

RESULTATS

1- Présentation de l'unité

Introduction

Histoire, localisation de l'unité, structure de l'unité (équipes ou thèmes)

L'UMR «Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes» (BPMP, <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/>) est située sur le campus INRA / Montpellier SupAgro («La Gaillarde») et regroupe de 110 à 150 personnes (127 au 01/06/2019), dont des permanents des quatre tutelles (CNRS, INRA, Montpellier SupAgro et Université Montpellier), des étudiants, des post-doctorants et des ITA non permanents d'origines diverses (14 nationalités différentes au 01/06/2019).

BPMP est directement issu du Laboratoire de Biochimie et Physiologie Végétales (BPV), fondé en 1971 par le professeur Louis Salsac sur le campus de La Gaillarde, avec comme principaux axes scientifiques les aspects physiologiques et biophysiques de la nutrition minérale des plantes supérieures. Au cours des années suivantes, BPV a été associé aux quatre tutelles dont BPMP dépend aujourd'hui et, à partir de 1981, a été dirigé par le professeur Claude Grignon. L'actuelle UMR BPMP a été créée en 1999. Il s'agissait d'un simple changement du nom de l'unité, sans modification de personnel ni d'activités scientifiques. BPMP a été successivement dirigé par le Professeur Claude Grignon (jusqu'en 2006), le Dr. Jean-François Briat (2006-2012) et le Dr. Alain Gojon (2012-).

BPMP est constitué de 11 équipes de recherche créées entre 1999 et 2019 (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/en/research/the-teams/>), d'une équipe administrative, d'une équipe logistique et de plusieurs plateformes technologiques ou services communs (voir l'organigramme ci-dessous). Toutes les équipes, plateformes et installations sont regroupées dans un seul bâtiment (dénommé « Institut de Biologie Intégrative des Plantes »), partagé depuis 2005 avec l'UMR LEPSE (« Laboratoire d'Etude des Plantes sous Stress Environnementaux ») avec lequel BPMP a une longue tradition de collaborations. BPMP a un autre site secondaire à la Faculté des Sciences (Campus Triolet, Université de Montpellier), qui correspond aux salles utilisées par le personnel de l'Université de BPMP dans le cadre de leurs activités d'enseignement.

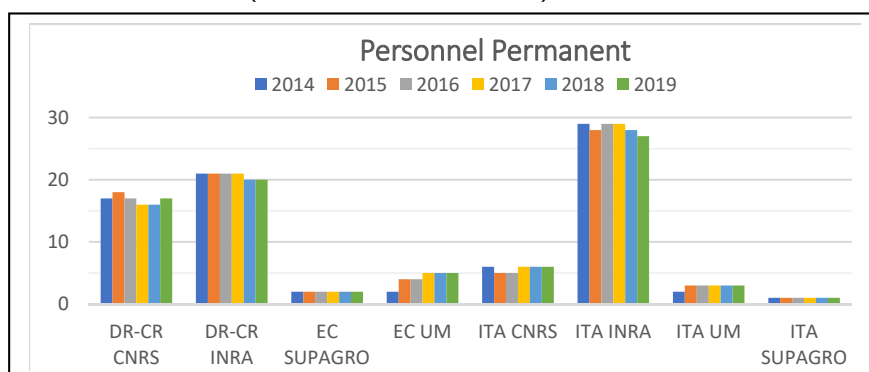
Une caractéristique essentielle de BPMP réside dans le fait que l'unité a gardé pendant près de 50 ans une focalisation scientifique principale sur les mécanismes impliqués dans la nutrition hydrominérale des plantes et dans les réponses des plantes aux facteurs abiotiques.

Effectif et moyens de l'unité

Effectif de l'unité

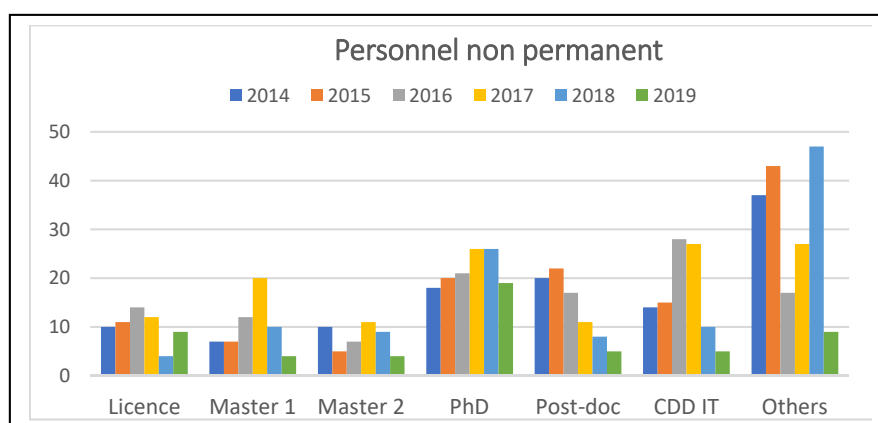
Personnel permanent et non permanent

Entre 2014 et 2019, le personnel de BPMP comptait environ 80 employés permanents (50% de scientifiques, 50% d'ITA) et un nombre variable de personnels non permanents (entre 30 et 70 personnes sont présentes à tout moment, en fonction de la période de l'année). L'effectif total du personnel permanent est resté stable au cours de la période 2014-2019 (voir graphique ci-dessous), à l'exception du personnel de l'Université, dont l'effectif est passé de 4 à 8, en conséquence des efforts que nous avons déployés pour renforcer nos liens avec l'Université (voir la section ci-dessous).



De manière plus détaillée, 13 membres du personnel permanent ont quitté l'unité au cours du contrat en cours (6 départs à la retraite et 7 mobilités). Ces départs ont été plus que compensés par l'arrivée de 15 nouveaux arrivants (4 recrutements et 11 mobilités).

Des changements plus prononcés sont survenus parmi le personnel non permanent. En particulier, le nombre de post-doctorants et d'ITA a nettement diminué depuis 2015 ou 2016, en raison d'une diminution des projets ANR financés dans l'unité. Le nombre de doctorants a augmenté, mais aucune tendance significative n'a été constatée pour les autres catégories. **Entre 2014 et 2019, BPMP a accueilli 446 personnels non permanents au total**, dont 67 scientifiques et étudiants invités en provenance d'autres laboratoires, 37 post-doctorants, 46 doctorants, 46 ITA non permanents et 250 étudiants de DUT/BTS, Licence et Master. Tous ces chiffres sont supérieurs à ceux de la période de référence précédente (2008-2013). Ceci est particulièrement marqué pour les étudiants en Master (96 en 2014-2019, contre 53 en 2008-2013).



Organisation générale

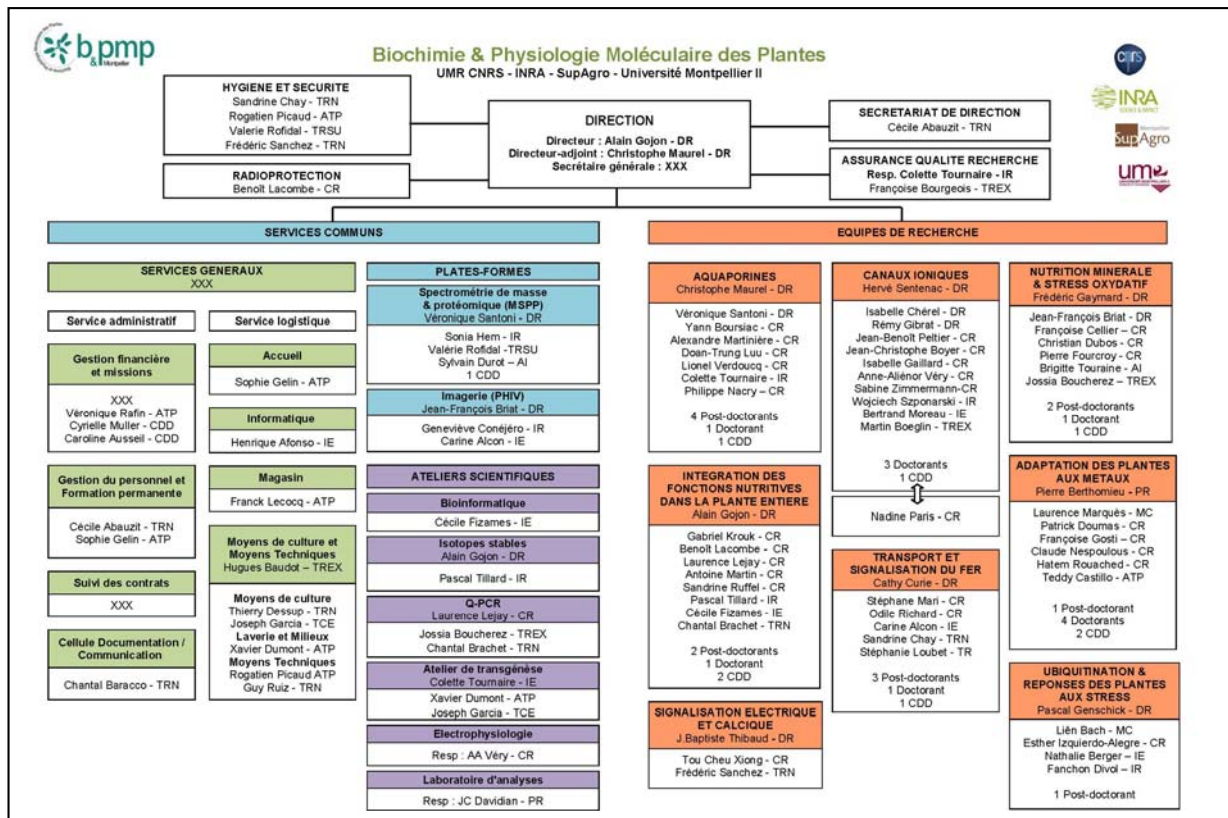
Bien que BPMP se caractérise par un affichage thématique assez focalisé, son organisation scientifique repose sur des équipes de recherche individualisées ayant à la fois une taille significative et une forte autonomie scientifique et financière. De notre point de vue, cette organisation offre le meilleur compromis entre les impératifs d'efficacité collective et de visibilité internationale d'une part, et de créativité et d'autonomie des scientifiques, d'autre part. La taille importante des équipes améliore leur crédibilité, permet des stratégies ambitieuses et résout en partie les problèmes de financement transitoires des chercheurs individuels. L'autonomie des groupes permet de développer des projets originaux et innovants. Une des conséquences de cette organisation est que BPMP n'a pas de structure scientifique transversale formelle. Des thèmes ou des projets communs sont encouragés entre les équipes, mais ne sont pas obligatoires, car ils peuvent limiter la liberté de ces équipes.

Une autre caractéristique-clé de l'organisation scientifique de BPMP est qu'elle n'est pas déterminée par l'affiliation institutionnelle du personnel (CNRS, INRA, SupAgro, Université). Tous les groupes mélangent des personnels issus de plusieurs de ces tutelles, faisant de BPMP une véritable « Unité Mixte de Recherche » où les objectifs scientifiques de chaque équipe sont examinés et validés par toutes les tutelles.

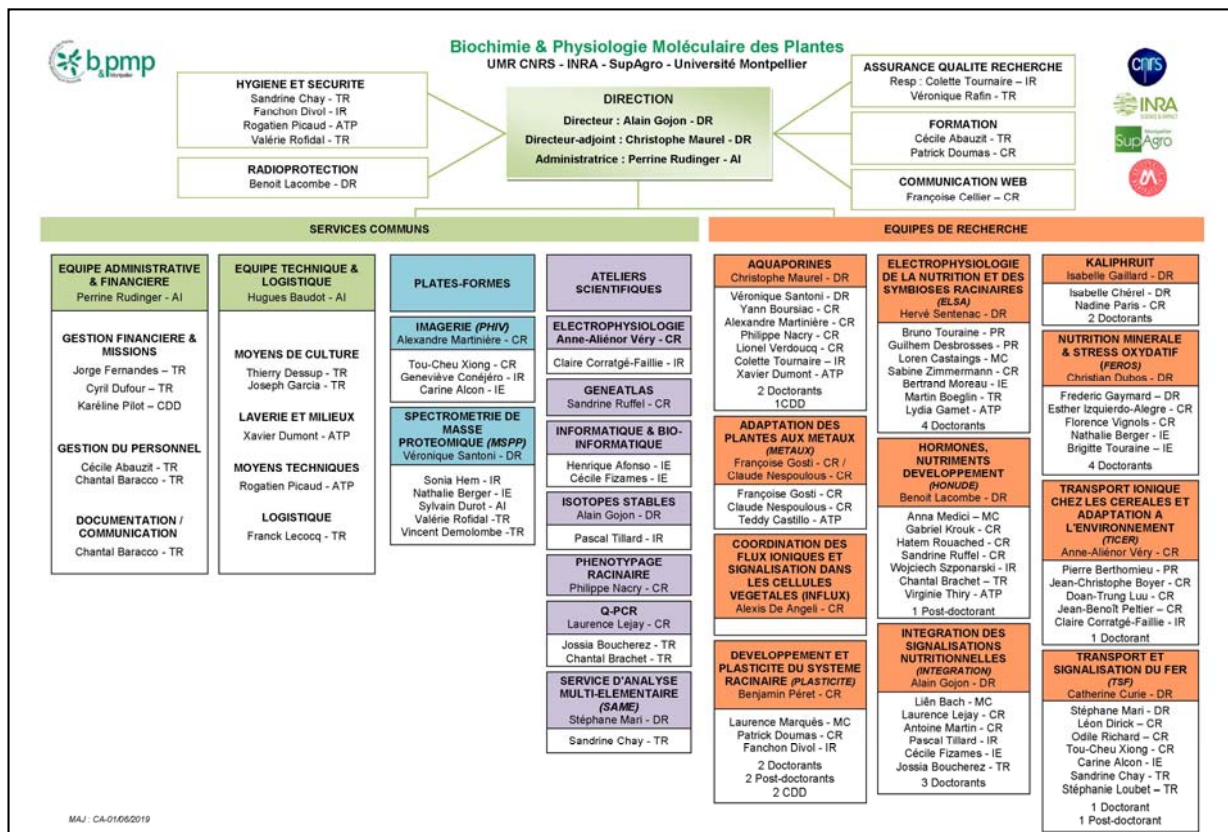
Bien que le principe d'autonomie des équipes de recherche ait été préservé pendant toute la période 2014-2019, une véritable stratégie collective a été mise en œuvre au niveau de l'unité. En particulier, la structuration et l'organisation de l'unité ont été considérablement modifiées pendant la période du contrat en cours. Les changements résultent principalement i) d'événements survenus juste avant cette période (2012-2013), ii) de la prise en compte des recommandations du comité AERES qui avait réalisé l'évaluation précédente (2014) et iii) de notre propre dynamique pour mener à bien le projet proposé lors de cette évaluation.

Cette évolution est visualisée par la comparaison entre les organigrammes de BPMP de 2014 et 2019 (voir ci-dessous).

Organigramme 2014



Organigramme 2019



Aux niveaux stratégique et scientifique :

- La création de 5 nouvelles équipes de recherche en 2015 (ELSA, HoNuDe, Intégration, KaliPHruit et TICER), résultant de la scission de deux grandes équipes antérieures (Canaux Ioniques et Intégration). Les objectifs étaient de renforcer la dynamique scientifique de BPMP par l'émergence de nouveaux projets indépendants et d'assurer un renouvellement significatif des chefs des équipes de recherche. Les deux objectifs étaient des recommandations claires du comité AERES en 2014. Cela a également permis de privilégier des projets axés sur des espèces d'intérêt agronomique, les équipes KaliPHruit et TICER concentrant respectivement leurs études sur la vigne et les céréales.
- L'intégration de 2 nouvelles équipes de recherche (Plasticité en 2015 et Influx en 2019) créées *de novo* par de jeunes scientifiques ayant rejoint BPMP dans le cadre de projets dédiés à l'émergence d'équipes de recherche juniors: projet ERC « Starting » pour B. Péret (Plasticité) et ATIP-Avenir pour A. de Angeli (Influx).
- La fermeture de l'équipe « Ubiquitination et réponses des plantes aux stress » (UbiStress) en 2016, du fait de la mobilité du responsable de cette équipe (P. Genschik) vers l'institut IBMP de Strasbourg. Les autres membres permanents de cette équipe ont rejoint d'autres équipes de BPMP.
- Une stratégie de renforcement des effectifs de l'Université de Montpellier. Il s'agissait d'une recommandation du comité AERES de 2014 et d'une priorité forte que nous avons proposée dans notre projet de 2014. Entre 2014 et 2017, le nombre de personnels permanents universitaires travaillant à BPMP a doublé (de 4 à 8), du fait de la mobilité entrante de 3 collègues (dont 2 professeurs titulaires) en 2015, et du recrutement d'une Maître de Conférences en 2017.

Au niveau organisationnel :

- une politique soutenue de développement de plateaux techniques communs (voir annexe 3) Cela comportait plusieurs aspects, tant au niveau des ressources humaines que des moyens financiers: (i) un effort financier important pour l'acquisition d'équipements scientifiques (environ 1,7 million €) comprenant 3 projets majeurs (« équipement lourd ») pour un microscope confocal, un spectromètre de masse pour la protéomique et un spectromètre de masse pour les isotopes stables, (ii) l'intégration de nos plateformes de protéomique et d'imagerie (MSPP et PHIV, respectivement) dans des organisations institutionnelles mutualisées de la région de Montpellier (« Pôle Protéomique Montpellierain » et « Montpellier Ressources Imagerie », respectivement, voir annexe 3), (iii) le renouvellement total du personnel scientifique et technique de la plateforme d'électrophysiologie (EHEV), qui constitue une installation originale dans la communauté scientifique végétale française, et (iv) la création *de novo* de trois nouveaux plateaux techniques pour la transcriptomique (GeneAtlas), l'analyse élémentaire (plateforme SAME) et le phénotypage des racines à haut débit (HIRROS) (voir l'organigramme ci-dessus).
- Une réorganisation en 2015 de l'équipe « Services généraux ». C'était l'une des recommandations du comité AERES de 2014, cette équipe ayant été confrontée à diverses difficultés au cours de la période contractuelle précédente. L'équipe a été divisée en deux équipes distinctes (administrative et logistique, respectivement), avec de nouveaux responsables à leur tête. De plus, et grâce à un soutien important du CNRS et de l'INRA, le personnel de l'équipe administrative a été considérablement renouvelé en 2014-2015 (3 nouveaux postes permanents). Nous considérons maintenant que ce problème est résolu car les deux équipes ont depuis largement démontré leur capacité à mener leurs tâches à bien.

