

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE
FACULTE DE MEDECINE DE BREST

Année 2017

N°.

THÈSE DE DOCTORAT EN MÉDECINE
DIPLOME D'ÉTAT

PAR

SACHA SCHUTZ

NÉ LE 18 MAI 1984

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 23 MAI 2017

Description du microbiote pulmonaire chez les
patients atteints de mucoviscidose

Président

Monsieur le Professeur Claude FEREC

Membres du jury

Monsieur le Professeur Cédric LE MARECHAL

Monsieur Professeur Philippe LANOTTE

Madame le Docteur Emmanuelle GENIN

Madame le Docteur Geneviève HERY-ARNAUD

Engagement de non-plagiat

Je, soussigné Sacha SCHUTZ, interne en biologie moléculaire au CHRU de Brest, déclare être pleinement informé que le plagiat de documents ou de parties de documents publiés sur toute forme de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour la rédaction de ce document.

Date : 12/05/2017

Signature :



Ce document a été rédigé en \LaTeX sous licence libre GNU GFDL.

Le code source de ce document est disponible sur

<https://github.com/dridk/these>.

L'ensemble des figures sont disponibles en lignes depuis ce QRCode

UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

**FACULTE DE MEDECINE ET
DES SCIENCES DE LA SANTE DE BREST**

DOYENS HONORAIRES :

Professeur H. FLOCH

Professeur G. LE MENN (†)

Professeur B. SENECAIL

Professeur J. M. BOLES

Professeur Y. BIZAIS (†)

Professeur M. DE BRAEKELEER (†)

DOYEN

Professeur C. BERTHOU

PROFESSEURS ÉMÉRITES

CENAC Arnaud

Médecine interne

LEHN Pierre

Biologie Cellulaire

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS EN SURNOMBRE

COLLET Michel

Gynécologie - Obstétrique

MOTTIER Dominique

Thérapeutique

RICHE Christian

Pharmacologie fondamentale

LEFEVRE Christian

Anatomie

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS DE CLASSE EXCEPTIONNELLE

BOLES Jean-Michel

Réanimation Médicale

COCHENER - LAMARD Béatrice

Ophtalmologie

DEWITTE Jean-Dominique

Médecine & Santé au Travail

FEREC Claude

Génétique

GILARD Martine

Cardiologie

JOUQUAN Jean

Médecine Interne

OZIER Yves

Anesthésiologie et Réanimation Chirurgicale

ROBASZKIEWICZ Michel

Gastroentérologie - Hépatologie

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS DE 1^{ÈRE} CLASSE

BAIL Jean-Pierre	Chirurgie Digestive
BERTHOU Christian	Hématologie – Transfusion
BLONDEL Marc	Biologie cellulaire
BRESSOLLETTE Luc	Médecine Vasculaire
DE PARSCAU DU PLESSIX Loïc	Pédiatrie
DE BRAEKELEER Marc	Génétique
DELARUE Jacques	Nutrition
DUBRANA Frédéric	Chirurgie Orthopédique et Traumatologique
FENOLL Bertrand	Chirurgie Infantile
FOURNIER Georges	Urologie
GOUNY Pierre	Chirurgie Vasculaire
HU Weiguo	Chirurgie plastique, reconstructrice & esthétique ; brûlologie
KERLAN Véronique	Endocrinologie, Diabète & maladies métaboliques
LACUT Karine	Thérapeutique
LE ROYER Christophe	Pneumologie
LE MEUR Yannick	Néphrologie
LE NEN Dominique	Chirurgie Orthopédique et Traumatologique
LOZAC'H Patrick	Chirurgie Digestive
MANSOURATI Jacques	Cardiologie
MARIANOWSKI Rémi	Oto. Rhino. Laryngologie
MISERY Laurent	Dermatologie – Vénérologie
MERVIEL Philippe	Gynécologie médicale : option gynécologie obstétrique
NEVEZ Gilles	Parasitologie et Mycologie
NONENT Michel	Radiologie & Imagerie médicale
PAYAN Christopher	Bactériologie – Virologie; Hygiène
REMY-NERIS Olivier	Médecine Physique et Réadaptation
SALAUN Pierre-Yves	Biophysique et Médecine Nucléaire
SARAUX Alain	Rhumatologie
SIZUN Jacques	Pédiatrie
STINDEL Éric	Biostatistiques, Informatique Médicale & technologies de communication

TILLY - GENTRIC Armelle

TIMSIT Serge

VALERI Antoine

WALTER Michel

Gériatrie & biologie du vieillissement

Neurologie

Urologie

Psychiatrie d'Adultes

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS DE 2^{ÈME} CLASSE

ANSART Séverine

Maladies infectieuses, maladies tropicales

AUBRON Cécile

Réanimation ; médecine d'urgence

BEN SALEM Douraied

Radiologie & Imagerie médicale

BERNARD-MARCORELLES Pascale

Anatomie et cytologie pathologiques

BEZON Eric

Chirurgie thoracique et cardiovasculaire

BOTBOL Michel

Psychiatrie Infantile

BROCHARD Sylvain

Médecine Physique et Réadaptation

CARRE Jean-Luc

Biochimie et Biologie moléculaire

COUTURAUD Francis

Pneumologie

DAM HIEU Phong

Neurochirurgie

DELLUC Aurélien

Médecine interne

DEVAUCHELLE-PENSEC Valérie

Rhumatologie

GIROUX-METGES Marie-Agnès

Physiologie

HUET Olivier

Anesthésiologie - Réanimation Chirurgicale/Médecine d'urgences

LIPPERT Éric

Hématologie ; transfusion : option hématologie

LE MARECHAL Cédric

Génétique

L'HER Erwan

Réanimation Médicale

MONTIER Tristan

Biologie Cellulaire

NOUSBAUM Jean-Baptiste

Gastroentérologie - Hépatologie

PRADIER Olivier

Cancérologie - Radiothérapie

RENAUDINEAU Yves

Immunologie

SEIZEUR Romuald

Anatomie-Neurochirurgie

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - PRATICIEN LIBÉRAL

LE RESTE Jean Yves

Médecine Générale

LE FLOC'H Bernard

Médecine Générale

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS ASSOCIÉS À MI-TEMPS

BARRAINE Pierre

Médecine Générale

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - LRU

BORDRON Anne

Biochimie et Biologie moléculaire

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS DE HORS CLASSE

LE MEVEL Jean Claude

Physiologie

PERSON Hervé

Anatomie

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS DE 1ÈRE CLASSE

ABGRAL Ronan

Biophysique et Médecine nucléaire

CORNEC Divi

Rhumatologie

DE VRIES Philine

Chirurgie infantile

DOUET-GUILBERT Nathalie

Génétique

HERY-ARNAUD Geneviève

Bactériologie – Virologie; Hygiène

HILLION Sophie

Immunologie

JAMIN Christophe

Immunologie

LE BERRE Rozenn

Maladies infectieuses-Maladies tropicales

LE GAC Géraud

Génétique

LE ROUX Pierre-Yves

Biophysique et Médecine nucléaire

LODDE Brice

Médecine et santé au travail

MIALON Philippe

Physiologie

MOREL Frédéric

Médecine & biologie du développement
& de la reproduction

PLEE-GAUTIER Emmanuelle

Biochimie et Biologie Moléculaire

QUERELLOU Solène

Biophysique et Médecine nucléaire

VALLET Sophie

Bactériologie – Virologie ; Hygiène

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS DE 2ÈME CLASSE

LE GAL Solène	Parasitologie et Mycologie
LE VEN Florent	Cardiologie
PERRIN Aurore	Biologie et médecine du développement & de la reproduction
TALAGAS Matthieu	Cytologie et histologie

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS STAGIAIRES

UGUEN Arnaud	Anatomie et Cytologie Pathologiques
---------------------	-------------------------------------

MAÎTRE DE CONFÉRENCES – PRATICIEN LIBERAL

NABBE Patrice	Médecine Générale
----------------------	-------------------

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉ MI-TEMPS

BARAIS Marie	Médecine Générale
CHIRON Benoît	Médecine Générale

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS

BERNARD Delphine	Biochimie et biologie moléculaire
FAYAD Hadi	Génie informatique, automatique et traitement du signal
HAXAIRE Claudie	Sociologie - Démographie
KARCHER Brigitte	Psychologie clinique
LANCIEN Frédéric	Physiologie
LE CORRE Rozenn	Biologie cellulaire
MIGNEN Olivier	Physiologie
MORIN Vincent	Électronique et Informatique

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS A TEMPS COMPLET

MERCADIE Lolita	Rhumatologie
------------------------	--------------

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS A MI - TEMPS

SCHICK Ulrike

Cancérologie, radiothérapie : option radiothérapie

AGRÉGÉS / CERTIFIÉS DU SECOND DEGRÉ

MONOT Alain

Français

RIOU Morgan

Anglais

Remerciements

Au Professeur Claude FERREC, qui me fait le grand honneur de présider le jury de cette thèse. Qu'il en soit chaleureusement remercié.

Au Docteur Geneviève HERY-ARNAUD, directrice de thèse, qui m'a fait découvrir toute la magie et la complexité du microbiote.

Au Professeur Cedric LE MARECHAL ainsi que le Docteur Paul GUEUGEN pour m'avoir accueilli dans le service de biologie moléculaire et m'avoir tant appris.

Au Docteur Emmanuelle GENIN, qui me fait le plaisir d'être membre de ce jury. Et qui sans son autorisation, aucun des calculs bio-informatiques n'auraient pu être réalisés.

Au Docteur Philippe LANOTTE, pour avoir accepté d'être présent par les voies du numériques

À Perrine qui m'a toujours soutenu,

À ma mère,

À mon père et tous ceux qui ne dédicacent pas leurs thèses à eux même.

À mes grands-parents Denise et Armand.

À mes compagnons de Fac,

Raphaël, avec qui jamais je n'aurais autant dépensé d'argent au Relai H. Florian, pour ses cours en sciences politiques et son sens du partage. Guillaume D, qui s'amuse aussi avec le microbiote. André pour m'avoir appris pendant un cours soporifique que les variables membres d'une classe sont contiguës en mémoire. Andreas, pour être mon modèle de la perfection intellectuelle. Thibaud pour m'avoir plongé dans la dépendance des bandes dessinées. Mon harem de cointerne Élodie, Marie, Margot, Charlotte, Varoona est (Kevin : je ne savais pas où te mettre) pour m'avoir boosté dans les derniers jours de rédactions.

À mes amis de Caen,

Sassan, Paul, Lorène, Simon, Benjamin, Jeff ...

Je remercie également mes amis qui ont relu ma thèse. Jeremie, Anne-sophie, Andreas, Thibaud et Olivier mon compagnon baroudeur.

À tous mes amis du Master de Bioinformatique de Rennes,

qui m'ont redonné une nouvelle jeunesse d'anarchiste libriste. Natir, Aluriak, Chloé, David, Jérôme, Pierre ...

For my friends far away,

Eugene and all the good people I met on the internet.

Je n'oublie pas de remercier toute l'équipe de biologie moléculaire qui a supporté ma maladresse.

Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution

Theodosius Dobzhansky

Table des matières

1	Avant-propos	6
2	Définitions	9
2.1	Termes utilisés en écologie	9
2.2	Termes utilisés en bio-informatique	12
3	Introduction	1
3.1	La mucoviscidose	1
3.1.1	Une maladie génétique	1
3.1.2	Une maladie infectieuse et inflammatoire	2
3.2	Le microbiote pulmonaire	3
3.3	Exploration du microbiote pulmonaire	5
3.3.1	Méthodes de prélèvement	5
3.3.2	Séquençage haut débit	5
3.4	Objectif de l'étude Mucobiome	7
4	Matériel et Méthodes	8
4.1	Recueil des données	8
4.2	Séquençage	8
4.3	Analyse bio-informatique	9
4.4	Étapes du pipeline	9
4.4.1	Merging : Fusions des reads	9
4.4.2	Cleaning : Filtrage des qualités	9
4.4.3	Reversing : Séquence complémentaire	11
4.4.4	Trimming : Suppression des primers	11
4.4.5	Dereplicating : Suppression des doublons	12
4.4.6	Assignation taxonomique	12
4.4.7	Analyse de la table des OTUs	12
5	Résultats	13
5.1	Séquençage et pipeline	13
5.1.1	Données de séquençage	13
5.1.2	Qualité des reads	13
5.1.3	Assignation taxonomique	15
5.1.4	Profondeur de séquençage	15
5.2	Résultats descriptifs	15
5.2.1	Composition du microbiote	15

5.2.2	Évolution de l'alpha diversité	20
5.2.3	Évolution des abondances	22
5.2.4	Bêta diversité	26
5.2.5	Présence de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	27
5.3	Résultats analytiques	27
5.3.1	Corrélation entre les genres bactériens	27
5.3.2	Comparaison entre les échantillons Free et Never	28
6	Discussion	30
6.1	Production des données	30
6.1.1	Séquençage	30
6.1.2	Pipeline	31
6.1.3	Méthodes d'analyse	32
6.2	Analyse des données	32
6.2.1	Principaux phyla bactériens	32
6.2.2	Dominance des pathogènes	32
6.2.3	Présence de <i>Pseudomonas</i>	32
6.2.4	Patients Free et Never	33
6.2.5	Hétérogénéité des microbiotes	33
6.2.6	Limites de l'étude	33
7	Conclusion	34

Table des figures

1	Incidence des maladies infectieuses et auto-immunes en Europe	6
2	La mitochondrie : exemple de symbiose entre eucaryote et procaryote. . .	8
3	Exemple de courbes de raréfaction.	11
4	Exemple d'ordination.	13
5	Exemple d'un read dans fichier FASTQ.	14
6	Histoire naturelle de l'infection pulmonaire à <i>P. aeruginosa</i>	4
7	Structure secondaire de l'ADNr 16S.	6
8	Régions constantes et variables de l'ADNr 16S.	6
9	Alignement d'un couple de reads sur l'ADNr 16S.	9
10	Graphique du pipeline simplifié sur 3 échantillons	10
11	Graphique du pipeline complet.	11
12	Exemple de déréplication d'un fichier FASTA	12
13	Nombre de reads par échantillon.	13
14	Qualité des reads forward de l'échantillon 1003.	14
15	Qualité des reads fusionnés pour l'échantillon 1003.	14
17	Courbe de raréfaction pour les 188 échantillons.	15
16	Nombre de reads par genre bactérien.	16
18	Phyla retrouvés dans les 188 échantillons.	17
19	Distribution du core microbiota sur les 188 échantillons	19
20	Variation du core microbiota sur les 188 échantillons.	19
21	Évolution du nombre d'espèces par patient en fonction du temps	20
22	Évolution de l'indice de Chao1 par patient en fonction du temps	21
23	Évolution de l'indice de Shanon par patient en fonction du temps	22
24	Évolution des abondances par phylum.	23
25	Évolution des abondances par genre.	24
26	Évolution des abondances pour le patient 43.	25
27	Évolution des abondances pour le patient 54.	25
28	Analyse PCoA + Bray-Curtis des 188 échantillons.	26
29	Corrélation des abondances du core microbiota.	28
30	Comparaison des diversités de Shannon entre les échantillons Free et Never.	29
31	Permanova entre les échantillons Free et Never sur une PCoA+ Bray-Curtis	29
32	Sensibilité de détection de la stratégie 16S en fonction de la longueur des reads.	30
33	Principe de la décomposition par entropie minimum.	31

Liste des tableaux

1	Exemple d'une table des OTUs	9
2	Classification de Lee ¹	3
3	Détail de l'assignation taxonomique des reads.	18
4	Concordance entre la présence d'ADNr 16S de <i>Pseudomonas</i> et sa détection en qPCR oprL	27
5	Concordance entre la présence d'ADNr 16S de <i>Pseudomonas</i> et sa détection en culture	27

Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyriboNucléique

ADNr : Acide désoxyriboNucléique ribosomique

ANOVA : ANalysis Of VAriance

ARS : Agence Régionale de la Santé

ASCII : American Standard Code for Information Interchange

BIOM : Biological Observation Matrix

BPPCO : Bronchopneumopathie chronique obstructive

CFTR : Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator

CPP : Comité de Protection des Personnes

DAG : Directed Acyclic Graph

DTT : DiThioTréitol

ECBC : Examen CytoBactériologique des Crachats

ELISA : Enzyme-Linked Immunosorbent Assay

FLASH : Fast Length Adjustment of Short reads

GNU : GNU's Not UNIXⁱ

IMC : Indice de Masse Corporelle

LBA : Lavage Broncho-Alvéolaire

MDS : MultiDimensional Scaling

MESR : Ministère chargé de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

NGS : Next-Generation Sequencing

OTU : Operational Taxonomic Unit

PCA : Principal Component Analysis

PCoA : Principal Coordinates Analysis

PCR : Polymerase Chain Reaction

PERMANOVA : PERmutational Multivariate ANalysis Of VAriance

qPCR : quantitative Polymerase Chain Reaction

i. Inventé par un Richard Stallman, il s'agit d'un acronyme récursif

Avant-propos

Depuis Louis Pasteur, les bactéries ont toujours été associées aux maladies. La mise en évidence des agents pathogènes comme la syphilis ou la peste n'a pas aidé à tordre le cou de ce stéréotype. La médecine les a donc longtemps considérées comme les ennemies à combattre plutôt que des alliées. Aujourd'hui, personne ne peut nier que les traitements anti-infectieux ont diminué la morbidité des maladies infectieuses. Les avancées majeures dans les domaines de l'hygiène, la vaccination et les antibiotiques ont conduit à faire diminuer la prévalence des maladies infectieuses voire à les faire disparaître. Cependant, la destruction systématique et massive des micro-organismes qui font partie de nous depuis des milliers d'années pourrait bien être la cause de l'émergence de nouvelles maladies² (Figure 1).

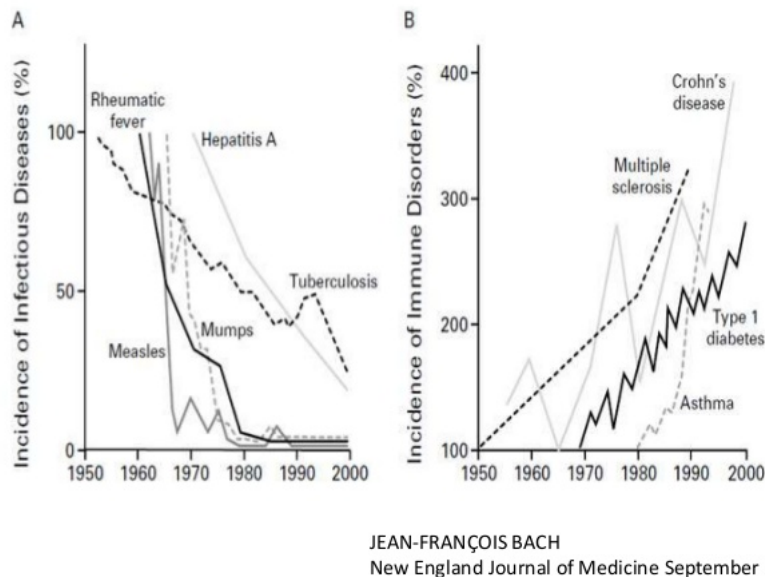


FIGURE 1 – Incidence des maladies infectieuses et auto-immunes en Europe

Les méthodes récentes d'exploration de ce monde microscopique comme le séquençage haut-débit ont permis aux bactéries de retrouver leurs lettres de noblesse. Elles sont présentes partout et jouent le premier rôle dans le fonctionnement des écosystèmes. Elles sont, par exemple, impliquées dans le cycle de l'azote et permettent à la biomasse d'absorber le diazote atmosphérique. Les bactéries sont ainsi la source primaire dans laquelle les organismes puisent pour construire leurs protéines et leurs acides nucléiques. Elles peuvent survivre dans les milieux les plus inhospitaliers. Les archées (anciennement archéobactéries) peuvent vivre dans des environnements d'acidité et de température exceptionnellement élevées ou faibles. On les retrouve dans les fonds océaniques où, privées de lumière, elles sont la seule source d'énergie pour la faune grâce à la chimiosynthèse

à l'instar de la photosynthèse. Le corps humain est lui aussi un environnement riche en bactéries. Pour la majorité d'entre elles, les méthodes de cultures classiques ne permettaient pas de les détecter. Mais à présent, nous savons que les régions anatomiques autrefois considérées stériles contiennent beaucoup de bactéries. On les retrouve sur tous les muqueuses et épithéliums du corps où elles se regroupent en communautés. La peau est colonisée par *Propionibacterium*, *Corynebacterium* et *Staphylococcus*³. Le vagin est colonisé essentiellement par *Lactobacillus* et la bouche principalement par *Streptococcus*³. La muqueuse intestinale est colonisée par une « flore » bactérienne ou microbiote dominé par les anaérobies pouvant contribuer jusqu'à 0,2 kgⁱⁱ au poids corporel⁴. En échange de l'hospitalité, le microbiote participe au fonctionnement physiologique de l'organisme. Il aide à la digestion en dégradant par exemple les sucres du lait maternel chez le nouveau-né^{5;3}. Il participe à la synthèse des vitamines essentielles (K, B12, B9)^{6;3}. Il éduque notre système immunitaire et fait barrière à l'implantation de tout nouvel agent pathogène. Tout déséquilibre du microbiote intestinal ou dysbiose peut avoir des conséquences pour notre santé. La liste des affections associées est longue³. On y retrouve la maladie de Crohn, la maladie cœliaque, le cancer de l'intestin, le syndrome du côlon irritable, l'obésité, le diabète de type 1, l'asthme, l'eczéma, la sclérose en plaques, la polyarthrite rhumatoïde, la maladie d'Alzheimer et même l'autisme.

