

MASTER II Biologie Végétale

Parcours : Plant Integrative Biology and Breeding

PROJET PRÉSENTÉ PAR :

Bouchet Péroline, Cauty Audrey, Hereil Alexandre, Mineiro Maria



Projet ingénieur :

Identification de traits phénotypiques de tolérance à la sécheresse pour la sélection de maïs population



COVALIENCÉ

Table des matières

Introduction	1
1. Problématique et méthodologie de travail	3
1.1. Contexte et objectifs d'étude	3
1.2. Méthodologie d'exécution du projet	4
1.3. Contenu du projet	7
2. Etat de l'art	9
2.1. Impact du stress hydrique et thermique sur le cycle du maïs	9
2.1.1. Stress hydrique et thermique pré-floraison	9
2.1.2. Stress hydrique et thermique pendant la floraison	12
2.1.3. Stress hydrique après la floraison	14
2.1.4. Précocité	14
2.2. Phénotypage de la tolérance au stress hydrique et thermique	15
2.2.1. Choix des traits de sélection	15
2.2.2. Ancrage racinaire	16
2.2.3. Précocité	16
2.2.4. Anthesis-Silking Interval	17
2.2.5. Recovery-overnight	17
2.2.6. Sénescence foliaire	18
2.2.7. Stérilité de la panicule et Leaf firing	18
2.2.8. Rendement	19
2.3. Sélection du maïs population	19
2.3.1. Compromis entre érosion génétique et pression de sélection	19
2.3.2. Bonnes pratiques pour éviter les biais de sélections	19
3. Résultats	21
3.1. Interviews agriculteurs	21
3.2. Itinéraire technique	23
Conclusion	24

Introduction

Le maïs est une des principales céréales cultivées et est à la base de l'alimentation de nombreuses régions du monde. Cette céréale provient d'Amérique centrale et aurait été domestiquée à partir de la Téosinte dans la région centrale du Mexique autour de -7000 ans. Il a été rapporté des Caraïbes par Christophe Colomb en 1493 et cultivé pour la première fois en Europe en Andalousie. Ces premiers maïs étaient de type « corné » (grains durs). Les premiers de type « denté » (avec une partie de l'albumen farineux et une autre partie plus en périphérie plus dure et vitreuse) ont été introduits plus tard, dans la première moitié du XVI^e siècle.

Originellement cultivé pour l'alimentation humaine, le maïs alimentaire ne représente aujourd'hui qu'une petite fraction de la production française. Il reste toutefois un aliment de base pour de nombreux pays comme le Mexique par exemple ou encore les États-Unis (mais ici de manière ultra transformée). L'utilisation du maïs comme plante fourragère est relativement récente (signalée en 1789) mais est devenue largement prépondérante, aujourd'hui près de 17 Mt sont produits par an contre 12,4 Mt pour les maïs grain (Agreste, 2018). Citons également ses nombreuses applications industrielles : éthanol, colles industrielles, matières plastiques biodégradables ...

Avant 1947, seules des variétés populations étaient cultivées en France. C'est après que des hybrides nord-américains furent introduits et inscrits au catalogue officiel français de par leurs performances agronomiques supérieures aux variétés locales françaises. Diffusées à partir de 1955, elles ont rapidement remplacé les populations locales (Doré *et al.*, 2006).

Conscient du risque de perte de biodiversité que présentait l'émergence des variétés hybrides, l'INRA a dès les années 1947-48, mené des opérations de prospection dans les Pyrénées et le sud du Massif central pour sauver ces variétés locales (Doré *et al.*, 2006). Ces opérations ont été poursuivies ensuite et sont toujours menées par des organismes tels que AgroBio Périgord.

De plus, certains rares agriculteurs, continuent de préserver la culture de maïs population. Les variétés population sont "composées d'individus exprimant des caractères phénotypiques proches, mais présentant encore une grande variabilité. Ceci leur permet d'évoluer selon les conditions de cultures et les pressions environnementales" (Réseau Semences Paysannes). Pour rester compétitives face aux variétés hybrides, ces variétés population sont encore soumises à des programmes de sélection.

Aujourd'hui les questions de changements climatiques sont très largement étudiées en sélection variétale. En effet avec le réchauffement climatique de plus en plus d'événements erratiques se produisent (Giec, 2013). Par exemple, les épisodes de sécheresse prolongés mettant en péril de nombreuses cultures. La sécheresse peut être associée à une baisse de précipitation à des moments critiques ou à de fortes chaleurs. Cela peut affecter de manière dramatique les cultures et notamment le rendement de ces dernières (Agreste, 2018). Le maïs n'est en aucun cas épargné par cela. En effet, le maïs est connu pour avoir des besoins en eau assez conséquents en comparaison d'autres cultures (ex : sorgho ou pomme de terre). Malgré tout il reste derrière le soja et les betteraves sucrières avec un besoin de 575 mm d'eau au cours de sa croissance (www.semencesdefrance.com). C'est pour cela que des programmes de

sélection, ayant pour but de développer des variétés de maïs population résistantes à la sécheresse, sont mis en place.

Ce projet ingénieur s'inscrit dans la thématique du maïs population. Il est réalisé avec l'association AgroBio Périgord, qui travaille notamment sur les problématiques de sélection de maïs population, et qui souhaite développer de nouvelles méthodes de sélection de maïs pour une résistance à la sécheresse. Pour cela AgroBio Périgord a fait appel à notre groupe d'étudiants. Le but de notre étude est d'acquérir de nouvelles connaissances sur des caractères phénotypiques en lien avec la tolérance à la sécheresse et de les inclure dans une stratégie de sélection réalisable en conditions paysannes.

Avec les résultats de ce travail et après un premier essai, AgroBio Périgord pourra proposer à ses adhérents une méthode de sélection pour améliorer des variétés de maïs population résistantes à la sécheresse.

1. Problématique et méthodologie de travail

1.1. Contexte et objectifs d'étude

AgroBio Périgord est un GAB (Groupement d'Agriculteurs Biologiques) avec une spécificité de Maison de la Semence Paysanne (travaillant avec des agriculteurs de toute la France). Pour des raisons historiques l'association située dans le Périgord travaille surtout sur le maïs. Elle dirige un programme de revalorisation des variétés de maïs population. Ces variétés permettent aux agriculteurs d'accéder à une autonomie semencière qui répond à plusieurs enjeux. Le principal enjeu est économique : le coût des semences hybrides est très élevé en agriculture biologique (250 €/ha contre 150 €/ha en conventionnel) ce qui peut être un frein pour les agriculteurs en conversion.

Les variétés population, si elles ont généralement un rendement inférieur aux variétés hybrides, présentent d'autres caractéristiques intéressantes (variétés adaptées au contexte et usages locaux). Elles permettent également aux agriculteurs de participer activement au maintien de la biodiversité cultivée et favorisent la réappropriation du savoir-faire.

Dans un contexte de changements climatiques, il serait intéressant de sélectionner des variétés de maïs population tolérantes à la sécheresse pour pallier aux stress hydriques. Ce projet pourrait rendre service aux agriculteurs du Périgord impliqués dans l'association, aux agriculteurs au niveau national et à l'association qui va acquérir de nouvelles méthodes.

Le but principal de ce projet est d'obtenir de nouvelles variétés de maïs résistantes au stress hydrique, c'est à dire qui maintiennent un niveau de rendement convenable en condition de sécheresse. La formulation de ce projet est présentée en annexe 1, afin de définir les principales caractéristiques. Pour accompagner le développement des maïs population dans un contexte de réchauffement climatique, AgroBio Périgord cherche à développer de nouveaux protocoles pour améliorer la tolérance à la sécheresse.

Les impacts de la sécheresse sur le maïs se répartissent en deux composantes. La première est le stress hydrique qui est principalement lié à un déficit pluviométrique. Le second correspond au stress thermique en phase de floraison et est associé à une perte de capacité des ovules à être fécondé et par conséquent à une réduction du nombre de grains (www.arvalis-infos.fr).

Nous nous sommes donc demandé quelle stratégie de sélection serait la plus adaptée pour conduire à des variétés de maïs population résistantes à la sécheresse dans les conditions proposées.

Pour mettre en place cette stratégie, de nouvelles méthodes de sélection de population de maïs doivent être mises en place. Pour cela, une étude bibliographique est réalisée, pour identifier de nouveaux caractères phénotypiques susceptibles d'être utilisés pour la sélection nasale. Ceux-ci doivent être facilement identifiables par les agriculteurs et permettent de différencier les plantes résistantes des plantes sensibles. Une des principales contraintes est de mettre en place des stratégies simples, sans nécessité d'acquisition d'appareils sophistiqués, afin que les agriculteurs puissent réaliser facilement les mesures aux champs (figure 1). Suite à l'acquisition de ces nouvelles méthodes, il faudra mettre en place un programme de sélection simple, adapté aux agriculteurs.

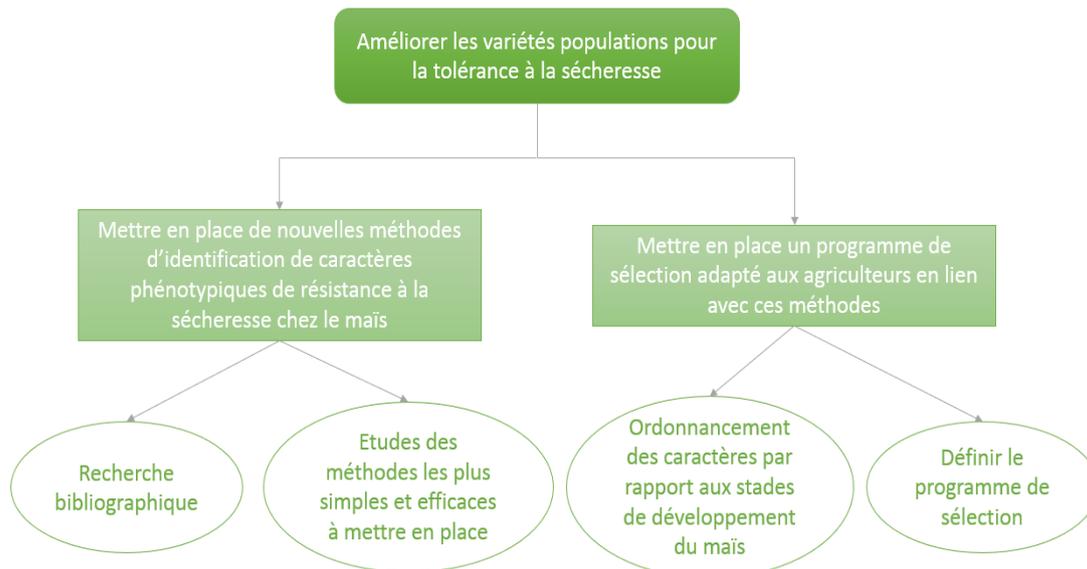


Figure 1 : Arbre à objectifs du projet

1.2. Méthodologie d'exécution du projet

Lors de l'exécution de ce projet nous nous sommes tout d'abord intéressés aux différentes fonctions et contraintes qui pourraient lui être associées (figure 2).

