

Pratiques et systèmes agricoles résilients en condition de sécheresse

Quels leviers agroécologiques pour les agriculteurs du bassin Seine-Normandie ?

Septembre 2019

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent

Juliette ASPAR

Encadrée par Sarah FEUILLETTE

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Sarah Feuillette pour m'avoir permis de réaliser ce stage, pour la confiance qu'elle m'a accordée, mais aussi pour ses conseils et sa relecture attentive.

Ce travail est basé sur des recherches bibliographiques et des entretiens. Merci aux personnes qui m'ont aiguillée vers les références sur le sujet (cf liste à la fin du rapport). J'aimerais remercier les personnes qui ont bien voulu m'accorder un entretien téléphonique et qui ont contribué à la rédaction de ce rapport. Je remercie notamment Lionel Alleto, Guillaume Blanchet, Nicolas Métayer et Jacques Morineau pour le temps consacré à répondre à mes questions.

Je remercie également toute l'équipe de la Direction Connaissances et Planification, pour leur accueil chaleureux. Je tiens à remercier en particulier Gabrielle et Pauline, mes collègues de bureau, pour leur soutien et leur bonne humeur durant ces deux mois.

Table des matières :

Introduction	6
Le risque sécheresse : une menace croissante dans le bassin Seine-Normandie	6
L'agriculture du bassin Seine-Normandie : la nécessité de s'adapter	7
Résilience des systèmes agricoles et agroécologie	8
I. Comment améliorer la résilience des systèmes de grandes cultures en conditions de sécheresse ?.....	9
I.1. Adapter les espèces et les variétés cultivées	9
- I.1.1. Esquiver les périodes de sécheresse	9
- I.1.2. Jouer sur la tolérance des espèces et des variétés cultivées à la sécheresse	11
- I.1.3. Diversifier les espèces et les variétés	15
I.2. Augmenter la disponibilité en eau dans le sol	18
- I.2.1. Maintenir une couverture du sol afin de limiter son assèchement et d'augmenter le réservoir utilisable du sol	19
- I.2.2. Limitation du travail du sol	20
I.3. Limiter le stress hydrique des cultures par l'agroforesterie	21
- I.3.1. Agroforesterie intra-parcellaire	21
- I.3.2. Plantation ou maintien de haies en bordures de parcelles	22
II. Quelles sont les stratégies d'amélioration de la résilience des systèmes d'élevage face aux épisodes de sécheresse ?	24
II.1. Améliorer la tolérance du troupeau et des cultures fourragères à la sécheresse	24
- II.1.1. Adapter le troupeau pour ajuster ses besoins au risque de sécheresse	24
- II.1.2. Valoriser la diversité génétique et spécifique pour améliorer la résistance des prairies ou des cultures fourragères à la sécheresse	25
II.2. Augmenter l'autonomie fourragère	27
- II.2.1. Sécuriser la ressource fourragère avec des stocks	27
- II.2.2. Diversifier les sources de fourrage	27
II.3. Limiter les impacts de la sécheresse sur les prairies et les troupeaux par l'agroforesterie	29
- II.3.1. Créer un microclimat humide grâce aux arbres	29
- II.3.2. Fournir un pâturage complémentaire	31
Récapitulatif des stratégies améliorant la résilience des systèmes d'élevage	33
III. Quels sont les leviers d'amélioration de la résilience des systèmes viticoles en conditions de sécheresse ?	34
III. 1. Modifier les pratiques culturales pour ajuster l'eau disponible aux besoins de la vigne	34

- III.1.1. Adapter les systèmes de taille.	34
- III.1.2. Adapter la gestion du sol	35
III. 2. Adapter la plantation des vignes	37
- III.2.1. Réorganiser les plantations dans l'espace.....	37
- III.2.2. S'appuyer sur la diversité génétique pour augmenter la résistance des vignes	38
- III.2.3. Introduire des arbres pour créer un microclimat.....	39
Récapitulatif des stratégies améliorant la résilience des systèmes viticoles	40
.....	40
IV. Des systèmes agroécologiques plus résilients face aux aléas climatiques	41
IV.1. L'agriculture biologique, en moyenne plus économe en eau et résistante aux sécheresses.....	41
IV.2. Les systèmes d'élevage laitier économes et autonomes du Réseau Agriculture Durable, des systèmes plus résilients sur le plan économique	42
IV.3. Les systèmes de polyculture-élevage favorisant les couplages entre animaux/végétaux permettent de mieux résister aux aléas	43
V. Quelles sont les voies d'économies d'eau dans les systèmes irrigués ?.....	45
V. 1. Limiter les prélèvements d'eau d'irrigation	45
- V.1.1. Privilégier l'irrigation d'appoint	45
- V.1.2. Reporter des volumes d'eau vers des cultures d'hiver (blé, orge, colza) plutôt que les cultures de printemps.....	46
V.2. Optimiser l'efficacité de l'irrigation.....	46
- V.2.1. Choix d'un dispositif d'irrigation économe en eau	46
- V.2.1. Pratiques de pilotage des apports d'eau d'irrigation	47
En conclusion, un bilan des différentes stratégies mobilisables	49
Annexes.....	56

Table des illustrations :

Figure 1 : Carte représentant les arrêtés sécheresse sur la période 2010-2018	6
Figure 2 : Répartition de la SAU par Orientation technicoéconomique des exploitations (OTEX) dans le Bassin Seine Normandie en 2016	8
Figure 3 : Orientation technicoéconomique des exploitations du Bassin Seine Normandie en 2010 (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2013)	8
Figure 4 : Calendrier des principales grandes cultures (Agreste, 2014)	10
Figure 5 : Production comparé du maïs et du sorgho, en sec et en irrigué en 1991 à l'INRA de Lusignan.....	11
Figure 6 : Rendement moyen par catégorie de variété en quintaux/ha (Marguerie, Latraye, Jézéquel, & Meloux, 2016).....	14
Figure 7 : Schéma du bilan hydrique du sol.....	18
Figure 8 : Schéma synthétisant les stratégies permettant d'augmenter la résilience des systèmes de grandes cultures en condition de sécheresse	23
Figure 9 : Vache pâturent le feuillage d'ormes et d'érables (Messean & Messean, 2017).....	31
Figure 10 : Schéma synthétisant les stratégies permettant d'augmenter la résilience des systèmes d'élevage en condition de sécheresse	33
Figure 11 : Stratégie permettant d'améliorer la résilience des systèmes viticoles en conditions de sécheresse	40
Figure 12 : Evolution comparée du revenu disponible des exploitations de Basse- Normandie en élevage bovin du CIVAM et du RICA, pour les années de 2009 à 2012	42
Figure 13 : Evolution du résultat courant par unité de main d'œuvre entre 2000 et 2015 pour des exploitations à couplage faible, moyen et élevé.....	44

Introduction

Le risque sécheresse : une menace croissante dans le bassin Seine-Normandie

Le bassin Seine-Normandie se compose du fleuve la Seine et de ses affluents l'Yonne, la Marne et l'Oise, ainsi que des petits cours d'eau côtiers normands. La Seine est un fleuve recevant actuellement en moyenne un peu moins de 800 mm d'eau par an, ce qui est assez faible par rapport aux autres bassins français. Le bassin possède cependant des aquifères très étendus et de large capacité qui régulent fortement la variabilité temporelle des eaux de surface. Ainsi le bassin Seine-Normandie était jusqu'ici un bassin relativement peu touché par les sécheresses en comparaison des bassins Adour-Garonne ou Rhône-Méditerranée.

La sécheresse peut être définie comme un déficit hydrique sur une période relativement longue par rapport à une référence. On distingue cependant plusieurs types de sécheresse (Météo France, 2014) :

- La sécheresse météorologique correspond à un déficit prolongé de précipitations ;
- La sécheresse hydrologique se manifeste lorsque les lacs, rivières ou nappes souterraines montrent des niveaux anormalement bas ;
- La sécheresse agricole se caractérise par un déficit en eau des sols superficiels (entre 1 et 2 m de profondeur), suffisant pour altérer le bon développement de la végétation.

Bien que ces différents types de sécheresse soient tous liés, on s'intéressera notamment au phénomène de sécheresse agricole dans cette étude.