Un exemple avec une application clinique est l'infection à *Clostridium difficile*. La destruction du microbiote intestinal par des antibiotiques donne l'opportunité à la souche toxigène de *C. difficile* de s'installer et provoquer une colite pseudo-membraneuse. Un des traitements proposés après plusieurs échecs de traitement antibiotique est la transplantation fécale visant à régénérer le microbiote du patient.

Le microbiote nous amène donc à reconsidérer notre individualité. Nous ne sommes plus seulement un organisme multicellulaire composé d'un seul génome ; mais plutôt un écosystème où cellules eucaryotes et micro-organismes vivent en symbiose. Cette relation n'est pas figée dans le temps et peut varier entre le commensalisme, le parasitisme et le mutualisme. Des études récentes ont permis d'estimer que pour un être humain le nombre de cellules microbiennes est de 39 milliards comparé aux 30 milliards de cellules humaines⁴. En associant les gènes bactériens, le génome d'un être humain passe de 23 000 à 3,3 millions de gènes⁷ avec toute la complexité des interactions que cela engendre. Les scientifiques ont nommé *holobionte* cet écosystème vivant. L'ensemble des génomes est appelé *hologénome*.

Il faut toutefois rester prudent quant au rôle donné aux microbiotes et éviter de tomber dans l'excès. Nombreuses sont les publications scientifiques qui se contredisent ou qui confondent corrélation et causalité. Ces publications ont d'ailleurs conduit à la création du hashtag humoristique sur Twitter, *#GutMicrobiomeAndRandomSomething* qui

ii. Les anciennes études estimaient le poids du microbiote digestive à 2 kg

consister à générer des titres d'études aléatoires. Les études sur le microbiote doivent être étayées par des études fonctionnelles afin de trouver des relations de cause à effet. Les corrélations doivent être réalisées sur des populations plus grandes avec un suivi dans le temps plus conséquent. Les nouvelles technologies de séquençage haut-débit vont dans ce sens en collectant toujours plus de données.

Il est encore trop tôt pour dire si cette science va révolutionner la médecine ou s'il s'agit d'un effet de mode. Au regard de l'évolution biologique et de l'importance du microbiote chez d'autres espèces, les paris sont ouverts. Ne l'oublions pas, ce sont d'anciennes bactéries, que nous appelons aujourd'hui des mitochondries (Figure 2) qui constituent avec nos cellules eucaryotes le paroxysme de la relation symbiotique.



FIGURE 2 – La mitochondrie : exemple de symbiose entre eucaryote et procaryote.

Définitions

Termes utilisés en écologie

Le microbiote⁸ est l'ensemble des micro-organismes (bactéries, levures, champignons, virus) vivant dans un environnement donné.

Le microbiome⁸ est l'ensemble des génomes du microbiote. Le plus souvent le microbiome fait référence aux génomes bactériens seuls. On parle alors de virome et de mycobiome pour les virus et champignons respectivement.

La biocénose est le terme écologique dans un sens large désignant l'ensemble des organismes vivants dans un environnement appelé **biotope**. Biocénose et biotope forment ensemble un **écosystème**.

Une symbiose est une association durable entre deux organismes. Leurs relations peuvent être mutualiste, parasitaire ou commensale.

L'OTU (*Operational Taxonomic Unit*) est un terme utilisé en phylogénie pour désigner un groupe d'individus semblables. Dans la majorité des cas, il s'agit de l'espèce dans la classification de Linné. En microbiologie, un OTU est défini par un groupe de bactéries ayant une similarité dans leurs séquences d'ADNr 16S supérieur ou égal à 97 %.

L'abondance absolue est le nombre d'individus appartenant au même OTU dans un échantillon. L'abondance relative est l'expression en pourcentage de l'abondance absolue. L'abondance est évaluée en calculant le nombre de séquence d'ADNr 16S appartenant à un OTU.

La dominance caractérise un OTU dont l'abondance est supérieure à 90 % dans un échantillon.

La table des OTUs est à la base de toute analyse en écologie. Elle correspond à un tableau à double entrée contenant l'abondance par échantillon et par OTU. Dans le tableau 1, l'abondance relative pour *Staphylococcus aureus* est de 68 %.

	échantillon 1	échantillon 2	échantillon 3
OTU 1 (<i>S. aureus</i>)	68 %	12 %	25 %
OTU 2 (<i>E. coli</i>)	40 %	24 %	25 %
OTU 3 (<i>P. aeruginosa</i>)	28 %	64 %	50 %

Tableau 1 – Exemple d'une table des OTUs
l'abondance relative de 3 espèces bactériennes pour 3 échantillon

La diversité alpha est une mesure de la biodiversité au sein d'un échantillon. Elle correspond à l'analyse d'une colonne de la table des OTUs. La richesse, l'indice de Chao1, de Shannon et de Simpson sont des indices de diversité alpha.

La diversité bêta est une analyse descriptive de la biodiversité entre plusieurs échantillons. Elle correspond à l'analyse de l'ensemble de la table des OTUs. L'approche la plus courante est de réaliser une analyse multivariée par des méthodes d'ordination. Il s'agit de représenter un graphique à n dimensions, impossible à représenter dans toutes ses dimensions, en le projetant dans un espace à deux ou trois dimensions.

La richesse (*richness*) est le nombre d'OTUs présents dans un échantillon. Les deux échantillons suivants ont la même richesse (2), mais pas les mêmes abondances.

échantillon 1 : 4 *Streptococcus*, 4 *Escherichia*

échantillon 2 : 432 *Streptococcus*, 12 *Escherichia*

L'équitabilité (*evenness*) indique si les OTUs d'un échantillon sont répartis uniformément. L'équitabilité du premier échantillon est plus grande que celle du second.

échantillon 1 : 50 *Streptococcus*, 50 *Escherichia*

échantillon 2 : 432 *Streptococcus*, 12 *Escherichia*

L'indice Chao1 est une estimation de la richesse réelle (*in vivo*) par rapport à la richesse observée dans l'échantillon (*in vitro*). Cet indice part du principe que si l'échantillon contient beaucoup de singletons (OTU détecté une seule fois), il est fort probable que la richesse réelle soit plus grande que la richesse de l'échantillon. La formule est la suivante :

$$Chao_1 = S_{observed} + \frac{a^2}{2b} \quad (1)$$

avec **S** la richesse observée, **a** le nombre de singletons et **b** le nombre de doubletons.

L'indice de Shannon est un indicateur évaluant à la fois la richesse et l'équitabilité dans un échantillon. Il se calcule de la même façon que l'entropie de Shannon.

$$Shannon = \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i) \quad (2)$$

avec **p** la fréquence d'un OTU parmi les **S** OTUs présents dans l'échantillon.

L'indice de Simpson est un indicateur évaluant la probabilité que deux individus sélectionnés aléatoirement dans un échantillon donné soient de la même espèce. L'indice est de sens contraire aux précédents. La formule est la suivante :

$$Simpson = 1 - \sum_{i=1}^S p_i \quad (3)$$

avec **p** la fréquence d'un OTU parmi les **S** OTUs présents dans l'échantillon

La courbe de raréfaction est utilisée pour déterminer si la profondeur de séquençage est suffisante pour caractériser la diversité d'un échantillon. Pour comprendre, imaginons un sac noir contenant des billes (reads) de différentes couleurs (espèces). Avec deux couleurs dans le sac, une petite poignée (un petit échantillon) de billes sera suffisante pour évaluer la diversité. Vous ne trouverez pas de nouvelle couleur avec plus de billes dans votre main. En revanche, avec d'avantage de couleurs dans le sac, il faudra une poignée plus importante pour évaluer la diversité. La courbe de raréfaction permet d'évaluer si cette poignée de billes est suffisamment représentative. Pour générer cette courbe, des groupes de reads de taille croissante (1..n) sont tirés aléatoirement depuis l'échantillon. Le groupe est reporté sur l'axe X et le nombre d'OTUs trouvé dans ce groupe est reporté sur l'axe Y. Une courbe s'aplatissant indique une bonne profondeur de séquençage (Figure 3).

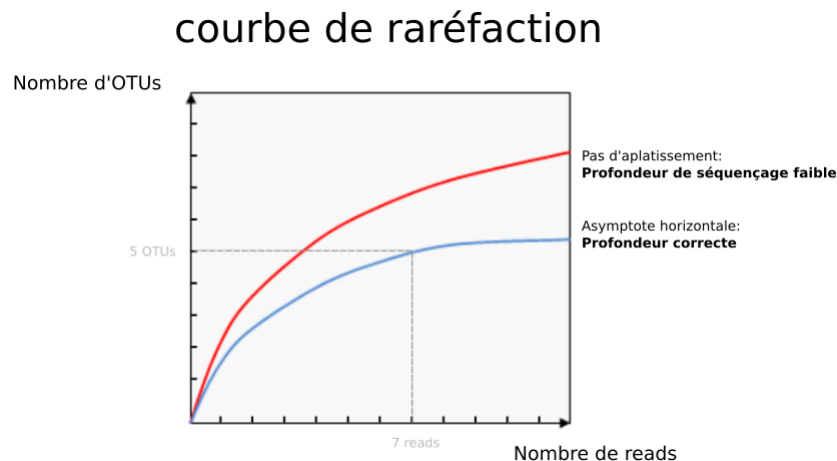


FIGURE 3 – Exemple de courbes de raréfaction.

La courbe bleue témoigne d'un bon échantillonnage en s'aplatissant précocement. Plus de reads ne permettraient pas de découvrir de nouveaux OTUs contrairement à la courbe rouge.

Termes utilisés en bio-informatique

Un **pipeline** est un ensemble d'étapes de calcul informatique. Chaque étape prend en entrée des fichiers pour en produire de nouveaux dans sa sortie. On peut comparer cela aux étapes d'une recette de cuisine. Sans parallélisation, un cuisinier (le processeur) doit attendre de faire fondre le beurre avant de battre les œufs en neige (exécution synchrone). En parallélisant, le cuisinier peut réaliser plusieurs étapes en même temps. Battre les œufs pendant que le beurre fond (exécution asynchrone). Maintenant, si l'objectif est de produire 188 gâteaux (188 analyses) et que l'on dispose de 64 cuisiniers (64 processeurs), l'organisation des tâches devient complexe si l'on veut maximiser le rendement. Pour cela, on dispose d'outils comme *Snakemake*⁹, qui permettent de trouver la meilleure façon d'optimiser les tâches en construisant ce qu'on appelle un graphe orienté acyclique.

NGS (Next Generation Sequencing) désigne l'ensemble des techniques de séquençage de nouvelle génération permettant de séquencer un nombre très important de fragments d'ADN.

La métagénomique est une méthode d'étude du contenu en matériel génétique présent dans un milieu grâce aux techniques de séquençage haut débit. Contrairement à la génomique qui s'intéresse au génome d'un individu, la métagénomique s'intéresse aux génomes d'une population d'individus. Dans son sens strict, la métagénomique correspond à l'étude de l'ensemble des séquences d'ADN. L'analyse d'un seul gène, comme celui de l'ARNr 16S est associé à tort au terme métagénomique, mais son usage reste courant. On lui préférera le terme de **métagénétique** ou **métataxonomique**.

Un **read** est un terme bio-informatique désignant une séquence d'ADN issue d'un séquençage haut débit. Selon les technologies, la longueur des reads varie le plus souvent entre 100 et 300 paires de bases.

Une **bibliothèque** est l'ensemble des fragments d'ADN préparés pour être séquencés.

Un **score de qualité Phred** ou QScore exprime la confiance que l'on porte au séquençage. Il est lié de façon logarithmique à la probabilité d'erreur d'identification d'un nucléotide. Par exemple un score de 10 équivaut à une 1 erreur sur 10. Un score de 40 à 1 erreur sur 10000.

$$Q = -10 \log_{10} P \quad (4)$$

Le score Q est associé de façon logarithmique à la probabilité d'erreur P de s'être trompé en séquençant un nucléotide.

Une **ordination** est une analyse multivariée visant à décrire des objets caractérisés par plusieurs variables. Par exemple un échantillon est caractérisé par différentes abondances de bactéries. Il existe plusieurs méthodes d'ordination. La plus connue étant l'Analyse en Composantes Principales (PCA) basée sur une matrice de covariances. En écologie, l'Analyse en Coordonnées Principales (PCoA) est préférée. Elle se base sur une matrice de distances. Elle consiste à projeter des points d'un espace à n dimensions vers un espace visible en 2 dimensions. La figure 4 illustre ce principe avec un exemple à deux dimensions seulement.

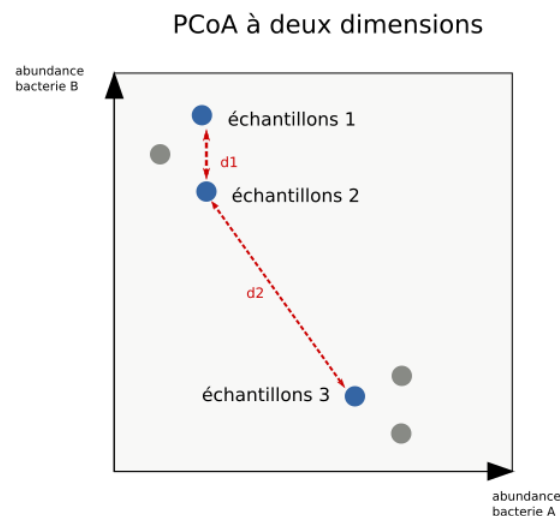


FIGURE 4 – Exemple d'ordination.

Représentation de plusieurs échantillons ne contenant que deux espèces A et B. Chaque échantillon est assimilable à un point de coordonnées (abondance A ; abondance B). Il est alors possible de calculer des distances entre les échantillons. La plus connue étant la distance euclidienne. Mais d'autres existent comme la distance de Bray-Curtis. Sur cette figure, les échantillons 1 et 2 ont des microbiotes proches, car la distance $d1$ qui les sépare est petite. Dans la réalité, il y a plus d'espèces donc plus de dimensions. Une PCoA consiste à réduire cet espace multidimensionnelle en un espace 2D qui respecte les distances entre les points.

La distance de Bray-Curtis est un indice de dissimilarité entre deux échantillons qui s'assimile à une distance entre 2 points dans un espace de taille n (Figure 4). Plus la distance est grande et plus les deux échantillons sont dissemblables. La formule est la suivante :

$$BC_{jk} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^p \min(N_{ij}, N_{ik})}{\sum_{i=1}^p (N_{ij} + N_{ik})} \quad (5)$$

Où N_{ij} est l'abondance d'une espèce i dans l'échantillon j et N_{ik} l'abondance de la même espèce i dans l'échantillon k . Le terme $\min(.,.)$ correspond au minimum obtenu pour deux comptes sur les mêmes échantillons. Les sommes situées au numérateur et dénominateur sont réalisées sur l'ensemble des espèces présentes dans les échantillons.

Un fichier FASTQ contient les séquences des reads et leurs qualités par nucléotides exprimés en Phred Score. Chaque read est représenté par 4 lignes dans un fichier textuel (Figure 5). Ces fichiers sont produit par le séquençage haut-débit.

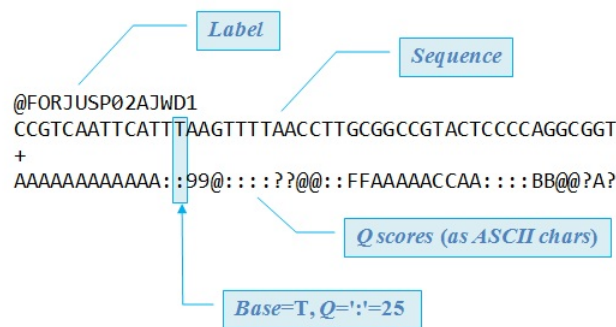


FIGURE 5 – Exemple d'un read dans fichier FASTQ.

Les scores de qualités sont encodés avec des symboles ASCII. Par exemple le quatorzième T est associé au symbole « : » correspondant au score phred de 25, soit une probabilité de 0,3 % d'erreur.

Le multiplexage est utilisé pour pouvoir séquencer plusieurs échantillons différents dans une même librairie. Pour cela, les ADNs de chaque échantillon sont marqués avec une courte séquence nucléotidique appelée barcode ou index suivant la technologie. Lors de l'analyse bio-informatique, les données sont démultiplexées afin d'associer chaque read à son échantillon.

Un graphe est un objet mathématique défini par des nœuds (nodes) reliés par des arrêtes (edges). Les graphes permettent de répondre à différents problèmes mathématiques. Par exemple, le problème des sept ponts de Königsberg, qui consiste à savoir

s'il existe une promenade passant par 7 ponts une seule fois. La théorie des graphes est très utilisée en bio-informatique.

Introduction

La mucoviscidose

Une maladie génétique

La mucoviscidose est une maladie génétique autosomique récessive grave qui touche en France 1 naissance sur 5400¹⁰. La Bretagne est la région la plus touchée avec une prévalence de 1/3000¹⁰. La loi de Hardy Weinberg estime qu'en Bretagne, 1 personne sur 27 est porteuse d'une mutation dans *CFTR* à l'état hétérozygote. Cette haute prévalence s'explique probablement par un effet fondateur associé à un avantage sélectif pour les individus porteurs de l'allèle mutéⁱⁱⁱ. Le gène *CFTR* impacté se situe sur le chromosome 7 en position q31.2. Il est constitué de 27 exons pour 250 188¹¹ paires de bases. Il code un canal chlore AMP dépendant permettant les échanges des ions chlorures au niveau des membranes cellulaires. Il est également impliqué dans le transport du thiocynate (SCN-) et des bicarbonates (HCO₃-)¹². On dénombre à ce jour 2017 mutations¹³ mises en cause dans la mucoviscidose. La perte d'une phénylalanine en position 508 par délétion de trois nucléotides c.1521-1523delCTT (anciennement $\Delta F508$) cause à elle seule 80 % des mucoviscidoses¹³. Ces mutations sont responsables d'une protéine défectueuse ou d'une absence de canaux sur les membranes cellulaires.

Cliniquement, la mutation entraîne une insuffisance pancréatique exocrine et une infertilité par disparition des canaux déférents. Des signes digestifs, hépatiques et articulaires sont également présents. L'atteinte de la fonction respiratoire est la plus bruyante cliniquement. En effet, au niveau de l'épithélium broncho-pulmonaire, l'absence d'une protéine CFTR fonctionnelle est responsable d'une déshydratation du mucus, le rendant plus visqueux et empêche les cils bronchiques de jouer leur rôle.

Du fait de la forte prévalence de la maladie, un dépistage précoce est réalisé systématiquement chez tous les nouveau-nés (test de Guthrie) afin d'adapter au plus tôt la prise en charge. Seul le test de la sueur permet de poser le diagnostic. Le dépistage prénatal basé sur l'ADN circulant est actuellement à l'étude¹⁴.

Le traitement repose avant tout sur une prise en charge respiratoire (kinésithérapie, dor-nase^{iv}, antibiothérapie). Les recherches en thérapies génétiques sont encourageantes¹⁵. Les traitements correcteurs/potentioteurs de la protéine CFTR, comme l'*ivacaftor* sont les seuls traitements curateurs, mais concernent uniquement certaines mutations rares comme la G551D. La greffe pulmonaire est le dernier recours.

iii. Plusieurs hypothèses ont été proposées, notamment celle de la diminution des pertes hydriques chez les sujets hétérozygotes lors des grandes épidémies de choléra.

iv. Une DNase qui fluidifie les sécrétions trop riches en ADN provenant de l'afflux des neutrophiles in situ et de leur apoptose prématurée.

Une maladie infectieuse et inflammatoire

L'atteinte pulmonaire dans la mucoviscidose est caractérisée par des réactions inflammatoires qui dégradent progressivement la fonction respiratoire. Cette inflammation est la conséquence d'un afflux excessif de polynucléaire avec libération de médiateurs¹⁶ probablement en réponse à une agression microbienne^v. Plusieurs pathogènes sont impliqués. Chez les jeunes enfants¹⁷, *Haemophilus influenzae* et *Staphylococcus aureus* sont le plus souvent responsable. *Achromobacter xylosoxidans*, *Burkholderia cepacia complex* et *Stenotrophomonas maltophilia* sont retrouvés parmi les sujets plus âgés¹⁷.

Mais c'est *Pseudomonas aeruginosa* qui caractérise l'atteinte pulmonaire dans la mucoviscidose en marquant un tournant décisif dans l'évolution de la maladie. Ce bacille aérobic strict est une bactérie de l'environnement rarement retrouvée parmi les sujets sains¹⁸. En revanche, dans la mucoviscidose, il est mis en évidence¹⁹ chez 60 % des patients jeunes et plus de 90 % des patients adultes.