Au niveau des ressources humaines :

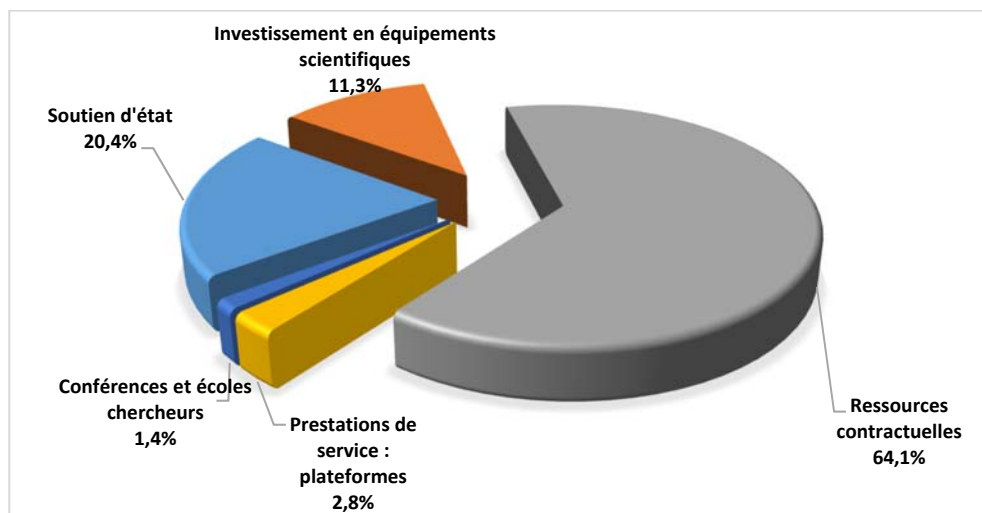
- Un « turn-over » important du personnel permanent. Cela est dû à l'arrivée de 30 nouveaux personnels permanents entre 2012 et 2015, d'origines diverses (recrutements externes, mobilités, intégration de la plateforme protéomique MSPP de l'INRA précédemment localisée dans une autre unité du campus), mais aussi du départ de 14 agents permanents au cours de la même période (pour diverses raisons individuelles). Cela a évidemment eu de lourdes conséquences

au cours de la période considérée. L'intégration réussie des nouveaux collègues et le remplacement fonctionnel de ceux qui ont quitté notre unité ont constitué un véritable défi.

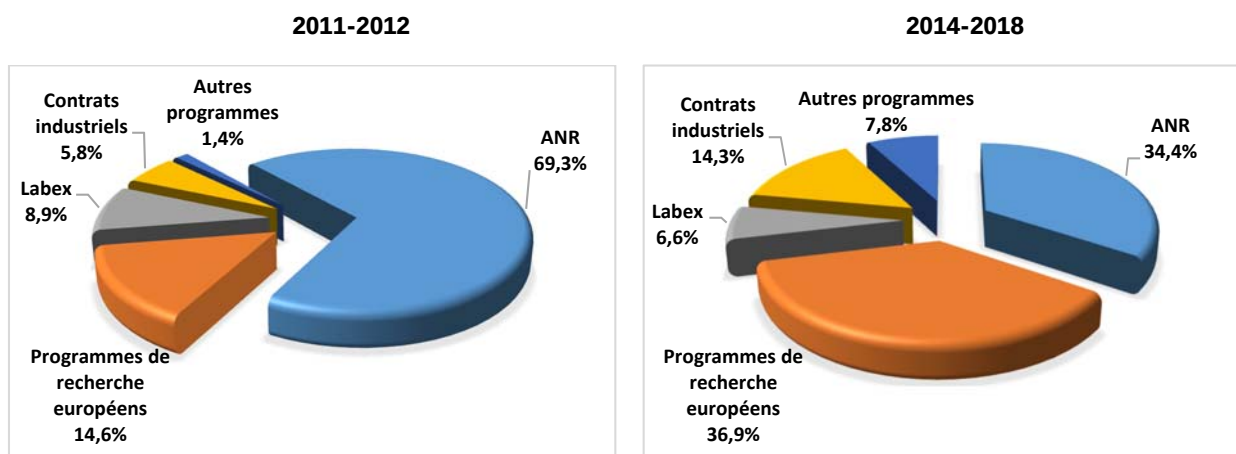
- Le plan d'action RH élaboré pour renforcer les 7 nouvelles équipes de recherche et la plateforme protéomique MSPP (afin de respecter notre principe de taille significative des équipes). Outre les personnes impliquées initialement dans ces créations, notre plan a conduit à l'intégration de 12 nouveaux agents permanents dans ces équipes entre 2016 et 2018 (principalement par mobilité interne au sein de BPMP, mais également par des recrutements externes). À ce jour, ce plan d'action est presque terminé, à l'exception de deux demandes de nouveaux postes permanents (au CNRS et à l'INRA) pour les équipes KaliPHruit et Influx.

Moyens financiers

En ce qui concerne les moyens financiers, la période 2014-2018 a été globalement très favorable, mais avec une tendance marquée à la baisse. Le fichier Excel « Contrat en cours » affiche le total des fonds dépensés par l'unité entre 2014 et 2018. Toutefois, ces données sous-estiment le budget opérationnel réel de BPMP : elles ne tiennent pas compte de plusieurs types de ressources obtenues par BPMP mais gérées en dehors de l'unité (projets AgreeSkills, PHC, contrats SATT, etc.). Au total, le budget opérationnel réel s'élevait à 11,25 millions d'euros pour l'ensemble de la période 2014-2018 (1,99 millions d'euros prévus en 2019). Il a rassemblé le soutien récurrent des quatre tutelles de BPMP (20,4% du total, voir figure ci-dessous), les financements exceptionnels alloués par ces tutelles (11,3%, principalement pour des investissements en équipements scientifiques), les ressources contractuelles obtenues en réponse aux appels à projets compétitifs des institutions locales, nationales ou internationales de soutien à la recherche (64,1%, principalement pour des projets de recherche), les revenus provenant des services de nos plateformes (2,8%) et les ressources obtenues pour l'organisation de conférences et d'écoles-chercheurs (1,4%). Ce budget n'inclut pas la plupart des bourses de doctorat (l'argent ayant été fourni directement aux étudiants).



Ce budget annuel moyen d'environ 2,2 millions d'euros pour la période en cours représente une augmentation de près de 50% par rapport à la période précédente (2008-2013). Le soutien récurrent des tutelles n'étant passé que d'environ 400 à 450 k € / an entre les deux périodes, cela montre que BPMP dans son ensemble a été très efficace dans sa recherche de ressources contractuelles. Cependant, l'origine de ces ressources a nettement évolué entre les deux périodes (voir les figures ci-dessous). En 2011-2012, le principal pourvoyeur de ressources contractuelles était de loin l'ANR (70% du total), alors qu'il ne représentait que 34% du budget 2014-2018.



Cette évolution est due à une baisse très significative et constante au cours de la période actuelle de notre taux de réussite aux appels à propositions de l'ANR. Cette diminution a également touché une grande majorité des unités de recherche axées sur la biologie végétale fondamentale. Plus en détail, nous avons eu 6 projets ANR acceptés en 2014-2016 (sur 54 proposés), alors que seulement 2 ont été acceptés en 2017-2018 (sur 49 proposés). La contribution du Labex AGRO (créé en 2011) a également diminué au cours de la période en cours par rapport à la précédente. Cela reflétait une priorité croissante du Labex pour les actions scientifiques et technologiques visant à promouvoir le développement agronomique des pays du Sud. Ces actions sortent clairement du cadre de BPMP. Ces changements brusques dans le financement ont créé une situation difficile pour les équipes de BPMP. Cependant, elles ont réagi collectivement et ont pu augmenter leur financement en provenance de l'Union européenne, de partenaires privés et d'autres sources. En particulier, BPMP a bénéficié de 3 projets ERC depuis 2014 (1 « Starting grant » à B. Péret et 2 « Advanced grant » à P. Genschik et C. Maurel), ce qui correspond à un budget total de 4,4 millions € (le projet de P. Genschik n'a été que partiellement réalisé dans BPMP, de 2014 à 2016). Nous notons également le succès de l'appel à propositions 2018 de l'ISITE de Montpellier (MUSE, créé en 2017), avec un projet pluridisciplinaire fédérateur (eCO2THREATS, 360 k €). Ces succès n'ont toutefois pas compensé la diminution générale du financement de l'ANR et du Labex. Ainsi, le montant annuel des ressources contractuelles au titre des projets de recherche est passé de 1,64 million € en 2014 à 0,91 million € en 2018 (voir fichier Excel du contrat en cours).

L'utilisation du budget opérationnel est définie par les règles suivantes :

- Chaque équipe dispose d'un budget indépendant, alimenté par ses ressources contractuelles (salaires du personnel non permanent, petit matériel et consommables) provenant des projets financés. Collectivement, les budgets individuels des équipes de recherche correspondent à 70-75% du budget opérationnel total de l'UMR. Une « taxe » représentant 15% de l'argent consacré aux consommables est prélevée par l'unité sur tous les contrats, à l'exception (jusqu'en 2018) de ceux spécifiquement consacrés aux jeunes chercheurs (par exemple, ANR JC, ERC « Starting »). Chaque équipe utilise son budget en fonction de ses propres priorités.
- Le budget général commun (non réparti entre les équipes) est constitué des dotations récurrentes des tutelles, plus les 15% de taxe prélevés sur les projets. Ce budget représente généralement environ 25-30% du budget opérationnel total et sert à payer toutes les dépenses d'infrastructure, les coûts de maintenance de tous les équipements importants et installations communes, les dépenses liées à l'hygiène et la sécurité, l'assurance qualité, la formation, la communication, l'animation scientifique et les gratifications d'étudiants (Masters). En conséquence, presque toutes les installations communes sont gratuites pour toutes les équipes de recherche (à l'exception des plateformes de protéomique, d'imagerie, d'analyse élémentaire et d'isotopes stables). De plus, les fonds restants sont utilisés en fin d'année pour l'achat d'équipements communs, dans le cadre d'une procédure de décision collective.

- Les règles de solidarité financière ont été définies en 2012 afin de fournir un financement minimal aux équipes qui manqueraient de manière transitoire de ressources contractuelles. Ces règles ont été discutées dans les différents comités de laboratoire (voir ci-dessous) et ont été officiellement approuvées par le Conseil d'unité.

Politique scientifique

BPMP peut être définie comme une unité de recherche en biologie intégrative. **Notre objectif général est de comprendre comment les plantes assurent leur nutrition hydro-minérale et réagissent aux facteurs environnementaux (principalement abiotiques) susceptibles de nuire à leur nutrition et à leur croissance. Le profil d'activité de l'unité est principalement orienté vers la recherche fondamentale, avec une implication significative dans l'enseignement supérieur.** Nous visons principalement à identifier des mécanismes moléculaires et cellulaires fondamentaux, en utilisant les modèles et les approches les plus pertinents pour atteindre un standard scientifique de haute qualité et maintenir notre visibilité au niveau international.

Toutes les équipes de recherche étudient divers processus fonctionnels et/ou développementaux déterminant l'état hydrique et minéral des plantes. **Bon nombre de ces équipes se concentre sur les processus de transport membranaire impliqués dans l'acquisition de l'eau et des nutriments minéraux par les racines, ainsi que dans leur distribution entre divers organes.** En conséquence, l'étude des transporteurs et des canaux membranaires, de leur intégration dans la plante entière et de leur régulation en réponse à des facteurs environnementaux, constitue un premier axe central des projets de recherche de BPMP. En plus de l'eau, la plupart des principaux macro- et micronutriments sont étudiés (potassium, azote, phosphore, fer, zinc, manganèse, etc.).

Le deuxième axe scientifique principal de BPMP vise à élucider les mécanismes de signalisation permettant aux plantes de percevoir les contraintes abiotiques et de développer des réponses adaptatives pertinentes. Ce sujet englobe une large palette de réponses, allant de la reprogrammation de la transcription à l'échelle du génome aux modifications du protéome à grande échelle, en passant par les modifications adaptatives de la croissance et du développement. Ce deuxième axe n'est pas déconnecté du premier (transport), car il implique également la détermination de la modulation de la machinerie de transport afin de maintenir une nutrition optimisée face aux fluctuations de l'environnement. Cependant, une évolution significative en 2014-2019 a été de mettre fortement l'accent sur les mécanismes de signalisation déclenchant les réponses développementales des racines. En conséquence, le système racinaire est devenu un modèle privilégié pour la plupart des projets de BPMP. Les facteurs abiotiques à l'étude sont principalement la disponibilité externe de l'eau et des nutriments minéraux ou des métaux, la lumière, le CO₂ et la température. En règle générale, les niveaux d'organisation biologique abordés dans les projets de recherche vont des molécules à la plante entière isolée, qui est le niveau le plus intégré étudié dans BPMP (les populations végétales sont en dehors de notre champ d'application).

La recherche fondamentale effectuée à BPMP peut être clairement reliée à des défis socio-économiques majeurs. Dans le contexte de l'agriculture durable et du changement climatique mondial, nous pensons que les questions liées à l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs et de l'eau par les plantes revêtent une importance stratégique croissante. En outre, les facteurs abiotiques étudiés correspondent à des stress environnementaux majeurs qui pénalisent déjà fortement la production agricole dans le monde entier, tels que la sécheresse, les inondations, le stress salin, la carence en nutriments ou la toxicité des métaux. Au cours de la période récente, nous avons également manifesté un intérêt croissant pour l'étude des réponses des plantes aux principaux facteurs abiotiques du changement climatique (température et concentration atmosphérique élevée en CO₂), ainsi que pour l'étude des interactions biotiques bénéfiques (bactéries PGPR et symbioses) susceptibles d'être pertinentes pour l'intensification écologique de l'agriculture.

Enfin, la formation est également un objectif majeur de BPMP, en lien direct avec ses activités de recherche fondamentale. Nous contribuons à l'enseignement général en sciences végétales de L'Université de Montpellier et de Montpellier SupAgro. Le personnel de ces deux établissements est présent dans le laboratoire et des chercheurs du CNRS et de l'INRA participent de manière significative à la formation. De plus, notre unité possède une longue expérience dans l'encadrement d'étudiants de

Master et de Doctorat français et étrangers, ainsi que de chercheurs post-doc ou d'ITA non permanents. De 50 à 100 de ces étudiants et personnels rejoignent BPMP chaque année.

Suite à la précédente évaluation réalisée par l'AERES (2014), plusieurs faiblesses ont été identifiées et BPMP a reçu des recommandations concernant à la fois sa stratégie scientifique et son organisation. Comme détaillé ci-dessous, la plupart de ces recommandations ont été prises en compte depuis :

- Le comité AERES avait recommandé que BPMP développe des actions plus ambitieuses pour mieux exploiter son leadership scientifique. Nous avons abordé ce point avec succès selon deux axes principaux. Premièrement, la visibilité internationale de BPMP a été renforcée par l'organisation de trois grands congrès internationaux. Deuxièmement, son attractivité et sa capacité à développer des projets plus ambitieux ont été validées par l'accueil de trois projets ERC portés par des chefs d'équipe de BPMP.
- Le comité avait souligné que plusieurs responsables d'équipe de recherche prendraient ou seraient sur le point de prendre leur retraite avant la fin de la période 2014-2019 en cours, et qu'une stratégie visant à favoriser l'émergence de leurs remplaçant(e)s devrait être élaborée. Cette stratégie a été mise en place dès 2014 et s'est traduite, comme indiqué ci-dessus, par la création de 7 nouvelles équipes de recherche depuis 2015. Globalement, cette période a été marquée par un renouvellement important des responsables d'équipes de recherche (6 nouveaux responsables sur 11).
- Nous avons été fortement encouragés à nous impliquer davantage dans la formation à l'Université de Montpellier et à attirer plus de personnel de cette Université. Cet objectif a été atteint avec succès. D'une part, le personnel de l'Université a doublé à BPMP au cours de la période (de 4 à 8) et d'autre part, le nombre d'étudiants en Master de l'Université accueillis à BPMP a considérablement augmenté par rapport à la période précédente (93 contre 53).
- Nous avons été encouragés à mieux communiquer sur la stratégie scientifique de l'unité auprès du personnel technique et administratif. Pour aborder ce point, divers aspects de la stratégie de BPMP ont été examinés au cours d'un nombre croissant de réunions du Conseil d'unité (voir la section « Organisation et vie de l'unité »). De plus, toutes les créations de novo de nouvelles équipes de recherche par les nouveaux chefs d'équipe ont été précédées par un séminaire interne destiné à informer tout le personnel de BPMP du projet correspondant. Enfin, le projet scientifique de chaque nouvelle équipe a été discuté lors des réunions du conseil d'unité.
- Le comité avait recommandé que BPMP soit plus actif dans l'élargissement de sa collaboration avec des partenaires privés et d'autres unités de recherche locales axées sur l'écophysiologie et les sciences du sol. Plusieurs actions significatives ont été menées dans ce sens pour soutenir la valorisation (contrats de recherche avec Syngenta, Solvay, Imperial Tobacco et la SATT locale). Ces efforts ont porté leurs fruits puisque le financement total des partenaires privés est passé de 384 k € au cours de la période 2008-2013 à 1 030 k € au cours de la période 2014-2018. Cependant, le partenariat avec des entreprises privées reste un aspect où BPMP a encore des progrès décisifs à accomplir. Les efforts visant à impliquer BPMP dans des projets plus intégrés avec des écophysiologistes et des spécialistes des sciences du sol ont également porté leurs fruits, notamment dans le cadre d'un projet important en collaboration avec des pédologues coordonné par BPMP et financé par le projet iSITE MUSE (projet «eCO₂THREATS»), ainsi que par notre partenariat avec les écophysiologistes dans le cadre du projet ERA-CAPS «Root Barriers».

2- Présentation de l'écosystème de recherche de l'unité

Bien que le contexte institutionnel de BPMP soit resté stable vis-à-vis de ses tutelles (CNRS, INRA, Université de Montpellier, Montpellier SupAgro), le contexte local a été considérablement modifié à plusieurs niveaux, ce qui a eu des conséquences pour BPMP.

