

**Évaluation préalable finale concernant les
souches de**

***Paenibacillus polymyxa* ATCC 842**

***Paenibacillus polymyxa* ATCC 55407**

***Paenibacillus polymyxa* 13540-4**

Environnement Canada

Santé Canada

Août 2015

N° de cat. : En14-230/2015F-PDF
ISBN 978-0-660-02557-5

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par le gouvernement du Canada et que la reproduction n'a pas été faite en association avec le gouvernement du Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de l'auteur. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec l'informathèque d'Environnement Canada au 1-800-668-6767 (au Canada seulement) ou 819-997-2800 ou par courriel à enviroinfo@ec.gc.ca.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'environnement, 2015.

Also available in English

Conformément à l'alinéa 74*b*) de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*, les ministres de l'Environnement et de la Santé ont mené une évaluation préalable des souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *Paenibacillus polymyxa*.

Les souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *P. polymyxa* partagent des caractéristiques avec d'autres souches de *P. polymyxa* qui sont présente dans l'environnement. *P. polymyxa* est une bactérie anaérobie facultative qui est présente dans de nombreux environnements. Elle a été isolée à partir de sols, de la rhizosphère, de racines de plantes, et de sédiments marins. *P. polymyxa* a une vaste gamme d'hôte en tant que bactérie favorisant la croissance des plantes. Elle a des caractéristiques qui lui confèrent une utilisation potentielle dans le contrôle biologique, la croissance des plantes, dans la production d'enzymes et dans les produits chimiques de spécialité, dans le traitement des eaux et des eaux usées, et dans des applications de nettoyage et de dégraissage.

P. polymyxa n'est pas connue en tant qu'agent pathogène animal ou végétal. Le rejet de ces souches dans l'environnement ne devrait pas avoir des effets néfastes sur l'environnement.

P. polymyxa n'est pas non plus connue comme étant un agent pathogène humain. Malgré son ubiquité, seuls deux cas d'infection humaine par la bactérie ont été signalés; les deux cas impliquaient des personnes souffrant de problèmes de santé préexistants. Parmi ces deux cas, un seul indiquait la bactérie *P. polymyxa* comme l'unique micro-organisme impliqué.

La présente évaluation prend en compte les caractéristiques des souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *P. polymyxa* à l'égard des effets sur la santé humaine et l'environnement associés à l'utilisation de produits et des procédés industriels visés par la LCPE (1999), y compris les rejets dans l'environnement par l'entremise de flux de déchets et l'exposition humaine fortuite par l'intermédiaire des milieux naturels. Afin de mettre à jour les renseignements sur les utilisations actuelles, le gouvernement a lancé une enquête pour la collecte obligatoire de renseignements en vertu de l'article 71 de la LCPE (1999), qui a été publiée dans la Partie I de la *Gazette du Canada* le 3 octobre 2009. Les renseignements fournis en réponse à l'avis indiquent que la souche ATCC 55407 de *P. polymyxa* n'a pas été importée ou fabriquée au Canada en 2008, mais que les souches ATCC 842 et 13540-4 de *P. polymyxa* sont utilisées dans des produits commerciaux et de consommation.

Compte tenu de tous les éléments de preuve contenus dans l'évaluation préalable, les souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *P. polymyxa*

présentent un faible risque d'effets nocifs sur les organismes et sur l'intégrité globale de l'environnement. Il est conclu que les souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *P. polymyxa* ne répondent pas aux critères énoncés à l'alinéa 64a) ou b) de la LCPE (1999), car elles ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à avoir, immédiatement ou à long terme, un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique, ni à mettre en danger l'environnement essentiel pour la vie.

D'après les renseignements présentés dans cette évaluation préalable, il est conclu que les souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 de *P. polymyxa* ne répondent pas aux critères énoncés à l'alinéa 64c) de la LCPE (1999), car elles ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions qui constituent ou peuvent constituer un danger au Canada pour la vie ou la santé humaines.

Table des matières

Sommaire	Error! Bookmark not defined.
Introduction	vii
Décisions d'autorités compétentes sur le plan national et international	viii
Échelle nationale	viii
Échelle internationale	viii
1. Évaluation du danger	1
1.1 Caractérisation de la bactérie <i>Paenibacillus polymyxa</i>	1
1.1.1 Identification taxonomique et historique de la souche	1
1.1.2 Propriétés biologiques et écologiques	5
1.1.3 Effets	14
1.2 Gravité du danger	19
2. Évaluation de l'exposition	21
2.1 Sources d'exposition	21
2.2 Caractérisation de l'exposition	23
2.2.1 Environnement	23
2.2.2 Humains	24
3. Caractérisation des risques	25
4. Conclusion	26
5. Références	27
6. Annexe : Phylogénie du genre <i>Paenibacillus</i>	37

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Liste des désignations de souches actuelles pour la souche de <i>P. polymyxa</i> ATCC 842.....	2
Tableau 1-2 : Conditions de croissance de la souche de <i>P. polymyxa</i> ATCC 8423	
Tableau 1-3 : Propriétaires morphologiques de la souche de <i>P. polymyxa</i> ATCC 842	3
Tableau 1-4 : Propriétaires biochimiques de la souche <i>P. polymyxa</i> ATCC 842 ..	4
Tableau 1-5 : Propriétés moléculaires de la souche de <i>P. polymyxa</i> ATCC 842 ..	5
Tableau 1-6 : Génomes et plasmides séquencés de souches de <i>P. polymyxa</i> ..	13
Tableau 1-7 : Rapports de cas chez les humains impliquant d'autres espèces de souches de <i>Paenibacillus</i>	18

Liste des figures

Figure 1-1 : Persistance de souches de <i>P. polymyxa</i> (inscrites à la LIS) dans le sol, sur la base d'analyses de la PCR quantitative de l'ADN du sol extractible (extrait de Can. J. Microbiol. 55, 1166-1175, avec autorisation)	6
Figure 6-1 : Arbre phylogénétique élargi du genre <i>Paenibacillus</i> découlant de comparaisons de séquences génétiques de l'ARNr 16S à l'aide d'un fragment de 1 320 nucléotides (tiré du Int. J. Syst. Evol. 58, 682-687, avec autorisation).....	37

Introduction

Conformément à l'article 74 de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)* [LCPE (1999)], les ministres de l'Environnement et de la Santé sont tenus de procéder à l'évaluation préalable des organismes vivants inscrits sur la Liste intérieure des substances afin de déterminer si lesdits organismes présentent ou sont susceptibles de présenter un risque pour l'environnement ou la santé humaine [d'après les critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999)]¹. Les souches de *Paenibacillus polymyxa* ATCC 842 et 55407 et la souche de *Paenibacillus polymyxa* 13540-4 ont été nommées et ajoutées à la Liste intérieure des substances (LIS) en vertu du paragraphe 25(1) de la LCPE (1988), car elles ont été fabriquées ou importées au Canada entre le 1^{er} janvier 1984 et le 31 décembre 1986.

La présente évaluation préalable tient compte des renseignements sur les risques tirés du domaine public et de données de recherche non publiées, ainsi que des commentaires d'examineurs scientifiques. Les renseignements liés à l'exposition ont été obtenus à partir du domaine public et des renseignements découlant de l'avis obligatoire relatif à l'article 71 de la LCPE (1999) publié le 3 octobre 2009 dans la Partie I de la *Gazette du Canada*. De plus amples précisions concernant la méthode d'évaluation des risques utilisée sont accessibles dans le *Cadre d'évaluation scientifique des risques liés aux micro-organismes réglementés en vertu de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*.

Les données propres aux deux souches aux dénominations maquillées inscrites sur la LIS, soit les souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et ATCC 55407, sont définies comme telles. Tous les renseignements propres au nom, à l'utilisation et à la fabrication ou à l'importation de la quantité de souches à dénomination maquillée ont été dissimulés à la demande du déclarant, conformément au *Règlement sur les dénominations maquillées* de la LCPE (1999), et ne peuvent être divulgués. Les organismes de substitution sont identifiés au niveau taxonomique fourni par la source. Les recherches documentaires ont été effectuées à l'aide de bases de données de publications scientifiques (SCOPUS, CAB Abstracts et NCBI), de recherches sur le Web, et de termes de recherche clés afin de cerner les dangers pour la santé humaine et l'environnement associés à chacune des souches de la Liste intérieure des substances évaluées

¹ La détermination de la conformité à l'un ou plusieurs des critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999) est basée sur une évaluation des risques potentiels pour l'environnement et/ou la santé humaine liés à l'exposition dans l'environnement en général. Pour les humains, cela inclut, sans toutefois s'y limiter, l'exposition par l'air, l'eau et l'utilisation de produits contenant la substance. Une conclusion établie en vertu de la LCPE (1999) pourrait ne pas présenter un intérêt pour une évaluation, bien qu'elle n'empêche pas non plus, en fonction des critères de risque prévus dans le *Règlement sur les produits contrôlés* ou le *Règlement sur les produits dangereux*, qui font partie du cadre réglementaire du Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT), visant les produits destinés à être utilisés au travail.

dans le présent rapport. Les renseignements recueillis jusqu'en janvier 2014 ont été pris en considération et inclus dans le présent rapport.

Décisions d'autorités compétentes sur le plan national et international

Échelle nationale

La souche *P. polymyxa* n'est assujettie à aucune exigence en matière de santé animale ou végétale selon les programmes des espèces exotiques envahissantes et de la santé des végétaux menées à l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). Cet organisme n'exige pas un permis d'importation en vertu de la *Loi sur la protection des végétaux*.

La souche *P. polymyxa* est considérée comme un organisme de la classe de risque 1 pour les humains et les animaux terrestres selon l'Agence de la santé publique du Canada (ASPC). L'ASPC n'exige pas de permis d'importation pour ce micro-organisme.

Échelle internationale

La souche *P. polymyxa* est inscrite à l'Inventaire des substances chimiques de la *Loi américaine réglementant les substances toxiques* sous le numéro de registre CAS 68038-68-6 (Environmental Protection Agency des États-Unis, 2011; 1994).

D'autres souches *P. polymyxa* sont utilisées dans trois pesticides microbiens : Hydroguard, utilisé pour éliminer les maladies (bactériennes) de la fonte des semis et y résister, est homologué aux États-Unis, et Topseed et NH, tous deux utilisés pour éliminer l'oïdium de la vigne dans le concombre, sont homologués en Corée (Kabaluk et Gazdik, 2005).

La Food and Drug Administration des États-Unis (USFDA) a publié des alertes d'importation pour les produits cosmétiques contaminés par la souche *P. polymyxa* (Food and Drug Administration des États-Unis, 2013).

1. Évaluation du danger

1.1 Caractérisation de la bactérie *Paenibacillus polymyxa*

1.1.1 Identification taxonomique et historique de la souche

Nom binomial : *Paenibacillus polymyxa* (Prazmowski, 1880) (Ash *et al.*, 1994)

Désignation taxonomique :

Règne : Bactéries

Embranchement : Firmicutes

Classe : Bacilli

Ordre : Bacillales

Famille : *Paenibacillaceae*

Genre : *Paenibacillus*

Espèce : *polymyxa*

Souches

- ATCC 842
- ATCC 55407
- 13540-4

Noms de remplacement : *Bacillus polymyxa* (Prazmowski, 1880) Mace, 1889 (listes approuvées, 1980); *Aerobacillus polymyxa* (Prazmowski, 1880) Donker, 1926; *Granulobacter polymyxa* (Prazmowski, 1880) Beijerinck, 1893; *Clostridium polymyxa* (Prazmowski, 1880)

1.1.1.1 Historique de la souche

La souche de *P. polymyxa* ATCC 842 a été isolée par Prazmowski en 1880 (Smith *et al.*, 1964). Elle a été initialement déposée par A. J. Kluyver à l'American Type Culture Collection (ATCC), puis, par l'entremise d'une chaîne de possession changeante, elle a finalement été déposée à la Coordination des collections belges de micro-organismes (BCCM) par Nolan en 1993. Là-bas, on lui a attribué le numéro d'enregistrement LMG 13294 (BCCM, 2013). La souche de *P. polymyxa* ATCC 842 est la souche type de l'espèce et a été déposée dans un certain nombre de souchothèques, tel qu'il est indiqué dans le tableau 1-1.

Tableau 1-1: Liste des désignations de souches actuelles pour la souche de *P. polymyxa* ATCC 842

Souchothèque	Désignations de la souche
DSMZ-Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig, Allemagne	DSM 36 ^T
Biologicky Ustav, Czech Akademie Ved, Prague, République tchèque	BUCSAV 162
Czech Collection of Microorganisms, Masaryk University, Brno, République tchèque	CCM 1459
Japan Collection of Microorganisms, RIKEN BioResource Center, Japon	JCM 2507
Laboratorium voor Microbiologie, Universiteit Gent, Gent, Belgique	LMG 13294
National Collection of Industrial Bacteria, Torry Research Station, Aberdeen, Écosse (incorporé avec la NCIMB)	NCIB 8158
National Collection of Type Cultures, Central Public Laboratory Service, Londres, Royaume-Uni	NCTC 10343
Korean Collection for Type Cultures, Genetic Resources Center, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, Taejon, République de Corée	KCTC 3858
Agricultural Research Service Culture Collection, National Center for Agricultural Utilization Research, Department of Agriculture des États-Unis, Peoria, Illinois, États-Unis	NRRL B-4317

La souche de *P. polymyxa* ATCC 55407 a été isolée d'une étable à Dublin en Virginie (États-Unis) et déposée à l'American Type Culture Collection (ATCC) par Sybron Biochemical Corporation. Toutefois, la souche n'est plus disponible à l'ATCC (ATCC, 2012). La souche de *P. polymyxa* 13540-4 a été isolée à partir d'amidon détérioré; la dénomination de cette souche a été maquillée à la demande du déclarant, conformément au *Règlement sur les dénominations maquillées* de la LCPE (1999), et ne peut être divulguée.