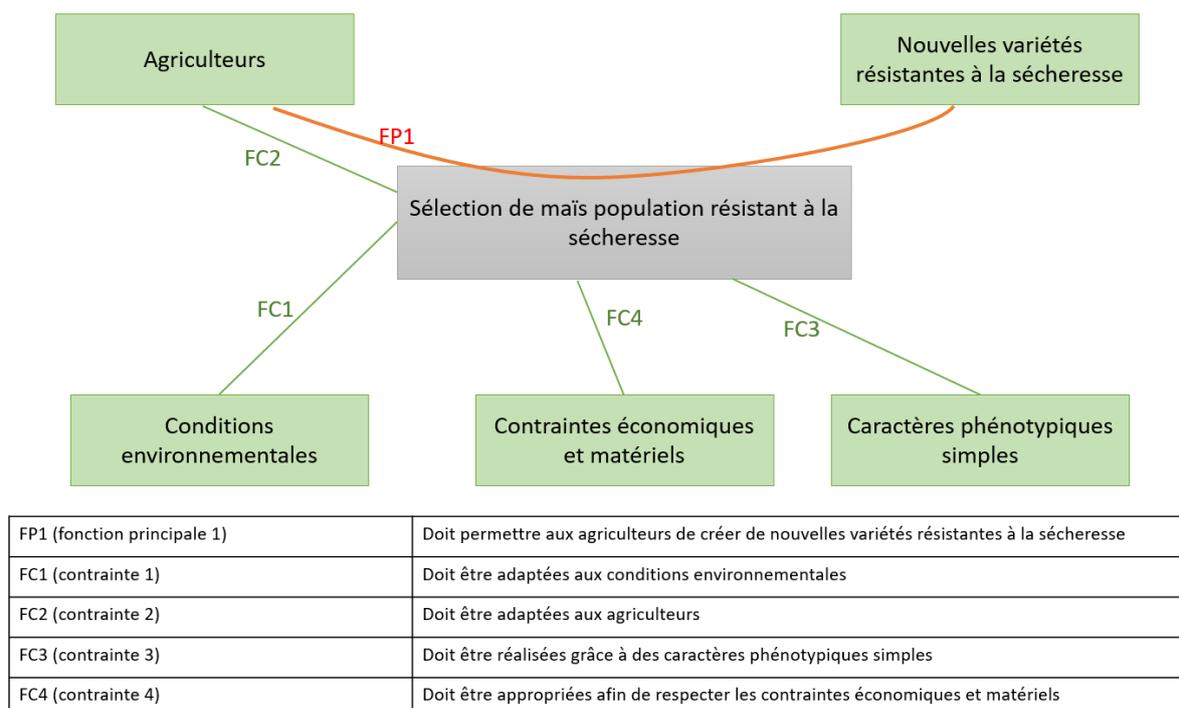


Figure 2 : Diagramme fonctionnel du projet

Il est apparu très clairement que la fonction principale de ce projet est de permettre aux agriculteurs d'améliorer des variétés existantes ou d'en créer de nouvelles sur ces caractéristiques de maïs résistantes à la sécheresse. Mais également soumis à différentes contraintes. Tout d'abord, il doit être adapté au contexte pédoclimatique du milieu. En effet, le programme de sélection et les variétés créés, devront répondre aux conditions environnementales déjà présentes dans les régions des agriculteurs favorables à ce projet et cela de manière universelle.

De plus ce projet doit être adapté aux agriculteurs, doit être réalisé avec des caractères phénotypiques simples (traits dits "soft") faciles et/ou peu coûteux à mesurer et doit respecter les contraintes économiques et matérielles. Les agriculteurs ont des contraintes de temps et de moyens qui seront prises en compte dans l'adoption de ce projet. Les agriculteurs ne disposent pas d'outils de sélection sophistiqués (comme des analyses avec des marqueurs génétiques) ce qui signifie que les caractères choisis doivent correspondre à des caractères phénotypiques facilement observables et héritables.

Suite à cela, il a pu être déterminé les différentes sous-tâches afin de mettre en place un diagramme des travaux (figure 3). Cela dans le but d'évaluer et d'indiquer le travail à faire pour accomplir chacune des sous-tâches.

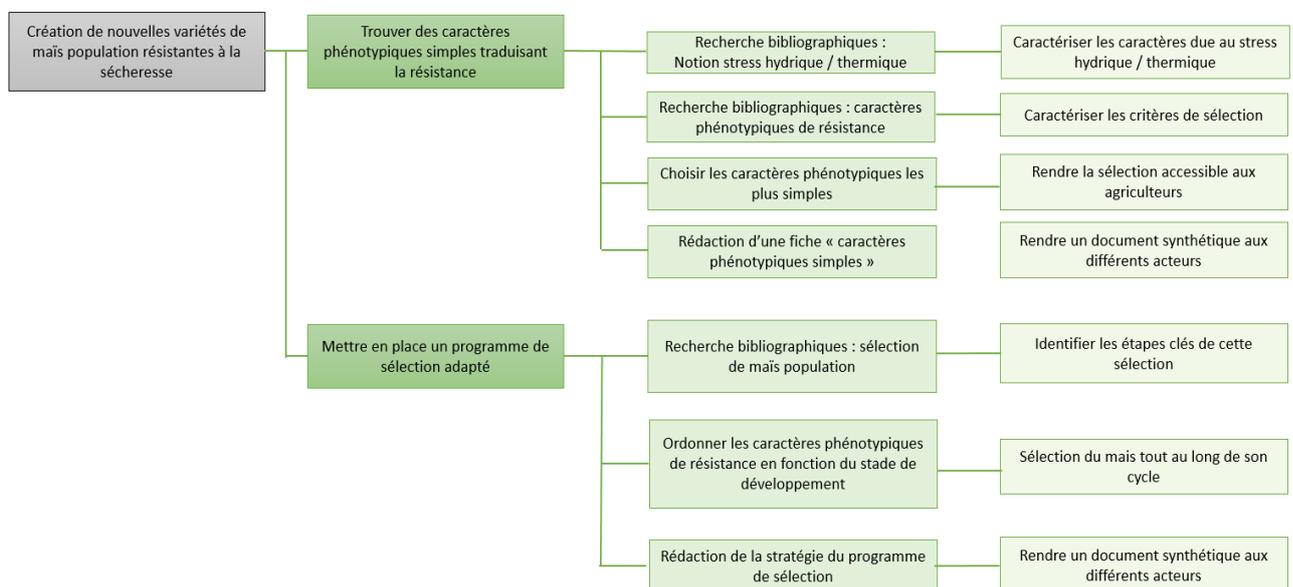


Figure 3 : Diagramme des travaux du projet

Dans un premier temps, pour trouver les caractères phénotypiques simples traduisant la résistance, des recherches bibliographiques sont nécessaires. Avec des recherches au niveau des notions de stress hydrique et thermique afin de caractériser les symptômes dus à ces stress, et des recherches sur des caractères phénotypiques de résistance afin de caractériser les critères de sélection. L'ensemble de ces informations sont recueillies au niveau de diverses sources : des publications scientifiques, des comptes rendus d'expérimentations ou encore dans des ouvrages portant sur ces sujets. Suite à cela nous pouvons choisir les caractères phénotypiques les plus simples et les plus pertinents afin de rendre la sélection accessible aux agriculteurs. Pour rendre

un document synthétique aux différents acteurs afin que la sélection se déroule dans les meilleures conditions une fiche bilan est également réalisée, destinée aux agriculteurs.

Dans un deuxième temps pour mettre en place un programme de sélection adapté, des recherches bibliographiques sont également réalisées sur la sélection du maïs population cela dans le but d'identifier les étapes clés de cette sélection. Les sources utilisées sont identiques à celles consultées pour les recherches précédentes. Grâce à ces recherches, un ordonnancement des caractères phénotypiques de résistance en fonction du stade de développement du maïs peut être mis en place afin de réaliser la sélection tout au long de son cycle.

Afin de mener à bien le projet, une grille de tâche évolutive est mise en place. À chaque fin de réunion de l'équipe du projet, la grille est mise à jour. La grille a été réalisée en début de projet, le 14 janvier (figure 4). Cet outil permet au groupe d'identifier les tâches à réaliser en priorité, le temps imparti et la date de fin de la tâche.

Tâches	Priorité (0-4)	Responsable	Date de fin	Charge de travail (h)	Livrable	Retard (O:N)	% avancement	Date de mise à jour
Recherche bibliographiques : Notion stress hydrique / thermique	4	Alexandre / Péroline	20/01	30	Rapport bibliographique	N	60	14/01
Recherche bibliographiques : caractères phénotypiques de résistance	4	Maria	20/01	25	Rapport bibliographique	N	50	14/01
Choisir les caractères phénotypiques les plus simples	3	Péroline	29/01	15	Liste des caractères	N	0	14/01
Fiche « caractères phénotypiques simples »	2	Audrey	05/02	30	Rédaction de la fiche	N	0	14/01
Recherche bibliographiques : sélection de maïs population	2	Audrey	05/02	25	Rapport bibliographique	N	60	14/01
Ordonner les caractères phénotypiques de résistance en fonction du stade de développement	1	Péroline	15/02	20	Frise chronologique de chaque étape de sélection	N	0	14/01
Stratégie du programme de sélection	1	Alexandre	22/02	30	Rédaction de la stratégie du programme de sélection	N	0	14/01

Figure 4 : Grille de tâches du 14 janvier 2019

De plus, cette grille est partagée et permet donc aux différents acteurs (responsables d'AgroBio Périgord) de visualiser l'avancement de chacune des tâches du projet. L'actualisation et les éventuels commentaires sont mis à jour également.

Chaque tâche est détaillée individuellement par des fiches de tâche (annexe 2). Ces fiches ont été réalisées par l'ensemble de l'équipe du projet afin de définir exactement les activités à mettre en place pour répondre au mieux aux objectifs de la tâche.

Les activités de chaque tâche sont décrites soigneusement ainsi que l'ordre à suivre. Le temps imparti pour réaliser toutes les activités de la tâche est renseigné pour que chacun définisse son temps de travail autour de l'ensemble des activités. Le responsable de la tâche affecté est en charge de vérifier si cette dernière est réalisée dans sa globalité.

1.3. Contenu du projet

Lors de ce projet, nous avons ordonné les différentes étapes dans le temps afin de le réaliser dans les meilleures conditions. Pour cela nous avons mis en place un diagramme de PERT (figure 5). Ce diagramme nous permet de réaliser les différentes tâches dans le bon ordre et de voir clairement le temps auquel il faut y consacrer.



Figure 5 : Diagramme de PERT

Ce diagramme prend également en compte les risques de dépassement de temps. Une date maximale de retard est indiquée afin que s’il y a un contretemps il ne soit pas pénalisant pour le bon avancement du projet. Dans le même but, un diagramme de GANT a aussi été réalisé (annexe 3).