Le Labex AGRO auquel appartient BPMP a été créé en 2011 pour remplacer le précédent RTRA (Réseau Thématique de Recherche Avancée). Le Labex AGRO a réalisé la plupart de ses actions de financement et de structuration au cours de la période 2014-2019, mais s'est principalement concentré sur des questions scientifiques liées au développement de l'agriculture dans les pays du Sud. Par conséquent, figurer en tant qu'acteur-clé dans ce Labex a constitué un vrai défi pour BPMP. La plupart de nos propositions de projets ont été rejetées en raison de leur supposée absence d'impact et le financement global du Labex a diminué par rapport à la période du RTRA précédent. BPMP n'a obtenu qu'environ 2% du financement total fourni par le Labex entre 2011 et 2018. En fonction du nombre de scientifiques travaillant dans différentes unités appartenant au Labex, le financement de BPMP a été jusqu'à 8 fois inférieur à celui des UMR similaires de biologie végétale, mais travaillant sur des plantes tropicales. Néanmoins, le soutien du Labex a été significatif pour les deux congrès internationaux organisés par BPMP à Montpellier et pour notre collaboration avec Solvay. De plus, avec le soutien du CNRS, nos échanges continus avec la Direction du Labex ont récemment permis de mettre en place un projet fédérateur sur la « Biologie végétale fondamentale » (2019-2022), financé par le Labex (600 k €), que BPMP anime avec l'unité LGDP (CNRS / Université de Perpignan) (voir projet).

L'Université de Montpellier (UM) a été créée en 2016 suite à la fusion des précédentes universités Montpellier 1 et 2. L'UM a soutenu BPMP de manière significative avec un poste de Maître de Conférences attribué en 2017 (en plus des 3 autres membres du personnel de l'Université ayant rejoint BPMP en 2015), et le financement de plusieurs projets d'équipement scientifique (120 k € au total). Réciproquement, et dans le cadre de notre stratégie générale visant à renforcer nos liens avec l'Université, BPMP a été l'un des principaux contributeurs à la construction et au fonctionnement du département scientifique «Biologie-Agrosciences» de la nouvelle Université de Montpellier. En effet, le directeur de ce département (Prof. B. Touraine) est un personnel de BPMP et le directeur de BPMP (A. Gojon) est membre du Conseil de ce département.

Le projet iSITE MUSE (Montpellier Université d'Excellence), auquel BPMP contribue, a été lancé en 2017. Son objectif principal est de structurer la communauté des sciences de la vie sur Montpellier. MUSE regroupe 120 unités de recherche et se concentre sur des questions scientifiques liées aux trois principales communautés de recherche fortement représentées dans la région de Montpellier : (i) sciences animales et médicales, (ii) écologie et environnement, et (iii) sciences végétales et agronomie. Malgré sa création récente (2017), MUSE a déjà financé environ 70 projets de recherche, dont 10 importants en 2018. L'un des projets majeurs (360 k €) est coordonné par BPMP, soulignant notre visibilité dans l'iSITE.

L'ancienne région « Languedoc-Roussillon » a fusionné avec sa voisine (« Midi-Pyrénées ») pour donner naissance à la nouvelle région « Occitanie ». Par rapport à l'ancienne, la nouvelle région « Occitanie » a une stratégie de financement de la recherche très différente, notamment en ce qui concerne les bourses de doctorat qui sont désormais plus faciles à obtenir dès lors que le projet de thèse est pertinent pour l'économie régionale. Cela constitue en particulier une opportunité importante pour nos projets sur la vigne, qui ont déjà bénéficié de deux demi-bourses de thèse depuis 2016.

Enfin, deux autres acteurs importants de l'écosystème local de BPMP sont l'unité Biocampus et l'école doctorale GAIA. Biocampus est une structure technologique (UMS CNRS / INSERM / UM) regroupant un grand nombre de plateformes mutualisées de recherche médicale et biologique à Montpellier. BPMP est à la fois contributeur et bénéficiaire de Biocampus car nos plateformes d'imagerie (PHIV) et de protéomique (MSPP) sont respectivement intégrées aux grandes plateformes d'imagerie (MRI) et de protéomique (PPM) de Biocampus (voir les détails à l'Annexe 3). En ce qui concerne GAIA, BPMP contribue à son fonctionnement (A. Gojon est membre du Conseil de GAIA, B. Lacombe est membre du jury de pré-sélection des candidats au concours de l'ED), et a également obtenu beaucoup de succès dans l'obtention des bourses de doctorat délivrées par cette école doctorale (11 sur la période, compte tenu du fait que 57 unités de recherche sont associées à GAIA et que seules 120 bourses de doctorat ont été délivrées depuis 2014).

3- Produits de recherche et activités de l'unité

Bilan scientifique

Production scientifique

Le nombre total de publications de BPMP au cours de la période allant de janvier 2014 à juin 2019 (5,5 ans) a été de 236 articles (à l'exclusion de BioRxiv), dont 222 sont parus dans des revues ayant un facteur d'impact (voir tableau ci-dessous et annexe 4).

Nom de la revue	Nombre d'articles	Facteur d'impact 2017		Nom de la revue	Nombre d'articles	Facteur d'impact 2017
Science	2	41,058		Mol. Microbiol.	1	3,816
Cell	1	31,398		Plant Sci.	2	3,712
Nat. Genet.	1	27,125		Int. J. Mol. Sci.	4	3,687
Physiol Rew.	1	24,014		BBA - Gen. Subjects	1	3,679
Nat. protoc.	1	12,423		Front. Plant Sci.	20	3,677
Nat. Commun.	3	12,353		Environ. Exp. Bot.	3	3,666
Trends Plant Sci.	8	12,149		Ann. Bot.-London	1	3,646
Nucleic Acids Res.	1	11,561		Mol. Plant-Microbe Interact.	1	3,588
Nat. Plant.	4	11,471		Plant Mol.Biol.	1	3,543
P. Natl. Acad. Sci. USA	6	9,504		Proteomics	1	3,532
Mol. Plant	8	9,326		Plant Soil	1	3,306
Curr. Biol.	1	9,251		Planta	1	3,249
Plant Cell	7	8,228		J. Integr. Plant Biol.	1	3,129
eLife	3	7,616		Molecules	1	3,098
New Phytol.	9	7,433		Rice	2	3,039
Curr. Opin. Plant Biol.	4	7,349		Febs Lett.	1	2,999
Compr. Rev. Food Sci. F	1	7,028		Biochem.	1	2,997
Sci. Signal.	2	6,378		J. Biol. Inorg. Chem.	1	2,952
Plant Biotechnol. J.	1	6,305		Reg. Envir. Chang.	1	2,872
Plant Physiol.	19	5,949		J. Plant Physiol.	4	2,833
Plant J.	8	5,775		Environ. Sci. Pollut, Res.	1	2,800
PLoS Genet.	2	5,540		Mycorrhiza	1	2,778
Plant Cell Environ.	6	5,415		PLoS one	4	2,766
Development	2	5,413		Plant Physiol. Biochem.	2	2,718
J. Exp. Bot.	19	5,354		MicrobiologyOpen	1	2,682
Crit. Rev. Biotechnol.	1	5,239		BioMed Res. Int.	2	2,583
Mol. Cell. Proteomics	1	5,236		Physiol. Plantarum	1	2,580
Environ. Microbiol	1	4,974		J. Cereal. Sci.	1	2,302
Plant Methods	1	4,269		Transgenic research	1	2,197
Mol. Plant Pathol.	1	4,188		Curr. Genomics	1	2,172
Sci. Rep. - UK	9	4,122		Trees-Struct. Funct.	2	1,782
Metallomics	1	4,069		Biol. Plantarum	1	1,424
Plant Cell Physiol.	4	4,059		Adv. Bot. Res.	6	1,388
J. Biol. Chem.	2	4,040		Arid Land Res. Manag.	1	0,970
Front. Microbiol.	1	4,019		J. Agric.Sci.Technol.	1	0,890
BMC Plant Biol.	2	3,930		Int. J. Agric. Biol.	1	0,869
Aquat. Toxicol.	1	3,884		Chil. J. Agric. Res.	1	0,775

Ces 222 articles correspondent à un facteur d'impact moyen pondéré des revues de 6.13, avec 122 (55% du total) de ces articles publiés dans des revues dont le facteur d'impact est supérieur à 5. **De plus, 44 articles (20% du total) ont été publiés dans des revues de premier plan** (Science, Cell, Nature Genetics, Physiological Reviews, Nature Protocols, Nature Communications, Trends in Plant Sciences, Nucleic Acids Research, Nature Plants, PNAS, Molecular Plant, Current Biology, Plant Cell).

Par rapport à la période de référence précédente (voir le tableau ci-dessous), **nos données actuelles illustrent une amélioration quantitative significative (augmentation de 27% du taux de publication par scientifique permanent à temps plein)** sans perte de qualité : la production de BPMP entre janvier 2008 et juin 2013 (5,5 ans) était de 169 articles dans des revues avec un facteur d'impact moyen de 6,15 (IF

2011). De plus, cette augmentation de la production scientifique s'inscrit dans une tendance à long terme favorable depuis 2004 (voir tableau ci-dessous). Il convient de souligner que ces progrès ont été réalisés alors que près de la moitié des équipes de recherche actuelles ont été créées en juillet 2015, et que plusieurs d'entre elles n'ont pas encore eu le temps de publier pleinement les résultats de leur nouveau projet de recherche.

Évolution à long terme de la production scientifique de BPMP dans des revues à facteur d'impact

Période	Nombre total d'articles	Nombre moyen/année/Scientifique permanent à plein temps	Facteur d'impact moyen
2004-2008 (4.5 years)	120	0.81	5.40
2008-2013 (5.5 years)	169	0.82	6.15
2014-2019 (5.5 years)	222	1.04	6.13

La grande majorité (> 95%) des 236 articles publiés sur la période 2014-2019 est directement liée aux thématiques scientifiques des équipes de BPMP. Les articles restants résultent principalement de l'activité ouverte de nos plateformes technologiques, qui ont fourni un support méthodologique aux projets scientifiques d'autres unités de recherche (voir annexe 3).

De plus, en ce qui concerne les 222 articles publiés dans des revues à facteur d'impact, il convient de noter que :

- 36% incluent un doctorant de BPMP en tant qu'auteur,
- 63% sont avec un membre de BPMP en premier et/ou dernier auteur,
- 40%, 25% et 43% sont respectivement en collaboration avec des équipes françaises, européennes et étrangères autres qu'euroennes.

Enfin, 2 brevets, 20 livres ou chapitres de livres, 6 logiciels, 25 thèses soutenues et 83 conférences invitées dans des conférences nationales ou internationales ont également été enregistrés au cours de la période 2014-2019. À l'exception des brevets et des thèses soutenues, ces chiffres montrent également une nette augmentation par rapport à la période précédente (3 brevets, 9 chapitres de livres, 0 logiciels, 25 thèses soutenues et 65 conférences invitées entre 2008 et 2013).

Principaux résultats scientifiques au niveau de l'unité

Lors de la dernière évaluation en 2014, nous avons proposé plusieurs priorités pour le contrat actuel de BPMP (voir notre rapport AERES de 2013). Ces priorités sont listées ci-dessous :

- Renforcer nos études sur le transport de l'eau chez les plantes et sur les réponses au stress hydrique.
- Développer des projets plus intégrés reliant développement et fonctions racinaires.- Élargir nos approches en biologie des systèmes.
- Généraliser l'étude des mécanismes de régulation post-traductionnelle.
- Initier des approches génétiques plus prospectives.

La plupart de ces priorités se sont traduites par des projets de recherche importants, et ont conduit à des avancées significatives, illustrées par des publications originales dans des revues de haut niveau.

Le thème sur lequel ceci a été particulièrement évident est celui du transport d'eau et des réponses au stress hydrique. En effet, plusieurs projets, principalement dirigés par l'équipe Aquaporines, ont permis de mieux comprendre la régulation du transport de l'eau dans les parties aériennes et les racines d'*Arabidopsis*. Alors que le rôle des aquaporines dans les mouvements stomatiques était resté flou, l'équipe a élucidé une double fonction hydraulique et de signalisation des aquaporines dans les cellules de garde (Grondin et al. 2015; Rodrigues et al. 2017). En particulier, une connexion étroite entre la fermeture stomatique, la signalisation par l'ABA médiée par le peroxyde d'hydrogène et les fonctions et

régulations des aquaporines a été établie. Les analyses génétiques quantitatives du transport d'eau dans les racines d'*Arabidopsis* constituent une autre avancée majeure (Shahzad et al. 2016; Tang et al. 2018). Basé sur sa capacité unique à phénotyper l'hydraulique racinaire à haut débit, l'équipe a pu isoler plusieurs gènes impliqués dans la régulation du transport d'eau. En particulier, une nouvelle voie de signalisation qui intervient dans les réponses des racines à l'hypoxie, en relation avec la disponibilité en K⁺, a été découverte.

Les travaux sur les réponses du développement racinaire aux signaux abiotiques ont été fortement renforcés depuis 2014. Une première série d'études a porté sur les mécanismes de perception /signalisation du nitrate et leur impact sur les propriétés fonctionnelles et développementales intégrées des racines. En particulier, les études sur le transcepteur (transporteur/senseur) NRT1.1 / NPF6.3 et ses connexions avec la signalisation auxine ont été poursuivies et amplifiées (équipes HoNuDe et Intégration). Ces projets ont atteint leur pleine maturité en termes de production scientifique et ont mis à jour de nouveaux liens avec la signalisation phosphate, l'ABA et les cytokinines (Mounier et al. 2014, Bouguyon et al. 2015, Lérain et al. 2015, Medici et al. 2015, Bouguyon et al 2016, Ristova et al 2016, Poitout et al 2018, Medici et al 2019). Deuxièmement, des études sur la plasticité développementale du système racinaire ont été entreprises dans plusieurs autres équipes (Aquaporines, ELSA, FeROS, Toxicité des métaux), donnant lieu à de nouvelles informations sur les réactions des racines à d'autres éléments nutritifs (fer et zinc, par exemple), au stress hydrique ou aux bactéries rhizosphériques (Reyt et al. 2015, Poitout et al. 2017, Bouain et al. 2018, Rosales et al., 2019). Troisièmement, BPMP a pu renforcer son positionnement dans le domaine du contrôle environnemental du développement des racines en aidant à la création en 2015 de l'équipe « Développement et Plasticité du Système Racinaire » (B. Péret, voir ci-dessus). Outre ses travaux sur *Arabidopsis*, ce groupe a introduit les racines de lupin comme modèle supplémentaire (Gallardo et al. 2019). Quatrièmement, le développement d'un robot automatisé pour le phénotypage de l'architecture des racines (HIRROS) a été une autre étape importante. Même avant 2014, notre capacité à effectuer des analyses précises de l'architecture du système racinaire à une vitesse suffisante avait été identifiée comme un goulot d'étranglement crucial. Notre dispositif de phénotypage à haut débit est actuellement adapté pour l'acquisition rapide d'images de systèmes racinaires sur des plantes cultivées *in vitro*. Le prototype a été entièrement développé en interne et sera bientôt pleinement opérationnel en tant que plateforme pour les équipes de BPMP et les utilisateurs externes, grâce au recrutement prévu d'un assistant-Ingénieur en 2019.

La biologie des systèmes s'est développée dans deux directions. Premièrement, des développements de premier plan ont été réalisés sur des algorithmes utilisés pour traiter des données génomiques à grande échelle (HoNuDe), en collaboration avec des mathématiciens (Krouk et al. 2015, Carré et al. 2017, Val et al. 2017, Carré et al. 2018). Cet effort a été associé à l'élaboration de logiciels (voir annexe 4) qui pourraient également avoir un potentiel d'innovation (projet financé par la SATT). Deuxièmement, les outils de biologie des systèmes ont été progressivement intégrés à des approches biologiques plus classiques pour élaborer des modèles de réseaux géniques de régulation, et identifier de nouveaux régulateurs de la nutrition minérale végétale (Integration, HoNuDe, KaliPHruit, Toxicité des métaux), souvent dans le cadre de collaborations avec d'autres équipes aux États-Unis et au Chili (Alvarez et al. 2014, Ristova et al. 2016, Pal et al. 2017, Varala et al. 2018, Brooks et al. 2019). Dans un sens plus large, les approches de modélisation mathématique ont été initiées par plusieurs autres équipes, mais avec des objectifs différents. Par exemple, le groupe Aquaporine a abordé la question de l'intégration des flux d'eau des racines individuelles dans le système racinaire entier pour modéliser l'architecture hydraulique des racines de différents génotypes d'*Arabidopsis*.

Les mécanismes de régulation post-traductionnelle sont maintenant systématiquement examinés par presque toutes les équipes de BPMP. Sans surprise, cela a conduit à l'identification de la phosphorylation des protéines et des interactions protéine-protéine en tant que mécanismes-clés pour moduler le transport de l'eau ou des ions et la transduction des signaux nutritionnels (Ronzier et al. 2014, Bouguyon et al. 2015, Grondin et al. 2015, Lérain et al 2015, Bellati et al 2016, Lefoulon et al 2016, Shahzad et al 2016, Corratgé-Faillie et al 2017, Prado et al 2019). Notre stratégie sur ce sujet comprenait également un soutien important à la fois pour le renforcement du personnel et la mise à niveau technologique de notre plateforme protéomique (MSPP, voir annexe 3).

La génétique quantitative est récemment apparue comme une approche très efficace à BPMP (Aquaporines, Toxicité des métaux), permettant plusieurs percées dans notre compréhension des mécanismes complexes associés à la réponse des plantes aux contraintes abiotiques (Shahzad et al. 2016, Bouain et al. 2018, Kisko et al 2018, Tang et al 2018). L'une des conséquences est que la génétique d'association (GWAS) apparaît désormais comme une approche majeure dans les récentes propositions concernant les projets fédérateurs coordonnés par BPMP (« eCO₂THREATS » et le projet phare « CalClim »).

