intervention devrait se situer entre 300 et 800€, hors frais de remplacement du mobilier et de simplification ou la restauration de l'habitation (housses de protection, sacs plastiques, comblement des fissures...)

La CS3D est une structure qui rassemble les différents professionnels du secteur de l'hygiène antiparasitaire en France, fondée en 1946, et est recommandée par le gouvernement. Elle assure que les professionnels qu'elle promeut respectent les principes de lutte raisonnée, les règles de sécurité des personnes, des animaux de compagnie et de l'environnement.

La certification CertiBIOCIDE, qui est un certificat individuel délivré par le Ministère de la transition écologique et solidaire, garantit que chaque porteur a été formé à la manipulation et l'utilisation des insecticides réservés aux professionnels, dans le respect des normes de sécurité humaine et environnementale. Elle atteste que le professionnel aura à sa disposition des produits plus actifs que ceux trouvés en vente libre. Le certificat doit être renouvelé tous les 5 ans, assurant la formation continue des professionnels du secteurs et la mise à jour de leurs connaissances. Il faut cependant souligner qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune certification ni labellisation spécifique dans la lutte contre les punaises de lit. Des discussions et des travaux gouvernementaux sont actuellement en cours pour mettre en place un tel dispositif.

7 PLAN GOUVERNEMENTAL DE PREVENTION ET DE LUTTE CONTRE LES PUNAISES DE LIT ET ASPECTS REGLEMENTAIRES

Note : Au moment de la rédaction de ce travail de thèse, la crise sanitaire liée à la pandémie de Covid-19 a provoqué un retard dans la mise en place du plan gouvernemental de lutte contre les punaises de lit prévue pour la mi-2020 et de nombreux détails ne sont pas encore connus. Cette partie résume l'état des lieux au mois d'Aout 2020.

La prise en compte de la résurgence globale des infestations de punaises de lit oblige à s'intéresser aux enjeux réglementaires pour répondre aux questions de responsabilité et de prise en charge des coûts.

La France apparaît bien en retard sur les questions réglementaires spécifiques aux punaises de lit par rapport à de nombreux autres pays comme les États-Unis, le Canada ou l'Australie (39). Au Canada, par exemple, la désinsectisation est rendue obligatoire au départ de tout locataire qui change de logement (39).

Début 2020, la députée Cathy Ranson-Bouzon a interpellé le gouvernement français pour rappeler qu'il était urgent de mettre en place une véritable politique publique pour lutter la résurgence des punaises de lit.

Le gouvernement a décidé de rattraper son retard en élaborant un plan de prévention et de lutte contre les punaises de lit. Il consiste en la mise en place d'une information publique fiable et accessible pour permettre à tous d'adopter les bons gestes et bonnes pratiques et de s'orienter vers des professionnels compétents. La question de la formation et de la certification de ces professionnels sera aussi abordée. Enfin, ce plan s'intéressera aux responsabilités de chacun des acteurs dans le partage ou non des coûts liés aux traitements.

7.1 UN PLAN POUR MIEUX INFORMER

Le vendredi 21 février 2020, le gouvernement a lancé une campagne d'information avec un site internet (stop-punaises.gouv.fr) et un numéro de téléphone (0.806.706.806) dédiés. Elle diffuse son information sous divers formats :

- Des spots publicitaires vidéo pour sensibiliser le public au problème des punaises de lit ;
- Des infographies pour permettre de savoir reconnaître l'insecte et où le chercher, comment l'éviter et comment s'en débarrasser ;
- Des recommandations et bonnes pratiques pour initier les premiers traitements sans aggraver l'infestation ni la disséminer ;
- Un numéro de téléphone pour répondre à toutes les questions.

Cette campagne veut apporter toutes les informations nécessaires pour sensibiliser les français qui, par manque de connaissances, peuvent adopter des comportements à risques et leur permettre de mieux agir.

7.2 UN PLAN POUR MIEUX AGIR

En cas d'infestation de punaise de lit, il est important réagir rapidement mais surtout, correctement. Trop souvent les particuliers agissent de manière contre-productive en voulant

traiter eux-mêmes et n'obtiennent au mieux qu'un échec et au pire une aggravation du problème. Ils sont généralement peu à connaître les principes de la lutte mécanique et n'ont souvent recours qu'aux moyens de lutte chimique. Sélection de souches résistantes aux insecticides, dissémination d'infestation, intoxications ne sont donc pas rares (39). La campagne d'information précitée a pour objectif d'aider les français à mieux agir après la découverte d'une infestation de punaises de lit.

Aussi, « de nombreuses victimes d'infestations sont confrontées à des sociétés de traitement qui, très souvent, par manque de formation ne traitent pas, voire même aggravent le problème d'infestation » disait Sébastien Lecornu, ministre chargé des collectivités territoriales en janvier 2020. C'est pour répondre à ce problème que le gouvernement a conclu un partenariat avec la CS3D pour ouvrir une réflexion sur la formation des professionnels et la création d'un label permettant de garantir les compétences et les qualifications des entreprises dans la lutte spécifique contre les punaises de lit. Ces dispositions sont prévues pour être mise en place avant la fin 2020.

Une instance scientifique et technique pluridisciplinaire (médecins, entomologistes, professionnels du secteur) doit aussi être mise en place pour élaborer des protocoles-types de lutte qui seraient adaptés à chaque cas de figure en fonction de l'étendue de l'infestation et du type de bâtiment.

7.3 UN PLAN POUR MIEUX PROTEGER

Pour améliorer la protection des locataires, le gouvernement a décidé d'agir avec la mise en place le 25 novembre 2018 de la loi Elan. Cette dernière renforce les dispositifs de lutte contre l'indécence des habitats locatifs en France et la lutte contre la recrudescence des nuisibles (dont les punaises de lit) en fait partie.

Cette loi aborde en réalité de nombreux sujets comme l'évolution du logement, du numérique et de l'aménagement. Pour le thème du logement, elle modifie l'article 6 de la loi n°89-462 du 6 juillet 1989 pour apporter une précision à la notion de "décence des logements" :

*« Le bailleur est tenu de remettre au locataire un logement décent ne laissant pas apparaître de risques manifestes pouvant porter atteinte à la sécurité physique ou à la santé, **exempt de toute infestation d'espèces nuisibles et parasites...** ». Article 6 de la loi du 6 juillet 1989 modifié par l'article 142 de la loi Elan*

Les bailleurs ont désormais l'obligation d'attester qu'un logement ne contient pas de signes de la présence d'une espèce nuisible avant d'avoir le droit de le louer. Celui qui loue son logement en dépit d'une infestation de nuisibles ou de parasites peut écopier d'une amende comprise entre 50.000 et 100.000 euros. Cette loi précise donc les responsabilités concernant la prise en charge des coûts liés aux traitements de désinsectisation : il incombe aux propriétaires et bailleurs de régler la facture. Cependant, elle ne décharge pas les locataires de leurs obligations prévues par l'article 7 de la loi n°89-462 qui les oblige à « *prendre à [leur] charge l'entretien courant du logement...* ». Si l'apparition d'une infestation de punaises de lit apparaît en cours de bail, alors le propriétaire laissera à la charge du locataire le règlement des coûts d'interventions. Dans un premier temps, le bailleur peut avancer les frais, mais il pourra récupérer la somme au moment du règlement des charges (la somme dépensée pour les produits de désinsectisation et les frais de personnels d'entretien peut être considérée comme une charge locative ou charge récupérable) (254).

Si le locataire est sûr que l'infestation est antérieure à son emménagement, c'est à lui de le prouver, ce qui reste un exercice très difficile.

Si l'intention est bonne, la loi Elan n'a pas abordé la notion de « preuve de décence » du logement que pourrait apporter par le propriétaire et qui servirait de preuve lors de l'arbitrage des cas litigieux avec les locataires.

Pour mieux protéger ces derniers, le ministre chargé de la ville et du logement Julien Denormandie a lancé une mission parlementaire dans le but d'adapter le droit à ce nouveau risque, notamment dans l'habitat collectif et le parc locatif. La mission intégrera également un volet consacré au financement, notamment pour les plus précaires. Il voudrait que les contrats d'assurance de location prennent en charge le coût des opérations de détection et de désinsectisation.

9 CONCLUSION

La punaise de lit parasite la vie de l'Homme depuis des dizaines de milliers d'années. Si elle a connu une quasi-disparition durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle, elle a entamé son fracassant retour à partir des années 1990, profitant des nombreux changements dans nos modes de vie : nous appartenons à une société croissante et mobile, qui voyage de plus en plus. Elle exerce de plus en plus une pression grandissante sur l'environnement, qui a permis l'émergence de résistances aux insecticides chez de nombreux nuisibles dont la punaise de lit qui deviennent extrêmement difficiles à tuer. Le fait de ne pas prendre rapidement en charge les infestations de punaises de lit entraîne la propagation des infestations avec des répercussions sur la santé humaine et un coût accru pour la société.