Nous nous sommes également demandé quels ressources et moyens nous disposions et ceux dont nous avons besoin. Au niveau des ressources cela correspond surtout à des ressources documentaires afin de choisir des traits phénotypiques et d’organiser le programme de sélection. Pour cela nous disposons de toute la documentation disponible sur internet (en vérifiant que les sources sont fiables), et nous avons pu compléter cela par de la documentation fournie par AgroBio Périgord. Nous avons aussi eu besoin de contacter des agriculteurs afin de réaliser une enquête concernant leurs pratiques et leurs engagements dans la pratique de maïs population. Pour cela AgroBio Périgord a consulté son réseau et nous a fait parvenir les contacts de 5 agriculteurs engagés dans la sélection de maïs population. Pour enrichir notre enquête, AgroBio Périgord nous a mis en contact avec leurs collègues de la Loire et la Loire-Atlantique, afin de pouvoir interviewer des agriculteurs de différentes régions.

En termes de moyens pour réaliser ce projet, nous n’avons pas eu besoin de beaucoup d’éléments. Nos ordinateurs personnels et la réservation de salles de travail de groupes ont été

suffisants. Le temps imparti pour ce projet était tout à fait cohérent et nous a permis de réaliser l'ensemble des tâches que nous avons prévus au départ ainsi que de rajouter cette enquête d'agriculteur.

	Atout	Handicap
Origine interne	<ul style="list-style-type: none"> - Sélection adaptée aux besoins de l'agriculteur - Adaptation aux conditions pédoclimatiques de l'exploitation - Sélection tout au long du cycle du maïs 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un apprentissage des méthodes de sélection - Opérations chronophages (observations plus assidues, sélections des meilleures plantes et épis)
Origine externe	<ul style="list-style-type: none"> - Démarche accompagnée par l'équipe d'AgroBio Périgord - Possibilité d'instaurer un système de sélection collectif - Sélection pour la tolérance à la sécheresse plus efficace par la mise en place d'un phénotypage approprié 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'irrégularité de rendement par rapport au système conventionnel - Dégénérescence de la population ou mauvais choix de sélection

Figure 6 : Matrice SWOT

Ce projet doit tout d'abord répondre aux questionnements des agriculteurs sur la problématique de la sécheresse tout en étant accessible et réalisable à un plus grand nombre d'entre eux. Afin de réaliser ce projet, nous avons défini les limites internes et externes aux projets. La matrice de SWOT (figure 6), permet de définir toutes les contraintes et les atouts du projet. Par exemple, la mise en pratique du programme de sélection proposé est chronophage, car les observations doivent être régulières et réalisées par la même personne afin de les rendre homogènes. De plus, la dégénérescence et la sélection de la population doivent être prises en compte lors de l'élaboration du programme de sélection qui ne doit pas être trop sévère ou au contraire trop laxiste. De plus, les contraintes et atouts du projet sont de différentes natures : internes ou externes.

2. État de l'art

L'utilisation de l'eau par le maïs fluctue tout au long de son cycle. Elle augmente de manière linéaire jusqu'à l'émergence des soies, puis diminue jusqu'au remplissage des grains (figure 7). Certains stades sensibles du développement du maïs peuvent concorder avec des périodes de sécheresse, c'est à dire lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol ne comble plus les besoins de la culture. C'est pourquoi les mécanismes génétiques et physiologiques de tolérance au stress hydrique ont été très tôt étudiés chez le maïs. De nombreux QTLs de tolérances ont pu être identifiés et sont exploités par les sélectionneurs (239 en 2010 d'après une revue de Hao *et al.*, (2010)).

Toutefois, ces technologies sont inaccessibles aux agriculteurs produisant leurs propres semences de maïs population. L'enjeu est ici d'identifier les phénotypes associés à la tolérance à la sécheresse et d'identifier ceux qui sont les plus pertinents dans le cadre d'une sélection nasale par l'agriculteur.

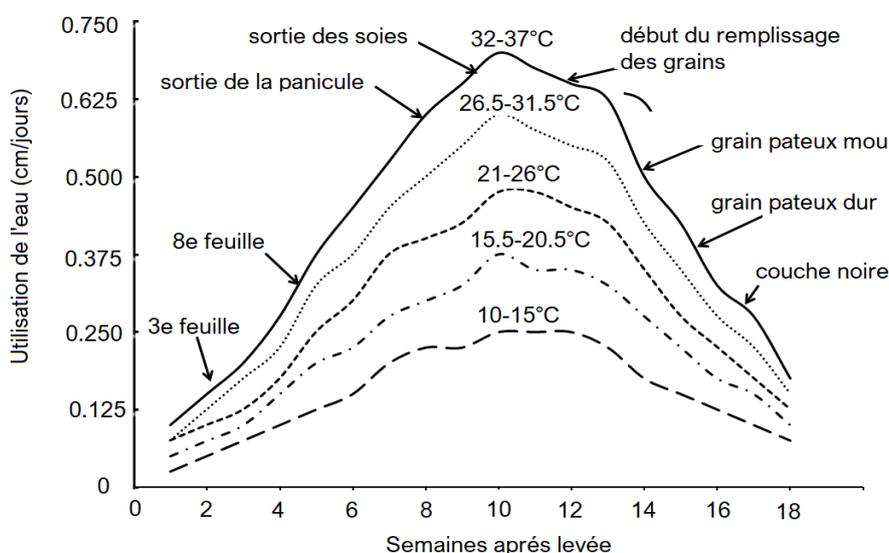


Figure 7 : Evolution des besoins hydriques durant le cycle cultural du maïs, en fonction de la température (Adapté d'après De La Fuente (2012))

2.1. Impact du stress hydrique et thermique sur le cycle du maïs

Les stress hydrique et thermique vont avoir de nombreux impacts tout au long du développement et de la croissance du maïs. Ces différents impacts peuvent causer des dommages à court terme au moment du stress, mais également sur le long terme. En effet, sur le long terme, le stress peut diminuer le rendement ce qui est problématique pour l'économie de l'agriculteur. Dans cette étude vont être détaillées les différentes réponses à ces stress au cours des principales étapes de développement du maïs.

2.1.1. Stress hydrique pré-floraison

Le stress hydrique pré-floraison impacte sévèrement la croissance et le développement du maïs. Mais, il peut être mis en avant, que les maïs ne seront pas impactés si le déficit hydrique ne dure que quelques jours. Au-delà, le taux de division cellulaire et d'élongation diminue ce

qui entraîne une réduction de la croissance de la totalité des tissus (Kakumanu *et al* 2012). À l'échelle de la plante, le développement foliaire sera impacté après la partie racinaire (Hajibabae *et al.*, 2012).

Un des symptômes les plus visibles de stress hydrique chez le maïs est l'enroulement des feuilles en cornet. Cette réaction de tolérance, normalement réversible, est due à la perte de turgescence des cellules bulliformes situées sur la face adaxiale de la feuille et permet à la plante de limiter les pertes d'eau par évapotranspiration (Virilouvet 2011).

Il existe un grand polymorphisme pour la rapidité à l'enroulement des feuilles et que ce caractère est contrôlé par seulement quelques gènes (2 gènes expliquent presque toute la variance pour ce caractère (Entringer *et al.*, 2014)). De ce fait, ce caractère est hautement héritable et facilement sélectionnable.

Cribler les plantes pour ce caractère n'est vraisemblablement pas judicieux il est facile de confondre une meilleure efficacité pour ce caractère (stratégie défensive) avec une détresse physiologique. Il est plus intéressant de s'intéresser au niveau de résilience de cet état de stress pendant la nuit, c'est-à-dire le dénouement des feuilles. Ce trait de résilience, introduit sous le nom de "recovery overnight", a été décrit comme un bon marqueur de tolérance au stress hydrique par le CIMMYT (International Maize and Wheat Improvement Center) (Banzinger *et al.*, 1996). Les plantes n'ayant pas regagné leur turgescence au cours de la nuit sont indicatrices de nombreux problèmes physiologiques, et donc il n'est pas intéressant de les garder (De La Fuente, 2012). Le plus judicieux serait de faire un passage sur le terrain pour éliminer les plantes n'ayant pas de résilience, et cela le lendemain matin d'une journée de sécheresse.

Un second symptôme est la réduction du développement foliaire en condition de stress hydrique. Cette stratégie adaptative permet à la plante de réduire son taux d'évapotranspiration. Il a d'ailleurs été montré une corrélation négative entre l'aire foliaire et le taux de survie chez le maïs (Belaygue *et al.*, 1996). Toutefois cette réduction de l'aire foliaire est également associée à une baisse de l'activité photosynthétique ainsi que du rendement (Flagella *et al.*, 2002 ; Goksoy *et al.*, 2004). Par conséquent, ce caractère présente moins d'intérêt pour notre étude.

D'autres modifications physiologiques au niveau des feuilles permettent d'améliorer la tolérance à la sécheresse. Ainsi, l'augmentation du nombre de stomates (meilleure gestion de l'évapotranspiration), ainsi que la réduction de la distance entre les faisceaux cribro-vasculaires (meilleure translocation des photoassimilats et de l'eau dans la feuille) sont des caractères favorables à l'amélioration de la tolérance au stress hydrique (De Souza *et al.*, 2013).

Les modifications morpho-anatomiques du système racinaire pendant les épisodes de sécheresses forment également un événement clé dans la tolérance au stress hydrique. Les racines de maïs continuent à pousser même lorsque le stress hydrique a commencé à inhiber la croissance des parties aériennes (Zhu *et al.*, 2010). Cette réaction physiologique, bien que coûteuse métaboliquement, permet à la plante d'explorer plus profondément le sol à la recherche d'humidité.

Il peut être montré chez les maïs que l'augmentation de la profondeur d'enracinement (Ali *et al.*, 2016) et la diminution de la densité de racine latérale faible (Zhan *et al.*, 2015 ; Gao and

Lynch 2016) était corrélée à la tolérance au stress hydrique. Cette stratégie permet une survie de la plante au détriment de la productivité (Sharp *et al.*, 2004). Ce dernier trait, bien qu'il puisse paraître contre-intuitif, est un pilier de cet idéotype dénommé par Lynch (2013) "*Steep, Cheap, and Deep*" (littéralement "fort, bon marché et profond", voir figure 8). En effet, la diminution des racines corticales permet de diminuer le coût métabolique pour l'exploration du sol (développement du chevelu racinaire) au profit de l'élongation racinaire. Il en résulte une meilleure exploitation de l'eau profonde et une meilleure tenue de la plante. Notons aussi que cet idéotype est particulièrement performant pour l'absorption de l'azote comme le confirment des études de modélisation (Postma *et al.*, 2014) et des résultats empiriques au champ (Zhan and Lynch 2015). Précisons également que les études de phénotypage de traits racinaires ont été réalisées sur de jeunes plantes, parfois plantules. Il est alors possible de phénotyper les plants de maïs à un stade précoce, car ils présentent un polymorphisme suffisamment discriminant. Étant donné que l'idéotype racinaire précédemment cité présente un meilleur ancrage dans le sol, il est probable qu'il montre une meilleure résistance au travail du sol par la herse. Il serait souhaitable de mettre en place une expérimentation pour confirmer ce point.

Il a également pu être décrit que l'augmentation de la proportion de parenchyme aérifère dans le cortex racinaire était corrélée à une augmentation de la tolérance hydrique (Zhu *et al.*, 2010). Concrètement, la formation d'aérenchyme permet de convertir une masse de tissus vivants en un volume rempli d'air.