1.1.1.2 Caractéristiques phénotypiques et moléculaires

En raison de ses cellules en forme de bâtonnet, de sa capacité de former des endospores et d'autres similarités avec le genre *Bacillus*, la souche *P. polymyxa* a été initialement classée dans ce genre par Mace en 1889 (Montefusco *et al.*, 1993). Plus tard, Ash *et al.* (1991) ont inclus cet organisme dans un groupe distinct sur le plan phylogénétique, à savoir le « groupe 3 », sur la base d'une analyse comparative de séquences génétiques de l'ARN ribosomique 16S de 1 450 et 1 490 nucléotiques en longueur, ce qui correspond à environ 95 % de la sous-unité ribosomique 16S entière (Ash *et al.*, 1991). L'organisme a finalement été reclassé dans une autre famille Paenibacillaceae et son genre type *Paenibacillus* (Priest, 2009). Le genre *Paenibacillus* peut être différencié d'autres membres des Bacillaceae par la réaction en chaîne de la polymérase (RCP) des fragments de gènes 16S de l'ARNr, à l'aide de la sonde de diagnostic d'origine qui a permis la reclassification de *P. polymyxa* et de plusieurs autres membres du genre *Paenibacillus* (Ash *et al.*, 1993), ou d'une amorce de

détection très spécifique PAEN515F qui a également permis d'établir une distinction entre *Paenibacillus polymyxa* (comprenant également la souche *P. polymyxa* ATCC 842) et d'autres taxons du genre Bacillaceae (Shida *et al.*, 1997). La présence d'antéiso-C15:0 en tant qu'acide gras cellulaire majeur (36,9–81,0 %) a également été déterminée par le diagnostic du genre (Shida *et al.*, 1997).

La figure 6-1 (annexe A) décrit les relations phylogénétiques de *P. polymyxa* avec la plupart des espèces de *Paenibacillus* ayant fait l'objet de publications valides sur l'alignement d'un fragment de 1 320 nucléotides de séquences génétiques de l'ARN ribosomique 16S issues de souches représentatives. Les souches de la Liste intérieure des substances n'ont pas été incluses dans les souches représentatives séquencées.

La souche *P. polymyxa* est une espèce génétiquement diverse qui présente des niveaux élevés de variabilité entre les souches (Lal et Tabacchioni, 2009; Nübel *et al.*, 1996). À l'heure actuelle, les génomes de dix souches de *P. polymyxa* ont été séquencés; ils présentent une grande variété de tailles, avec les plus grands et les plus petits génomes différant de 2,1 paires de mégabases (NCBI Genome, 2014), ce qui laisse entendre une possibilité de reclassification taxonomique future de certains membres d'espèces. Les caractéristiques de la souche type, ATCC 842, sont indiquées dans les tableaux 1-2, 1-3, 1-4, et 1-5.

Tableau 1-2 : Conditions de croissance de la souche de *P. polymyxa* ATCC 842

Caractéristique	<i>P. polymyxa</i> ATCC 842	Référence
Température optimale	30 °C	BCCM, 2013
Croissance à 50 °C	Aucune	Priest, 2009
pH optimal	7,0	Shida <i>et al.</i> , 1997
Croissance à un pH de 5,6	Positive	Shida <i>et al.</i> , 1997
Croissance en présence de 5 % de chlorure de sodium (NaCl)	Aucune	Shida <i>et al.</i> , 1997

Tableau 1-3 : Propriétaires morphologiques de la souche de *P. polymyxa* ATCC 842

Caractéristique	<i>P. polymyxa</i> ATCC 842	Référence
Coloration de Gram	Résultats positifs : coloration variable ou négative	Priest, 2009; Shida <i>et al.</i> , 1997
Forme de la cellule	Bâtonnet	Priest, 2009
Taille de la cellule	0,5–0,8 × 2–5 µm	Priest, 2009
Flagelle	Péritriches	Priest, 2009; Shida <i>et al.</i> , 1997
Motilité	Mobile	Priest, 2009

Forme des spores	Ovale avec des parois épaisses et coupe transversale en forme d'étoile, ^a sporanges gonflées	Comas-Riu et Vives-Rego, 2002; Shida <i>et al.</i> , 1997
Profile des acides gras	C _{15:0} antéiso à 62,9 % et C _{17:0} antéiso à 16,9 %	Priest, 2009; Shida <i>et al.</i> , 1997

Caractéristique	<i>P. polymyxa</i> ATCC 842	Référence
Colonies	Gélose nutritive : pâle et mince, souvent accompagnée d'une propagation amiboïde. Gélose sucrée : habituellement entassée et mucoïde avec une surface matte	Priest, 2009

a. Renseignements disponibles concernant la souche CECT 155, qui est un dérivé de la *P. polymyxa* ATCC 842

Tableau 1-4 : Propriétaires biochimiques de la souche *P. polymyxa* ATCC 842

Caractéristique	<i>P. polymyxa</i> ATCC 842	Référence
Respiration	Anaérobie facultatif	Priest, 2009
Métabolisme	Organohétérotrophe : fermentation du glucose et de divers autres glucides	Priest, 2009; Shida <i>et al.</i> , 1997
Catalase	Positive	Priest, 2009
Oxydase	Négative	Priest, 2009
Réduction du nitrate (en nitrite)	Positive	Priest, 2009
Fixation de l'azote	Positive	Priest, 2009
Métabolites secondaires	Acétylméthylcarbinol (indole) Xylanase Lévane (composant de capsule)	Lal et Tabacchioni, 2009; Lal <i>et al.</i> , 2012; Priest, 2009; Shida <i>et al.</i> , 1997; Tong <i>et al.</i> , 2013
Production antimicrobienne	Famille de la polymyxine-colistatine-circuline ^a Composés de type fusaricidine ^a	Raza <i>et al.</i> , 2008

Biofilm	Positive ^b	Timmusk <i>et al.</i> , 2005
----------------	-----------------------	------------------------------

a. Renseignements disponibles concernant les souches non inscrites sur la LIS

b. Renseignements disponibles concernant les souches B1 et B2

Tableau 1-5 : Propriétés moléculaires de la souche de *P. polymyxa* ATCC 842

Caractéristique	<i>P. polymyxa</i> ATCC 842	Référence
Taux de GC (\$ en mol)	44,9 %	Jeong <i>et al.</i> , 2011; Tong <i>et al.</i> , 2013
Taille du génome (Mb)	5,9	Jeong <i>et al.</i> , 2011; Tong <i>et al.</i> , 2013
N ^o d'enregistrement de GenBank (gènes 16S de l'ARNr)	AJ320493	NCBI Nucleotide, 2001; Priest, 2009
N ^o d'enregistrement de GenBank (Génome entier)	AFOX01000000	NCBI Nucleotide, 2014

1.1.2 Propriétés biologiques et écologiques

La *P. polymyxa* est une bactérie sporulée (Priest, 2009). En tant qu'anaérobie facultatif, il peut être actif dans des conditions anaérobies et s'épanouir dans des environnements semi-anaérobies, et une vaste gamme d'hôtes en tant que bactérie favorisant la croissance des plantes. La souche *P. polymyxa* est présente dans de nombreux environnements : elle est naturellement présente dans des sédiments marins (Lal et Tabacchioni, 2009) et a été également isolée à partir de divers sols ainsi que de la rhizosphère et de racines d'arbres de forêt et de plantes cultivées, y compris des oliviers cultivés dans une ferme de vergers biologiques (Blibech, 2012), du blé, de l'orge, du trèfle blanc, de l'ivraie vivace, de l'agropyre à crête, des haricots verts, de l'ail (Raza *et al.*, 2008), du maïs, du sorgho commun, et du sucre de canne (Lal et Tabacchioni, 2009).

Une étude de la persistance dans le sol a été menée par Providenti *et al.* (2009), dans laquelle des souches étroitement apparentées de *P. polymyxa* pouvaient être discriminées à l'aide d'une réaction en chaîne de la polymérase quantitative ciblant des régions non codantes propres à des souches dans le génome. L'étude a montré que si les souches *P. polymyxa* NRRL B-4317 (ATCC 842), ATCC 55407 et 13540-4 étaient rejetées dans du sol limoneux-sableux (pH 5,0, 22 °C et 80 % d'humidité relative) à des densités initiales de $\sim 1 \times 10^6$ UFC/g sol, leurs concentrations diminueraient, dans un délai d'un à six mois, pour atteindre un niveau proche ou inférieur au seuil de détection de $\sim 1 \times 10^2$ UFC/g sol (figure 1). Neuf carottes de sol ont été préparées pour chaque souche; seules les souches ATCC 55407 et 13540-4 ont été détectées dans au moins une carotte de sol après le 105^e jour. Dans une autre expérience, la souche NRRL B-

4317 a affiché une concentration inférieure au seuil de détection avant le 14^e jour suivant l'inoculation (données non présentées).

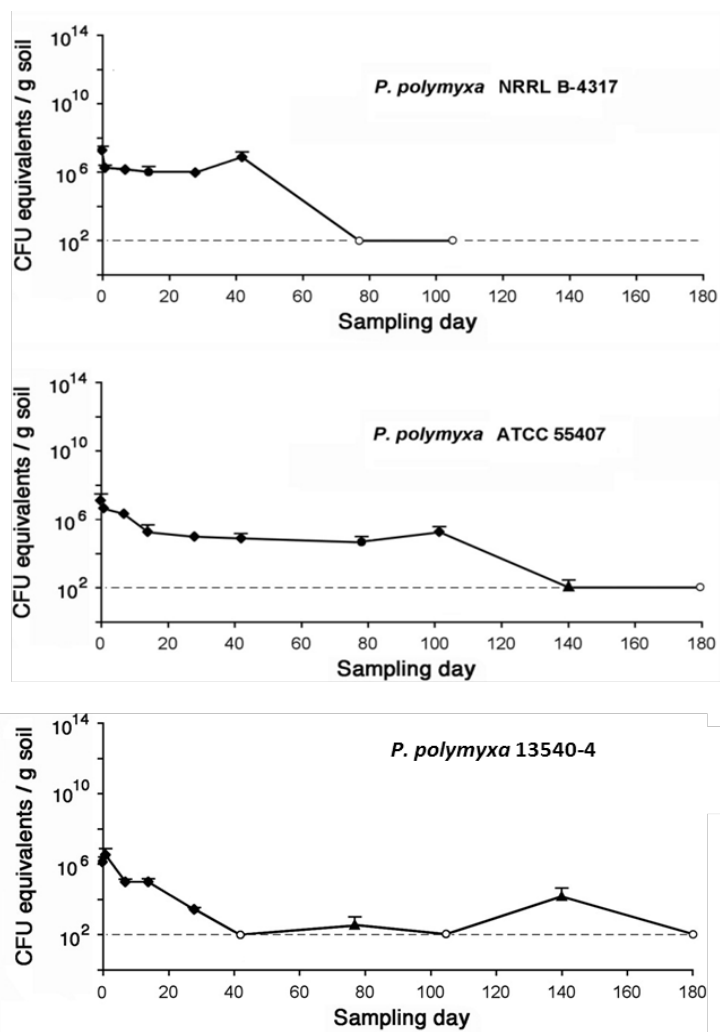


Figure 1-1 : Persistance de souches de *P. polymyxa* (inscrites à la LIS) dans le sol, sur la base d'analyses de la PCR quantitative de l'ADN du sol extractible (extrait de Can. J. Microbiol. 55, 1166-1175, avec autorisation)

1.1.2.1 Promotion de la croissance des plantes

La souche de *P. polymyxa* favorise la croissance des plantes en augmentant la disponibilité des éléments nutritifs (par la fixation de l'azote et la solubilisation du phosphore), en améliorant la porosité du sol et en produisant un certain nombre de phytohormones qui favorisent également la croissance. La souche de *P. polymyxa* peut fixer l'azote atmosphérique dans des conditions anaérobies (Gaby et Buckley, 2012). Le phosphore soluble est un nutriment végétal réducteur dans le sol (Hesham, A. E. et Hashem, M. 2011; Malboobi *et al.*, 2009), et une grande proportion de phosphore disponible dans des engrais chimiques devient rapidement insoluble et ainsi non disponible pour les plantes (Malboobi *et al.*, 2009). La souche de *P. polymyxa* se solubilise efficacement dans le phosphore inorganique par l'excrétion d'acides organiques. Des expériences en serre montrent que l'inoculation de maïs avec la souche de *P. polymyxa* dans des engrais chimiques contenant différents niveaux de phosphore dans du sol calcaire ont causé de fortes hausses du poids sec en pousses et du poids sec en racines (28,53 g c. 26,91 g [hausse de 6,02 %] et 2,29 g c. 1,74 g [hausse de 31,61 %], respectivement) ainsi que de l'absorption de phosphore dans les pousses et les racines de la plante (81,04 mg c. 75,98 mg [hausse de 6,67 %] et 3,84 mg c. 2,78 mg [hausse de 38,13 %], respectivement) comparativement à organismes témoins inoculés (Hesham, A. E. et Hashem, M., 2011). La souche de *P. polymyxa* peut augmenter de 57 % la masse de sol qui adhère aux racines de blé. Cette hausse de la masse est accompagnée d'une transition vers une structure de sol plus poreuse près des racines, ce qui peut améliorer la rétention d'eau et le transfert d'éléments nutritifs dans la rhizosphère (Raza *et al.*, 2008). L'effet d'agrégation du sol causé par la souche de *P. polymyxa* peut être médié par la synthèse de lévane (Raza *et al.*, 2008), étant donné que le rapport entre la masse de sol sec adhérent au sol et la masse sèche de tissus de racines était bien plus élevé pour les plantes inoculées avec une souche CF43 de type sauvage produisant du lévane que pour les plantes inoculées avec une souche SB03 mutante déficiente en lévane (Bezzate *et al.*, 2000).

Le lévane peut également jouer un rôle dans la formation de biofilm. La souche de *P. polymyxa* peut former des biofilms, qui sont des colonies microbiennes enfermées dans un matériau adhésif (habituellement des polysaccharides), attaché à une surface. Le lévane est le polysaccharide produit par la souche de *P. polymyxa* lorsqu'elle est cultivée dans du sucrose (Timmusk, 2003). À la suite de la colonisation de racines d'Arabette de Thalius (*Arabidopsis thaliana*) avec la souche de *P. polymyxa* B1::pCM20, les bactéries ont formé un biofilm intensif autour des extrémités des racines de la plante. Plusieurs fins ont été proposées pour le biofilm de la souche de *P. polymyxa* relativement à son rôle en tant que bactérie favorisant la croissance des plantes : (1) la possibilité que la formation de biofilm de la souche de *P. polymyxa* sur les racines coïncide avec les sites de colonisation potentiels des agents pathogènes et agisse ainsi comme une couche protectrice visant à prévenir l'accès des agents pathogènes par l'exclusion compétitive, (2) la couche protectrice pourrait également contribuer à l'amélioration de la tolérance des plantes à la sécheresse, et (3) les dommages causés par le biofilm à l'extrémité de la racine pourraient, à leur tour, causer l'activation de gènes de défense contre les pathogènes (Timmusk *et al.*, 2005).