L'impact sur la santé humaine concerne surtout les troubles dermatologiques associés aux piqûres mais de nombreuses autres conséquences restent encore sous évaluées, notamment les troubles psychiques. Les punaises de lit sont reconnues porteuses de nombreux microorganismes potentiellement pathogènes pour l'homme, et s'il n'y a pour le moment pas de preuve d'un pouvoir vectoriel, cela n'exclut pas qu'on le découvre un jour.

À l'heure actuelle, les populations de punaises de lit continuent d'augmenter dans la plupart des pays. Dans le passé, les punaises de lit étaient largement vaincues par des insecticides résiduels puissants et très efficaces, comme le DDT. Aujourd'hui les insecticides sont de moins en moins efficaces et le développement de nouvelles molécules peut coûter des centaines de millions d'euros. Si la recherche progresse, elle semble se concentrer sur de nouveaux moyens de lutte alternatifs basés sur les phéromones ou l'étude du symbiote qui renferme encore de nombreux mystères. Elle permet en outre une compréhension plus claire de la variété des mécanismes de résistance. Il est bien probable que les résultats constitueront une base de départ pour le développement de stratégies de gestion bien plus efficaces.

Très en retard par rapport à d'autres pays, la France a décidé de situer l'année 2020 comme une année charnière dans sa stratégie de lutte, en lançant un grand plan gouvernemental de lutte contre les punaises de lit, permettant aux différents publics de mieux appréhender cette problématique. La France souhaite mieux accompagner ses ressortissants dans les différentes et difficiles étapes de la lutte contre une infestation de punaises de lit, passant par une meilleure information du public, une meilleure formation des professionnels et une adaptation du droit à ces nouveaux enjeux.

Mais actuellement, il semblerait qu'il n'y a pas vraiment de lumière au bout du tunnel et le défi de trouver des stratégies de gestion à faible toxicité, rentables et efficaces dans le temps demeure. La lutte contre les punaises de lit est d'un coût élevé pour une grande partie de notre société, et on peut parier que les punaises de lit continueront à être un parasite nuisible de la société humaine pendant les nombreuses années à venir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

homogénéiser

1. Hoogstraal H, Usinger RL. Monograph of Cimicidae (Hemiptera-Heteroptera). Journal of Parasitology. févr 1967; 582p
2. Roth S, Balvín O, Siva-Jothy MT, Di Iorio O, Benda P, Calva O, et al. Bedbugs evolved before their bat hosts and did not co-speciate with ancient humans. Curr Biol. juin 2019;29 (11):1847-1853
3. Huchet JB, Poux, puces et punaises, la vermine de l'homme. Découverte, descriptions et traitements. Antiquité, Moyen Âge, Temps Modernes. L'Harmattan Ed. France, 2015, 418p
4. Panagiotakopulu E, Buckland E. *Cimex lectularius* L., the common bed bug from Pharaonic Egypt. Antiquity, 1999,73:908-911;
5. Orfanos C. Socrate et les punaises de Tourneboule. Études Platoniciennes. 1 nov 2009; (6):13-23.
6. Johnson CG. The ecology of the bed-bug, *Cimex lectularius* L., in Britain: Report on Research, 1935–1940. Epidemiol Infect. déc 1941;41 (4):345-461.
7. Potter MF. The History of Bed Bug Management—With Lessons from the Past. Am Entomol. 2011;57 (1):14-25.
8. USDA (United States Department of Agriculture) Report of the Commissioner of Agriculture for the year 1875 [Internet]. In: U.S. Government Publishing Office, Washington. Disponible sur: <http://archive.org/details/CAT30951786013> [cité 12 août 2020].
9. Potter MF. The History of Bed Bug Management, with lessons from the past. Am Entomol. 2011;57 (1):14-25.
10. Matheson R. Medical Entomology. Comstock Publishing Company Inc. New York, NY. 1950, 629p.
11. Dang K, Doggett SL, Veera Singham G, Lee CY. Insecticide resistance and resistance mechanisms in bed bugs, *Cimex* spp. (Hemiptera: Cimicidae). Parasit Vectors. 2017, 10(1):318
12. USFWS (United States Fish and Wildlife Service). Monitoring Plan Released For American Peregrine Falcon [Internet]. Disponible sur: <https://www.fws.gov/news/ShowNews.cfm?newsId=B7CF11C4-4637-4387-B35630F0FADBAC6E> [cité 12 août 2020].
13. Guyton KZ, Loomis D, Grosse Y, El Ghissassi F, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, et al. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. Lancet Oncol. mai 2015;16 (5):490-1.
14. Doggett SL, Miller DM, Lee C-Y, Advances in the Biology and Management of Modern Bed Bugs, 1ère édition, John Wiley & Sons Ed. 2018, 469p.
15. Weirauch C, Schuh RT, Cassis G, Wheeler WC. Revisiting habitat and lifestyle transitions in Heteroptera (Insecta: Hemiptera): insights from a combined morphological and molecular phylogeny. Cladistics. 2019;35 (1):67-105.
16. Grazia J, Panizzi A, Greve C, Schwertner C, Campos L, Garbelotto T. True Bugs (Heteroptera) of the Neotropics. Première édition. Springer Ed. Netherland. 2015. 901p
17. Péricart J. Hémiptères : Anthocoridae, Cimicidae, Microphysidae de l'Ouest Paléarctique. Masson Ed. Paris, France. 1972, 410p.
18. Encyclopædia Universalis. Hétéroptères [Internet]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/heteropteres/>. [cité 13 août 2020]
19. Harry M. Les Triatominae : des Réduves Démasqués. Insectes, 1991, 80 (1):5-9
20. Institut Pasteur. Maladie de Chagas [Internet] Disponible sur:

<https://www.pasteur.fr/fr/centre-medical/fiches-maladies/maladie-chagas> [cité 13 août 2020]

21. Delaunay P, Berenger JM, Izri A, Chosidow O et al. Les punaises de lits *Cimex lectularius* et *Cimex hemipterus* - Biologie, Lutte et Santé publique. Association des naturalistes de Nice et des Alpes-Maritimes, 2010, 16 p.
22. Khan HR, Rahman MM. Morphology and biology of the bedbug, *Cimex hemipterus* (Hemiptera: Cimicidae) in the laboratory. Dhaka Univ J Biol Sci. 3 août 2012;21 (2):125-30
23. ANOFEL (Association Française des Enseignants de Parasitologie et Mycologie). Parasitoses et mycoses des régions tempérées et tropicales. 6eme édition. Elsevier Masson Ed. Paris, France. 2019, 552p.
24. Duvallet G, Fontenille D, Robert V. Entomologie médicale et vétérinaire. 1^{ère} édition. Quae Ed. Versailles, France. 2017. 690p.
25. Huchet JB, Poux, puces et punaises, la vermine de l'homme. Découverte, descriptions et traitements. Antiquité, Moyen Âge, Temps Modernes. L'Harmattan Ed. France, 2015, 418p
26. Kassianoff L. Étude morphologique et biologique de la famille des cimicidés. Ann Parasitol Hum Comparée. 1937;15 (2):97-124.
27. Bérenger J-M, Pluot-Sigwalt D. Présence en France de la Punaise de lit tropicale, *Cimex hemipterus* (Fabricius, 1803) (Hemiptera, Heteroptera, Cimicidae). Bull Société Entomol Fr. 13 déc 2017;122 (4):423-7.
28. Kassianoff L. Étude morphologique et biologique de la famille des cimicidés (Suite). Ann Parasitol Hum Comparée. 1937;15 (3):193-217.
29. Akhouni M, Sereno D, Durand R, Mirzaei A, Bruel C, Delaunay P, et al. Bed Bugs (Hemiptera, Cimicidae): Overview of Classification, Evolution and Dispersion. Int J Environ Res Public Health. janv 2020;17 (12):45-76.
30. Beaumont A, Cassier P. Biologie animale : Des protozoaires aux métazoaires épithélienneuriens. 3^{ème} édition, Dunnod Ed. Paris, France. 2000, 502p
31. Cranston P.S, Gullan P.J. The Insects : An Outline of Entomology. 5^{ème} edition. Willey-Blackwell Ed. Oxford, England. 2014, 624p
32. Usinger R.L, Beaucournu J-C, Sur deux *Cimex* (Insecta, Heteroptera), nouveaux pour la faune française, parasites des chauves-souris. Annales de Parasitologie Humaine Comparée, 1967, 42(2):269-271.
33. Reinhardt K, Siva-Jothy M.T. Biology of the Bed Bugs (Cimicidae). Annual Review of Entomology. 2007, 52:351-374.
34. Delaunay P, Berenger J-M, Robert V, Izri A, Jourdain E. Punaises de Lit : Biologie, Lutte et Santé Publique. [Internet] In : Ministère des Solidarités et de la Santé. Disponible sur : https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/punaise_de_lit_livret_delaunay_2015.pdf. [cité 1 sept 2020]
35. Reinhardt K, Breunig HG, Uchugonova A, König K. Sperm metabolism is altered during storage by female insects: evidence from two-photon autofluorescence lifetime measurements in bedbugs. J R Soc Interface. 2015, 12 (110)
36. Hosokawa T, Koga R, Kikuchi Y, Meng X-Y, Fukatsu T. Hosokawa T, Koga R, Kikuchi Y, Meng XY, Fukatsu T. Wolbachia as a bacteriocyte-associated nutritional mutualist. Proc Natl Acad Sci USA. 2010, 107:769-774.
37. Nikoh N, Hosokawa T, Moriyama M, Oshima K, Hattori M, Fukatsu T. Evolutionary origin of insect-Wolbachia nutritional mutualism. Proc Natl Acad Sci USA. 2014; 111 (28):10257-62.
38. Goodman M.H. Endosymbiotic Bacteria in the Bed Bug, *Cimex lectularius* L. (Hemiptera). 2016 [Internet] In : Université du Kentucky, États-unis. Disponible sur : https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=entomology_etds [cité 19 août 2020]
39. Doggett SL, Miller DM, Lee C-Y. Advances in the Biology and Management of Modern Bed

Bugs. John Wiley & Sons; 2018. 469 p.