La primocolonisation à *P. aeruginosa* semble avoir lieu tôt dans l'enfance¹⁸. Il y a ensuite une phase de latence (Figure 6), variable entre les individus, marquée par des épisodes de recolonisation intermittente. À ce moment, l'éradication par des antibiotiques reste possible. Puis survient le passage à la chronicité. *P. aeruginosa* s'adapte à son milieu et s'installe à long terme. Il perd certains caractères de virulence, mais devient résistant aux antibiotiques¹⁹. Son phénotype change. Il se transforme pour devenir mucoïde en sécrétant un film d'alginate qui le protège du système immunitaire. Les mécanismes sous-jacents à cette adaptation sont ingénieux. La forte densité en bactéries est responsable de l'activation de certains gènes par un processus appelé *quorum sensing*²⁰. Dans ce processus, chaque bactérie communique avec ses voisines par des signaux chimiques. Le génome de *P. aeruginosa* devient également hyperpermutable¹⁷ pour présenter une plus grande diversité génétique au regard de la sélection naturelle^{vi} et donc évoluer plus rapidement.

À ce stade, le traitement antibiotique n'est plus curatif mais symptomatique et l'évolution tend inexorablement vers un déclin de la fonction respiratoire.

L'approche clinique est donc préventive afin de retarder le passage à la chronicité. Elle vise à éliminer *P. aeruginosa* dès qu'il est détecté en culture grâce à une surveillance rapprochée¹⁹. La culture étant peu sensible, d'autres méthodes d'identification peuvent être employées. La détection des anticorps anti-pyocyaniques par ELISA a montré peu de sensibilité et n'est plus recommandée à l'heure actuelle²¹. La PCR ciblée associant les gènes des protéines bactériennes *oprL*, *gyrB* et *ecfX* s'est montrée plus sensible et plus spécifique que la culture²².

En pratique, la colonisation chronique est définie lorsque 3 expectorations sont rendues

v. D'autres hypothèses suggèrent que l'inflammation précède la colonisation¹⁶

vi. En biologie évolutive, il s'agit d'évolvabilité

positives en culture, successivement au cours d'un suivi mensuel ou bimensuel¹⁹. Une autre classification, celle de Lee¹ définit 4 groupes (Tableau 2) :

Tableau 2 – Classification de Lee¹

Chronique	> 50 % des cultures sont positives sur 12 mois
Intermédiaire	≤ 50 % des cultures sont positives sur 12 mois
Free	Cultures négatives sur 12 mois avec des antécédents de positivité à <i>P. aeruginosa</i>
Never	Cultures négatives sur 12 mois sans antécédents de positivité à <i>P. aeruginosa</i>

À ce jour, la physiopathologie de l'infection broncho-pulmonaire chez les patients atteints de mucoviscidose est encore mal comprise ; Par exemple, on ne sait pas clairement pourquoi *P. aeruginosa* s'installe préférentiellement chez les patients atteints de mucoviscidose. Plusieurs hypothèses ont été proposées :

Déshydratation du mucus¹⁷ : La mutation *CFTR* serait responsable d'un mucus plus visqueux et moins épais associé à la perte de fonction des cils bronchiques. Les bactéries seraient alors piégées dans ce mucus pour être exposées plus longtemps à l'épithélium respiratoire et ainsi déclencher une réponse inflammatoire.

Augmentation de salinité¹⁷ : L'augmentation de la salinité du mucus aurait pour conséquence de désactiver des peptites antimicrobiens présents comme les bêta-defensines, lysozymes ou les lactoferrines.

Adhérence aux cellules¹⁷ : *P. aeruginosa* serait un ligand naturel des cellules épithéliales portant la protéine CFTR non mutée. Après internalisation, la bactérie serait détruite.

Création d'un milieu favorable : L'inflammation précède la colonisation à *P. aeruginosa* et crée un milieu favorable. Par exemple la production d'alanine et de lactate²³ est une source de carbone métabolisable par *P. aeruginosa*.

Stimulation du système immunitaire : *P. aeruginosa* stimulerait le système immunitaire de façon à éliminer tous ses concurrents et ainsi se développer seul dans sa niche écologique²⁴.

Anomalie du microbiote^{25? ;26;27} : A l'instar de ce qui est bien démontré au niveau intestinal, le microbiote respiratoire jouerait le rôle de barrière contre l'implantation d'agents pathogènes exogènes. La dysbiose induite par la mucoviscidose permettrait à *P. aeruginosa* de s'installer

Le microbiote pulmonaire

Bien qu'il soit en contact avec le milieu extérieur, l'arbre respiratoire (comprenant la trachée, les bronches et les alvéoles) a longtemps été considéré stérile avec les méthodes de culture classique. Il a fallu attendre l'avènement du séquençage haut débit

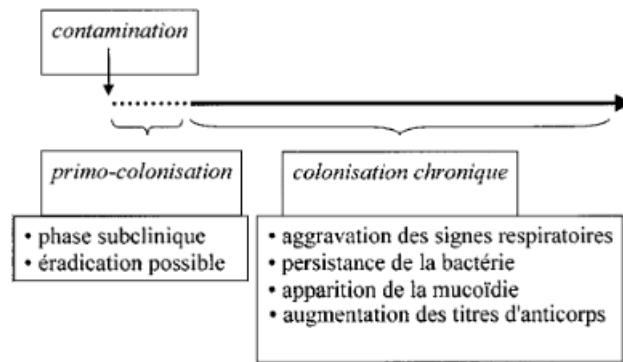


FIGURE 6 – Histoire naturelle de l'infection pulmonaire à *P. aeruginosa* (P. Plésiat 2003¹⁸).

pour mettre en évidence le microbiote pulmonaire^{28;26;29;30}.

L'arbre respiratoire chez le fœtus^{vii} est stérile. Il se colonise comme l'intestin, à la naissance lors du passage de la filière génitale puis se différencie au cours du temps. Il est beaucoup moins riche que le microbiote digestif, mais plus dynamique en raison d'un flux aérien bidirectionnel. Les bactéries du microbiote respiratoire proviennent de l'air ambiant, des voies supérieures, mais aussi du tube digestif par un phénomène de micro aspirations³². Une étude a d'ailleurs montré une concordance entre le microbiote digestif et respiratoire³².

Le microbiote pulmonaire est dominé par le phylum des *Firmicutes* (*Streptococcus*) et des *Bacteroidetes* (*Prevotella*). Les genres retrouvés majoritairement sont *Streptococcus*, *Prevotella*, *Fusobacteria*, *Veillonella*, *Haemophilus*, *Neisseria* et *Porphyrromonas*. L'arbre respiratoire étant en continuité directe avec les voies aériennes supérieures il y a un gradient microbien de l'oropharynx jusqu'aux alvéoles. Certains genres bactériens sont communs, comme *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Haemophilus* et *Moraxella*. Tandis que d'autres genres comme *Corynebacterium* et *Dolosigranulum* sont retrouvés essentiellement au niveau du nez et de l'oropharynx.

Le microbiote pulmonaire est dynamique. Il peut varier dans l'espace à cause de la structure irrégulière de l'arbre bronchique. Un prélèvement au niveau d'un foyer infectieux, par exemple, se distinguera nécessairement d'un foyer sain. Il existe également des gradients physico-chimiques qui selon la région peuvent sélectionner des espèces. Les cavernes tuberculeuses par exemple se trouvent essentiellement dans le lobe supérieur en raison d'une concentration en oxygène plus élevée qui favorise ce bacille aérobic strict. D'autres études^{33;34} ont montré que la diversité diminue avec l'âge ou encore que la structure du microbiote change avec une exposition tabagique. Enfin, les pathologies respiratoires²⁶ sont une autre source de variabilité du microbiote. Il est par exemple

vii. Un article récent critique l'idée d'un fœtus stérile³¹

démontré dans la mucoviscidose qu'il y a une augmentation de richesse et une diminution de diversité. L'asthme et la BPCO sont également associés à des anomalies du microbiote pulmonaire^{35;27}.

Il semble cependant que ce soit l'individu lui-même qui soit la principale source de variabilité avant tout autre facteur³⁶.

Exploration du microbiote pulmonaire

Méthodes de prélèvement

Le microbiote respiratoire est exploré en séquençant l'ADN des micro-organismes présents dans un échantillon. Toutes les méthodes de recueil sont possibles, mais les prélèvements protégés (combicath^{viii}, Liquide Broncho Alvéolaire (LBA)) sont recommandés afin d'éviter une contamination par les voies aériennes supérieures. En pratique, les patients atteints de mucoviscidose sont suivis par le recueil des prélèvements moins invasifs comme les prélèvements pharyngés ou les expectorations spontanées ou induites (examen cytobactériologique du crachat (ECBC)). Dans ces dernières, la qualité du prélèvement peut être évaluée en comptant le nombre de cellules épithéliales (normalement < 25 par champ à l'objectif x10) et de polynucléaires (normalement > 10 par champ à l'objectif x10) selon le score de Bartlett adapté par Murray et Washington²¹. Des prélèvements sont également réalisables *in situ* sur les explants lors des greffes pulmonaires.

Séquençage haut débit

Le séquençage de nouvelle génération permet de séquencer de grandes quantités d'ADN dans un échantillon et ainsi de déterminer sa composition en bactéries ou autres micro-organismes. À titre d'exemple, un séquenceur Sanger classique permet de lire des fragments d'ADN d'environ 800 pb parallélisable jusqu'à 96 fois en augmentant le nombre de capillaires. À l'inverse, un séquenceur de nouvelle génération lit des fragments plus courts de l'ordre de 150 pb. Mais la parallélisation peut aller jusqu'à 20 milliards de fois en un seul run sur un Illumina Novaseq.

Deux stratégies de séquençages sont utilisées en écologie microbienne :

La stratégie shotgun consiste à séquencer l'ensemble des ADN présents dans l'échantillon sans discernement, qu'ils soient humains ou bactériens. Les séquences sont filtrées puis les génomes bactériens sont reconstruits par des méthodes bio-informatiques complexes.

La stratégie Amplicon est moins coûteuse sur le plan de l'analyse. Elle consiste à séquencer un gène spécifiquement bactérien et suffisamment variable pour discriminer une espèce. Il s'agit du gène de l'ARNr 16S.

viii. Cette brosse télescopique est glissée au travers d'un fibroscope et dirigée sous contrôle de la vue dans une petite bronche. Le cathéter interne est alors poussé, expulsant le bouchon et permettant d'avancer la brosse de quelques centimètres, pour réaliser le prélèvement bactériologique.

L'ARNr 16S est un ARN non codant participant à la structure de la petite sous unité des ribosomes bactériens. Il est composé de 1542 nucléotides et forme plusieurs boucles dans sa structure secondaire (Figure 7). L'alignement des séquences d'ADNr 16S entre plusieurs espèces met en évidence des régions constantes et 9 régions variables (Figure 8). Les régions constantes permettent de concevoir des amorces s'hybridant sur tous les ADNs bactériens. Les régions variables apportent la spécificité taxonomique permettant d'identifier l'espèce bactérienne.

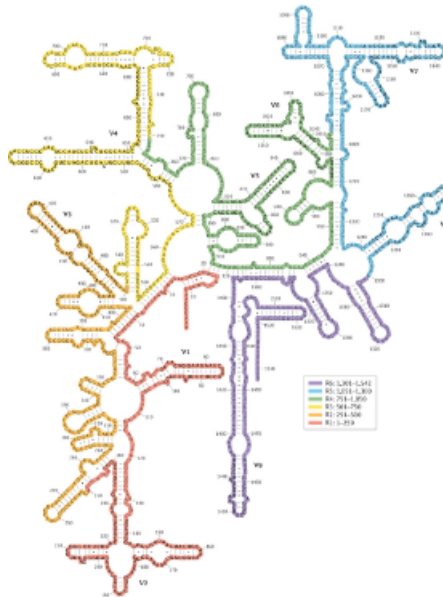


FIGURE 7 – Structure secondaire de l'ADNr 16S.

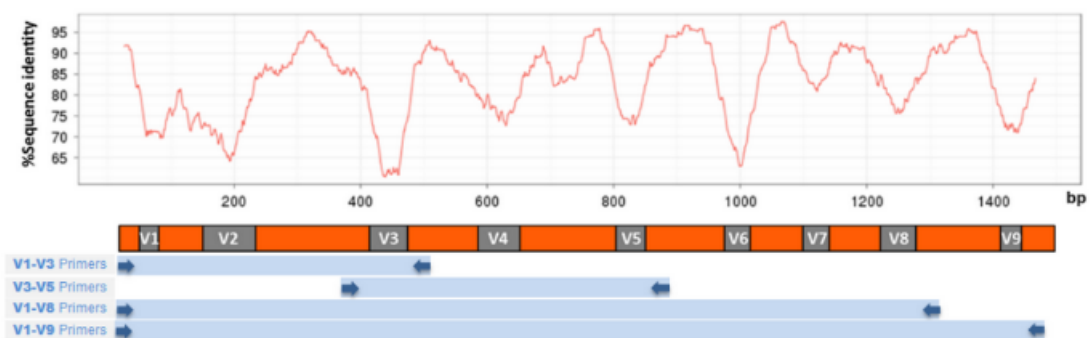


FIGURE 8 – Régions constantes et variables de l'ADNr 16S.

En séquençant l'ensemble des génomes bactériens, la stratégie *shotgun* est plus informative, car elle permet de prédire la fonction d'un microbiote. En effet, les transferts génétiques horizontaux amènent à dissocier l'espèce de sa fonction. Deux bactéries d'une

même espèce peuvent avoir des fonctions différentes. L'inférence fonctionnelle à partir de la deuxième stratégie est possible, mais déconseillée. La stratégie 16S reste toutefois une méthode simple pour décrire les populations bactériennes présentes. C'est cette stratégie qui a été utilisée dans notre étude.

Objectif de l'étude Mucobiome

L'objectif principal de l'étude MUCOBIOME est de déterminer si dans la mucoviscidose, le microbiote respiratoire influence la colonisation à *P. aeruginosa*. Pour cela, nous avons suivi pendant trois ans, une cohorte de 96 patients atteints de mucoviscidose exempts de *P. aeruginosa* depuis au moins 1 an. L'exploration de leur microbiote par la stratégie 16S a été réalisée à partir d'expectorations bronchiques obtenues dans le cadre de leur suivi longitudinal. À partir des données générées par le séquençage, nous avons effectué l'étude descriptive et analytique de leur microbiote en créant un pipeline bio-informatique dédié. L'objectif principal de ce travail de thèse a été la mise au point et l'évaluation de ce pipeline créé à façon pour l'étude MUCOBIOME.

Matériel et Méthodes

Recueil des données

Quatre-vingt-seize patients atteints de mucoviscidose ont été suivis sur 3 ans (2008-2011) dans une étude prospective multicentrique (Nantes, Brest, Roscoff) appelée *Mucobiome*. Le comité de protection des personnes (CPP VI-Ouest) et le comité d'éthique du CHRU de Brest ont approuvé le protocole. Tous les patients (ou les parents pour les mineurs) ont signé un consentement éclairé. Le protocole a fait l'objet d'une déclaration de biocollection à l'ARS et au MESR (n° DC-2008-214).

Les expectorations des patients ont été recueillies lors des séances de kinésithérapie respiratoire, tous les 3 mois selon le calendrier des recommandations officielles. En pratique, sur l'ensemble de la cohorte suivie, l'intervalle médian entre 2 consultations a été de 3,4 mois. Les patients devaient avoir un génotypage *CFTR* et un test à la sueur positif. Les transplantés pulmonaires ont été exclus de l'étude. Pour être inclus, le patient devait être exempt de *P. aeruginosa* depuis au moins un an d'après les résultats de la culture bactérienne des expectorations. Le patient devait être en capacité d'expectorer spontanément (exclusion des prélèvements pharyngés). La première culture bactérienne positive à *P. aeruginosa* était le « endpoint » de l'étude. À cette étape, le patient était sorti de l'étude pour être réinclus un an plus tard en cas de maintien de la négativité des cultures bactériennes obtenue par l'antibiothérapie d'éradication anti-*P. aeruginosa*. D'autres données clinico-biologiques (Age, Sexe, IMC, type de mutation, Présence ou absence de *P. aeruginosa* en culture et en qPCR, score cytologique de Bartlett, Catégorie Free ou Never selon Lee¹) ont également été recueillies. Au total, 707 expectorations ont été recueillies à l'issue de l'étude MUCOBIOME. Pour ce travail portant sur l'étude du microbiote broncho-pulmonaire, 188 ont été sélectionnées dont 22 expectorations positives à *P. aeruginosa*. L'âge médian était de 20 ans (18 ans à 38 ans). 74 échantillons étaient catégorisés Free et 114 Never.

La procédure d'extraction des ADN des échantillons est détaillée dans la publication de F. Le Gall³⁷. Brièvement les échantillons ont été liquéfiés avec du Dithiotréitol (DTT). Les protéines ont été dégradées avec de la protéinase K. Les parois bactériennes ont été fragmentées par sonication (DTT par sonication, Elamsonic S10, Singen, Germany). Après 10 min de centrifugation, l'ADN a été extrait à partir du culot à l'aide du kit QUIAamp DNA Minikit (Quagen). Les extraits d'ADN ont été envoyés pour séquençage chez le prestataire GATC.

Séquençage

La librairie a été générée en amplifiant la région V3-V5 à l'aide du couple d'amorces forward CCTACGGGAGGCAGCAG et reverse CCGTCAATTCMTTTRAGT et du

kit MiSeq Reagent Kits v3.

Le séquençage a été réalisé sur Illumina MiSeq pour produire un couple de séquences chevauchantes de 300 pb (Figure 9). Après fusion du couple, le séquençage permet de lire 535 pb correspondant à la région V3-V5.

Environ 25 millions de reads sont produits par run MiSeq. En multiplexant à l'aide de 94 indexes, les 188 échantillons ont été séquencés sur 2 runs pour produire 188 x 2 fichiers fastq.

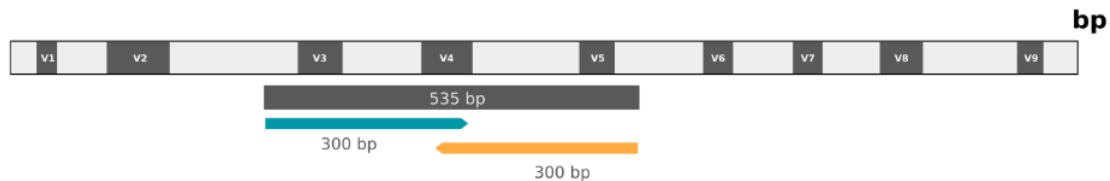


FIGURE 9 – Alignement d'un couple de reads sur l'ADNr 16S.

Le couple de séquence de 300 pb permet de recouvrir l'ensemble de la région V3-V5 de l'ARN 16S

Analyse bio-informatique

L'analyse des 188 paires de fichiers fastq a été réalisée grâce à un pipeline bio-informatique, appelé *mucobiome*, conçu et testé dans le cadre de cette étude. Cet outil modélise l'ensemble du pipeline sous forme d'un graphe direct acyclique (DAG) et le résout afin d'optimiser la parallélisation.

Le pipeline *mucobiome* prend en entrée, les 188 couples de fichiers FASTQ provenant du séquençage et produit un fichier BIOM contenant la table des OTUs. Les figures 10 et 11 illustrent toutes les étapes du pipeline qui sont décrites ci-dessous.

Étapes du pipeline

Merging : Fusions des reads

2 fastq en entrée 1 fastq en sortie.

La première étape du pipeline consiste à fusionner le couple de fichiers fastq afin de produire un seul fichier contenant des plus longues séquences de 535 pb correspondant à la région V3-V5 de l'ADNr 16S. Le programme **Flash**³⁸ a été utilisé avec les paramètres par défaut. À partir de deux fichiers fastq, ce dernier recherche le meilleur alignement entre deux reads et produit un fichier fastq contenant les reads fusionnés. Une analyse qualitative des reads a été réalisée avec **FastQ**³⁹ avant et après fusion.

Cleaning : Filtrage des qualités

1 fastq en entrée 1 fastq en sortie.

Les données de séquençage haut débit peuvent contenir beaucoup d'erreurs. Il est

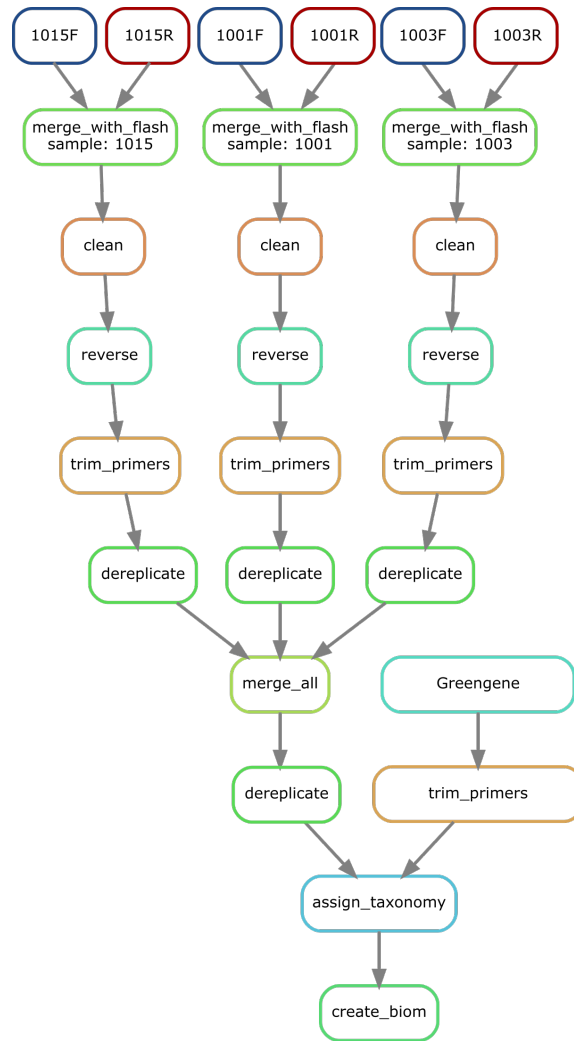
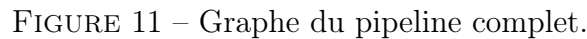


FIGURE 10 – Graphe du pipeline simplifié sur 3 échantillons

. Seul les échantillons 1015, 1001 et 1003 sont représentés.

