

THÈSE DE MÉDECINE

CHU-BREST

UNIVERSITÉ DE BREST
DES DE BIOLOGIE MÉDICALE

Description du microbiote pulmonaire chez les patients atteints de mucoviscidoses

Auteur :

Sacha SCHUTZ

Responsable :

Geneviève HERY-ARNAUD

8 mai 2017



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 : 17/05/2017

Signature :

ssh pub key fingerprint : a4 :e3 :da :87 :78 :2d :e1 :6f :bb :56 :5c :d1 :72 :f5 :50 :63

Licence

Copyright (c) 2016-2017 SCHUTZ Sacha. Permission est autorisée de copier, distribuer et/ou modifier ce document sous les termes de la Licence de Documentation libre GNU, Version 1.2 ou toute version ultérieure publiée par la Free Software Foundation ; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. Une copie de la licence est incluse dans la section intitulée «“GNU Free Documentation License”.»



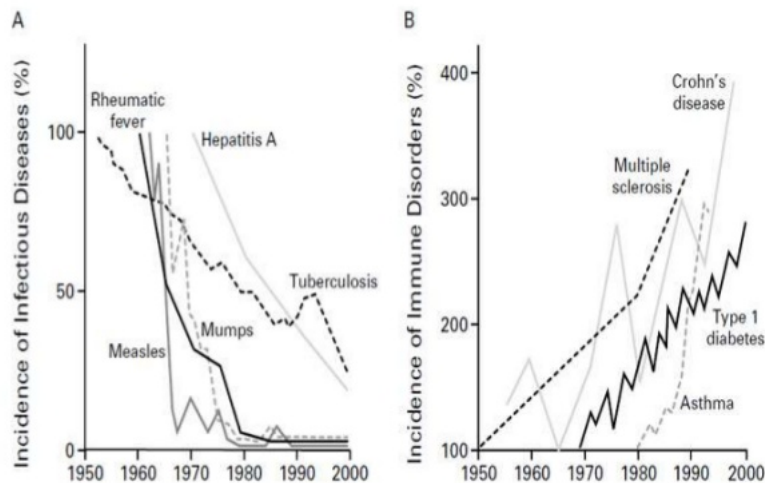
Table des matières

1	Avant-propos	3
2	Définition	6
2.1	Termes utilisés en écologie	6
2.2	Termes utilisés en bio-informatique	9
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	Méthode de prélèvement	5
3.3.2	Séquençage haut débit	5
3.4	Objectif de l'étude Mucobiome	6
4	Matériel et Méthodes	7
4.1	Recueil des données	7
4.2	Extraction de l'ADN	8
4.3	Séquençage	8
4.4	Analyse bio-informatique	8
4.5	Étape du pipeline	9
4.5.1	Merging : Fusions des reads	9
4.5.2	Cleaning : Filtrage des qualités	10
4.5.3	Reversing : Séquence complémentaire	11
4.5.4	Trimming : Suppression des primers	11
4.5.5	Dereplicating : Suppression des doublons	11
4.5.6	Assignement taxonomique	11
4.5.7	Analyse de la table des OTUs	12
5	Résultat	12
5.1	Séquençage et pipeline	12
5.1.1	Données de séquençage	12
5.1.2	Qualité des reads	12
5.1.3	Assignement taxonomique	13
5.1.4	Profondeur d'échantillonnage	13
5.2	Résultats descriptifs	14

5.2.1	Composition du microbiote	14
5.2.2	Évolution de l'alpha diversité	16
5.2.3	Évolution des abondances	16
5.2.4	Bêta Diversité	18
5.2.5	Présence de <i>P.aeruginosa</i>	19
5.3	Résultats analytiques	19
5.3.1	Corrélation entre les genres bactériens	19
5.3.2	Comparaison entre échantillons Free et Never	22
6	Discussion	24
6.1	Production des données	24
6.1.1	Séquençage	24
6.1.2	Pipeline	25
6.1.3	Méthode d'analyse	25
6.2	Analyse des données	26
6.2.1	Principaux phylums	26
6.2.2	Dominance des pathogènes	27
6.2.3	Présence de <i>Pseudomonas</i>	27
6.2.4	Patient Free et Never	27
6.2.5	Hétérogénéité des microbiotes	27
7	Limite de l'étude	28
8	Conclusion	28

Avant-propos

Depuis 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).



JEAN-FRANÇOIS BACH
New England Journal of Medicine September 2002

FIGURE 1 – Incidence des maladies infectieuses et auto-immunes en Europe au cours de 50 ans.

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 à 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 résister 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. La majorité des bactéries a longtemps été indétectable par les méthodes de cultures classiques. Mais à présent, nous savons que les régions anatomiques autrefois considérées stériles contiennent beaucoup de bactéries. On les retrouve sur tous les territoires du corps exposé où elles se regroupent en communautés. La peau est colonisée par *Propionibacterium*, *Corynebacterium* et *Staphylococcus*⁵². Le vagin est colonisé essentiellement par *Lactobacillus* et la bouche principalement par *Streptococcus*⁵². La muqueuse intestinale est colonisée par une "flore" bactérienne ou microbiote dominé par les anaérobies pouvant contribuer jusqu'à 0,2 kg au poids corporel⁴³. En échange notre hospitalité, le microbiote contribue au bon fonctionnement de son hôte. Il aide à la digestion en dégradant par exemple les sucres du lait maternel chez le nouveau-né^{5;52}. Il participe à la synthèse des vitamines essentielles (K, B12, B9)^{26;52}. Il éduque notre système immunitaire et fait barrière à l'implantation de tout nouvel agent pathogène. Tout déséquilibre du microbiote intestinale ou dysbiose peut avoir des conséquences pour notre santé. La liste des affections associées est longue⁵². 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. Par exemple, la destruction du microbiote intestinale par des antibiotiques donne l'opportunité à la souche toxigène de *Clostridium difficile* de s'installer et provoquer la 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'étant pas figée dans le temps et pouvant 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 humaines⁴³. En associant les gènes bactériens, le génome d'un être humain passe de 23 000 à 3,3 millions de gènes³⁸ 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*.

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 permettent à l'ensemble de nos cellules de respirer.



FIGURE 2 – La mitochondrie est l'exemple de symbiose ultime entre eucaryote et procaryote.

Définition

Termes utilisés en écologie

Le **microbiote**¹⁵ est l'ensemble des micro-organismes (bactéries, levures, champignons, virus) vivant dans un environnement donné.

Le **microbiome**¹⁵ 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 semblable. 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 à 97%.

L'**abondance** absolu est le nombre d'individus d'un même OTU dans un échantillon. L'abondance est indirectement évaluée en comptant le nombre de molécules d'ADNr 16S. L'abondance relative est l'expression en pourcentage de l'abondance absolue.

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

La **table des OTU** est à la base de toutes analyses en écologie. Elle correspond à un tableau à double entrée contenant l'abondance par échantillon et par OTU. Dans le tableau 3, 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%

FIGURE 3 – La table des OTUs : L'abondance relative de 3 espèces bactériennes pour 3 échantillons

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, en le projetant dans un espace à deux ou trois dimensions.

La richesse (richness) est le nombre d'OTU présent 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 réparties uniformément. L'équitabilité du premier échantillon est plus grande que le 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 :

$$Chao1 = S_{observed} + \frac{a^2}{2b} \quad (1)$$

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 davantage 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 bille 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'OTU retrouvé dans ce groupe est reporté sur l'axe Y. Une courbe s'aplatissant indique une bonne profondeur de séquençage (Figure 4).

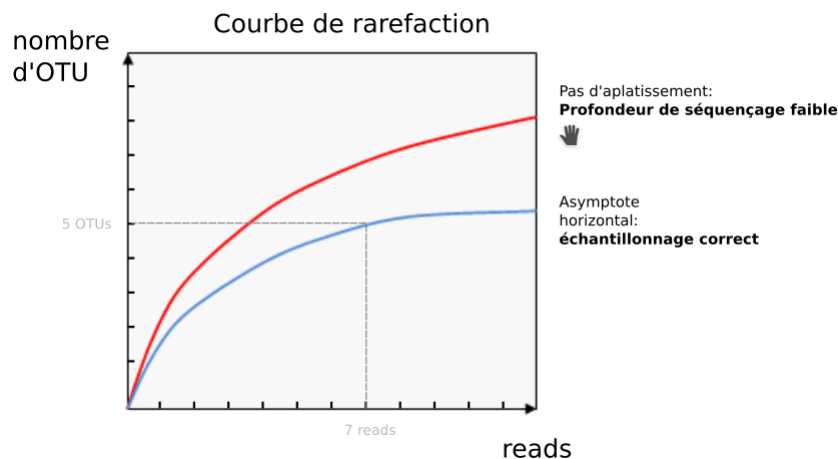


FIGURE 4 – Exemple de courbes de raréfactions. La courbe bleue témoigne d'un bon échantillonnage en s'aplatissant précocement. Plus de reads ne permettraient pas de découvrir de nouveaux OTUs contrairement à la courbe rouge.

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*²³, 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 séquenceurs de nouvelle génération permettant de séquencer un nombre très important de fragments d'ADN.

La métagénomique est une méthode d'étude du contenu en ADN 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'ARN 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, les reads varient entre 150 et 300 paires de bases.

Une **librairie** 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 5 illustre ce principe avec un exemple à deux dimensions seulement.

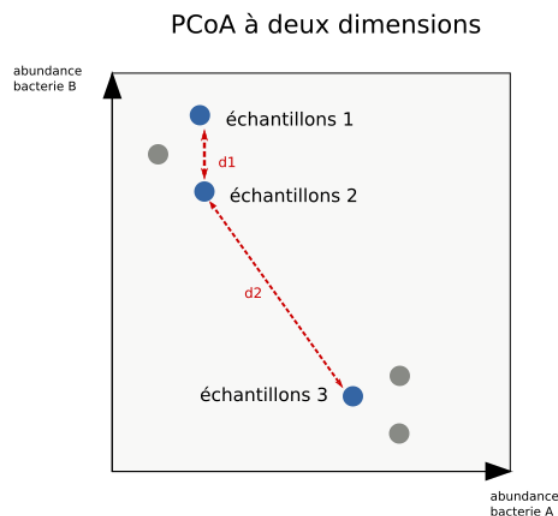


FIGURE 5 – Représentation de plusieurs échantillons ne contenant que deux espèces A et B. Chaque échantillon est assimilable à un point de coordonnées (abondance A ; abondance B). Il est alors possible de calculer des distances entre les échantillons. La plus connue étant la distance euclidienne. Mais d'autres existent comme la distance de Bray-Curtis. Sur cette figure, les échantillons 1 et 2 sont 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 5). 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 situés au numérateur et dénominateur sont réalisés 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 textuelle (Figure 6). Ces fichiers sont produit par le séquençage haut-débit.

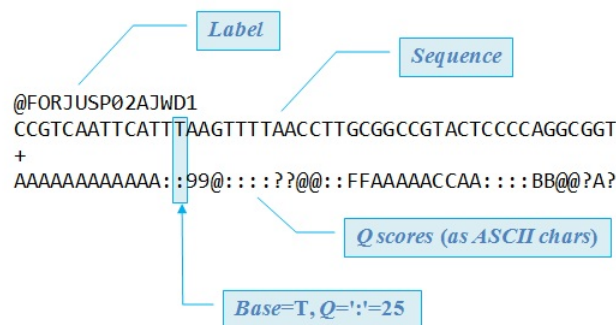


FIGURE 6 – Exemple d'un read contenu dans un fichier fastq. Les scores de qualités sont encodés avec des symboles ASCII. Par exemple le quatorzième T est associé au symbole « : » correspondant au score phred de 25, soit une probabilité de 0,3% d'erreur.

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 arêtes (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 frappe en France 1 naissance sur 5400⁴⁰. La Bretagne est la région la plus touchée avec une prévalence de 1/3000⁴⁰. La loi de Hardy Weinberg estime qu'en Bretagne 1 patient sur 25 est porteur de la mutation 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 mutéⁱ. Le gène *CFTR* impacté se situe sur le chromosome 7 en position q31.2. Il est constitué de 27 exons pour 250 188³⁵ paires de bases. Il code pour 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-)³⁹. On dénombre à ce jour 2017 mutations¹⁷ mises en cause dans la mucoviscidose. La perte d'une phénylalanine en position 508 par délétion du est triplet c.1521-1523delCTT (anciennement $\Delta F508$) cause à elle seule 80% des mucoviscidoses¹⁷. 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 retrouvés. L'atteinte de la fonction respiratoire est la plus bruyante cliniquement. En effet au niveau de l'épithélium broncho-pulmonaire, l'absence d'un *CFTR* fonctionnel est responsable d'une déshydratation du mucus le rendant plus visqueux et empêche les cils bronchiques de jouer leurs rôles.

La forte prévalence de la maladie nécessite de réaliser un dépistage précoce chez tous les nouveau-nés (test de Gutri) afin d'adapter au plus tôt la prise en charge. Seul le test à la sueur permet de poser le diagnostic. Le dépistage prénatal basé sur l'ADN circulant est actuellement à l'étude¹⁸.

Le traitement repose avant tout sur une prise en charge respiratoire (kinésithérapie, dor-naseⁱⁱ, antibiothérapie). Les recherches en thérapies génétiques sont encourageantes³³. 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.

i. Plusieurs hypothèses ont été proposées, notamment lors des grandes épidémies de choléra en diminuant les pertes hydriques.

ii. 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 médiateur²⁰ probablement en réponse à une agression microbienne. Plusieurs pathogènes sont impliqués. Chez les jeunes enfants⁹, *Haemophilus influenza* et *Staphylococcus aureus* sont le plus souvent responsable. *Burkholderia cepacia complex* et *Stenotrophomonas maltophilia* sont retrouvés parmi les sujets plus âgés⁹.

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 stricte est une bactérie de l'environnement rarement retrouvé parmi les patients sains³⁷. En revanche, dans la mucoviscidose, il est mis en évidence²⁴ chez 60% des patients jeunes et plus de 90% des patients adultes.