40. Stutt AD, Siva-Jothy MT. Traumatic insemination and sexual conflict in the bed bug *Cimex lectularius*. Proc Natl Acad Sci. 8 mai 2001;98 (10):5683-7.
41. Encyclopædia Universalis. Développement hémimétabole. [Internet]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/developpement-hemimetabole/> [cité 19 août 2020]
42. Ashbrook AR, Scharf ME, Bennett GW, Gondhalekar AD. Bed bugs (*Cimex lectularius* L.) exhibit limited ability to develop heat resistance. PLOS ONE. 7 févr 2019;14 (2)
43. Siva-Jothy MT. Trauma, disease and collateral damage: conflict in cimicids. Philos Trans R Soc B Biol Sci. 28 févr 2006;361 (1466):269-75.
44. Francischetti IMB, Calvo E, Andersen JF, Pham VM, Favreau AJ, Barbian KD, et al. An insight into the sialome of the bed bug, *Cimex lectularius*. J Proteome Res. 6 août 2010;9 (8):3820-31.
45. Doggett SL, Dwyer DE, Peñas PF, Russell RC. Bed bugs: clinical relevance and control options. Clinical Microbiology Reviews. 2012, 25:164-192.
46. Lehnert M. Behavior And Control Of The Bed Bug, *Cimex lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae) 2013. All Dissertations, Clemson University, South Carolina, USA. [Internet] Disponible sur: https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/1169 [cité 19 août 2020]
47. Siva-Jothy MT, Stutt AD. A matter of taste: direct detection of female mating status in the bedbug. Proc R Soc B Biol Sci. 22 mars 2003;270 (1515):649-52.
48. Reinhardt K, Naylor R, Siva-Jothy M. Potential sexual transmission of environmental microbes in a traumatically inseminating insect. Ecol Entomol. 1 oct 2005;30:607-11.
49. Morrow E, Arnqvist G. Costly traumatic insemination and a female counter-adaptation in bed bugs. Proceedings. Biological sciences / The Royal Society. 2003, 270:2377-81
50. Siva-Jothy MT, Zhong W, Naylor R, Heaton L, Hentley W, Harney E. Female bed bugs (*Cimex lectularius* L) anticipate the immunological consequences of traumatic insemination via feeding cues. Proc Natl Acad Sci U S A. 16 juill 2019;116 (29):14682-7.
51. Legrand P, Verheggen F, Haubruge E, Francis F. Host-seeking behavior in the bed bug (*Cimex lectularius*) and applications in integrated pest management. A review. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2016, 20(2):195-202
52. Singh N, Wang C, Cooper R, Liu C. Interactions among Carbon Dioxide, Heat, and Chemical Lures in Attracting the Bed Bug, *Cimex lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae). Psyche (Stuttg). 12 mars 2012
53. Siljander ED. Foraging and Communication Ecology of bed bugs. Am Entomol. 2006;52 (2):116-7.
54. Liu F, Liu N. Human Odorant Reception in the Common Bed Bug, *Cimex lectularius*. Sci Rep. 2 nov 2015;5 (1):15558.
55. Harraca V, Ryne C, Birgersson G, Ignell R. Smelling your way to food: can bed bugs use our odour? J Exp Biol. 15 févr 2012;215 (4):623-9.
56. Hentley WT, Webster B, Evison SEF, Siva-Jothy MT. Bed bug aggregation on dirty laundry: a mechanism for passive dispersal. Sci Rep. 28 sept 2017;7 (1):11668.
57. Harraca V, Ryne C, Ignell R. Nymphs of the common bed bug (*Cimex lectularius*) produce anti-aphrodisiac defence against conspecific males. BMC Biol. 9 sept 2010;8 (1):121.
58. Benoit JB, Del Grosso NA, Yoder JA, Denlinger DL. Resistance to dehydration between bouts of blood feeding in the bed bug, *Cimex lectularius*, is enhanced by water conservation, aggregation, and quiescence. Am J Trop Med Hyg. mai 2007;76 (5):987-93.
59. Weeks ENI, Logan JG, Birkett MA, Caulfield JC, Gezan SA, Welham SJ, et al. Electrophysiologically and behaviourally active semiochemicals identified from bed bug refuge substrate. Sci Rep. 12 mars 2020;10 (1):4590.
60. Ulrich KR, Kramer M, Feldlaufer MF. Ability of bed bug (Hemiptera: Cimicidae) defensive

- secretions (E)-2-hexenal and (E)-2-octenal to attract adults of the common bed bug *Cimex lectularius*: Defensive secretions attract bed bugs. *Physiol Entomol.* juin 2016;41 (2):103-10.
61. Singh N, Wang C, Cooper R. Role of Vision and Mechanoreception in Bed Bug, *Cimex lectularius* L. *Behavior.* PLOS ONE. 6 mars 2015;10 (3)
 62. DeVries ZC, Kells SA, Appel AG. Effects of Starvation and Molting on the Metabolic Rate of the Bed Bug (*Cimex lectularius* L.). *Physiol Biochem Zool.* janv 2015;88 (1):53-65.
 63. Benoit JB. Stress Tolerance of Bed Bugs: A Review of Factors That Cause Trauma to *Cimex lectularius* and *C. Hemipterus*. *Insects.* juin 2011;2 (2):151-72.
 64. How Y, Lee C-Y. Effects of Temperature and Humidity on the Survival and Water Loss of *Cimex hemipterus* (Hemiptera: Cimicidae). *Journal of medical entomology.* 2010, 47, pp.987-95
 65. Kells SA, Goblirsch MJ. Temperature and Time Requirements for Controlling Bed Bugs (*Cimex lectularius*) under Commercial Heat Treatment Conditions. *Insects.* 29 août 2011;2 (3):412-22.
 66. Olson J, Eaton M, Kells S, Morin V, Wang C. Cold Tolerance of Bed Bugs and Practical Recommendations for Control. *J Econ Entomol.* 1 déc 2013;106:2433-41.
 67. Rukke BA, Hage M, Aak A. Mortality, fecundity and development among bed bugs (*Cimex lectularius*) exposed to prolonged, intermediate cold stress. *Pest Manag Sci.* 2017;73 (5):838-43.
 68. Encyclopædia Universalis. SYMBIOSE [Internet] Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/symbiose/> [cité 23 août 2020].
 69. Taylor MJ, Bandi C, Hoerauf A. Wolbachia bacterial endosymbionts of filarial nematodes. *Adv Parasitol.* 2005;60:245-84.
 70. Sakamoto JM, Rasgon JL. Endosymbiotic Bacteria of Bed Bugs: Evolution, Ecology and Genetics. *Am Entomol.* 2006;52 (2):119-22.
 71. Goodman MH. Endosymbiotic Bacteria In The Bed Bug, *Cimex Lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae) [Internet]. In : Université du Kentucky. Disponible sur: http://uknowledge.uky.edu/entomology_etds/33/ [cité 19 août 2020]
 72. Prasad RS. Nutrition and reproduction in haematophagous arthropods. *Proc Anim Sci.* 96 (3):253-73.
 73. Moriyama M, Nikoh N, Hosokawa T, Fukatsu T. Riboflavin Provisioning Underlies Wolbachia's Fitness Contribution to Its Insect Host. *mBio.* 10 nov 2015;6 (6)
 74. Kikuchi Y, Hayatsu M, Hosokawa T, Nagayama A, Tago K, Fukatsu T. Symbiont-mediated insecticide resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2012, 109, 8618-22.
 75. Goddard J, Hasenkampf N, Edwards K, Shazo R, Embers M. Bed Bug Saliva Causes Release of Monocytic Inflammatory Mediators: Plausible Cause of Cutaneous Bite Reactions. *Int Arch Allergy Immunol.* 23 janv 2013;161:127-30.
 76. Abdel-Naser MB, Lotfy RA, Al-Sherbiny MM, Sayed Ali NM. Patients with papular urticaria have IgG antibodies to bedbug (*Cimex lectularius*) antigens. *Parasitol Res.* mai 2006;98 (6):550-6.
 77. Leverkus M, Jochim RC, Schäd S, Bröcker E-B, Andersen JF, Valenzuela JG, et al. Bullous Allergic Hypersensitivity to Bed Bug Bites Mediated by IgE against Salivary Nitrophenol. *J Invest Dermatol.* 1 janv 2006;126 (1):91-6.
 78. Goddard J, De Shazo R. Multiple feeding by the common bed bug, *Cimex lectularius*, without sensitization. *Midsouth Entomol.* 2009, 2(1):90-2.
 79. Reinhardt K, Kempke D, Naylor RA, Siva-Jothy MT. Sensitivity to bites by the bedbug, *Cimex lectularius*. *Med Vet Entomol.* 1 avr 2009;23:163-6.
 80. Bernardeschi C, Cleach L, Delaunay P, Chosidow O. Bed bug infestation. *BMJ Clinical research ed.,* 2013, 346:134-39
 81. Ibrahim O, Syed UM, Tomecki KJ. Bedbugs: Helping your patient through an infestation. *Cleve Clin J Med.* mars 2017;84 (3):207-11.