Merging : Les reads pairs de 300 pb sont fusionnés pour produire un fichier fastq contenant des reads de 535 pb. **Cleaning** : Les reads de mauvaise qualité sont supprimés. **Reversing** : Les reads sont transformés en leurs séquences complémentaires pour pouvoir être alignés. **Trimming** : Seule la séquence entre les primers V3-V5 est conservée. **Dereplicating** : Les séquences dupliquées sont retirées. **Merging** : L'ensemble des séquences est regroupé dans un seul fichier. **Taxonomy assignment** : Les séquences sont alignées sur la base de données *Greengene*. **create_biom** : la table des OTUs est créée

important de supprimer les reads de mauvaise qualité pour gagner en spécificité. Le filtrage des reads de mauvaise qualité est réalisé avec le programme **sickle**⁴⁰. Son algorithme repose sur l'utilisation d'une fenêtre glissante de taille définie (par défaut : 20 pb). Cette fenêtre glisse le long de la séquence et pour chaque position calcule la moyenne des scores de qualité dans cette fenêtre. Si successivement le score moyen passe sous un certain seuil, le read est supprimé. Les paramètres utilisés sont ceux par défaut :



un score de 20 avec une fenêtre glissante de 20 pb. Une analyse qualitative des reads a été réalisée avec **FastQt**³⁹ après le filtrage.

1 fastq en entrée 1 fasta en sortie.

Trimming : Suppression des primers

1 fasta en entrée 1 fasta en sortie.

Pour permettre un alignement parfait entre les reads et la base de données, les primers sont retirés et seule la séquence V3-V5 est conservée. Cette étape est réalisée aussi bien pour les données du séquençage que la base de données *Greengene*. Le programme

cutadapt⁴³ est utilisé avec une tolérance de 0,1 par défaut.

Dereplicating : Suppression des doublons

1 fasta en entrée 1 fasta en sortie.

Cette étape consiste à supprimer toutes les séquences doublons. En procédant ainsi, on s'assure de ne pas répéter l'assignation taxonomique plusieurs fois sur des reads identiques. Le nombre de reads dupliqués est conservé pour être pris en considération lors du calcul des abondances. Il s'agit d'une étape d'optimisation permettant d'économiser en temps de calcul. La déréplication a été réalisée avec **vsearch**⁴⁴ et sa fonction `-derep_fulllength`

>sample1	
ACGTTTTT	
>sample1	>sample1;size=3
ACGTTTTT	ACGTTTTT
>sample1	>sample1;size=1
GTAGAGT	GTAGAGT
>sample1	
ACGTTTTT	
<i>avant dereplication</i>	<i>après dereplication</i>

FIGURE 12 – Exemple de déréplication d'un fichier FASTA

Assignation taxonomique

2 fasta en entrée, 1 fichier biom en sortie.

L'assignation taxonomique consiste à associer chaque read à son taxon. Nous avons utilisé la stratégie *close référence* dont le rôle est de comparer chaque read à une base de données avec un seuil de 97 % de similarité. Cet algorithme est de complexité N , c'est-à-dire que le temps de calcul est directement proportionnel au nombre de reads testé. La base de données *Greengene*⁴¹ version mai 2013 a été utilisée. C'est un fichier fasta contenant 1 262 986 séquences et 203 452 OTUs.

La stratégie d'assignation *de novo* n'a pas été utilisée. Cette dernière, de complexité N^2 , consiste à comparer les reads entre eux pour former des groupes, sans utilisation d'une base de donnée. L'assignation taxonomique a été réalisé avec **vsearch** et sa fonction `-usearch_global`.

Analyse de la table des OTUs

L'analyse de la table des OTUs a été réalisée avec R et le package **phyloseq**⁴⁵. Les OTUs ont été regroupés par genre bactérien. La normalisation de la table des OTUs s'est faite en pondérant le nombre de reads au total. Les abondances absolue et relative, la prévalence, la dominance et la courbe de raréfaction ont été mesurées pour chaque

échantillon. Les diversités alpha de type Chao1 et Shannon ont été mesurées sur tous les échantillons. L'évolution de ces indices a été représentée graphiquement dans le temps et par patient. La diversité bêta a été évaluée grâce une Analyse en Coordonnées Principales utilisant la distance de Bray-Curtis. Le core microbiota⁴⁶ a été calculé. Il est défini comme l'ensemble des taxons retrouvé dans plus de 50 % des échantillons avec une abondance supérieure à 0,1 %. La corrélation entre les genres a été recherchée. Les catégories Free et Never ont été comparées d'après leurs diversités alpha et bêta.

Résultats

Séquençage et pipeline

Données de séquençage

Après démultiplexage, 188 x 2 fichiers Fastq ont été générés soit deux fichiers par échantillon. La longueur des reads dans l'ensemble est de 301 paires de bases. Au total, 115 002 297 reads ont été produits sur deux runs MiSeq (Figure 13). Avec en moyenne 616 900 reads par échantillon. Un minimum de 61 422 reads pour l'échantillon 2154 et un maximum de 1 071 188 pour l'échantillon 3165.

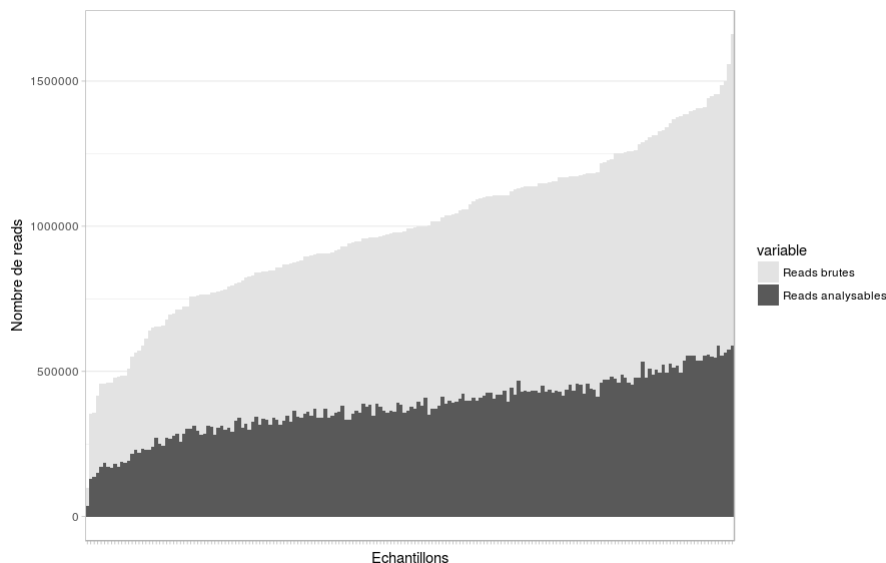


FIGURE 13 – Nombre de reads par échantillon.

En clair le nombre de reads bruts produits par le séquenceur. En sombre ,les reads analysables.

Qualité des reads

La figure 14 montre la qualité typique d'un fichier fastq produit par le séquenceur. Une baisse de qualité importante est observée à hauteur du 250e nucléotide. Tous les fichiers fastq présentaient le même profil. À cause de cette baisse de qualité, seulement

60.9 % des reads ont pu être fusionnés. L'étape de filtrage a permis de ramener la qualité médiane au-dessus de 20 (Figure ??) mais en perdant beaucoup de reads. Au total, seulement 37.7 % des reads ont été conservés pour l'analyse (Figure 13) avec des bornes allant de 26,50 % à 49,93 %.

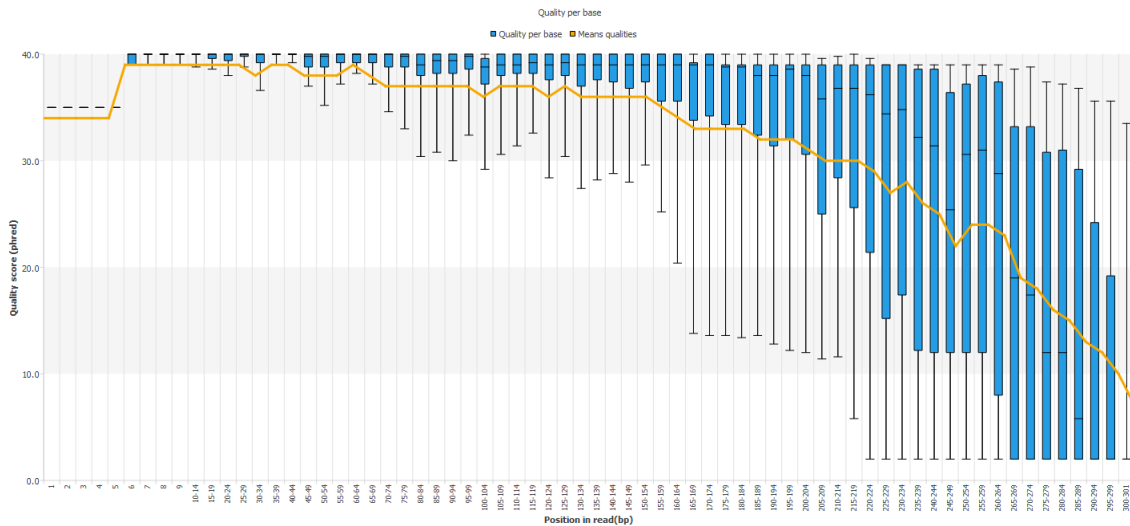


FIGURE 14 – Qualité des reads forward de l'échantillon 1003.

Axe X : la position du nucléotide. **Axe Y** : la distribution des scores de qualités Phred qui chute.

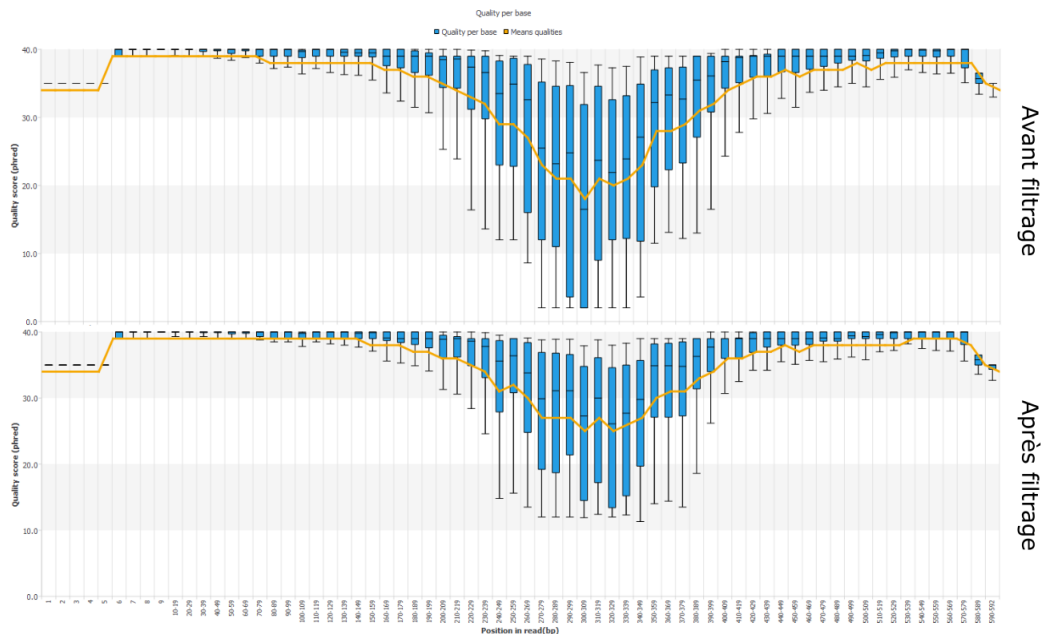


FIGURE 15 – Qualité des reads fusionnés pour l'échantillon 1003.

Après fusions des reads forward et reverse, le read produit est plus long.

Assignation taxonomique

99.88 % (4615960) des reads analysables ont reçu une assignation taxonomique soit 10517 OTUs détectés^{ix} correspondant à 54 genres bactériens (Figure 16).

Profondeur de séquençage

La figure 17 montre les courbes de raréfaction pour les 188 échantillons. Dans l'ensemble elles s'aplatissent précocement, témoignant d'un bon niveau d'échantillonnage. Les quelques échantillons n'ayant pas atteint l'asymptote horizontale ont tout de même été conservés.

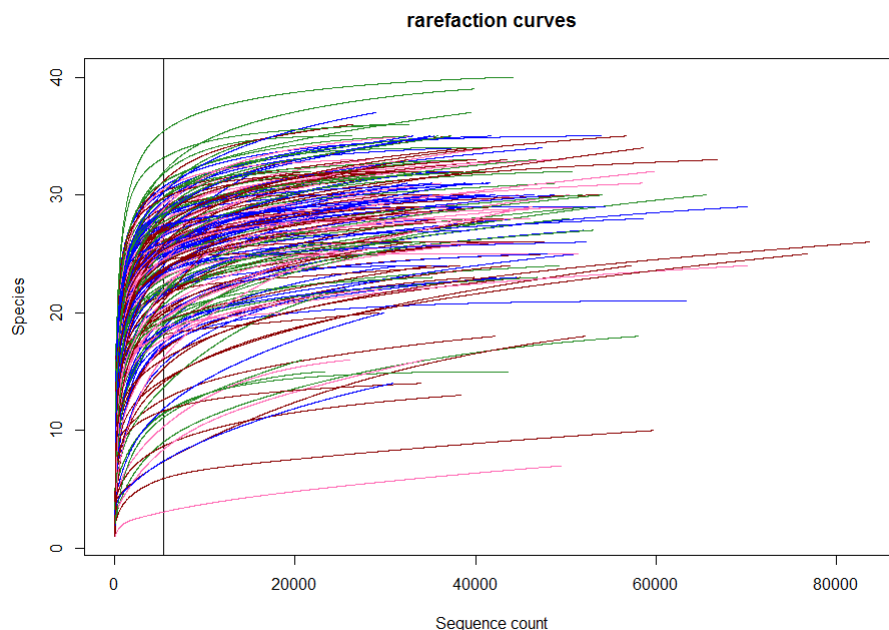


FIGURE 17 – Courbe de raréfaction pour les 188 échantillons.

Résultats descriptifs

Composition du microbiote

Cinquante-quatre genres (Figure 16) et sept phyla (Figure 18) bactériens sont retrouvés dans l'ensemble des échantillons analysés. Les deux phyla majoritaires sont *Firmicutes* (42.59 %) et *Proteobacteria* (31.48 %). Parmi les *Firmicutes* majoritaires, on trouve *Streptococcus* et *Staphylococcus*. Au sein des *Proteobacteria*, *Neisseria* et *Haemophilus* sont les genres les plus abondants. Le tableau 3 résume l'ensemble des résultats en y associant la prévalence des genres bactériens parmi les 188 échantillons. Par exemple *Streptococcus*, *Neisseria*, *Prevotella*, *Granulicatella*, *Gemella*, *Veillonella* et *Fusobacterium* sont très prévalents, car présents dans plus de 185 échantillons. D'autres

ix. Pour chaque espèce, il y a plusieurs OTUs définis dans *Greengene*

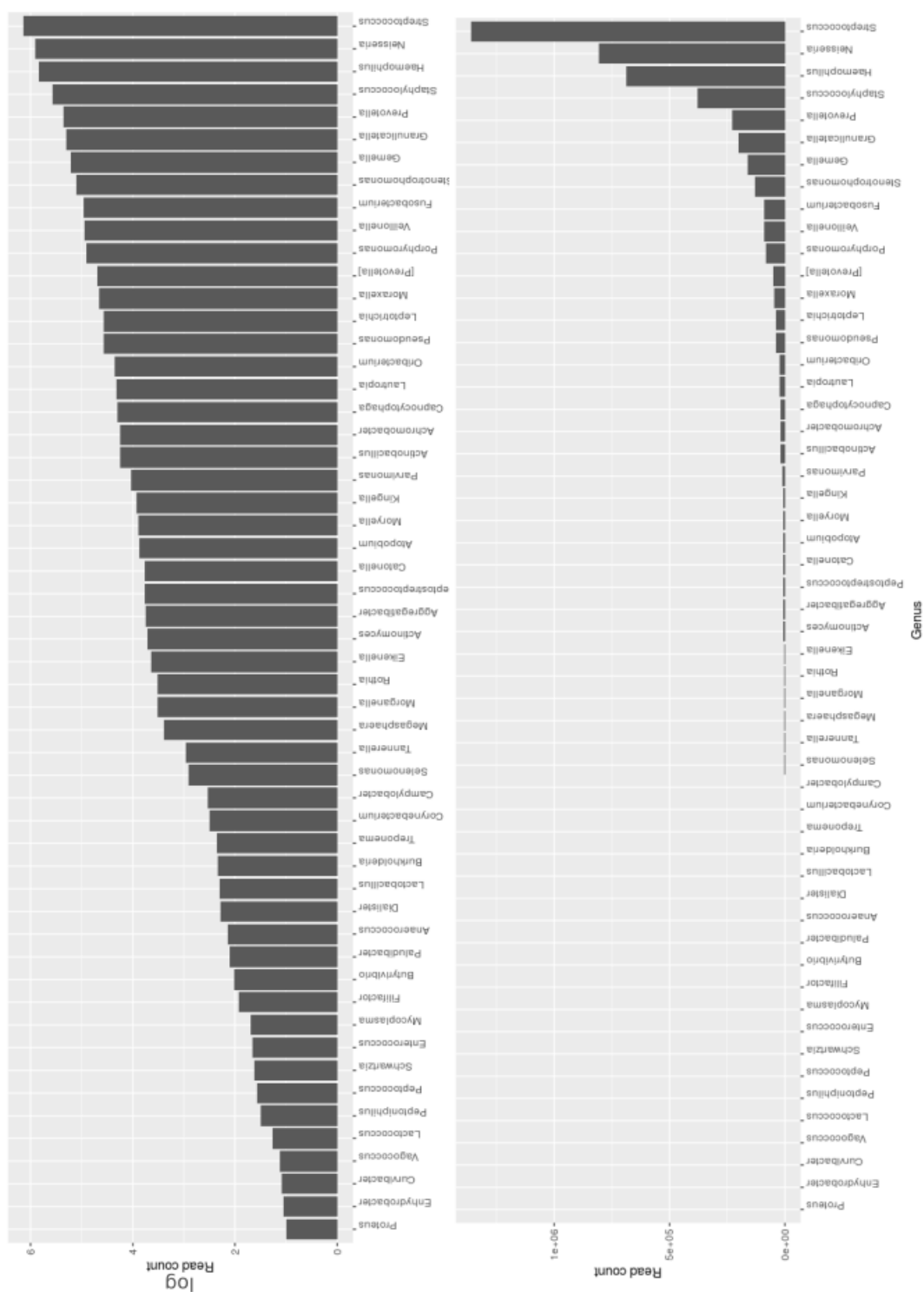


FIGURE 16 – Nombre de reads par genre bactérien.
La représentation avec une échelle logarithme sert à visualiser les genres peu
abondants.

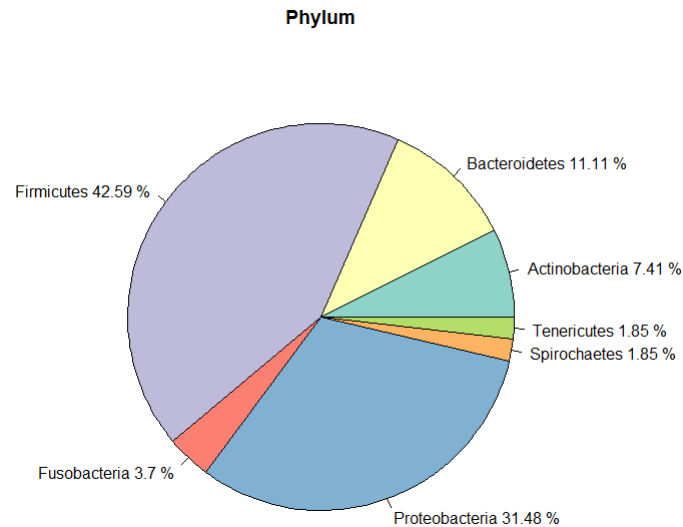


FIGURE 18 – Phyla retrouvés dans les 188 échantillons.

genres sont dominants. Il s'agit de *Streptococcus*, *Neisseria*, *Haemophilus* et *Staphylococcus*. *Stenotrophomonas* et *Achromobacter* sont retrouvées dans 64 et 8 échantillons respectivement. *Pseudomonas* est retrouvé dans 53 échantillons, dont un, au moins avec une abondance de 25.94 %. *Burkholderia* est retrouvé seulement dans deux échantillons à moins de 1 %.