Même si le bassin Seine Normandie est un territoire historiquement peu touché par les sécheresses, plusieurs zones de tension sur l'eau émergent, telles que la Beauce ou l'Aronde. Les arrêtés sécheresses sont également récurrents sur le bassin (cf. Figure 1), avec dans les 8 dernières années, un minimum de 56 arrêtés pris par an (en 2014), un maximum de 359 (en 2011), et une moyenne de 184.

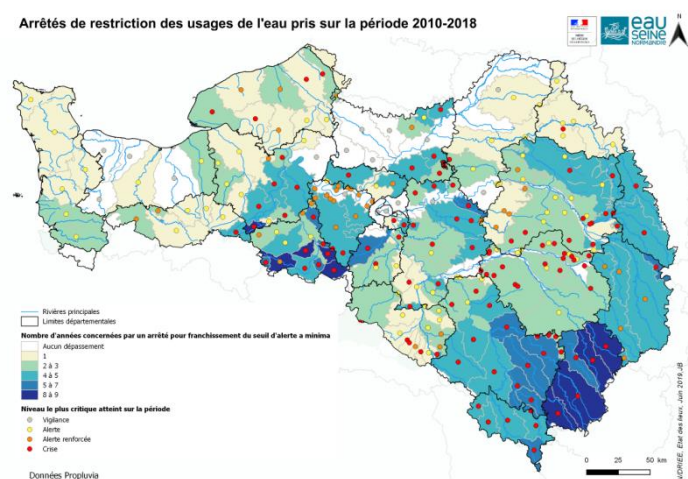


Figure 1 : Carte représentant les arrêtés sécheresse sur la période 2010-2018

D'autre part, selon les projections d'une récente étude réalisée par le Cerfacs de Toulouse (Boé & Radojevic, 2018), les épisodes de sécheresse risquent de s'accroître sur le bassin Seine-Normandie à l'horizon 2030 - 2060. Les simulations, réalisées sur la base du scénario d'émission de gaz à effet de serre tendanciel (RCP 8.5)¹ et de 14 modélisations climatiques régionalisées, indiquent notamment :

¹ La comparaison avec le RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 montre qu'à cette échéance les projections du GIEC sont similaires d'un scénario à l'autre, la divergence entre les trajectoires d'émission de gaz à effet de serre ayant lieu à partir de la seconde moitié du siècle.

- Des sécheresses agricoles (humidité du sol inférieure à la décennale sèche) plus sévères et plus longues que dans le passé ;
- Des sécheresses hydrologiques (caractérisées par un débit inférieur au VCN3 – minimum du débit consécutif sur 3 jours) jusqu'à dix fois plus longues ;
- Un nombre important de mois passés en sécheresse chaque année, plutôt qu'une alternance d'années de sécheresses extrêmes entrecoupées d'années sans sécheresse.

Bien que ces simulations ne constituent en aucun cas des prévisions, elles montrent cependant que des situations de sécheresses bien plus extrêmes que lors des 100 dernières années sont probables d'ici 2030-2060.

Cela est d'autant plus préoccupant que les ressources sont faibles au regard de la population particulièrement importante du bassin et des multiples d'usages de l'eau qui risquent encore de s'accroître au cours des prochaines années. En effet, bien que les prélèvements agricoles destinés à l'irrigation soient encore relativement faibles (ils concernent 3% des agriculteurs en 2000 et 6% en 2010), ils sont en augmentation tendancielle, et cette pression pourrait encore augmenter avec l'accroissement des sécheresses agricoles.

Il semble donc important d'envisager dès maintenant la question de l'adaptation des systèmes agricoles à des situations de sécheresses plus fréquentes et parfois particulièrement fortes et prolongées. Si l'adaptation par l'offre, qui consiste à prélever ou à stocker plus d'eau grâce à des retenues d'irrigation, peut paraître attrayante, elle présente un certain nombre de limites et génère un besoin en eau toujours accru. Dans ce contexte, il paraît donc prioritaire d'adapter la demande en eau en adaptant les systèmes agricoles pour les rendre plus résilients en condition de sécheresse. Nous tenterons donc dans cette étude d'étudier l'intérêt de différents systèmes et pratiques dans la résilience des systèmes agricoles en condition de sécheresse.

Afin de pouvoir proposer des stratégies pertinentes il semble important de caractériser l'agriculture dans le bassin Seine Normandie.

L'agriculture du bassin Seine-Normandie : la nécessité de s'adapter

L'agriculture est la première activité du bassin Seine-Normandie en termes d'occupation des sols. La surface agricole utile (SAU), de 5,7 millions d'hectares en 2017, couvre 58 % de la superficie du bassin (Agence de l'eau Seine-Normandie, à paraître).

L'agriculture du bassin Seine-Normandie est majoritairement spécialisée en grandes cultures, qui couvrent 57% de la SAU du bassin (cf. Figure 2). En effet vers le centre du bassin, la Beauce, l'Île-de-France et la Picardie se caractérisent par de faibles reliefs et un sol limoneux qui en font des régions favorables à la culture intensive de céréales (blé et orge, et dans une moindre mesure maïs), d'oléagineux (colza) et de betterave sur de très grandes exploitations. Vers les périphéries est et ouest, la Basse-Normandie, la Champagne humide ou encore le Morvan possèdent un sol plus argileux et compact qui rend ces régions plus favorables à la pâture et l'élevage. On y retrouve donc notamment des prairies permanentes qui représentent autour de 18% de la SAU. On retrouve également des cultures permanentes (vignes ou vergers) avec quelques espaces viticoles, notamment au niveau de la Champagne crayeuse et de l'Auxerrois qui se caractérisent par des sols calcaires, perméables, associés à une géographie en côte. Le bassin compte également de manières plus anecdotiques du maraîchage et de l'horticulture autour de Paris.

Figure 2 : Répartition de la SAU par Orientation technicoéconomique des exploitations (OTEX) dans le Bassin Seine Normandie en 2016

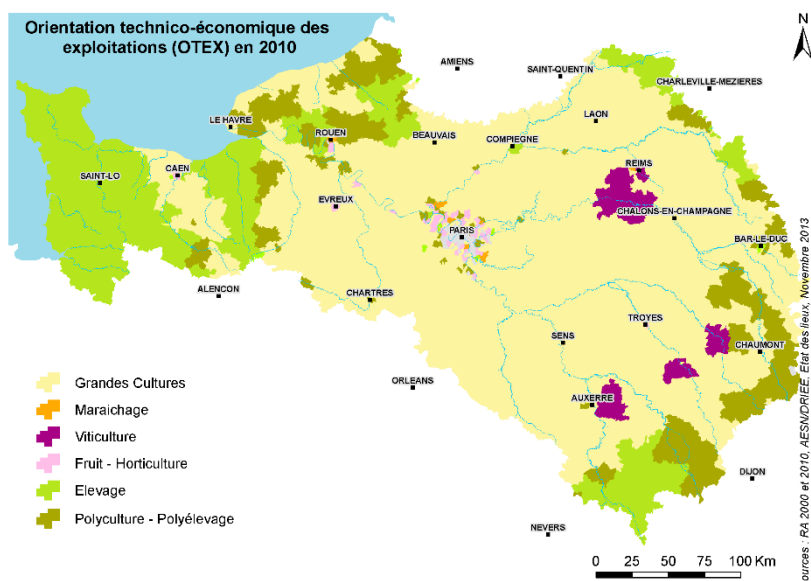
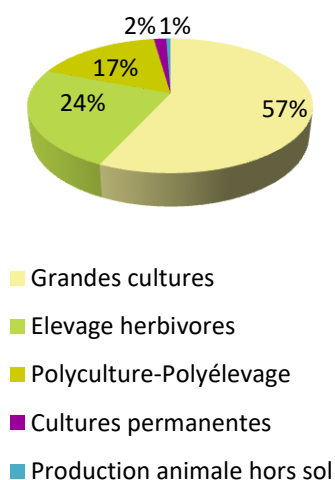


Figure 3 : Orientation technicoéconomique des exploitations du Bassin Seine Normandie en 2010 (Agence de l'eau Seine-Normandie, 2013)

Compte tenu de la répartition de la SAU en fonction des orientations technico-économiques des exploitations du Bassin-Seine Normandie (OTEX), nous avons décidé de nous focaliser sur les trois principales OTEX du Bassin-Seine Normandie : à savoir les grandes cultures, les systèmes d'élevage et les cultures permanentes pour lesquels nous étudieront plus précisément le cas de la vigne.