82. Goddard J, deShazo R. Bed Bugs (*Cimex lectularius*) and Clinical Consequences of Their Bites. JAMA. 1 avr 2009;301 (13):1358-66.
83. Wilcock J, Etherington C., Hawthorne K, Brown G. Insect bites. bmj, 2020, 370.
84. Scarupa MD, Economides A. Bedbug bites masquerading as urticaria. J Allergy Clin Immunol. 1 juin 2006;117 (6):1508-9.
85. Feinberg AR, Feinberg SM, Benaim-Pinto C. Asthma and rhinitis from insect allergens: I. Clinical importance. J Allergy. 1 sept 1956;27 (5):437-444.
86. Jimenez-Diaz C, Sanchez Cuenca C. Asthma produced by susceptibility to unusual allergens: Linseed, insects, tobacco, and chicory. Journal of Allergy, 1935, 6 (4):397-403
87. Fu W-Z, Yin K-S. Clinical Study of the Relationship Between the Bed Bug and Allergic Asthma. Chinese Journal Of Vector Biology And Control.1995, 1995 (1).
88. Doggett S. A Code of Practice For the Control of Bed Bug Infestations in Australia 4rd Edition 2013. [Internet] In : Département d'Entomologie Médicale, Université de Sydney, Australie. Disponible sur : <http://medent.usyd.edu.au/bedbug/index.htm> [cité 24 août 2020]
89. Venkatachalam PS, Belavady B. Loss of haemoglobin iron due to excessive biting by bed bugs. Trans R Soc Trop Med Hyg. 1 mai 1962;56 (3):218-21.
90. Pritchard MJ, Hwang SW. Severe anemia from bedbugs. CMAJ Can Med Assoc J. 1 sept 2009;181 (5):287-8.
91. Paulke-Korinek M, Széll M, Laferl H, Auer H, Wenisch C. Bed bugs can cause severe anaemia in adults. Parasitol Res. 22 déc 2011;110:2577-9.
92. Sabou M, Imperiale D. G, Andrès E, Abou-Bacar A, Foeglé J, Lavigne T, Candolfi E. Bed bugs reproductive life cycle in the clothes of a patient suffering from Alzheimer's disease results in iron deficiency anemia. Parasite, 2013, 20.
93. Michael, Potter F, Haynes KF, Connelly K, Deutsch M, Hardebeck E, et al. The sensitivity spectrum: human reactions to bed bug bites. Pest Control Technol. 2010;38 (2):70-100.
94. Ashcroft R, Seko Y, Chan LF, Dere J, Kim J, McKenzie K. The mental health impact of bed bug infestations: a scoping review. Int J Public Health. 1 nov 2015;60 (7):827-37.
95. Bellanger A-P, Crouzet J, Boussard M, Grenouillet F, Sechter D, Capellier G, et al. Ectoparasitosis or Ekbom syndrome? Can Fam Physician. nov 2009;55 (11):1089-92.
96. Burrows S, Perron S, Susser S. Suicide following an infestation of bed bugs. American Journal of Case Reports. 2013, 14:176-177
97. Man Burned After Trying to Kill Bedbugs in Car With Rubbing Alcohol [Internet] In: NBC New York . Disponible sur: <https://www.nbcnewyork.com/news/local/man-burned-bed-bugs-rental-car-rubbing-alcohol-police-long-island/1010036/> [cité 24 août 2020]
98. Blais T. Edmonton condo fire caused by Calgary exterminator prompts lawsuit from family whose child was left permanently disabled [Internet]. In: Edmonton Sun. Disponible sur: <https://edmontonsun.com/2013/07/11/edmonton-condo-fire-caused-by-calgary-exterminator-prompts-lawsuit-from-family-whose-child-was-left-permanently-disabled> [cité 24 août 2020].
99. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Acute illnesses associated with insecticides used to control bed bugs. Seven states, 2003-2010. MMWR. Morbidity and mortality weekly report. 2011, 60(37):1269–1274.
100. British couple and five other tourists died in Thailand « because of bed bug pesticide poisoning ». [Internet]. In: Daily Mail Online, 2011. Disponible sur: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-1385379/British-couple-tourists-die-Thailand-bed-bug-pesticide-poisoning.html> [cité 24 août 2020]
101. Fernquest J. Mystery tourist deaths and illegal bedbug spray [Internet] In : Bangkok Post Online. Disponible sur: <https://www.bangkokpost.com/learning/advanced/491114/mystery-tourist-deaths-illegal-bedbug-spray> [cité 24 août 2020]
102. Lai O, Ho D, Glick S, Jagdeo J. Bed bugs and possible transmission of human pathogens: a

systematic review. Arch Dermatol Res. 2016;308 (8):531-8.

103. Burton GJ. Bedbugs in relation to transmission of human diseases. Public Health Rep. juin 1963;78 (6):513-24.

104. Delaunay P, Blanc V, Del Giudice P, Levy-Bencheton A, Chosidow O, Marty P, et al. Bedbugs and Infectious Diseases. Clin Infect Dis Off Publ Infect Dis Soc Am. 15 janv 2011;52 (2):200-10.

105. Santé Publique France. Maladies à transmission vectorielle [Internet]. Disponible sur <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle> [cité 25 août 2020].

106. Marois I. Étude des patients hospitalisés lors de l'épidémie de dengue de 2017 en Nouvelle-Calédonie et élaboration d'un modèle prédictif de dengue sévère. Thèse de doctorat en médecine. Bordeaux : Université de Bordeaux 2, 2018, 111p

107. Rizzoli A, Hauffe HC, Carpi G, Vourc'h GI, Neteler M, Rosà R. Lyme borreliosis in Europe. Eurosurveillance. 7 juill 2011;16 (27):19906.

108. Ghouzzi M-HE, Boiret E, Wind F, Brochard C, Fittère S, Paris L, et al. Blood Donors and Blood Collection: Testing blood donors for Chagas disease in the Paris area, France: first results after 18 months of screening. Transfusion (Paris). 2010;50 (3):575-83.

109. Organisation Mondiale de la Santé. Maladie de Chagas (trypanosomiase américaine) [Internet]. Disponible sur: [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-\(american-trypanosomiasis\)](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-(american-trypanosomiasis)) [cité 26 août 2020]

110. Salazar R, Castillo-Neyra R, Tustin AW, Borrini-Mayorí K, Náquira C, Levy MZ. Bed Bugs (*Cimex lectularius*) as Vectors of Trypanosoma cruzi. Am J Trop Med Hyg. 4 févr 2015;92 (2):331-5.

111. Requena-Méndez A, Aldasoro E, Lazzari E de, Sicuri E, Brown M, Moore DAJ, et al. Prevalence of Chagas Disease in Latin-American Migrants Living in Europe: A Systematic Review and Meta-analysis. PLoS Negl Trop Dis. 13 févr 2015;9 (2):e0003540.

112. Soriano-Arandes A, Angheben A, Serre-Delcor N, Treviño-Maruri B, Prat JG i, Jackson Y. Control and management of congenital Chagas disease in Europe and other non-endemic countries: current policies and practices. Trop Med Int Health. 2016;21 (5):590-6.

113. INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale). Hépatite B [Internet] Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/hepatite-b> [cité 26 août 2020].

114. Silverman AL, Qu LH, Blow J, Zitron IM, Gordon SC, Walker ED. Assessment of hepatitis B virus DNA and hepatitis C virus RNA in the common bedbug (*Cimex lectularius* L.) and kissing bug (*Rodnius prolixus*). Am Jour Gastroenterol. 1 juill 2001;96 (7):2194-8.

115. Jupp PG, Purcell RH, Phillips JM, Shapiro M, Gerin JL. Attempts to transmit hepatitis B virus to chimpanzees by arthropods. S Afr Med J. 1991;79 (3):320-2.