La souche de *P. polymyxa* produit une grande variété de phytohormones qui aident à réguler la croissance et le développement des plantes. Ces phytohormones comprennent des auxines, notamment de l'acide indole 3-acétique (IAA) et des cytokinines, y compris de l'isopentényladénine (IP). La production d'auxine a été évaluée dans une étude impliquant 68 souches de *P. polymyxa*, y compris la souche ATCC 842 (DSM 36) inscrite à la Liste intérieure des substances. Toutes ces souches pouvaient produire jusqu'à 17 µg/mL d'acide indole 3-acétique dans le surnageant de culture. La souche ATCC 842 (DSM 36) inscrite à la Liste intérieure des substances figurait parmi celles qui produisaient le plus faible niveau d'acide indole 3-acétique, soit 1 µg/mL dans le surnageant de culture (Da Mota *et al.*, 2008). Dans une étude portant sur la phase de croissance stationnaire de la souche de *P. polymyxa* B2 isolée à partir de la rhizosphère de blé, l'isopentényladénine et un autre composé inconnu similaire à la cytokinine ont été extraits du milieu de croissance à une concentration de 1,5 nM. Les cytokinines peuvent être actives à de très faibles quantités, car le très faible volume de micro-environnements dans lesquels elles sont extraites et la coprésence des auxines dans la rhizosphère peuvent agir de façon synergique avec la cytokinine (Timmusk *et al.*, 1999). Les composés organiques volatils, y compris l'acétoïne et le 2,3-butanédiol produits par la souche de *P. polymyxa*, favorisent également la croissance des plantes (Ryu *et al.*, 2003). La souche de *P. polymyxa* produit du 3-hydroxybutan-2-one en présence d'oxygène et accumule du diméthylcétol en quantités importantes en tant que produit de la fermentation dans des concentrations d'oxygène intermédiaires (De Mas *et al.*, 1988; Mankad et Nauman, 1992).

La souche de *P. polymyxa* a le potentiel d'être utilisée dans la biosorption de certains métaux lourds. La souche de *P. polymyxa* P13 a été décrite comme un agent producteur d'exopolysaccharides : il a été démontré que 100 mL d'une culture de souches P13 en phase stationnaire formait 27±4 mg et 15±4 mg d'exopolysaccharides dans un milieu d'infusion cerveau-cœur (BHI) contenant 1 M de chlorure de sodium et dans un milieu BHI témoin sans chlorure de sodium, respectivement. La souche P13 a montré une forte capacité de sorption d'acétate de cuivre (II) d'origine industrielle. La production d'exopolysaccharides a été associée à un stress hyperosmotique par de fortes concentrations de sel de 1 M de chlorure de sodium, entraînant ainsi une hausse significative de la capacité de biosorption des cellules entières (Acosta *et al.*, 2005). L'absorption de cellules de *P. polymyxa* ou la production d'exopolysaccharides par ces microorganismes à la surface de plusieurs minéraux a été signalée comme une méthode permettant de séparer de façon sélective certains ions métalliques de mélanges binaires. La biofloculation de charbons indiens à forte teneur en cendres utilisant la souche de *P. polymyxa* a montré une baisse de 60 % dans la concentration de cendres, ce qui laisse entendre que la floculation sélective du charbon était possible (Lal et Tabacchioni, 2009).

1.1.2.2 Lutte biologique

La souche de *P. polymyxa* a un potentiel de lutte biologique contre les insectes et les nématodes ainsi que les maladies bactériennes et les maladies fongiques des plantes.

On pense que la souche de *P. polymyxa* peut prévenir la prolifération du nématode *Meloidogyne javanica* en produisant des sidérophores qui se lient à la plus grande partie du fer (III) dans la zone entourant la racine de la plante. La carence en fer qui en découle empêche le nématode de se proliférer dans les environs immédiats des racines (Siddiqui *et al.*, 2007). De même, des effets néfastes causés par deux différentes souches de *P. polymyxa* exposées à d'autres nématodes (*Meloidogyne incognita*) ont été signalés plus tard par Siddiqui et Akhtar (2008), qui ont étudié les effets protecteurs d'une souche non identifiée dans des tomates, et par Akhtar et Panwar (2013), qui ont mis à l'essai les propriétés de lutte biologique de la souche MTCC 122 dans des pois.

L'exposition du nématode à galles *Meloidogyne incognita* à diverses concentrations (5 % à 100 %) du filtrat de culture de la souche de *P. polymyxa* GBR-I a fortement réduit l'éclosion des œufs du nématode et causé une mortalité importante chez ses jeunes. À des concentrations plus élevées de 25 % à 100 %, l'éclosion des œufs a été réduite de 84 % à 91 % après deux jours d'exposition comparativement aux mesures de contrôle de l'eau distillée stérile. Dans l'ensemble, la gravité des effets était proportionnelle aux concentrations de filtrats de culture de la souche *P. polymyxa* et aux durées d'exposition. Ces résultats ont ensuite été confirmés par l'application d'une suspension bactérienne de la souche *P. polymyxa* GBR- I dans des plants de tomates en pot trois jours avant l'inoculation du nématode, ce qui a réduit les populations de nématodes de 91,3 % et les galles racinaires de 62,5 %, par rapport aux témoins non traités (Khan *et al.*, 2008).

Dans une serre, des semis de tomates ont été exposés à la souche *M. incognita* (3 000 œufs). Comparativement aux témoins non traités, des semis traités avec la souche de *P. polymyxa* T79 ($1,0 \times 10^9$ UFC par pot) ont montré une réduction importante ($P = 0,05$), par gramme, du nombre de racines, de jeunes au deuxième stade, de femelles, de nématodes (au total), de masses d'œufs, et du nombre de nématodes par masse d'œufs (Liu *et al.*, 2012).

Dans une autre expérience en serre impliquant différentes bactéries, l'inoculation de plants de tomate infestés par la souche de *M. incognita* (1 000 jeunes au deuxième stade par plant) avec la souche de *P. polymyxa* NFB7 (2×10^8 UFC par pot) après 60 jours a entraîné de fortes réductions de la population de nématodes, comparativement à des témoins infestés par des nématodes, non inoculés, comme suit : 95,8 % pour un certain nombre de jeunes/racines, 85 % pour un certain nombre de femelles par racine, et 95,16 % pour un certain nombre de jeunes par kilogramme de sol (El-Hadad *et al.*, 2011).

La souche *P. polymyxa* a également un potentiel de lutte biologique contre les insectes ravageurs d'oliviers, soit *Hylesinus oleiperda* et *Phloeotribus scarabaeoides*. Dans des essais d'alimentation, des isolats Pp10, Pp11, Pp12, Pp22 et Pp24 de la souche de *P. polymyxa*, à une dose d'inoculation de 3×10^7 UFC par boîte de Pétri contenant des larves, ont causé des taux de mortalité allant jusqu'à 55 % chez les larves de ces coléoptères sept jours après l'inoculation. Les protéines trouvées dans des surnageants de la souche de *P. polymyxa* étaient toxiques pour les larves de *P. oleae* et de

P. scarabaeoides, avec des valeurs de CL₅₀ de 37,6 µg/mL et 12,4 µg/mL, respectivement (Blibech *et al.*, 2012). De la même manière, dans une autre étude, Blibech (2012) a constaté qu'une souche différente de *P. polymyxa* (souche I10) était pathogène pour les coléoptères. Ces résultats, pris en compte avec la capacité de la souche de la *P. polymyxa* de survivre dans les racines d'olivier, peuvent être considérés comme étant prometteurs pour la lutte biologique contre ces ravageurs agricoles (Blibech, 2012).

D'autres espèces de *Paenibacillus* sont également actives contre les larves de coléoptères. *P. popilliae* et *P. lentimorbis* sont des agents pathogènes de larves du brome du Japon (*Popillia japonica*) et de larves de plusieurs scarabées connexes (vers blanc). Ces agents pathogènes ont causé la maladie laiteuse chez les larves d'insectes et peuvent ainsi être utilisés dans la lutte biologique (Dingman, 2008).

La production d'antibiotiques est une caractéristique fréquente, mais non uniforme de la souche de *P. polymyxa* (Beatty et Jensen, 2002), ce qui peut contribuer à la lutte biologique contre les maladies bactériennes et les maladies fongiques des plantes. Elle est connue pour produire deux familles d'antibiotiques peptidiques codées dans les chromosomes (Kim *et al.*, 2010a; Raza *et al.*, 2008). En outre, il existe de nombreux rapports de propriétés antimicrobiennes et antifongiques dans lesquelles la nature de l'agent inhibiteur n'est pas définie (Raza *et al.*, 2008), ce qui exige la présence de bactéries vivantes pour la suppression continue (Dijksterhuis *et al.*, 1999). La famille polymyxine-colistine-circuline comprend des polymyxines (A, B₁, B₂, C, D, E₁, E₂, M, S₁ et T₁), des polypeptides (A), de la polyxine, de la jolipeptide, et de saltavoline. La polymyxine B et la polymyxine E (colistine) sont utilisées dans un cadre clinique pour les activités antibactériennes contre une grande variété de bactéries à Gram négatif, y compris *Escherichia coli*, *Klebsiella* spp., *Enterobacter* spp., *Pseudomonas aeruginosa* et *Acinetobacter* spp., *Salmonella* spp., et certaines *Shigella* spp., *Pasteurella* spp., et *Haemophilus* spp. (Landman *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2012).

Cependant, une grande variété de bactéries à Gram négatif sont résistantes aux polymyxines (Landman *et al.*, 2008). Les polymyxines sont des agents cationiques qui se lient à la membrane extérieure bactérienne anionique et perturbent l'intégrité et la perméabilité de la membrane. Elles présentent une grande affinité pour le groupe lipide des lipopolysaccharides, peuvent désactiver les endotoxines (Landman *et al.*, 2008; Raza *et al.*, 2008) et inhibent la respiration cellulaire (Raza *et al.*, 2008). En raison de leur effet perturbateur sur l'intégrité de la membrane, les bactéries à Gram négatif peuvent devenir encore plus sensibles aux antimicrobiens hydrophobes (p. ex. l'érythromycine) à la suite d'une exposition aux polymyxines (Landman *et al.*, 2008).

La famille des fusaricidines comprend les fusaricidines A, B, C et D (produites par les souches de *P. polymyxa* PKB1 et SQR-21), la gavaserine, la gatavoline (produites par *P. polymyxa* ssp. *Colistinus koyama*) et une série de peptides désignée comme LI-F03, LI-F04, LI-F05, LI-F07 et LIF08 (Beatty et Jensen, 2002). L'activité microbienne des fusaricidines varie selon les acides aminés présents à trois positions variables dans le

groupement peptidique (Li *et al.*, 2007), mais la famille est moins diverse que dans le groupe polymyxine-colistine-circuline (Raza *et al.*, 2008). Les fusaricidines affichent une excellente activité antifongique contre les champignons pathogènes tels que *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* et *Penicillium thomii*. La fusaricidine B, en particulier, a une activité antagoniste contre *Candida albicans* et *Saccharomyces cerevisiae*. Les fusaricidines présentent également une excellente activité germicide contre les bactéries à Gram négatif comme *Staphylococcus aureus* et *Micrococcus luteus*. Par ailleurs, ils affichent une activité antifongique contre *Leptosphaeria maculans*, qui cause la pourriture noire des racines du canola (Choi *et al.*, 2008). Bien que les fusaricidines soient fortement actives contre les champignons et les bactéries à Gram positif, elles ne présentent aucune activité même à 100 µg/mL contre toutes les bactéries à Gram négatif testées (Kajimura et Kaneda, 1997).

Les lectines sont des protéines qui lient des glycoconjugués par une certaine activité enzymatique et qui sont largement réparties dans la nature (Lakhtin *et al.*, 2011). Les lectines I et II isolées à partir de la souche de *P. polymyxa* 1460 ont été en mesure de supprimer la croissance des souches *Rhizobium leguminosarum* 252 et *Bacillus subtilis* 36 à presque toutes les concentrations testées (de 1 à 10 µg/mL). La lectine I était inhibitrice des souches *Azospirillum brasilense* 245 et *Erwinia carotovora* subsp. *citrulis* 603, tandis que la lectine II exerçait une activité bactéricide contre les souches *Xanthomonas campestris* B-610 et B-611 et *A. brasilense* 245. L'activité inhibitrice des lectines est considérée comme étant médiée par leurs interactions avec des récepteurs propres aux lectines, qui se produisent sur la membrane bactérienne, menant ainsi à des changements conformationnels dans la membrane et à la défaillance concomitante du métabolisme des cellules bactériennes (Karpunina *et al.*, 2003).

Les souches de *P. polymyxa* produisent de nombreuses enzymes, ce qui en fait des antagonistes précieux pour contrôler les agents pathogènes des plantes (Raza *et al.*, 2008).

Des chitinases et des β -1,3-glucanases ont été produites lorsque différentes souches de *P. polymyxa*, y compris la souche ATCC 842 inscrite à la Liste intérieure des substances (Mavingui et Heulin, 1994), ont été cultivées en présence de chitine colloïdale en tant que source unique de carbone. On pense que les chitinases favorisent les effets antagonistes des bactéries contre les agents pathogènes fongiques des plantes comme les basidiomycètes (Mavingui et Heulin, 1994; Nielsen et Sørensen, 1997). Les souches de *P. polymyxa* CM5-5 et CM5-6 peuvent produire de la cellulase et de la mannanase (Nielsen et Sørensen, 1997). Deux xylanases ont été isolées à partir de souches de *P. polymyxa* CECT 153 et ATCC 842 (LMG 6319) (Morales *et al.*, 1993); ces enzymes contribuent à la dégradation de la cellulose et de certaines glycoprotéines disponibles dans les parois cellulaires d'*oomycètes* (Nielsen et Sørensen, 1997) et ont, par conséquent, un potentiel de lutte biologique.