Au-delà des priorités identifiées dans notre projet de 2014, plusieurs autres développements importants ont eu lieu au cours des dernières années. Ces développements structureront sans aucun doute la stratégie scientifique de BPMP dans les années à venir :

- Un intérêt renouvelé pour la reprogrammation transcriptionnelle en réponse à des signaux abiotiques. Plusieurs projets axés sur les mécanismes de signalisation et les réseaux géniques de régulation déclenchant les réponses aux éléments nutritifs ont permis l'identification d'un nombre significatif de facteurs de transcription ou chromatiens comme acteurs-clés de ces réponses (Alvarez et al. 2014, Khan et al. 2014, Medici et al. 2015, Pal et al. 2017, Bellegarde et al. 2018, Bellegarde et al. 2019, Medici et al. 2019, Tissot et al. 2019). C'est pourquoi plusieurs équipes (HoNuDe, Intégration, FeROS) ont renforcé leurs études des mécanismes de régulation de la transcription, qui incluent désormais la dynamique de la chromatine.
- Les données convergentes de plusieurs équipes mettent en évidence l'importance générale des processus d'oxydo-réduction et de signalisation par les ROS (espèces réactives de l'oxygène) dans la gestion de l'homéostasie de l'eau et des éléments nutritifs (N, Fe). Bien que ce n'ait généralement pas été l'objectif recherché, le rôle pivot de ces processus ressort de plusieurs projets indépendants (Reyt et al. 2015, Wudick et al. 2015, Rodrigues et al. 2017, Bellegarde et al. 2019, Martinière et al. 2019).
- Des efforts importants ont été consacrés à l'étude des interactions entre les voies de signalisation des différents nutriments, dans le contexte de combinaisons de contraintes abiotiques (N et P, N et C, N et eau, P et zinc, etc.). Ces études ont abouti à de nombreuses découvertes originales, montrant que les situations de stress multiples induisent souvent des propriétés émergentes : les réactions des plantes aux stress combinés reposent sur des mécanismes spécifiques qui ne constituent pas la simple addition des réponses à chaque stress individuel (Khan et al. 2014, Medici et al. 2015, Li et al. 2016, Shahzad et al. 2016, Kisko et al. 2018, Medici et al. 2019).
- Plusieurs groupes (Aquaporines, Influx, KaliPHruit, TSF) ont exprimé un intérêt commun croissant pour les développements technologiques concernant les techniques d'imagerie de pointe et l'utilisation de biosenseurs (pH, fer, ROS, hormones, calcium, nitrate,...) adaptés aux études *in vivo* (Xiong et al. 2014, Hosy et al. 2015, Martinière et al. 2018). En conséquence, notre plateforme d'imagerie (PHIV) a mis au point des projets spécifiques qui devraient fournir de nombreux outils novateurs pour les études de transport et de signalisation.

Enfin, l'étude du transport membranaire, sujet historiquement fort de BPMP, est restée très active au sein de plusieurs équipes. Comme par le passé, certaines études ont été consacrées à la caractérisation fonctionnelle des transporteurs d'*Arabidopsis* pour les principaux nutriments minéraux (Nieves-Cordones et al. 2014, Lérans et al. 2015, Taochy et al. 2015, Castaings et al. 2016, Alejandro et al. 2017). Cependant, un nombre important de nouveaux projets ont abordé des questions plus originales, telles que le transport de solutés organiques associé à la nutrition en fer (Fourcroy et al. 2014, Grillet et al. 2014, Fourcroy et al. 2016), les transporteurs Na^+/K^+ impliqués dans la tolérance au stress salin chez les céréales (Ben Amar et al. 2014, Tounsi et al. 2016, Nguyen et al. 2017), les canaux et les transporteurs de K^+ déterminant l'acidité des baies de raisin (Nieves-Cordones et al. 2019), ou des systèmes de transport assurant le transfert de nutriments ou la signalisation électrique dans les symbioses racinaires (Garcia et al. 2014, Charpentier et al. 2016, Guerrero-Galan et al. 2018, Wang et al. 2019).

Comme lors de la période de référence précédente, une grande partie des recherches menées à BPMP a été réalisée dans le cadre de collaborations internationales.

Il n'y a pas eu de zone géographique privilégiée puisque, au cours de la période 2014-2018, la plupart de nos programmes collaboratifs ont ciblé de nombreux pays situés sur 4 continents : Europe (nombreux pays différents), Afrique (essentiellement le Maghreb), Amérique (principalement les États-Unis et le Chili) et Asie (Chine, Japon, Taiwan et Vietnam). Au-delà du pourcentage élevé de publications communes avec des équipes étrangères (voir ci-dessus), la vitalité de nos collaborations internationales se manifeste par: (i) le nombre de scientifiques et d'étudiants étrangers accueillis en visite (61 au total), et (ii) la proportion de projets internationaux (33%) dans les projets majeurs (36 au total) financés par des institutions locales, nationales ou internationales (Labex, iSITE, ANR, LIA, ATIP, ERC, H2020, Marie Curie-Sklodowska, NSF).

Faits marquants

Au-delà d'une simple liste, il est important de détailler la signification de ces faits marquants au regard de la stratégie scientifique de BPMP. Par conséquent, ils ont été regroupés et liés, le cas échéant, aux priorités scientifiques avancées par BPMP en 2013 ou aux recommandations du comité AERES en 2014. Nous ne faisons ici référence qu'aux faits marquants scientifiques puisque ceux associés aux changements organisationnels de l'unité qui ont déjà été détaillés dans la section « Effectifs et moyens de l'unité » ci-dessus.

Visibilité et attractivité nationale et internationale de BPMP

- L'organisation de trois grandes conférences internationales: (i) Nitrogen2016: le 3ème Symposium international sur la nutrition azotée des plantes (conférence EMBO également soutenue par la NSF), (ii) IPMB2018: le douzième Congrès international de biologie moléculaire végétale, et (iii) IPSB2018: la première conférence internationale sur la biologie des systèmes végétaux. Ces trois conférences ont constitué une illustration sans précédent de la renommée de BPMP dans les communautés scientifiques internationales au cœur de notre domaine de recherche.
- La création d'un LIA (Laboratoire International Associé) entre BPMP et le Centre de génomique et de biologie des systèmes de l'Université de New York (États-Unis). Basée sur une collaboration de longue date, ce LIA a joué un rôle structurant important dans le développement de nos approches en biologie des systèmes.
- La création de deux nouvelles équipes dirigées par de jeunes scientifiques provenant d'autres unités de recherche. BPMP a réussi à attirer deux collègues prometteurs, Benjamin Péret (CR CNRS) et Alexis de Angeli (CR CNRS), qui ont choisi notre unité pour développer leurs projets, respectivement soutenus par un ERC « starting » et une ATIP-Avenir. Ces réalisations concrétisent notre stratégie visant à fournir un environnement matériel et scientifique attrayant pour de nouveaux responsables scientifiques.

Transport d'eau et réponse au stress hydrique

Les travaux récents de BPMP sur le transport d'eau par les racines représentent une avancée majeure par rapport aux études précédentes dans le domaine des relations plantes-eau (équipe Aquaporines). Les travaux se sont appuyés sur une approche de génétique quantitative novatrice centrée sur la conductivité hydraulique racinaire, une caractéristique majeure qui n'avait jamais été explorée auparavant. Ce travail a eu plusieurs impacts :

- Il a donné lieu à deux publications de haut niveau (Shahzad et al., Cell, 2016 ; Tang et al., 2018, Nature Commun.) et une troisième publication à venir (Shahzad et al., Plant Cell, en révision).
- En reconnaissance de ce travail exceptionnel, l'équipe Aquaporines a reçu deux prix de l'Académie des Sciences (« Grandes Avancées Françaises en Biologie » 2017 à Z. Shahzad ; Prix Georges Morel à C. Maurel en 2018).
- Les résultats ont fourni une base solide pour le projet ERC « Advanced » obtenu par C. Maurel en 2017. Ce projet permettra à l'équipe Aquaporines d'explorer les nombreuses facettes de l'architecture hydraulique racinaire du maïs soumis à un stress hydrique.
- Enfin, le communiqué de presse relatif aux travaux de Shahzad et al (Cell, 2016) a donné lieu à plusieurs interviews dans des émissions radiophoniques publiques (France, Suisse) et dans la presse nationale.

Intégration des réponses fonctionnelles et développementales du système racinaire

Les études convergentes réalisées par les équipes HoNuDe et Intégration (toutes deux issues de la scission de l'ancienne équipe Intégration) ont permis de mieux comprendre les voies de signalisation du nitrate, et en particulier de celle activée par NRT1.1/NPF6.3 (transporteur-senseur de nitrate). Dans une série de publications (Mounier et al. 2014 PCE, Bouguyon et al. 2015 Nature Plants, Lérans et al. 2015 Sci Signal,

Medici et al. 2015 Nature Commun, Bouguyon et al. 2016 Plant Physiol, Medici et al. 2019 Plant Cell), ces équipes ont dévoilé l'étendue des fonctions de NRT1.1/NPF6.3 dans le contrôle d'une large palette de réponses physiologiques et développementales de la plante au nitrate, et ont démontré que NRT1.1/NPF6.3 participe également à une cascade de signalisation intégrant des signaux nitrate et phosphate, pour moduler à la fois le transport de N ou P et la croissance racinaire. Collectivement, ces publications constituent une étude exhaustive unique en son genre des mécanismes de perception et signalisation des nutriments qui, à leur tour, coordonnent les réponses fonctionnelles et développementales du système racinaire.

Voir les communiqués de presse :

- [Les stratégies des plantes pour optimiser l'utilisation des nitrates](#)
- [Détection des ions minéraux par les plantes : du nouveau pour le nitrate et le phosphate](#)
- « Une phosphatase comme régulateur positif du transport et de la perception du nitrate chez les plantes » (<http://archives.cnrs.fr/insb/article/2015/b-la-combe>)

Voir également le rapport d'activité de l'INRA 2015 sur les faits marquants scientifiques au niveau national (pp 19-20) :

<http://institut.inra.fr/Reperes/Documents/Rapports-d-activite/Rapport-d-activite-2015>

Autres faits marquants

- 3 projets ERC ont été développés dans BPMP.
- Le séquençage *de novo* du génome du lupin blanc a été achevé en 2018. Ce projet d'envergure a été dirigé par l'équipe Plasticité et a impliqué un important consortium d'une douzaine d'équipes de recherche appartenant à divers instituts.

Interaction avec l'environnement social, économique et culturel

La période 2014-2018 a vu une nette stimulation de nos interactions avec les entreprises privées, à travers 3 grands projets partiellement ou totalement conduits sur la période, et correspondant à un niveau significatif de financement privé des équipes de BPMP (Syngenta : 600 k€, Solvay : 300 k€, et Imperial Tobacco : 300 k€).

BPMP a également renforcé son interaction avec l'environnement social en participant à diverses initiatives ouvertes au public. Il s'agit notamment de la journée "Fascination des plantes" organisée par l'EPSO et de notre journée annuelle "Portes ouvertes" à l'occasion de la "Fête de la Science" au cours de laquelle nous accueillons des classes préparatoires aux écoles d'ingénieurs agronomes et aux écoles normales.

Formation

Un fait marquant est la poursuite de l'école-chercheur internationale MISTRAL (Montpellier international school on ion and water transport in plants), entièrement conçue et gérée par BPMP. Créée en 2012, MISTRAL a pour objectif d'assurer une formation de recherche de haut niveau sur les aspects théoriques et pratiques du transport des ions et de l'eau chez les plantes. MISTRAL est un point-clé de notre stratégie visant à positionner BPMP en tant qu'institut leader au niveau international dans le domaine de la nutrition hydrominérale des plantes. Chaque session de cette école-chercheur bisannuelle est limitée à une quinzaine de doctorants, post-doctorants ou chercheurs seniors ayant déjà une expérience significative sur le sujet. Elle se déroule sur deux semaines complètes, avec des cours magistraux (une semaine) et une formation pratique sur les différentes plateformes technologiques de BPMP (une semaine). Au cours de la période d'évaluation, les 3 sessions, organisées en 2014, 2016 et 2018, ont rassemblé 43 participants au total (68% d'étrangers), provenant de 13 pays différents.

3- Organisation et vie de l'unité

Pilotage, vie, organisation de l'unité

En complément du fonctionnement scientifique autonome des équipes de recherche, l'organisation et la vie de BPMP reposent sur trois piliers principaux :

- *Le "Règlement Intérieur" de BPMP.* Ce document établit toutes les règles formelles relatives aux principaux aspects de notre fonctionnement individuel et collectif, tels que "Hygiène et Sécurité", "Charte informatique", "Temps de travail et organisation du travail de nuit ou de week-end"..... Tout nouvel arrivant à BPMP reçoit ce document et atteste de sa lecture par une déclaration signée.
- *Le fonctionnement des différents comités de management, exécutifs ou non (détaillés ci-dessous).*
- *Plusieurs équipes et groupes de soutien avec des tâches administratives et logistiques (détaillées ci-dessous).*

Comités de management

BPMP est actuellement dirigé par une équipe de direction comprenant Alain Gojon en tant que directeur, Christophe Maurel en tant que directeur-adjoint et Perrine Rudinger en tant qu'Administratrice.

Le *Conseil d'Unité*, où les différentes catégories de personnel sont représentées selon la réglementation qui s'applique à la taille de notre laboratoire, est le seul conseil officiel et obligatoire. Il se réunit en moyenne 4 fois par an et donne des avis sur toutes les questions relatives à la vie du laboratoire, en particulier sur celles concernant la stratégie générale de l'unité, l'hygiène et la sécurité, les ressources financières, les ressources humaines et les missions des services communs. Depuis 2013, le rôle du Conseil de l'Unité a été renforcé en ce qui concerne les grandes orientations scientifiques. Ceci résulte d'une recommandation du comité AERES qui suggérait que la communication sur ces questions soit améliorée entre la direction et le personnel technique. Dans la pratique, deux procédures principales ont été mises en place. Premièrement, les règles et les critères de validation de la création d'une nouvelle équipe de recherche (ou la promotion d'une personne comme chef d'équipe) ont été détaillés dans un document écrit qui a été discuté et validé par le Conseil. Deuxièmement, chaque création d'une nouvelle équipe de recherche a fait l'objet de discussions au sein du Conseil qui, dans la plupart des cas, a exprimé son opinion par un vote formel.

Le *Conseil des chefs d'équipe* se réunit une fois par mois et aide la direction à prendre les décisions relatives à la politique scientifique et à la gestion des ressources humaines, telles que définir les priorités scientifiques, créer ou fermer des équipes, élaborer les demandes de ressources à nos tutelles, et décider des investissements pour les équipements scientifiques. Ce comité est composé des chefs des équipes de recherche, mais aussi des chefs des équipes administrative et logistique, et de la responsable scientifique de la plateforme protéomique. Toutes ces personnes (14 au total) exercent une responsabilité hiérarchique directe sur du personnel permanent en aval du directeur.

En outre, deux autres structures collectives participent à l'organisation et à la vie de l'unité :

Le *Comité Technique du Laboratoire* est composé d'un membre par équipe et de la Direction. Il est chargé de trouver des solutions à tout problème technique ou pratique pouvant survenir dans l'unité (à l'exception des cultures végétales, voir ci-dessous). Il fait également des recommandations pour améliorer "la vie de BPMP" au jour le jour. Il se réunit une fois par mois et dispose de son propre budget (10 k€) à répartir collectivement.

Le *Comité Moyens de Culture* est également composé d'un membre par équipe de recherche et des agents impliqués dans la gestion des installations de culture (serre, chambres et enceintes de culture). Ce comité a un rôle crucial pour assurer une utilisation collective harmonieuse et efficace des installations de culture des plantes, en fixant des règles de leur utilisation par les équipes de recherche, et en définissant des protocoles de culture (gestion des différentes espèces, conditions environnementales, lutte phytosanitaire, etc...). Ceci est particulièrement important car la plupart des plantes cultivées dans l'unité sont des OGM. De plus, le nombre croissant d'espèces végétales étudiées au sein de BPMP se

traduit par une difficulté grandissante pour satisfaire tous les besoins des différentes équipes. Cela nécessite une organisation stricte pour l'utilisation de nos installations.

Enfin, l'*Assemblée générale* de tout le personnel de BPMP a lieu une fois par an, généralement en janvier. Cette réunion est l'occasion pour le directeur de détailler les principaux aspects de la vie de l'unité au cours de l'année précédente et les perspectives pour l'année à venir. En outre, des réunions spécifiques entre la Direction et chaque collège de personnel (scientifiques permanents, ITA permanents et personnel non permanent) sont organisées chaque année.

Equipes support

En plus de plateformes technologiques et des installations communes (voir annexe 3), les activités de recherche de BPMP sont soutenues par plusieurs équipes et groupes ayant à la fois des tâches administratives et logistiques (voir organigramme ci-dessus).

L'*équipe administrative et financière* est dirigée par l'administratrice (P. Rudinger). Elle est en charge de l'accueil des visiteurs et de la gestion des ressources humaines, de l'exécution et du suivi du budget, de la gestion des missions et de la communication (à l'exception du site Internet). En ce qui concerne les aspects financiers, l'équipe (deux gestionnaires à plein temps) établit un budget prévisionnel et une gestion budgétaire analytique, intégrant toutes les ressources financières de BPMP. Cette tâche difficile est réalisée à l'aide du logiciel Geslab du CNRS en utilisant une procédure spécifique développée par l'équipe. Cela permet à la Direction de BPMP et à toutes les équipes de recherche de suivre en ligne leurs achats et leurs factures et d'être informées presque en temps réel de l'état de leurs moyens financiers. En matière de gestion des ressources humaines, BPMP accueille chaque année 50 à 100 personnels non permanents (étudiants, post-doctorants, ITA, scientifiques invités...), français ou étrangers, pour des périodes allant de quelques mois à trois ans. Nous avons donc mis en place une procédure d'accueil pour ces nouveaux arrivants, qui facilite leur arrivée et leur intégration. Une gestionnaire RH à temps plein (avec l'aide d'une autre gestionnaire à temps partiel) est responsable des ressources humaines et de la formation professionnelle de l'ensemble du personnel de BPMP. Enfin, une gestionnaire à temps partiel est chargée de la communication et de l'information scientifique et technique.

L'*équipe Technique et Logistique* (6 ITA à plein temps) est dirigée par le responsable technique (H. Baudot). Elle entretient un dispositif étoffé d'installations de culture des plantes (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/en/platform/plant-culture/>), gère les cultures dans la serre et assure un contrôle réglementaire strict des plantes transgéniques produites dans l'Unité. Cette équipe s'occupe également de l'entretien du bâtiment et inventorie l'équipement (y compris les appareils scientifiques), tout en gérant son enlèvement lorsqu'il est hors d'usage. Enfin, l'équipe s'occupe de la laverie et de la préparation de milieux. Elle reçoit toutes les livraisons des fournisseurs externes et gère le magasin interne où toutes les équipes peuvent trouver la plupart des consommables nécessaires (plus de 600 articles différents en stock).

En plus de ces deux équipes entièrement dédiées aux fonction support, d'autres groupes s'occupent de l'Hygiène et Sécurité (voir section spécifique ci-dessous), de l'Assurance Qualité Recherche (voir section spécifique ci-dessous), de la formation interne du personnel de BPMP, et du suivi du site Web. Ces groupes sont principalement constitués de personnels volontaires qui accomplissent ces tâches en plus de leur activité principale au sein d'une des équipes ou plateformes de l'unité.

Principales actions concernant l'organisation et la vie de l'unité

Comme indiqué dans la section " Effectifs de l'unité " ci-dessus, ces équipes et groupes ont été fortement réorganisés au cours de la période de référence, à l'exception du groupe Hygiène et Sécurité (comparer les organigrammes 2014 et 2019 ci-dessus). Cette réorganisation a permis le développement de plusieurs actions importantes, principalement menées par nos nouveaux responsables administratifs et techniques, et l'amélioration de l'organisation générale et de la vie de BPMP. Ces actions sont énumérées ci-dessous.