116. INSERM (Institut national de la santé et de la recherche médicale). Cancer du foie et virus de l'hépatite C (VHC). [Internet]. Disponible sur: <https://presse.inserm.fr/cancer-du-foie-et-virus-de-lhepatite-c-vhc-interet-de-maintenir-dans-des-programmes-de-depistage-les-patients-cirrhotiques-gueris-de-linfection-virale-par-interferon-ou-antivirau/33008/> [cité 29 août 2020].

117. Ling J, Vinnersten TP, Hesson JC, Bohlin J, Roligheten E, Holmes EC, et al. Identification of hepatitis C virus in the common bed bug – a potential, but uncommon route for HCV infection? Emerg Microbes Infect. 1 janv 2020;9 (1):1429-31.

118. Lowe CF, Romney MG. Bedbugs as Vectors for Drug-Resistant Bacteria. Emerg Infect Dis. juin 2011;17 (6):1132-4.

119. Cockbrun C, Amoroso M, Carpenter M, Johnson B, Neive R, Miller A, Riotto A et al. Gram-Positive Bacteria Isolated from the Common Bed Bug, *Cimex lectularius* L, Entomologica Americana. 2013, 119(1):23-29.

120. Goddard J, Varela-Stokes A, Smith W, Edwards K. Artificial Infection of the Bed Bug With *Rickettsia parkeri*. Journal of medical entomology, 2012, 49:922-6

121. Leulmi H, Bitam I, Berenger JM, Lepidi H, Rolain JM, Almeras L, et al. Competence of *Cimex lectularius* Bed Bugs for the Transmission of Bartonella quintana, the Agent of Trench Fever. Turell MJ, éditeur. PLoS Negl Trop Dis. 22 mai 2015;9 (5).
122. Otti O, McTighe AP, Reinhardt K. In vitro antimicrobial sperm protection by an ejaculate-like substance. Funct Ecol. 2013;27 (1):219-26.
123. Moriyama M, Koga R, Hosokawa T. et al. Comparative transcriptomics of the bacteriome and the spermatheca of the bedbug *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). Appl Entomol Zool, 2012, 47, 233–243.
124. Kaushal A, Gupta K, Van Hoek M. Characterization of *Cimex lectularius* (bedbug) defensin peptide and its antimicrobial activity against human skin microflora. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2016, 470(4):955-960
125. Hoffmann J, Dimarcq J, Bulet P. Les peptides antibactériens inducibles des insectes. médecine/sciences. 1992;8 (5):432.
126. Wojcik J. Lawsuits over bedbugs a nightmare for hotels. [Internet]. In Business Insurance. Disponible sur : <http://www.businessinsurance.com/article/20040222/STORY/100014180/Lawsuits-over-bedbugs-a-nightmare-for-hotels> [cité 13 sept 2020]
127. CNEV (Centre national d'Expertise sur les Vecteurs). Punaises de lit en France : état des lieux et recommandations, 2015. Disponible sur : https://www.anses.fr/fr/system/files/CNEV-Ft-Sept2015-Rapport_Punaises_de_lits_en_France.pdf
128. Que Choisir. Punaises de lit – Pas de panique [Internet]. Disponible sur : <https://www.quechoisir.org/actualite-punaises-de-lit-pas-de-panique-n1307/> [cité 13 sept 2020].
129. Potter MF. The Perfect Storm: An Extension View on Bed Bugs. Am Entomol. 2006;3.
130. Doggett S.L., Russell R.C. The resurgence of bed bugs, *Cimex* spp.(Hemiptera: Cimicidae) in Australia. In Proceedings of the Sixth International Conference on Urban Pests. 2018, 6:407-425
131. Wang L, Xu Y, Zeng L. Resurgence of Bed Bugs (Hemiptera: Cimicidae) in Mainland China. Fla Entomol. mars 2013;96 (1):131-6.
132. Davies TGE, Field LM, Williamson MS. The re-emergence of the bed bug as a nuisance pest: implications of resistance to the pyrethroid insecticides. Med Vet Entomol. 2012;26 (3):241-54.
133. Reuters. NY bedbug epidemic spreads to the United Nations. [Internet]. Disponible sur : <https://www.reuters.com/article/us-un-bedbugs-idUSTRE69Q5AO20101027>
134. Wang C, Singh N, Zha C, Cooper R. Bed Bugs: Prevalence in Low-Income Communities, Resident's Reactions, and Implementation of a Low-Cost Inspection Protocol. J Med Entomol. 1 mai 2016;53 (3):639-46.
135. Jourdain F, Delaunay P, Bérenger J-M, Perrin Y, Robert V. The Common bed bug (*Cimex lectularius*) in metropolitan France. Survey on the attitudes and practices of private- and public-sector professionals. Parasite. 2016;23:38.
136. INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale). Consultations liées aux punaises de lit en médecine générale en France métropolitaine, période 2019-2020. [Internet]. Disponible sur : <https://www.sentiweb.fr/document/5008> [cité 31 août 2020].
137. Doggett S. L., Geary M. J., Crowe W. J., Wilson P., Russell R. C. Has the tropical bed bug, *Cimex hemipterus* (Hemiptera: Cimicidae), invaded Australia?. Environmental Health, 2003, 3(4), 80.
138. Bertaud N. Connait-on les punaises de lit ? : enquête auprès de la population poitevine. Thèse de doctorat en pharmacie. Poitiers : Université de Poitiers, 2015, 58p.
139. Seidel C, Reinhardt K. Bugging Forecast: Unknown, Disliked, Occasionally Intimate. Bed Bugs in Germany Meet Unprepared People. PLOS ONE. 2 janv 2013;8 (1) p. e51083.
140. Romero A, Sutherland AM, Gouge DH, Spafford H, Nair S, Lewis V, et al. Pest Management Strategies for Bed Bugs (Hemiptera: Cimicidae) in Multiunit Housing: A Literature Review on Field Studies. J Integr Pest Manag., 2017, 8(1)
141. Boase C, Robinson W, Bajomi D. Bed bugs (Hemiptera: Cimicidae): an evidence-based

- analysis of the current situation. In : Proceedings of the sixth international conference on urban pests. OOK-Press Veszprém, 2008. p.7-14.
142. Barzman M, Bàrberi P, Birch ANE, Boonekamp P, Dachbrodt-Saaydeh S, Graf B, et al. Eight principles of integrated pest management. *Agron Sustain Dev.* oct 2015;35 (4):1199-215.
 143. Soderlund D. M, Clark J. M, Sheets L. P, Mullin L. S., Piccirillo V. J., Sargent D, Weiner M. L. Mechanisms of pyrethroid neurotoxicity: implications for cumulative risk assessment. *Toxicology*, 2002; 171(1):3-59.
 144. Neff D, Frazier SF, Quimby L, Wang R-T, Zill S. Identification of resilin in the leg of cockroach, *Periplaneta americana*: confirmation by a simple method using pH dependence of UV fluorescence. *Arthropod Struct Dev.* 1 janv 2000;29 (1):75-83.
 145. Gürtler RE, Oneto ML, Cecere MC, Castañera MB, Canale DM. A Simple Method to Identify Triatomine (Hemiptera: Reduviidae) Feces in Sensing Devices Used in Vector Surveillance Programs. *J Med Entomol.* 1 mars 2001;38 (2):147-52.
 146. ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Punaises de lit en France : état des lieux et recommandations. [Internet] Disponible sur: <https://docplayer.fr/4641269-Punaises-de-lit-en-france-etat-des-lieux-et-recommandations.html> [cité 5 sept 2020].
 147. Vaidyanathan R, Feldlaufer MF. Bed Bug Detection: Current Technologies and Future Directions. *Am J Trop Med Hyg.* 3 avr 2013;88 (4):619-25.
 148. Wang C, Gibb T, Bennett GW. Evaluation of two least toxic integrated pest management programs for managing bed bugs (Heteroptera: Cimicidae) with discussion of a bed bug intercepting device. *J Med Entomol.* mai 2009;46 (3):566-71.
 149. Wang, C., Tsai, W. T., Cooper, R., & White, J. Effectiveness of bed bug monitors for detecting and trapping bed bugs in apartments. *Journal of Economic Entomology*, 2011, 104 (1):274-278.
 150. Cooper R, Wang C. The Future of Bed Bugs. [Internet] In : NPMA (National Pest Management Association). Disponible sur: <https://entomology.rutgers.edu/personnel/changlu-wang/docs/Wang2012Pestworld.pdf> [cité 5 sept 2020].
 151. Wang C, Singh N, Cooper R, Liu C, Buczkowski G. Evaluation of an Insecticide Dust Band Treatment Method for Controlling Bed Bugs. *J Econ Entomol.* 106:347-52.
 152. Richardson H.H. The Action of Bean Leaves against the Bedbug. *Journal of Economic Entomology*, 1943; 36(4).
 153. Szyndler, M. W., Haynes, K. F., Potter, M. F., Corn, R. M., & Loudon, C. Entrapment of bed bugs by leaf trichomes inspires microfabrication of biomimetic surfaces. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, 10(83), p20130174.
 154. Wagner GJ. Secreting Glandular Trichomes: More than Just Hairs. *Plant Physiol.* 1 juill 1991;96 (3):675-9.
 155. Bustamante J, Panzarino JF, Rupert TJ, Loudon C. Forces to pierce cuticle of tarsi and material properties determined by nanoindentation: The Achilles' heel of bed bugs. *Biol Open.* 15 oct 2017;6 (10):1541-51.
 156. Singh N, Wang C, Cooper R. Effect of Trap Design, Chemical Lure, Carbon Dioxide Release Rate, and Source of Carbon Dioxide on Efficacy of Bed Bug Monitors. *J Econ Entomol.* 1 août 2013;106 (4):1802-11.
 157. Wang C, Tsai W-T, Cooper R, White J. Effectiveness of Bed Bug Monitors for Detecting and Trapping Bed Bugs in Apartments. *J Econ Entomol.* 1 févr 2011;104 (1):274-8.
 158. Packtite by Beacon-instructions [Internet]. Disponible sur: <http://www.sternenvironmental.com/pdfs/beacon-instructions.pdf> [cité 6 sept 2020]
 159. Singh N, Wang C, Cooper R. Effectiveness of a Sugar–Yeast Monitor and a Chemical Lure for Detecting Bed Bugs. *J Econ Entomol.* 1 juin 2015;108 (3):1298-303.
 160. Legrand P., Verheggen F., Haubruge É., Francis F. Synthèse bibliographique sur le