Toujours au niveau du cortex racinaire, il a été montré que la réduction du nombre de cellules corticales (Chimungu *et al.*, 2014a), et l'augmentation de la taille de ces mêmes cellules (Chimungu *et al.*, 2014b) permet d'améliorer la tolérance au stress hydrique. Bien que le maïs présente un très grand polymorphisme, peu de caractères sont utilisés du fait de la fastidiosité du phénotypage. Tous ces traits racinaires suggèrent que c'est l'optimisation et la réduction des coûts métaboliques, pour l'exploration du sol, qui doit être privilégiée. Ils confortent donc la pertinence de l'idéotype "*Steep, Cheap, and Deep*" de Lynch.

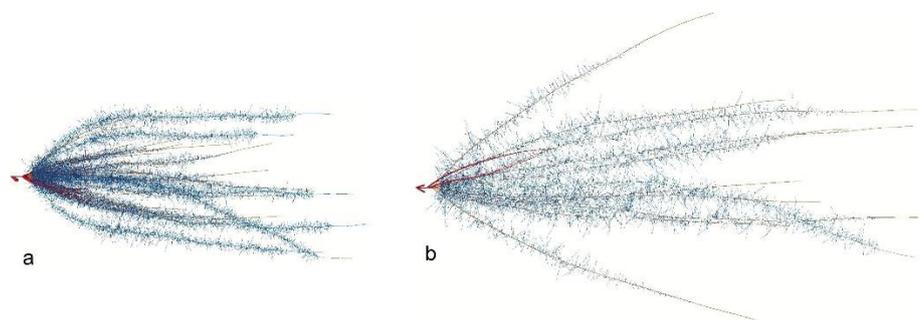


Figure 8 : Exemple de polymorphisme pour la longueur racinaire et la densité de racines latérales (Gao and Lynch 2016)

a : architecture racinaire commune; b : architecture "Steep, Cheap, and Deep"

2.1.2. Stress hydrique et thermique pendant la floraison

Le stade reproducteur du maïs est particulièrement sensible au stress hydrique et thermique. Pour une question de visibilité, nous décomposons la phase reproductive en 4 étapes : l'émission de la panicule, l'émission de pollen, l'émission des soies, la fécondation des ovules.

La formation de la panicule est sensible aux fortes chaleurs. Le stress thermique peut avoir plusieurs symptômes. Le plus visible est la "brûlure" des nouvelles feuilles qui entourent la panicule (*leaf firing*). Elle est facilement distinguable de la sénescence physiologique du maïs qui affecte d'abord les feuilles les plus âgées pour mobiliser des nutriments aux organes en développement. Cette sénescence prématurée impacte fortement l'allocation en photoassimilats et par conséquent le rendement (Chen *et al.*, 2010).

Un autre symptôme du stress thermique généralement associé au *leaf firing* est le dessèchement de la panicule sans extrusion des anthères (*tassel blasting*). Le stress thermique au niveau de la panicule peut également se manifester de manière différente : les panicules n'extrudent pas leurs anthères et demeurent anormalement vertes jusqu'à la sénescence naturelle de la plante.

Ces deux derniers symptômes ne sont pas corrélés à une baisse de rendement dans les essais, car les génotypes sensibles (mâles stériles) sont pollinisés par d'autres plantes (Hussain *et al.*, 2006). Il reste néanmoins de très bons indicateurs de la tolérance au stress thermique, facilement phénotypés.

En condition favorable, l'émission du pollen commence très rapidement après l'apparition de la panicule. Elle se prolonge généralement 5 à 8 jours selon les variétés et les températures (jusqu'à 2 semaines en condition très favorable) avec un pic autour du 3e jour. La durée d'émission du pollen décroît à partir de 30°C. Sa viabilité est affectée au-delà de 37°C et lorsque l'hygrométrie est en dessous de 30°C (Pilar Herrero *et al.* 1980).

Toutefois, étant donné que le pic d'émission du pollen est maximal en début de matinée (avec une reprise en fin d'après-midi ou soirée), la pollinisation n'est normalement pas limitée par la température. Ainsi, contrairement à d'autres céréales comme le blé (Saini *et al.*, 1984), l'orge (Sakata *et al.*, 2000) ou le riz (Sheoran *et al.*, 1996), l'impact de la sécheresse sur la production de grain chez le maïs n'est généralement pas dû à la stérilité du pollen. Comme nous le verrons plus loin, c'est plutôt le raccourcissement de l'émission du pollen couplé à un retard d'émission des soies qui peut causer des conséquences importantes et une forte réduction du potentiel de rendement.

Les soies se développent et s'allongent à la surface de chaque ovule sur l'épi. Elles permettent au pollen de progresser jusqu'à l'ovule. Les premières soies qui se développent sont celles de la base de l'épi, puis les suivantes en remontant jusqu'au sommet. Elles émergent des spathes en 4 à 8 jours, grandissent de 3,5 cm/jour les 2 premiers jours puis leur progression ralentit. Chaque soie va continuer à s'allonger jusqu'à sa fécondation ou sa sénescence. Les fécondations réussies se font généralement dans les 2-5 jours bien qu'en conditions favorables elles restent pollinisables jusqu'à 10 jours. En plus de la sénescence naturelle, le stress hydrique

et une chaleur supérieure à 35°C peuvent entraîner un dessèchement prématuré des soies (Du Plessis 2003).

Les soies ayant un taux d'humidité plus élevé que tous les autres organes de la plante de maïs, elles sont par conséquent plus sensibles à un stress hydrique. Le manque d'eau peut ralentir leur élongation et leur émergence. Ce qui conduit à un allongement du délai entre l'émission du pollen et l'émergence des soies appelé *Anthesis Silk Interval* (ASI). En condition favorable, l'ASI est typiquement de 2 à 4 jours. Lorsque le plant de maïs est soumis à un stress hydrique, l'ASI est plus importante : 7 jours en moyenne ; jusqu'à 23 jours pour les plantes les plus affectées (essais AgroBio Périgord). Il en résulte que le nombre d'événements de fécondation, et donc la production de grains est négativement corrélée à l'augmentation de l'ASI (Hema *et al.*, 2001).

Dans le cas où l'ASI est négative, la floraison femelle se produit avant la floraison mâle (protogynie). Ce caractère est relativement rare et n'est pas observable chez les variétés modernes. Certaines variétés anciennes sont parfois sujettes à la protogynie. À titre d'exemple, AgroBio Périgord a mesuré jusqu'à 10% d'individus protogynes dans leurs essais (communication personnelle).

Plusieurs études dans les années 90 ont montré que ce caractère pourrait être intéressant pour améliorer la pollinisation du maïs. Bassetti et Westgate (1993) ont montré qu'en conditions optimales, une ASI négative, jusqu'à - 6 jours, permet un remplissage du grain optimal, malgré la diminution de pollen (facteur non limitant) (Figure 9). Ils suggèrent que ce caractère est relativement intéressant pour la tolérance au stress hydrique, car malgré le décalage de l'ASI, ce dernier reste suffisamment faible pour assurer une bonne pollinisation.

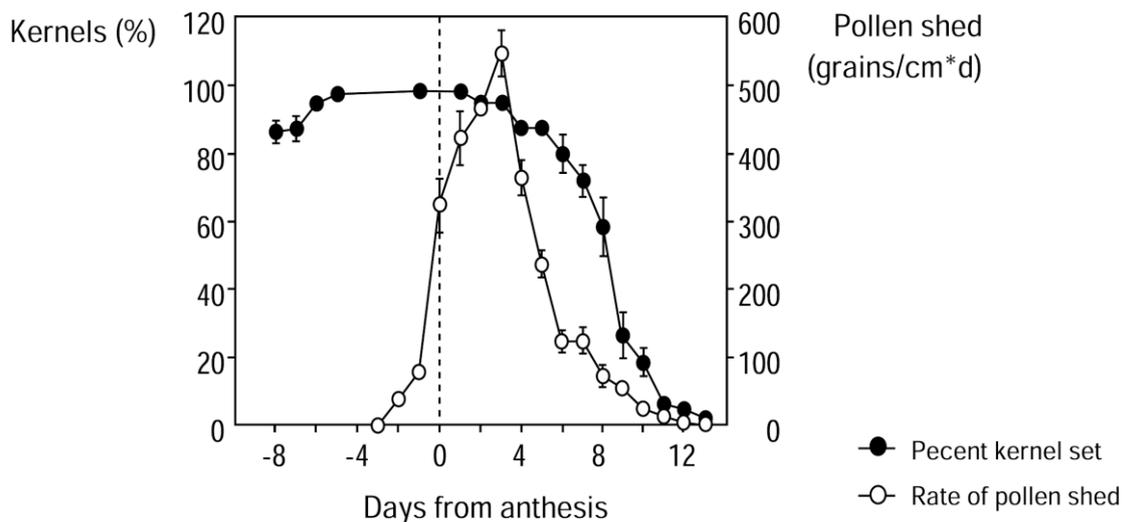


Figure 9 : Pourcentage de grains remplis par épis en fonction de l'ASI. La courbe d'émission du pollen est ajoutée pour comparaison. Adapté de Bassetti et Westgate (1993)

Plusieurs études ont montré que les variations de dates de floraison mâle et femelle sont associées à des centaines de QTLs à effet mineur (Salvi *et al.* 2009). Sur 29 publications il a été comptabilisé 441 QTLs associés aux variations de floraison mâles/femelle. Il est possible de

sélectionner les individus protogynes d'une population pour augmenter le taux d'allèles associé à une floraison femelle plus précoce que la floraison mâle afin de réduire l'ASI.

La protogynie est un caractère peu étudié en sélection variétale. L'introduction de ce caractère dans des lignées de pre-breeding, via l'introgession d'un taxon apparenté au maïs, *Zea diploperrenis* qui est totalement protogyne (US Patent 4677246).

2.1.3. Stress hydrique après la floraison

Un déficit hydrique sévère dans les deux semaines suivant la fécondation peut aboutir à un avortement des grains. La fin de cette période de sensibilité, dite SLAG (Stade Limite d'Avortement des Grains), se situe à 250 degrés jour après le stade de floraison femelle (Arvalis). Après ce stade, il n'y a plus d'avortement possible des grains : le nombre de grains/épi est définitivement fixé (Figure 10).

Enfin, un manque d'eau durant la phase de remplissage des grains est associé à un dessèchement précoce des parties foliaires (tige et feuilles). Cela diminue les allocations trophiques au grain et par conséquent diminue le Poids de Milles Grains (PMG). La sénescence des feuilles est un trait quantitatif et peut-être sélectionné. L'idéotype sera alors le "*stay green*", c'est-à-dire que la plante garde des feuilles vertes et fonctionnelles jusqu'à la récolte. Lorsqu'une plante reste verte et n'entre pas en sénescence, le système photosynthétique est toujours fonctionnel et permet ainsi de synthétiser les sucres nécessaires à la plante. L'efficacité photosynthétique est largement corrélée avec la sénescence foliaire. À ce stade de la plante, le système doit être fonctionnel afin de permettre une bonne maturation des grains, avec des propriétés demandées (fort taux protéique). Toutefois, l'impact du niveau de sénescence foliaire reste modéré ($R^2 = -0,14$ (Banziger *et al.*, 1996)).