Sur les aspects techniques :

- *Réaffectation des locaux à l'intérieur du bâtiment.* Cette réaffectation découle de la profonde modification de la structuration générale de l'unité qui a eu lieu depuis 2014 (nouvelles équipes

de recherche et de support, 'intégration de la plateforme protéomique). Une réallocation de près de la moitié des locaux du bâtiment a ainsi été décidée en 2015. Cela a nécessité l'aménagement de certains de ces locaux, et le déménagement de la quasi-totalité du personnel. Notre objectif était que, dans la mesure du possible, chaque équipe (14 actuellement, y compris la plateforme protéomique, contre 9 en 2014) puisse être installée dans un espace unique et dédié. Ce plan a également nécessité un financement spécifique pour modifier l'infrastructure des locaux d'accueil de la plateforme protéomique qui a déménagé d'un autre bâtiment (84 k€)

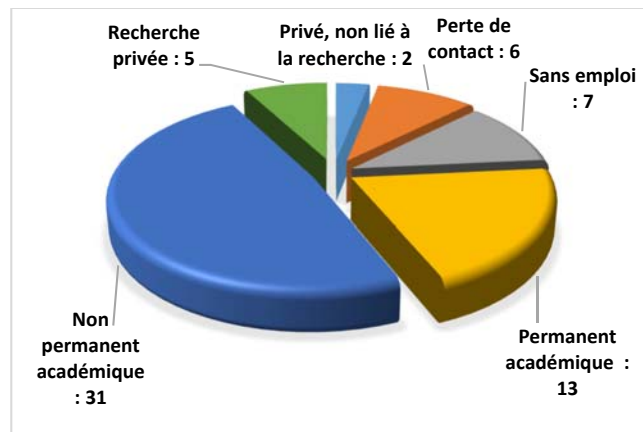
- *Modernisation des installations de culture et plan d'économie d'énergie.* En raison des besoins du projet LupinRoots (ERC), d'une part, et sur recommandation du Conseil d'unité et du Conseil des chefs d'Equipe, d'autre part, le Responsable Technique (H. Baudot) a réalisé une ambitieuse modernisation de nos chambres de culture. Ces travaux ont consisté en la construction de trois chambres de culture neuves, l'installation de trois phytotrons de haute technologie pour des expériences en environnement contrôlé, le remplacement des systèmes de régulation de trois anciennes chambres de culture et le doublement des systèmes de climatisation pour toutes les chambres (afin qu'aucune ne tombe en panne plus d'une journée). Au total, cette modernisation a nécessité un budget de 572 k€. De plus, nous avons décidé de remplacer tous les anciens dispositifs d'éclairage par de nouveaux systèmes LED à des fins d'économie d'énergie (toujours en cours).

Sur le plan des ressources humaines :

- *Aide à l'évolution de carrière du personnel administratif et technique.* Dès son arrivée en 2015, notre administratrice a proposé de mettre en place une procédure d'accompagnement du personnel non scientifique de BPMP dans son évolution professionnelle. La rédaction des rapports annuels d'activité est ainsi aidée, et des formations et entraînements pour les épreuves orales des sélections professionnelles et des concours sont proposés. Cette initiative comble une lacune dans la stratégie de l'Unité sur ces aspects. Le tableau ci-dessous présente le relevé général des promotions du personnel permanent de BPMP (y compris les scientifiques).

Type de promotion	Nombre de personnes promues	Type de promotion	Nombre de personnes promues
ATP2 > ATP1	1	IE > IR	1
ATP1 > TCN	2	IR1 > IRHC	1
TCN > TCS	3	CR2 > CR1	5
TCS > TCX	1	CRCN > CRHC	4
TC > AI	1	CR > DR2	3
AI > IE	1	DR2 > DR1	1
IECN > IEHC	2	MDC > PU	1

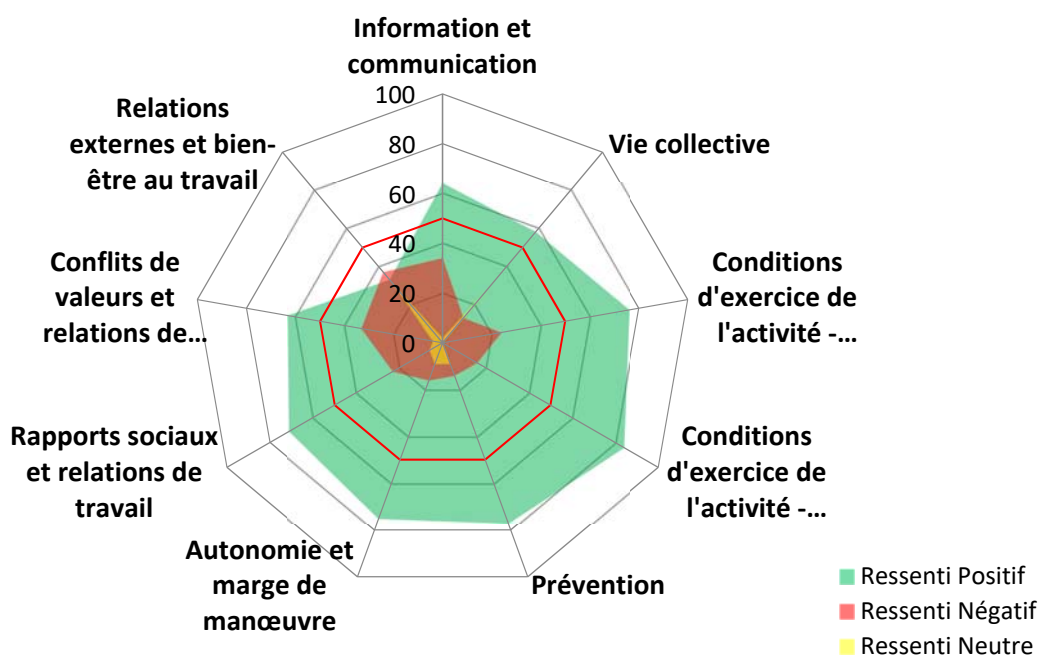
- *Accompagnement du personnel non permanent et suivi de son devenir.* L'absence de procédure formalisée en interne pour apporter un soutien au grand nombre d'étudiants et d'employés non permanents était une autre lacune qui a été identifiée à BPMP. De nombreuses actions qui ne peuvent être présentées en détail ici ont été entreprises pour y remédier. En bref, nous avons concentré nos efforts sur l'amélioration de la communication auprès de cette catégorie de personnel, en organisant des réunions d'information obligatoires pour tous les nouveaux arrivants et des réunions collectives avec l'équipe de Direction, spécifiques au collège des non-permanents. Nous avons également initié un suivi systématique du devenir des doctorants, des post-docs et des ITA non permanents à contrat long (> 1 an). Nous avons estimé qu'il était essentiel de savoir si leur travail à BPMP les avait aidés à trouver un emploi par la suite. Le graphique ci-dessous résume les résultats de cette enquête pour les 64 personnels qui ont quitté BPMP entre 2014 et 2019. Il montre que parmi les 58 collègues avec lesquels nous avons gardé un contact, 49 (85%) ont actuellement un emploi lié à la recherche ou à la formation en biologie et sciences végétales (dans des institutions publiques comme des organismes de recherche ou des universités, ou dans des entreprises privées). Parmi les 13 personnes ayant un poste académique permanent, 2 ont été recrutées à BPMP. Enfin, seules 7 personnes sont actuellement sans emploi et 2 ont un emploi sans rapport avec leur formation scientifique.



- *Stratégie de communication.* La communication interne et externe de BPMP est un autre domaine dans lequel des actions importantes ont été menées. L'événement majeur de la période a été la reconstruction totale de notre site Web par un groupe dirigé par l'administratrice, avec à la fois un site Internet (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/>) et un site Intranet. Nous avons défini une procédure et mis en place une équipe dédiée pour assurer une actualisation continue du site. Nous avons inclus dans l'intranet de nombreuses ressources, services et applications (agenda, protocoles scientifiques, directives administratives, informations sur la sécurité, rapports des réunions des Conseils et comités, réservation de salles et d'équipements, etc...). Par ailleurs, nous avons poursuivi la publication d'une lettre d'information électronique hebdomadaire, qui fournit toutes les informations scientifiques, technologiques, administratives et organisationnelles utiles à l'ensemble de l'unité. Toutes les lettres (depuis 2006) sont stockées sur l'intranet et peuvent être consultées avec un moteur de recherche pour un sujet spécifique.

Un point important a trait au fait que BPMP a eu une occasion unique en 2018 d'évaluer tous les aspects de l'organisation et de la vie de l'unité. Ceci résulte d'une initiative de l'INRA au niveau national pour évaluer les risques psychosociaux et la qualité de vie au travail dans ses unités. Depuis 2016, les différentes unités de recherche du centre INRA de Montpellier sont soumises à cette action (3-4 unités/an). Par conséquent, tous les personnels de BPMP (quel que soit leur employeur) ont été invités à répondre en janvier 2018 à un questionnaire anonyme comprenant plus de 100 questions portant sur la qualité de vie au travail et la gestion managériale dans l'unité. Une grande majorité des personnels (78 % de l'effectif total) a répondu à l'enquête, ce qui a assuré une bonne représentativité des avis au niveau de l'Unité entière.

Le graphique ci-dessous montre les résultats synthétiques de l'enquête sur les principaux éléments examinés. La majorité du personnel de BPMP (entre 60 et 80% selon les critères) a un jugement positif (zone verte) sur tous les aspects, à l'exception de celui qui concerne les moyens "Externes" qui ne relèvent pas de BPMP, mais principalement de l'administration locale et des employeurs. Ce dernier point reflète largement le fait que les conditions d'évolution de carrière sont jugées insatisfaisantes. En ce qui concerne l'information, la communication et la vie collective, le bilan est également généralement positif (environ 60% de satisfaction). Cependant, une analyse plus fine des divers aspects inclus dans cet critère (non montrée ici) indique que la plupart des personnes de l'unité (75 %) souligne un manque évident de communication et d'interaction entre les équipes de recherche. C'est certainement une conséquence de la grande indépendance scientifique et de l'autonomie fonctionnelle de ces équipes. D'un autre côté, les conditions d'exercice de l'activité sont jugées très bonnes ou excellentes par tous, en particulier par les personnels non permanents (>80% de satisfaction). Il s'agit d'une marque de reconnaissance forte pour tout le personnel qui a été impliqué dans la supervision de l'organisation générale de BPMP, et en particulier pour toutes les personnes impliquées dans les actions énumérées ci-dessus qui visaient à améliorer ces conditions de travail.



L'enquête de 2018 présentée ci-dessus a également débouché sur des initiatives visant à améliorer les interactions sociales entre les équipes de BPMP. Ainsi, une "rencontre de convivialité" ouverte à tous est organisée chaque mois, à la suite d'un de nos séminaires scientifiques (présenté par un scientifique invité externe). C'est l'occasion de discuter davantage avec ce scientifique et d'avoir une interaction informelle entre tout le personnel de BPMP. De plus, la retraite scientifique de 2018 (voir ci-dessous) a été l'occasion de proposer un programme social plus ambitieux que lors des événements précédents. A cet effet, l'administratrice a répondu à l'appel à propositions 2018 "Risques psychosociaux et qualité de vie

" du CNRS, et a obtenu un financement spécifique pour assurer un événement convivial unique et sans précédent (jeux, cocktail, dîner et soirée).

Animation scientifique

L'animation scientifique dans BPMP repose d'abord sur de nombreux échanges lors des réunions des différents conseils et comités d'unité ou des réunions hebdomadaires des équipes. Elle est également entretenue par une série d'actions spécifiquement dédiées, listées ci-dessous

- *Séminaires scientifiques.* Tout au long de l'année, des scientifiques sont invités à donner des séminaires (en général le jeudi après-midi). Depuis 2014, 138 séminaires ont été donnés (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/actualites/>), principalement par des scientifiques extérieurs à BPMP, dont une forte proportion venant de l'étranger (58%). La grande majorité de ces séminaires est ouverte à l'ensemble de la communauté scientifique montpelliéraine. Depuis plus de 10 ans, un groupe spécifique de personnes de BPMP (le Comité Séminaires) s'occupe très efficacement de ces aspects (collecte des propositions des équipes de recherche, prise en charge des déplacements et du logement des scientifiques invités, réservation des salles de séminaires, communication des dates et résumés des séminaires). Un budget spécial est alloué à ce Comité (environ 10 k€/an en moyenne). Chaque année, tous les nouveaux doctorants sont également invités à donner des séminaires internes pour présenter leur projet de recherche à tout le personnel de BPMP.
- *Journées thématiques.* Afin de se concentrer plus précisément sur des sujets spécifiques qui semblent importants pour la stratégie scientifique de BPMP, 3 séminaires d'une journée entière ont été organisés depuis 2014. Chacun de ces événements comprenait des séminaires donnés par des spécialistes externes invités sur le thème choisi, plusieurs séminaires par des scientifiques de BPMP, et une table ronde pour échanger et conclure. Les sujets choisis étaient : Signalisation cellulaire, génétique quantitative et interactions biotiques.
- *Retraites scientifiques.* Ces retraites ont eu lieu deux fois au cours de la période contractuelle actuelle (en 2015 et au début 2019). Elles ont eu lieu à l'extérieur de Montpellier et ont rassemblé pendant deux jours tout le personnel du BPMP (le laboratoire est fermé à cette occasion pour s'assurer que tout le monde sera présent à la retraite). L'objectif principal est de procéder à un échange approfondi sur la stratégie scientifique de l'unité. Chaque événement comprenait des séminaires spécifiques organisés par toutes les équipes et des tables rondes thématiques. La retraite 2015 a été conçue pour permettre aux nouvelles équipes de recherche créées à cette date de présenter leurs nouveaux projets et d'en discuter avec tout le personnel de BPMP. La retraite de 2019 a été plus spécifiquement consacrée à la préparation du projet de l'unité pour 2021-2025.

Parité ; intégrité scientifique ; santé et sécurité ; développement durable et impacts environnementaux ; propriété intellectuelle et intelligence économique.

Parité

Avec 39 femmes pour 42 hommes, la parité est presque parfaite au sein du personnel permanent de BPMP. Au niveau des responsables, une évolution significative s'est produite en 2015 suite à la création des nouvelles équipes de recherche. Davantage de femmes sont devenues chef d'équipe, et l'actuel Conseil des chefs d'équipe comporte maintenant 6 femmes (43%) contre 3 (30%) en 2014. Enfin, les recrutements ou arrivées de personnel permanent depuis 2014 sont presque équilibrés, avec 9 hommes et 8 femmes.

Intégrité scientifique

Ces questions sont abordées à deux niveaux différents. Au niveau de l'unité, des directives précises sont données à tous les nouveaux arrivants concernant l'utilisation des cahiers de laboratoire, le stockage et la sauvegarde des données brutes, la traçabilité de tout matériel biologique, etc... Cela se fait grâce à un "livret d'accueil", et par une réunion d'information obligatoire. Au niveau du site de Montpellier, tous les doctorants sont invités à suivre une formation spécifique sur ce sujet, organisée par l'école doctorale.

Hygiène et Sécurité

La prévention est une activité cruciale à BPMP. C'est pourquoi, depuis 2012, il a été décidé que cette tâche serait prise en charge par une solide équipe d'assistants de Prévention. Cette équipe est actuellement composée de 5 personnes (y compris la radioprotection, voir organigramme), qui disposent de lettres de mission officielles validées par le directeur et les quatre tutelles dont dépend BPMP. Par conséquent, la quantité de travail effectuée par cette équipe est importante, et la plupart des tâches de Prévention sont effectuées au niveau de l'unité, le plus souvent sans l'appui des services correspondants des tutelles.

Le travail de cette équipe est guidé par des procédures précises. Tout d'abord, les règles d'hygiène et de sécurité ont été explicitement définies dans une annexe de notre Règlement Intérieur. Deuxièmement, nous utilisons le système INRA, et en particulier l'application informatique correspondante OPPI (Outil Principal de Pilotage de Prévention de l'INRA), qui fournit des méthodes rigoureuses et complètes pour traiter ces problèmes. L'OPPI génère également tous les avertissements pertinents lorsque les actions nécessaires ne sont pas effectuées en temps voulu. Troisièmement, nous avons mis en place nos propres procédures, qui comprennent : des réunions régulières entre l'équipe de Prévention et le directeur (au moins 4/an), l'élaboration d'un rapport et d'un plan d'action annuel, une réunion dédiée du Conseil d'unité pour discuter de ce rapport et de ce plan d'action, des réunions d'information obligatoires en hygiène et sécurité à tout nouvel arrivant (en français ou anglais), un recyclage obligatoire pour les personnels permanents (tous les 4 ans), des documents spécifiques et un processus de validation autorisant le travail hors heures normales et les week-ends. Nous avons également assuré tous les investissements financiers nécessaires (le budget annuel global est d'environ 10 k€/an), et interagissons avec la direction du campus pour assurer la sécurité dans le bâtiment ou un suivi médical pertinent du personnel.

Collectivement, cette équipe, ces actions et ces procédures ont prouvé leur efficacité. Heureusement, aucun incident grave en matière de sécurité n'a été enregistré au cours de la période 2014-2019, et aussi parmi les principaux éléments pris en compte dans l'enquête sur les risques psychosociaux et la qualité de vie au travail, la Prévention se classe au deuxième rang de satisfaction (près de 80%, voir la figure ci-dessus). Cela démontre clairement l'efficacité de notre équipe d'Assistants de Prévention.

Développement durable

Deux actions principales visant à réduire le gaspillage ont été développées depuis 2014. Tout d'abord, un ambitieux plan d'économie d'énergie a été mis en place pour remplacer par des systèmes LED tous les systèmes d'éclairage de nos chambres de culture (près de 80 k€ d'investissement). Deuxièmement, l'équipe technique a défini des méthodes très efficaces pour éliminer, par des moyens appropriés, tous les équipements hors d'usage et tous les déchets plastiques.

Propriété intellectuelle et intelligence économique

L'une des chefs d'équipe (C. Curie) est spécifiquement chargée de suivre les projets de BPMP avec des partenaires privés ou des organisations visant à soutenir l'innovation (SATT, Pôle de compétitivité). Néanmoins, l'essentiel de notre activité sur ces thèmes repose sur le soutien apporté par les services correspondants des tutelles (CNRS, INRA, SupAgro, Université). En effet, l'accent que nous mettons sur la recherche fondamentale n'exige pas que nous développions seuls une stratégie ambitieuse et spécifique en matière de Propriété Intellectuelle. De plus, la raison d'être de nos partenariats avec des entreprises privées repose principalement sur leur pertinence scientifique, et non sur leur capacité à générer des ressources financières. Nous n'avons donc pas ressenti le besoin d'un plan spécifique pour l'Intelligence Économique. Toutefois, l'intérêt croissant que nous portons aux plantes cultivées en tant que modèles végétaux pourrait changer ces points de vue à l'avenir.