Résilience des systèmes agricoles et agroécologie

La résilience est une notion d'écologie qui désigne la capacité d'un système vivant à retrouver les structures et les fonctions de son état de référence après une perturbation. Cette notion a été élargie aux systèmes agricoles dans le dictionnaire d'agroécologie en ligne promu par l'INRA (de Oliveira, Coroller, Perrin, & Martin, 2019) et désigne la capacité d'adaptation d'un agrosystème à une perturbation. Dans notre étude on étudiera en particulier la capacité d'adaptation à la sécheresse.

Cette capacité à retrouver son état d'équilibre peut donc s'évaluer au regard de différents critères notamment la stabilité des rendements mais aussi la stabilité des revenus de l'agriculteur sans lesquels le système risque d'être profondément modifié. On peut distinguer plusieurs grandes capacités pour améliorer la résilience à l'aléa (de Oliveira, Coroller, Perrin, & Martin, 2019) :

- La capacité tampon : le système est capable de tolérer des perturbations sans s'éloigner de son régime de routine. Nous verrons notamment que le choix du matériel végétal ou des pratiques culturales peut limiter les impacts de la sécheresse en permettant la résistance du système à l'aléa ;
- La capacité d'adaptation : le système est capable de modifier son fonctionnement, sa structure pour compenser les effets de la sécheresse et revenir rapidement à un régime de routine. Nous verrons ainsi que la diversité des espèces, ou des ressources ou des activités peut permettre de répartir davantage les risques et de compenser les pertes ;
- La capacité de transformation : le système est capable de se transformer en profondeur pour perdurer. Notre objectif est cependant d'apporter des stratégies pour le maintien du système tel que le souhaitent les agriculteurs, aussi cet aspect sera peu traité dans notre étude.

La notion de résilience est souvent associée à celle d'agroécologie. En effet l'agroécologie est une forme d'agriculture qui revendique un objectif de résilience (Osaé, Osez l'agroécologie, 2015). Selon le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, l'agroécologie peut se définir comme une façon de concevoir des systèmes de production agricoles qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes. L'agroécologie promeut ainsi la valorisation de la diversité biologique, l'optimisation des processus naturels (cycle du carbone, de l'eau, équilibre entre ravageurs et auxiliaires de cultures), et la préservation des ressources naturelles pour améliorer la résilience des agroécosystèmes. Dans ce rapport, nous tenterons donc de mettre en avant les pratiques et systèmes agroécologiques permettant la résilience du système en condition de sécheresse, en prenant la définition de l'agroécologie dans son sens large, c'est-à-dire une agriculture qui utilise les fonctionnalités naturelles des écosystèmes tout en limitant les pressions sur l'environnement et les ressources naturelles.

Bien que cette étude se focalise sur l'intérêt de ces pratiques ou systèmes vis-à-vis de la sécheresse, les notions de résilience et d'agroécologie ne se limitent pas à un seul aléa, un seul aspect de l'écosystème. Une pratique dite agroécologique ou résiliente doit favoriser le système dans son intégralité et non pas uniquement la tolérance à la sécheresse, c'est pourquoi on s'attachera à montrer l'intérêt ou les limites de certaines pratiques sur l'ensemble du système.

I. Comment améliorer la résilience des systèmes de grandes cultures en conditions de sécheresse ?

I.1. Adapter les espèces et les variétés cultivées

Afin d'augmenter la résistance de son système agricole aux périodes de sécheresse, le premier levier sur lequel l'agriculteur peut jouer est le matériel végétal. Le choix des variétés et des espèces cultivées, mais aussi des rotations de cultures permet d'obtenir un système plus résilient en condition de sécheresse.

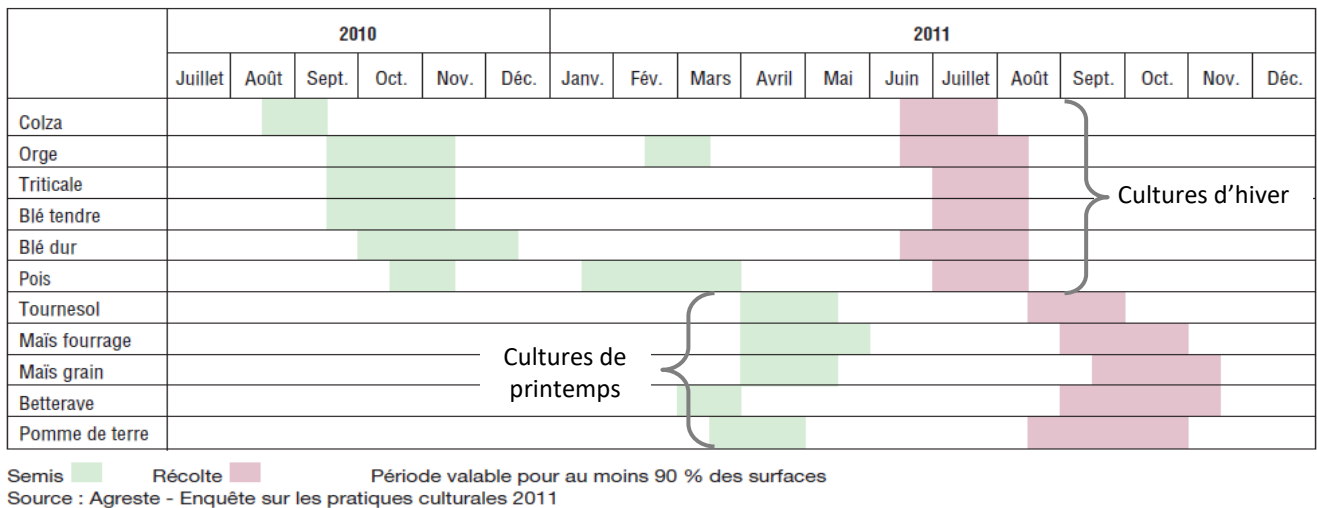
- I.1.1. Esquiver les périodes de sécheresse

Selon Amigues et al (2006), la première stratégie pour augmenter la résilience d'un système de grandes cultures en condition de sécheresse est l'esquive. Cette stratégie consiste à éviter les périodes de déficit hydrique dans le cycle cultural, ou tout du moins à éviter qu'elles ne coïncident avec les phases critiques ou sensibles du cycle cultural.

Introduire des cultures d'hiver dans la rotation

Les cultures finissant leur cycle plus tôt (vers mai-juin) ont plus de chance d'esquiver les périodes de sécheresse plus fréquentes en été (cf. Figure 4). C'est notamment le cas des cultures semées à l'automne, ou en fin d'hiver telles que l'orge, le blé ou le colza. De plus, les périodes sensibles sont avancées par rapport aux périodes de risque de déficit hydrique. Néanmoins ces cultures sont déjà largement dominantes dans les assolements des agriculteurs. Par ailleurs, une trop forte proportion de cultures d'hiver conduit à des dates de semis peu diversifiées ce qui peut poser des difficultés pour la gestion des adventices. En effet, semer toujours aux mêmes périodes favorise d'une année sur l'autre les mêmes adventices dont la date de levée est proche de la date de semis. Enfin le risque croissant de sécheresses automnales qui apparait dans les projections climatiques est à prendre en compte.

Figure 4 : Calendrier des principales grandes cultures (Agreste, 2014)



Cette stratégie et ses limites ont été expérimentées au sein du GAEC Ursule en Vendée, qui pour esquisser les périodes de sécheresse a augmenté la part des cultures d’hiver de son assolement jusqu’à atteindre 70% de cultures d’hiver (cf. Annexe 1). Les adventices ont cependant rapidement posé problème à l’agriculteur, qui a préféré revenir à une proportion de 50 %. En effet, selon Jacques Morineau, associé au GAEC, il est préférable d’avoir le maximum de dates de semis différentes pour limiter le salissement des cultures.