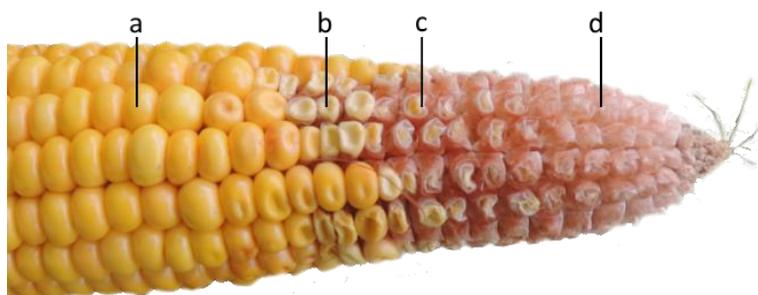


Figure 10 : Effet du stress hydrique sur la formation des grains

(d : Grain non fécondé ; c : Grain fécondé et avorté lors du SLAG ; b : Grain fécondé mais dont le remplissage a été limité par le manque d'eau ; a : Grain fécondé normal)

2.1.4 Précocité

La stratégie d'échappement consiste à adapter la durée du cycle cultural à un scénario climatique favorable pour le développement de la culture. En d'autres termes, les stades sensibles au stress thermique et hydrique, comme la floraison ou le remplissage du grain, doivent concorder à une période où la disponibilité en eau est importante. Le moyen le plus

simple est de réduire le temps du cycle cultural en obtenant des plantes plus précoces. Pour mesurer la précocité, il faut habituellement raisonner en somme de degrés jours (base 6°C). Un stade clé pour la mesure de la précocité peut être l'émergence de la panicule.

Un inconvénient majeur à la précocité des plantes est la réduction de l'évapotranspiration et du rayonnement intercepté pendant la période levée-floraison. Il en résulte une diminution de la biomasse foliaire et de l'allocation trophique aux grains. Autrement dit, plus une plante est précoce, moins elle est productive. Dans les faits ce n'est pas vrai, car le potentiel de rendement n'atteint jamais son maximum. En cultivant des variétés plus précoces, le rendement potentiel est moins élevé, que pour une variété tardive, mais sa susceptibilité de la sécheresse sera moindre. Pour plus de détails sur la relation complexe entre la précocité et le rendement, se référer à Amigues *et al.* (2006).

De plus la précocité est un caractère particulièrement sensible aux interactions de type Génotype x Environnement. Plus le sol se réchauffe rapidement, plus la levée sera rapide. Les sols à réchauffement rapide correspondent aux sols argilo-calcaires, sableux ou caillouteux, et/ou riches en matière organique (besoin d'au moins 80°C J). À l'opposé, les sols à réchauffement lent sont des sols limoneux battants, limono-argileux pauvres en matière organique (besoin au moins de 110°C J) (Bignon *et al.*, 1990).

Les pluies peuvent également impacter la précocité. Si le début de saison est très pluvieux, le sol se réchaufferait moins vite. Par conséquent, la levée sera retardée.

2.2. Phénotypage de la tolérance au stress hydrique et thermique

Le phénotypage des maïs population est réalisé en champ, et peut être réalisé par de nombreux acteurs. Chaque trait sélectionné a un lien direct ou indirect avec la tolérance à la sécheresse tout au long du cycle de développement du maïs.

2.2.1. Choix des traits de sélection

Avant de choisir les traits de sélection, il faut faire une distinction entre les traits dits “hard” et “soft”. Les premiers sont difficiles et coûteux à mesurer mais avec un lien direct avec le mécanisme de tolérance au stress hydrique. Tandis que les traits dits “soft” sont faciles et/ou peu coûteux à mesurer mais dont le lien est seulement corrélatif avec les traits hard. Par exemple, l'efficacité photosynthétique et la sénescence foliaire sont respectivement des traits dits “hard” et “soft”. Si les programmes de sélection des sociétés semencières permettent des criblages phénotypiques sur les traits hard (efficacité photosynthétique, Water Use Efficiency (WUE), etc..), cela n'est pas envisageable pour le cas des agriculteurs sélectionneurs.

Étant donné que le présent projet a pour but de permettre aux agriculteurs de sélectionner eux-mêmes leurs maïs population, les critères de sélection doivent être simplement phénotypés (sans outillage) et ne pas être trop chronophage. Le tableau 1 résume les traits softs associés au stress hydrique, qui paraissent pertinents.

Tableau 1 : Liste des traits associés au stress hydrique pouvant être potentiellement utilisable dans le cadre d'une sélection nasale de maïs.

Trait	Ideotype	Corrélation avec trait "hard"	Corrélation avec le rendement	Période de phénotypage
Anthesis-silking interval (ASI)	ASI le plus court possible (voire négatif)	- Taux de fécondation	+++	Floraison
Recovery overnight de l'enroulement des feuilles	Feuilles déroulées la matinée suivant une journée de sécheresse	- Efficience photosynthétique - WUE - Résilience à la sécheresse	+	Tout le cycle (une matinée suivant une journée de sécheresse)
Sénescence foliaire	'Stay green' - sénescence foliaire la plus tardive possible	- Efficience photosynthétique - WUE	++	Fin de cycle / remplissage de grain
Rendement	Rendement le plus élevé possible	- Taux de fécondation - Efficience photosynthétique - WUE	++++	Récolte
Ancrage racinaire	Fort enracinement	- WUE - Efficience photosynthétique	+	Stade 3 feuilles
Précocité	Précoce	- Efficience photosynthétique - WUE	++	Entre les stades 3 à 10 feuilles
Stérilité de la panicule	Extrusion complète des anthères avec émission de pollen	- Taux de fécondation	0	1 ou 2 semaines après l'épiaison
Feuilles brûlées (Leaf firing)	Aucun symptôme de <i>Leaf firing</i>	- Efficience photosynthétique	++	1 ou 2 semaines après l'épiaison

2.2.2. Ancrage racinaire

L'enracinement n'est pas sélectionné de manière directe, car il n'y a pas d'observation du fait de la fastidiosité du phénotypage. Pour sélectionner des racines correspondant à l'idéotype "*Steep, Cheap, and Deep*" de Lynch (2013), il est suggéré de faire un passage de herse étrille au stade 3 ou 4 feuilles. La profondeur et la vitesse de travail devront être adaptées de sorte que ce travail ne soit pas trop destructif. Les plantes dont le système racinaire sera trop superficiel seront ainsi potentiellement éliminées. Les plantes les plus précoces seront favorisées.

2.2.3. Précocité

La précocité est détectable à plusieurs stades, au stade 3-4 feuilles un passage avec la herse étrille peut être réalisée, ce passage permet d'éliminer les plantes avec les racines les moins développées et indirectement les plus tardives.

Pour ce qui est de l'observation, la précocité des plantes doit être analysée à la montaison (figure 11). Les plantes les plus vigoureuses c'est-à-dire les plus précoces seront marquées. Lors du début de la sortie de la panicule ces plantes seront castrées.

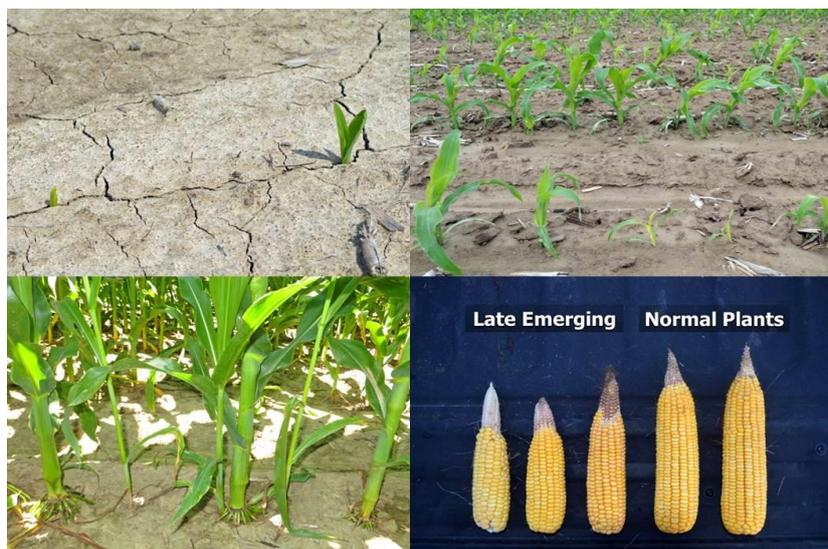


Figure 11 : Exemple de polymorphisme pour la précocité et impact sur la tolérance à la sécheresse (Source : mississippi crop.com)

2.2.4. Anthesis-Silking Interval

Le nombre de jours entre la floraison mâle et la floraison femelle est un caractère difficilement exploitable sur de grandes parcelles, comme expliqué précédemment.

Considérant l'hérédité quantitative du caractère protogyne du maïs, il peut être intéressant de sélectionner ce caractère pour réduire de manière globale l'ASI positive de la population. Ce caractère est suffisamment récurrent dans certaines populations. De plus, au niveau génétique, une ASI courte n'est pas incompatible avec une précocité importante (Ngugi *et al.*, 2013). Toutefois, en exerçant une pression de sélection pour une ASI courte, la fréquence d'individus mâles stériles peut augmenter. Cela s'explique par une confusion entre un défaut d'extrusion des anthères avec une ASI courte (Banziger *et al.*, 2000).

2.2.5. Recovery-overnight

Le trait de "recovery-overnight" est à observer lors de la montaison et doit être évalué le lendemain d'une journée de sécheresse. Lors de la journée de sécheresse les plantes vont enrrouler leurs feuilles ("leaf rolling") (figure 12). Ce phénomène est dû à la perte de turgescence des feuilles. Pendant la nuit, les températures vont diminuer. Au matin, les plantes non sensibles à la sécheresse et aux hautes températures ont rétabli leur turgescence et n'ont plus les feuilles enrroulées ("recovery overnight"). Les plantes n'ayant pas récupéré leur turgescence seront castrées, permettant ainsi de réaliser une sélection négative.



Figure 12 : Phénomène de Overnight Recovery (De La Fuente, 2012)

2.2.6. Sénescence foliaire

La sénescence foliaire peut apparaître dès les premiers stades végétatifs de la plante. Ce caractère est à observer au remplissage des grains, ceci correspond à 2 000°C/jour. Le caractère recherché est le “Stay Green”, c’est à dire, la sénescence la plus tardive possible (figure 13). De ce fait, un passage doit être réalisé afin de noter les pieds ayant une sénescence foliaire précoce, c’est-à-dire les plants ayant des feuilles jaunies et sèches. Par la suite, ces plantes seront, soit éliminées, soit non choisies suivant la sélection appliquée par les différents acteurs.