Assurance Qualité Recherche

Des efforts importants ont été consacrés à l'amélioration de nos procédures de Qualité. Outre les actions ciblant les équipes de recherche (fiabilité et traçabilité des ressources génétiques, stockage des graines, utilisation correcte des cahiers de laboratoire), le comité dédié a réalisé une mise à jour ambitieuse de l'inventaire et du suivi des équipements techniques et scientifiques (plus de 700 articles). Par ailleurs, les travaux sur la Qualité ont été sensiblement renforcés dans nos plateformes et plateaux techniques communs (certifications ISO9001 pour MSPP et PHIV, et labélisation " Fiabilité des mesures " pour l'Atelier des Isotopes Stables, voir annexe 3). L'accent mis sur la Qualité est également illustré par le renforcement récent (2019) de la Cellule Qualité avec une technicienne administrative à temps plein (voir organigramme ci-dessus).

PROJETS ET STRATEGIE A CINQ ANS

1- Analyse SWOT

Forces ✓ Une large expertise en physiologie et biophysique du transport et des stress ✓ Un ensemble renouvelé d'équipes de recherche ✓ Un ensemble diversifié et modernisé d'équipements et de plateformes ✓ Une bonne attractivité nationale et une bonne visibilité internationale	Besoins d'amélioration ✓ Intégration des éléments biotiques et autres éléments du sol dans la nutrition des plantes ✓ Liens avec des partenaires privés
Opportunités ✓ Diversification des modèles végétaux et développements technologiques pour l'étude des plantes cultivées ✓ Structuration du site de Montpellier (I-SITE) ✓ Besoins pressants de solutions au changement climatique	Menaces ✓ Les incertitudes liées au financement de la recherche fondamentale entraînent d'importantes variations des ressources et des hétérogénéités entre les équipes ✓ Politique locale favorisant les études sur les plantes tropicales

2- Structure, effectifs et orientations scientifiques

1) EFFECTIF ET ORGANISATION COLLECTIVE

1) Elaboration du projet :

Les grandes lignes de ce projet ont été élaborées grâce à plusieurs cycles de concertation au cours des 12 derniers mois. Une première étape a été, à partir du printemps 2018, l'identification du futur directeur et de l'équipe de direction, sur la base d'une lettre d'intention et de discussions prospectives lors d'une assemblée générale. Une retraite scientifique réunissant tout le personnel de BPMP pendant deux jours, en janvier 2019, a fourni une occasion unique d'échange et de réflexion stratégique. Cet événement a permis la présentation orale des projets des équipes, des tables rondes sur six sujets prospectifs, chacun étant préparé et animé par deux scientifiques de BPMP, et une discussion plénière sur l'organisation et les perspectives scientifiques de BPMP. Avant ces discussions, les plateformes de BPMP avaient présenté leurs activités et leurs perspectives dans le cadre de séminaires hebdomadaires. Par la suite, une série de 5 réunions thématiques entre chefs d'équipe a permis de finaliser les orientations stratégiques décrites ci-dessous. Les grandes lignes de ce projet ont également été présentées au conseil de laboratoire en mai 2019.

2) Forces et organisation générale

Ce projet reflète une profonde réorganisation scientifique de BPMP au cours des dernières années. Notre laboratoire a su attirer des équipes externes (Plasticité, Influx), et faire émerger une nouvelle génération d'équipes internes et de leaders (HoNuDe, TICeR, KaliPHruit, FeROS). Par ailleurs, il a été convenu qu'en raison d'un manque de leader, deux anciennes équipes (ELSA, Toxicité Métallique) cesseraient leur activité, leurs membres étant redéployés dans d'autres équipes. Ainsi, le projet de BPMP s'articulera autour de neuf équipes scientifiques, l'organisation technique restant essentiellement inchangée (voir dernier paragraphe). Si la grande autonomie scientifique et budgétaire des équipes assure leur créativité, nous mobiliserons une force collective sur des enjeux transversaux et institutionnels qui vont au-delà des objectifs individuels des équipes.

2) STRATÉGIE SCIENTIFIQUE

La biologie végétale a vécu une révolution continue au cours des dernières décennies. Les mécanismes moléculaires et cellulaires mis en place tout au long de la vie de la plante peuvent maintenant être décrits avec une grande précision, surtout chez les espèces végétales modèles, et BPMP a contribué à cet effort. De plus, des méthodes de génomique de plus en plus puissantes, comme le séquençage génomique à haut débit, la génétique d'association et l'édition du génome, sont maintenant

généralisées à de nombreuses espèces végétales, y compris les principales espèces cultivées. Sur le principe, du moins, il n'y a donc plus de limite au développement d'études mécanistiques fondamentales sur ces espèces et à l'exploration de leur originalité biologique ou de leur pertinence par rapport à des objectifs appliqués.

Bien que BPMP ait été fondé il y a près de 50 ans, sa chance et son principal défi ont été que son champ de recherche historique, la nutrition minérale et hydrique des plantes sous contraintes abiotiques, est constamment resté un sujet scientifique très convoité et disputé. La demande sociétale à long terme adressée aux instituts de recherche comme le nôtre reste toujours d'améliorer le rendement des cultures avec une utilisation minimale et durable des intrants.

En plus de ce défi, le changement climatique a récemment suscité de plus en plus d'émotion et de préoccupations politiques dans nos sociétés. D'un point de vue biologique, le changement climatique exacerbe les contraintes environnementales auxquelles sont confrontées les plantes, en premier lieu une augmentation primaire du CO₂ atmosphérique et de la température, qui peuvent induire par ailleurs des événements climatiques extrêmes. De façon plus inattendue, l'augmentation du CO₂ atmosphérique (eCO₂) et les températures élevées altèrent l'état nutritionnel des plantes par des mécanismes inconnus jusqu'ici. Ainsi, conjugué à une augmentation constante de la population humaine, le changement climatique exerce une forte pression sur l'agriculture et la sécurité alimentaire.

Face à ces défis pressants, BPMP veut mobiliser ses efforts pour explorer et proposer des solutions aux multiples impacts du changement climatique:

- pour assurer la productivité des plantes dans un environnement soumis à des contraintes environnementales et des environnements dégradés
- pour préserver la valeur nutritionnelle des plantes, et donc la qualité des aliments
- pour identifier des solutions pour le stockage du carbone dans le sol.

Pour cela, notre stratégie sera de renforcer le potentiel exploratoire de BPMP en biologie végétale fondamentale. Dans ce cadre, nous ambitionnons de développer des études de haut niveau en biologie végétale, en utilisant la plante modèle *Arabidopsis thaliana* lorsqu'elle est la plus pertinente, mais en mettant davantage l'accent sur d'autres plantes modèles, qui soient, elles, d'intérêt agronomique. Bien qu'il s'agisse d'un chemin étroit, nous pensons qu'il constitue la meilleure stratégie pour opérer un transfert pertinent des connaissances et de compétences, de l'étude des mécanismes biologiques (notre mission première) vers des objectifs appliqués (notre contribution ultime).

3) PRINCIPAUX OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

BPMP a priorisé quatre grands domaines de recherche dans lesquels d'importantes contributions scientifiques doivent être apportées au cours des prochaines années. Il est à noter que l'intérêt et l'expertise de longue date des équipes de BPMP dans le domaine du transport membranaire étayera et consolidera la plupart de ces recherches.

1) Fonctions racinaires

Les études sur les fonctions racinaires ont été et resteront centrales à BPMP. Cette recherche couvre sur un large éventail de projets, principalement abordés sous l'angle de la nutrition de la plante. Il s'agit notamment des mécanismes d'absorption de l'eau et des nutriments et leur coordination avec les réponses adaptatives de la croissance et du développement des racines aux signaux environnementaux (Aqua, HoNuDe, Integration, KaliPHruit, Plasticité). De plus, des études sur l'interaction des racines avec des microorganismes bénéfiques (mycorrhizes, bactéries fixatrices d'azote) ou pathogènes seront développées (TICeR, FeROS). La croissance racinaire est également un objectif important pour améliorer le stockage du carbone dans le sol (Intégration).

Par rapport à nos activités précédentes, une attention particulière sera portée aux structures et types de racines spécialisés tels que les poils absorbants, les racines protéoïdes (lupin), et les racines nodales (céréales). Dans une perspective à plus long terme, les fonctions racinaires devront être considérées en relation avec le sol. Des programmes spécifiques sur l'adaptation des racines aux sols calcaires, sur le mode d'action des biofertilisants ou sur l'exsudation racinaire nous semblent pertinents pour aborder ces questions difficiles.

2) Signalisation des contraintes environnementales

Les mécanismes de signalisation environnementale seront étudiés, tant au niveau cellulaire que sur de longues distances, en utilisant principalement les racines comme modèle.

Premièrement, ces études porteront sur la façon dont les cellules sont capables de percevoir les multiples signaux associés aux stress (disponibilité en nutriments ou en eau, hormones végétales), en considérant les rôles complexes de récepteurs, de transporteurs membranaires ou de transcepteurs. Ces signaux (par exemple NO³⁻) et le rôle en aval de divers messagers secondaires (H⁺, Ca²⁺, ROS) seront

étudiés en utilisant des biosenseurs spécifiques (Aqua, HoNuDe, Influx, Integration, KaliPHruit, MeMo). Comprendre comment les signaux sont transmis grâce à la dynamique des membranes cellulaires via des complexes protéiques mobilisés dans des nanodomaines ou des vésicules d'endocytose sera également un aspect clé (Aqua, TICER). La transduction du signal implique également des protéines kinases/phosphatases maîtresses qui sont largement étudiées par plusieurs équipes (Aqua, HoNuDe, KaliPHruit, MeMo). Notre objectif sera de comprendre comment ces acteurs moléculaires servent à la régulation de cibles spécifiques telles que les facteurs de transcription ou les protéines de transport membranaire.

Deuxièmement, la signalisation à longue distance liée à la disponibilité en eau ou en azote sera étudiée à l'aide de systèmes originaux dits "split root" (Aqua, HoNuDe). Plusieurs types de signaux (miRNA, peptides, phytohormones majeures, ROS) sont potentiellement impliqués. Leur identification reposera sur une combinaison fine d'analyses physiologiques, transcriptionnelles et génétiques.

Nous notons qu'un bon nombre de nos études fait état d'un rôle majeur de la signalisation par les ROS. En raison de l'implication généralisée de ces espèces moléculaires dans les réponses au stress et l'homéostasie des nutriments, la caractérisation de leur fonction et plus généralement du statut redox des plantes représentera un axe transversal majeur de la recherche à BPMP.

3) Reprogrammation de l'expression du génome

Notre objectif est d'analyser comment les stimuli environnementaux induisent une reprogrammation transcriptionnelle profonde des cellules végétales en agissant sur les réseaux de régulation génique. Plus de la moitié des équipes de recherche (Intégration, HoNuDe, FeROS, Plasticity, KaliPHruit, Aqua) développent des projets avec un tel questionnement, utilisant ainsi une série d'approches complémentaires.

La biologie des systèmes, qui offre un cadre théorique solide pour aborder ces questions, est maintenant de plus en plus utilisée à BPMP. Cette approche sera par ailleurs renforcée en utilisant des données d'épigénomique (FeROS, Intégration), en complément de données plus classiques d'expression génique ou d'interaction protéique. Des études pionnières sur l'épigénétique spécifique du type cellulaire et sur la variabilité interindividuelle de l'expression des gènes seront également menées au sein de l'équipe Intégration.

BPMP renforcera également sa capacité à étudier la fonction spécifique des facteurs de transcription. En complément d'études sur leurs interactions avec la chromatine, la régulation de ces protéines par des modifications post-traductionnelles (voir plateforme MSPP) ou des interactions avec des partenaires protéiques à fonctions multiples (ex. régulateurs chromatiniques) seront étudiés (FeROS, Intégration, MeMo). Ces mécanismes peuvent jouer un rôle clé en établissant un lien entre la perception et la signalisation environnementales, d'une part, et la fonction des régulateurs transcriptionnels majeurs d'autre part.

4) Réponses intégrées des plantes aux stress environnementaux complexes

Les équipes de BPMP veulent passer de l'étude de la réponse des plantes à des stress ponctuels dans des systèmes expérimentaux simplifiés à une analyse complète de la réponse des plantes aux stress dans des contextes plus réalistes.

L'un des premiers objectifs sera de comprendre comment les plantes peuvent percevoir des stress combinés et y répondre. La génétique d'association (GWAS) et la biologie des systèmes s'avèrent très efficaces pour révéler des mécanismes de signalisation et des réseaux de réponse émergents, qui ont été omis dans des études antérieures et pourrait être d'une importance agronomique majeure. Un contexte typique est l'interaction de stress nutritionnel (Zn vs. P vs. N) qui provoque des réactions non prédictibles chez le blé dur et *Arabidopsis* (HoNuDe). En relation avec le changement climatique, les équipes de BPMP étudieront également comment les températures élevées interfèrent avec la nutrition des plantes dans les sols calcaires (MeMo et autres).

Un deuxième objectif sera d'analyser les réponses intégrées des plantes à des stress complexes. Un exemple est la façon dont les stress environnementaux tels que la sécheresse, la salinité ou un taux élevé de CO₂ modifient directement ou indirectement le fonctionnement des cellules osmocontractiles telles que les cellules de garde des stomates (Influx, TICeR) ou les cellules déterminant l'enroulement des feuilles chez les céréales (TICeR). Au-delà de la croissance des plantes, les équipes de BPMP étudieront également l'état nutritionnel des plantes, qui détermine en fin de compte la qualité des produits alimentaires. Plusieurs équipes de BPMP s'intéressent aux mécanismes qui sous-tendent les effets négatifs de l'eCO₂ et de la température élevée sur, respectivement, l'assimilation des nutriments végétaux ou l'homéostasie K⁺/pH de la baie de raisin (Intégration, FeROS, MeMo, KaliPHruit).

4) APPROCHES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Pour atteindre ses objectifs scientifiques, BPMP développera des efforts particuliers dans les quatre approches suivantes.

1) Un travail combinant espèces végétales modèles et cultivées.

Ces dernières années, BPMP est passé d'études exclusives sur *Arabidopsis* à des projets sur un ensemble croissant d'espèces végétales avec deux objectifs principaux : (1) explorer de nouveaux systèmes biologiques avec des questions qui ne peuvent être abordées chez *Arabidopsis*, (2) ouvrir de nouvelles voies vers la biologie translationnelle. Le temps est venu d'une planification plus rationnelle et ciblée de ces développements, avec plusieurs objectifs complémentaires.

(i) Les impacts du changement climatique sur la nutrition des plantes comme cibles clés des approches de biologie translationnelle. BPMP veut couvrir les principales problématiques liées à la sécheresse (Aqua, Plasticité), à l'eCO2 (FeROS, Intégration, MeMo), et aux hautes températures (KaliPHruit, MeMo). Notre objectif est d'explorer des solutions pour faire face aux impacts de ces menaces sur l'absorption de l'eau, des nutriments, et sur leur répartition dans les parties comestibles des plantes. Pour cela, nous utiliserons des espèces cultivées pertinentes (maïs, riz, vigne, tomate) ou nous développerons des études parallèles sur des espèces végétales modèles et cultivées (ex. *Arabidopsis* vs blé dur).

(ii) Des études fondamentales et à long terme sur les plantes cultivées susceptibles de déboucher sur de nouvelles ouvertures en biologie translationnelle. Les efforts de BPMP dans ce sens reposeront essentiellement sur les céréales. Les équipes se pencheront sur certaines classes spécifiques de transporteurs (HKT ; TlCeR), leur système racinaire très différencié (Aqua), ou leur réponse prononcée aux contraintes composites (HoNuDe).

(iii) L'utilisation d'*Arabidopsis* comme une étape intermédiaire dans les approches de biologie translationnelle. Cette approche représente une force et une originalité des équipes de BPMP. Par exemple, l'équipe Plasticité souhaite introduire des racines protéoïdes dans de nouvelles espèces végétales, sur la base de son travail fondamental sur le lupin. Ici, *Arabidopsis* pourra être utilisé comme modèle pour explorer les questions liées aux barrières interspécifiques. Alors que les travaux de KaliPHruit visent à améliorer la qualité du raisin, cette équipe établit régulièrement la fonctionnalité des systèmes de transport de potassium de la vigne par expression chez *Arabidopsis*.

En raison de l'importance des enjeux et des difficultés de ces approches, nous avons tenu à les sécuriser dans des projets de grande envergure (ERC HyArchi) ou dans des projets collectifs assurant un partenariat solide (programmes étendards CalClim et eCO2THREATS ; LabCom SOLSTIS). D'une manière générale, une mutualisation des efforts et le partage d'expérience sur les nouvelles espèces cultivées constituera un axe majeur de coopération future entre les équipes. Après une phase initiale d'exploration et de diversification, notre objectif serait de réduire le nombre d'espèces cultivées étudiées à BPMP. Quoi qu'il en soit, un défi pour l'équipe technique et logistique, chargée des installations de culture et de leur suivi, sera d'assurer la production simultanée de matériel végétal à partir de ces différentes espèces.

2) Recherche interdisciplinaire et développements technologiques

Pour compléter son expertise historique dans le domaine du transport membranaire et de la physiologie des stress environnementaux, BPMP poursuivra le développement d'approches interdisciplinaires comme composante clé de ses projets de biologie intégrative.

(i) La modélisation mathématique des flux de solutés et d'eau, du niveau cellulaire au niveau de l'organisme, représentera une première direction. Ces modèles de plantes dits Structure-Fonction visent à intégrer les flux d'eau dans l'architecture du système racinaire (Aqua), le transport ionique entre les compartiments subcellulaires des cellules de garde (Influx), le transport de l'auxine dans les primordia des racines latérales (Plasticité), la charge ionique du phloème vers le mésocarpe ou la plasticité des parois des cellules, dans la baie de raisin (KaliPHruit).

(ii) Des techniques d'imagerie seront utilisées pour suivre l'évolution du statut hydrique et ionique dans des organes complexes. Par exemple, l'imagerie élémentaire permet d'accéder à des profils tissulaires de concentration et de spéciation du fer (MeMo). Plusieurs équipes utiliseront l'imagerie de résonance nucléaire pour analyser l'état hydrique des tissus végétaux en fonction de leurs propriétés hydrauliques (Aqua), du pH local (KaliPHruit, Influx) ou de la teneur intracellulaire en NO³⁻ et Cl⁻ (Influx).