Avancer la date de semis

Une autre stratégie consiste à décaler le cycle cultural d’une culture afin d’éviter les périodes à risque, en avançant la date de semis par exemple. On retrouve en effet cette stratégie dans le rapport Agriculture Forêt Climat (Vert, Schaller, & Villien, 2013). Menée en collaboration avec des chercheurs, des membres du Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation et de la Forêt, des instituts techniques, du monde agricole ou encore de la société civile, cette étude cherche à évaluer les conséquences du changement climatique et à proposer des stratégies d’adaptation pour 14 études de cas. Pour le cas des grandes cultures du Cher, la première stratégie envisagée est ainsi d’esquisser les périodes de déficit hydrique en décalant les cycles culturaux.

Pour les cultures de printemps, on peut jouer sur la date de semis. Pour l’orge, il s’agit par exemple d’augmenter la proportion d’orges de printemps semées à l’automne pour augmenter la biomasse produite lors de l’hiver et sa valorisation en rendement (moins de tallage, plus de grains par épi), et ainsi réduire les pertes liées aux stress tardifs, ou encore de semer plus précocement également au printemps (dans les limites de faisabilité en février) (Vert, Schaller, & Villien, 2013).

Choix de variétés précoces

Pour les cultures d’hiver, comme le blé, cette stratégie repose davantage sur l’utilisation de variétés à montaison et à épiaison plus précoces, qui est un levier beaucoup plus puissant que la date de semis. En effet, le blé étant une plante de jours longs, son cycle va surtout être influencé par l’arrivée du printemps. La date de semis a donc moins d’influence sur l’arrivée à maturation des blés. D’après les calculs menés par Arvalis, d’ici 2035, l’augmentation de la température entrainera des blés naturellement plus précoces d’une semaine (Bousquet, 2018). Néanmoins pour éviter les stress, il faudrait que les blés soient encore plus précoces d’une semaine supplémentaire afin de mieux résister aux phénomènes de sécheresse. C’est vers cela que se tourne donc aujourd’hui l’institut du végétal.

Autres intérêts de la stratégie d'esquive :

Le décalage du cycle cultural rend par ailleurs possible l'introduction de culture dérobée (culture s'intercalant entre deux cultures principales) plus résistante à la sécheresse. Le rapport AFClm envisage la plantation de graminées tropicales type sorgho en interculture dans les parcelles de grande culture de la Somme, valorisables en ressource fourragère.

- **I.1.2. Jouer sur la tolérance des espèces et des variétés cultivées à la sécheresse**

On ne peut cependant pas toujours éviter le stress hydrique, d'autant plus que ces derniers se font de plus en plus fréquents au printemps. Un deuxième levier consiste à choisir un matériel végétal tolérant à la sécheresse. En effet, certaines cultures et certaines variétés ont de meilleures aptitudes pour résister aux conditions de sécheresse : plantes en C4², systèmes racinaires plus développés, certaines plantes sont à privilégier dans les rotations.

Choix d'espèces tolérantes à la sécheresse

D'après le rapport de l'INRA sur l'agriculture et la sécheresse (Amigues, et al., 2006), certaines espèces possèdent une tolérance intrinsèque à la sécheresse, tant des appareils végétatifs que reproducteurs, ce qui leur permet d'avoir des rendements acceptables en condition de sécheresse même sans irrigation.

C'est notamment le cas du sorgho. Biologiquement proche du maïs, son métabolisme en C4 lui permet une forte efficacité en eau comparable à celle du maïs. Cependant ses exigences en eau sont beaucoup plus faibles, avec des besoins totaux entre 400 et 500 mm d'eau contre des besoins totaux supérieurs à 600 mm d'eau pour le maïs. De plus, le sorgho possède un enracinement profond qui lui permet de maintenir son activité photosynthétique même pour un sol en déficit hydrique (Amigues, et al., 2006). Ainsi, si la production de maïs est plus élevée que celle du sorgho en système irrigué, ce dernier résiste mieux aux conditions sèches (cf. Figure 5). En condition de sécheresse, sans irrigation, la production de maïs est nettement plus faible que la production de sorgho.

Figure 5 : Production comparé du maïs et du sorgho, en sec et en irrigué en 1991 à l'INRA de Lusignan (Amigues, et al., 2006)

Modalité	Irrigué		Sec	
	Maïs	Sorgho	Maïs	Sorgho
Production en matière sèche (t/ha)	24	18	9	13
Consommation d'eau (mm)	615	480	300	310
Efficacité de l'eau (kg MS/ mm)	39	37	30	42

Le développement de la culture du sorgho a cependant longtemps été freiné par le manque de structuration de la filière, limitant la marge brute de cette culture (Amigues, et al., 2006). Depuis, le premier congrès européen du sorgho en 2016 a permis d'amorcer la structuration d'une interprofession européenne. De plus, le sorgho bénéficie depuis 2017 de fonds communautaires destinés à un programme de promotion de sa culture en Europe (Carpentier, 2017).

² La photosynthèse transforme l'énergie solaire en sucres à partir du gaz carbonique et de l'eau. Il y a trois mécanismes connus de fixation du CO₂ au cours de ce processus, C3, C4 et CAM. Le métabolisme en C4 limite les pertes d'eau lors de la fixation du CO₂ ce qui offre à ces plantes un avantage compétitif en situation de sécheresse.

De même, le tournesol possède un système racinaire pivotant très efficace, et s'adapte à la ressource en eau disponible en diminuant sa croissance végétative au profit de la phase de remplissage des graines (Amigues, et al., 2006) ce qui lui confère de très bonnes capacités de résistance à la sécheresse. (Léveillé, 2016). De plus, utiliser le tournesol dans un cycle de rotation présente de nombreux intérêts, puisqu'il offre des conditions optimales d'implantation aux céréales d'hiver avec un rendement du blé suivant augmenté d'environ 15 %. En outre cette culture nécessite l'emploi de peu de phytosanitaires et peu d'azote en comparaison des autres grandes cultures (Léveillé, 2016). La faible productivité du tournesol et la faible marge brute induite constituent aujourd'hui les principaux freins au développement de cette culture (Amigues, et al., 2006). Néanmoins, les programmes de recherches menés par l'INRA depuis 2006 et le récent séquençage du génotype du tournesol en 2016 devraient permettre d'accélérer la sélection de variétés plus productives et plus résistantes aux aléas climatiques (Léveillé, 2016).

Sélection de variétés classiques tolérantes à la sécheresse

La variabilité génétique au sein d'une même culture conduit également à une variabilité de la tolérance à la sécheresse entre les variétés. Cependant, depuis une cinquantaine d'années, la majorité des travaux de sélection variétale a été tournée vers la recherche de variétés productives pour des systèmes à haut rendement. Les travaux de sélection étant menés dans des conditions climatiques favorables, on manque aujourd'hui de recul technique pour qualifier les niveaux de résistance des variétés actuelles à la sécheresse.

Dans un contexte de changement climatique, les chercheurs et les instituts techniques se penchent désormais davantage sur la question de la résistance à la sécheresse. Ainsi, depuis 2015, des travaux de phénotypage à haut débit sont menés par l'institut technique du végétal ARVALIS et l'INRA. Implantée dans la Beauce, la plateforme Phenofield permet d'évaluer la tolérance de variétés de maïs et de blé tendre en condition de stress hydrique (Bousquet, 2018). Les premiers résultats ont ainsi montré que la perte de rendement de certaines variétés de blé, en situation de stress hydrique, est inférieure d'au minimum 10 %, par rapport à celle de leurs voisines : ces variétés pourraient donc être intéressantes pour une plus grande résilience des systèmes agricoles en conditions de sécheresse.

Cependant, les variétés classiques (ou variétés modernes) sont sélectionnées au niveau national dans des stations expérimentales, et sont donc peu adaptées aux spécificités locales. Par ailleurs, les variétés modernes ont pendant longtemps été sélectionnées pour des systèmes à forte fertilisation azotée et avec herbicide (Mollier, 2014). Ainsi, de plus en plus d'agriculteurs se détournent de ces variétés modernes peu adaptées à leurs conditions pédoclimatiques et à leurs pratiques.

Par ailleurs, si on considère la question de la résilience à la sécheresse, un inconvénient des variétés classiques réside également dans leur homogénéité. Issues de lignée pure, ces variétés sont identiques sur le plan génétique, et sont donc très peu adaptables aux variations de l'environnement. En effet, en conditions limitantes inhabituelles, il n'y a pas de génotype qui peut s'avérer plus adapté que les autres. L'absence de diversité génétique les rend donc particulièrement sensibles aux aléas, notamment climatiques.