La primocolonisation à *Pseudomonas aeruginosa* est difficilement détectable, mais elle semble avoir lieu tôt dans l'enfance[@]. Il y a ensuite une phase de latence, variable entre les individus, marquée par des épisodes d'exacerbations et de rémissions. À ce moment, l'éradication par des antibiotiques reste possible. Puis survient le passage à la chronicité. *Pseudomonas aeruginosa* s'adapte à son milieu et s'installe à long terme. Il perd certains caractères de virulence, mais devient résistant aux antibiotiques²⁴. 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*⁴¹. Dans ce processus, chaque bactérie communique avec ses voisines par des signaux chimiques.

Le génome de *Pseudomonas aeruginosa* devient aussi hyperpermutable⁹ pour présenter une plus grande diversité génétique au regard de la sélection naturelleⁱⁱⁱ et donc évoluer plus rapidement.

À ce stade, le traitement antibiotique n'est plus curatif 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 *Pseudomonas aeruginosa* dès qu'il est détecté en culture grâce à une surveillance rapprochée²⁴. 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 sensibilité³⁷. La PCR ciblée associant les protéines bactériennes *oprL*, *gyrB* et *ecfX* s'est montrée plus sensible et plus spécifique que la culture²⁵.

En pratique, la colonisation chronique est définie lorsque 3 expectorations sont rendues positives en culture, successivement au cours d'un suivi mensuel ou bimensuel²⁴. Une

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

autre classification, celle de Lee²⁷ définit 4 groupes (Tableau 1) :

chronique	> 50% des cultures sont positives sur 12 mois
intermédiaire	≤ 50% des cultures sont positives sur 12 mois
Free	Toute culture négative sur 12 mois, avec des antécédents
Never	Toute culture négative sur 12 mois sans antécédents

TABLE 1 – Classification de Lee²⁷

On ne sait pas aujourd'hui pourquoi *Pseudomonas aeruginosa* s'installe préférentiellement chez les patients atteints de mucoviscidose. Plusieurs hypothèses ont été proposées :

Déshydratation du mucus⁹ : La mutation *CFTR* serait responsable d'un mucus plus visqueux et moins épais associé à une 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 salinité⁹ : 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 cellules⁹ : *P.aeruginosa* serait un ligand nature des cellules 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 lactate⁶ 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 écologique.

Une anomalie du microbiote²¹ : Le microbiote jouerait le rôle de barrière à agents pathogènes. Une dysbiose 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 pour mettre en évidence le microbiote pulmonaire^{21;3;13}.

L'arbre respiratoire chez le fœtus^{iv} est stérile. Il se colonise comme l'intestin, à la naissance en traversant la filière génitale puis se différencie avec le temps. Il est beaucoup moins riche que le microbiote digestif, mais plus dynamique en raison d'un flux aérien bidirectionnel. Les bactéries du microbiote proviennent de l'air ambiant, des voies supérieures, mais aussi du tube digestif par des micro aspirations¹¹. Une étude a d'ailleurs

iv. Un article récent critique l'idée d'un fœtus stérile³⁶

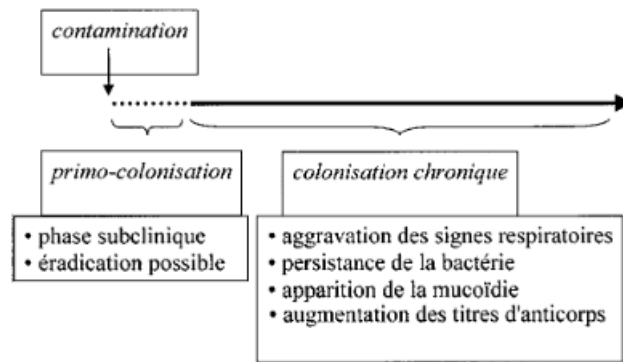


FIGURE 7 – Infection pulmonaire à *P.aeruginosa* dans la mucoviscidose (P.Plésiat 2003³⁷).

montré une concordance entre le microbiote digestif et respiratoire¹¹.

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 *Porphyromonas*. L'arbre respiratoire étant en continuité direct avec les voies aériennes supérieures, certains genres bactériens sont communs, comme *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Haemophilus* et *Moraxella*. Tandis que d'autres genres comme *Corynebacterium* et *Dolosigranulum* ne sont retrouvés qu'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 aérobie stricte. D'autres études^{16;8} ont montré que la diversité diminue avec l'âge ou encore que la structure du microbiote change avec une exposition tabagique. Enfin les pathologies respiratoires²¹ sont une autre source de variabilité. Il est par exemple 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^{12;34}.

Il semble cependant que ce soit l'individu lui-même qui soit la principale source de variabilité avant tout autre facteur⁵⁰. C'est-à-dire que l'environnement et le génome d'un individu sont les principaux déterminants du microbiote pulmonaire.

Exploration du microbiote pulmonaire

Méthode 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 (cubicath, 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 (ECBC). Dans ces dernières, la qualité du prélèvement peut être évaluée en comptant le nombre de cellules épithélium (normalement < 25 par champ à l'objectif x10) et de polynucléaire (normalement > 10 par champ à l'objectif x10) selon le score de Bartlett (REMIC 2015). 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 800pb 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 150pb. Mais la parallélisation peut aller jusqu'à 20 milliards de fois en un seul run sur un Illumina Novaseq.

2 stratégies de séquençages sont utilisées en écologie microbienne :

La stratégie *shotgun* consiste à séquencer l'ensemble des ADN présents dans l'échantillon sans discernement, que ce soit humain ou bactérien. 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'ARN 16S.

L'ARN 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 8). L'alignement des séquences d'ADNr 16S entre plusieurs espèces met en évidence des régions constantes et 9 régions variables (Figure 9). 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.

En séquençant l'ensemble des génomes bactériens, la stratégie *shotgun* est plus in-

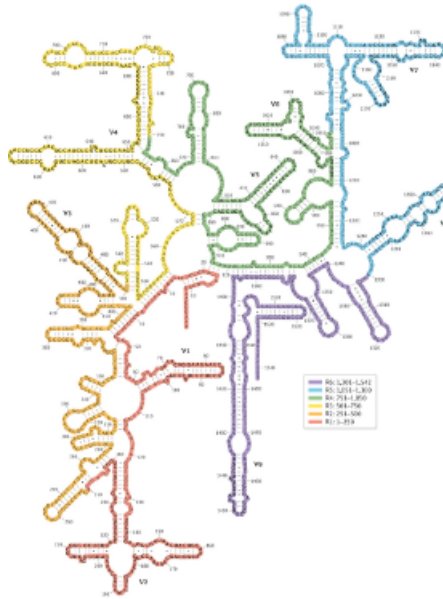


FIGURE 8 – Structure secondaire de l'ARN 16S

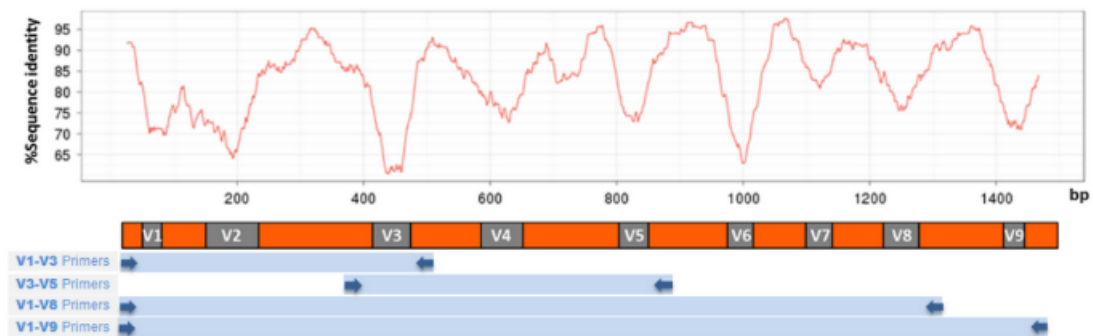


FIGURE 9 – Régions constantes et variables de l'ADNr 16S

formative, 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 général de l'étude MUCOBIOME est de savoir si dans la mucoviscidose, le microbiote respiratoire influence la colonisation à *Pseudomonas aeruginosa*. Pour cela, nous avons suivi pendant 3 ans, une cohorte de 47 patients atteints de mucoviscidose exempts de *Pseudomonas aeruginosa* depuis au moins 1 an. L'exploration de leur micro-

biote par la stratégie 16S a été réalisée à partir d'expectorations bronchiques obtenues dans le cadre de leurs suivis longitudinal. À partir des données générées par le séquençage, nous avons effectué l'étude descriptive et analytique de leurs microbiotes en créant un pipeline bio-informatique dédié. L'objectif principal de ce travail a été la mise au point et l'évaluation de ce pipeline à façon pour l'étude MUCOBIOME.

Matériel et Méthodes

Recueil des données

Quatre-vingt-dix-sept 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 ECBC des patients ont été recueillies lors des séances de kinésithérapie respiratoire tous les 3 mois, suivant 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 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 PA 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 ont également été recueillies. Au total, 756 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 PA.

citer qq exemples de données (que tu exploiteras après) et préciser le score cytologique (à mettre dans les résultats : impact oui ou non sur les données du microbiote)

TABLE 2 – démographie

57 patients		
age	34	
	2.2	2.3

Extraction de l'ADN

La procédure d'extraction des ADN des échantillons est détaillée dans la publication de F. Gall²⁵. 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 par un 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 300pb (Figure 10). Après fusion du couple, le séquençage permet de lire 535pb correspondants à la région V3-V5.

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

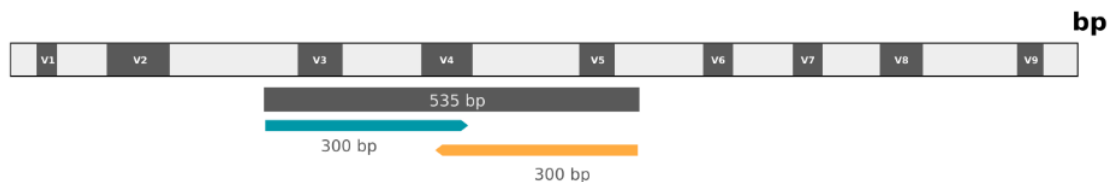


FIGURE 10 – le couple de séquence de 300pb permet de recouvrir l'ensemble de la région V3-V5 de l'ARN 16S

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. Par rapport aux autres logiciels comme *QIIME*⁷ ou *MOTHUR*⁴², le pipeline mucobiome est spécialisé dans l'analyse des données 16S. Il est également plus rapide en raison d'un très haut niveau de parallélisation permis grâce à *Snakemake*²³. 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 11 et

12 illustrent toutes les étapes du pipeline qui sont décrites ci-dessous.

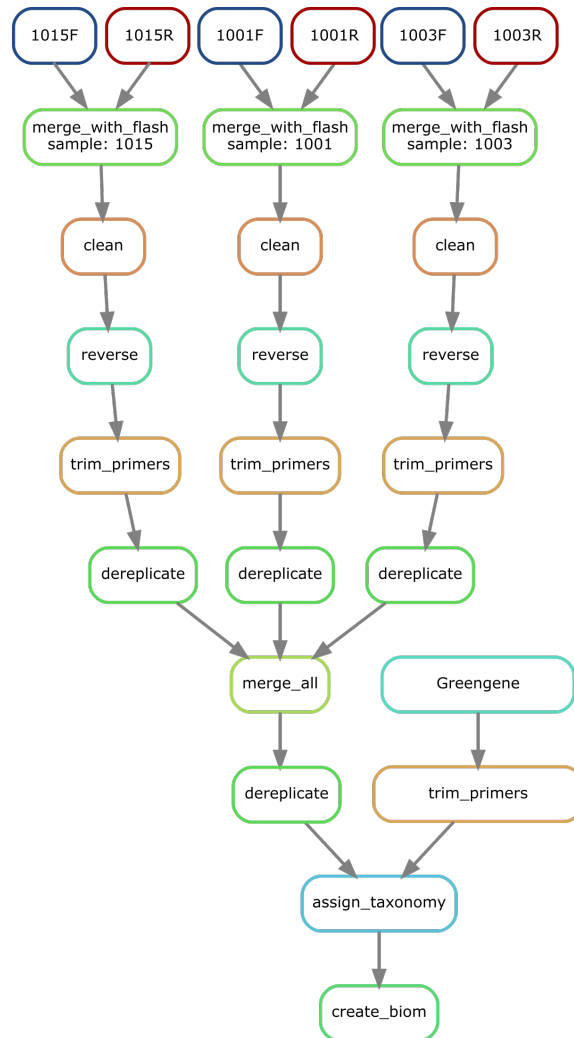


FIGURE 11 – Graphe du pipeline simplifié sur 3 échantillons 1015, 1001 et 1003.

Merging : Les reads pairs de 300pb sont fusionnés pour produire un fichier fastq contenant des reads de 535pb. **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 OTU est créée

Étape 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 535pb correspondant à

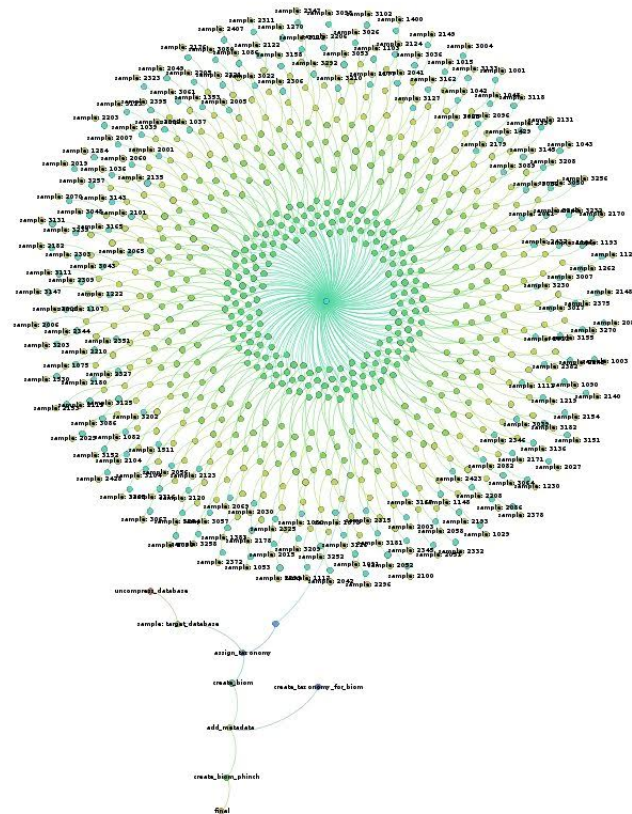


FIGURE 12 – le graphe du pipeline sur l'ensemble des échantillons. Le tournesol montre le niveau de parallélisation nécessaire.

la région V3-V5 de l'ARN 16S. Le programme **Flash**²⁹ 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 **FastQt**⁴⁴ 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 important de supprimer les reads de mauvaise qualité pour gagner en spécificité. (expliquer la qualité). Le filtrage des reads de mauvaise qualité est réalisé avec le programme **sickle**²². Son algorithme repose sur l'utilisation d'une fenêtre glissante de taille définie (par défaut : 20pb). 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 20pb. Une analyse qualitative des reads a été réalisée avec **FastQt**⁴⁴ après le filtrage.