En outre, certaines souches de *P. polymyxa* isolées à partir de milieux de production de volaille (p. ex. NRRL B-30507, NRRL B-30509 et NRRL B-30508) ont produit des bactériocines ayant une activité inhibitrice contre la bactérie *Campylobacter jejuni* (Svetoch *et al.*, 2005). Cette constatation laisse supposer une application potentielle de

ces organismes dans la production d'agents de conservation organiques d'aliments pour la gestion de l'infection par la bactérie *Campylobacter* chez la volaille.

1.1.2.3 Activité probiotique

La souche de *P. polymyxa* a été utilisée dans l'aquaculture en raison de ses propriétés probiotiques (examiné dans Hong *et al.*, 2005). Des effets favorables à la santé ont été observés dans des essais d'alimentation de poissons impliquant des mélanges de la souche de *P. polymyxa* avec d'autres bactéries. Toutes les études ont montré des effets positifs importants liés à divers paramètres de santé et de croissance mesurés chez des larves d'esturgeon perse (*Acipenser percicus*) (Jafarian *et al.*, 2009a) et la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) (Jafarian *et al.*, 2009b). Aucun effet nocif n'a été signalé après la consommation des formulations probiotiques dans l'ensemble des études abordées.

1.1.2.4 Formation de spores

La souche *P. polymyxa* forme des spores ellipsoïdales qui gonflent distinctement le sporange ou la cellule-mère (Lal et Tabacchioni, 2009) et qui ont des parois épaisses ayant une coupe transversale en forme d'étoile (Comas-Riu et Vives-Rego, 2002). Les spores de la souche de *P. polymyxa* peuvent résister à des conditions environnementales difficiles, y compris des extrêmes en matière de températures, de pH, de haute pression, d'aridité, d'irradiation UV, et d'infiltration chimique (examiné dans Huo *et al.*, 2012). Les spores demeurent dans un état de dormance durant de longues périodes et germent lorsque les conditions sont propices à la croissance végétative (Setlow, 2003). Dans la souche *P. polymyxa* SQR-21 (un agent de lutte biologique éprouvée), on a constaté que la température de sporulation avait une incidence sur les propriétés de résistance et de germination des spores. Par exemple, les spores préparées à une plus forte température de 37 °C ont montré une plus forte résistance à la chaleur que celles préparées à 25 °C et 30 °C. Cependant, le taux de germination présentait une corrélation négative avec la température de sporulation (Huo *et al.*, 2012).

1.1.2.5 Transmission horizontale de gènes

Aucun plasmide n'a été détecté dans les souches de *P. polymyxa* inscrites à la Liste intérieure des substances et on ne sait pas si elles possèdent des éléments génétiques mobiles. Toutefois, deux autres souches transportent de grands plasmides (tableau 1-6) qui codent un certain nombre de gènes essentiels pour le métabolisme. Le plasmide à 510 115 paires de base de la souche SC2 contient des gènes essentiels impliqués dans le métabolisme des purines, des pyrimidines et des lipides ainsi que des gènes pour les protéines ribosomiques, des facteurs d'élongation et de traduction et des méthyltransférases de l'ADN (Ma *et al.*, 2011). Le plasmide à 366 576 paires de base dans la souche M-1 contient des gènes essentiels codant des protéines ribosomiques et des gènes impliqués dans la réplication, la réparation et la méthylation de l'ADN, la

transcription, le début de la traduction, le métabolisme des acides aminés et des glucides, le transport, et la résistance aux médicaments (Niu *et al.*, 2011).

Tableau 1-6 : Génomes et plasmides séquencés de souches de *P. polymyxa*

Souche/plasmide	Type	Taille (Mb)	Teneur en guanine et cytosine (%)	N° des protéines codées	N° d'enregistrement de GenBank
SC2	Chr	5,73	45,2	5 406	CP002213
pSC	Plsm	0,51	37,6	626	CP002214
M1	Chr	5,86	45,2	5 061	HE577054
pPPM1a	Plsm	0,37	38,4	295	HE577055

Dans un cadre expérimental, l'utilisation d'un bactériophage IPy1 de la souche *P. polymyxa* isolé dans le sol (et précédemment décrit) et de la souche de *P. polymyxa* Loutit, qui est un hôte naturellement compatible pour le IPy1 (Seldin *et al.*, 1984), a été étudiée en tant que système hôte-vecteur pour la biologie moléculaire. Le phage a médié efficacement la transduction de l'ADN plasmidique dans la bactérie. Des transductions de cette souche contenant les plasmides à résistance marquée aux antibiotiques, à savoir pC194, pBC16 et pRJ45, ont été détectées à des fréquences de 5×10^{-7} à $1,2 \times 10^{-6}$ par unité en forme de plaque. On n'a décelé aucun réarrangement ni aucune suppression dans ces plasmides découlant de la transduction. Le plasmide pC194 n'a pas été transféré à différentes souches de *P. polymyxa* par le phage IPy1. Différents fragments de l'ADN du phage IPy1 cloné dans le plasmide pRJ45 ont entraîné une hausse de la fréquence de transduction des nouveaux plasmides (pRJI13, pRJI21 et pRJI41) dans la souche de *P. polymyxa* Loutit à une fréquence de $1,2$ à $6,5 \times 10^{-4}$ par unité en forme de plaque (Ferreira *et al.*, 1999).

1.1.2.6 Propriétés pathogènes et toxigènes et sensibilité aux antibiotiques

Les recherches documentaires n'ont pas permis de cerner des déterminants de la virulence ou des toxines associées à la *P. polymyxa*, qui permettraient d'infecter les plantes aquatiques ou terrestres, les animaux, ou les humains.

Les seuls renseignements disponibles sur la mise à l'essai de la sensibilité antimicrobienne des souches de *P. polymyxa* sont liés à la présélection de l'organisme isolé dans une hémoculture de l'un des deux cas de bactériémie, ce qui indique que la souche *P. polymyxa* est résistante à la pénicilline, mais sensible à la céfazoline, à la vancomycine, au chloramphénicol, à la tobramycine, à la gentamicine, à la ciprofloxacine, et à la clindamycine (Galanos *et al.*, 2003).

Bien que la souche de *P. polymyxa* puisse théoriquement acquérir des gènes de virulence (y compris des déterminants de résistance aux antibiotiques) par le transfert horizontal à partir d'autres bactéries, cette probabilité n'est pas plus importante pour les souches inscrites à la Liste intérieure des substances comparativement à d'autres souches de *P. polymyxa* qui sont naturellement présentes dans l'environnement.

1.1.3 Effets

1.1.3.1 Effets sur l'environnement

Plantes terrestres

Malgré le rôle bien reconnu de la souche de *P. polymyxa* en tant que bactérie favorisant la croissance des plantes, quelques études ont montré qu'elle peut également agir à titre de rhizobactérie délétère dans certaines circonstances. L'inoculation de l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) avec la souche de *P. polymyxa* (en l'absence de stress biotique ou abiotique) a donné lieu à une réduction de 30 % de la croissance des plantes ainsi qu'à un système de racines retardé, comparativement à des plantes non inoculées (Timmusk et Wagner, 1999; Timmusk, 2003).

Dans une autre étude impliquant la colonisation de l'éco-type C24 de racines de l'arabette des dames par la souche de *P. polymyxa* B1 (isolée de la rhizosphère du blé), la bactérie a principalement colonisé les extrémités des racines, où elle a formé des biofilms et s'est comportée comme un organisme envahisseur des racines. Cette observation a été clairement démontrée par la forte accumulation de cellules bactériennes à 10^6 cellules par gramme de poids racinaire et par la formation d'une matière semi-transparente laissant supposer une matrice extracellulaire dans les deux heures seulement suivant l'inoculation. En raison de la couverture étanche formée par les cellules colonisatrices abondantes, il a été initialement difficile d'évaluer les dommages causés par les bactéries. Néanmoins, des signes de dommages à la coiffe radiculaire épidermique au cours des 5 heures d'incubation ont été constatés dans les images fournies. Au cours de la période plus longue d'inoculation, une deuxième zone de biofilm s'est formée dans la région de différenciation des racines, et la racine est devenue de plus en plus touchée. Après 24 heures, la racine était encore plus fortement peuplée par l'organisme à 10^9 UFC par gramme de poids racinaire et elle était gravement endommagée (Timmusk *et al.*, 2005). Les auteurs, tentant de concilier les activités délétères et bénéfiques de la souche de *P. polymyxa* observées dans le même système-hôte des plantes ont indiqué (1) la possibilité que la formation de biofilm de la souche de *P. polymyxa* sur les racines coïncide avec les sites de colonisation potentiels d'agents pathogènes et, par conséquent, agisse comme une couche protectrice empêchant l'accès de ces pathogènes par l'exclusion compétitive, (2) l'éventualité que la couche de protection contribue également à la tolérance améliorée des plantes à la sécheresse, et (3) la possibilité que les dommages causés par le biofilm à l'extrémité de la racine activent, à leur tour, des gènes de défense contre d'autres pathogènes (Timmusk *et al.*, 2005).

La souche de *P. polymyxa* a causé le mildiou dans des semis de tomates cultivés à partir de graines inoculées avec une suspension de 1×10^6 UFC/mL de la souche *P. polymyxa* isolée dans des semis naturellement malades. De nombreuses mouchetures nécrotiques ont été observées sur des tiges, des cotylédons et, parfois, des racines de semis. Des résultats similaires ont été observés après l'inoculation

artificielle de graines de tomates exemptes de germes avec des souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 8523 (Caruso *et al.*, 1984).

Plantes aquatiques et algues

Une espèce de *Paenibacillus* non identifiée a été isolée dans des algues brunes d'Irlande comestibles (*Himanthalia elongata*, *Laminaria sacharina* and *Laminaria digitata*), apparemment dans le cadre de la microflore normale. Aucun effet néfaste connexe n'a été signalé (Gupta *et al.*, 2010). Une recherche documentaire scientifique approfondie n'a révélé aucune autre déclaration de *P. polymyxa* ou d'autres espèces de *Paenibacillus* associées à des plantes aquatiques.

Invertébrés terrestres

La souche *P. polymyxa* a été étudiée aux fins d'utilisation comme agent de lutte biologique en raison de sa capacité à avoir une incidence sur les nématodes et les insectes ravageurs. En dehors d'un cadre de défi expérimental, des effets nocifs chez des invertébrés n'ont pas été signalés dans la documentation. Cependant, compte tenu des données obtenues dans le cadre d'expériences de simulation, il est possible que de tels effets soient observés chez certains invertébrés à de fortes concentrations de souches de *P. polymyxa*.

Le genre *Paenibacillus* contient un certain nombre d'espèces entomopathogènes, telles que *P. larvae*, *P. alvei*, *P. popilliae* et *P. lentimorbus*.

L'espèce *P. larvae* est l'agent responsable de la loque américaine, qui est l'une des maladies bactériennes de l'abeille mellifère les plus délétères, touchant les abeilles au stade larvaire. Cette maladie tue les larves infectées et peut détruire des colonies infectées (examiné dans Genersch, 2008). Une analyse de génome entier de l'espèce *P. larvae* a révélé des cadres de lecture ouverts très similaires à ceux de (a) synthétases de plipastatine antibiotique (qui inhibe la phospholipase A2), (b) à une surfactine (avec activité hémolytique), (c) à des polycétide-synthétases putatives de type I dont les produits sont des métabolites secondaires avec des effets antibiotiques, immunodépresseurs ou toxiques, et (d) à des homologues d'un transporteur ABC de complexe fer-sidérophore putatif, qui permet l'absorption du fer par le milieu (Chan *et al.*, 2011). En outre, l'espèce *P. larvae* sécrète des protéases extracellulaires hautement actives au cours du processus d'infection, ce qui facilite l'invasion de l'hémocèle et l'élimination de la larve (Genersch, 2008). Dans l'analyse phylogénétique du genre *Paenibacillus* (annexe A), la souche *P. polymyxa* se regroupe de façon éloignée de l'espèce *P. larvae*.

P. alvei, un organisme qui peut se produire en tant qu'envahisseur secondaire des abeilles domestiques (*Apis mellifera*) pendant les éclosions de loque européenne, est capable de produire des signes chez les larves, qui sont semblables aux signes produits chez l'espèce *P. larvae* (Djordjevic *et al.*, 2000). L'analyse de la séquence génomique de *P. alvei* a révélé que cet organisme abrite des gènes pour produire une

variété de toxines, dont une toxine culicide putative ainsi qu'un complexe de toxines insecticides qui produit des toxines actives par voie orale situées à la surface de l'organisme. Par ailleurs, *P. alvei* possède des gènes qui codent les chitinases (abordé dans la section 1.1.2.3) et des hyaluronates lyases qui sont connues en tant que facteurs de virulence endommageant les tissus conjonctifs de cellules eucaryotes. (Djukic *et al.*, 2012). La souche *P. polymyxa*, dans son rôle de bactérie favorisant la croissance des plantes, est connue pour stimuler la production de chitinases par les plantes, ce qui peut les protéger contre certains agents pathogènes fongiques. Seule une étude (Mavingui et Heulin 1994) a démontré l'activité des chitinases dans la souche de *P. polymyxa*. Néanmoins, malgré la capacité de la souche de *P. polymyxa* de produire des chitinases, cet organisme n'a jamais été signalé comme un agent pathogène des abeilles mellifères. Une recherche documentaire approfondie n'a relevé aucune hyaluronate lyase propre à la souche de *P. polymyxa*. En outre, l'analyse phylogénétique du genre *Paenibacillus* (annexe A) montre clairement que la souche de *P. polymyxa* se regroupe de façon éloignée de l'espèce *P. alvae*.

Invertébrés aquatiques

Tel qu'il a été indiqué précédemment, différentes souches de *P. polymyxa* (y compris la souche ATCC 842 inscrite à la Liste intérieure des substances) sont capables de produire des chitinases (Mavingui et Heulin, 1994), une enzyme qui peut dégrader la chitine, qui est le composé majeur de l'exosquelette de crustacés. Par conséquent, différents microbes chitinolytiques, procaryotes et eucaryotes sont impliqués dans l'apparition de maladies de la carapace et de lésions de la carapace connexes chez les crustacés (examiné par Quinn *et al.*, 2013). Cependant, des relevés de communautés bactériennes suscitant des maladies/lésions de la carapace chez le homard américain (*Homarus americanus*) ou le tourteau (*Cancer pagurus*) touchés par cette maladie n'ont pas permis de cerner la souche de *P. polymyxa* ou d'autres membres du genre *Paenibacillus* parmi les micro-organismes impliqués dans ces cas (Quinn *et al.*, 2013; Vogan *et al.*, 2002, respectivement).