comportement de recherche de l'hôte chez la punaise de lit (*Cimex lectularius*) et applications dans le cadre de la lutte intégrée. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2016; 20(2).

161. Wang C., Gibb T., Bennett G. W., McKnight S. Bed bug (Heteroptera: Cimicidae) attraction to pitfall traps baited with carbon dioxide, heat, and chemical lure. *Journal of economic entomology*, 2009; 102(4), 1580-1585.

162. Schaafsma EJ, Hapke SD, Banfield MG. Bed Bug (*Cimex lectularius* L.) Population Composition as Determined by Baited Traps. *Insects*. 30 avr 2012;3 (2):442-52.

163. Gries R, Britton R, Holmes M, Zhai H, Draper J, Gries G. Bed bug aggregation pheromone finally identified. *Angew Chem Int Ed Engl*. 19 janv 2015;54 (4):1135-8.

164. Browne C., Stafford K., Fordham R. The use of scent-detection dogs. *Irish Veterinary Journal*, 2006; 59(2), 97.

165. Sonoda H, Kohnoe S, Yamazato T, Satoh Y, Morizono G, Shikata K, et al. Colorectal cancer screening with odour material by canine scent detection. *Gut*. 1 juin 2011;60 (6):814-9.

166. Taylor M. T, McCready J., Broukhanski G., Kirpalaney S., Lutz H., Powis J. Using dog scent detection as a point-of-care tool to identify toxigenic *Clostridium difficile* in stool. In *Open forum infectious diseases*, 2018 5(8), p179.

167. Cooper R., Wang C., Singh N. Accuracy of trained canines for detecting bed bugs (Hemiptera: Cimicidae). *Journal of economic entomology*, 2014; 107(6):2171-2181.

168. NPMA (National Pest Management Association). Best Management Practices for Bed Bugs, 2016 [Internet]. Disponible sur: https://nmpapestworld.org/default/assets/File/techresources/NPMA%20Bed%20Bug%20BMPs%20approved%202016_07_28.pdf [cité 7 sept 2020]

169. Lehnert M.P, Pereira R.M, Koehler P.G, Walker, W, Lehnert M.S. (2011). Control of *Cimex lectularius* using heat combined with dichlorvos resin strips. *Medical and veterinary entomology*, 25(4):460-464.

170. EGTOP (Expert Group for Technical Advice on Organic Production). Final Report On Plant Protection Products [Internet] In : Commission Européenne ; Agriculture et développement rural. Disponible sur https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/egtop-final-report-plant_protection_products-ii_en_1.pdf [cité 7 sept 2020]

171. DeVries ZC, Reid WR, Kells SA, Appel AG. Effects of Starvation on Deltamethrin Tolerance in Bed Bugs, *Cimex lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae). *Insects*. mars 2015;6 (1):102-11.

172. Getty G., Moore R., and Lewis V.R. A trial evaluation of the London Luxury bed bug mattress protector. *Pest Control Tech*, 2012, 40(12):116–118

173. FSD (Fédération Suisse des Désinfestateurs). Guide européen des méthodes de lutte contre les punaises de lit, Deuxième version [Internet]. Disponible sur : <http://www.fsd-vss.ch/sites/default/files/dokumente-allgemein/ECov2%20Fran%C3%A7ais%20GC%20FSD%202017.pdf> [cité 6 sept 2020]

174. Miller DM, Meek F. Cost and Efficacy Comparison of Integrated Pest Management Strategies with Monthly Spray Insecticide Applications for German Cockroach (Dictyoptera: Blattellidae) Control in Public Housing. *J Econ Entomol*. 2004;97 (2):11.

175. Kells SA. Bed Bugs: A Systemic Pest Within Society. *Am Entomol*. 2006;52 (2):107-8.

176. Suty L. La lutte biologique : définitions et concepts généraux. *Sci En Partage*. 2010;43-63.

177. OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Parasites et prédateurs des punaises de lit [Internet]. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/266730/PMC2554706.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [cité 8 sept 2020].

178. Hase A. Successful Biological Control of Bugs by *T. flavidus*. *Naturwissenschaften*, 1934, 22(38).

179. We the people, Your Voice in Our Government. Introduce *Thanatus Flavidus* Spiders to American Cities for the purpose of pest control. [Internet]. In : Maison Blanche des États-Unis. Disponible sur: <https://petitions.whitehouse.gov/petition/introduce-thanatus-flavidus-spiders-american-cities-purpose-pest-control> [cité 8 sept 2020]
180. Javahery M. Natural history of *Reduvius personatus* Linnaeus (Hemiptera: Heteroptera: Reduviidae) in North America. *Munis Entomology & Zoology*, 2013, 8(2):685-703.
181. Wattal BL, Kalra NL. *Pyralis pictalis* Curt. (Pyralidac: Lepidoptera) Larvae as Predators of Eggs of Bed Bug, *Cimex hemipterus* Fab. (Cimicidae: Hemiptera). *Indian J Malariol*. 1960;14 (1):77-9.
182. Brown C.R, Page C.E, Robison G.A, O'Brien V.A, Booth W. Predation by ants controls swallow bug (Hemiptera: Cimicidae: *Oeciacus vicarius*) infestations. *Journal of Vector Ecology*, 2015, 40(1):152-157.
183. Xavier CAD, Allen ML, Whitfield AE. Ever-increasing viral diversity associated with the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Formicidae: Hymenoptera). *bioRxiv*, 2020; 245274.
184. Auteur inconnu. Bedbugs—Cimicidae. *Bulletin of the World Health Organization*, 1964, 30, p91
185. Barbarin A.M, Jenkins N.E, Rajotte E.G, Thomas M.B. A preliminary evaluation of the potential of *Beauveria bassiana* for bed bug control. *Journal of invertebrate pathology*, 2012, 111(1):82-5.
186. Ulrich K.R, Feldlaufer M.F, Kramer M, Leger R.J.S. Inhibition of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* sensu lato in vitro by the bed bug defensive secretions (E)-2-hexenal and (E)-2-octenal. *BioControl*, 2015, 60(4):517-26
187. Pietri JE, Liang D. Virulence of entomopathogenic bacteria in the bed bug, *Cimex lectularius*. *J Invertebr Pathol*. 1 janv 2018;151:1-6.
188. Auteur inconnu. Bedbugs—Cimicidae. *Bulletin of the World Health Organization*, 1964, 30, p91
189. Naylor RA, Boase CJ. Practical Solutions for Treating Laundry Infested With *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). *J Econ Entomol*. 1 févr 2010;103 (1):136-9.
190. Benoit JB, Lopez-Martinez G, Teets NM, Phillips SA, Denlinger DL. Responses of the bed bug, *Cimex lectularius*, to temperature extremes and dehydration: levels of tolerance, rapid cold hardening and expression of heat shock proteins. *Med Vet Entomol*. déc 2009;23 (4):418-25.
191. Doggett SL, Dwyer DE, Peñas PF, Russell RC. Bed Bugs: Clinical Relevance and Control Options. *Clin Microbiol R*. 2012, 25(1):164-92
192. Wang C, Lü L, Xu M. Carbon Dioxide Fumigation for Controlling Bed Bugs. *Journal of medical entomology*, 2012, 49:1076-83.
193. Sg G, Jj L, Pw S, Al H. Gaseous chlorine dioxide as an alternative for bedbug control. *Infect Control Hosp Epidemiol*. 20 mars 2012;33 (5):495-9.
194. INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Dioxyde de chlore (FT 258) [Internet]. Disponible sur: http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_258§ion=pathologieToxicologie [cité 8 sept 2020].
195. Darriet F. Moustiquaires Imprégnées Et Résistance Des Moustiques Aux Insecticides. 1^{ère} Edition. IRD Éd, Marseille France. 2017
196. Yu SJ. *The Toxicology and Biochemistry of Insecticides*. CRC Press Ed. New York, NY. 2014, 374 p.
197. Testud F, Grillet J-P. Insecticides organophosphorés, carbamates, pyréthriinoïdes de synthèse et divers. *EMC - Pathol Prof Environ*. janv 2007;2 (2):1-24.
198. Bouchala F. Les Pyréthriinoïdes [Internet] In Université de médecine de Sétif. Disponible sur: https://fmedecine.univ-setif.dz/ProgrammeCours/LES_PYRETHRINOIDES_2020.pdf [cité 9 sept 2020].
199. INCHEM (International Programme On Chemical Safety). Cypermethrin. [Internet] Disponible

sur: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc142.htm#SectionNumber:6.2> [cité 9 sept 2020].