Reversing : Séquence complémentaire

1 fastq en entrée 1 fasta en sortie.

Les reads produits par le séquenceur ne sont pas orientés dans le même sens que la base de données *Greengene*¹⁰. Pour permettre l'alignement, les séquences ont été remplacées par leurs séquences complémentaires grâce au programme **seqtk**¹⁹. Par la même occasion les scores de qualités devenus inutiles sont supprimés. Les séquences sont sauvegardées dans un fichier fasta.

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 **cutadapt**³¹ 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'assignement 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**⁴⁶ 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 13 – Exemple de déréplication d'un fichier fasta

Assignement taxonomique

2 fasta en entrée, 1 fichier biom en sortie.

L'assignement taxonomique consiste à labelliser 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 98% 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*¹⁰ version mai 2013 a été utilisée. Il s'agit d'un fichier fasta contenant 1 262 986 séquences et 203 452 OTUs.

L'autre stratégie d'assignement *de novo* n'a pas été utilisée. Cette dernière, de complexité N^2 , consiste à comparer les reads entre eux pour former des groupes. Elle s'emploie de préférence pour détecter les bactéries absentes des bases de données.

L'assignement 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**³². 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. L'abondance absolue et relative, la prévalence et la dominance de chaque genre a été mesuré. Les diversité 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 microbiota⁴⁸ 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.

Résultat

Séquençage et pipeline

Données de séquençage

Après démultiplexage, 188 x 2 fichiers Fastq ont été générés soit deux fichiers par échantillons. 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 14). 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.

Qualité des reads

La figure 15 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, x% des reads pairs n'ont pas réussi à fusionner. L'étape de filtrage a permis de ramener la qualité médiane au-dessus de 20 (Figure 16). Au total seulement 49.24% des reads sont conservés pour l'analyse (Figure 14) avec des bornes allant de 37,30% à 61,13%.

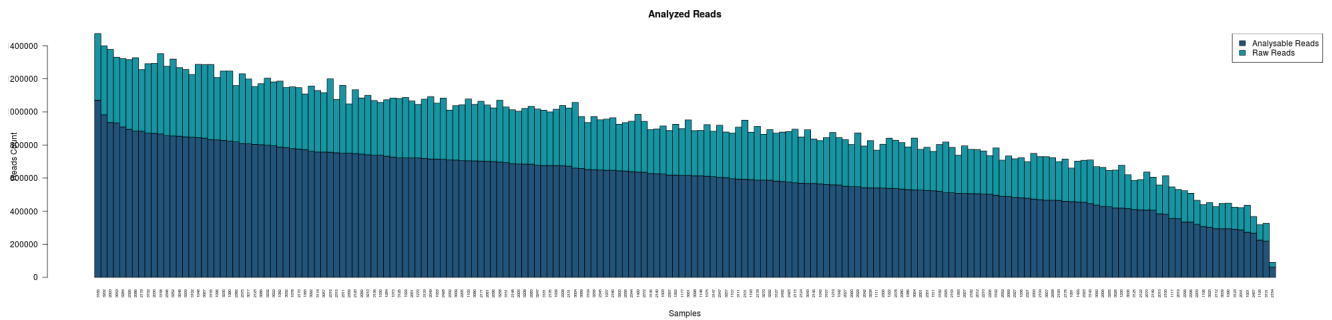
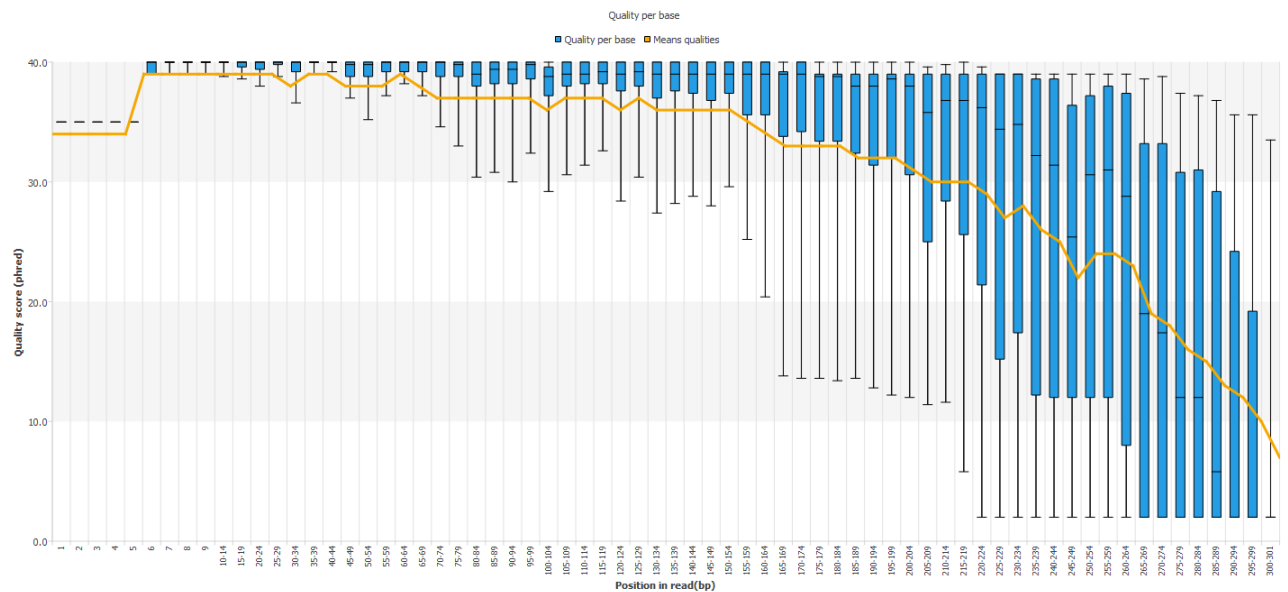


FIGURE 14 – Nombre de reads par échantillons

FIGURE 15 – Qualité par nucléotide des reads forward de l'échantillon 1003. **Axe X** : la position sur le read. **Axe Y** : La distribution des qualités

Assignement taxonomique

99.88% (4615960) des reads analysables ont reçu une assignation taxonomique soit 10517 OTUs détectés^v correspondant à 54 genres bactériens (Figure 17). Le temps de calcul a été de 1 h 29 et a nécessité 40 cœurs et 20 gigaoctets de mémoire contre 21h de calcul sans l'optimisation par déréduplication.

Profondeur d'échantillonnage

La figure 18 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.

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

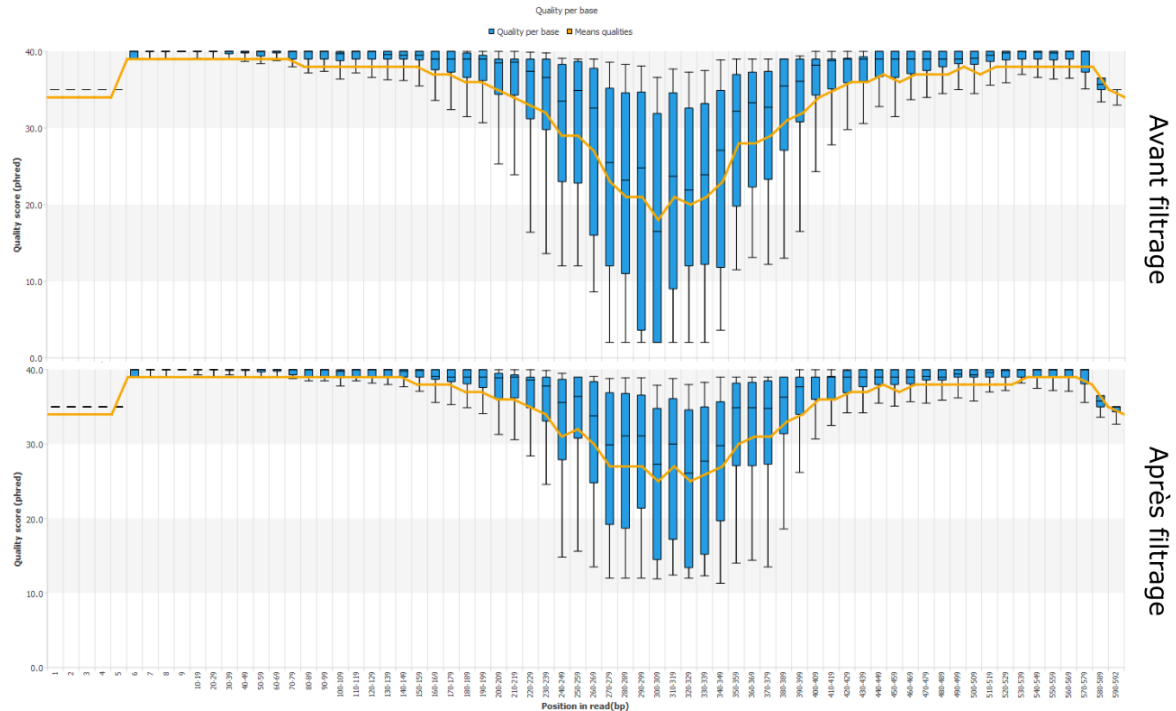


FIGURE 16 – Qualité par nucléotide des reads fusionnés pour l'échantillon 1003

Résultats descriptifs

Composition du microbiote

Cinquante-quatre genres (Figure 17) et sept phylums (Figure 19) bactériens sont retrouvés dans l'ensemble des échantillons analysés. Les deux phyla majoritaires sont *Firmicute* (42.59%) et *Proteobacteria* (31.48%). Parmi les *Firmicutes* majoritaires, on retrouve *Streptococcus* et *Staphylococcus*. Chez *Proteobacteria*, *Neisseria* et *Haemophilus* sont les genres les plus abondants. Le tableau de la figure 20 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 genres sont dominants. Il s'agit de *Streptococcus*, *Neisseria*, *Haemophilus* et *Staphylococcus*. *Sténotrophomonas* 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 15 genres bactériens (Figure 21). Sa distribution est illustrée dans la figure 22. *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

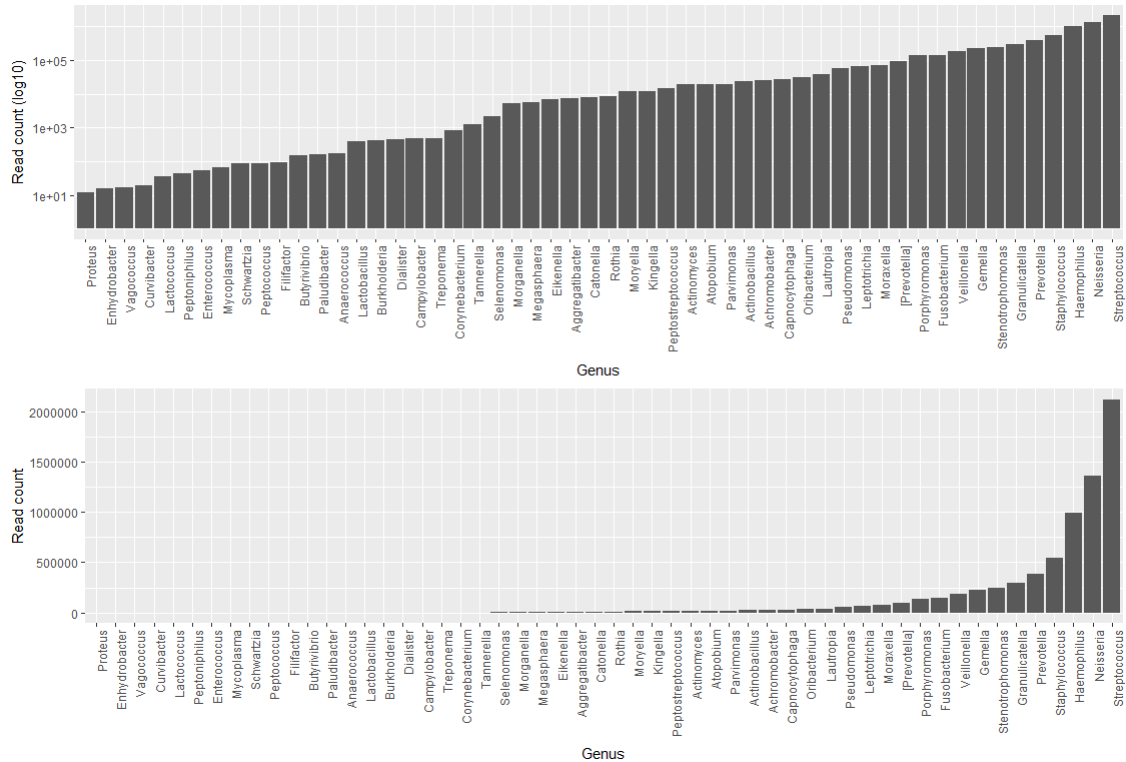


FIGURE 17 – Nombre de reads par genre bactérien

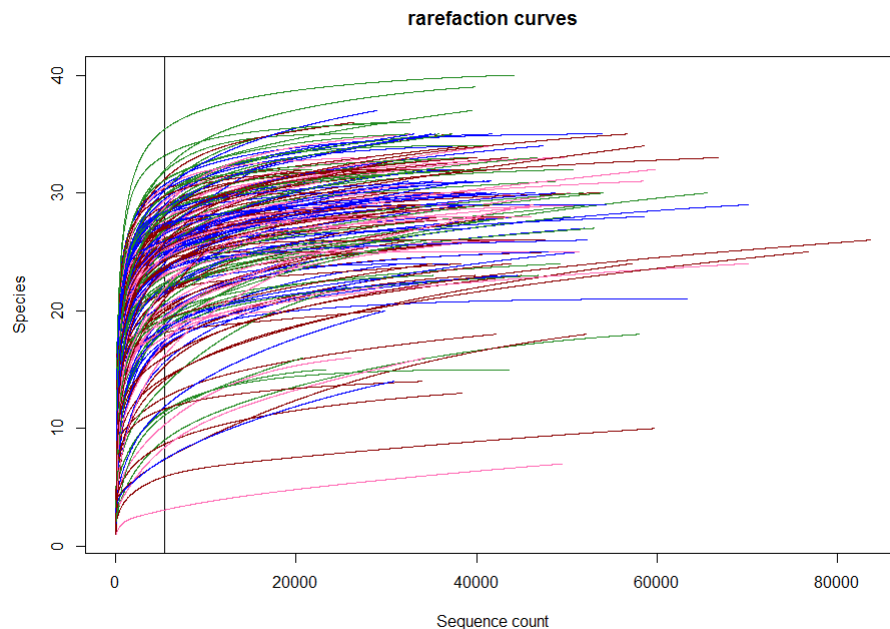


FIGURE 18 – Courbe de raréfaction

18%. Les abondances de *Staphylococcus* et *Haemophilus* sont faibles dans la plupart des échantillons. Mais pour quelques échantillons, ces genres sont dominants. Les autres