En outre, une recherche documentaire scientifique approfondie n'a révélé aucune déclaration impliquant la souche *P. polymyxa* ou d'autres membres du genre *Paenibacillus* en tant qu'agent pathogène des invertébrés aquatiques.

Vertébrés aquatiques

Il existe des preuves impliquant la souche de *P. thiaminolyticus* comme une source de thiaminase chez les animaux aquatiques et terrestres. Dans des conditions de laboratoire, la souche de *P. thiaminolyticus*, qui se trouvent dans les viscères de certains poissons de proie, a provoqué le décès lorsqu'elle a été donnée à du touladi dans des aliments. La thiaminase I, une enzyme dégradant la vitamine B₁ produite par la souche de *P. thiaminolyticus*, a été jugée responsable de la carence en thiamine et de la mortalité connexe chez les poissons. Toutefois, d'autres études n'ont montré aucune relation entre l'activité de la thiaminase et la teneur en protéines de thiaminase I de la souche de *P. thiaminolyticus* ou l'abondance de cellules de *P. thiaminolyticus* mesurées à plusieurs niveaux trophiques des réseaux trophiques des Grands Lacs

(poissons, zooplancton, moules dreissenidés). Par conséquent, il a été conclu que la souche de *P. thiaminolyticus* n'est pas la principale source d'activité de la thiaminase touchant les salmonidés des Grands Lacs (Richter *et al.*, 2012). Sur le plan phylogénétique, la souche de *P. thiaminolyticus* est la plus proche de la souche de *P. popillae*, qui cause des maladies chez le scarabée japonais (Iiyama *et al.*, 2013) et se regroupe de façon éloignée de la souche de *P. polymyxa*.

En outre, il existe des études sur l'alimentation dans lesquelles la souche de *P. polymyxa* (seule ou mélangée avec d'autres organismes) a été analysée pour son potentiel probiotique chez différentes espèces de poissons, tel qu'il est indiqué dans la section 1.1.2.3 (Jafarian *et al.*, 2009a, Jafarian *et al.*, 2009b). Aucun effet nocif connexe n'a été signalé après la consommation des formulations probiotiques dans l'ensemble des études examinées.

Vertébrés terrestres

Une espèce de *Paenibacillus* a été cultivée à partir de sang d'une vache laitière frisonne présentant des signes liés à une endocardite bactérienne. On pense que la source d'infection découle de l'ingestion accidentelle d'un objet en métal contaminé et de sa pénétration dans la paroi du réticulum (Watts et Tulley, 2013). L'espèce *Paenibacillus* isolée n'a pas été adéquatement définie dans le rapport visant à déterminer sa portée et ses liens avec des souches inscrites à la Liste intérieure des substances qui sont évaluées dans le présent document.

1.1.3.2 Effets sur la santé humaine

Jusqu'à présent, on ne relève que deux cas déclarés de la souche de *P. polymyxa* associée à une infection chez l'humain, et seulement un cas impliquant la souche de *P. polymyxa* comme organisme unique. Un cas de bactériémie due à la souche de *P. polymyxa* impliquait une femme de 93 ans hospitalisée pour un infarctus cérébral. Les auteurs ont avancé l'hypothèse selon laquelle la souche de *P. polymyxa* pourrait avoir pénétré dans sa circulation par l'entremise d'une section de peau brisée sur ses mains pendant qu'elle faisait du jardinage (Nasu *et al.*, 2003). Un autre cas de bactériémie impliquant une souche non précisée de *P. polymyxa* et deux espèces de *Bacillus* a été signalé chez une patiente immunocompétente de 18 ans souffrant d'une maladie mentale sous-jacente (syndrome de Münchhausen) impliquant au moins un épisode antérieur d'auto-injection de sol. On a avancé une hypothèse selon laquelle la source de ces organismes serait l'auto-injection d'un produit polymicrobien contenant des spores de *Bacillus*, compte tenu des antécédents de maladie psychiatrique et du comportement autodestructeur de la patiente (Galanos *et al.*, 2003).

D'autres espèces *Paenibacillus* causent parfois des maladies chez les humains ou sont isolées à partir d'échantillons cliniques. *P. alvei* est l'espèce la plus souvent signalée relativement à une infection humaine. Elle a été isolée à partir d'échantillons de liquide céphalorachidien, de sang et de liquide pleural et sur un corps étranger extrait de l'œil (Ouyang *et al.*, 2008). Dans d'autres cas d'infection attribuée à *P. alvei* et à *P. macerans*, l'identité taxinomique de l'agent responsable n'était pas définitive. Ces

cas incluent des cas d'endophtalmie, de méningite, d'infection de hanche prothétique, d'infection de plaie, et d'infection liée à un cathéter (Kim *et al.*, 2010).

Tableau 1-7 : Rapports de cas chez les humains impliquant d'autres espèces de souches de *Paenibacillus*

Description du cas	Bactéries associées	Détails cliniques/résultat	Références
Une bactériémie chez un patient souffrant de plusieurs problèmes médicaux et ayant une sonde à demeure	<i>P. thiaminolyticus</i>	Une antibiothérapie intraveineuse (pipéracilline et un aminoglycoside) a permis de contrôler efficacement l'infection.	Ouyang <i>et al.</i> , 2008
Une bactériémie impliquant cinq utilisateurs de drogues injectables	<i>P. larvae</i>	Tous, sauf un, se sont rétablis soit sans traitement ou avec un traitement à base d'antibiotiques bêta-lactamines.	Rieg <i>et al.</i> , 2010
Un abcès cérébral à la suite d'une blessure périorbitaire	<i>P. macerans</i> et une espèce de souche de <i>Clostridium</i>	La thérapie antimicrobienne a été inefficace et le patient est décédé.	Bert <i>et al.</i> , 1995
Endocardite avec de récents antécédents de tympanoplastie	<i>P. popilliae</i>	L'infection a été contrôlée une thérapie à base de pénicilline G par voie intraveineuse.	Wu <i>et al.</i> , 1999
Dispositif cardiaque associé à l'endocardite	<i>P. glucanolyticus</i>	L'infection a été contrôlée avec du triméthoprime-sulfaméthoxazole et de l'érythromycine.	Ferrand <i>et al.</i> , 2013
L'organisme a été isolé à partir d'expectorations d'un patient souffrant d'une maladie pulmonaire.	<i>P. sputi</i>	Des signes ou des symptômes d'une infection grave étaient absents. L'organisme était sensible à l'ampicilline, au chloramphénicol, à l'érythromycine, à la néomycine, à la pénicilline G, à la	Kim <i>et al.</i> , 2010

Description du cas	Bactéries associées	Détails cliniques/résultat	Références
		rifampicine, à la streptomycine, à la tétracycline, au triméthoprim-sulfaméthoxazole, et à la vancomycine, et résistant à la kanamycine.	
Médiastinite secondaire	<i>P. pasadenensis</i>	Le patient a présenté des signes d'infection, p. ex. des malaises, de la fièvre et des marqueurs élevés d'inflammation ainsi qu'un rejet de liquide clair à partir d'une plaie sternale. Le traitement à la vancomycine, à la clindamycine et à la ciprofloxacine a permis de contrôler l'infection.	Anikpeh <i>et al.</i> , 2010

L'analyse phylogénétique du genre *Paenibacillus* (annexe A) démontre clairement que la souche de *P. polymyxa* se regroupe de façon éloignée de l'espèce *Paenibacillus* associée à une infection humaine. Tous les cas signalés d'infection par l'espèce *Paenibacillus* (y compris la souche de *P. polymyxa*) impliquaient des patients présentant des problèmes de santé préexistants ou de peau brisée, ou ayant subi des procédures médicales invasives.

1.2 Gravité du danger

Il existe peu de renseignements dans les ouvrages scientifiques laissant entendre que la souche de *P. polymyxa* est pathogène pour les plantes aquatiques et terrestres, les vertébrés et les invertébrés, malgré sa répartition généralisée dans l'environnement. Aucune maladie animale ou végétale signalée n'est attribuée aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 ou 13540-4. Tel qu'il a été mentionné précédemment dans le présent document, la souche de *P. polymyxa* a des propriétés de lutte biologique et de promotion de la croissance des plantes et semble présenter des antécédents d'utilisation sécuritaire sur la base d'une variété de produits connus pour être commercialisés et de l'absence de déclaration d'effets nocifs. Quelques études expérimentales ont indiqué un certain potentiel d'effets néfastes chez les plantes lorsque la souche de *P. polymyxa* y était directement inoculée à de fortes concentrations ($\sim 1 \times 10^6$ bactéries par mL) (Timmusk *et al.*, 2005). Des effets néfastes chez certains nématodes et insectes ravageurs ont également été observés avec un inoculat de 10^7 – 10^9 UFC (Blibech *et al.*, 2012; El-Hadad *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012).

Cela laisse entendre que la dose efficace pour des effets néfastes est susceptible d'être élevée et que, par conséquent, les risques posés à ces organismes cibles peuvent être considérés comme étant faibles. En outre, la souche de *P. polymyxa* a été utilisée en tant que probiotique chez l'esturgeon perse et la truite arc-en-ciel, sans effet négatif déclaré.

Comme il a été mentionné précédemment, certaines autres espèces de *Paenibacillus* sont impliquées dans l'apparition de maladies chez des insectes dans des conditions naturelles, mais ces espèces sont distinctes de la souche de *P. polymyxa* sur le plan phylogénétique. La gravité du danger pour l'environnement que représentent les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 est donc considérée comme étant faible.

À ce jour, on ne compte que deux cas signalés d'infection humaine impliquant la souche de *P. polymyxa*; l'une impliquant l'auto-injection d'un produit polymicrobien contenant la souche de *P. polymyxa*, et l'autre impliquant une grave comorbidité (Galanos *et al.*, 2003; Nasu *et al.*, 2003). Si l'on combine ces deux cas à l'ubiquité de l'organisme, l'importance de ces deux semble négligeable. Des rapports de cas d'autres espèces de *Paenibacillus* isolées de sang ou de liquides organiques impliquaient d'autres espèces que l'on ne considérerait pas comme étant proches de la souche de *P. polymyxa*. Ces cas ont également été associés à des problèmes de santé préexistants, à des procédures médicales invasives (Ouyang *et al.*, 2008) ou à des dommages aux barrières normales à l'infection (Anikpeh *et al.*, 2010; Galanos *et al.*, 2003; Nasu *et al.*, 2003). Par ailleurs, les espèces impliquées sont distinctes de la souche de *P. polymyxa* sur le plan phylogénétique. Dans le cas peu probable d'une infection par la souche de *P. polymyxa*, des traitements antibiotiques efficaces sont disponibles (Galanos *et al.*, 2003). La gravité du danger pour l'humain que représentent les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 est considérée comme étant faible.

Les dangers liés à l'utilisation des micro-organismes en milieu de travail doivent être classés comme il se doit en vertu du Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT)².

² La détermination de la conformité à l'un ou plusieurs des critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999) est basée sur une évaluation des risques potentiels pour l'environnement et/ou la santé humaine liés à l'exposition dans l'environnement en général. Pour les humains, cela inclut, sans toutefois s'y limiter, l'exposition par l'air, l'eau et l'utilisation de produits contenant la substance. Une conclusion établie en vertu de la LCPE (1999) sur les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4, ne présente pas un intérêt pour une évaluation, qu'elle n'empêche pas non plus, en fonction des critères de risque prévus dans le Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT), qui sont définis dans le *Règlement sur les produits contrôlés* visant les produits destinés à être utilisés au travail.

2. Évaluation de l'exposition

2.1 Sources d'exposition

La présente évaluation est axée sur l'exposition aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 découlant de leur ajout délibéré à des produits de consommation ou commerciaux ou de leur utilisation dans des procédés industriels.

Les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 ont été inscrites à la Liste intérieure des substances en 1997 et 1998, car elles ont été fabriquées et importées au Canada entre le 1^{er} janvier 1984 et le 31 décembre 1986. La souche ATCC 55407 a été inscrite à des fins d'utilisation dans des applications industrielles. Des utilisations de souches ATCC 842 et 13540-4 sont maintenues confidentielles à la demande des déclarants.

En 2007, un questionnaire volontaire a été envoyé à un sous-ensemble de sociétés de biotechnologie clés au Canada. Les réponses, combinées aux renseignements obtenus d'autres programmes réglementaires et non réglementaires du gouvernement fédéral, révèlent que la souche de *P. polymyxa* 13540-4 n'a pas été utilisée. Cependant, les réponses du sondage indiquent que jusqu'à 9 400 kg de produits contenant potentiellement la souche de *P. polymyxa* ATC 842 et jusqu'à 6×10^{12} UFC de la souche de *P. polymyxa* ATCC 55407 (la formulation et la concentration étaient inconnues dans les deux cas) ainsi que de faibles quantités de souches ATCC 55407 destinées à la recherche et au développement, ont été importées ou fabriquées au Canada en 2006.

En 2009, le gouvernement a mené une enquête de collecte obligatoire de renseignements (Avis) en vertu de l'article 71 de la LCPE (1999); elle a été publiée dans la Partie I de la *Gazette du Canada*, le 3 octobre 2009 (ci-après nommé l'avis aux termes de l'article 71). L'avis s'appliquait à toute personne qui, au cours de l'année civile 2008, avait fabriqué ou importé les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 ou 13540-4, que ce soit seule, dans un mélange ou dans un produit. Plusieurs réponses ont été reçues concernant les souches de *P. polymyxa* inscrites à la Liste intérieure des substances, ce qui indique qu'environ 2 000 kg de produits contenant les souches ATCC 842, ATCC 55407 ou 13540-4 ont été importés ou fabriqués au Canada en 2008 à des fins commerciales ou de consommation.

Dans le cadre d'un suivi de l'avis aux termes de l'article 71, le déclarant a confirmé qu'il n'importait plus la souche de *P. polymyxa* ATCC 55407. En outre, cette souche n'est plus mise en vente sur le marché par l'ATCC, ce qui réduit la probabilité de son utilisation dans des applications futures.

Les souches de *P. polymyxa* inscrites à la Liste intérieure des substances ont des propriétés qui suscitent l'intérêt d'entreprises commerciales dans diverses industries, notamment la biorestauration, le traitement de l'eau, et les produits de consommation.