(iii) La biologie des systèmes sera développée plus avant à BPMP. La puissance de découverte de cette approche sera renforcée dans deux directions complémentaires (i) l'amélioration de l'analyse mathématique basée sur de nouveaux algorithmes d'apprentissage machine (HoNuDe) (ii) l'optimisation du phénotypage des plantes à haut débit, pour tester des candidats régulateurs majeurs. Nous pensons que BPMP a de fortes potentialités sur ce dernier point, qui sera également déterminant pour le GWAS. Dans cette optique, les équipes de BPMP poursuivront leurs efforts dans le développement de nouveaux équipements pour la microfluidique (Intégration), les techniques de chambre à pression (Aqua) ou les nouvelles installations microscopiques (plateforme PHIV).

Plusieurs contextes institutionnels ont été identifiés pour rechercher un soutien à ces programmes. En particulier, l'Université de Montpellier et ses départements de physique et de mathématiques ainsi que le LabEx associé (Numev) offrent un environnement privilégié pour la recherche interdisciplinaire. Par ailleurs, l'INRA a lancé un Métaprogramme en biologie prédictive, auquel BPMP souhaite contribuer. Pour cela, BPMP devra renforcer ses forces internes. Cela nécessitera l'implication marquée de certains chercheurs de BPMP dans des domaines interdisciplinaires spécifiques ainsi que des partenariats renforcés avec des chimistes, physiciens et mathématiciens spécialisés. Des collaborations internationales pertinentes (Chili; LIA du CNRS avec l'Université de New York) seront également encouragées. Enfin, nous croyons que le recrutement d'un ingénieur en codage informatique (profil à l'étude) pourrait donner une plus grande autonomie au laboratoire et faciliter le développement de projets nécessitant des programmes informatiques spécifiques.

3) Plateformes scientifiques

Ces équipements procurent une compétitivité unique à BPMP dans plusieurs axes scientifiques majeurs de notre projet.

(i) Phénotypage racinaire. En raison de notre orientation majeure sur les racines, nous poursuivrons le développement d'outils pour le phénotypage automatisé et améliorerons la plateforme HIRROS actuelle. Il s'agira notamment d'un nouveau dispositif pour le phénotypage 2D de systèmes racinaires de grande taille et cultivés sur papier filtre (PhenoROOT). L'analyse d'images demeure un défi central pour suivre la dynamique de l'architecture du système racinaire et pour déterminer les taux de croissance des racines. De nouvelles approches impliquant l'apprentissage machine devront être utilisées. Un autre défi pour BPMP sera d'améliorer notre capacité de phénotypage tissulaire et cellulaire des racines, afin d'assurer le suivi du développement des poils absorbants, des racines latérales ou protéoïdes, par exemple. Alors que l'acquisition de nouveaux équipements d'imagerie pourrait être nécessaire, ces efforts ouvriront de nouvelles perspectives en matière d'analyse fonctionnelle et de criblage génétique. Les efforts seront développés dans un cadre bien identifié, avec de collaborateurs spécialisés dans le phénotypage racinaire (4PMI, AgroEcologie, INRA, Dijon) et nous rechercherons un soutien complémentaire au travers de programmes interdisciplinaires du CNRS ou de l'I-Site MUSE.

ii) Imagerie. D'importants défis en imagerie (microscopie à super-résolution, technologies des bio senseurs) nécessiteront des efforts particuliers. Dans ce dernier cas, BPMP souhaite développer des bio senseurs pour les ROS et divers ions (potassium, phosphate, ammonium, nitrate, fer, manganèse,...), principalement en exprimant dans les plantes des senseurs, tels que ClopH, qui ont été développés chez les animaux ou les microorganismes (Influx, KaliPHruit, MeMo). En raison de la généralisation de cette approche, il pourrait également être pertinent d'améliorer nos instruments d'imagerie pour ces senseurs. Un poste de technicien CNRS a également été demandé pour renforcer la plateforme PHIV et permettre à son ingénieur actuel de consacrer plus de temps au développement technologique.

(iii) Plateforme protéomique de spectrométrie de masse (MSPP) : En ce qui concerne la protéomique, les analyses quantitatives des modifications protéiques (phosphorylation, ubiquitination) resteront un axe majeur. Bien que la demande potentielle des équipes de BPMP en protéomique soit importante, la synergie entre ces équipes et MSPP peut encore être améliorée. Un autre défi consistera à assurer la compétitivité de la MSPP en renouvelant son principal instrument de spectrométrie de masse au cours des deux prochaines années. Un bon positionnement local au sein du Pôle Protéomique de Montpellier (BioCampus) (appels d'offre IBISA), mais aussi un soutien de nos institutions nationales seront indispensables.

iv) Électrophysiologie. Fort de sa solide expérience, BPMP vise à poursuivre le développement des analyses *in planta*, en particulier au niveau des stomates (Influx, TICeR). Un deuxième objectif sera de coupler les approches d'électrophysiologie et d'imagerie (Influx, TICeR).

v) Analyse des ions et des isotopes stables. BPMP possède plusieurs équipements et plateformes clés dans ce domaine. Pour une optimisation et une meilleure visibilité aux niveaux local et national, il pourrait être judicieux de regrouper ces activités au sein d'une structure commune. À ce propos, et en anticipation du prochain départ à la retraite du collègue en charge de la plateforme d'analyse des isotopes stables, cette activité devra être soutenue par un nouveau recrutement. Un poste d'ingénieur assistant a été demandé à l'INRA.

(vi) Bioinformatique. Nous sommes tous confrontés à une demande croissante en bioinformatique pour l'analyse de données protéomiques, d'hybridation de puces, de RNAseq ou de séquençage de nouvelle génération (NGS). Le GWAS nécessite également une analyse statistique spécifique en relation avec des données génotypiques complexes. Face à cette demande croissante et diversifiée, BPMP ressent un fort besoin de mieux structurer ses activités dans ce domaine. Si certains traitements des données peuvent être externalisés, nous devons également renforcer et adapter en permanence notre capacité d'analyse interne. Tout d'abord, les besoins individuels de chaque équipe et les compétences présentes

dans les équipes ou les plateformes techniques devront être confrontés. Après cette étape, on peut envisager la formation de personnels dédiés, et éventuellement l'identification d'un nouveau profil de recrutement technique et d'une nouvelle plateforme.

4) Qualité et traçabilité

Une meilleure mise en œuvre de ces approches dans l'ensemble de nos différentes activités est importante et requiert une implication du collectif. Tout d'abord, les efforts visant à mieux organiser nos ressources biologiques communes et à **accréditer** les installations méthodologiques seront poursuivis. Deuxièmement, une approche pragmatique sera adoptée à l'aide d'actions emblématiques pour démontrer les avantages globaux d'une planification et d'une organisation rationnelles des projets à grande échelle (par exemple, les projets ERC).

5) BPMP DANS SON ENVIRONNEMENT

BPMP articulera son activité de recherche et d'enseignement à différents niveaux, en prenant en compte, bien sûr, les lignes directrices de ses quatre institutions.

1) Affirmer le positionnement scientifique de BPMP au sein du site de Montpellier.

En raison de sa politique scientifique locale, notre site constitue sans aucun doute un niveau clé pour mettre en œuvre, du point de vue de la biologie végétale, des solutions au changement climatique. Ainsi, nous jouerons un rôle actif dans l'animation scientifique de structures locales telles que le LabEx Agro, le Département scientifique de l'Université, et le futur pôle "Agriculture et Environnement" de l'I-SITE MUSE. Au-delà des projets individuels des équipes, les programmes étendus ou collectifs menés par BPMP (eCO2THREATS, CalClim) qui visent à comprendre les impacts du changement climatique sur la production végétale sont des exemples typiques des actions à mener à ce niveau.

En complément, nous nous attacherons à défendre la pertinence de notre positionnement en biologie végétale fondamentale, tant sur les plantes modèles que sur les plantes d'intérêt agronomique. Comme par le passé, les interactions scientifiques avec les laboratoires voisins seront déterminantes pour élargir la portée de nos études (modélisation mathématique, qualité alimentaire, interactions plantes-sol). En particulier, l'émergence d'un Institut de Santé Végétale à Montpellier peut ouvrir de nouvelles opportunités de coopération, dans le cadre du LabEx Agro, pour développer des projets sur les interactions plantes- stress biotiques.

Nos plateformes d'imagerie et de protéomique sont bien intégrées au sein d'un consortium multi-institutionnel de services techniques (UMS BioCampus), principalement lié au pôle de Biologie Santé. Pourtant, le site de Montpellier a besoin d'une meilleure intégration des équipements et plateformes spécifiques de la communauté de Biologie Végétale et d'Agronomie. BPMP est prêt à contribuer à cette évolution en apportant son expertise et la visibilité de ses équipements en phénotypage racinaire, électrophysiologie et analyses ioniques.

Enfin, BPMP poursuivra ses efforts d'enseignement, tant à l'Université de Montpellier qu'à Montpellier SupAgro. Au-delà des cours magistraux, qui sont pour la plupart dispensés par des collègues de ces institutions, toutes les équipes peuvent proposer une offre significative en matière de formation par la recherche (étudiants de premier et deuxième cycles). Ce sera sans aucun doute un moyen de renforcer nos liens avec SupAgro. Pour l'instant, le positionnement de BPMP au sein du département de Biologie-Agrosciences est excellent mais pourrait être affaibli dans quelques années, en raison de la retraite anticipée de son directeur (B. Touraine).

2) Contribuer aux défis scientifiques nationaux

Au niveau national, BPMP défendra son rang en biologie végétale fondamentale et contribuera aux grands défis portés par le Département de Biologie et Amélioration des Plantes de l'INRA et par l'Institut National des Sciences Biologiques du CNRS. Par exemple, BPMP s'efforcera de trouver un positionnement original dans le domaine prometteur de la biologie prédictive, à travers le Métaprogramme dédié de l'INRA. Les études sur les fonctions racinaires (phénotypage) et les réponses des plantes aux stress multiples s'inscrivent également dans les priorités scientifiques de l'INRA. Dans le droit fil de l'initiative 4 pour 1000, BPMP est également disposé à apporter des idées originales sur les liens entre le métabolisme du carbone et la croissance racinaire. Enfin, plusieurs projets de BPMP s'inscrivent clairement dans l'agenda de recherche interdisciplinaire promu par le CNRS.

3) Défendre la visibilité internationale de BPMP.

Comme par le passé, BPMP veut porter son activité de recherche au plus haut niveau international. Au-delà des collaborations bien établies dans les pays occidentaux (Europe, USA), les équipes explorent désormais avec une attention particulière les liens avec l'Asie (Chine, Japon). Au-delà des collaborations de recherche, la formation des étudiants à l'aide de dispositifs dédiés (par ex. les bourses du CSC) ou

dans le cadre de notre école d'été bisannuelle (MISTRAL) sera cruciale. Nos relations avec le Sud cibleront préférentiellement le Maghreb et le Vietnam, et un soutien du Labex Agro est prévu pour toutes ces actions internationales.

4) Élargir le partenariat industriel de BPMP.

BPMP a considérablement amélioré son partenariat industriel au cours des dernières années, principalement au travers de projets bilatéraux (Solvay, Syngenta, SATT AxLR). Pourtant, son activité dans ce domaine doit être consolidée. Une des orientations privilégiées consisterait à établir un partenariat étroit entre BPMP et une entreprise privée en utilisant un appel d'offre spécifique de l'ANR (LabCom). Des contacts ont été établis avec Frayssinet, une société produisant des engrais organiques. Nous discutons ainsi l'opportunité d'établir une structure de recherche mixte public-privé, hébergée dans notre institut, pour étudier les mécanismes de la bio-stimulation et le rôle des micro-organismes dans le sol. Au-delà de sa dimension partenariale, ce projet comblerait une lacune scientifique évidente de nos activités et renforcerait les études sur les interactions plante-sol. A plus long terme, nous prévoyons que nos efforts accrus de recherche sur les plantes cultivées ouvriront de nouvelles possibilités de partenariat avec des entreprises privées.

6) RESSOURCES HUMAINES ET ORGANISATION INTERNE

Bien que la programmation scientifique et le positionnement local représentent des défis majeurs pour l'avenir de BPMP, plusieurs aspects de l'organisation interne exigeront également une attention particulière :

1) Consolider le fonctionnement collectif de l'unité.

Au cours de la dernière période, BPMP a développé une organisation collective solide. Les équipes de recherche bénéficient du soutien efficace de deux équipes de services communs bien organisées et autonomes et d'un large éventail de plateformes et d'installations techniques. Notre modèle économique, qui a été mis sous tension par une baisse récente du financement de la recherche, mais qui a résisté à celle-ci, offre un juste équilibre entre les initiatives individuelles des équipes et la solidarité collective. Pourtant, la vie quotidienne et l'harmonie entre toutes les catégories de personnels exigent une attention continue. Une attention particulière sera portée à l'animation de nos multiples comités de fonctionnement qui structurent les points clés de notre activité collective, tels que les équipements communs, la santé des plantes et leur production. De plus, une forte mobilisation collective sera nécessaire pour poursuivre notre plan d'économie d'énergie.

2) Gérer un flux constant de départs à la retraite

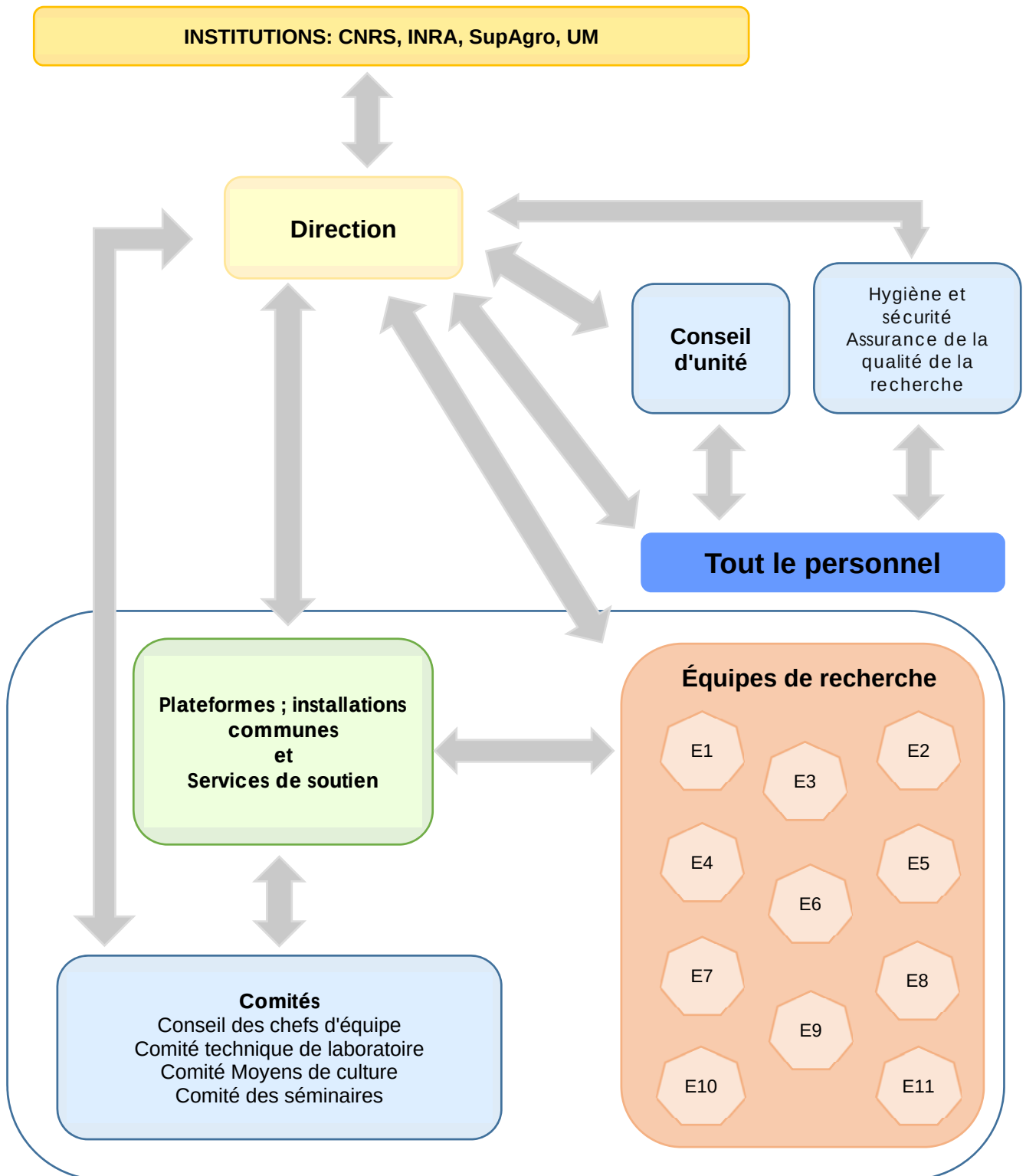
En raison du vieillissement inévitable de notre personnel, nous prévoyons le départ à la retraite d'environ deux scientifiques et d'un ITA par an au cours des cinq prochaines années. Du fait de la dynamique scientifique de BPMP et de son attractivité, cela ne devrait pas faire obstacle à notre dynamique scientifique. Cependant, une attention particulière devra être accordée aux personnels des services communs (culture des plantes, laverie) et des plateformes (isotopes stables). Des postes correspondants ont déjà été demandés à l'INRA et au CNRS. Notre future représentation à l'Université de Montpellier et Montpellier SupAgro est aussi un de nos points faibles. BPMP devra être une source de propositions lorsque plusieurs postes de professeurs devront être renouvelés au cours des prochaines années.

3) Assurer le développement des petites équipes

Notre organisation et notre gestion scientifiques ont été profondément renouvelées ces dernières années mais ne sont pas figées. Certaines équipes ont identifié l'émergence potentielle de nouveaux chefs de groupe (A. Martin, H. Rouached). La force humaine de ces équipes et d'autres équipes de petite taille (Influx, KaliPHruit) devra être renforcée par des recrutements ciblés. Notons que l'arrivée d'une jeune chargée de recherche du CNRS (S. Cortijo) dans l'équipe Intégration contribue déjà à cette dynamique.

Enfin, nous sommes conscients que les micro-organismes du sol jouent un rôle clé dans la nutrition des plantes et que l'activité de BPMP dans ce domaine nécessite des forces supplémentaires. Accueillir de nouveaux collègues ou même une nouvelle équipe sur ce sujet sera une priorité stratégique.