200. Soderlund DM. Molecular Mechanisms of Pyrethroid Insecticide Neurotoxicity: Recent Advances. *Arch Toxicol.* févr 2012;86 (2):165-81.
201. Wang C., Singh N., Zha C., Cooper R. Efficacy of selected insecticide sprays and aerosols against the common bed bug, *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). *Insects*, 2016, 7(1), 5.
202. ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Fixation de limites maximales de résidus (LMR) concernant le butoxyde de pipéronyle sur les végétaux [Internet]. Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/PHYTO2012sa0049.pdf> [cité 10 septembre 2020]
203. Bradberry SM, Cage SA, Proudfoot AT, Vale JA. Poisoning due to pyrethroids. *Toxicol Rev.* 2005;24 (2):93-106.
204. Office des publications de l'Union européenne. Directive Du Conseil du 15 juillet 1991 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques [Internet]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A01991L0414-20110601> [cité 9 sept 2020].
205. Académie Nationale de Pharmacie. Acétylcholinestérase [Internet]. Disponible sur: [http://dictionnaire.acadpharm.org/w/Ac%C3%A9tylcholinest%C3%A9rase_\(AChE\)](http://dictionnaire.acadpharm.org/w/Ac%C3%A9tylcholinest%C3%A9rase_(AChE)) [cité 9 sept 2020].
206. Tawatsin A., Thavara U., Chompoonsri J., Phusup Y., Jonjang N., Khumsawads, C., Siriyasatien P. Insecticide resistance in bedbugs in Thailand and laboratory evaluation of insecticides for the control of *Cimex hemipterus* and *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). *Journal of Medical Entomology*, 2011, 48(5):1023-1030.
207. Kilpinen, O., Kristensen, M., & Jensen, K. M. V. Resistance differences between chlorpyrifos and synthetic pyrethroids in *Cimex lectularius* population from Denmark. *Parasitology research*, 2011, 109(5), 1461.
208. Lilly D. G., Doggett S. L., Zalucki M. P., Orton C, Russell R. C. Bed bugs that bite back, confirmation of insecticide resistance in the common bed bug, *Cimex lectularius*. *Professional Pest Manager*, 2009, 13, 22-24.
209. Abou-Donia MB. Organophosphorus ester-induced chronic neurotoxicity. *Arch Environ Health.* août 2003;58 (8):484-97.
210. Jurenka, R. *Advances in Insect Physiology*. 1ère Edition. Elsevier Ed. Amsterdam. 2019, 436p.
211. Ghoneim K., Bakr R.F. Physiological activities of anti-Juvenile hormone agents against insects and their role for devising fourth generation insecticides: a comprehensive review. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A, Entomology*, 2018 11(3), 45-138.
212. Naylor, R., Bajomi, D., & Boase, C. Efficacy of (S)-methoprene against *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae). In 6th International Conference on Urban Pests, Budapest, Hungary, 13-16 July 2008:115-121
213. Sierras A, Schal C. Lethal and Sublethal Effects of Ingested Hydroprene and Methoprene on Development and Fecundity of the Common Bed Bug (Hemiptera: Cimicidae). *J Med Entomol.* 4 juill 2020;57 (4):1199-206.
214. Campbell B, Baldwin R, Koehler P. Locomotion Inhibition of *Cimex lectularius* L. Following Topical, Sublethal Dose Application of the Chitin Synthesis Inhibitor Lufenuron. *Insects.* sept 2017;8 (3):94.
215. How Y-F, Lee C-Y. Surface contact toxicity and synergism of several insecticides against different stages of the tropical bed bug, *Cimex hemipterus* (Hemiptera: Cimicidae). *Pest Manag Sci.* 2011;67 (6):734-40.
216. Romero A, Anderson TD. High Levels of Resistance in the Common Bed Bug, *Cimex lectularius* (Hemiptera: Cimicidae), to Neonicotinoid Insecticides. *J Med Entomol.* 1 mai 2016;53 (3):727-31.
217. ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du

- travail). L'Impact sur la Santé Humaine des Substances Néonicotinoïdes Autorisées Dans les Produits Phytopharmaceutiques Et Les Produits Biocides. [Internet]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIOC2016SA0104.pdf> [cité 10 sept 2020].
218. Ashbrook AR, Scharf ME, Bennett GW, Gondhalekar AD. Detection of Reduced Susceptibility to Chlorfenapyr- and Bifenthrin-Containing Products in Field Populations of the Bed Bug (Hemiptera: Cimicidae). *J Econ Entomol.* 1 juin 2017;110 (3):1195-202.
219. WHO (World Health Organization). Chlorfenapyr. [Internet] Disponible sur : https://www.who.int/whopes/quality/Chlorfenapyr_specs_eval_WHO_December_2017.pdf?ua=1 [cité 10 septembre 2020]
220. Maudouit M, Rochoy M. Revue systématique de l'impact du chlordécone sur la santé humaine aux Antilles françaises. *Therapies.* 1 déc 2019;74 (6):611-25.
221. Jones SC, Bryant JL. Ineffectiveness of Over-the-Counter Total-Release Foggers Against the Bed Bug (Heteroptera: Cimicidae). *J Econ Entomol.* 1 juin 2012;105 (3):957-63.
222. Jones SC, Bryant JL, Harrison SA. Behavioral Responses of the Bed Bug to Permethrin-Impregnated ActiveGuard™ Fabric. *Insects.* 7 juin 2013;4 (2):230-40.
223. Crawley S, Gordon J, Kowles K, Potter M, Haynes K. Impact of sublethal exposure to a pyrethroid-neonicotinoid insecticide on mating, fecundity and development in the bed bug *Cimex lectularius* L. (Hemiptera: Cimicidae). *PLoS ONE.* 10 mai 2017;12.
224. Zhu F, Sams S, Moural T, Haynes KF, Potter MF, Palli SR. RNA interference of NADPH-cytochrome P450 reductase results in reduced insecticide resistance in the bed bug, *Cimex lectularius*. *PloS One.* 2012;7 (2):e31037.
225. Punchihewa R, de Silva WAPP, Weeraratne TC, Karunaratne SHPP. Insecticide resistance mechanisms with novel 'kdr' type gene mutations in the tropical bed bug *Cimex hemipterus*. *Parasit Vectors.* 21 juin 2019;12 (1):310.
226. Zhu F, Gujar H, Gordon JR, Haynes KF, Potter MF, Palli SR. Bed bugs evolved unique adaptive strategy to resist pyrethroid insecticides. *Sci Rep.* 14 mars 2013;3 (1):1456.
227. Benoit J. B, Adelman Z.N, Reinhardt K, Dolan A, Poelchau M, Jennings E.C, Zhu F. Unique features of a global human ectoparasite identified through sequencing of the bed bug genome. *Nature communications,* 2016, 7(1), 1-10.
228. Bai X, Mamidala P, Rajarapu SP, Jones SC, Mittapalli O. Transcriptomics of the Bed Bug (*Cimex lectularius*). *PloS one,* 2011, 6(1) e16336.
229. Mamidala P, Wijeratne AJ, Wijeratne S, Kornacker K, Sudhamalla B, Rivera-Vega LJ, et al. RNA-Seq and molecular docking reveal multi-level pesticide resistance in the bed bug. *BMC Genomics.* 6 janv 2012;13:6.
230. Koganemaru R, Miller D.M, Adelman Z.N. Robust cuticular penetration resistance in the common bed bug (*Cimex lectularius* L.) correlates with increased steady-state transcript levels of CPR-type cuticle protein genes. *Pesticide biochemistry and physiology,* 2013, 106(3):190-197.
231. Lilly D. G., Latham S. L., Webb C. E., Doggett, S. L. Cuticle thickening in a pyrethroid-resistant strain of the common bed bug, *Cimex lectularius* L.(Hemiptera: Cimicidae). *PloS One,* 2016, 11(4), e0153302.
232. Rinkevich FD, Du Y, Dong K. Diversity and Convergence of Sodium Channel Mutations Involved in Resistance to Pyrethroids. *Pestic Biochem Physiol.* 1 juill 2013;106 (3):93-100.
233. Sheele JM, Anderson JF, Tran TD, Teng YA, Byers PA, Ravi BS, et al. Ivermectin Causes *Cimex lectularius* (Bedbug) Morbidity and Mortality. *J Emerg Med.* 1 sept 2013;45 (3):433-40.
234. Sheele JM, Ridge GE. Toxicity and potential utility of ivermectin and moxidectin as xenointoxicants against the common bed bug, *Cimex lectularius* L. *Parasitol Res.* 1 août 2016;115 (8):3071-81.
235. Sheele, J. M, Ridge G, Li X, Schlatzer D, Lesser E. The Benefit of a Single Oral Dose of Ivermectin in Humans: The Adverse Effects on *Cimex lectularius* L. Populations and Fecundity. *Cureus,*

2019, 11(11).