Le core microbiota est constitué de 14 genres bactériens (Figure 19). Sa distribution est illustrée dans la figure 20. *Streptococcus* respecte grossièrement une distribution normale variant de la quasi-absence à la dominance avec une moyenne de 30 % par échantillon. *Neisseria* est le deuxième genre le plus abondant avec une moyenne de 18 %. Les abondances de *Staphylococcus* et *Haemophilus* sont faibles dans la plupart des échantillons. Mais pour quelques échantillons, ces genres sont dominants. Les autres genres ont une abondance faible qui varie faiblement. Ils ne sont jamais retrouvés comme dominants.

Tableau 3 – Détail de l'assignation taxonomique des reads.

Légendes : Nombre de reads - Moyenne des abondances relatives - écart-type des abondances relatives - plus petite abondance relative - plus grande abondance relative - Nombre d'échantillons où le genre est présent - Nombre d'échantillon où le genre est dominant

	Reads count (% of all reads)	Mean of Relative abundance %	Standard deviation of Relative abundance %	Minimum relative abundance %	Maximum relative abundance %	Present N (% of all samples)	Most abundant N (% of all samples)
<i>Streptococcus</i>	1358573 (29.83)	31.02	20.38	0.02	90.50	188 (100)	95 (175.93)
<i>Neisseria</i>	807931 (17.74)	17.29	18.04	0.00	93.53	185 (98.4)	40 (74.07)
<i>Haemophilus</i>	686186 (15.07)	13.43	24.26	0.00	99.77	183 (97.3)	29 (53.7)
<i>Staphylococcus</i>	377739 (8.3)	7.62	16.13	0.00	98.27	175 (93.1)	12 (22.22)
<i>Prevotella</i>	227445 (4.99)	5.37	5.86	0.00	29.91	187 (99.5)	0 (0)
<i>Granulicatella</i>	199458 (4.38)	4.45	4.11	0.00	28.42	185 (98.4)	0 (0)
<i>Gemella</i>	161797 (3.55)	3.74	3.67	0.00	17.48	182 (96.8)	0 (0)
<i>Stenotrophomonas</i>	129326 (2.84)	2.96	14.61	0.00	94.17	53 (28.2)	7 (12.96)
<i>Fusobacterium</i>	91380 (2.01)	2.22	2.77	0.00	16.19	182 (96.8)	0 (0)
<i>Veillonella</i>	88875 (1.95)	2.16	2.66	0.00	14.16	187 (99.5)	0 (0)
<i>Porphyromonas</i>	81748 (1.8)	1.84	3.29	0.00	25.90	162 (86.2)	0 (0)
<i>[Prevotella]</i>	50207 (1.1)	1.24	2.09	0.00	17.22	165 (87.8)	0 (0)
<i>Leptotrichia</i>	37561 (0.82)	0.89	1.53	0.00	13.48	170 (90.4)	0 (0)
<i>Pseudomonas</i>	37178 (0.82)	0.85	4.02	0.00	27.45	48 (25.5)	1 (1.85)
<i>Moraxella</i>	45865 (1.01)	0.79	6.37	0.00	76.71	46 (24.5)	2 (3.7)
<i>Achromobacter</i>	17729 (0.39)	0.52	7.08	0.00	97.14	7 (3.7)	1 (1.85)
<i>Oribacterium</i>	22236 (0.49)	0.51	0.76	0.00	5.70	178 (94.7)	0 (0)
<i>Capnocytophaga</i>	20073 (0.44)	0.50	0.96	0.00	7.71	174 (92.6)	0 (0)
<i>Lautropia</i>	20785 (0.46)	0.45	1.22	0.00	11.23	136 (72.3)	0 (0)
<i>Actinobacillus</i>	17430 (0.38)	0.42	2.57	0.00	34.08	93 (49.5)	1 (1.85)
<i>Parvimonas</i>	10957 (0.24)	0.26	0.71	0.00	5.96	147 (78.2)	0 (0)
<i>Kingella</i>	8289 (0.18)	0.19	0.52	0.00	5.08	144 (76.6)	0 (0)
<i>Atopobium</i>	7356 (0.16)	0.18	0.34	0.00	2.43	158 (84)	0 (0)
<i>Moryella</i>	7731 (0.17)	0.17	0.42	0.00	3.84	140 (74.5)	0 (0)
<i>Peptostreptococcus</i>	5793 (0.13)	0.15	0.31	0.00	1.82	120 (63.8)	0 (0)
<i>Catonella</i>	5851 (0.13)	0.14	0.19	0.00	1.20	157 (83.5)	0 (0)
<i>Actinomyces</i>	5196 (0.11)	0.13	0.23	0.00	1.93	161 (85.6)	0 (0)
<i>Aggregatibacter</i>	5657 (0.12)	0.13	0.39	0.00	3.12	83 (44.1)	0 (0)
<i>Eikenella</i>	4327 (0.1)	0.10	0.33	0.00	2.40	138 (73.4)	0 (0)
<i>Rothia</i>	3333 (0.07)	0.07	0.16	0.00	1.26	117 (62.2)	0 (0)
<i>Morganella</i>	3317 (0.07)	0.06	0.78	0.00	10.67	5 (2.7)	0 (0)
<i>Megasphaera</i>	2425 (0.05)	0.06	0.19	0.00	2.00	87 (46.3)	0 (0)
<i>Selenomonas</i>	800 (0.02)	0.02	0.07	0.00	0.58	108 (57.4)	0 (0)
<i>Tannerella</i>	895 (0.02)	0.02	0.04	0.00	0.38	116 (61.7)	0 (0)
<i>Treponema</i>	229 (0.01)	0.01	0.03	0.00	0.27	34 (18.1)	0 (0)
<i>Burkholderia</i>	217 (<0.01)	0.01	0.09	0.00	1.17	2 (1.1)	0 (0)
<i>Corynebacterium</i>	317 (0.01)	0.01	0.02	0.00	0.16	77 (41)	0 (0)
<i>Campylobacter</i>	344 (0.01)	0.01	0.02	0.00	0.14	88 (46.8)	0 (0)
<i>Peptoniphilus</i>	31 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.03	11 (5.9)	0 (0)
<i>Vagococcus</i>	13 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.02	10 (5.3)	0 (0)
<i>Curvibacter</i>	12 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.01	11 (5.9)	0 (0)
<i>Mycoplasma</i>	49 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.02	18 (9.6)	0 (0)
<i>Lactococcus</i>	18 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.02	7 (3.7)	0 (0)
<i>Paludibacter</i>	128 (<0.01)	0.00	0.02	0.00	0.22	18 (9.6)	0 (0)
<i>Anaerococcus</i>	137 (<0.01)	0.00	0.05	0.00	0.64	2 (1.1)	0 (0)
<i>Schwartzia</i>	41 (<0.01)	0.00	0.01	0.00	0.13	5 (2.7)	0 (0)
<i>Fillifactor</i>	85 (<0.01)	0.00	0.02	0.00	0.17	5 (2.7)	0 (0)
<i>Peptococcus</i>	37 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.02	16 (8.5)	0 (0)
<i>Lactobacillus</i>	198 (<0.01)	0.00	0.02	0.00	0.29	26 (13.8)	0 (0)
<i>Enhydrobacter</i>	11 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.01	7 (3.7)	0 (0)
<i>Dialister</i>	195 (<0.01)	0.00	0.02	0.00	0.13	39 (20.7)	0 (0)
<i>Proteus</i>	10 (<0.01)	0.00	0.00	0.00	0.02	7 (3.7)	0 (0)
<i>Enterococcus</i>	45 (<0.01)	0.00	0.01	0.00	0.11	22 (11.7)	0 (0)
<i>Butyrivibrio</i>	103 (<0.01)	0.00	0.02	0.00	0.21	10 (5.3)	0 (0)

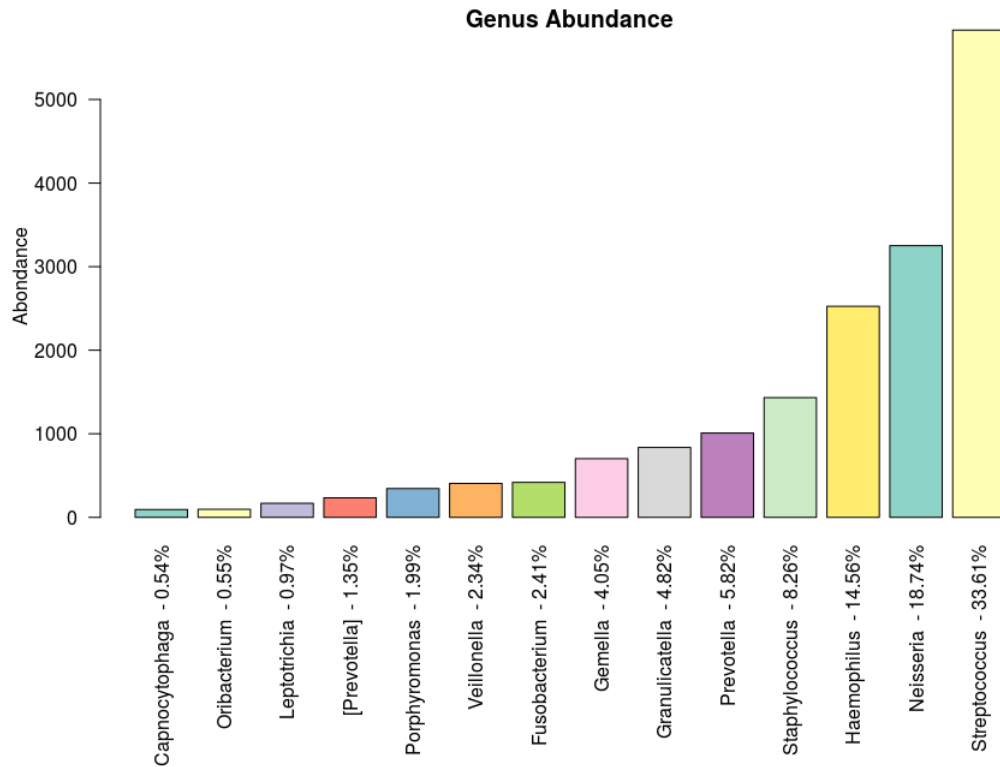


FIGURE 19 – Distribution du core microbiota sur les 188 échantillons

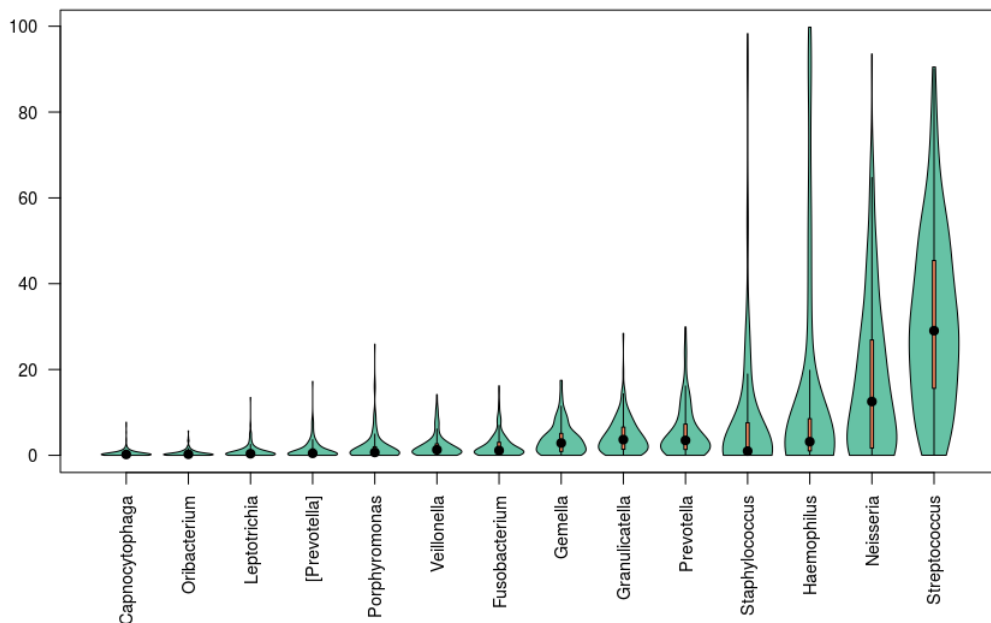


FIGURE 20 – Variation du core microbiota sur les 188 échantillons.
 En ordonnée les abondances relatives de chaque genre. L'épaisseur des violons exprime la proportion d'échantillon.

Évolution de l'alpha diversité

Les figures 21,22 et 23 en annexe, montrent l'évolution des diversités alpha par patient au cours du temps en utilisant les indices Chao1, Observed et Shannon.

La richesse (Observed , Chao1) par patient varie de 10 à 40 genres bactériens. La richesse du patient 256 est faible. Celle du patient 26 élevée. Certains patients ont des richesses stables au court du temps. Les patients 25, 26 et 74 conservent leurs richesses sur plus de 5 prélèvements successifs. Les patients 20 et 69 présentent une stabilité globale entrecoupée par des pertes de biodiversité. La richesse du patient 8 diminue progressivement. Les patients 23, 232 et 248 ont des fluctuations plus chaotiques. L'indice de Shannon montre que pour un richesse constante dans le temps, l'équitabilité est différente. Par exemple, la richesse du patient 223 est stable sur la figure, 21 mais son indice de shannon varie sur la figure 23 témoignant d'une distribution différente de ses bactéries. Seul le patient 26 semble conserver à la fois une richesse et une équitabilité stables au court du temps.