Annexe 2 - Tableau fonctionnel



Annexe 3 - Équipement - Plateformes

Introduction

BPMP a mis en place une organisation solide pour l'utilisation collective des équipements technologiques, ce qui a abouti à la création de plusieurs plateformes et ateliers communs (voir l'organigramme dans le document d'auto-évaluation, et (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/en/platform/>)). Ces plateformes et ateliers sont largement ouverts à toutes les équipes de recherche de BPMP, ainsi qu'aux utilisateurs externes, soit par le biais de collaborations, soit par de prestations analytiques payantes.

La liste et la description des plateformes et des ateliers/installations communs sont présentées ci-dessous, en distinguant les deux plateformes qui ont un positionnement officiel au sein des organisations institutionnelles au niveau local ou national (PHIV et MSPP), et les ateliers spécifiques de BPMP.

Plateformes

Plateforme d'histocytologie et d'imagerie des cellules végétales (PHIV)

La Plateforme d'Histocytologie et d'Imagerie Cellulaire Végétale (PHIV : <https://phiv.cirad.fr/>) est une plateforme commune entre notre unité de recherche sur le campus " La Gaillarde " (PHIV-La Gaillarde) et l'UMR " Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes » (AGAP) basée sur le campus de " La Valette " (PHIV-La Valette) du Cirad. Dès 2003, PHIV est devenue un membre fondateur de la plateforme régionale "Montpellier Ressources Imagerie" (MRI, UMS Biocampus) qui est reconnue par IBISA, le consortium chargé d'organiser au niveau national les plateformes dédiées aux sciences biologiques, sanitaires et agronomiques. MRI est elle-même membre de France BioImaging (<http://france-bioimaging.org/>) et a reçu la certification ISO 9001-2015 NFX 50-900.

Les missions de PHIV sont, (i) de fournir l'équipement depuis la préparation des échantillons jusqu'à l'observation au microscope, (ii) de maintenir toutes les machines en bon état de fonctionnement, (iii) d'aider les utilisateurs à concevoir leurs expériences, de les former à utiliser le matériel et les aider à interpréter les données, (iv) de développer de nouvelles méthodes d'imagerie et (v) de communiquer sur ses connaissances et participer aux enseignements.

MRI-PHIV-Lavalette et MRI-PHIV-La Gaillarde sont gérées de manière à être totalement complémentaires, tant au niveau du matériel que des compétences. MRI-PHIV-Lavalette est davantage orientée vers les approches d'histochimie moléculaire et possède une expertise très précieuse en anatomie végétale, tandis que MRI-PHIV-La Gaillarde est plus impliquée dans le développement de méthodes d'imagerie in vivo (méthodes basées sur la fluorescence, notamment le développement de sondes ratiométriques de biosenseurs).

Il est indispensable de décrire où les protéines sont localisées dans la plante (à l'échelle des organes et des cellules) pour comprendre leurs fonctions. Ce type de questions est abordé par une majorité de chercheurs de BPMP. C'est pourquoi un investissement important a été réalisé sur MRI-PHIV-La Gaillarde, avec l'acquisition d'un microscope confocal à balayage laser Leica SP8 et d'un microscope à épifluorescence Zeiss Apotome. De plus, un tiers des équipes de recherche utilisent, voire développent, des biosenseurs. Ces molécules, qui peuvent être produites génétiquement pour piloter leur localisation subcellulaire, permettent de percevoir des variations dans différents composants cellulaires tels que le pH, les ROS, le calcium, la Rho-GTPase, le nitrate, le fer... Pour suivre cet intérêt croissant, nous avons mis au point un nouveau microscopique ratiométrique avec une source lumineuse. **De plus, nous développons un prototype pour combiner l'utilisation de biosenseurs bioluminescentes avec une acquisition à long terme (plusieurs jours)** sur un dispositif d'imagerie verticale. Ce projet a été financé par le programme "défi instrumentation aux limites" du CNRS en 2018.

Au cours de la dernière période (2014-2018), PHIV a été associée à 24 publications de BPMP (voir annexe 4). PHIV est également en charge d'un cours d'imagerie cellulaire végétale dédié aux étudiants du

Master de l'Université de Montpellier, et contribue à l'école d'été MISTRAL (organisée par BPMP). PHIV organise également chaque année deux à trois stages de formation sur place en microscopie, histologie moléculaire (immunocytologie et hybridation *in situ*), analyse d'images pour des étudiants diplômés et des scientifiques permanents des différents instituts de recherche. Le personnel de PHIV fait partie de plusieurs réseaux (GDR imabio (CNRS), Rmui (INRA), BIOCCI (biocapteurs en Occitanie), et co-organise chaque année le "Plant Imaging in Occitanie" avec des collègues de Toulouse (LIPM/LRSV), Perginan (LGDP) et Banyuls (UPMC), pour fédérer les connaissances en imagerie végétale dans cette nouvelle région.

Enfin, les utilisateurs de PHIV ne sont pas limités aux unités de recherche de BPMP et AGAP. A l'avenir, PHIV prévoit de fédérer tous les groupes de recherche montpellierains travaillant dans le domaine des sciences végétales et agronomiques, et qui ont besoin de méthodes d'imagerie pour leurs travaux. **Ainsi, BPMP et AGAP, par leur investissement dans PHIV et MRI, jouent un rôle stratégique important dans l'organisation des installations de microscopie et d'imagerie ouvertes à toute la communauté des sciences végétales et agronomiques de Montpellier.**

Plateforme protéomique de spectrométrie de masse (MSPP)

Présentation de MSPP

MSPP (Mass Spectrometry Proteomics Platform) du laboratoire BPMP appartient au Pôle Protéomique Montpelliérain de l'UMS Biocampus (PPM, <https://www.ppm.cnrs.fr/>). PPM regroupe des installations technologiques régionales dans le domaine de l'analyse protéomique, est reconnue comme une plateforme IBISA à l'échelle nationale et est certifiée ISO9001:2015. Sa gestion et sa coordination sont assurées par un responsable scientifique (P. Marin), un responsable scientifique adjoint (V. Santoni, DR INRA à BPMP, responsable de MSPP) et un responsable technique (M. Séveno) avec des comités exécutifs et directeur. Les décisions stratégiques sont fondées sur les recommandations d'un conseil scientifique composé d'experts externes.

Le personnel de MSPP regroupe 1 DR 50%, 1 IR 80%, 1 IE 50%, 1AI 100%, 2 TR 100%. MSPP dispose de deux nano-HPLC (Thermo Fisher Scientific) couplés à des spectromètres de masse (Maxis HD Bruker et Q-Exactive + Thermo Fisher Scientific). Le logiciel s'appuie sur des outils bioinformatiques dédiés à l'identification des protéines, à la quantification sans étiquetage des protéines et aux analyses statistiques.

Étant hébergé par BPMP, les objectifs de MSPP sont de fournir des outils protéomiques afin de répondre aux objectifs du laboratoire, y compris la capacité d'identifier et de quantifier les transporteurs membranaires et les composants des voies de signalisation, sous leur forme native et sous leur forme modifiée. En effet, les modifications post-traductionnelles contribuent aux principaux mécanismes de régulation étudiés à BPMP.

Projets traités au cours de la période 2014-2019

En plus des utilisateurs de BPMP, MSPP est ouvert aux utilisateurs externes, y compris les laboratoires universitaires et les entreprises privées. Les projets soumis à MSPP sont sélectionnés sur la base de leur faisabilité technique et de la présence d'un financement adéquat qui doit couvrir le coût des analyses. Dans l'ensemble, au cours de la période 2014-2019, MSPP a traité en moyenne 10 projets par an : 75 %, 13 % et 12 % d'origine régionale, nationale et européenne, respectivement. Au cours de cette période, les collaborations et les services sur demande ont représenté respectivement 97 % et 3 % des projets réalisés par MSPP. Les revenus moyens s'élevaient à 24 000€ par an, y compris les subventions sur les projets internes.

Les projets internes représentaient moins de 10% des projets réalisés par la plateforme au cours de la période et ont été consacrés à des développements méthodologiques incluant (i) la mise en place d'une stratégie de spectrométrie de masse ciblée (Parallel Reaction Monitoring) pour l'identification et la quantification des protéines faiblement abondantes (ii) l'analyse protéomique de l'ubiquitination des protéines (iii) la comparaison des logiciels de quantification à grande échelle et sans marquage des protéines. Les développements (i) et (ii) ont été soutenus par des subventions de l'INRA (département BAP)

19 articles dont au moins un membre de MSPP ont été publiés au cours de la période.

Enseignement et formation

Pendant la période d'évaluation, MSPP a participé à de nombreuses écoles et journées thématiques : - MISTRAL (Montpellier International School on ion and water TRANsport in pLants, 2014, 2016, 2018) - Ecole inter-organismes (2014) - Ecole de recherche du réseau MassProt (2016) - Ateliers technologiques du Biocampus Montpellier (2014) - Club jeunes chercheurs SFEAP (2015). MSPP encadre également des étudiants, ingénieurs et post-doctorants dans le cadre de projets internes ou collaboratifs (2 masters, 2 post-doctorants pendant la période) et assure la formation interne des nouveaux membres de MSPP (N. Berger et V. Demolombe).

Perspectives

Les objectifs scientifiques sont de poursuivre la mise en œuvre de stratégies de spectrométrie de masse et de développements bioinformatiques afin de fournir à la communauté scientifique végétale des occasions de se lancer sur des **projets protéomiques ciblés** et à **grande échelle** sur les formes **natives** et **modifiées** des protéines, en particulier sur la **quantification de l'ubiquitination**.

Analyse SWOT : Force Bonne dynamique de MSPP (nouvelles technologies) / Faiblesse : Un seul spectromètre de masse adapté à la plupart des projets et qui pourrait bientôt devenir désuet / Opportunités : Achat de nouveaux équipements (Biocampus, IBISA, INRA, CNRS) / Risques : Moins d'appels d'offres disponibles en raison de la restructuration nationale et régionale.

Ateliers/installations communes

Moyens de culture

Depuis le déménagement dans notre bâtiment actuel en 2005, BPMP n'a cessé de développer ses installations de culture pour répondre à la demande croissante de son personnel scientifique et technique. Ces installations comprennent maintenant : 13 chambres de culture (d'environ 6 à 10 m² chacune) pour les plantes cultivées sur sol, en hydroponie ou *in vitro* dans des conditions standard, 7 petites chambres de culture pour les expériences dans des conditions spécifiques non standard, 3 chambres de culture avec contrôle environnemental sophistiqué pour des expériences spécifiques sous contrôle étroit et une serre S2 de 350 m² (voir détail sur toutes ces installations sur: <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/bpmp/en/platform/plant-culture/>).

Plateforme d'expression hétérologue et d'électrophysiologie (EHEV)

L'analyse moléculaire du transport membranaire de l'eau et des ions minéraux dans les plantes nécessite l'identification des protéines responsables de ces différents transports. Une plante possède plusieurs centaines de protéines différentes remplissant cette fonction, souvent spécifiques (par exemple, pour le potassium, le nitrate, le fer, l'eau, etc...). Il faut donc pouvoir les isoler et les étudier séparément.

La plateforme d'expression hétérologue et d'électrophysiologie de BPMP est un dispositif unique en France dédié à ce type de travail sur les protéines végétales. Il permet notamment de caractériser en détail l'activité des protéines de transport membranaire en mesurant leur signature électrique, puisque la plupart des nutriments sont transportés sous une forme ionique. Cette plateforme, qui regroupe sept dispositifs d'enregistrement pour diverses analyses en contexte hétérologue (ie dans des ovocytes de xénopes) ou dans des cellules végétales, est largement ouverte aux utilisateurs externes.

Au cours de la dernière période (2014-2019), EHEV a accueilli 10 doctorants et chercheurs de laboratoires français ou d'institutions étrangères (Italie, Royaume-Uni, Suède, Tunisie, Inde) pour mener leurs projets de recherche. De plus, EHEV a été impliqué dans plusieurs formations: (i) le module pratique de l'école thématique "transport d'ions dans les plantes" pour les étudiants en Master de l'Université Montpellier (chaque année), (ii) le module pratique de l'école thématique d'électrophysiologie "E2M" INRA-CNRS-INSERM (en 2018) (iii) les modules pratiques de l'école internationale MISTRAL (organisé par BPMP en 2014, 2016 et 2018).

Au cours de la dernière période, la plateforme EHEV a été associée à 20 publications.

Atelier d'analyse des Isotopes Stables (AIS)

L'Atelier d'analyse des Isotopes Stables (AIS) a été créé en 1990. Il permet d'analyser la teneur isotopique (principalement des isotopes non radioactifs ^{15}N et ^{13}C) d'échantillons provenant de laboratoires de l'INRA mais aussi d'autres laboratoires, dont des institutions étrangères. Il soutient également les projets de recherche de BPMP qui étudient les mécanismes de la nutrition azotée et carbonée des végétaux, avec un accent particulier sur le transport des composés N et C. L'amélioration de la nutrition minérale des plantes, en particulier la nutrition en azote, est un enjeu majeur pour l'agriculture moderne qui doit trouver des solutions pour une meilleure efficacité d'utilisation des engrais. Il s'agit d'une exigence absolue pour limiter la pollution de l'environnement par le nitrate, sans diminuer la productivité des cultures. AIS contribue à la réalisation de cet objectif par le développement de méthodologies permettant des dosages quantitatifs de l'absorption et de l'utilisation de l'azote par les plantes. Pour cela, AIS est équipé de deux systèmes de spectrométrie de masse isotopique en ligne (on line-IRMS, Elementar). AIS possède la certification "Fiabilité des mesures" depuis 2015.

Service d'Analyses Multi-Élémentaires (SAME)

SAME, créé officiellement en juillet 2016, est consacré à la quantification atomique à partir d'échantillons végétaux (racines, feuilles, fruits, graines, fluides cellulaires...) ainsi qu'à partir de matériaux du sol. Globalement, les échantillons (matière sèche) sont digérés par hydrolyse acide qui désagrège les structures moléculaires pour libérer leur contenu atomique (phosphore, calcium, magnésium, sodium, fer, zinc...). Après cette étape d'hydrolyse, les éléments choisis sont quantifiés par spectrométrie d'émission atomique. Le service proposé par la plateforme comprend l'hydrolyse des échantillons, le choix des éléments et la quantification par spectrométrie. L'équipement est composé d'un micro-ondes avec 2x24 réacteurs pour la digestion acide et d'un spectromètre d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES, Agilent) équipé d'un échantillonneur automatique.

Plateforme de phénotypage racinaire

La plateforme de phénotypage racinaire, créée en 2017, est dédiée à l'analyse cinétique et non destructive de l'architecture du système racinaire des semis de nombreuses espèces dont *Arabidopsis*, riz, tomate, colza et *Medicago* cultivés *in vitro*. L'objectif principal de la plateforme est de développer des approches, des outils et des méthodes pour identifier l'impact de différents environnements sur la croissance et le développement des racines. Cela comprend les stress osmotiques, les carences ou excès en nutriments ou les interactions biotiques, seuls ou en combinaison. Ces analyses servent de base à d'autres approches de génétique et de physiologie moléculaire.

Les plantules sont cultivées *in vitro* sur des boîtes de Pétri de 120x120mm (petites boîtes: SP) ou 245x245mm (grandes boîtes: LP). L'installation de phénotypage comprend une unité d'imagerie autonome qui peut traiter jusqu'à 72 PL et 200 SP à la fois, avec une fréquence d'imagerie allant de 2 à 24 heures.

L'automate d'imagerie est situé dans une chambre de culture dédiée permettant d'ajuster la température, l'hygrométrie, la photopériode, l'intensité lumineuse en fonction des besoins de l'utilisateur. Il est équipé d'une caméra linéaire 16 Mpixel, d'un objectif télécentrique et d'un rétroéclairage LED collimaté pour des images à 10µm de résolution avec un contraste élevé (même pour les racines minces et presque translucides d'*Arabidopsis*).

Les images collectées sont stockées à long terme dans une base de données sécurisée. Les images sont actuellement analysées de manière semi-automatique. Un pipeline entièrement automatisé intégré dans la suite OpenAleaLab (<https://team.inria.fr/virtualplants/software/>) est en cours de développement. La plateforme de phénotypage racine est soutenue par les programmes de recherche de BPMP, mais elle est ouverte à la communauté scientifique par le biais de collaborations locales, nationales et internationales.

Plateforme d'analyse transcriptomique GeneAtlas®

BPMP a mis en place le système GeneAtlas de la société Affymetrix en 2014. Ce système permet d'effectuer, rapidement et sur place, toutes les étapes nécessaires à l'acquisition des données

transcriptomiques. Les données d'expression des gènes sont acquises par hybridation de microréseaux (organisés en bandes indivisibles de 4 microréseaux). À ce jour, le système donne accès à l'expression génique de plantes modèles comme *Arabidopsis thaliana*, *Medicago*, le soja et le riz. Par exemple, les microréseaux d'*Arabidopsis* fournissent des données d'expression pour plus de 28 000 gènes, y compris les précurseurs des miARNs.

La simplicité du système permet à chacun d'étudier les transcriptomes de plantes quand il le souhaite. Le protocole menant à la synthèse de l'ADNc marqué est une expérience de biologie moléculaire classique. L'hybridation des puces à ADN a lieu dans une "Station d'hybridation" dédiée. Un premier dispositif robotisé appelé "Station Fluidics" permet le lavage et la coloration des puces. Ensuite, une "Station d'Imagerie" est utilisée pour l'imagerie des 4 puces en parallèle. Enfin, un ordinateur dédié à l'analyse des données peut être utilisé. Sur cet ordinateur, le logiciel Expression Console permet d'évaluer la qualité des puces à ADN. Le logiciel contrôle également une console d'analyse du transcriptome (TAC) qui permet la normalisation des données suivie d'une analyse conduisant à l'identification des gènes différentiellement exprimés lors de la comparaison des traitements 2 par 2 (analyse statistique par t.test).

Cet outil permet de contourner certaines limitations : le budget nécessaire à l'hybridation d'une puce est réduit, le système est moins complexe et évite de déplacer des expériences individuelles sur des plateformes externes (contrôle des protocoles, synchronisation, données, etc...). Avec la généralisation de l'approche de la Biologie des Systèmes, impliquant une approche répétitive et systématique dans laquelle chaque analyse transcriptomique alimente un modèle de réseau de régulation, cet outil permet aux équipes de BPMP de déchiffrer avec une grande précision des signaux et réseaux de régulation génétique qui contrôle l'homéostasie des nutriments chez *Arabidopsis thaliana* et autres plantes modèles.