Figure 13 : Polymorphisme de la sénescence foliaire chez le maïs (gauche : sénescence foliaire tardive ; droite : sénescence foliaire précoce) (Zaman-Allah et al., 2016)

2.2.7. Stérilité de la panicule et Leaf firing

Les symptômes de leaf firing et de stérilité des panicules (figure 14) apparaissent juste après l’épiaison et sont visibles jusqu’à la sénescence naturelle de la plante. La meilleure période pour les noter reste néanmoins 1/2 semaines après l’épiaison afin de ne pas confondre avec un dessèchement naturel.

Comme évoqué précédemment, la stérilité de la panicule n’est absolument pas corrélée au rendement dans un maïs population, car la pollinisation sera assurée par d’autres plantes. Les plantes touchées par la stérilité mâle doivent être strictement éliminées.

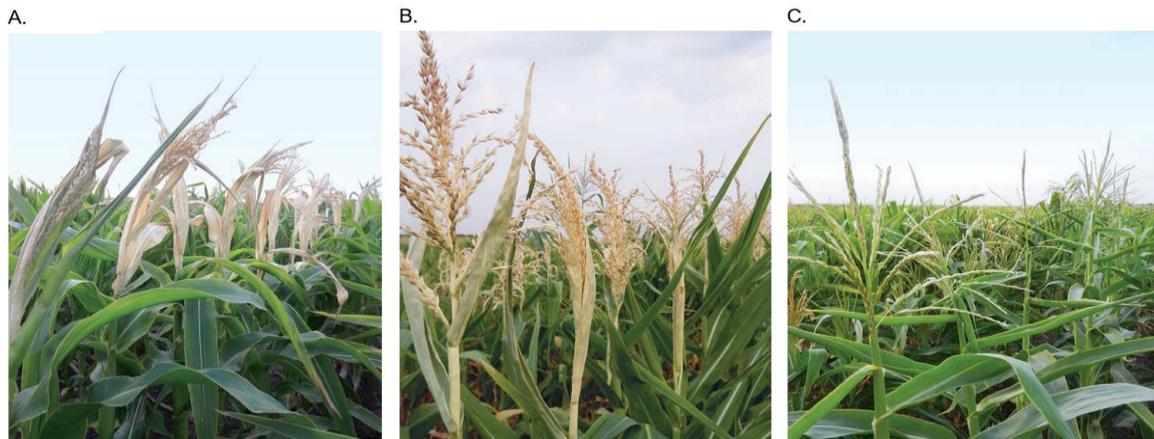


Figure 14 : Phénomène de leaf firing (A : Symptômes de leaf firing ; B : panicules stériles avec dessèchement ; C : panicules stériles sans dessèchement (Kandel et al. 2018)

2.2.8. Rendement

Le rendement est un trait observable lors de la récolte des épis de maïs. Il est préférable de sélectionner les grands épis avec des grains bien remplis, les épis moyens peuvent aussi être choisis de façon à obtenir un rendement maximal et d'optimiser la diversité de la population. De plus, le rendement est adaptable suivant les objectifs de l'exploitation.

2.3. Sélection du maïs population

2.3.1. Compromis entre érosion génétique et pression de sélection

Le maintien d'une variabilité génétique dans une population de maïs est important pour éviter l'érosion génétique. Cette variabilité sera d'autant plus importante que l'on conservera de semences. Toutefois, dans une démarche de sélection, il est nécessaire de réduire le nombre d'individus pour exercer une pression sélective suffisamment forte pour faire évoluer la population. En théorie, le nombre d'épis à conserver dépendra de la diversité génétique de la population. Plus celle-ci est importante, plus le nombre d'épis devra l'être également.

Lorsqu'il s'agit de maintenir une variété population, la plupart des programmes de conservation génétique admettent que conserver 100-200 épis (1 par plante) est suffisant (Parlevliet 2007). Ces épis doivent bien entendu être représentatifs de l'idéotype variétal.

2.3.2. Bonnes pratiques pour éviter les biais de sélections

Afin de réduire au maximum les biais de sélections, des mesures adéquates doivent être considérées lors de la culture. Les points cruciaux ont considéré sont :

- **Période de semis** : C'est un élément clé pour optimiser le phénotypage de la tolérance à la sécheresse. Pour accentuer le stress hydrique, le semis peut être retardé pour décaler le cycle cultural et augmenter son exposition aux épisodes de sécheresse.

- **Choix de la parcelle** : La parcelle de sélection doit être idéalement homogène sur les points pédologiques (profondeur et nature du sol) et microclimatiques (les haies peuvent influencer sur l'exposition, l'intensité de l'exposition au vent ...)

- **Densité de semis** : Si la semence n'est pas limitante, il peut être intéressant de semer à une forte densité. Ainsi, il y a plus de plantules présentes sur la parcelle ce qui permet de réaliser un éclaircissage plus sévère, au stade 2/3 feuilles (assez d'individus pour réaliser cette sélection).

- **Sélection négative** : Afin de ne pas pénaliser le rendement, les plantes indésirables seront castrées au lieu d'être éliminées.

- **Effet bordure** : Les plantes situées sur les bords de la parcelle montrent généralement une vigueur supérieure à celles situées à l'intérieur. Par conséquent, il est recommandé de ne pas sélectionner les plantes situées en bordure de parcelle.

3. Résultats

3.1. Interviews agriculteur

Au cours de ces interviews il a pu être remarqué que les finalités d'emploi de ce maïs population pouvaient être très variées. De plus, l'ensemble de ces agriculteurs semblent très impliqués dans cette question de sélection de maïs population et ses différents enjeux, même si leur choix de cette technique de travail reste différent. Certains de ces agriculteurs ont déjà vu en quelques années des améliorations de leurs variétés suite à cette sélection et souhaite continuer pour obtenir des résultats encore meilleurs.

Une partie des agriculteurs ont déjà retiré l'irrigation de leur itinéraire technique mais certains se laissent encore la possibilité de petites irrigations en cas de forte chaleur ou sécheresse. Toutefois la plupart ont but d'arriver à supprimer cette irrigation dans le futur.

Le temps passé à réaliser la sélection est de seulement quelques jours. L'ensemble de ces agriculteurs sont prêts à consacrer quelques jours supplémentaires afin d'obtenir des résultats pertinents et notamment au sujet de la résistance à la sécheresse.

Nom/pseudo	Localisation exploitation	Activités	Surface de maïs pop et rendement	Avantages	Inconvénients	Temps consacré à la sélection
F.L.	Nouvelle-Aquitaine	Céréales pour farine (transformation à la ferme), dont maïs population	1 ha de maïs pop à 20 qtx/ha (travail depuis 2015) sans irrigation	Goût pour les farines, rendement meilleurs en cas de sécheresse, économique	Rendement inférieur aux hybrides (maïs compensation par rapport au charges)	2 jours au total
Y.P.	Nouvelle-Aquitaine	Élevage (avicole, volaille), maraîchage et maïs alimentation animale (but futur humain)	1 à 2 ha de maïs pop à 15 à 20 qtx/ha (travail depuis 2015) avec irrigation exceptionnelle	Économique, variétés plus adaptées à ses terres, adéquation avec ses convictions, meilleure qualité nutritive	Chronophage et logistique plus lourde (tri...)	2,5 jours au total
D.M.	Nouvelle-Aquitaine	Polyculture (céréales biologiques et fourrage) et élevage (canard et vache allaitante)	2 à 5 ha de maïs pop à 15 à 30 qtx/ha (travail depuis 8 ans) avec irrigation occasionnelle suivant les besoins	Cohérence du travail avec ses envies, équilibre alimentaire intéressant (alimentation animale et gavage)	Rendement, verse, pied sans épi, déconvenue avec la sécheresse (mais cela autant que les hybrides).	3 jours au total
A.O.	Loire-Atlantique	Vaches laitières élevage, accueil pédagogique à la ferme, culture de millet pour l'alimentation humaine, bois énergie	Culture de maïs population sans irrigation	Autonomie, pas d'achat de semence, fierté de pouvoir faire ces semences, travail pour la biodiversité de préservation et de maintien, réappropriation du savoir-faire important.	Temps de travail en plus, rendement moindre, il y en a plein mais il les accepte	Ils n'ont pas quantifié cela
F.L.	Loire-Atlantique près de Nantes	Vaches laitières, maïs (pop et hybride) pour consommation animale	Culture de maïs pop sans irrigation, près de 6ha avec un rendement de 8t de matière sèche / ha	Moins de coûts, pas besoin d'acheter les semences et être dépendant des grands semenciers, éthique, pas d'irrigation, permet un travail en équipe avec d'autres agriculteurs c'est-à-dire plus d'échanges, maïs est plus résilients que l'hybride	Rendement moins important que pour les hybrides, travail de sélection peut-être long	La sélection se fait en commun avec d'autres agriculteurs (sur chacune des exploitations), pour son exploitation ils mettent en tout près de 2 jours. Il serait prêt à y consacrer plus de temps.

Tableau 2 : Informations synthétiques recueillies lors des interviews téléphoniques auprès de 5 agriculteurs pratiquant déjà la sélection de maïs population, les noms des agriculteurs correspondent à leurs initiales pour conserver leur anonymat.

3.2. Itinéraire technique

La sélection de variétés de maïs résistantes à la sécheresse passe tout d'abord par une modification de l'itinéraire technique classique. Tout d'abord la sélection variétale doit être faite sur un terrain homogène (mêmes profondeur et type de sol sur toute la surface), il faut éviter les terrains situés sur un lit de rivière et la plantation de maïs doit avoir une densité uniforme.

Pendant toute la durée du cycle du maïs, celui-ci ne doit pas être irrigué, les plantes les plus vigoureuses seront ainsi sélectionnées. De plus, la sélection ne doit pas prendre en compte les individus ayant poussé en bordure, évitant ainsi l'effet bordure.

Au stade 3-4 feuilles, une première sélection négative, en passant la herse étrille peut être envisagée. En faisant un passage suffisamment profond (5 cm - pas trop rapidement), toutes les plantes qui n'avaient pas un fort enracinement sont éliminées. Un avantage supplémentaire de cette technique est qu'elle permet de faire un désherbage en cours de culture.

La seconde journée de sélection se situe pendant la montaison, idéalement après une journée de canicule (feuilles enroulées). Les plants présentant un mauvais "*recovery overnight*" seront marqués le lendemain en début de journée (8-9h). D'autres traits comme la vigueur (précocité) et la sénescence foliaire pourront être observés durant la même journée.

Les plantes marquées seront castrées en début de sortie de panicule. Les plantes présentant des symptômes de coups de chaleur ("*leaf firing*", "*tassel blast*", panicules stériles) seront également éliminées. Dans la même journée il faudrait marquer toutes les plantes protogynes (floraison femelle avant floraison mâle). Ces plants seront identifiés et préférentiellement choisis lors de la récolte.

Suite aux sélections négatives réalisées tout le long du cycle du maïs, une sélection positive est réalisée. La sélection nasale positive consiste à récolter des épis destinés à la semence. Cette méthode se fait manuellement avant la récolte mécanique. Les plantes qui sont protogéniques et qui ont des épis gros et bien remplis seront davantage sélectionnées. La sélection a lieu sur l'ensemble de la parcelle d'essai pour conserver au maximum de diversité génétique. Sur l'ensemble de la parcelle 100 à 200 épis par hectare, sont prélevés. Par plante, seulement un épi est prélevé. Les rangs de bordure sont exclus des prélèvements.