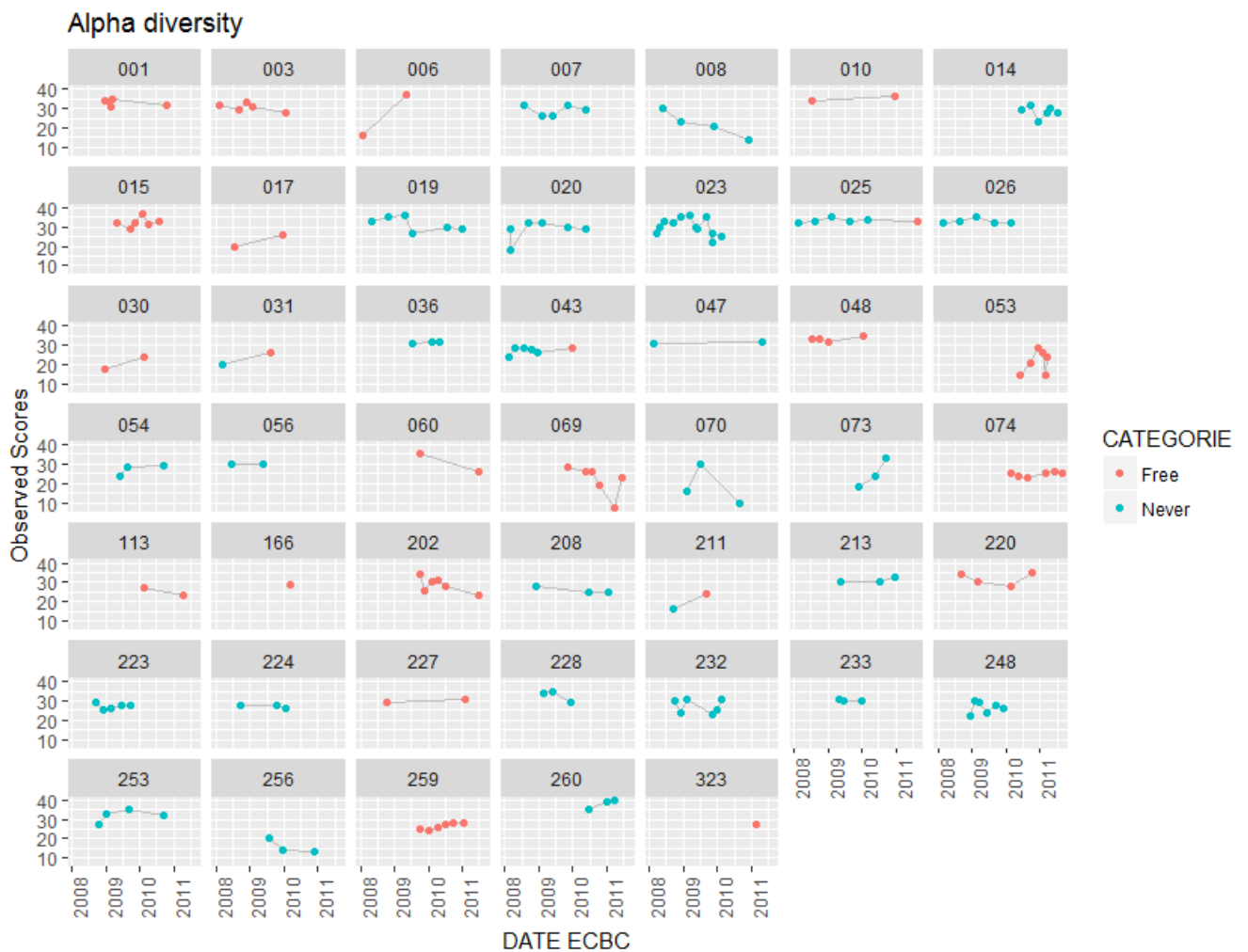


FIGURE 21 – Évolution du nombre d'espèces par patient en fonction du temps

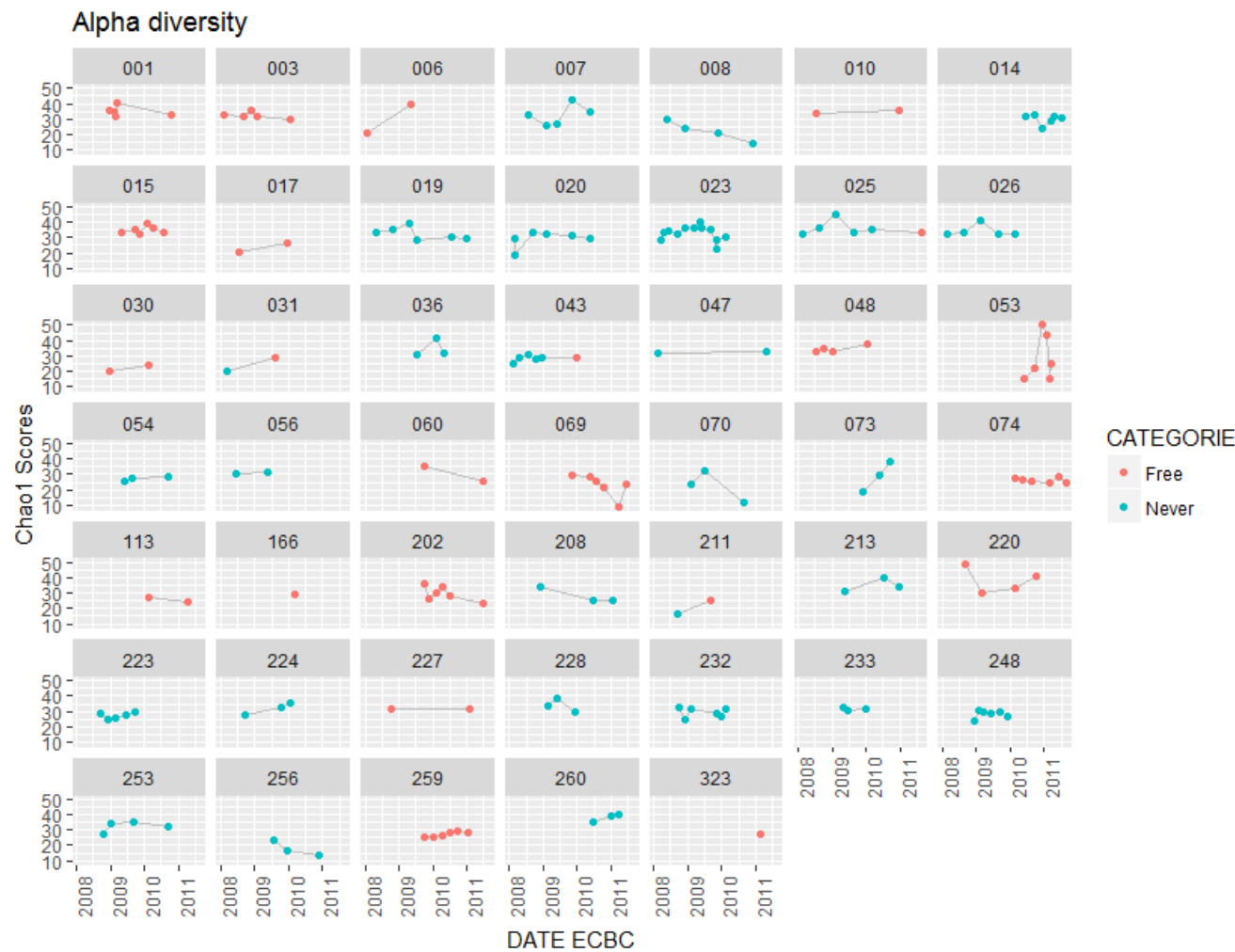


FIGURE 22 – Évolution de l'indice de Chao1 par patient en fonction du temps

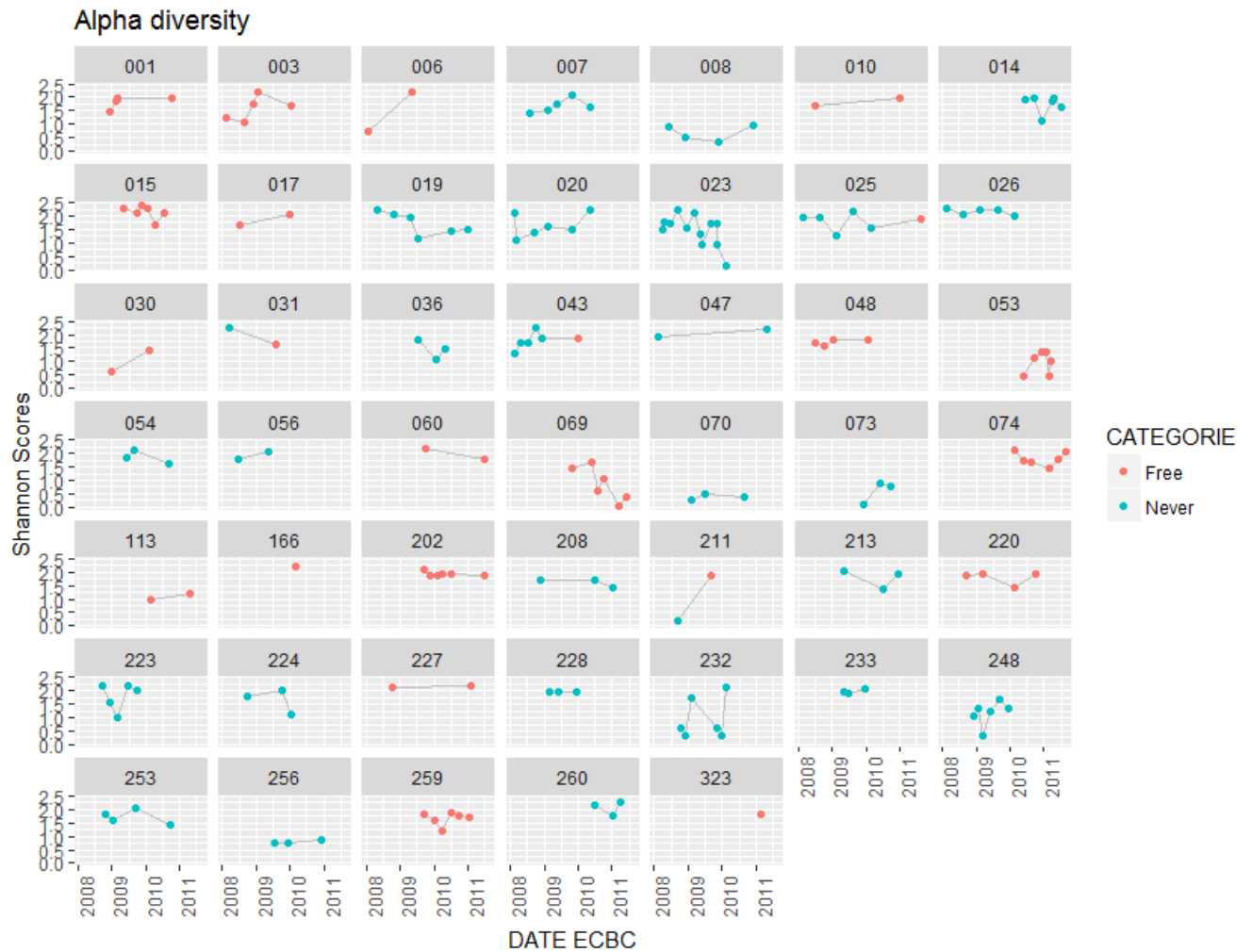


FIGURE 23 – Évolution de l'indice de Shanon par patient en fonction du temps

Évolution des abondances

Les figures 24 et 25 montrent l'évolution des abondances au cours du temps pour chaque patient. Ces graphiques nous permettent d'interpréter plus finement les graphiques d'alpha diversité précédents. Par exemple, la diminution de richesse du patient 8 est liée à la présence de *Stenotrophomonas* sur les 4 échantillons. La perte de diversité du 3e prélèvement du patient 223 est causée par l'apparition de *Neisseria* qui devient dominant. Le patient 3 montre une diminution progressive d'*Haemophilus* parallèlement à une augmentation de *Streptococcus*.

Le patient 256 présente une dominance à *Stenotrophomonas* sur l'ensemble de ses échantillons. *Achromobacter* est dominant dans le premier échantillon du patient 211. D'autres montrent un phénomène de résilience. Par exemple, le patient 223 récupère un microbiote identique après une colonisation quasi omnisciente à *Haemophilus*.

Dans l'ensemble, il existe deux types de populations bactériennes : une population de bactéries constantes et minoritaires (*Fusobacterium*, *Granulicatella*, *Gemella*, *Veillo-*

nella, *Parvimonas*, *Leptotrichia*, *Oribacterium*, *Capnoctyophaga*, *Catonella*); une autre population de bactéries très fluctuantes dans le temps jouant alternativement le rôle de genre dominant ou au contraire de genre absent (*Haemophilus*, *Streptococcus*, *Neisseria* et *Prevotella*). La figure 26 zoome sur le patient 43 pour montrer ces deux populations. La figure du patient 27 est mise également à titre exemple, car elle montre l'apparition de *P. aeruginosa*.

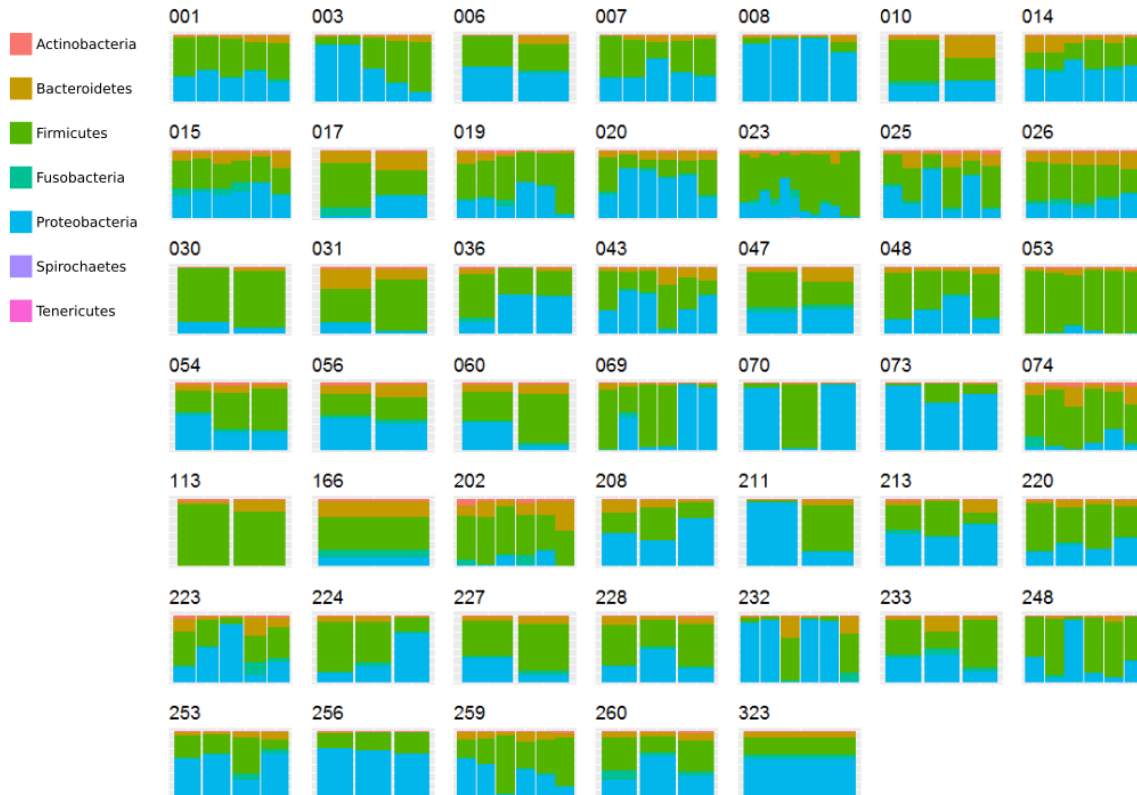


FIGURE 24 – Évolution des abondances par phylum.
Les échantillons sont ordonnés par patient dans le temps

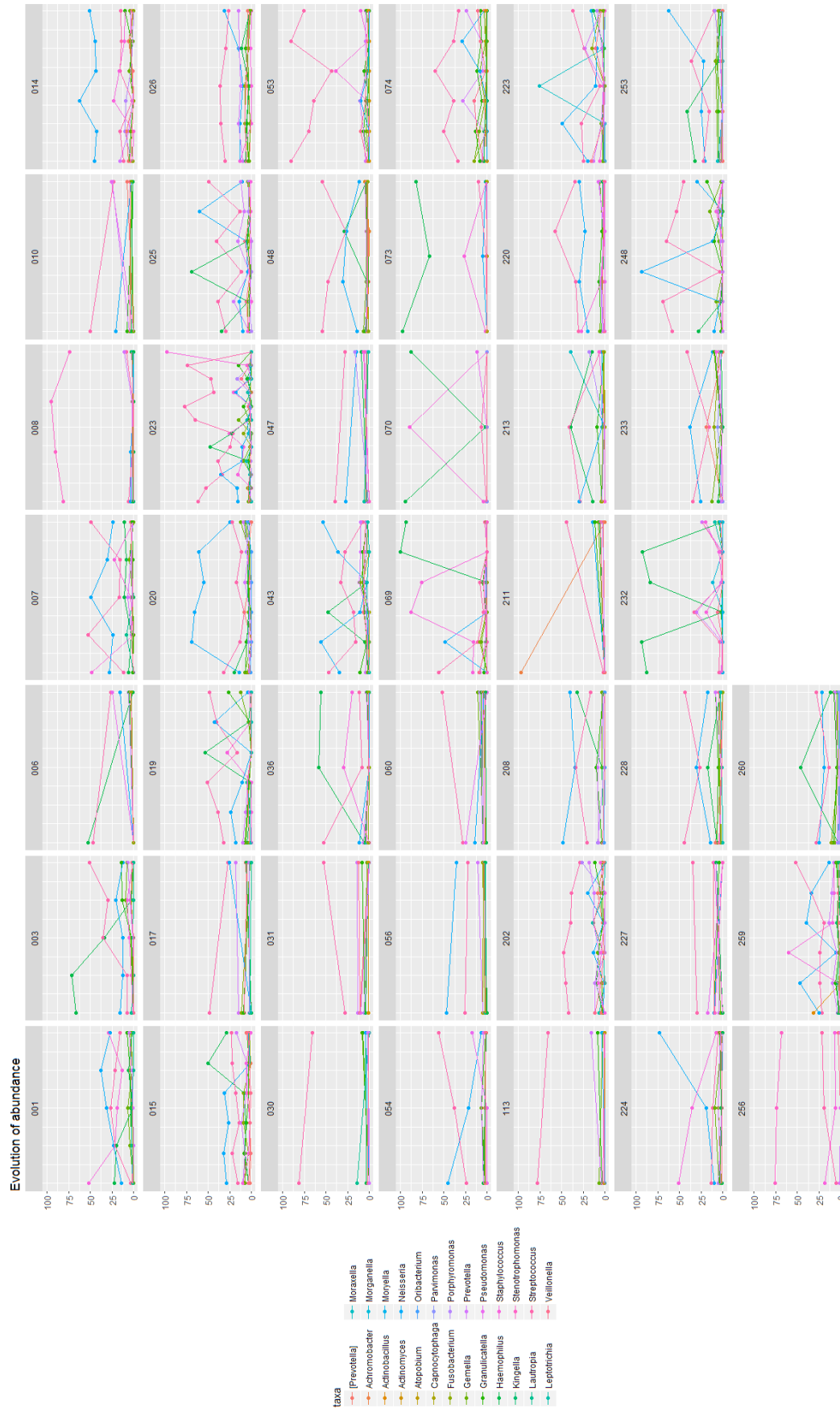


FIGURE 25 – Évolution des abondances par genre.

Les échantillons sont ordonnés par patient dans le temps.

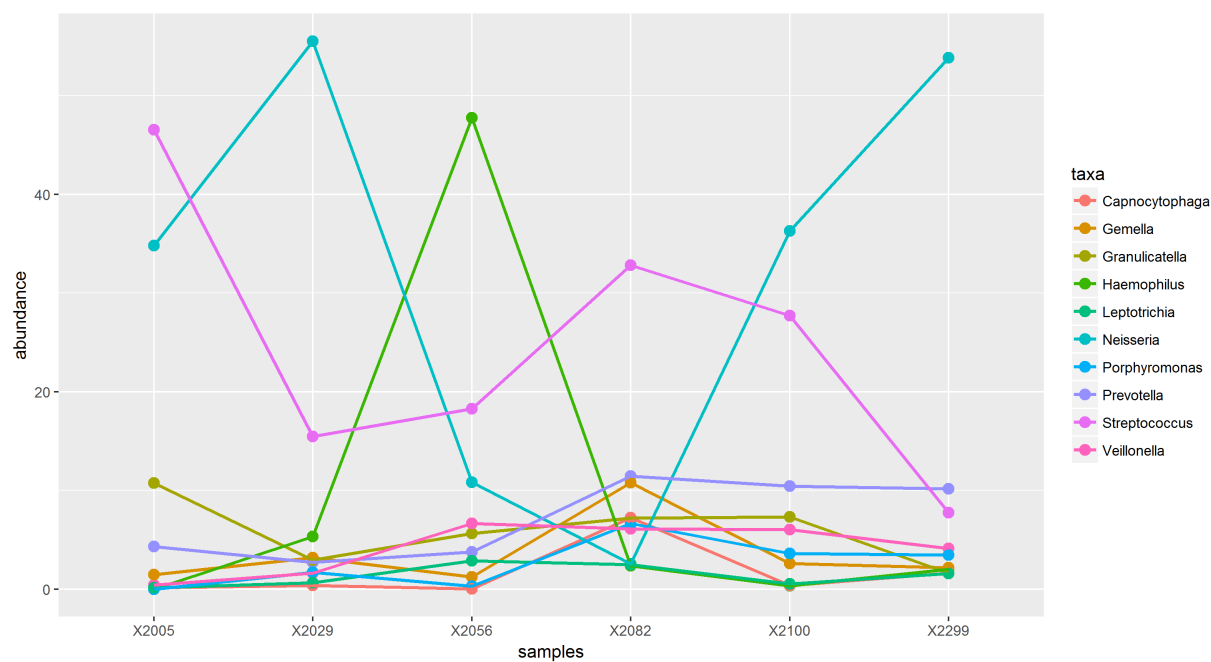


FIGURE 26 – Évolution des abondances pour le patient 43.
Notez la population stable et la population fluctuante.

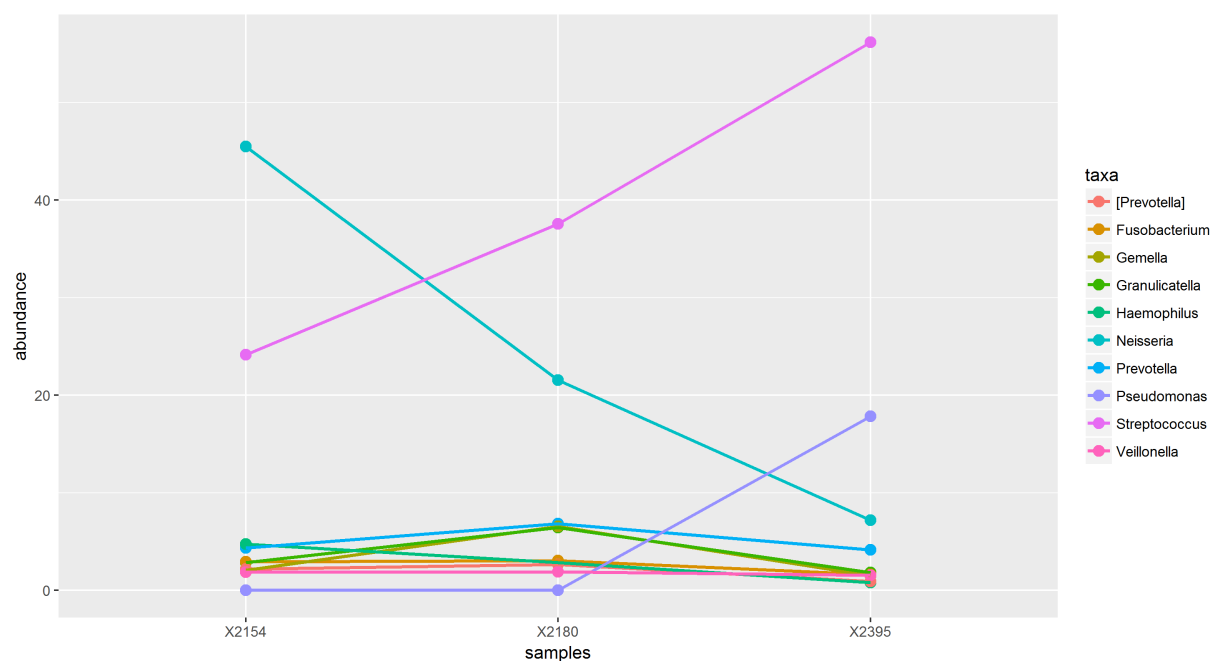


FIGURE 27 – Évolution des abondances pour le patient 54.
Notez l'apparition de *Pseudomonas* dans le dernier échantillon.

Bêta diversité

La bêta diversité sur l'ensemble des échantillons a été réalisée par une méthode d'ordination de type PCoA en utilisant les distances de Bray-Curtis (Figures 28,31). Les deux axes principaux expliquent respectivement 28.5 % et 17.4 % de la variabilité. Certains échantillons d'un même patient sont très proches sur le graphique d'ordination. Par exemple, le patient 23 et 253 sur la figure 28. Aucune des analyses tenant compte des paramètres biocliniques colligés pendant l'étude MUCOBIOME comme l'âge, le sexe, le poids, la prise d'antibiotique et le type de mutation du gène *CFTR* n'a mis en évidence des groupes distincts de microbiote. Le score cytologique n'a pas non plus montré de différence. La variabilité est expliquée principalement par la dominance des genres *Neisseria*, *Streptococcus* et *Haemophilus* comme le montre la figure 28.

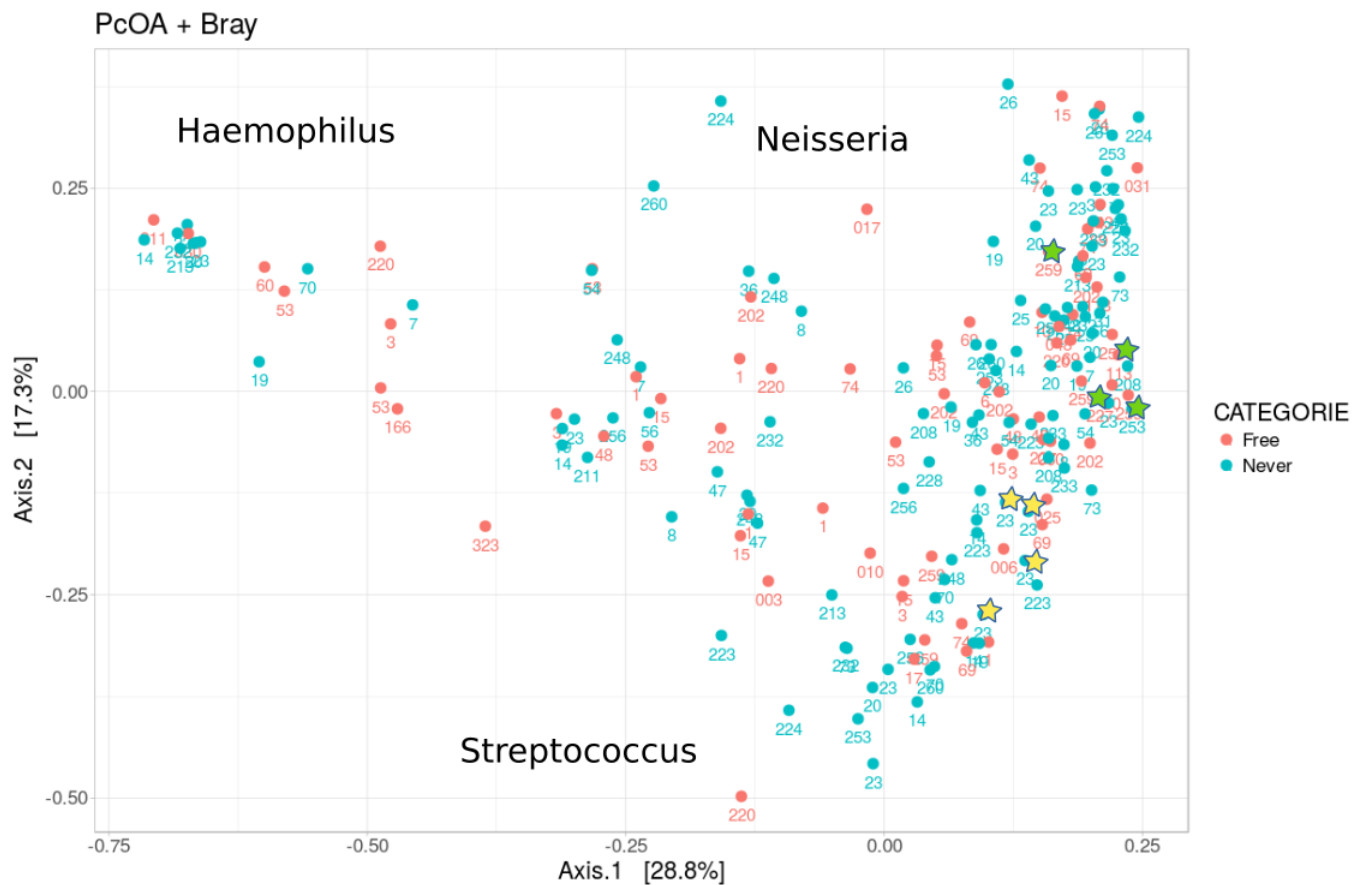


FIGURE 28 – Analyse PCoA + Bray-Curtis des 188 échantillons.