236. Pietri JE, Liang D. Insecticidal Activity of Doxycycline against the Common Bedbug. *Antimicrob Agents Chemother.* 21 2020;64 (5).

237. Phillips TW, Aikins MJ, Thoms E, Demark J, Wang C. Fumigation of Bed Bugs (Hemiptera: Cimicidae): Effective Application Rates for Sulfuryl Fluoride. *J Econ Entomol.* 1 août 2014;107 (4):1582-9.

238. INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Bromométhane - Fiche toxicologique. [Internet]. Disponible sur: http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_67 [cité 11 sept 2020].

239. Lauterbach M, Solak E, Kaes J, Wiechelt J, Mach M-AV, Weilemann LS. Epidemiology of Hydrogen Phosphide Exposures in Humans Reported to the Poison Center in Mainz, Germany, 1983–2003. *Clin Toxicol.* 1 janv 2005;43 (6):575-81.

240. Schiestl F.P, Roubik D.W. Odor compound detection in male euglossine bees. *Journal of chemical ecology*, 2003, 29(1), 253-257.

241. Larson NR, Zhang A, Feldlaufer MF. Fumigation Activities of Methyl Benzoate and Its Derivatives Against the Common Bed Bug (Hemiptera: Cimicidae). *J Med Entomol.* 9 janv 2020;57 (1):187-91.

242. Akhtar Y, Isman MB. Efficacy of diatomaceous earth and a DE-aerosol formulation against the common bed bug, *Cimex lectularius* Linnaeus in the laboratory. *J Pest Sci.* 1 sept 2016;89 (4):1013-21.

243. Agnew JL, Romero A. Behavioral responses of the common bed bug, *Cimex lectularius*, to insecticide dusts. *Insects*, 2017, 8(3), 83.

244. Akhtar Y, Isman MB. Horizontal Transfer of Diatomaceous Earth and Botanical Insecticides in the Common Bed Bug, *Cimex lectularius* L.; Hemiptera: Cimicidae. *PLOS ONE.* 25 sept 2013;8 (9):e75626.

245. Benoit J.B, Phillips S.A, Croxall T. J, Christensen B. S, Yoder J. A, Denlinger D. L. Addition of alarm pheromone components improves the effectiveness of desiccant dusts against *Cimex lectularius*. *Journal of Medical Entomology*, 2014, 46(3):572-579

246. INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Les silices amorphes - Brochure - INRS [Internet]. Disponible sur : <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%205033> [cité 8 sept 2020].

247. INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Silice cristalline - Fiche toxicologique. [Internet]. Disponible sur: http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_232 [cité 8 sept 2020].

248. Korunić Z, Rozman V, Liška A, Lucić P. A review of natural insecticides based on diatomaceous earths. *Poljoprivreda/Agriculture*, 2016, 22(1):10-18.

249. Singh N, Wang C, Cooper R. Potential of essential oil-based pesticides and detergents for bed bug control. *Journal of economic entomology*, 2014, 107(6):2163-170.

250. Feldlaufer, M. F., & Ulrich, K. R. (2015). Essential oils as fumigants for bed bugs (Hemiptera: Cimicidae). *Journal of Entomological Science*, 2015, 50(2):129-37.

251. Gaire S, Scharf ME, Gondhalekar AD. Toxicity and neurophysiological impacts of plant essential oil components on bed bugs (Cimicidae: Hemiptera). *Sci Rep.* 8 mars 2019;9 (1):3961.

252. Wang C, Lü L, Zhang A, Liu C. Repellency of Selected Chemicals Against the Bed Bug (Hemiptera: Cimicidae). *J Econ Entomol.* 1 déc 2013;106 (6):2522-9.

253. ARS PACA (Agence Régionale de Santé région Provence Alpes Côte d'Azur). CHOIX_desinsectiseur_punaises. [Internet] Disponible sur: https://www.paca.ars.sante.fr/sites/default/files/2016-12/CHOIX_desinsectiseur_punaises3D_V2_200214_0.pdf [cité 12 sept 2020].

254. Service Public France. Charges à payer par le locataire (charges « locatives » ou « récupérables ») [Internet]. Disponible sur: <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F947> [cité 13 sept 2020].

DEMANDE D'IMPRIMATUR

Date de soutenance : 3 mars 2021

<p style="text-align: center;">DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE</p> <p>présenté par : Arnaud GLOMET</p> <p><u>Sujet</u> : Prolifération des punaises de lits en milieu urbain : nouvelle réglementation et traitements des locaux lors d'infestations.</p> <p><u>Jury</u> :</p> <p>Président : M. Xavier BELLANGER, Maître de Conférences Directeur : Mme Sandrine CAPIZZI, Maître de Conférences Juges : Mme Claire DOUSSET, Pharmacien M. Bastien WAGNER, Pharmacien</p>	<p style="text-align: center;">Vu, Nancy, le 22 janvier 2021</p> <p style="text-align: center;">Le Président du Jury Directeur de Thèse</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  M. Xavier BELLANGER </div> <div style="text-align: center;">  Mme Sandrine CAPIZZI </div> </div>
<p style="text-align: center;">Vu et approuvé, Nancy, le</p> <p style="text-align: center;">Doyen de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Lorraine,</p> <p style="text-align: center;">Pr. Raphaël DUVAL</p>	<p style="text-align: center;">Vu, Nancy, le</p> <p style="text-align: center;">Le Président de l'Université de Lorraine,</p> <p style="text-align: center;">10 Pierre MUTZENHARDT</p> <p>N° d'enregistrement :</p>

N° d'identification :

TITRE

PROLIFÉRATION DES PUNAISES DE LIT EN MILIEU URBAIN : NOUVELLE RÉGLEMENTATION ET TRAITEMENTS DES LOCAUX LORS D'INFESTATIONS DES PUNAISES DE LITS

Thèse soutenue le 03 Mars 2021

Par Arnaud Glomet

RESUME :

La punaise de lit est un des plus anciens parasites hématophages de l'homme. Elle l'aurait rencontré à la Préhistoire et ne l'aurait ensuite plus jamais quitté. Si on a cru pouvoir s'en débarrasser au sortir de la Seconde Guerre Mondiale avec l'avènement du génie chimique et l'apparition de puissants insecticides comme le DDT, depuis les années 1990 dans les grandes agglomérations, l'infestation des logements collectifs et individuels par cet insecte est en pleine recrudescence. Pour l'éradiquer, la détection doit être rapide et précoce, car la lutte est difficile et onéreuse, du fait du mode de vie particulier de cet arthropode et de sa résistance croissante aux insecticides.

Si aucune étude ne l'implique pour le moment dans la transmission d'agents infectieux, ses piqûres peuvent engendrer des démangeaisons, des lésions cutanées et des réactions allergiques parfois à risque de complication et leur présence dans un foyer est presque toujours associée à une dégradation de la qualité de vie des résidents.

Très en retard par rapport à d'autres pays, la France a décidé de placer l'année 2020 comme une année charnière dans sa stratégie de lutte, en mettant en place un plan gouvernemental de lutte contre les punaises de lit, permettant aux différents publics de mieux appréhender cette problématique. Elle souhaite mieux accompagner ses ressortissants dans les différentes étapes de la lutte contre une infestation de punaises de lit en fournissant une meilleure information au public, une meilleure formation aux professionnels et en adaptant le Droit à ces nouveaux enjeux.

MOTS CLES : Punaises de lit, *Cimex lectularius*, piqûres, insecte, parasite, insecticide, lutte intégrée, réglementation

Directeur de thèse	Intitulé du laboratoire	Nature
<u>Sandrine Capizzi</u>	<u>Laboratoire de microbiologie</u>	Expérimentale <input type="checkbox"/> Bibliographique <input checked="" type="checkbox"/> Thème <input type="checkbox"/>

Thèmes	1 – Sciences fondamentales 3 – Médicament ⑤ - Biologie	② – Hygiène/Environnement 4 – Alimentation – Nutrition 6 – Pratique professionnelle
--------	--	---