L'augmentation récente du nombre de publications liées à cet organisme peut également refléter l'intérêt commercial accru à l'égard de la souche de *P. polymyxa*.

À l'exception de la lutte biologique et de la promotion de la croissance des plantes, la souche *P. polymyxa* est principalement utilisée en tant qu'organisme de production pour une variété d'enzymes et de produits chimiques spéciaux, notamment :

- o la production de l'isomère (R, R) optiquement actif du 2,3-butanédiol (Ji *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2011), qui est utilisé comme antigél (Häßler *et al.*, 2012);
- o la production de diméthylcétol, qui est utilisé comme arôme dans la nourriture (Zhang *et al.*, 2012);
- o la production d'enzymes (p. ex. 1,3-glucanases, cellulases, chitinases, protéases et xylanase) avec des applications dans le prétraitement de matières de base pour la production de biocarburant, le blanchiment de la pâte à papier (Kumar *et al.*, 2012; Lan Pham *et al.*, 1998; Morales *et al.*, 1993), la formulation de détergent, l'industrie alimentaire, le traitement du cuir, la synthèse chimique, la gestion des déchets (Alvarez *et al.*, 2006), et des formulations de débouche-tuyaux (Griffin *et al.*, 1995 [numéro de la demande de brevet américain 870057]).

Dans d'autres applications, la souche *P. polymyxa* pourrait être utilisée seule ou avec d'autres micro-organismes pour coloniser un milieu bien précis et produire ces enzymes *in situ* et d'autres molécules en vue de remplir une fonction en particulier. Une recherche dans le domaine public a révélé les utilisations actuelles suivantes d'autres souches de *P. polymyxa* naturellement présentes, dans les secteurs de la consommation, du commerce et de l'industrie, à savoir :

- o le traitement des eaux usées industrielles et municipales : (fiche technique A, 2014)
- o la lutte contre l'accumulation de graisses dans des canalisations d'égout (fiche technique B, 2007);
- o la restauration de l'eau, y compris les aquariums, les aquacultures et les bassins d'agrément (fiche signalétique B, 2010);
- o des désodorisants aux fins d'utilisation dans des hôpitaux, des maisons de soins infirmiers, des écoles, des prisons, des appartements, des maisons funéraires, des chenils, des cliniques médicales (séparateurs de graisse), des siphons, des tuyaux de descente, des toilettes portatives, des fosses septiques, des véhicules de plaisance, des ports de plaisance, des pompes d'épuisement, des fosses d'aspiration, des poubelles, des réceptacles de déchets, des vestiaires, et des moquettes (fiche signalétique A, 2003);
- o des produits de débouchage (fiche signalétique C, 2004);
- o l'utilisation dans des essais de performance de milieux, le traitement de tâches, des réactifs, des trousseaux d'identification, et l'évaluation de procédures bactériologiques (fiche technique C, 2014);
- o l'utilisation en tant que probiotique dans les aliments en aquaculture (fiche technique D, 2014)

2.2 Caractérisation de l'exposition

L'exposition humaine ou environnementale à la souche de *P. polymyxa* ATCC 55407 ne devrait pas avoir lieu à l'heure actuelle, selon les réponses à l'avis aux termes de l'article 71 (qui indique que la souche n'a pas été utilisée dans des produits commerciaux ou de consommation ou des procédés industriels au Canada en 2008), la confirmation par le déclarant de la cessation de l'importation de la souche au Canada, et le fait que la souche ne soit plus mise en vente sur le marché par l'ATCC. Toutefois, l'exposition humaine et environnementale aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4 est jugée moyenne, car des produits importés ont été déclarés dans l'enquête menée en vertu/application de l'article 71.

Compte tenu de la portée et de l'échelle des applications connues et potentielles des espèces, des scénarios d'exposition humaine et environnementale découlant d'utilisations futures potentielles de souches de *P. polymyxa* inscrites à la Liste intérieure des substances, qui pourraient augmenter l'exposition, ont été pris en compte avec les propriétés de survie et de persistance de ces micro-organismes.

2.2.1 Environnement

Des scénarios d'exposition environnementale basés sur des utilisations connues de souches de *P. polymyxa* inscrites à la Liste intérieure des substances et d'autres souches de *P. polymyxa*, ainsi que sur des utilisations futures probables décrites dans la section 2.1 indiquent que des sources d'exposition sont susceptibles d'introduire les souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4 dans des écosystèmes aquatiques et terrestres.

L'ampleur de l'exposition des plantes et des animaux aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4 dépendra de leur persistance et de leur survie dans l'environnement. La souche de *P. polymyxa* est un anaérobie facultatif formant des endospores, qui est capable de se développer dans des milieux contenant peu d'oxygène. Cela explique son ubiquité dans les sols et dans la rhizosphère de diverses plantes ainsi que dans les zones de subsurface plus profondes dans les sédiments marins. Ses spores peuvent rester dans un état de dormance pendant de longues périodes, en étant résistantes à de nombreux facteurs de stress environnemental. Dans des conditions favorables, les spores germent et produisent des cellules végétatives. Tel qu'il a été mentionné précédemment, une étude de la persistance dans le sol (Providenti *et al.*, 2009) a montré que, dans un délai d'un à six mois dans les systèmes terrestres, les souches de *P. polymyxa* NRRL B-4317 (ATCC 842) et 13540-4 voient leur densité initiale diminuer d'environ 1×10^6 UFC/g de sol à des concentrations proches ou en dessous de la limite de détection d'environ 1×10^2 UFC/g de sol. Ce déclin rapide de la taille de population de la souche de *P. polymyxa* à la suite de son introduction dans le sol pourrait être due au phénomène commun de microbiostase du sol, qui est défini comme la croissance ou l'effet inhibiteur de la survie du sol qui est attribué à la rareté des sources de nutriments disponibles pour les microbes dans le sol, et à l'hostilité de l'environnement du sol pour les microbes arrivants en raison de la

pluralité de facteurs abiotiques et biotiques (van Veen *et al.*, 1997). Même si ces preuves laissent entendre que les souches de *P. polymyxa* introduites dans le sol et l'eau diminueront probablement jusqu'à des concentrations de fond au fil du temps dans des conditions sous-optimales, les spores des souches de *P. polymyxa* sont susceptibles de persister et de s'accumuler dans l'environnement. Si la souche de *P. polymyxa* ATCC 55407 devenait disponible au Canada, ses scénarios d'exposition devraient être similaires à ceux des souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4.

2.2.2 Humains

L'exposition humaine devrait principalement se produire par contact direct avec des produits de consommation contenant les souches de *P. polymyxa* ATCC 842 ou 13540-4. Les contacts avec la peau et les yeux, et l'inhalation de gouttelettes ou de particules pulvérisées contenant les souches, sont des voies probables d'exposition directe.

Après l'application du produit, les souches de *P. polymyxa* ATCC 842 ou 13540-4 résiduelles sur les surfaces et dans les réservoirs, tels que les canalisations traitées, pourrait entraîner une exposition cutanée, une exposition par ingestion fortuite si l'organisme persiste sur les surfaces de préparation des aliments et son inhalation, lorsque les aérosols sont générés (p. ex. avec les broyeurs à ordures dans les cuisines). Étant donné que *la P. polymyxa* devrait persister dans certains sites (comme les canalisations) après l'application, ces expositions peuvent ne pas avoir lieu au moment de l'application.

Si des produits commerciaux contenant la souche de *P. polymyxa* ATCC 55407 deviennent accessibles au Canada, la population générale pourrait faire l'objet d'une exposition fortuite lors de l'application de ces produits commerciaux. Le degré d'exposition fortuite dépendra du mode d'application, du volume appliqué et de la proximité des tierces personnes par rapport au lieu de l'application, mais il devrait en général être faible.

L'exposition indirecte aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4 dans l'environnement à la suite de leur utilisation dans le traitement de l'eau et des eaux usées, la restauration de l'eau des aquacultures et des bassins d'agrément, le dégraissage des canalisations d'égout, l'entretien des pelouses, ou l'élimination des déchets provenant de leur utilisation dans la production d'enzymes, aurait certainement lieu aux alentours des sites d'application ou d'élimination, mais ne devrait pas être plus importante que l'exposition directe découlant de l'utilisation de l'organisme dans les produits de consommation.

Si l'organisme pénètre dans les systèmes municipaux de traitement de l'eau potable par l'entremise de rejets dus à des utilisations potentielles, le procédé de traitement de l'eau, qui comprend la coagulation, la floculation, l'ozonisation, la filtration et la chloration, devrait éliminer de façon efficace ces micro-organismes dans l'eau potable.

La croissance des produits microbiens « plus écologiques » sur le marché peut accroître l'exposition humaine directe aux souches de *P. polymyxa* inscrites à la *Liste intérieure des substances* et ayant des applications potentielles dans ces produits. S'il y a utilisation commerciale, industrielle ou de consommation des souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4, l'exposition humaine dans les scénarios d'exposition décrits ci-dessus peut se produire et pourrait inclure une exposition directe et possiblement répétée à des préparations concentrées des souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 ou 13540-4.

3. Caractérisation des risques

Dans cette évaluation, le risque est caractérisé selon un paradigme intégré à l'article 64 de la LCPE (1999) qui veut qu'un danger et l'exposition à ce danger soient tous deux nécessaires pour qu'il y ait un risque. La conclusion de l'évaluation des risques est basée sur le danger et sur ce que l'on connaît de l'exposition due aux utilisations actuelles.

Concernant les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4, on estime que le danger est faible pour l'environnement et la santé humaine. On ne s'attend pas actuellement à une exposition de l'environnement et une exposition humaine de la souche ATCC 55407 de *P. polymyxa* dues à son utilisation volontaire dans des procédés industriels ou des produits de consommation ou commerciaux au Canada (faible exposition); on estime donc que le risque associé à ces utilisations actuelles devrait être faible pour l'environnement et la santé humaine. L'exposition humaine et environnementale aux souches de *P. polymyxa* ATCC 842 et 13540-4 est jugée moyenne, car des produits importés contenant ces souches ont été déclarés dans l'enquête menée en vertu de l'article 71, mais, sur la base de la faible estimation du danger, le risque associé à ces deux souches découlant des actuels niveaux d'exposition est jugé faible.

La détermination du risque posé que présentent les utilisations actuelles est suivie par la prise en compte du danger estimé lié à de futures expositions prévisibles (découlant de nouvelles utilisations).

Les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 ont des propriétés utiles qui suscitent l'intérêt quant à leur utilisation dans d'autres procédés industriels ou produits commerciaux ou de consommation. Dans le cas où ces utilisations commerciales, industrielles ou de consommation potentielles des souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 seraient mises en œuvre, le niveau d'exposition environnementale ou humaine à ces souches pourrait augmenter. Néanmoins, le risque que présentent les utilisations potentielles prévisibles des souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 reste faible étant donné qu'il n'y a aucune preuve d'effets sur la santé humaine ou d'effets écologiques nocifs pour les espèces de l'environnement à l'échelle de la population, malgré la répartition généralisée de la bactérie *P. polymyxa* dans l'environnement et l'historique des

utilisations industrielles, environnementales et commerciales des souches ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4.

4. Conclusion

À la lumière des renseignements présentés dans l'évaluation préalable, on conclut que les souches de *P. polymyxa* ATCC 842, ATCC 55407 et 13540-4 ne pénètrent pas dans l'environnement en une quantité ou concentration ou dans des conditions de nature à :

- avoir, immédiatement ou à long terme, un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique;
- mettre en danger ou risquer de mettre en danger l'environnement essentiel pour la vie;
ou
- constituer ou risquer de constituer un danger au Canada pour la vie ou la santé humaines.

Il est donc conclu que ces substances ne satisfont à aucun des critères énoncés à l'article 64 de la LCPE (1999).

5. Références

- Acosta, M.P., Valdman, E., Leite, S., Battaglini, F., Ruzal, S. 2005. Biosorption of copper by *Paenibacillus polymyxa* cells and their exopolysaccharide. *World J. Microb. Biot.* 21:1157-1163.
- Akhtar, M., Panwar, J. 2013. Efficacy of root-associated fungi and PGPR on the growth of *Pisum sativum* (cv. Arkil) and reproduction of the root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *J. Basic Microbiol.* 53:318-326.
- Alvarez, V.M., Von Der Weid, I., Seldin, L., Santos, A.L.S. 2006. Influence of growth conditions on the production of extracellular proteolytic enzymes in *Paenibacillus peoriae* NRRL BD-62 and *Paenibacillus polymyxa* SCE2. *Lett. Appl. Microbiol.* 43:625-630.
- Anikpeh, Y.F., Keller, P., Bloemberg, G., Grünenfelder, J., Zinkernagel, A. 2010. New disease: Spacecraft bacterium, *Paenibacillus pasadenensis*, causing wound infection in humans. *BMJ Case Rep.* 29 décembre 2010.
- Ash, C., Farrow, J.A.E., Wallbanks, S., Collins, M.D. 1991. Phylogenetic heterogeneity of the genus *Bacillus* revealed by comparative analysis of small-subunit-ribosomal RNA sequences. *Lett. Appl. Microbiol.* 13:202-206.
- Ash, C., Priest, F., Collins, M. 1994. *Paenibacillus* gen. nov. and *Paenibacillus polymyxa* comb. nov. In: Validation of the publication of new names and new combinations previously effectively published outside the IJSB, list no. 51. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 44:852.
- Ash, C., Priest, F.G., Collins, M.D. 1993. Molecular identification of rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. *Antonie Van Leeuwenhoek* 64:253-260.
- [ATCC] American Type Culture Collection. 2012. Renseignements généraux sur la souche *Paenibacillus polymyxa* ATCC 55407. [consulté en décembre 2013]. Accès : <http://www.atcc.org/Products/All/55407.aspx#information>
- Banner Chemical Corp. 2003. Fiche signalétique A : Banzyme Odor Eliminator. [consulté en avril 2014]. Accès : <http://www.bannerchemical.com/pdf/DO901.pdf>
- [BCCM] Belgian Co-ordinated Collections of Micro-organisms. 2013. Renseignements sur la souche *Paenibacillus polymyxa* LMG 13294. [consulté en avril 2014]. Accès : <http://bccm.belspo.be/catalogues/lmg-search-results?FIRSTITEM=1&LIST1=ALL+FIELDS&TEXT1=&FIRSTITEM=1&LIST2=ALL+FIELDS&TEXT2=&FIRSTITEM=1&LIST3=STRNUM&TEXT3=13294&FIRSTITEM=1&LIST4=STRNUM&TEXT4=&FIRSTITEM=1&LIST5=STRNUM&TEXT5=&CONJ=OR&RANGE=20&B3=Run+Query>

Beatty, P.H., Jensen, S.E. 2002. *Paenibacillus polymyxa* produces fusaricidin-type antifungal antibiotics active against *Leptosphaeria maculans*, the causative agent of blackleg disease of canola. *Can. J. Microbiol.* 48:159-169.