Chaque point est un échantillon labellisé par l'identifiant du patient. La couleur représente la catégorie Free ou Never. Les échantillons du patient 23 et 253 sont représentés par des étoiles. La variabilité s'explique principalement par *Haemophilus*, *Streptococcus* et *Neisseria*

Présence de *Pseudomonas aeruginosa*

Sur les 188 échantillons, 22 étaient positifs à *P. aeruginosa* en culture. L'ADNr 16S de *Pseudomonas* est détecté dans 48 échantillons. Dans la majorité des cas, l'abondance relative de *P. aeruginosa* est faible. Sur les 48 échantillons, 39 ont une abondance relative en dessous de 3 %. L'abondance la plus forte est de 27,4 % et correspond au « end point » positif en culture du patient 10. Les tableaux 4 et 5 comparent le nombre d'échantillons arborant des reads ADNr 16S de *Pseudomonas* avec ceux détectés par qPCR (données de l'étude de Héry-Arnaud et al., 2017²²) et par culture. En considérant arbitrairement la méthode 16S comme un gold standard, ces deux tableaux nous permettent de mesurer la sensibilité et la spécificité de la détection par qPCR ou par culture. Ainsi la qPCR oprL est très sensible et peu spécifique avec un seul vrai négatif pour 31 faux positifs. La culture est en revanche très spécifique avec 9 faux positifs.

Tableau 4 – Concordance entre la présence d'ADNr 16S de *Pseudomonas* et sa détection en qPCR oprL

	qPCR négative	qPCR positive
16S absent	141	31
16S présent	1	15

Tableau 5 – Concordance entre la présence d'ADNr 16S de *Pseudomonas* et sa détection en culture

	Culture négative	Culture positive
16S absent	163	9
16S présent	3	13

Résultats analytiques

Corrélation entre les genres bactériens

La figure 29 montre les corrélations linéaires réalisées entre les genres du core microbiota. La corrélation la plus forte est entre *Prevotella* et *Veillonella* avec un coefficient de Pearson à 0.60. *Streptococcus* et *Haemophilus* évoluent dans le sens inverse avec un coefficient à -0.41.

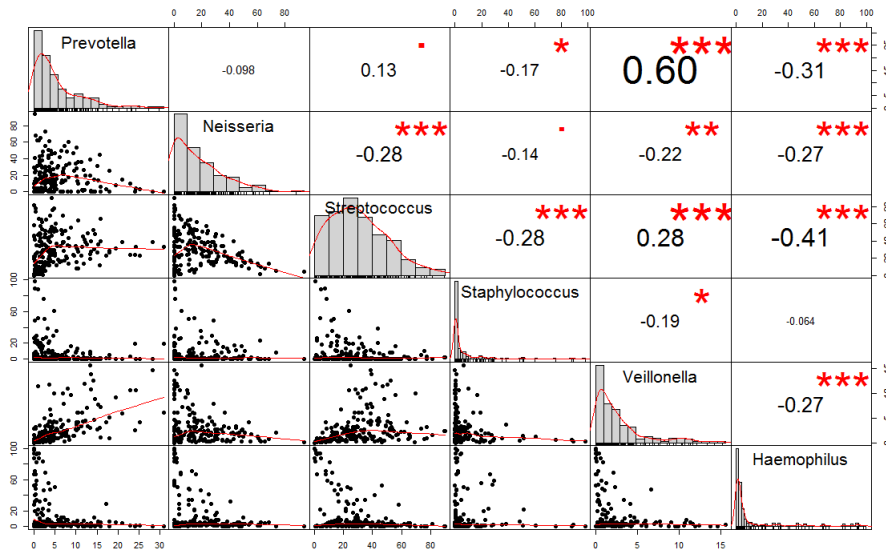


FIGURE 29 – Corrélation des abondances du core microbiota.

En diagonale, la distribution des genres par échantillon. A gauche, les corrélations entre deux genres. A droite, le score de Pearson entre deux genres. *Prevotella* et *Veillonella* sont fortement corrélés.

Comparaison entre les échantillons Free et Never

La figure 30 compare les indices de Shannon entre les échantillons Free et Never. Le T-test / ANOVA n'a pas montré de différence significative (p-value > 0.05).

La figure 31 est une autre PCoA réalisée avec microbiomeanalyst^x pour de discriminer les groupes Free et Never. Les échantillons Never ont plus de différences entre eux que les échantillons Free qui semblent converger. Les deux groupes sont significativement différents avec une PERMANOVA p-value < 0.001.

x. <http://www.microbiomeanalyst.ca>

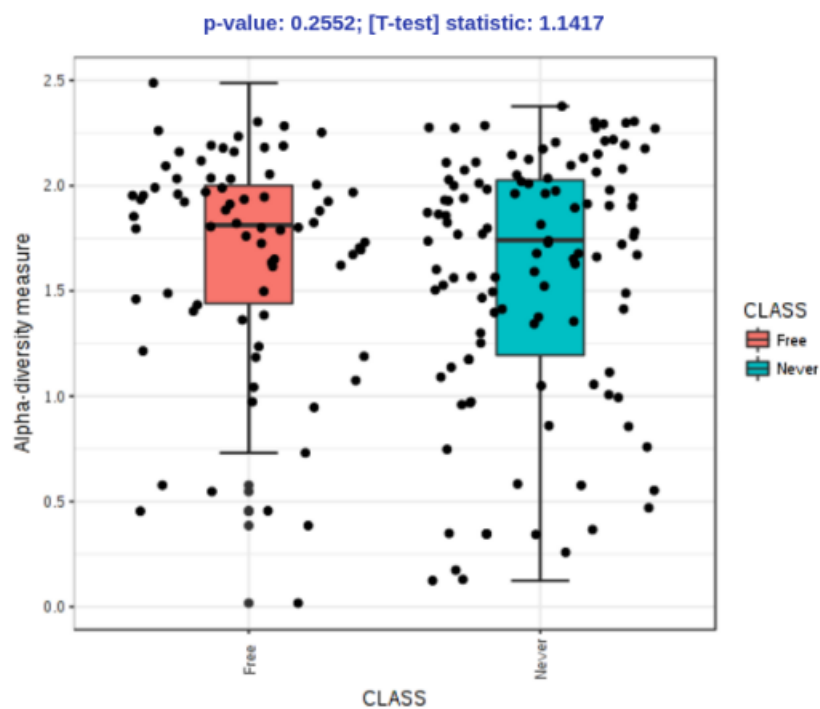


FIGURE 30 – Comparaison des diversités de Shannon entre les échantillons Free et Never.

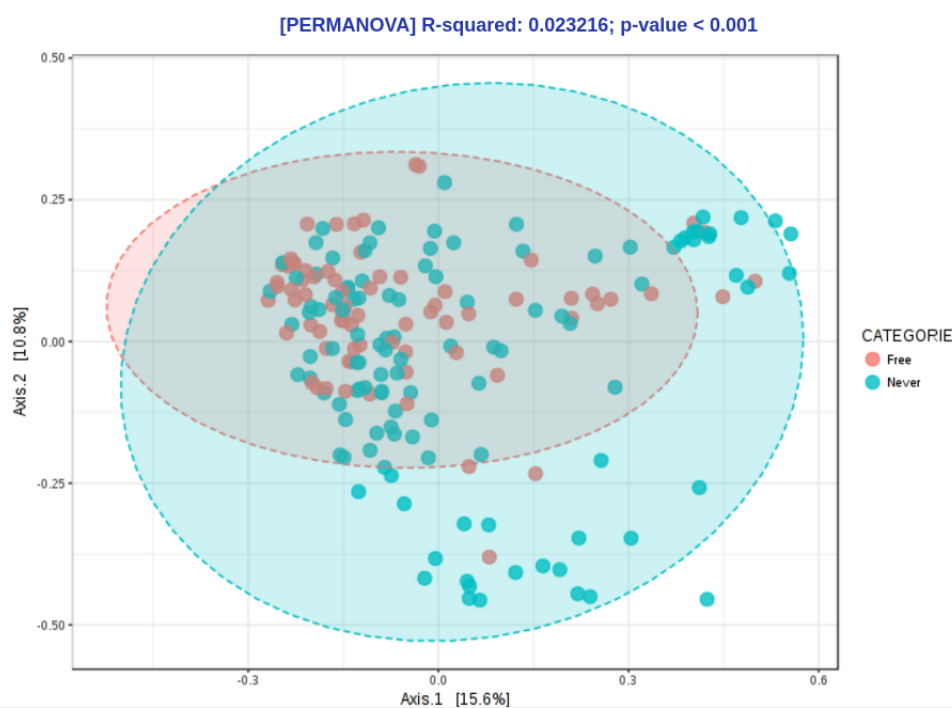


FIGURE 31 – Permanova entre les échantillons Free et Never sur une PCoA+ Bray-Curtis

Discussion

Production des données

Séquençage

La version 3 du kit MiSeq Reagent Kit produit des reads plus longs (300 pb) que dans la version précédente (250 pb) afin d'augmenter la précision de l'assignation taxonomique (Figure 32). En contrepartie, la qualité du séquençage est médiocre aux extrémités avec des scores qui chutent en dessous de 20. À cause de cela, seulement 43 % de reads sont exploitables. C'est un problème connu lié à la chimie du kit que Illumina n'a pas corrigé à ce jour. La profondeur de séquençage reste toutefois suffisante comme l'attestent les courbes de raréfaction. En utilisant d'autres amorces ciblant des régions de l'ADNr 16S différentes, nous pourrions augmenter la taille du chevauchement pour gagner en profondeur, mais en diminuant la longueur des reads.

Les séquenceurs de 3e génération comme le Mini Ion (Oxford Nanopore) ou le PacBio (Pacific Bioscience) apporteraient un avantage certain. Ces derniers sont capables de produire des reads très longs (10 000 pb en moyenne) et pourraient facilement séquencer l'intégralité de l'ADNr 16S. De plus, contrairement à Illumina, les fragments d'ADN sont directement lus (Technologie SMS : Single Molecule Sequencing) évitant ainsi tout biais d'amplification pouvant surévaluer les abondances. La qualité des reads de ces séquenceurs de 3e génération est en revanche de mauvaise qualité. Malgré cela, deux études^{47;48} ont déjà montré que leurs résolutions taxonomiques atteignent facilement celui de l'espèce.

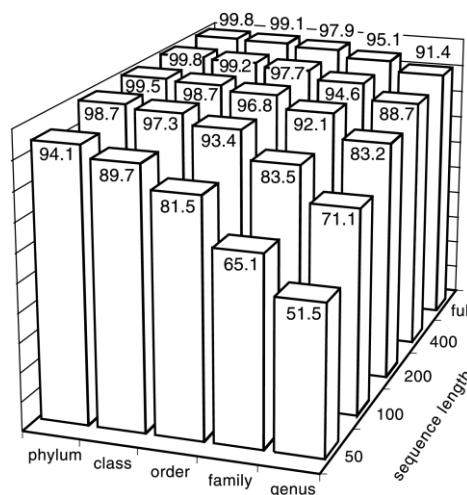


FIGURE 32 – Sensibilité de détection de la stratégie 16S en fonction de la longueur des reads.

(Wang et al. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy)

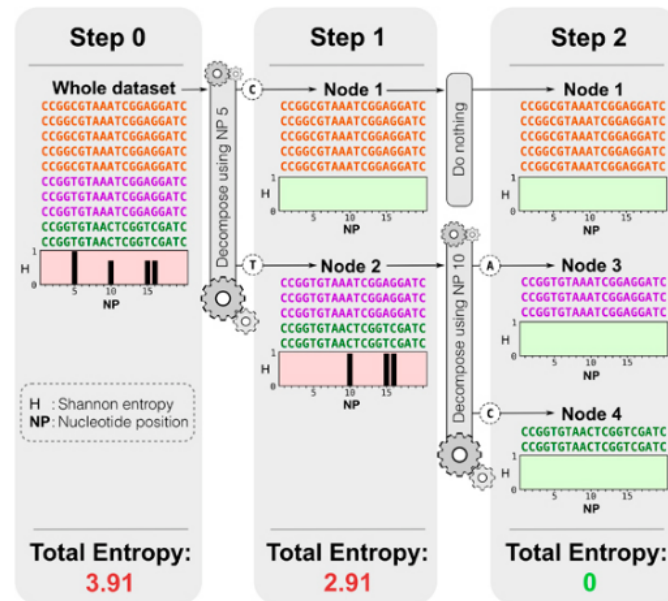


FIGURE 33 – Principe de la décomposition par entropie minimum.

⁵². Étape 1 : les reads sont alignés. L'entropie H est calculée pour chaque position nucléotidique. Étape 2 : La position ayant la plus forte entropie est utilisée pour discriminer deux groupes. Étape 3 : Le processus est répété jusqu'à atteindre une entropie totale de 0

Pipeline

Par rapport aux autres logiciels comme *QIIME*⁴⁹ ou *MOTHUR*⁵⁰, le pipeline mucobiome est plus rapide car il distribue la charge de calcul de chaque échantillon dans un *thread* dédié grâce à *Snakemake*⁹. Il est par ailleurs économe en temps de calcul grâce la dé-réplication qui teste une seul fois un même read contre la base de données. Sans cette option, sur une machine disposant des mêmes ressources de calcul, le pipeline mucobiome a mis 21h de calcul contre 1h29 avec l'option. La stratégie close-reference utilisée dans le pipeline mucobiome a permis d'assigner jusqu'au niveau du genre, plus de 99 % des reads analysés. La base de données *Greengene* est donc assez exhaustive pour analyser le microbiote respiratoire, car tous les genres sont connus. En revanche, la résolution taxonomique n'atteint pas le rang de l'espèce. Il a en effet déjà été montré que les régions hypervariables prises isolément ne sont pas assez discriminantes⁵¹. Deux espèces peuvent par exemple varier d'un seul nucléotide dans une région hypervariable. D'autre part, l'assignation taxonomique dépend d'une similarité que nous avons fixé arbitrairement à 97 %. D'autres algorithmes permettent de s'affranchir de ce seuil. Par exemple la clusterisation par calcul d'entropie maximum (Figure 33) *Maximum entropy clusterisation*⁵².

Méthodes d'analyse

Parmi les analyses de bêta diversité, seule l'analyse en coordonnées principales (PCoA) a été présentée en utilisant la distance de Bray-Curtis. Nous avons également réalisé d'autres ordinations (données non montrées) qui n'ont pas été concluantes. Par exemple, en changeant le type de distance ou en utilisant un positionnement multidimensionnel (MDS) au lieu de la PCoA.

Par ailleurs, la proximité phylogénétique des bactéries n'a pas été prise en compte. Un microbiote contenant trois bactéries proches n'est pas la même chose qu'un microbiote contenant trois bactéries très éloignées. La distance UniFrac⁵³ pourrait alors remplacer la distance de Bray-Curtis en prenant en considération la phylogénie des bactéries.

Analyse des données

Principaux phyla bactériens

Par rapport aux données chez les sujets sains⁵⁴, nos résultats chez les patients mucoviscidosiques montrent une augmentation des *Proteobacteria* (31.48 %) aux dépens des *Bacteroidetes* (11.11 %). Et dans une moindre mesure, une augmentation des *Actinobacteria* (7.41 %). Ces résultats sont en accord avec ceux présentés dans la méta-analyse de *Nature*⁵⁴ retrouvant ces proportions dans la mucoviscidose, l'asthme et la BPCO. Cet excès s'explique principalement par la dominance d'*Haemophilus* et de *Neisseria*. Par ailleurs, une large proportion d'anaérobies est retrouvée, avec notamment *Prevotella* et *Veillonella*. La corrélation forte entre ces deux genres (coefficient de Pearson = 0.60) a été décrite dans le microbiote intestinal⁵⁵. La signification clinique de la présence des anaérobies est encore incertaine⁵⁶.

Dominance des pathogènes

Les autres pathogènes associés à la mucoviscidose sont tous retrouvés (*Haemophilus*, *Staphylococcus*, *Burkholderia*, *Stenotrophomonas*) et ont tendance à dominer les autres. Pourtant, la majorité des échantillons proviennent de patients sans détérioration clinique. Ceci remet en cause l'idée selon laquelle l'infection bactérienne soit à l'origine des exacerbations. En effet, plusieurs études^{57;16} ont montré qu'il peut y avoir exacerbations sans infection et inversement. Une des hypothèses suggère que l'anomalie du *CFTR* est directement responsable d'un terrain pro-inflammatoire.

Présence de *Pseudomonas*

Ces résultats confirment les résultats déjà décrits au laboratoire³⁷ avec les marqueurs *oprL* et la nécessité de coupler une PCR plus spécifique avec les marqueurs *gyrB*/textitecX.

Ces résultats doivent être nuancés, car la résolution taxonomique de notre méthode s'arrête au genre *Pseudomonas* et non à l'espèce *P. aeruginosa*.

Patients Free et Never

Les patients selon leur appartenance aux catégories Never et Free¹, qui permettent de distinguer les patients selon leur anamnèse vis-à-vis de *P. aeruginosa* (totalement exempts ou colonisation datant d'au moins 1 an), n'ont pas montré de différence statistiquement significative dans leurs diversités alpha. En revanche, l'analyse PERMANOVA de diversité bêta montre une différence significative entre ces deux groupes. Une homogénéisation de la structure du microbiote chez les patients Free est probablement causée par l'antibiothérapie d'éradication de *P. aeruginosa*. En effet, les axes d'ordinations les plus impactés concernent (Figures 28 et ??) *Neisseria* et *Haemophilus*, deux genres bactériens sensibles à l'antibiothérapie anti-pyocyanique. Ce résultat vient confirmer sur un grand nombre d'échantillons l'hypothèse avancée dans une étude pilote de²⁵ selon laquelle la primocolonisation à *P. aeruginosa* suivi de son traitement antibiotique marque durablement le microbiote laissant une « empreinte » microbiobiologique chez les patients Free.

Hétérogénéité des microbiotes

Nos résultats de diversité alpha et bêta montrent la grande variabilité du microbiote respiratoire. Il est différent entre les patients et change rapidement au cours du temps. Aucune des données recueillies (sexe, âge, IMC, type de mutation, score cytologique, prise d'antibiotique) n'a permis de distinguer des catégories de microbiote. Il semble donc que ce soit l'individu lui-même la principale source de variabilité. La proximité, sur le graphique d'ordination, de certains échantillons d'un même patient va dans ce sens. Cette observation renforce l'idée de la nécessité d'appliquer une médecine personnalisée et de précision chez les patients atteints de mucoviscidose.

Limites de l'étude

Plusieurs points sont à prendre en considération pour critiquer la justesse des résultats. Premièrement, les ADN séquencés proviennent d'expectorations bronchiques ayant traversé les voies aériennes supérieures. Une contamination est toujours possible. Le score cytologique de Bartlett n'a pas permis de mettre en évidence des différences dans la structure du microbiote qui soient imputables aux contaminations de l'oropharynx. Néanmoins, la présence de *Corynebacterium* dans certains échantillons peut en être évocatrice. De plus, la stratégie 16S ne fait pas la distinction entre des bactéries mortes et vivantes ce qui biaise encore l'estimation des abondances. Dans l'idéal, il faudrait réaliser des prélèvements invasifs⁷ assez difficiles à mettre en pratique. Une autre idée serait de réaliser parallèlement à l'ECBC l'analyse d'un prélèvement de l'oropharynx pour calculer un différentiel.

D'un point de vue du recueil, l'analyse longitudinale ne contient pas assez d'échantillons (en moyenne 3 échantillons par patient sur 3 ans). Et comme nous avons pu

le voir, l'hétérogénéité du microbiote rend difficilement comparables les patients entre eux. Il serait intéressant d'augmenter la résolution temporelle, en augmentant le nombre d'échantillons par patient. Enfin les nouvelles technologies de séquençage évoquées plus haut seraient idéales pour atteindre le niveau taxonomique de l'espèce.