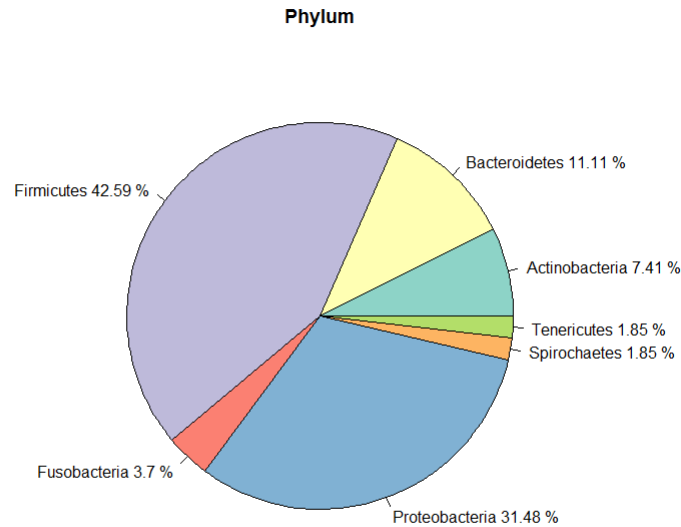


FIGURE 19 – Phylums retrouvés dans les 188 échantillons

genres ont une abondance faible qui varie faiblement. Elles ne sont jamais retrouvées comme dominants.

Évolution de l'alpha diversité

Les figures 35,36 et 37 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 25,26,74 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, 35 mais son indice de shannon varie sur la figure 37 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.

Évolution des abondances

Les figures 32, 33 et 34 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 précédente. Par exemple la diminution de richesse du pa-

	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>Elkenella</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 20 – Nombre de reads - Moyenne des abondances relatives - écart-type des abondances relatives - plus petite abondance relative - plus grande abondance relative - Nombre d'échantillon ou le genre est présent - Nombre d'échantillon ou le genre est dominant

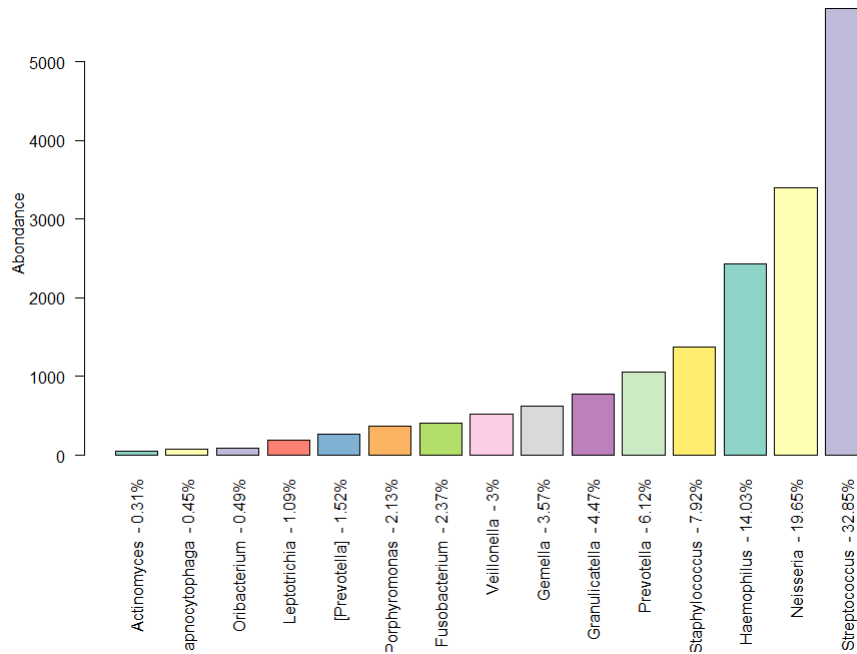


FIGURE 21 – Distribution du core microbiota dans l'ensemble des échantillons

tient 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 *Sténotrophomonas* 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 complète à *Haemophilus*.

Dans l'ensemble, il existe deux types de population bactérienne : une population de bactéries constantes et minoritaires (*Fusobacterium*, *Granulicatella*, *Gemella*, *Veillonella*, *Parvimonas*, *Leptotrichia*, *Oribacterium*, *Capnoctophaga*, *Catonella*) ; une autre population de bactéries très fluctuantes dans le temps jouant alternativement le rôle de genre dominant ou au contraire du genre absent. (*Haemophilus*, *Streptococcus*, *Neisseria* et *Prevotella*). La figure 23 zoom sur le patient 43 pour montrer ces deux populations. La figure du patient 24 est mise également à titre exemple, car elle montre l'apparition de *Pseudomonas aeruginosa*.

Bêta Diversité

La bêta diversité sur l'ensemble des échantillons a été réalisé par une méthode d'ordination de type PCoA en utilisant les distances de Bray-Curtis (Figure 25,26 et 29). 2 axes principaux expliquent respectivement 28.5% et 17.4% de la variabilité. Certains

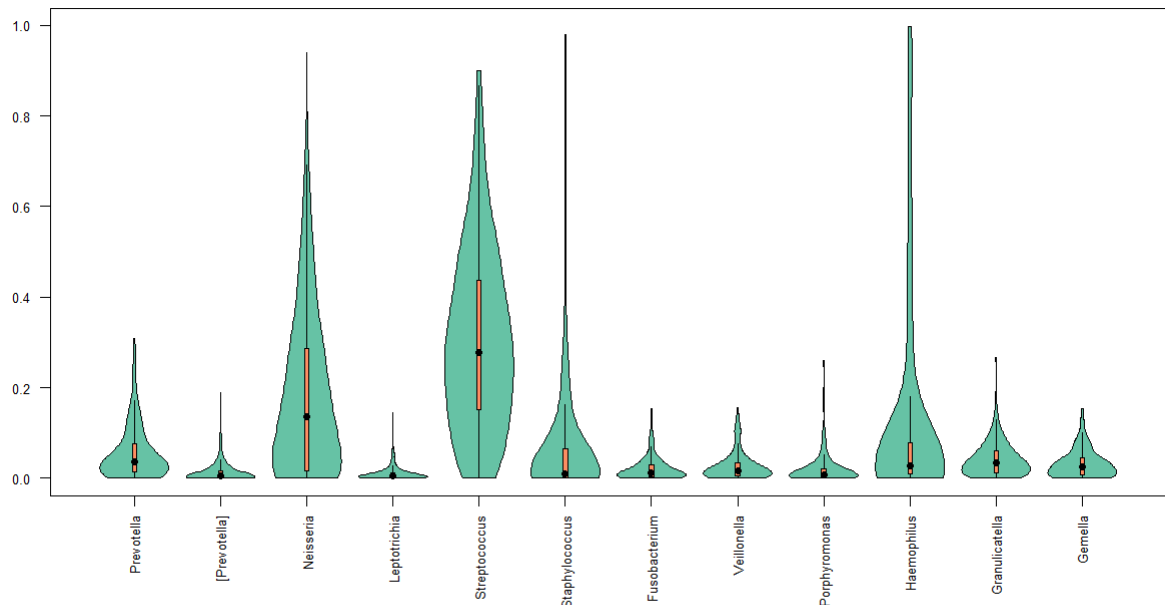


FIGURE 22 – Variation du core microbiota dans l'ensemble des échantillons

échantillons d'un même patient sont très proches sur le graphique d'ordination. Par exemple le patient 69 et 003 ont des échantillons dont les points se confondent. Aucune des analyses tenant compte des paramètres biocliniques colligés pendant l'étude MUCOBIOME comme 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 26.

Présence de *P.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 est faible. Sur les 48, 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 3 et 4 comparent le nombre d'échantillons contenant de l'ADNr de *P.aeruginosa* avec la PCR et la culture.

Résultats analytiques

Corrélation entre les genres bactériens

La figure 27 montre les corrélations linéaires réalisées entre les genres du core microbiota. La corrélation la plus forte est entre *Prevotella* et *Veillonella* avec un coefficient

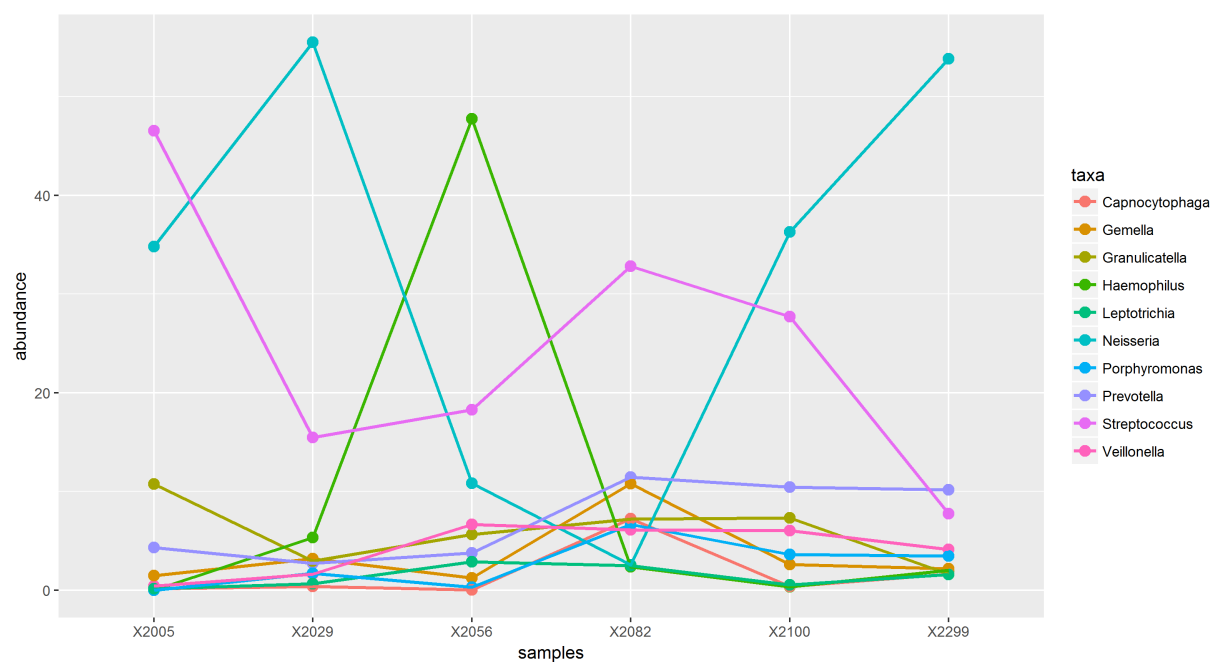


FIGURE 23 – Évolution des abondances pour le patient 43. Notez la population stable et la population fluctuante

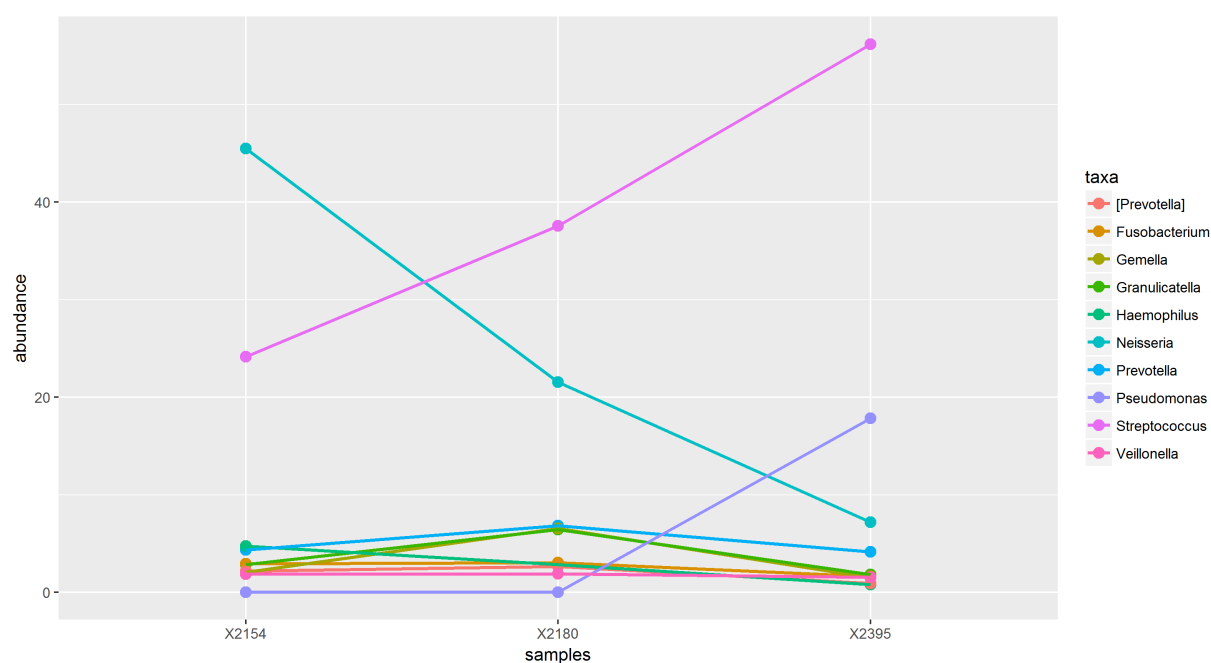


FIGURE 24 – Évolution des abondances pour le patient 54. Notez l'apparition de *Pseudomonas* dans le dernier échantillon