Bert, F., Ouahes, O., Lambert-Zechovsky, N. 1995. Brain abscess due to *Bacillus macerans* following a penetrating periorbital injury. *J. Clin. Microbiol.* 33:1950-1953.

Bezzate, S., Aymerich, S., Chambert, R., Czarnes, S., Berge, O., Heulin, T. 2000. Disruption of the *Paenibacillus polymyxa* levansucrase gene impairs its ability to aggregate soil in the wheat rhizosphere. *Environ. Microbiol.* 2:333-342.

Bio-Industries Ltd. 2010. Fiche signalétique B : Bio-Plus. Description: Aqueous suspension of nitrifying and facultative Micro-Organisms (live culture) in buffered solution. [consulté en avril 2014]. Accès : <http://bio.ie/wp-content/uploads/2012/07/Bio-Treat-BIOPLUS-msdNEW.pdf>

BioZ Technologies. 2014. Fiche technique D : Mélange bactérien utilisé dans différents produits comme probiotiques alimentaires (aquaculture) ou pour nettoyer les bassins aquacoles. [consulté en juillet 2014]. Accès : http://bioztech.com/Additional/AboutUs_probiotics_aquaculture_shrimpfarming_organic.html

Blibech, I. 2012. Étude de la lutte biologique intégrée contre la teigne de l'olivier *Prays oleae* Bern. (*Lepidoptera, Hyponomeutidae*) : Emploi des parasitoïdes entomophages et des bactéries entomopathogènes et perspectives de protection biologique de l'olivier en Tunisie, thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax. 215 p.

Blibech, I., Ksantini, M., Chaieb, I., Jlassi, B., Rhouma, A., Jaoua, S., Aifa, S. 2012. Isolation of entomopathogenic *Bacillus* from a biodynamic olive farm and their pathogenicity to lepidopteran and coleopteran insect pests. *Crop. Prot.* 31:72-77.

BluePlanet Corporation. 2014. Fiche technique A : Aquaclean/ACF-32. [consulté en avril 2014]. Accès : <http://www.blueplanetcorp.com/en/application-research/25-aquaclean-acf-32>

Caruso, F., Zuck, M., Bessette, A. 1984. Bacterial seedling blight of tomato caused by *Bacillus polymyxa* [isolation and identification]. *Plant. Dis.* 68:617-620.

Chan, Q.W.T., Cornman, R.S., Birol, I., Liao, N.Y., Chan, S.K., Docking, T.R., Jackman, S.D., Taylor, G.A., Jones, S.J.M., de Graaf, D.C., *et al.* 2011. Updated genome assembly and annotation of *Paenibacillus larvae*, the agent of American foulbrood disease of honey bees. *BMC Genomics* 12:450.

Choi, S.K., Park, S.Y., Kim, R., Lee, C.H., Kim, J.F., Park, S.H. 2008. Identification and functional analysis of the fusaricidin biosynthetic gene of *Paenibacillus polymyxa* E681. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 365:89-95.

- Comas-Riu, J., Vives-Rego, J. 2002. Cytometric monitoring of growth, sporogenesis and spore cell sorting in *Paenibacillus polymyxa* (formerly *Bacillus polymyxa*). *J. Appl. Microbiol.* 92:475-481.
- Da Mota, F.F., Gomes, E.A., Seldin, L. 2008. Auxin production and detection of the gene coding for the Auxin Efflux Carrier (AEC) protein in *Paenibacillus polymyxa*. *J. Microbiol.* 46:257-264.
- De Mas, C., Jansen, N.B., Tsao, G.T. 1988. Production of optically active 2, 3-butanediol by *Bacillus polymyxa*. *Biotechnol. Bioeng.* 31:366-377.
- Dijksterhuis, J., Sanders, M., Gorris, L.G.M., Smid, E.J. 1999. Antibiosis plays a role in the context of direct interaction during antagonism of *Paenibacillus polymyxa* towards *Fusarium oxysporum*. *J. Appl. Microbiol.* 86:13-21.
- Dingman, D.W. 2008. Geographical distribution of milky disease bacteria in the eastern United States based on phylogeny. *J. Invertebr. Pathol.* 97:171-181.
- Djordjevic, S.P., Forbes, W.A., Smith, L.A., Hornitzky, M.A. 2000. Genetic and biochemical diversity among isolates of *Paenibacillus alvei* cultured from Australian Honeybee (*Apis mellifera*) colonies. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:1098-1106.
- Djukic, M., Becker, D., Poehlein, A., Voget, S., Daniel, R. 2012. Genome sequence of *Paenibacillus alvei* DSM 29, a secondary invader during European foulbrood outbreaks. *J. Bacteriol.* 194:6365-6365.
- El-Hadad, M., Mustafa, M., Selim, S.M., El-Tayeb, T., Mahgoob, A., Aziz, N.H.A. 2011. The nematicidal effect of some bacterial biofertilizers on *Meloidogyne incognita* in sandy soil. *Braz. J. Microbiol.* 42:105-113.
- [EPA] Environmental Protection Agency. 1994. *Toxic Substances Control Act de l'EPA. Identification of Microorganisms Currently Listed on The TSCA Chemical Substance Inventory.* [consulté en janvier 2014]. Accès : http://www.epa.gov/biotech_rule/pubs/pdf/listing.pdf
- [EPA] Environmental Protection Agency. 2011. EPA/OPP Microbiology Laboratory: Standard Operating Procedure for Biosafety in the Laboratory. SOP Number: MB-01-06. [consulté en janvier 2014]. Accès : <http://www.epa.gov/pesticides/methods/atmpmethods/MB-01-06.pdf>
- Ferrand, J., Hadou, T., Selton-Suty, C., Goehringer, F., Sadoul, N., Alauzet, C., Lozniewski, A. 2013. Cardiac device-related endocarditis caused by *Paenibacillus glucanolyticus*. *J. Clin. Microbiol.* 51:3439-3442.
- Ferreira, E.C.N., Clementino, V.B., Duarte, G.F., Seldin, L. 1999. Plasmid transduction in *Paenibacillus polymyxa*. *World J. Microb. Biot.* 15:109-115.

Food and Drug Administration des États-Unis. 2013. Import Alert 53-17 : Contamination par la souche *Paenibacillus polymyxa* de préparations de fard à yeux Yiwu City Ludanmei Cosmetics Co. Ltd. (Chine) et Christian Cosmetics (Mexique). [consulté en avril 2014]. Accès : http://www.accessdata.fda.gov/cms_ia/importalert_136.html

Gaby, J.C., Buckley, D.H. 2012. A comprehensive evaluation of PCR primers to amplify the nifH gene of nitrogenase. *PLOS ONE* 7:e42149.

Galanos, J., Perera, S., Smith, H., O'Neal, D., Sheorey, H., Waters, M.J. 2003. Bacteremia due to three *Bacillus* species in a case of Munchausen's syndrome. *J. Clin. Microbiol.* 41:2247-2248.

Genersch, E. 2008. *Paenibacillus larvae* and American Foulbrood – Long since known and still surprising. *J. Verbr. Lebensm.* 3:429-434.

Griffin, W.M., Ritter, R.T., Dent, D.A. 1995. Formule liquide de déboucheur (Sybron Chemical Holdings, Inc.). Brevet américain n° 5,449,619.

Gupta, S., Rajauria, G., Abu-Ghannam, N. 2010. Study of the microbial diversity and antimicrobial properties of Irish edible brown seaweeds. *Int. J. Food Sci. Tech.* 45:482-489.

Häßler, T., Schieder, D., Pfaller, R., Faulstich, M., Sieber, V. 2012. Enhanced fed-batch fermentation of 2, 3-butanediol by *Paenibacillus polymyxa* DSM 365. *Bioresour. Technol.* 124:237-240.

Hesham, A.E., Hashem, M. 2011. Molecular genetic identification of yeast strains isolated from Egyptian soils for solubilization of inorganic phosphates and growth promotion of corn plants. *J. Microbiol. Biotechnol.* 21:55-61.

Hong, H.A., Duc, L.H., Cutting, S.M. 2005. The use of bacterial spore formers as probiotics. *FEMS Microbiol. Rev.* 29:813-835.

Huo, Z., Zhang, N., Raza, W., Huang, X., Yong, X., Liu, Y., Wang, D., Li, S., Shen, Q., Zhang, R. 2012. Comparison of the spores of *Paenibacillus polymyxa* prepared at different temperatures. *Biotechnol. Lett.* 34:925-933.

Iiyama, K., Nishi, O., Mon, H., Man Lee, J., Kusakabe, T., Asano, S., Yasunaga-Aoki, C., Shimizu, S. 2013. Phylogenetic analysis of *Paenibacillus popilliae* and its related taxa based on housekeeping genes. *J. Insect. Biotechnol. Sericol.* 82:1-11.

Jafarian, H.A., Shahi, G.A., Yazdani, A.R. 2009a. The effect of probiotics on the feeding efficiency and larval growth of three species of Caspian sturgeon. *J. Agr. Sci. Nat. Res.* 16:non paginé.

Jafarian, H.A., Taati, K.M., Nazarpour, A.R. 2009b. The study effect of probiotic *Bacillus* on growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) larvae via supplementation with meal of *Daphnia magna*. *J. Agr. Sci. Nat. Res.* 16:39-47.

Jeong, H., Park, S.-Y., Chung, W.-H., Kim, S.H., Kim, N., Park, S.-H., Kim, J.F. 2011. Draft genome sequence of the *Paenibacillus polymyxa* type strain (ATCC 842T), a plant growth-promoting bacterium. *J. Bacteriol.* 193:5026-5027.

Ji, X., Huang, H., Ouyang, P. 2011. Microbial 2, 3-butanediol production: a state-of-the-art review. *Biotechnol. Adv.* 29:351-364.

Kabaluk, T., Gazdik, K. 2005. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Directory of Microbial Pesticides for Agricultural Crops in OECD Countries. [consulté en janvier 2014]. p. 1-242. Accès : <http://www.organicagcentre.ca/Docs/MicrobialDirectory-English-V237-05-Revision1.pdf>

Kajimura, Y., Kaneda, M. 1997. Fusaricidins B, C and D, new depsipeptide antibiotics produced by *Bacillus polymyxa* KT-8: isolation, structure elucidation and biological activity. *J. Antibiot.* (Tokyo) 50:220-228.

Karpunina, L., Mel'nikova, U.Y., Suslova, Y.V., Mukhacheva, E., Ignatov, V. 2003. The bactericidal activity of lectins from nitrogen-fixing bacilli. *Microbiology* 72:300-304.

Khan, Z., Kim, S., Jeon, Y., Khan, H., Son, S., Kim, Y. 2008. A plant growth promoting rhizobacterium, *Paenibacillus polymyxa* strain GBR-1, suppresses root-knot nematode. *Bioresour. Technol.* 99:3016-3023.

Kim, J.F., Jeong, H., Park, S., Kim, S., Park, Y.K., Choi, S., Ryu, C., Hur, C., Ghim, S., Oh, T.K. 2010. Genome sequence of the polymyxin-producing plant-probiotic rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* E681. *J. Bacteriol.* 192:6103-6104.

Kim, K.K., Lee, K.C., Yu, H., Ryoo, S., Park, Y., Lee, J. 2010. *Paenibacillus sputi* sp. nov., isolated from the sputum of a patient with pulmonary disease. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 60:2371-2376.

Kumar, D., Ashfaq, M., Muthukumar, M., Singh, M., Garg, N. 2012. Production and characterization of carboxymethyl cellulase from *Paenibacillus polymyxa* using mango peel as substrate. *J. Environ. Biol.* 33(1):81-84.

Lakhtin, V., Lakhtin, M., Alyoshkin, V. 2011. Lectins of living organisms. The overview. *Anaerobe* 17:452-455.

Lal, S., Romano, S., Chiarini, L., Signorini, A., Tabacchioni, S. 2012. The *Paenibacillus polymyxa* species is abundant among hydrogen-producing facultative anaerobic bacteria in Lake Averno sediment. *Arch. Microbiol.* 194:345-351.

- Lal, S., Tabacchioni, S. 2009. Ecology and biotechnological potential of *Paenibacillus polymyxa*: A minireview. *Indian J. Microbiol.* 49:2-10.
- Lan Pham, P., Taillandier, P., Delmas, M., Strehaiano, P. 1998. Production of xylanases by *Bacillus polymyxa* using lignocellulosic wastes. *Ind. Crop. Prod.* 7:195-203.
- Landman, D., Georgescu, C., Martin, D.A., Quale, J. 2008. Polymyxins revisited. *Clin. Microbiol. Rev.* 21:449-465.
- Li, J., Beatty, P.K., Shah, S., Jensen, S.E. 2007. Use of PCR-targeted mutagenesis to disrupt production of fusaricidin-type antifungal antibiotics in *Paenibacillus polymyxa*. *Appl. Environ. Microbiol.* 73:3480-3489.
- Liu, R., Dai, M., Wu, X., Li, M., Liu, X. 2012. Suppression of the root-knot nematode [*Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood] on tomato by dual inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria. *Mycorrhiza* 22:289-296.
- Ma, M., Wang, C., Ding, Y., Li, L., Shen, D., Jiang, X., Guan, D., Cao, F., Chen, H., Feng, R. 2011. Complete genome sequence of *Paenibacillus polymyxa* SC2, a strain of plant growth-promoting rhizobacterium with broad-spectrum antimicrobial activity. *J. Bacteriol.* 193:311-312.
- Malboobi, M.A., Owlia, P., Behbahani, M., Sarokhani, E., Moradi, S., Yakhchali, B., Deljou, A., Heravi, K.M. 2009. Solubilization of organic and inorganic phosphates by three highly efficient soil bacterial isolates. *World J. Microb. Biot.* 25:1471-1477.
- Mankad, T., Nauman, E. 1992. Effect of oxygen on steady-state product distribution in *Bacillus polymyxa* fermentations. *Biotechnol. Bioeng.* 40:413-426.
- Mavingui, P., Heulin, T. 1994. *In vitro* chitinase and antifungal activity of a soil, rhizosphere and rhizoplane population of *Bacillus polymyxa*. *Soil Biol. Biochem.* 26:801-803.
- Montefusco, A., Nakamura, L., Labeda, D. 1993. *Bacillus peoriae* sp. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 43:388-390.
- Morales, P., Madarro, A., Pérez-González, J.A., Sendra, J., Pinaga, F., Flors, A. 1993. Purification and characterization of alkaline xylanases from *Bacillus polymyxa*. *Appl. Environ. Microbiol.* 59:1376-1382.
- Nasu, Y., Nosaka, Y., Otsuka, Y., Tsuruga, T., Nakajima, M., Watanabe, Y., Jin, M. 2003. A case of *Paenibacillus polymyxa* bacteremia in a patient with cerebral infarction. *Kansenshogaku Zasshi* 77:844-848.