Suite aux multiples recherches et identifications des traits de sélection, un poster a été réalisé et présenté en annexe 4. Tous les traits liés à la sélection en conditions de sécheresse sont détaillés, avec le processus à suivre. Ce document peut être un outil pour les conseillers d'AgroBio Périgord mais également pour les agriculteurs.

Conclusion

Depuis quelques années le maïs population fait l'objet de nombreuses études, et présente une multitude d'intérêts comme l'adaptation aux conditions de culture et aux usages locaux. Le maïs population résout aussi le problème du coût des semences, qui représente une part non négligeable des dépenses.

De nos jours, les événements climatiques extrêmes tels que des températures estivales plus élevées ou des sécheresses prolongées sont de plus en plus nombreuses. Par conséquent, l'intérêt pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse du maïs est croissant. Si des programmes de sélection, pour ce caractère, ont été mis en place pour les variétés conventionnelles (hybrides), l'amélioration des variétés population pour la tolérance aux stress hydrique/thermique est peu documentée.

Ce projet d'identifications de caractères liés à la tolérance à la sécheresse s'inscrit donc dans ce contexte. Plusieurs traits phénotypiques ont ainsi pu être mis en avant comme l'ancrage racinaire, la précocité, l'ASI, le *recovery-overnight*, la sénescence foliaire, la stérilité de la panicule et le '*leaf firing*'. Ces caractères ont ensuite permis de construire un programme de sélection nasale adapté aux besoins de l'agriculteur.

Il serait par la suite intéressant de se pencher sur de nouvelles méthodes pour diminuer l'ASI globale des populations de maïs. Une approche serait de faire une sous-population d'une centaine d'individus isolés de la population originelle dans laquelle l'ASI serait évaluée de manière rigoureuse (notation des floraisons mâles et femelles). Les meilleurs individus seraient sélectionnés et réinjectés dans la population initiale (à hauteur de 5%).

Une autre perspective intéressante serait de faire une expérimentation sur le travail du sol pour sélectionner les plantes ayant un meilleur ancrage racinaire. Bien que la profondeur et la vitesse de travail doivent vraisemblablement être adaptées aux conditions pédologiques de l'agriculteur, une méthodologie générale pourrait être détaillée.

Références bibliographiques

- Ali M. L., Luetchens J., Singh A., Shaver T. M., Kruger G. R., Lorenz A. J., 2016, Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. *Euphytica* 207:79–94
- Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 pages
- Banzinger, M., G.O. Edmeades, et S. Quarrie. 1996. Drought stress at seedling stage – are there genetic solutions. dans *Developing Drought- and Low N- Tolerant Maize. Proceedings of a symposium*, 25-29. El Batan, Mexico. p. 348-354
- Bassetti P. et Westgate M. 1993, Water Deficit Affects Receptivity of Maize Silks, *Crop Science* 33:279-282
- Belaygue C., Wery J., Cowan A., et Tardieu F., 1996, Contribution of Leaf Expansion, Rate of Leaf Appearance, and Stolon Branching to Growth of Plant Leaf Area under Water Deficit in White Clover. *Crop Science*, 36, 1240-1246
- Bignon, J. 1990, Agrométéorologie et physiologie du maïs grain dans la Communauté Européenne. Publication EUR 13041 FR of the Office for Official Publications of the European Communities; Series 'Agriculture'. Luxembourg
- Chen, Junping & Xu, Wenwei & Burke, John & Xin, Zhanguo. 2010,. Role of Phosphatidic Acid in High Temperature Tolerance in Maize. *Crop Sci.* 50. 2506-2515
- Chimungu J. G., Brown K. M., Lynch J. P., 2014a,. Reduced root cortical cell file number improves drought tolerance in maize. *Plant Physiol.* 166, 1943–1955
- Chimungu J. G., Brown K. M., Lynch J. P., 2014b,. Large root cortical cell size improves drought tolerance in maize. *Plant Physiol.* 166, 2166–2178
- Dass S, Arora P, Kumari M, Pal D., 2001, Morphological traits determining drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Indian. J Agric Res* 35(3):190–193
- De La Fuente G., 2012, Breeding Maize for Drought Tolerance : Diversity Characterization and Linkage Disequilibrium of Maize Paralogs ZmLOX4 and ZmLOX5
- De Souza T. C., de Castro E. M., Magalhães P. C., Lino L. D. O., Alves E. T., de Albuquerque E. P., 2013,. Morphophysiology, morphoanatomy, and grain yield under field conditions for two maize hybrids with contrasting response to drought stress. *Acta Physiol. Plant.* 35, 3201–3211.
- Doré C., Varoquaux F., 2006. Histoire et amélioration de cinquante plantes cultivées, Paris éd., Collection savoir-faire 840 pages
- Hema O., Kim S. K., Mondeil F., Tio-Touré B. B., Tapsoba A., 2001, Intervalle entre floraison mâle et femelle chez le maïs : son importance en sélection pour la tolérance à la sécheresse, *Cahiers d'Agriculture* 10, 255-260
- Du Plessis J., 2003, Maize production. Directorate agricultural information services, department of agriculture in cooperation with ARC-Grain Crops Institute
- Duvick D. N., Cassman K. G., 1999, Post-green revolution trend in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39, 1622–1630
- Entringer G. C., Guedes F. L., Oliveira A. A., Nascimento J. P., Souza J. C., 2014, Genetic control of leaf curl in maize. *Genet. Mol. Res.* 13, 1672–1678

- Flagella Z, Rotunno T, Tarantino E, Di Caterina R, De Caro A., 2002, Changes in seed yield and oil fatty acid composition of high oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids in relation to the sowing date and the water regime. *Eur J Agron* 17:221–230
- Gao Y, Lynch J. P., 2016, Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays* L.). *J Exp Bot* 67:4545–4557
- Goksoy A.T., Demir A.O., Turan Z.M., Dagustu N., 2004, Responses of sunflower to full and limited irrigation at different growth stages. *Field Crops Res* 87:167–178
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'étude du climat (Giec), 2013, Cinquième rapport d'évaluation, les éléments scientifiques, contribution du groupe de travail I
- Hajibabae M, Azizi F, Zargari K., 2012, Effect of drought stress on some morphological, physiological and agronomic traits in various foliage corn hybrids. *Am Eurasian J Agric Environ Sci* 12(7):890–896
- Hao Z, Li X, Liu X, Xie C, Li M, Zhang D, Zhang S, 2010, Meta-analysis of constitutive and adaptive QTL for drought tolerance in maize. *Euphytica* 174:165–177
- Hussain T. Khan I. A. Malik, M. A. Ali Z. 2006 Breeding potential for high temperature tolerance in corn (*Zea mays* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 38(4): 1185.
- Kandel, Manoj & Kant Ghimire, Surya & Shrestha, Jiban., 2018., Mechanisms of heat stress tolerance in maize. *Azarian Journal of Agriculture*. 5. 20-27
- Kakumanu A., Ambavaram M. M.R., K. Curtis, Krishnan A., Batlang U., Myers E., Grene R. et Andy Pereira, 2012. Effects of Drought on Gene Expression in Maize Reproductive and Leaf Meristem Tissue Revealed by RNA-Seq. *Plant Physiology* , Vol. 160, pp. 846–867
- Luo X. Zheng J. Huang R. Huang Y. Wang H. Jiang L. Fang X. 2016, Phytohormones signaling and crosstalk regulating leaf angle in rice. *Plant Cell Rep.* 35: 2423-2433
- Lynch J. P., 2013, Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann Bot* 112:347–357
- Ngugi K. Cheserek J., Muchira C. Chemining G., 2013, *Journal of Renewable Agriculture*, 84-90
- Parlevliet J. E., 2007, How to maintain improved cultivars. *Euphytica* 153:353–362
- Pilar Herrero M. et Johnson R.R. 1980, High Temperature Stress and Pollen Viability of Maize. *Crop Science*, Vol. 20 No. 6, p. 796-800
- Postma J. A, Dathe A, Lynch J. P, 2014, The Optimal Lateral Root Branching Density for Maize Depends on Nitrogen and Phosphorus Availability. *Plant Physiology* 166:590–602
- Saini H. S., Sedgley M, Aspinall D., 1984, Developmental anatomy in wheat of male sterility induced by heat stress, water deficit or abscisic acid.
- Sakata T., Takahashi H., Nishiyama I, Higashitani 2000, A Effects of High Temperature on the Development of Pollen Mother Cells and Microspores in Barley *Hordeum vulgare* L. *J Plant Res* 113:395–402
- Salvi S., Castelletti S., Tuberosa R., 2009. An updated consensus map for flowering time QTLs in maize. *Maydica*. 54. 501-512
- Sharp R. E., Poroyko V., Hejlek L. G., Spollen W. G., Springer G. K., Bohnert H. J. et Nguyen H. T., 2004. Root growth maintenance during water deficits: physiology to functional genomics. *J. Exp. Bot.* 55: 2343–2351

Sheoran I. S. et Saini H. S., 1996, Drought-induced male sterility in rice: changes in carbohydrate levels and enzyme activities associated with the inhibition of starch accumulation in pollen. *Sex Plant Reprod Ger.*

Virlouvet L. 2011, Identification et caractérisation de gènes impliqués dans la variation de caractères quantitatifs affectés par la sécheresse chez le maïs.

Yang N. Lu Y. Yang X. Huang J. Zhou Y. Ali F. Wen W. Liu J. Li J. Yan J. 2014, Genome wide association studies using a new nonparametric model reveal the genetic architecture of 17 agronomic traits in an enlarged maize association panel. *PLoS Genet.*; 10

Mainassara Z-A., Zaidi P. H., Trachsel S., Cairns J., Vinayan M. T., Kaliyamoorthy S., 2016. Phenotyping for abiotic stress tolerance in maize: drought stress

Zhan A., Lynch J. P., 2015, Reduced frequency of lateral root branching improves N capture from low-N soils in maize. *J Exp Bot* 66:2055–2065

Zhan A., Schneider H., Lynch J. P., 2015 Reduced Lateral Root Branching Density Improves Drought Tolerance in Maize. *Plant Physiol* 168:1603–1615.

Zhu J., Brown K. M., Lynch J. P., 2010, Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant Cell Environ* 33:740–749.

Sitographie

<http://agreste.agriculture.gouv.fr/> (“Données de Grandes Cultures 2018, consulté le 11/02/2019. Bulletin de veille CEP octobre 2018, consulté le 11/02/2019)

<http://www.arvalis-infos.fr/quelles-consequences-des-temperatures-elevees-sur-le-remplissage-des-grains--@/view-24874-arvarticle.html> (consulté le 02/03/2019)

<http://www.mississippi-crops.com/2018/07/10/why-did-the-kernels-near-the-ear-tip-not-fill/> (consulté le 22/02/2019)

<https://www.semencesdefrance.com/dossier/les-besoins-du-mais/> (consulté le 02/03/2019)

<https://www.arvalis-infos.fr/telechargez-la-nouvelle-plaquette-sur-les-stades-du-ma-s-@/view-15066-arvarticle.html> (consulté le 02/03/2019)

Annexes :

Annexes 1 : Formulation du projet

Sur quoi le projet agit-il ?