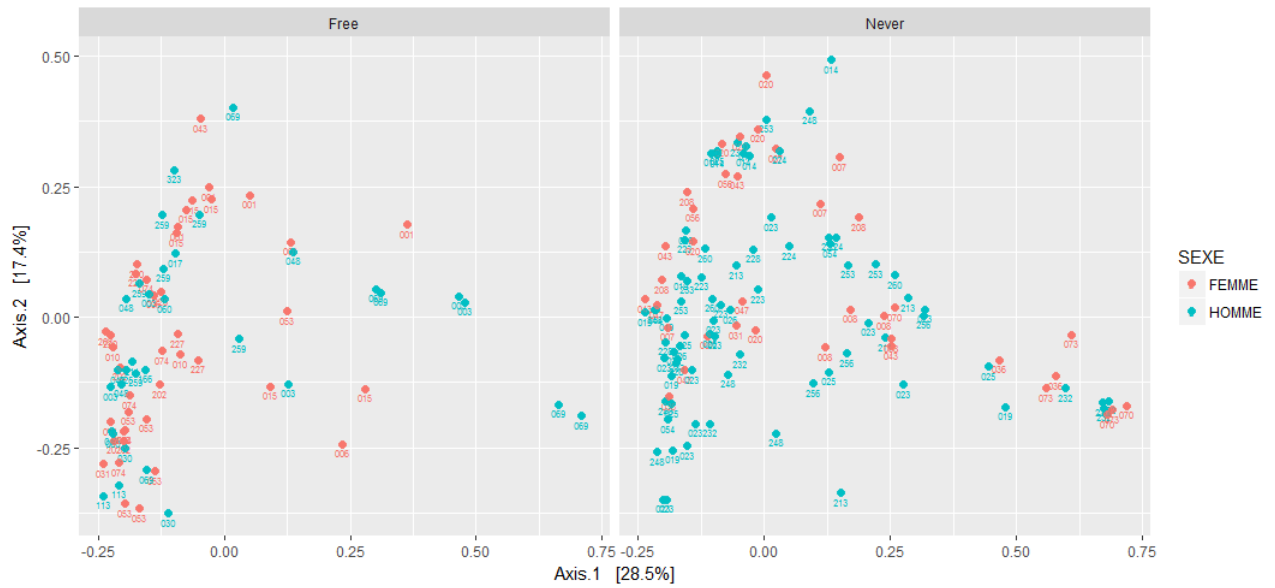


FIGURE 25 – Analyse en coordonnées principales sur les 188 échantillons en utilisant les distances de Bray-curtis. Chaque point est un échantillon labellisé par l'identifiant du patient. À gauche les échantillons Free. À droite les échantillons Never.



FIGURE 26 – Analyse en coordonnées principales sur les 188 échantillons. La variabilité s'explique principalement par *Haemophilus*, *Streptococcus* et *Neisseria*

	PCR négative	PCR positive
16S absent	141	31
16S present	1	15

TABLE 3 – Concordance entre la présence d'ADNr 16S de *Pseudomonas* et sa détection en PCR oprL

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

TABLE 4 – Concordance entre la présence d'ADNr 16S de *Pyo* et sa détection en culture

de Pearson à 0.60. *Streptococcus* et *Haemophilus* évoluent dans le sens inverse avec un coefficient à -0.41.

Comparaison entre échantillons Free et Never

La figure 28 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 29 est une analyse multivariée discriminant 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 p-value < 0.001.

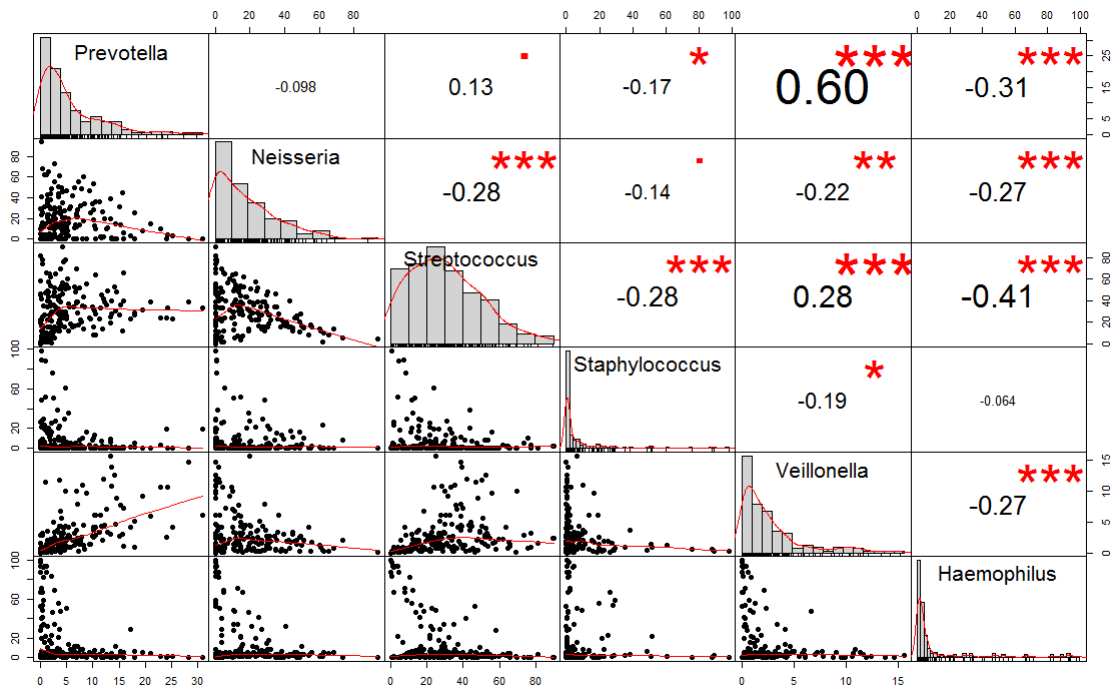


FIGURE 27 – Corrélation des abondances entre les genres du core microbiota

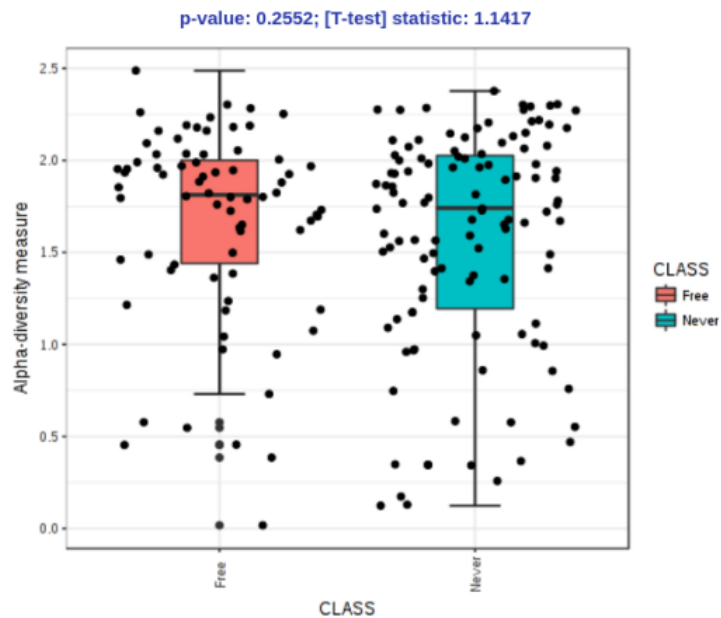


FIGURE 28 – Comparaison des diversités de Shannon entre les échantillons Free et Never

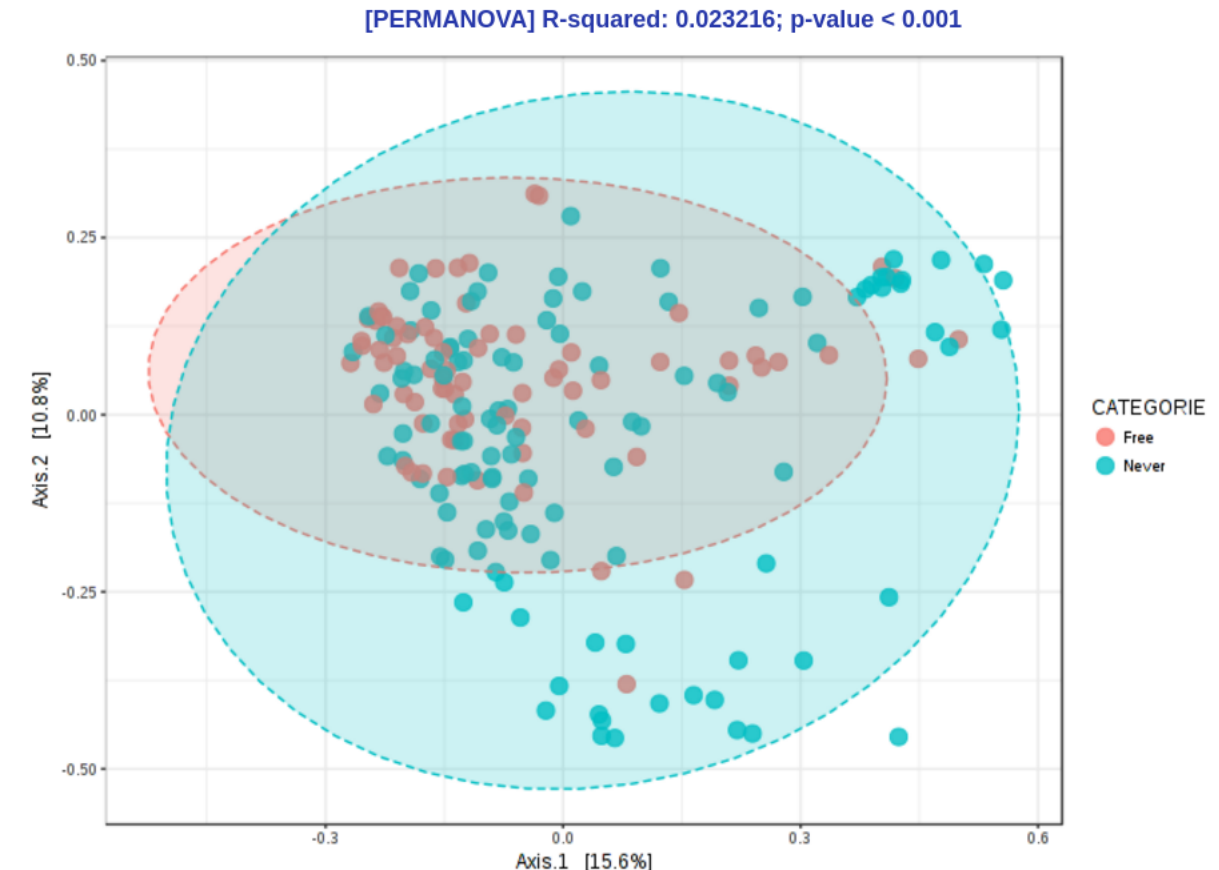


FIGURE 29 – Permanova entre les échantillons Free et Never sur une PCoA en utilisant la distance de Bray-Curtis

Discussion

Production des données

Séquençage

La version 3 du kit MiSeq Reagent Kit produit des reads plus longs (300pb) que dans la version précédente (250pb) afin d'augmenter la précision de l'assignation taxonomique (Figure 30). 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 d'ADNr 16S différente, nous pourrions augmenter la taille du chevauchement pour gagner en profondeur, mais en diminuant la taille des reads.

Les séquenceurs de 3e générations comme le Mini Ion (Oxford Nanopore) ou le PacBio (Pacific Bioscience) apporteraient un avantage certain. Ces derniers sont capables de

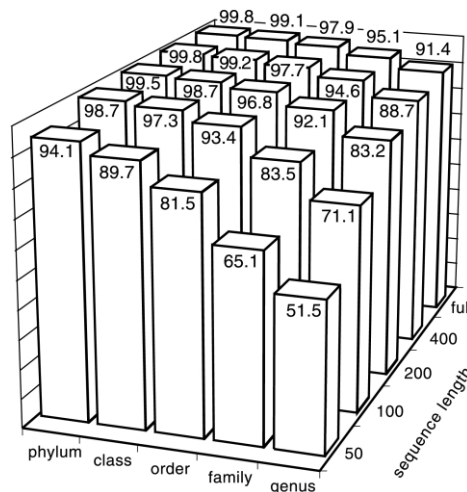


FIGURE 30 – Sensibilité de détection de la stratégie 16S en fonction de la longueur des reads. (Wang et al. Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy)

produire des reads très longs (10 000pb en moyenne) et pourraient facilement séquencer l'intégralité de l'ARN 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^{49;4} ont déjà montré que leurs résolutions taxonomiques atteignent facilement celui de l'espèce.

Pipeline

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 fixée arbitrairement à 97%. D'autres algorithmes permettent de s'affranchir de ce seuil. Il s'agit par exemple de la clusterisation par calcul d'entropie maximum *Maximum entropy clusterisation*¹.