[NCBI] National Center for Biotechnology Information, Genome. 2014. *Paenibacillus polymyxa*: Genome Assembly and Annotation report [10]; Plasmid Annotation Report [2]. [consulté en juin 2014]. Accès : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genome/genomes/1386>

[NCBI] National Center for Biotechnology Information, Nucleotide. 2001. *Paenibacillus polymyxa* partial 16S rRNA gene, strain DSM 36T. GenBank: AJ320493.1. [consulté en décembre 2013]. Accès : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AJ320493>

[NCBI] National Center for Biotechnology Information, Nucleotide. 2014. *Paenibacillus polymyxa* ATCC 842, whole genome shotgun sequencing. GenBank: AFOX00000000.1. [consulté en janvier 2014]. Accès : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AFOX00000000.1>

Nielsen, P., Sørensen, J. 1997. Multi-target and medium-independent fungal antagonism by hydrolytic enzymes in *Paenibacillus polymyxa* and *Bacillus pumilus* strains from barley rhizosphere. *FEMS Microbiol. Ecol.* 22:183-192.

Niu, B., Rueckert, C., Blom, J., Wang, Q., Borriss, R. 2011. The genome of the plant growth-promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* M-1 contains nine sites dedicated to nonribosomal synthesis of lipopeptides and polyketides. *J. Bacteriol.* 193:5862-5863.

Nübel, U., Engelen, B., Felske, A., Snaidr, J., Wieshuber, A., Amann, R.I., Ludwig, W., Backhaus, H. 1996. Sequence heterogeneities of genes encoding 16S rRNAs in *Paenibacillus polymyxa* detected by temperature gradient gel electrophoresis. *J. Bacteriol.* 178:5636-5643.

Organica (UK) Ltd. 2007. Fiche technique B : Formula-33 (traitement des eaux usées). [consulté en avril 2014]. Accès : <http://www.organica-uk.co.uk/pdfdownloads/wastewater.pdf>

Ouyang, J., Pei, Z., Lutwick, L., Dalal, S., Yang, L., Cassai, N., Sandhu, K., Hanna, B., Wiczorek, R.L., Bluth, M. 2008. *Paenibacillus thiaminolyticus*: a new cause of human infection, inducing bacteremia in a patient on hemodialysis. *Ann. Clin. Lab. Sci.* 38:393-400.

Park, S., Park, S., Choi, S. 2012. Characterization of sporulation histidine kinases of *Paenibacillus polymyxa*. *Res. Microbiol.* 163:272-278.

Priest, F.G. 2009. Genus I. *Paenibacillus* Ash, Priest et Collins 1994, 852^{VP}. In: De Vos, P., Garrity, G.M., Jones, D., Krieg, N.R., Ludwig, W., Rainey, F.A., Schleifer, K.H., Whitman, W.B. (éd.) *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Volume 3: The Firmicutes. New York (NY) : Springer. p. 269-295.

Providenti, M.A., Begin, M., Hynes, S., Lamarche, C., Chitty, D., Hahn, J., Beaudette, L.A., Scroggins, R., Smith, M.L. 2009. Identification and application of AFLP-derived

genetic markers for quantitative PCR-based tracking of *Bacillus* and *Paenibacillus* spp. released in soil. *Can. J. Microbiol.* 55:1166-1175.

Quinn, R.A., Cawthorn, R.J., Summerfield, R.L., Smolowitz, R., Chistoserdov, A.Y. 2013. Bacterial communities associated with lesions of two forms of shell disease in the American lobster (*Homarus americanus*, Milne Edwards) from Atlantic Canada. *Can. J. Microbiol.* 59:380-390.

Raza, W., Yang, W., Shen, Q. 2008. *Paenibacillus polymyxa*: antibiotics, hydrolytic enzymes and hazard assessment. *J. Plant Pathol.* 90:419-430.

Richter, C.A., Evans, A.N., Wright-Osment, M.K., Zajicek, J.L., Heppell, S.A., Riley, S.C., Krueger, C.C., Tillitt, D.E., Kidd, K. 2012. *Paenibacillus thiaminolyticus* is not the cause of thiamine deficiency impeding lake trout (*Salvelinus namaycush*) recruitment in the Great Lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 69:1056-1064.

Rieg, S., Bauer, T.M., Peyerl-Hoffmann, G., Held, J., Ritter, W., Wagner, D., Kern, W.V., Serr, A. 2010. *Paenibacillus larvae bacteremia* in injection drug users. *Emerg. Infect. Dis.* 16:487.

Seldin, L., Van Elsas, J., Penido, E.G. 1984. *Bacillus polymyxa* bacteriophages from Brazilian soils. *Antonie Van Leeuwenhoek* 50:39-51.

Setlow, P. 2003. Spore germination. *Curr. Opin. Microbiol.* 6:550-556.

Shida, O., Takagi, H., Kadowaki, K., Nakamura, L., Komagata, K. 1997. Transfer of *Bacillus alginolyticus*, *Bacillus chondroitinus*, *Bacillus curdlandolyticus*, *Bacillus glucanolyticus*, *Bacillus kobensis*, and *Bacillus thiaminolyticus* to the genus *Paenibacillus* and emended description of the genus *Paenibacillus*. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 47:289-98.

Siddiqui, Z., Akhtar, M. 2008. Effects of antagonistic fungi and plant growth-promoting rhizobacteria on growth of tomato and reproduction of the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. *Australas. Plant Pathol.* 38:22-28.

Siddiqui, Z.A., Baghel, G., Akhtar, M. 2007. Biocontrol of *Meloidogyne javanica* by *Rhizobium* and plant growth-promoting rhizobacteria on lentil. *World J. Microb. Biot.* 23:435-441.

Smith, N., Gibson, T., Gordon, R.E., Sneath, P. 1964. Type cultures and proposed neotype cultures of some species in the genus *Bacillus*. *J. Gen. Microbiol.* 34:269-272.

Svetoch, E.A., Stern, N.J., Eruslanov, B.V., Kovalev, Y.N., Volodina, L.I., Perelygin, V.V., Mitsevich, E.V., Mitsevich, I.P., Pokhilenko, V.D., Borzenkov, V.N. 2005. Isolation of *Bacillus circulans* and *Paenibacillus polymyxa* strains inhibitory to *Campylobacter jejuni* and characterization of associated bacteriocins. *J. Food Protect.* 68:11-17.

Thermo Fisher Scientific Inc. 2014. Fiche technique C : BactiDisks^{MC}. [consulté en avril 2014]. Accès : https://www.thermoscientific.com/content/dam/tfs/SDG/MBD/MBD%20Marketing%20Material/Catalog/Canadian%20Catalog_EN_FR.pdf

Timmusk, S. 2003. Mechanism of Action of The Plant Growth Promoting Bacterium *Paenibacillus polymyxa*. Université de Uppsala. Accès : <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:163648/FULLTEXT01.pdf>

Timmusk, S., Grantcharova, N., Wagner, E.G.H. 2005. *Paenibacillus polymyxa* invades plant roots and forms biofilms. *Appl. Environ. Microbiol.* 71:7292-7300.

Timmusk, S., Nicander, B., Granhall, U., Tillberg, E. 1999. Cytokinin production by *Paenibacillus polymyxa*. *Soil Biol. Biochem.* 31:1847-1852.

Timmusk, S., Wagner, E.G.H. 1999. The plant-growth-promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* induces changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression: A possible connection between biotic and abiotic stress responses. *Mol. Plant Microbe In.* 12:951-959.

Tong, Y.J., Ji, X.J., Liu, L.G., Shen, M.Q., Huang, H. 2013. Genome Sequence of *Paenibacillus polymyxa* ATCC 12321, a Promising Strain for Optically Active (R,R)-2,3-Butanediol Production. *Genome Announc.* 1:10.1128/genomeA.00572-13.

Tri-Chem Corp. 2004. Fiche signalétique C : Free Flow. [consulté en avril 2014]. Accès : <http://www.tri-chem.com/attachments/msds/FREE%20FLOW.pdf>

van Veen, J.A., van Overbeek, L.S., van Elsas, J.D. 1997. Fate and activity of microorganisms introduced into soil. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61:121-135.

Vogan, C.L., Costa-Ramos, C., Rowley, A.F. 2002. Shell disease syndrome in the edible crab, *Cancer pagurus* – Isolation, characterization and pathogenicity of chitinolytic bacteria. *Microbiology* 148:743-754.

Watts, A., Tulley, W. 2013. Case Report: Sequelae of traumatic reticuloperitonitis in a Friesian dairy cow. *New Zeal. Vet. J.* 61:111-114.

Wu, Y., Hong, T., Hou, C.J., Chou, Y., Tsai, C., Yang, D. 1999. *Bacillus popilliae* endocarditis with prolonged complete heart block. *Am. J. Med. Sci.* 317:263-265.

Yu, B., Sun, J., Bommareddy, R.R., Song, L., Zeng, A. 2011. Novel (2R, 3R)-2, 3-butanediol dehydrogenase from potential industrial strain *Paenibacillus polymyxa* ATCC 12321. *Appl. Environ. Microb.* 77:4230-4233.

Zhang, L., Chen, S., Xie, H., Tian, Y., Hu, K. 2012. Efficient acetoin production by optimization of medium components and oxygen supply control using a newly isolated *Paenibacillus polymyxa* CS107. *J. Chem. Technol. Biot.* 87:1551-1557.

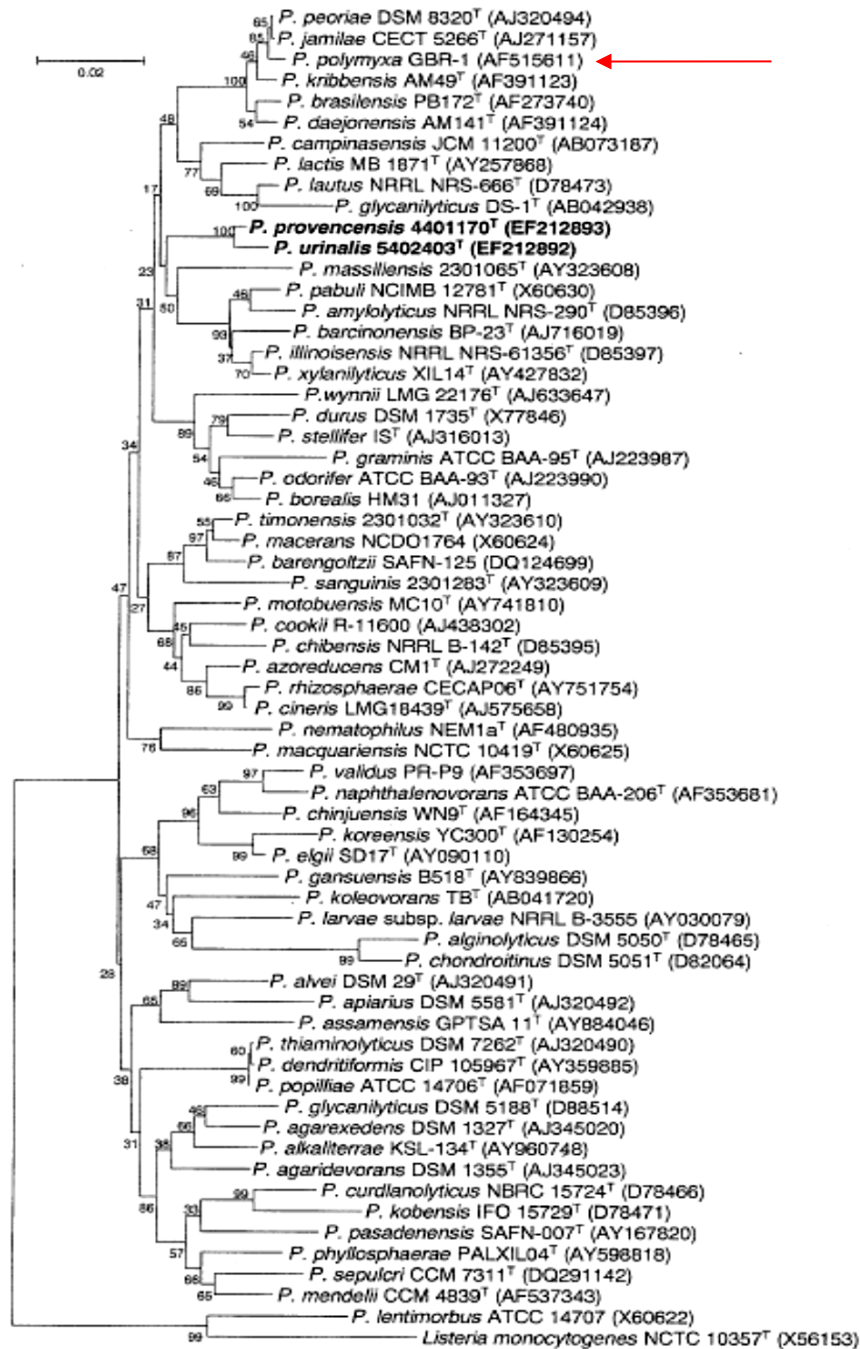
6. Annexe : Phylogénie du genre *Paenibacillus*

Figure 6-1 : Arbre phylogénétique élargi du genre *Paenibacillus* découlant de comparaisons de séquences génétiques de l'ARNr 16S à l'aide d'un fragment de 1 320 nucléotides (tiré du Int. J. Syst. Evol. 58, 682-687, avec autorisation)