- Sur la sélection participative de maïs population
- Améliorer les variétés populations pour la tolérance à la sécheresse
- Identifier des caractères phénologiques associés à la tolérance au stress hydrique facilement utilisables par les agriculteurs

A qui le projet rend-il service ?

- Aux agriculteurs du Périgord impliqués dans l'association
- Aux agriculteurs au niveau national
- A l'association en acquérant de nouvelles méthodes et de nouveaux caractères à sélectionner

Objectifs :

- Mettre en place de nouvelles méthodes d'identification de caractères phénotypiques de résistance à la sécheresse chez le maïs
- Mettre en place un programme de sélection adapté aux agriculteurs en lien avec ces méthodes

Pourquoi ce but ?

- Conditions climatiques changeantes : avec le réchauffement climatique il est important d'avoir des variétés avec une forte résistance à la sécheresse
- Maintien de la biodiversité cultivé

But :

- Obtenir de nouvelles variétés de maïs résistantes au stress hydrique (manque d'eau et coup de chaleur) et que celles-ci aient un rendement proche de celui des variétés hybrides
- Valorisation de production pour leur propre semence

Besoin :

- Aspect économique
- Réappropriation de savoir-faire par les agriculteurs
- Valorisation des variétés traditionnelles
- Intérêt gustatif (ex: polenta, ...)

Cause :

- Variétés de population résistantes à la sécheresse inexistantes
- Accroissement des enjeux liés au changement climatique

Annexe 2 : Fiches de tâche

		Fiche de tâche	Edition du 22/01/19
<p>Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tâche : Recherche bibliographiques, notion stress hydrique / thermique Responsables : Alexandre et Péroline</p>			
<p>Description : Caractérisation des caractères due au stress hydrique / thermique sur maïs population Activités principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recherche sur différents sites et ouvrages à notre disposition • Identifier les articles en adéquation avec le sujet • Identifier les mots clés • Synthétiser les informations pertinentes <p>Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : Site internet et revue scientifique (Google scholar, Sciences, Nature ...), ordinateurs Tâches exclues : Organisation et répartition des recherches</p>			
Date de début : 8/01/19 Date de fin : 21/01/19 Evénements clés de l'exécution : Identification de caractères résistants à la sécheresse		Durée : 13 jours	
Imputation travaux : Recherche bibliographique		Budget : 0€	
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsables tâche : Alexandre et Maria Date : 22/01/19	

		Fiche de tâche	Edition du 22/01/19
<p>Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tâche : Recherche bibliographiques, caractères phénotypiques de résistance Responsable : Maria</p>			
<p>Description : Caractérisation des caractères phénotypiques de résistance sur maïs population Activités principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recherche sur différents sites et ouvrages à notre disposition • Identifier les articles en adéquation avec le sujet • Identifier les mots clés • Synthétiser les informations pertinentes <p>Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : Site internet et revue scientifique (Google scholar, Sciences, Nature ...), ordinateurs Tâches exclues : Organisation et répartition des recherches</p>			
Date de début : 8/01/19 Date de fin : 21/01/19 Evénements clés de l'exécution : Identification caractères phénotypiques de résistance		Durée : 13 jours	
Imputation travaux : Recherches bibliographiques		Budget : 0€	
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsable tâche : Maria Date : 22/01/19	

	Fiche de tache	Edition du 22/01/19
Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tache : Fiche « caractères phénotypiques simples » Responsable : Audrey		
Description : Rendre un document facile d'utilisation et synthétique Activités principales : <ul style="list-style-type: none"> Lister les caractères phénotypiques choisis Caractériser chaque caractère : stade de développement, partie de la plante, comment l'identifier Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : liste des caractères phénotypiques résistant à la sécheresse et facile d'identification Taches exclues : Organisation de la liste des caractères phénotypiques suivant leurs pertinences		
Date de début : 29/01/19 Date de fin : 04/02/19 Evénements clés de l'exécution : Choix judicieux pour répondre aux demandes des agriculteurs		Durée : 7 jours
Imputation travaux : Lister les caractères pertinents		Budget : 0€
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsable tache : Audrey Date : 22/01/19

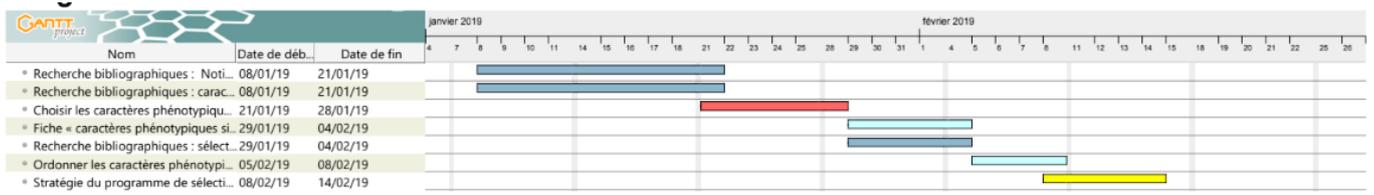
	Fiche de tache	Edition du 22/01/19
Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tache : Identifier et lister les caractères reconnaissables facilement en champs pour les agriculteurs Responsable : Péroline		
Description : Choisir les caractères phénotypiques les plus simples Activités principales : <ul style="list-style-type: none"> Identifier les caractères phénotypiques résistants à la sécheresse Identifier les caractères phénotypiques facilement remarquable en champs Caractériser les caractères phénotypiques résistants à la sécheresse et facilement identifiable en champs Choisir les principaux caractères pour ne peut passer trop de temps en sélection négative ou positive Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : document de synthèse des recherches bibliographiques, ordinateurs ... Taches exclues : Réflexion et concordance pour optimiser le temps des agriculteurs pour la sélection		
Date de début : 21/01/19 Date de fin : 28/01/19 Evénements clés de l'exécution : Validation des caractères phénotypiques		Durée : 7 jours
Imputation travaux : Identification et choix		Budget : 0€
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsable tache : Péroline Date : 22/01/19

	Fiche de tache	Edition du 22/01/19
Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tache : Ordonner les caractères phénotypiques de résistance en fonction du stade de développement Responsable : Péroline		
Description : Sélection des caractères résistants du maïs tout au long de son cycle Activités principales : <ul style="list-style-type: none"> • Identification des différents stades de développement du maïs • Reprendre les caractères de résistances lister au début de projet • Lier les caractères avec le stade de développement 		
Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : Document bibliographique produit précédemment, ordinateur Taches exclues : Mettre en lien les recherche bibliographique et les stades de développement du maïs		
Date de début : 05/02/19 Date de fin : 08/02/19 Evénements clés de l'exécution : Lier les informations		Durée : 4 jours
Imputation travaux : Lister les caractères de résistance		Budget : 0€
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsable tache : Péroline Date : 22/01/19

	Fiche de tache	Edition du 22/01/19
Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tache : Recherche bibliographiques : sélection de maïs population Responsable : Audrey		
Description : Identification des étapes clés de cette sélection sur maïs population Activités principales : <ul style="list-style-type: none"> • Recherche sur différents sites et revues • Recherche sur les ressources mises à disposition par Agro BioPérigord • Identification des différentes méthodes de la sélection de population • Recherche adaptées aux conditions climatiques de la région du Périgord • Recherche de protocole 		
Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : Site internet et revue scientifique (Google scholar, Sciences, Nature, Agro BioPérigord ...), ordinateurs Taches exclues : Organisation des recherches		
Date de début : 29/01/19 Date de fin : 04/02/19 Evénements clés de l'exécution : Identification de procédé de sélection		Durée : 7 jours
Imputation travaux : Recherche bibliographique		Budget : 0€
Visas	Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19	Responsable tache : Audrey Date : 22/01/19

	Fiche de tache	Edition du 22/01/19
<p>Projet : Sélection de maïs population résistant à la sécheresse Titre de la tache : Rédaction de la stratégie du programme de sélection Responsable : Alexandre</p>		
<p>Description : Rendre un document synthétiques aux différents acteurs</p> <p>Activités principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un document regroupant les caractères de résistance à la sécheresse, le stade auquel le caractère est a observer, la méthode d'observation • Ordonner les caractères suivant leurs pertinences et leurs faciliter d'identification • Rédiger un programme de sélection pour optimiser la sélection <p>Entrée nécessaire (matériels, documents, contraintes plannings) : Documents rédigés au début de projet, ordinateurs Taches exclues : Rédaction de fiche de sélection pour chaque caractères</p>		
<p>Date de début : 08/02/19 Date de fin : 14/02/19 Evénements clés de l'exécution : Synthétiser les informations de sélection</p>		<p>Durée : 7 jours</p>
<p>Imputation travaux : Rédaction de fiches de sélection pour chaque caractères</p>		<p>Budget : 0€</p>
Visas	<p>Responsables Projet : Jérôme et Robin Date : 7/01/19</p>	<p>Responsable tache : Alexandre Date : 22/01/19</p>

Annexe 3 : Diagramme de GANT



Annexe 4 : Poster des traits de sélection



Traits de sélection pour la tolérance à la sécheresse du maïs



Encrage racinaire :

Stade 3 à 5 feuilles

Déchausser les plants de maïs avec un enracinement faible

Passage de la herse étrille assez fort

Double intérêts :
Sélection et désherbage
mécanique des
adventices



Précocité :

A partir du stade 3 à 4 feuilles

Identifier et marquer les plants les plus précoces

Castrer les plants tardifs

Impact important sur
l'efficacité de la
photosynthèse et de
l'utilisation de l'eau



Anthesis-Silking Interval :

A la floraison

ASI doit être compris entre 2 à 4 jours

Sélection des floraison mâles et femelles rapprochées

Impact direct sur le
taux de fécondation
Forte corrélation avec
le rendement



Recovery overnight :

Lendemain matin suivant une journée de sécheresse

Sélection après chaque de journée de sécheresse des
pieds ayant les feuilles entièrement dé-enroulées

Impact important sur
l'efficacité de la
photosynthèse
Forte corrélation avec
le rendement



Sénescence foliaire :

Au remplissage des grains

Sénescence foliaire doit être la plus tardive possible

Marquer les plants où les feuilles sont en sénescence précoce

Plants à éliminer ou ne pas sélectionner suivant la sélection

Impact important sur
l'efficacité de la
photosynthèse et de
l'utilisation de l'eau



Stérilité de la panicule et feuilles brûlées :

Après 1 à 2 semaines après l'épiaison et jusqu'à la sénescence

Marquer les plants touchés par la stérilité mâle

Élimination de ces plants

Impact important sur
l'efficacité de la
photosynthèse et sur le
taux de fécondation



Rendement :

A la récolte

Rendement doit être le plus élevé

Sélection des populations à fort rendement et à forte diversité

Sélection des populations ayant les caractères les plus appropriés pour l'agriculteur

Maintien de la
diversité
Populations adaptées
aux conditions
environnementales