Méthode d'analyse

Parmi les analyses de bêta diversité, seule l'analyse en coordonnées principales a été présentée en utilisant la distance de Bray-Curtis. Nous avons également réalisé d'autres ordinations qui n'ont pas été concluantes. Par exemple en changer le type de distance

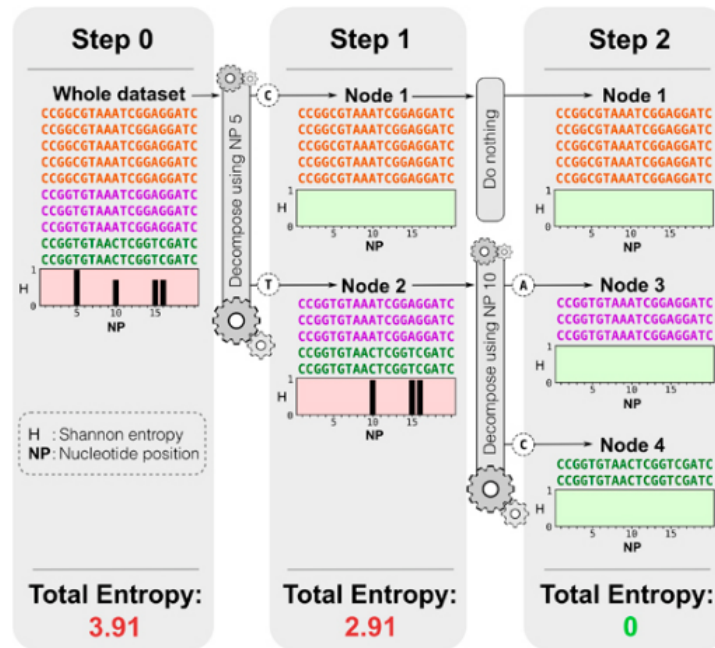


FIGURE 31 – Principe de la décomposition par entropie minimum. Étape 1 : les reads sont alignés. L'entropie H est calculée pour chaque position nucléotidique. Étape 2 : La position ayant la plus forte entropie est utilisée pour discriminer deux groupes. Étape 3 : Le processus est répété jusqu'à atteindre une entropie totale de 0

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 UniFrac²⁸ pourrait alors remplacer la distance de Bray-Curtis en prenant en considération la phylogénie des bactéries.

Analyse des données

Principaux phylums

Par rapport aux données chez les sujets sains³⁰, 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 meta-analyse de *Nature* 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 sont retrouvés, avec notamment *Prevotella* et *Veillonella*. La corrélation forte entre ces deux genres (coefficient de Pearson = 0.60) a été décrite dans le microbiote intestinal¹⁴. La signification clinique de la présence des anaérobies est encore incertaine⁴⁷.

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^{45;20} ont montré qu'il peut y avoir exacerbations sans infection et inversement. Une des hypothèses suggère que l'anomalie du *CFTR* soit directement responsable d'un terrain pro-inflammatoire.

Présence de *Pseudomonas*

Sur les 188 échantillons, 22 étaient positifs en culture à *Pseudomonas aeruginosa* correspondant aux endpoints de l'étude. En considérant arbitrairement la méthode 16S comme un gold standard, les tableaux 3 et 4 nous permettent de mesurer la sensibilité et la spécificité de la PCR et la culture. Ainsi la PCR 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. Ces résultats confirment les résultats déjà décrits au laboratoire²⁵ avec les marqueurs oprL et la nécessité de coupler une PCR plus spécifique avec les marqueurs gyrB/ecfX.

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

Patient Free et Never

Les patients selon leur appartenance aux catégories Never et Free²⁷, 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, ni dans leur diversité alpha ni dans la composition de leur microbiote. Il semble donc ressortir de l'étude que le microbiote dépend avant tout du sens.

Hétérogénéité des microbiotes

Nos résultats de diversité alpha et bêta montrent la grande variabilité du microbiote respiratoire. Ils sont différents entre les patients et changent rapidement au cours du temps. Aucune des données recueillies (Sexe, Âge, Poids, IMC , type de mutation, Score cytologique, prise d'antibiotique) n'a permis de distinguer des catégories de microbiote. Il est assez étonnant que même la prise d'antibiotique ne permette de distinguer des groupes. Ceci s'explique probablement par la capacité de résilience, c'est-à-dire une capacité de revenir vers un état précédent ultérieur au traitement. 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.

Limite de l'étude

Plusieurs points sont à prendre en considération pour critiquer la justesse des résultats. Premièrement, les ADN séquencés proviennent d'expectoration bronchique ayant traversé les voies aériennes supérieures. Une contamination est toujours possible. Le score cytologique de Bartlett, n'a pas permis de discriminer des contaminations de l'oropharynx. Mais la présence de *Corynebacterium* dans certains échantillons est évocatrice. De plus, la stratégie 16S ne fait la distinction entre des bactéries mortes et vivantes biaisant ce qui biaise encore l'estimation des abondances. Dans l'idéal il faudrait réaliser des prélèvements invasifs 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 évoqué plus haut, seraient idéales pour atteindre le niveau taxonomique de l'espèce.

Conclusion

Le séquençage de l'ARN 16S a été réalisé sur 188 expectorations bronchiques de patient atteint de mucoviscidose avec un pipeline bio-informatique dédié. Malgré la faible qualité du séquençage, plus de 99% des reads ont reçu une assignation taxonomique atteignant le rang du genre. L'augmentation des *Proteobacteria* évoqués dans d'autres études est retrouvée. Les analyses de diversités ont montré une grande hétérogénéité des microbiotes entre les patients et une variabilité dans le temps. Ni les données contextuelles ni les catégories de Lee n'ont montré une différence significative en termes de diversité. Une étude longitudinale avec une résolution temporelle plus importante serait intéressante pour évaluer la cinétique du microbiote. 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. La métagénomique fonctionnelle ou encore la PCR digitale apporterait ces éléments de réponse au prix de calcul informatique parfois très élevé.

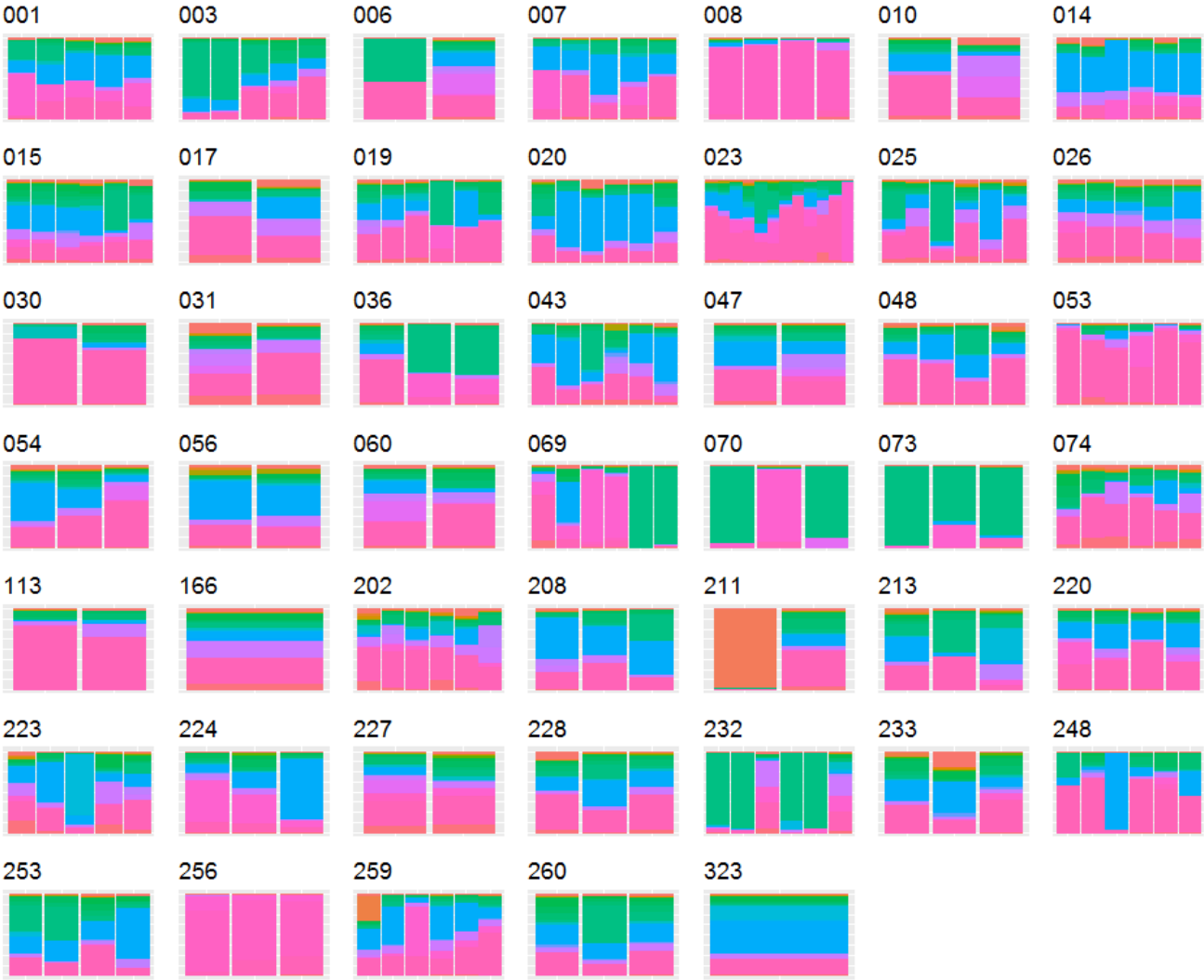


FIGURE 32 – Évolution des abondances par genre

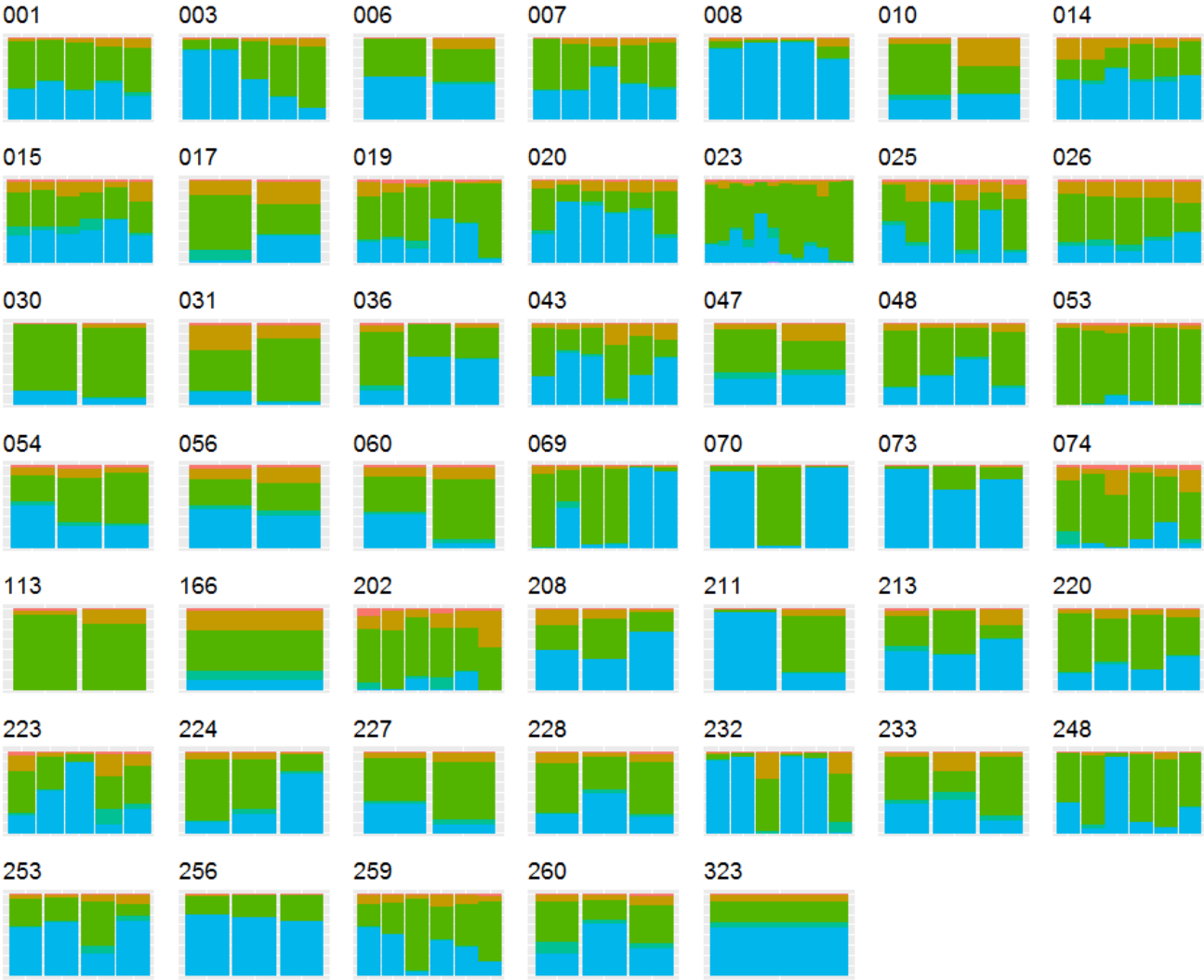
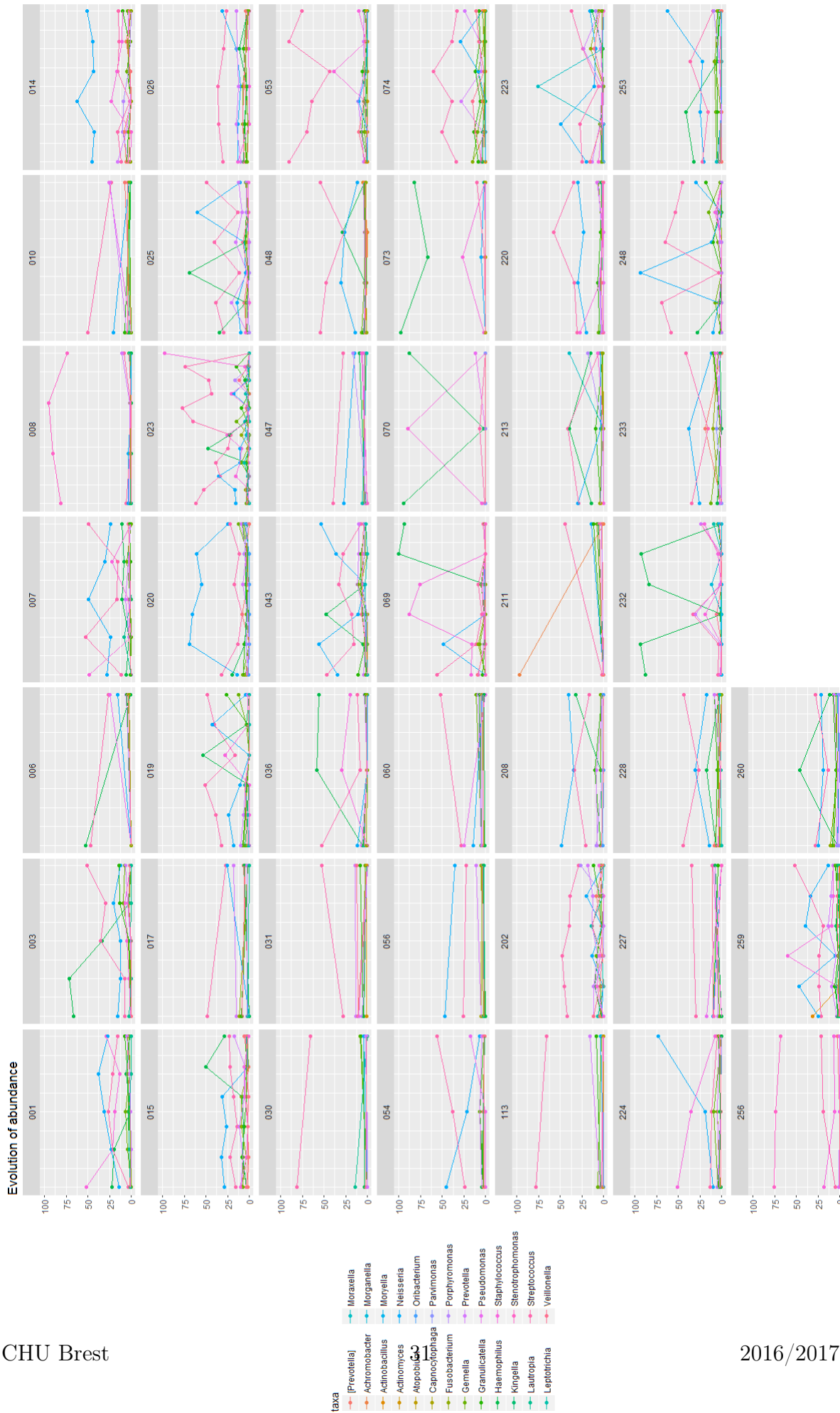