Enfin, même si cela ne concerne pas directement la résilience à la sécheresse, on peut par ailleurs reprocher aux variétés classiques, issues des semences certifiées, de priver les agriculteurs d'une part de leur autonomie. En effet, la plupart des variétés classiques tirent leur productivité de l'hybridation : environ 100% des variétés de maïs et tournesol, 80% des potagères, etc. (Kasler, 2006). La vigueur hybride (ou effet d'hétérosis) rend ces variétés très productives et beaucoup plus vigoureuses que celles dont elles sont issues. Cependant l'hybridation rend ces variétés très instables et leurs descendants très peu productifs ce qui oblige les agriculteurs à racheter des semences tous les ans. Si elles n'ont pas été rendues stériles par

hybridation, les semences peuvent être replantées par les agriculteurs, mais en versant un pourcentage de leur prix initial aux semenciers. Et dans les faits, les agriculteurs sont souvent obligés de retourner à la semence certifiée tous les deux ou trois ans (Kasler, 2006).

Sélection de variétés populations tolérantes à la sécheresse

Contrairement aux variétés issues de semences certifiées, les variétés populations sont constituées d'un ensemble d'individus différents sur le plan génétique, et non de clones. Ces variétés sont principalement issues de semences paysannes sélectionnées par les agriculteurs eux-mêmes et replantées d'une année sur l'autre, avec des échanges entre agriculteurs pour assurer un bon brassage génétique. Leur diversité génétique permet à ces variétés de mieux s'adapter aux variations de leur environnement. En effet, il existe toujours un individu dont le génotype est mieux adapté qui, du fait de la sélection naturelle ou de la sélection de l'agriculteur laissera plus de descendants (Mollier, 2014). Ainsi, si des années de sécheresse se succèdent, l'agriculteur peut sélectionner les individus qui ont le mieux résisté pour produire des semences adaptées à ce stress.

D'autre part, contrairement aux variétés classiques sélectionnées en station expérimentale, les variétés populations sont sélectionnées au champ par les agriculteurs, et bien souvent de manière participative. Elles sont donc continuellement sélectionnées pour être adaptées aux conditions pédoclimatiques locales mais aussi aux pratiques des agriculteurs, notamment en agriculture biologique. En effet, bien que certaines études se penchent aujourd'hui sur la question des semences certifiées biologiques plus résistantes aux maladies (Mollier, 2014), les variétés classiques ont longtemps été sélectionnées sur le critère unique ou principal du rendement.

La principale limite à l'utilisation des semences paysannes est leur rendement : dans 95% des expérimentations menées par les compagnies semencières, les variétés lignées pures issues de la sélection classique offrent des meilleurs rendements que les variétés populations, ce qui est logique puisqu'elles ont été sélectionnées sur ce critère principalement. Cependant, il est important de noter que ces expérimentations sont souvent menées dans des conditions favorables, à l'aide d'irrigation et d'intrants y compris des produits phytosanitaires, que l'on cherche aujourd'hui à limiter. Dans le cas des variétés population, la diversité des individus exerce un effet tampon permettant d'obtenir des rendements moyens stables quelles que soient les conditions (Mollier, 2014).

En ce qui concerne le blé, une expérimentation associant Agribio 04, Arvalis et le parc naturel du Luberon a été menée dans les Alpes de Hautes-Provence (Marguerie, Latraye, Jézéquel, & Meloux, 2016) afin de comparer les performances agronomiques de différentes variétés modernes et populations face au stress hydrique. Afin d'observer les conséquences du stress hydrique, les variétés ont été conduites avec et sans irrigation. Comme on peut le voir ci-dessous (Figure 6), cette expérimentation met en évidence que les variétés populations sont beaucoup moins sensibles au stress hydrique et dépendantes de l'irrigation que les variétés modernes. En effet, la différence de rendement n'est pas significative entre les variétés populations irriguées et non irriguées, alors que la variation du rendement entre ces deux modalités est autour de 12% pour les variétés classiques. Cependant, on observe que dans tous les cas les variétés populations ont un rendement inférieur aux variétés modernes.

Figure 6 : Rendement moyen par catégorie de variété en quintaux/ha (Marguerie, Latraye, Jézéquel, & Meloux, 2016)

Modalité	Variété moderne		Variété paysanne	
	Irrigué	Non irrigué	Irrigué	Non irrigué
Effectif	52	52	76	76
Moyenne rendement	47.438	41.487	30,245	29,974
Groupes	A	B	C	C

Les lettres représentent les différences statistiquement significatives. Lorsque deux modalités n'ont aucune lettre en commun on peut affirmer avec certitude que la différence de rendement observée est due à la modalité

La sélection de variétés populations ne doit cependant pas être écartée pour autant comme une mesure permettant d'augmenter la résilience des exploitations en condition de sécheresse. En effet, cette expérimentation permet surtout de mettre en évidence que certaines variétés semblent plus prometteuses que d'autres dans la résistance à la sécheresse, et que des programmes de sélections successives permettraient sans doute d'obtenir de meilleurs résultats, y compris en termes de rendement, sur du plus long terme.

C'est le cas du programme « Cultivons la biodiversité en Nouvelle Aquitaine » lancé par AgroBioPérigord. Depuis 2000, cette association d'agriculteurs teste des variétés de maïs population en agriculture biologique afin de proposer à ses adhérents de nouvelles variétés. Parmi les résultats de ce travail, des rendements, certes un peu plus faibles, mais nettement plus réguliers, ont été observés, notamment les années sèches ou dans les terres les plus pauvres. On peut également mentionner une bonne aptitude aux conditions de culture sans intrants chimiques et une grande richesse des grains en protéines (Kasler, 2006).

Enfin, outre le gain d'adaptabilité et de stabilité du rendement, les variétés populations permettent un gain d'autonomie non négligeable pour les agriculteurs. Cultiver ses propres semences permet aux agriculteurs d'être indépendants du prix des semences, ce qui est un facteur de résilience important. La baisse des charges liées aux semences et à l'irrigation peut même permettre à l'agriculteur d'assurer un meilleur revenu. Armand Duteil du réseau AgroBioPérigord cultive ainsi des variétés de maïs population sans irrigation. Pour lui, les économies réalisées sur l'eau et l'achat des semences compensent la perte de rendement et lui permettent de ne pas dépendre de ressources en eau (JT 20h de France 2, 2015) .

Un des freins principaux au développement des semences paysannes réside aujourd'hui dans la réglementation. Du fait de leur hétérogénéité, elles dérogent aux principes de distinction, d'homogénéité et de stabilité nécessaires à l'inscription des variétés au catalogue officiel³. Bien que les agriculteurs soient encore autorisés à les cultiver, elles ne peuvent être ni vendues, ni échangées sauf dans le cadre de la recherche. Beaucoup d'agriculteurs sont donc dans l'attente d'une évolution du cadre réglementaire.

Autres intérêts des variétés populations :

- Adaptation aux pratiques agricoles non intensives (non-utilisation de produits phytosanitaires, ...)
- Entretien de la diversité génétique de l'espèce
- Adaptation aux conditions pédoclimatiques locales
- Meilleure résilience aux aléas en général (parasites, adventices, ...)

³ Le catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées répertorie les variétés issues de la sélection classique. D'après le décret du 11 juin 1949, seules peuvent être commercialisées les semences issues de variétés inscrites au catalogue officiel.

- 1.1.3. Diversifier les espèces et les variétés

En ce qui concerne le choix du matériel végétal, la clé de l'adaptation reste la diversification des espèces et des variétés. En effet, si on observe une augmentation des épisodes de stress hydrique, la sécheresse peut avoir des conséquences très variables suivant sa durée et le moment du cycle où elle intervient. Ainsi, il semble qu'augmenter le nombre d'espèces et de variétés dans l'assolement mais aussi au sein d'une même parcelle est un moyen efficace de répartir le risque, et donc d'augmenter la résilience du système.