Conclusion

Le séquençage de l'ADNr 16S a été réalisé sur 188 expectorations bronchiques de 47 patients atteints de mucoviscidose avec un pipeline bio-informatique dédié. Malgré la faible qualité du séquençage MiSeq (Illumina) dans la version 3 du kit, plus de 99 % des reads ont reçu une assignation taxonomique jusqu'au genre bactérien. L'augmentation des *Proteobacteria* évoquée dans d'autres études sur le microbiote respiratoire dans la mucoviscidose est retrouvée. Les analyses de diversité ont montré une grande hétérogénéité des microbiotes entre les patients et une variabilité dans le temps. Ni les données clinico-biologiques recueillies ni les catégories de Lee (statut vis à vis de *P. aeruginosa*) n'ont montré une différence significative en termes de diversité alpha. Toutefois en terme de bêta diversité, le microbiote des patients Free est moins divers que celui des patient Never, probablement à cause de l'antibiothérapie d'éradication de *P. aeruginosa*. Une étude longitudinale avec une résolution temporelle plus importante serait intéressante pour évaluer la cinétique d'évolution du microbiote ; cette étude sera menée dans le futur car la collection biologique issue de l'étude MUCOBIOME comprend en moyenne 3,4 prélèvements par patient et par an ; le pipeline mucobiome sera précieux pour l'analyse de ces autres prélèvements. Les séquenceurs de troisième génération permettraient l'assignation taxonomique jusqu'à l'espèce. Enfin d'autres approches seraient intéressantes pour évaluer la fonction du microbiote et aussi l'impact du virome respiratoire, qui est tout aussi important. La métagénomique fonctionnelle ou encore la PCR digitale apporterait ces éléments de réponse au prix de calculs informatiques parfois très élevés.

Références

- [1] T. W. Lee, K. G. Brownlee, S. P. Conway, M. Denton, and J. M. Littlewood, “Evaluation of a new definition for chronic *Pseudomonas aeruginosa* infection in cystic fibrosis patients,” *Journal of Cystic Fibrosis*, vol. 2, pp. 29–34, mar 2003.
- [2] J.-F. Bach, “The Effect of Infections on Susceptibility to Autoimmune and Allergic Diseases,” *New England Journal of Medicine*, vol. 347, pp. 911–920, sep 2002.
- [3] E. Yong, *Moi, microbiote, maître du monde : Les microbes, 30 billions d’amis !* 2017.
- [4] R. Sender, S. Fuchs, R. Milo, T. Lee, H. Ahn, and S. Baek, “Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body,” *PLOS Biology*, vol. 14, p. e1002533, aug 2016.
- [5] L. Bode, “Human milk oligosaccharides : every baby needs a sugar mama.,” *Glycobiology*, vol. 22, pp. 1147–62, sep 2012.
- [6] J. G. LeBlanc, C. Milani, G. S. de Giori, F. Sesma, D. van Sinderen, and M. Ventura, “Bacteria as vitamin suppliers to their host : a gut microbiota perspective,” *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 24, pp. 160–168, apr 2013.
- [7] J. Qin, R. Li, J. Raes, M. Arumugam, K. S. Burgdorf, C. Manichanh, T. Nielsen, N. Pons, F. Levenez, T. Yamada, D. R. Mende, J. Li, J. Xu, S. Li, D. Li, J. Cao, B. Wang, H. Liang, H. Zheng, Y. Xie, J. Tap, P. Lepage, M. Bertalan, J.-M. Batto, T. Hansen, D. Le Paslier, A. Linneberg, H. B. Nielsen, E. Peltier, P. Renault, T. Sicheritz-Ponten, K. Turner, H. Zhu, C. Yu, S. Li, M. Jian, Y. Zhou, Y. Li, X. Zhang, S. Li, N. Qin, H. Yang, J. Wang, S. Brunak, J. Doré, F. Guarner, K. Kristiansen, O. Pedersen, J. Parkhill, J. Weissenbach, M. Antolin, F. Artiguenave, H. Blottiere, N. Borruel, T. Bruls, F. Casellas, C. Chervaux, A. Cultrone, C. Delorme, G. Denariáz, R. Dervyn, M. Forte, C. Friss, M. van de Guchte, E. Guedon, F. Haimet, A. Jamet, C. Juste, G. Kaci, M. Kleerebezem, J. Knol, M. Kristensen, S. Layec, K. Le Roux, M. Leclerc, E. Maguin, R. Melo Minardi, R. Oozeer, M. Rescigno, N. Sanchez, S. Tims, T. Torrejon, E. Varela, W. de Vos, Y. Winogradsky, E. Zoetendal, P. Bork, S. D. Ehrlich, and J. Wang, “A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing,” *Nature*, vol. 464, pp. 59–65, mar 2010.
- [8] J. Eisen, “What does the term microbiome mean ? And where did it come from ? A bit of a surprise,” <http://www.microbe.net/2015/04/08/what-does-the-term-microbiome-mean-and-where-did-it-come-from-a-bit-of-a-surprise>.

- [9] J. Koster and S. Rahmann, “Snakemake—a scalable bioinformatics workflow engine,” *Bioinformatics*, vol. 28, pp. 2520–2522, oct 2012.
- [10] Registredelamuco.org, “Registre Francais de la mucovidoses 2015,”
- [11] N. A. O’Leary, M. W. Wright, J. R. Brister, S. Ciufo, D. Haddad, R. McVeigh, B. Rajput, B. Robbertse, B. Smith-White, D. Ako-Adjei, A. Astashyn, A. Badret-din, Y. Bao, O. Blinkova, V. Brover, V. Chetvernin, J. Choi, E. Cox, O. Ermolaeva, C. M. Farrell, T. Goldfarb, T. Gupta, D. Haft, E. Hatcher, W. Hlavina, V. S. Joardar, V. K. Kodali, W. Li, D. Maglott, P. Masterson, K. M. McGarvey, M. R. Murphy, K. O’Neill, S. Pujar, S. H. Rangwala, D. Rausch, L. D. Riddick, C. Schoch, A. Shkeda, S. S. Storz, H. Sun, F. Thibaud-Nissen, I. Tolstoy, R. E. Tully, A. R. Vatsan, C. Wallin, D. Webb, W. Wu, M. J. Landrum, A. Kimchi, T. Tatusova, M. DiCuccio, P. Kitts, T. D. Murphy, and K. D. Pruitt, “Reference sequence (RefSeq) database at NCBI : current status, taxonomic expansion, and functional annotation,” *Nucleic Acids Research*, vol. 44, pp. D733–D745, jan 2016.
- [12] P. M. Quinton, “The neglected ion : HCO_3^- ,” *Nature Medicine*, vol. 7, pp. 292–293, mar 2001.
- [13] Genet.sickkids.on.ca, “Cystic Fibrosis Mutation Database.”
- [14] C. Guissart, C. Dubucs, C. Raynal, A. Girardet, F. Tran Mau Them, V. Debant, C. Rouzier, A. Boureau-Wirth, E. Haquet, J. Puechberty, E. Bieth, D. Dupin Deguine, P. Khau Van Kien, M. Brechard, V. Pritchard, M. Koenig, M. Claustres, and M. Vincent, “Non-invasive prenatal diagnosis (NIPD) of cystic fibrosis : an optimized protocol using MEMO fluorescent PCR to detect the p.Phe508del mutation,” *Journal of Cystic Fibrosis*, vol. 16, pp. 198–206, mar 2017.
- [15] T. Montier, P. Delépine, R. Marianowski, K. Le Ny, M. Le Bris, D. Gillet, G. Portard, P. Mondine, I. Frachon, J.-J. Yaouanc, J.-C. Clément, H. des Abbayes, and C. Férec, “CFTR Transgene Expression in Primary ΔF508 Epithelial Cell Cultures From Human Nasal Polyps Following Gene Transfer With Cationic Phosphonolipids,” *Molecular Biotechnology*, vol. 26, pp. 193–206, mar 2004.
- [16] H. Heijerman, “Infection and inflammation in cystic fibrosis : A short review,” 2005.
- [17] J. C. Davies, “Pseudomonas aeruginosa in cystic fibrosis : pathogenesis and persistence,”
- [18] P. Plésiat, “Quels critères microbiologiques pour définir une colonisation ou une infection à Pseudomonas aeruginosa ?,”

- [19] M. Le Bourgeois and S. Vrielynck, “Infection bronchopulmonaire dans la mucoviscidose,”
- [20] R. Ruimy and A. Andremont, “Quorum-sensing chez *Pseudomonas aeruginosa* : Mécanisme moléculaire, impact clinique, et inhibition,” 2004.
- [21] Société Française de Microbiologie, *Rémic : Référente en microbiologie médicale*. 2015.
- [22] G. Héry-Arnaud, E. Nowak, J. Caillon, V. David, A. Dirou, K. Revert, M.-R. Munck, I. Frachon, A. Haloun, D. Horeau-Langlard, J. Le Bihan, I. Danner-Boucher, S. Ramel, M.-P. Pelletier, S. Rosec, S. Gouriou, E. Poulhazan, C. Payan, C. Férec, G. Rault, G. Le Gal, and R. Le Berre, “Evaluation of quantitative PCR for early diagnosis of *Pseudomonas aeruginosa* infection in cystic fibrosis : a prospective cohort study,” *Clinical Microbiology and Infection*, vol. 23, pp. 203–207, mar 2017.
- [23] M. L. Boulette, P. J. Baynham, P. A. Jorth, I. Kukavica-Ibrulj, A. Longoria, K. Barrera, R. C. Levesque, and M. Whiteley, “Characterization of alanine catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* and its importance for proliferation in vivo.,” *Journal of bacteriology*, vol. 191, pp. 6329–34, oct 2009.
- [24] E. Pernet, J. Brunet, L. Guillemot, M. Chignard, L. Touqui, and Y. Wu, “*Staphylococcus aureus* Adenosine Inhibits sPLA2-IIA-Mediated Host Killing in the Airways,” *The Journal of Immunology*, vol. 194, pp. 5312–5319, jun 2015.
- [25] M. Keravec, J. Mounier, E. Prestat, S. Vallet, J. K. Jansson, G. Burgaud, S. Rosec, S. Gouriou, G. Rault, E. Coton, G. Barbier, and G. Héry Arnaud, “Insights into the respiratory tract microbiota of patients with cystic fibrosis during early *Pseudomonas aeruginosa* colonization Background,” vol. 4, 2015.
- [26] W. Ho Man, W. A. de Steenhuijsen PETERS, and D. Bogaert, “The microbiota of the respiratory tract : gatekeeper to respiratory health,” *Nature Publishing Group*, 2017.
- [27] L. D. N. Nguyen, E. Viscogliosi, and L. Delhaes, “The lung mycobiome : an emerging field of the human respiratory microbiome.,” *Frontiers in microbiology*, vol. 6, p. 89, 2015.
- [28] M. Hilty, C. Burke, H. Pedro, P. Cardenas, A. Bush, C. Bossley, J. Davies, A. Ervine, L. Poulter, L. Pachter, M. F. Moffatt, and W. O. C. Cookson, “Disordered microbial communities in asthmatic airways,” *PLoS ONE*, vol. 5, no. 1, 2010.

- [29] J. M. Beck, V. B. Young, and G. B. Huffnagle, “The Microbiome of the Lung,”
- [30] R. P. Dickson and G. B. Huffnagle, “The Lung Microbiome : New Principles for Respiratory Bacteriology in Health and Disease,”
- [31] M. E. Perez-Muñoz, M.-C. Arrieta, A. E. Ramer-Tait, J. Walter, F. Ballester, M. Francino, C. Mølgaard, K. Michaelsen, T. Licht, U. Sauer, K. McCoy, A. Macpherson, E. Schober, C. Ionescu-Tirgoviste, G. Devoti, C. Beaufort, K. Buschard, C. Patterson, C. Colding, V. Tremaroli, Y. Yin, S. Bergman, X. Xu, L. Madsen, K. Kristiansen, J. Dahlgren, and W. Jun, “A critical assessment of the “sterile womb” and “in utero colonization” hypotheses : implications for research on the pioneer infant microbiome,” *Microbiome*, vol. 5, no. 1, p. 48, 2017.
- [32] R. P. Dickson, J. R. Erb-Downward, and G. B. Huffnagle, “The Role of the Bacterial Microbiome in Lung Disease,”
- [33] K. B. Frayman, D. S. Armstrong, R. Carzino, T. W. Ferkol, K. Grimwood, G. A. Storch, S. M. Teo, K. M. Wylie, and S. C. Ranganathan, “The lower airway microbiota in early cystic fibrosis lung disease : a longitudinal analysis,” *Thorax*, pp. thoraxjnl-2016-209279, 2017.
- [34] B. Coburn, P. W. Wang, J. Diaz Caballero, S. T. Clark, V. Brahma, S. Donaldson, Y. Zhang, A. Surendra, Y. Gong, D. Elizabeth Tullis, Y. C. W. Yau, V. J. Waters, D. M. Hwang, and D. S. Guttman, “Lung microbiota across age and disease stage in cystic fibrosis.,” *Scientific reports*, vol. 5, p. 10241, may 2015.
- [35] R. P. Dickson, J. R. Erb-Downward, and G. B. Huffnagle, “The Role of the Bacterial Microbiome in Lung Disease,”
- [36] F. J. Whelan, A. A. Heirali, L. Rossi, H. R. Rabin, M. D. Parkins, and M. G. Surette, “Longitudinal sampling of the lung microbiota in individuals with cystic fibrosis,” *Plos One*, vol. 12, no. 3, p. e0172811, 2017.
- [37] F. Le Gall, R. Le Berre, S. Rosec, J. Hardy, S. Gouriou, S. Boisramé-Gastrin, S. Vallet, G. Rault, C. Payan, and G. Héry-Arnaud, “Proposal of a quantitative PCR-based protocol for an optimal *Pseudomonas aeruginosa* detection in patients with cystic fibrosis,”
- [38] T. Mago ?? and S. L. Salzberg, “FLASH : Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies,” *Bioinformatics*, vol. 27, no. 21, pp. 2957–2963, 2011.
- [39] Labsquare, “Fastqt : another quality control tool for high throughput sequence data,” 2017.

- [40] F. J. Joshi NA, “Sickle : A sliding-window, adaptive, quality-based trimming tool for FastQ files <https://github.com/najoshi/sickle>,” 2011.
- [41] T. Z. DeSantis, P. Hugenholtz, N. Larsen, M. Rojas, E. L. Brodie, K. Keller, T. Huber, D. Dalevi, P. Hu, and G. L. Andersen, “Greengenes, a Chimera-Checked 16S rRNA Gene Database and Workbench Compatible with ARB,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 72, pp. 5069–5072, jul 2006.
- [42] H. Li, “Seqtk : a fast and lightweight tool for processing FASTA or FASTQ sequences, 2013. <https://github.com/lh3/seqtk>,”
- [43] M. Martin, “Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads,” *EMBnet.journal*, vol. 17, no. 1, pp. pp. 10–12, 2011.
- [44] Torbjørn Rognes, “A peer-reviewed version of this preprint was published in PeerJ on 3 March 2015,” *PeerJ*, no. March, 2015.
- [45] P. J. McMurdie, S. Holmes, R. Kindt, P. Legendre, and R. O’Hara, “phyloseq : An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data,” *PLoS ONE*, vol. 8, p. e61217, apr 2013.
- [46] C. J. van der Gast, A. W. Walker, F. A. Stressmann, G. B. Rogers, P. Scott, T. W. Daniels, M. P. Carroll, J. Parkhill, and K. D. Bruce, “Partitioning core and satellite taxa from within cystic fibrosis lung bacterial communities,” *The ISME journal*, vol. 5, pp. 780–91, may 2011.
- [47] J. Wagner, P. Coupland, H. P. Browne, T. D. Lawley, S. C. Francis, and J. Parkhill, “Evaluation of PacBio sequencing for full-length bacterial 16S rRNA gene classification,” *BMC Microbiology*, vol. 16, p. 274, dec 2016.
- [48] A. Benítez-Páez, K. J. Portune, and Y. Sanz, “Species-level resolution of 16S rRNA gene amplicons sequenced through the MinIONTM portable nanopore sequencer,” *GigaScience*, vol. 5, p. 4, dec 2016.
- [49] J. G. Caporaso, J. Kuczynski, J. Stombaugh, K. Bittinger, F. D. Bushman, E. K. Costello, N. Fierer, A. G. Peña, J. K. Goodrich, J. I. Gordon, G. A. Huttley, S. T. Kelley, D. Knights, J. E. Koenig, R. E. Ley, C. A. Lozupone, D. McDonald, B. D. Muegge, M. Pirrung, J. Reeder, J. R. Sevinsky, P. J. Turnbaugh, W. A. Walters, J. Widmann, T. Yatsunenko, J. Zaneveld, and R. Knight, “QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data,” *Nature Methods*, vol. 7, pp. 335–336, may 2010.

- [50] P. D. Schloss, S. L. Westcott, T. Ryabin, J. R. Hall, M. Hartmann, E. B. Hollister, R. A. Lesniewski, B. B. Oakley, D. H. Parks, C. J. Robinson, J. W. Sahl, B. Stres, G. G. Thallinger, D. J. Van Horn, and C. F. Weber, “Introducing mothur : open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities.,” *Applied and environmental microbiology*, vol. 75, pp. 7537–41, dec 2009.
- [51] B. Yang, Y. Wang, and P.-Y. Qian, “Sensitivity and correlation of hypervariable regions in 16S rRNA genes in phylogenetic analysis.,” *BMC bioinformatics*, vol. 17, p. 135, mar 2016.
- [52] E. Aldana-Bobadilla and A. Kuri-Morales, “A clustering method based on the maximum entropy principle,” *Entropy*, vol. 17, no. 1, pp. 151–180, 2015.
- [53] C. Lozupone and R. Knight, “UniFrac : a New Phylogenetic Method for Comparing Microbial Communities UniFrac : a New Phylogenetic Method for Comparing Microbial Communities,” *Applied and environmental microbiology*, vol. 71, no. 12, pp. 8228–8235, 2005.
- [54] B. J. Marsland and E. S. Gollwitzer, “Host–microorganism interactions in lung diseases,” *Nature Publishing Group*, vol. 14, 2014.
- [55] A. Dlugosz, B. Winckler, E. Lundin, K. Zakikhany, G. Sandström, W. Ye, L. Engstrand, and G. Lindberg, “No difference in small bowel microbiota between patients with irritable bowel syndrome and healthy controls,” *Scientific Reports*, vol. 5, p. 8508, jul 2015.
- [56] M. M. Tunney, T. R. Field, T. F. Moriarty, S. Patrick, G. Doering, M. S. Muhlebach, M. C. Wolfgang, R. Boucher, D. F. Gilpin, A. McDowell, and J. S. Elborn, “Detection of Anaerobic Bacteria in High Numbers in Sputum from Patients with Cystic Fibrosis,” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 177, pp. 995–1001, may 2008.
- [57] R. Tirouvanziam, S. de Bentzmann, C. Hubeau, J. Hinnrasky, J. Jacquot, B. Péault, and E. Puchelle, “Inflammation and Infection in Naive Human Cystic Fibrosis Airway Grafts,” *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, vol. 23, pp. 121–127, aug 2000.

SCHUTZ (Sacha) - Description du microbiote respiratoire chez les patients atteints de mucoviscidose - 41 pages, 33 figures, 5 tableaux

RESUME : La colonisation à *Pseudomonas aeruginosa* est un tournant décisif dans l'évolution de la mucoviscidose. Née de la description exhaustive du microbiote respiratoire grâce aux technologies de séquençage haut débit, l'hypothèse proposée est que ce microbiote pourrait influencer la colonisation à *P. aeruginosa*. Afin d'étayer cette hypothèse, il est nécessaire de disposer d'un pipeline bio-informatique spécifiquement dédié aux données de séquençage issues des expectorations des patients. Tel a été l'objectif de ce travail. A partir des données de séquençage de l'ADNr 16S (Illumina MiSeq, kit V3) de 188 prélèvements issus de la collection biologique de l'étude MUCOBIOME et provenant de 47 patients (13-38 ans) prélevés itérativement, le pipeline créé a permis de révéler la structure et la dynamique du microbiote respiratoire au cours du temps et de l'analyser au regard des données biocliniques colligées. Ce pipeline original a montré une fiabilité et un temps de calcul très avantageux par comparaison avec les autres pipelines habituellement utilisés pour l'analyse des données 16S des microbiotes.

MOTS CLEFS :

MICROBIOTE RESPIRATOIRE
MUCOVISCIDOSE
PSEUDOMONAS AERUGINOSA
ARNR 16S
BIOINFORMATIQUE
SÉQUENÇAGE HAUT-DÉBIT

JURY :

Président : M. FEREC
Membres : G. HERY-ARNAUD
E. GENIN
C. LE MARECHAL
P. LANOTTE

DATE DE SOUTENANCE :

23 Avril 2017

ADRESSE DE L'AUTEUR :

33 Rue d'aiguillon, 29200 Brest