FIGURE 33 – Évolution des abondances par phylum



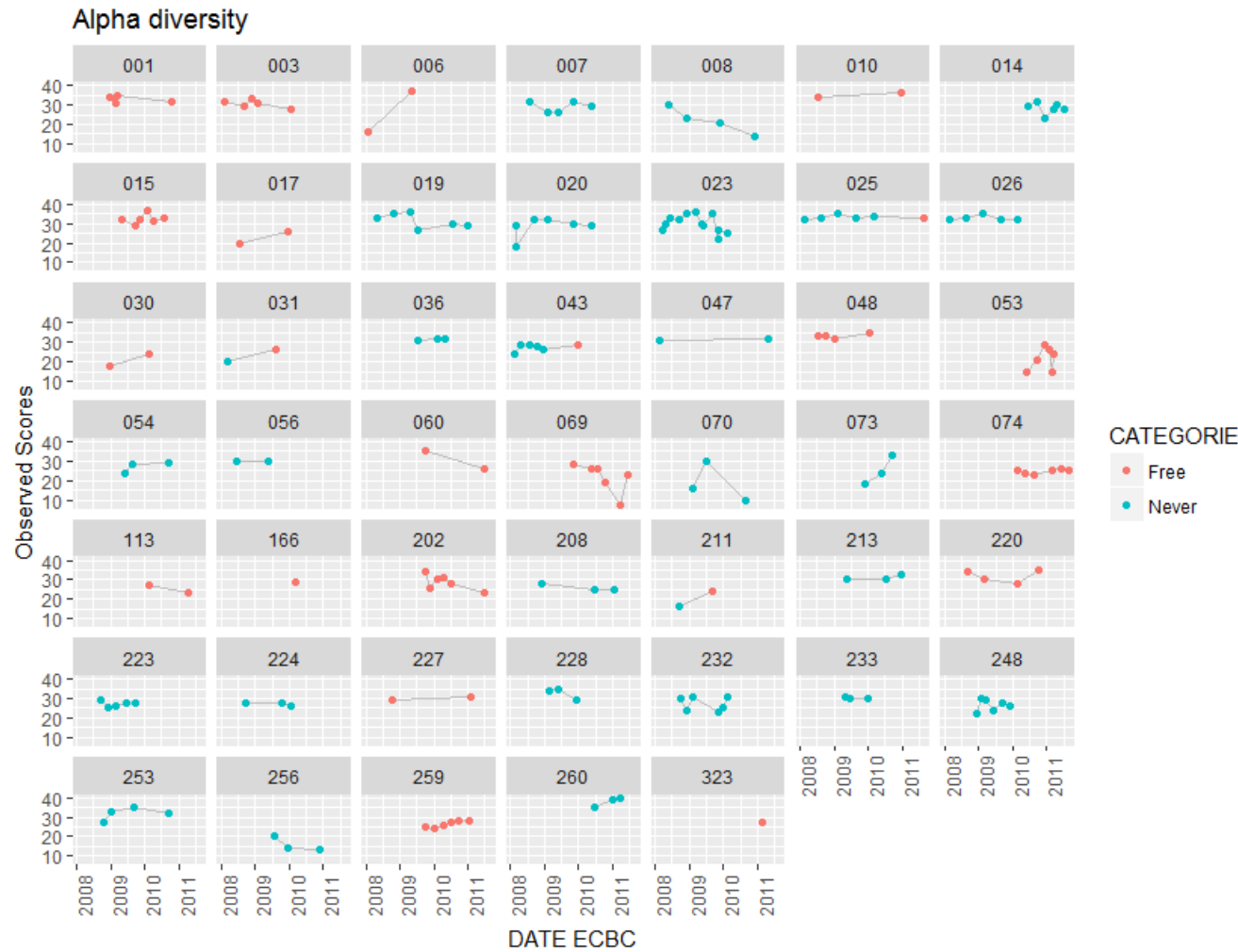


FIGURE 35 – Évolution du nombre d’espèces par patient en fonction du temps

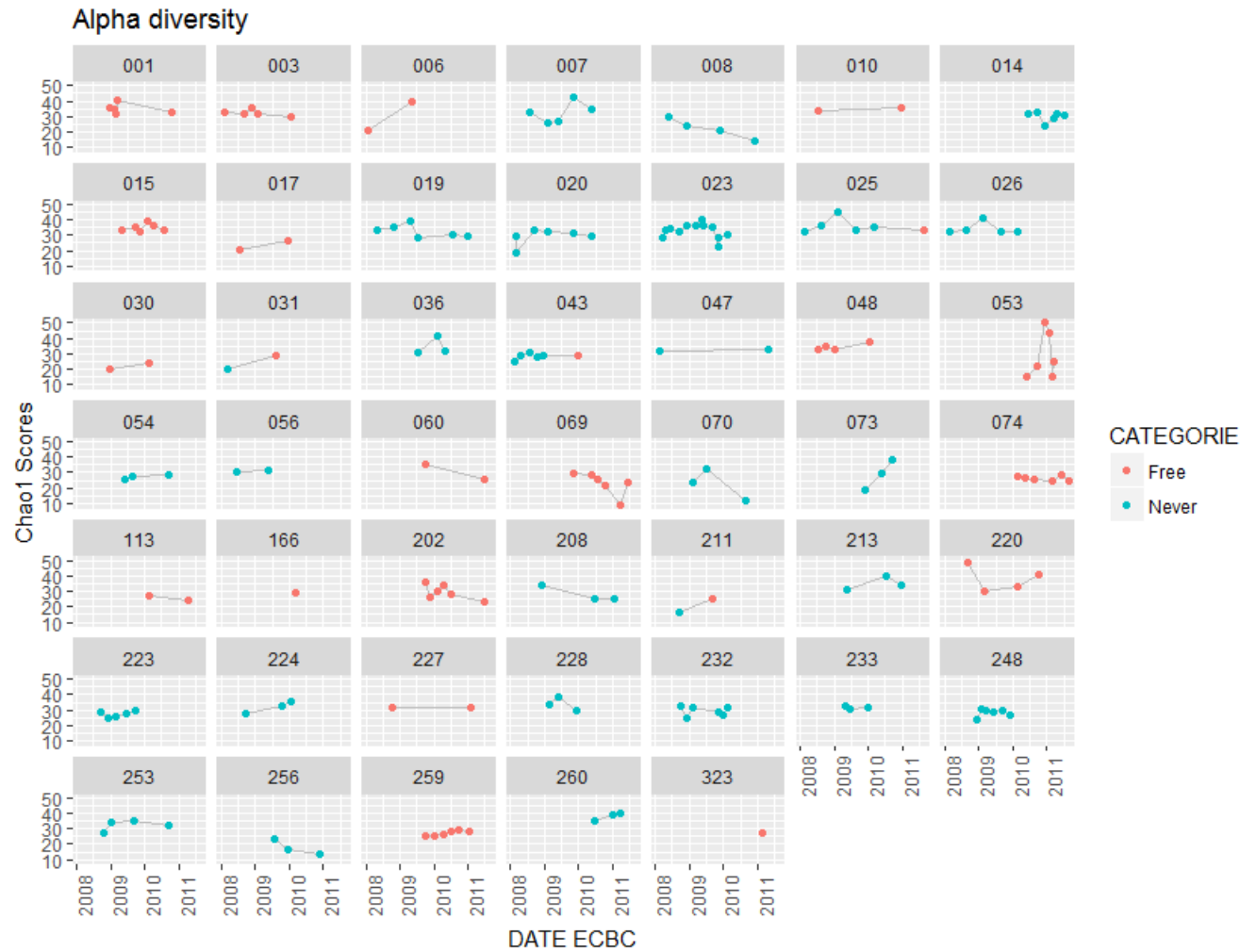


FIGURE 36 – Évolution de l'indice de Chao1 par patient en fonction du temps

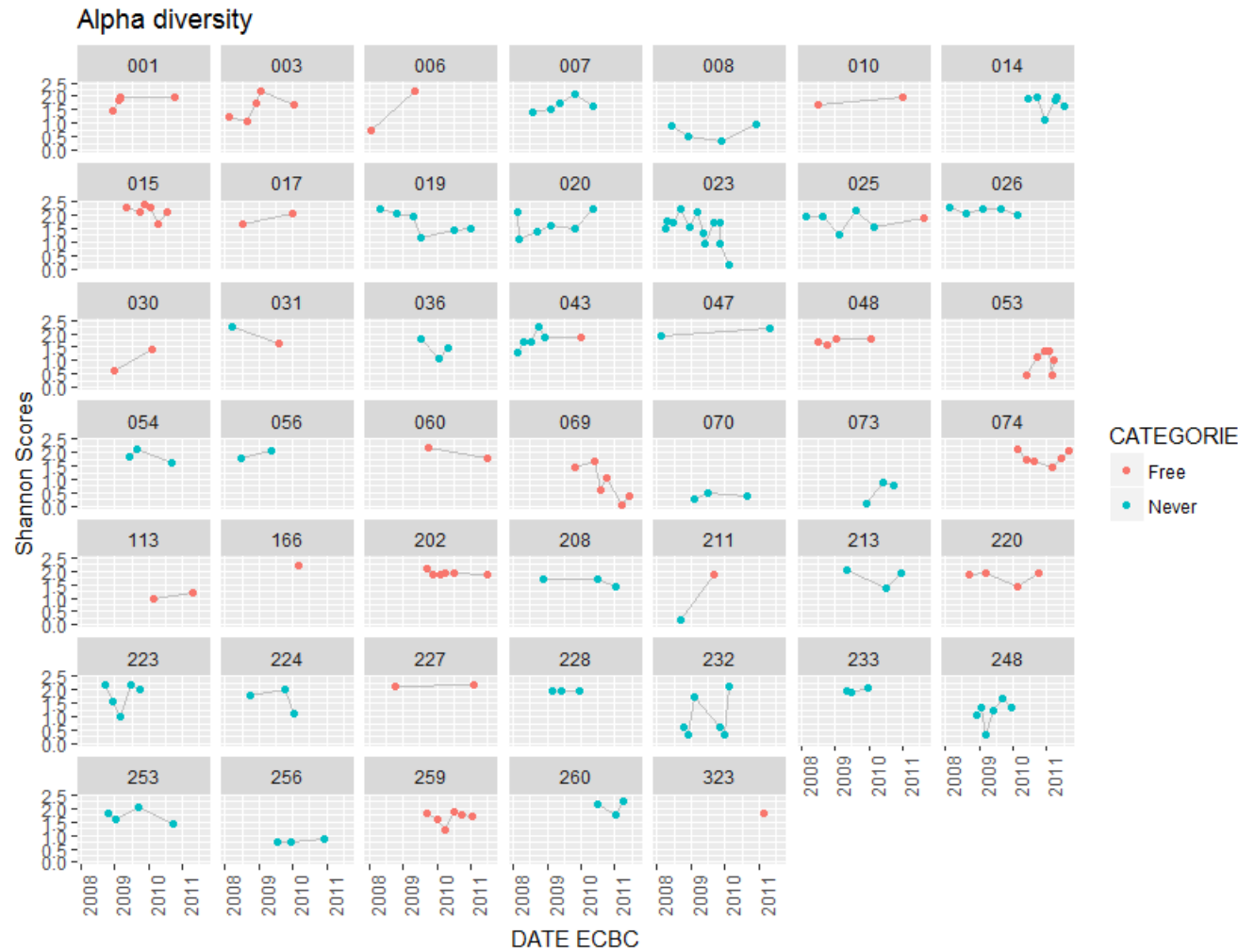


FIGURE 37 – Évolution de l'indice de Shanon par patient en fonction du temps

Références

- [1] Edwin Aldana-Bobadilla and Angel Kuri-Morales. A clustering method based on the maximum entropy principle. *Entropy*, 17(1) :151–180, 2015.
- [2] Jean-François Bach. The Effect of Infections on Susceptibility to Autoimmune and Allergic Diseases. *New England Journal of Medicine*, 347(12) :911–920, sep 2002.
- [3] James M Beck, Vincent B Young, and Gary B Huffnagle. The Microbiome of the Lung.
- [4] Alfonso Benítez-Páez, Kevin J. Portune, and Yolanda Sanz. Species-level resolution of 16S rRNA gene amplicons sequenced through the MinION™ portable nanopore sequencer. *GigaScience*, 5(1) :4, dec 2016.
- [5] Lars Bode. Human milk oligosaccharides : every baby needs a sugar mama. *Glycobiology*, 22(9) :1147–62, sep 2012.
- [6] Megan L Boulette, Patricia J Baynham, Peter A Jorth, Irena Kukavica-Ibrulj, Aissa Longoria, Karla Barrera, Roger C Levesque, and Marvin Whiteley. Characterization of alanine catabolism in *Pseudomonas aeruginosa* and its importance for proliferation in vivo. *Journal of bacteriology*, 191(20) :6329–34, oct 2009.
- [7] J Gregory Caporaso, Justin Kuczynski, Jesse Stombaugh, Kyle Bittinger, Frederic D Bushman, Elizabeth K Costello, Noah Fierer, Antonio Gonzalez Peña, Julia K Goodrich, Jeffrey I Gordon, Gavin A Huttenhower, Scott T Kelley, Dan Knights, Jeremy E Koenig, Ruth E Ley, Catherine A Lozupone, Daniel McDonald, Brian D Muegge, Meg Pirrung, Jens Reeder, Joel R Sevinsky, Peter J Turnbaugh, William A Walters, Jeremy Widmann, Tanya Yatsunenko, Jesse Zaneveld, and Rob Knight. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods*, 7(5) :335–336, may 2010.
- [8] Bryan Coburn, Pauline W Wang, Julio Diaz Caballero, Shawn T Clark, Vijaya Brahma, Sylva Donaldson, Yu Zhang, Anu Surendra, Yunchen Gong, D Elizabeth Tullis, Yvonne C W Yau, Valerie J Waters, David M Hwang, and David S Guttman. Lung microbiota across age and disease stage in cystic fibrosis. *Scientific reports*, 5 :10241, may 2015.
- [9] Jane C Davies. *Pseudomonas aeruginosa* in cystic fibrosis : pathogenesis and persistence THE MOLECULAR BASIS OF CYSTIC FIBROSIS.
- [10] 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*, 72(7) :5069–5072, jul 2006.
- [11] Robert P Dickson, John R Erb-Downward, and Gary B Huffnagle. The Role of the Bacterial Microbiome in Lung Disease.
- [12] Robert P Dickson, John R Erb-Downward, and Gary B Huffnagle. The Role of the Bacterial Microbiome in Lung Disease.
- [13] Robert P Dickson and Gary B Huffnagle. The Lung Microbiome : New Principles for Respiratory Bacteriology in Health and Disease.
- [14] Aldona Dlugosz, Björn Winckler, Elin Lundin, Katherina Zakikhany, Gunnar Sandström, Weimin Ye, Lars Engstrand, and Greger Lindberg. No difference in small bowel microbiota between patients with irritable bowel syndrome and healthy controls. *Scientific Reports*, 5(1) :8508, jul 2015.
- [15] Jonathan 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>.
- [16] Katherine B Frayman, David S Armstrong, Rosemary Carzino, Thomas W Ferkol, Keith Grimwood, Gregory A Storch, Shu Mei Teo, Kristine M Wylie, and Sarath C Ranganathan. The lower airway microbiota in early cystic fibrosis lung disease : a longitudinal analysis. *Thorax*, pages thoraxjnl–2016–209279, 2017.
- [17] Genet.sickkids.on.ca. Cystic Fibrosis Mutation Database.
- [18] 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.P. Brechard, V. Pritchard, M. Koenig, M. Claustres, and M.C. 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*, 16(2) :198–206, mar 2017.
- [19] H. Li. Seqtk : a fast and lightweight tool for processing FASTA or FASTQ sequences, 2013. <https://github.com/lh3/seqtk>.
- [20] Harry Heijerman. Infection and inflammation in cystic fibrosis : A short review. 2005.
- [21] Wing Ho Man, Wouter AA de Steenhuijsen Piters, and Debby Bogaert. The microbiota of the respiratory tract : gatekeeper to respiratory health. *Nature Publishing Group*, 2017.

- [22] Fass JN. Joshi NA. Sickles : A sliding-window, adaptive, quality-based trimming tool for FastQ files <https://github.com/najoshi/sickle>. 2011.
- [23] J. Koster and S. Rahmann. Snakemake—a scalable bioinformatics workflow engine. *Bioinformatics*, 28(19) :2520–2522, oct 2012.
- [24] Muriel Le Bourgeois and Stéphanie Vrielynck. Infection bronchopulmonaire dans la mucoviscidose.
- [25] Florence Le Gall, Rozenn Le Berre, Sylvain Rosec, Jeanne Hardy, Stéphanie Gouriou, Sylvie Boisramé-Gastrin, Sophie Vallet, Gilles Rault, Christopher Payan, and Geneviève Héry-Arnaud. Proposal of a quantitative PCR-based protocol for an optimal *Pseudomonas aeruginosa* detection in patients with cystic fibrosis.
- [26] Jean Guy LeBlanc, Christian Milani, Graciela Savoy de Giori, Fernando Sesma, Douwe van Sinderen, and Marco Ventura. Bacteria as vitamin suppliers to their host : a gut microbiota perspective. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(2) :160–168, apr 2013.
- [27] Tim W.R. Lee, Keith G. Brownlee, Steven P. Conway, Miles Denton, and James M. Littlewood. Evaluation of a new definition for chronic *Pseudomonas aeruginosa* infection in cystic fibrosis patients. *Journal of Cystic Fibrosis*, 2(1) :29–34, mar 2003.
- [28] Catherine Lozupone and Rob Knight. UniFrac : a New Phylogenetic Method for Comparing Microbial Communities UniFrac : a New Phylogenetic Method for Comparing Microbial Communities. *Applied and environmental microbiology*, 71(12) :8228–8235, 2005.
- [29] Tanja Mago ?? and Steven L. Salzberg. FLASH : Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. *Bioinformatics*, 27(21) :2957–2963, 2011.
- [30] Benjamin J Marsland and Eva S Gollwitzer. Host–microorganism interactions in lung diseases. *Nature Publishing Group*, 14, 2014.
- [31] Marcel Martin. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet.journal*, 17(1) :pp. 10–12, 2011.
- [32] Paul J. McMurdie, Susan Holmes, R Kindt, P Legendre, and RB O’Hara. phyloseq : An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. *PLoS ONE*, 8(4) :e61217, apr 2013.