Allongement des rotations et diversification de l'assolement

La diversification de l'assolement et l'allongement des rotations peut permettre de répartir le risque de sécheresse sur un plus grand nombre de cultures. En effet, si une sécheresse survient pendant un stade sensible d'une ou plusieurs cultures, l'augmentation du nombre d'espèces différentes permet de diminuer les pertes. Ainsi, même si la PAC impose aux agriculteurs une implantation d'au moins 3 cultures différentes, certains agriculteurs peuvent cultiver jusqu'à 30 espèces différentes. C'est le cas de Jacques Morineau, chef des cultures du GAEC Ursule. Pour lui, c'est un vrai facteur de résilience face aux aléas climatiques (cf. Annexe 1). La diversification des variétés peut également être envisagée.

L'allongement de la rotation permet également d'augmenter la diversité des cultures sur l'exploitation et de mettre en place des successions de cultures complémentaires. Ce point est notamment relevé par Roger et Denis Béziat, en grandes cultures en Haute-Garonne (Osaé, Osez l'agroécologie, 2014). Pour ces agriculteurs, la place de chacune des cultures dans la rotation peut être un facteur de résilience. Ainsi, le sorgho, plante rustique vis à vis de la sécheresse, dotée d'un fort potentiel racinaire restructurant le sol, est implanté en tête de rotation. Selon Roger et Denis Béziat, en structurant et en assainissant le sol, le sorgho facilite l'implantation du pois protéagineux, dont le développement racinaire est plus faible, et favorise son accès à l'eau. De telles complémentarités entre les espèces peuvent également être intéressantes du point de vue de la lutte contre les ravageurs ou de la fertilisation azotée.

La diversification des cultures au sein de l'exploitation est donc une bonne manière de répartir le risque. Mais la diversification et l'exploitation de la complémentarité des espèces peuvent être poussées encore davantage grâce aux mélanges de cultures sur une même parcelle.

Autres intérêts de la diversification de l'assolement et de l'allongement des rotations :

- Régulations du stock de semence d'adventice et limitation de l'usage des produits phytosanitaires
- Limitation de l'utilisation d'intrants (fertilisants, etc.)
- Augmentation de la biodiversité et notamment de la microfaune du sol

Associer différentes espèces pour une plus grande résilience à la sécheresse

Les associations de cultures différentes au sein d'une même parcelle peuvent également être mises en place par certains agriculteurs dans un objectif de résilience face aux aléas climatiques. En effet, les cultures associées permettent de jouer sur plusieurs leviers. Comme la diversification de l'assolement, les mélanges de cultures permettent de répartir le risque sur plusieurs espèces, mais ont également un effet compensatoire : si une espèce ou une variété ne parvient pas à surmonter le stress hydrique, les autres pourront tout de même survivre, voire compenser les pertes par une meilleure exploitation des ressources

qui ne sont plus utilisées par la première. Les mélanges d'espèces ont également l'avantage de la complémentarité. En effet, deux espèces peuvent occuper des niches écologiques différentes : certaines associations peuvent ainsi permettre d'optimiser l'exploration racinaire du sol grâce à des systèmes racinaires différenciés (association de plantes à racines pivots et fasciculées) ou encore de limiter un stress hydrique trop important lié à un stade phénologique très demandeur en eau, grâce à une répartition différente dans le temps des besoins des espèces.

Des associations de céréales et de légumineuses ont notamment été expérimentées par des agriculteurs du CIVAM du pays Châtelleraudais à la suite d'années climatiques difficiles. Leur initiative a donné naissance au programme de recherche participative APACH : Associations de cultures en agro écologie dans le Châtelleraudais (CIVAM du Pays Châtelleraudais, 2018). Pendant 3 ans, des protocoles ont été mis en place afin d'infirmer ou de valider les hypothèses des chercheurs et les observations des agriculteurs. Cette étude a notamment montré, sur 6 types d'essais suivis, avec 68 modalités par an, sur 3 campagnes, que l'association de céréales avec un ou des protéagineux (pois ou féverole) avait majoritairement une meilleure performance que les cultures pures, sur la base du rendement et du Land Equivalent Ratio (indicateur qui compare le rendement de chaque culture en mélange à ceux de ces mêmes cultures cultivées seules). Cette performance varie selon les conditions climatiques annuelles de la parcelle. Il est intéressant de noter que si la monoculture peut être plus performante ponctuellement lorsque les conditions sont optimales, sur plusieurs années l'association est toujours plus performante, notamment en condition d'aléas climatiques tels que la sécheresse. En effet, lors d'années climatiques difficiles comme l'année 2016, les associations complexes céréales-protéagineux ont permis d'assurer un rendement supérieur et de sécuriser davantage le système de l'exploitant.

D'autre part, cette étude a mis en évidence d'autres avantages que peuvent représenter les cultures associées, notamment l'augmentation de la résistance du blé face aux maladies fongiques dans une association blé-protéagineux, ou la plus faible présence d'adventices.

Le tri lors de la récolte représente néanmoins un élément majeur et est souvent un frein au développement des cultures associées. En effet, le tri des graines peut être nécessaire pour commercialiser sa culture ou produire ses propres semences. Peu de collecteurs possèdent cependant l'équipement adéquat pour trier les cultures associées, ce qui oblige les agriculteurs à investir dans leur propre matériel. Celui-ci peut vite devenir onéreux, c'est pourquoi de nombreux agriculteurs se tournent vers les Coopératives d'utilisation de matériel agricoles (CUMA) (Osaé, Osez l'agroécologie, 2016).

Autres intérêts des mélanges d'espèces :

- Plus faible impact des organismes nuisible du fait de la dispersion de la plante hôte ciblée.
- Augmentation de la résistance du blé face aux maladies fongiques dans une association blé-protéagineux, et la plus faible présence d'adventices donc moindre usage de produits phytosanitaires.

- Limitation des adventices

(CIVAM du Pays Châtelleraudais, 2018)

Mise en culture de mélanges variétaux

Une autre stratégie qui utilise la diversité génétique comme facteur de résilience en conditions de sécheresse est le mélange de variétés sur une même parcelle. De la même manière que pour les variétés populations, la présence de génotypes différents et complémentaires (différence de précocité, tolérances différentes à la sécheresse, ...) permet d'augmenter les chances d'avoir des individus qui toléreront ou esquivront la sécheresse.

Bien que peu d'études traitent aujourd'hui de la question, la complémentarité des variétés permet d'augmenter la résilience des cultures. Le projet de recherche Wheatamix vise par exemple à qualifier les performances des mélanges de variétés modernes de blés face aux aléas, et notamment aux bioagresseurs (INRA Versailles Grignon, 2017). De 2014 à 2017, 70 chercheurs, conseillers agricoles et agriculteurs ont mis en place des essais variétaux sur des parcelles du bassin parisien. Ce projet, qui vise à évaluer les services écosystémiques de ces mélanges variétaux, a ainsi mis en évidence que les parcelles en mélange avaient un rendement légèrement supérieur (de 1 à 3%) à ceux obtenus en variétés pures, avec des différences plus marquées (1 à 6%) lorsque la pression des maladies est élevée. Le projet n'étudie pas à proprement parler l'intérêt des mélanges variétaux dans la résistance aux aléas climatiques, mais on peut supposer qu'il existerait des mécanismes similaires. En effet au cours du projet des expérimentations ont notamment été menées dans le Cher, régulièrement impacté par un stress hydrique précoce, et les chercheurs ont pu observer que des mélanges de variétés aux précocités différentes pouvaient réduire ce stress. Le décalage des phases sensibles entre des variétés de précocité différentes permettaient de limiter l'effet de ce type de stress hydrique.

De plus, si la plupart des agriculteurs du programme évoquent la réduction de la pression en maladies, certains insistent sur le gain de stabilité des rendements face aux aléas (Noël, 2016). C'est le cas d'Hugo Roger, exploitant à Cléré-du-Bois dans l'Indre, qui réalise des mélanges de blés depuis une dizaine d'années, et qui évoque avant tout une stabilité du rendement. Ses sols étant sensibles à la sécheresse et aux excès d'eau, selon lui les mélanges de différentes variétés de blés lui permettent d'éviter les maladies mais aussi de mieux résister aux accidents climatiques.

La résistance du mélange de variétés de blés aux aléas semble néanmoins très variable en fonction du choix des variétés et de l'architecture du couvert obtenu. Ainsi, des mélanges avec des variétés de même hauteur entretiendraient un microclimat humide intéressant pour résister aux conditions séchantes, mais aussi plus favorable au développement de maladies. L'association de variétés aux précocités différentes pourrait également permettre de répartir davantage le risque de stress hydrique.