- [33] Tristan Montier, Pascal Delépine, Rémi Marianowski, Karine Le Ny, Morgane Le Bris, Danielle Gillet, Gaël Potard, Philippe Mondine, Irène Frachon, Jean-Jacques Yaouanc, Jean-Claude Clément, Harvé des Abbayes, and Claude Férec. CFTR Transgene Expression in Primary $\Delta F508$ Epithelial Cell Cultures From Human Nasal Polyps Following Gene Transfer With Cationic Phosphonolipids. *Molecular Biotechnology*, 26(3) :193–206, mar 2004.
- [34] Linh D N Nguyen, Eric Viscogliosi, and Laurence Delhaes. The lung mycobiome : an emerging field of the human respiratory microbiome. *Frontiers in microbiology*, 6 :89, 2015.
- [35] Nuala A. O’Leary, Mathew W. Wright, J. Rodney Brister, Stacy Ciufu, Diana Haddad, Rich McVeigh, Bhanu Rajput, Barbara Robbertse, Brian Smith-White, Danso Ako-Adjei, Alexander Astashyn, Azat Badretdin, Yiming Bao, Olga Blin-kova, Vyacheslav Brover, Vyacheslav Chetvernin, Jinna Choi, Eric Cox, Olga Ermo-laeva, Catherine M. Farrell, Tamara Goldfarb, Tripti Gupta, Daniel Haft, Eneida Hatcher, Wratro Hlavina, Vinita S. Joardar, Vamsi K. Kodali, Wenjun Li, Donna Maglott, Patrick Masterson, Kelly M. McGarvey, Michael R. Murphy, Kathleen O’Neill, Shashikant Pujar, Sanjida H. Rangwala, Daniel Rausch, Lillian D. Riddick, Conrad Schoch, Andrei Shkeda, Susan S. Storz, Hanzhen Sun, Francoise Thibaud-Nissen, Igor Tolstoy, Raymond E. Tully, Anjana R. Vatsan, Craig Wallin, David Webb, Wendy Wu, Melissa J. Landrum, Avi Kimchi, Tatiana Tatusova, Michael DiCuccio, Paul Kitts, Terence D. Murphy, and Kim D. Pruitt. Reference sequence (RefSeq) database at NCBI : current status, taxonomic expansion, and functional annotation. *Nucleic Acids Research*, 44(D1) :D733–D745, jan 2016.
- [36] Maria Elisa Perez-Muñoz, Marie-Claire Arrieta, Amanda E. Ramer-Tait, Jens Walter, F Ballester, MP Francino, C Mølgaard, KF Michaelsen, TR Licht, U Sauer, KD McCoy, AJ Macpherson, E Schober, C Ionescu-Tirgoviste, G Devoti, CE Beaufort, K Buschard, CC 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*, 5(1) :48, 2017.
- [37] P Plésiat. Quels critères microbiologiques pour définir une colonisation ou une infection à *Pseudomonas aeruginosa* ?
- [38] Junjie Qin, Ruiqiang Li, Jeroen Raes, Manimozhiyan Arumugam, Kristoffer Solvs-ten Burgdorf, Chaysavanh Manichanh, Trine Nielsen, Nicolas Pons, Florence Le-venez, Takuji Yamada, Daniel R. Mende, Junhua Li, Junming Xu, Shaochuan Li, Dongfang Li, Jianjun Cao, Bo Wang, Huiqing Liang, Huisong Zheng, Yinlong Xie,

- Julien Tap, Patricia Lepage, Marcelo Bertalan, Jean-Michel Batto, Torben Hansen, Denis Le Paslier, Allan Linneberg, H. Bjørn Nielsen, Eric Pelletier, Pierre Renault, Thomas Sicheritz-Ponten, Keith Turner, Hongmei Zhu, Chang Yu, Shengting Li, Min Jian, Yan Zhou, Yingrui Li, Xiuqing Zhang, Songgang Li, Nan Qin, Huanming Yang, Jian Wang, Søren Brunak, Joel Doré, Francisco Guarner, Karsten Kristiansen, Oluf Pedersen, Julian Parkhill, Jean Weissenbach, Maria Antolin, François Artiguenave, Hervé Blottiere, Natalia Borruel, Thomas Bruls, Francesc Casellas, Christian Chervaux, Antonella Cultrone, Christine Delorme, Gérard Denariáz, Rozenn Dervyn, Miguel Forte, Carsten Friss, Maarten van de Guchte, Eric Guedon, Florence Haimet, Alexandre Jamet, Catherine Juste, Ghalia Kaci, Michiel Klee-rebezem, Jan Knol, Michel Kristensen, Severine Layec, Karine Le Roux, Marion Leclerc, Emmanuelle Maguin, Raquel Melo Minardi, Raish Oozeer, Maria Rescigno, Nicolas Sanchez, Sebastian Tims, Toni Torrejon, Encarna Varela, Willem de Vos, Yohanan Winogradsky, Erwin Zoetendal, Peer Bork, S. Dusko Ehrlich, and Jun Wang. A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing. *Nature*, 464(7285) :59–65, mar 2010.
- [39] Paul M. Quinton. The neglected ion : HCO_3^- . *Nature Medicine*, 7(3) :292–293, mar 2001.
- [40] Registredelamuco.org. Registre Francais de la mucovidoses 2015.
- [41] R. Ruimy and A. Andremont. Quorum-sensing chez *Pseudomonas aeruginosa* : Mécanisme moléculaire, impact clinique, et inhibition, 2004.
- [42] Patrick D Schloss, Sarah L Westcott, Thomas Ryabin, Justine R Hall, Martin Hartmann, Emily B Hollister, Ryan A Lesniewski, Brian B Oakley, Donovan H Parks, Courtney J Robinson, Jason W Sahl, Blaz Stres, Gerhard G Thallinger, David J Van Horn, and Carolyn F Weber. Introducing mothur : open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities. *Applied and environmental microbiology*, 75(23) :7537–41, dec 2009.
- [43] Ron Sender, Shai Fuchs, Ron Milo, T Lee, H Ahn, and S Baek. Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body. *PLOS Biology*, 14(8) :e1002533, aug 2016.
- [44] Labsquare team. Fastqt : another quality control tool for high throughput sequence data. 2017.
- [45] Rabindra Tirouvanziam, Sophie de Bentzmann, Cédric Hubeau, Jocelyne Hinnrasky, Jacky Jacquot, Bruno Péault, and Edith Puchelle. Inflammation and Infec-

- tion in Naive Human Cystic Fibrosis Airway Grafts. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 23(2) :121–127, aug 2000.
- [46] Torbjørn Rognes. A peer-reviewed version of this preprint was published in PeerJ on 3 March 2015. *PeerJ*, (March), 2015.
- [47] Michael M. Tunney, Tyler R. Field, Thomas F. Moriarty, Sheila Patrick, Gerd Doering, Marianne S. Muhlebach, Matthew C. Wolfgang, Richard Boucher, Deirdre F. Gilpin, Andrew McDowell, and J. Stuart Elborn. Detection of Anaerobic Bacteria in High Numbers in Sputum from Patients with Cystic Fibrosis. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 177(9) :995–1001, may 2008.
- [48] Christopher J van der Gast, Alan W Walker, Franziska A Stressmann, Geraint B Rogers, Paul Scott, Thomas W Daniels, Mary P Carroll, Julian Parkhill, and Kenneth D Bruce. Partitioning core and satellite taxa from within cystic fibrosis lung bacterial communities. *The ISME journal*, 5(5) :780–91, may 2011.
- [49] Josef Wagner, Paul Coupland, Hilary P. Browne, Trevor D. Lawley, Suzanna C. Francis, and Julian Parkhill. Evaluation of PacBio sequencing for full-length bacterial 16S rRNA gene classification. *BMC Microbiology*, 16(1) :274, dec 2016.
- [50] Fiona J. Whelan, Alya A. Heirali, Laura Rossi, Harvey R. Rabin, Michael D. Parkins, and Michael G. Surette. Longitudinal sampling of the lung microbiota in individuals with cystic fibrosis. *Plos One*, 12(3) :e0172811, 2017.
- [51] Bo Yang, Yong Wang, and Pei-Yuan Qian. Sensitivity and correlation of hypervariable regions in 16S rRNA genes in phylogenetic analysis. *BMC bioinformatics*, 17 :135, mar 2016.
- [52] Ed Yong. *Moi, microbiote, maître du monde : Les microbes, 30 billions d’amis !* 2017.