Les travaux de l'INRA montrent qu'il faut un minimum de trois variétés pour qu'elles puissent s'adapter aux stress rencontrés.

Il est également important de noter que l'adoption des mélanges variétaux par les agriculteurs français est encore aujourd'hui relativement faible mais elle croit de manière exponentielle ces 6 dernières années et aujourd'hui la surface en mélange a dépassé 8% de la SAU ce qui est supérieur à la variété la plus cultivée en France⁴. D'après un rapport du centre d'études et prospective du ministère de l'agriculture (Labarthe, Coléno, Fugerey-Scarbel, Hannachi, & Lemarié, 2018), il existe encore certains freins à cette pratique. En effet, pour les mêmes raisons que les variétés populations, les mélanges ne sont à ce jour pas autorisés sur le marché des semences. De plus, l'utilisation des mélanges de variétés est encore compliqué avec les

⁴ Arnaud Gauffreteau, INRA. Comm. Pers.

débouchés en meunerie du fait de standards de qualité. Cependant, l'entreprise Soufflet commercialise depuis quelques années maintenant un mélange dédié à sa panification industrielle. Enfin, le manque de connaissance sur les avantages des mélanges de variétés, mais aussi sur les règles de conception des mélanges, limite leur diffusion auprès des agriculteurs.

Autres intérêts des mélanges variétaux :

- Limitation des pesticides dans les milieux et notamment dans les eaux en améliorant la résistance des cultures aux maladies
- Entretien la diversité génétique de l'espèce
- Meilleure résilience aux aléas en général

I.2. Augmenter la disponibilité en eau dans le sol

Le sol est un autre grand type de levier sur lequel jouer pour augmenter la résistance à la sécheresse, un sol de bonne qualité étant susceptible d'absorber, de stocker puis de restituer l'eau aux plantes. La quantité d'eau maximale que le sol peut absorber et restituer aux plantes correspond au réservoir utilisable⁵ (RU) du sol. La quantité d'eau que le sol contient et peut effectivement restituer aux plantes est le stock d'eau du sol (S) de capacité RU (Amigues, et al., 2006) .

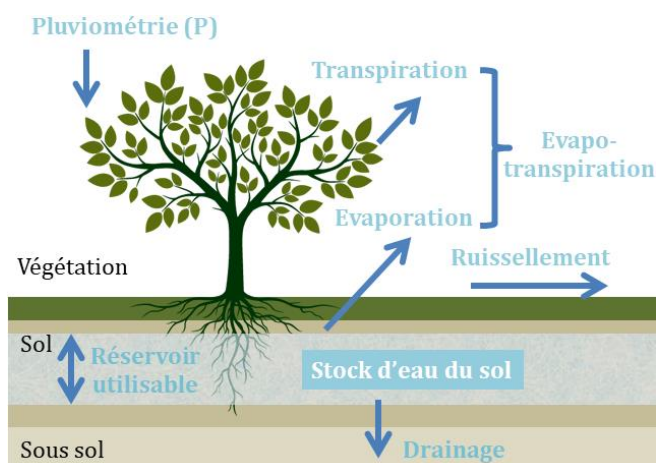


Figure 7 : Schéma du bilan hydrique du sol

Le stock d'eau du sol dépend de la pluviométrie (P) mais est limité par l'eau perdue par évapotranspiration (ETR), somme de la transpiration de la végétation et de l'évaporation du sol, par ruissellement (R) et par drainage (D). Sur un intervalle de temps donné le bilan hydrique permet de donner la variation du stock d'eau du sol :

$$\Delta S = P - (ETR + R + D)$$

Afin d'augmenter l'eau disponible en eau dans le sol pour les plantes, les principales stratégies consistent à :

- Optimiser l'infiltration de l'eau dans le sol pour éviter le ruissellement,
- Limiter l'évapotranspiration,
- Augmenter le réservoir utilisable en améliorant la capacité de rétention d'eau du sol pour limiter le drainage

⁵ Le réservoir utilisable du sol anciennement appelé réserve utile est la quantité d'eau maximale que le sol peut restituer aux plantes. C'est la différence entre :

- La capacité au champ : quantité d'eau maximale que le sol peut retenir et au de laquelle il y a drainage
- Le point de flétrissement : quantité d'eau au-dessous de laquelle la plante n'a plus accès à l'eau car l'eau est trop liée au sol (Peigne, 2014)

Les effets que peuvent avoir certaines pratiques sur ces mécanismes ont notamment été étudiés par le programme BAG'AGES (Bassin Adour-Garonne : quelles performances des pratiques AGroécologiquES ?) (cf. Annexe 2).

Le projet BAG'AGES est un programme de recherche coordonné par l'UMR AGIR de l'INRA de Toulouse. Lancé en 2016, il vise à évaluer les intérêts et les limites de pratiques agroécologiques telles que l'allongement des rotations, la réduction du travail du sol, et la couverture du sol par des cultures intermédiaires dans la gestion de la ressource en eau en grandes cultures. Bien que le projet n'en soit pas encore à son terme prévu pour 2020, Lionel Alletto, coordinateur du projet BAG'AGES a pu donner quelques résultats intermédiaires des expérimentations portant sur le fonctionnement hydrique du sol, qui sont développées ci-après (cf. Annexe 2).

- *1.2.1. Maintenir une couverture du sol afin de limiter son assèchement et d'augmenter le réservoir utilisable du sol*

Introduire des couverts végétaux

La couverture des sols permet tout d'abord de limiter l'érosion hydrique des sols et la formation de croute de battance⁶ qui tend à réduire l'infiltration de l'eau dans le sol. En outre, les couverts végétaux permettent un apport de matière organique lorsqu'ils se décomposent (s'ils sont laissés sur place) ainsi qu'une amélioration de la porosité du sol du fait de leur enracinement. Ces couverts peuvent notamment être des cultures intermédiaires, ou des cultures dérobées.

Dans le cadre du projet BAG'AGES, les chercheurs ont observé une augmentation sensible du réservoir utile des systèmes étudiés sur certains types de sol qu'ils ont attribué aux couverts végétaux. En effet, sur des sols limoneux, battants et hydromorphes (comme on peut en trouver en Normandie et en Picardie dans le bassin Seine-Normandie), une augmentation du réservoir utile de 5 à 10 % a été observé dans les horizons superficiels. Cette augmentation est attribuée à l'augmentation du taux de matière organique en lien avec la présence de couverts intermédiaires.

Cette augmentation de RU est également corrélée à une augmentation de la porosité du milieu, qui peut s'expliquer par le développement racinaire des couverts. Cependant, il faut noter que dans les sols très riches en matière organique ou dans les sols sableux, les méthodes et outils utilisés ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative entre les systèmes intégrant ces pratiques et les autres (cf. Annexe 2). On peut en effet supposer que l'augmentation du taux de matière organique est négligeable dans les sols déjà très riches, et qu'elle est insuffisante pour avoir un effet significatif dans les sols sableux à faible capacité de rétention. Enfin, l'étude a relevé que ces systèmes semblent favoriser l'activité biologique des sols ainsi que le développement de mycorhizes, qui favorisent l'absorption de l'eau par les plantes en augmentant le volume de sol exploré par les racines.

La présence de couverts végétaux pose le problème de leur destruction avant la culture suivante. En effet, en agriculture conventionnelle, ce type de couvert est souvent détruit par traitement chimique, ce qui nuit à la qualité de l'eau et des sols. Le désherbage mécanique est toujours possible mais doit se limiter à un travail superficiel pour ne pas trop dégrader le sol, comme nous le verrons dans la partie suivante. D'autres

⁶ L'érosion hydrique des sols est un phénomène naturel dû aux précipitations. Elle se traduit notamment par la formation d'une croute structurale appelée la battance qui réduit l'infiltration de l'eau et conduit à la formation de ruissellement. Toutefois, de nombreuses pratiques agricoles (tassement) peuvent contribuer à renforcer ce phénomène.

alternatives de destruction du couvert, telles que le pâturage par des élevages ovins, sont également testées par des agriculteurs, notamment au sein de l'association Agrof'ile.

Introduire des couverts secs

Par rapport aux couverts vivants, les couverts secs tels que le mulch, le paillage ou encore le bois raméal fragmenté présentent l'avantage de ne pas transpirer et de limiter encore davantage la perte d'eau du sol par évapotranspiration. Par ailleurs ils n'ont pas à être détruits. Néanmoins ce type de couvert est moins adapté en grandes cultures car il nécessite de recouvrir une trop grande surface, et sera davantage employé en viticulture ou maraichage.

Autres apports de matière organique

De façon plus générale, les apports de matière organique peuvent contribuer à améliorer le réservoir utile du sol en augmentant sa capacité de rétention d'eau. Ces amendements organiques peuvent se présenter sous la forme de compost, mais aussi de fumier et contribuent ainsi à valoriser cette ressource.

- *1.2.2. Limitation du travail du sol*

Sans labour, semis sous couverts

Les résultats du programme BAG'AGES montrent que les pratiques de conservation des sols (notamment l'absence de travail du sol), lorsqu'elles sont maîtrisées et mises en place depuis un certain temps, permettent une infiltration de l'eau supérieure ou équivalente à celle constatée dans les systèmes avec labour. De plus, cette infiltration est plus stable dans le temps et moins fluctuante dans les systèmes étudiés. Les chercheurs ont ainsi pu observer que si le labour augmente de façon significative la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols pendant une durée limitée, la capacité d'infiltration finit par baisser. En outre, en système labouré, le système racinaire des plantes se développe moins en profondeur. En effet, le labour peut créer une rupture dans les horizons du sol qui limite le développement des racines et donc le volume du sol prospecté. La limitation du travail du sol permet donc d'augmenter la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol et le volume de sol potentiellement prospecté par les racines. Par ailleurs les expérimentations longue durée menées par l'Irstea montrent des rendements similaires entre non labour et labour, avec des économies de carburants et une baisse de la production de CO₂ de l'ordre de 50%⁷.

Cependant, la grande faiblesse des systèmes sans labour demeure la dépendance aux herbicides. En effet, la limitation du travail du sol entraîne inéluctablement une augmentation du risque de développement des adventices. Bien que ce ne soit pas systématique, certains de ces systèmes utilisent davantage d'herbicides qu'en système conventionnel, ce qui peut constituer un vrai problème au regard de la qualité de l'eau⁸. De plus, si certains suggèrent que ces pratiques permettraient une meilleure dégradation des substances chimiques, d'après les résultats du projet BAG'AGES, cela semble pour l'instant négligeable.

Pour conclure, les pratiques de conservation des sols telles que la couverture du sol et la limitation du travail du sol sont intéressantes en termes de gestion quantitative de l'eau, par la stabilisation de la capacité d'infiltration de l'eau, l'augmentation du taux de matière organique dans le sol et le développement facilité

⁷ Patrice Garin, Irstea. Comm. Pers. et <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03650340.2013.863423>

⁸ <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-016-8123-x>

des mycorhizes et des racines en profondeur. Cependant, en ce qui concerne la question du non-labour la question de l'utilisation des herbicides reste un problème majeur du point de vue de la qualité de l'eau.

Travail du sol superficiel et/ou non systématique

Si l'arrêt total du travail s'avère complexe dans les systèmes en agriculture biologique ou à faible intrants, de nombreux agriculteurs recherchent des alternatives au labour classique afin de limiter la dégradation du sol et sa capacité à absorber et restituer l'eau aux cultures. Un travail du sol superficiel et non systématique peut notamment être mis en place. Ce type de pratiques a notamment été étudié depuis une dizaine d'années à l'ISARA-Lyon (Thomas, 2016). Des essais sont menés afin de comparer différentes techniques de travail du sol : le labour traditionnel (0-30 cm), le labour agronomique sans rasette (0-18 cm), le travail du sol superficiel avec un chisel (0-15 cm) et le travail très superficiel (0-7 cm) ou semis direct sous couvert roulé certaines années de la rotation. En termes de résultats, les rendements en labour agronomique sont proches voire supérieurs au labour traditionnel, en revanche les techniques sans retournement (travail du sol superficiel et très superficiel) ont des résultats inférieurs en tous les cas très variables, notamment en très superficiel, sauf dans certains cas (parcelle en blé en Isère), du fait de la concurrence avec les adventices.

Une technique qui semble prometteuse est le semis direct sous couvert. Cette technique consiste à semer directement dans le couvert qui va limiter la montaison des adventices. Cependant le semis sous couvert est techniquement très compliqué car il faut que la culture parvienne à prendre le pas sur le couvert (cf. Annexe 3). Par ailleurs il semble important de construire et évaluer des systèmes « hybrides » où la charrue peut être ressortie si besoin pour gérer l'herbe sans pour autant dégrader les sols (labour agronomique).

D'autres retours de terrain montrent par exemple des pratiques de « sans labour à durée déterminée » en Rhône-Alpes : 3, 5 voire 7 ans sans labour puis retour à la charrue avant une nouvelle période de non-labour. D'autres témoignent de 25 ans de « sans labour » avec un travail simplifié par grattage superficiel avec outils à dents souples (broyage des résidus de récolte si besoin). Dans le GAEC Ursule en agriculture biologique la charrue a été modifiée pour ne labourer qu'à 11-13 cm : cela permet de réduire l'impact du travail du sol tout en profitant d'un retournement complet (cf. Annexe 1).

Autres intérêts de la limitation du travail du sol :

- Limitation de l'érosion du sol
- Amélioration de la fertilité du sol
- Stockage du carbone

I.3.Limiter le stress hydrique des cultures par l'agroforesterie

- I.3.1. Agroforesterie intra-parcellaire

Ce sujet reste encore peu étudié. Une thèse en cours à l'INRA de Montpellier porte sur la question des mécanismes de résiliences des systèmes agroforestiers face au réchauffement climatique (cf. Annexe 4). Ce travail compare notamment l'impact du stress hydrique sur les rendements de cultures de céréales (blé dur, orge d'hiver, pois) en association avec des noyers, à des systèmes non agroforestiers. Les sécheresses sont reproduites expérimentalement grâce à des dispositifs d'exclusion de pluie. Cette recherche teste l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers permettraient de diminuer le stress hydrique des cultures intercalaires, et favoriseraient des rendements plus stables en situation de stress hydrique. Bien que

cette thèse ne soit pas achevée, Guillaume Blanchet a bien voulu nous faire part de ses résultats intermédiaires.

Ses expérimentations montrent une apparente absence de compétition sur l'eau entre la culture et les arbres, qui s'expliquerait par une bonne complémentarité entre les horizons explorés par les arbres et la culture, en situation de sol profond (le système racinaire des arbres puise l'eau directement dans la nappe alors que les cultures puisent l'eau dans les horizons de surfaces). Cela contredit donc l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers induiraient systématiquement une compétition forte pour la ressource en eau entre arbres et cultures. Néanmoins, Guillaume Blanchet insiste sur le fait que ces mécanismes sont très dépendants des conditions pédologiques locales, et que des résultats très différents auraient pu être observés sur des sols moins profonds.

D'autre part, il semble qu'on observe en système agroforestier une diminution de certains indicateurs de stress hydrique des cultures, tels que la durée de floraison ou la conductance stomatique. On observe ainsi des durées de floraison plus longues pour le pois lorsqu'il est à l'ombre des arbres. Cela se traduit par un nombre de fleurs plus élevé et donc potentiellement par un rendement plus élevé. Par ailleurs, la culture est soumise à une plus faible amplitude de température, et l'ouverture stomatique semble plus importante en agroforesterie. Cela traduit un stress hydrique plus faible (plus les besoins en eau de la plante sont importants, plus la plante doit conserver son eau par la fermeture de ses stomates, ce qui limite sa photosynthèse).

Les premiers résultats de cette thèse semblent donc confirmer une limitation du stress hydrique des cultures par l'agroforesterie, même si on ne dispose pas encore de tous les résultats, et que ces mécanismes sont très dépendants des conditions pédoclimatiques locales.

L'agroforesterie est également étudiée et mise en pratique dans le bassin Seine-Normandie au sein d'Agrofile, association qui œuvre pour l'intégration des arbres dans les systèmes de production agricoles franciliens. Grâce à des expérimentations sur le terrain, l'association fournira prochainement davantage de données sur la résilience des systèmes agroforestiers en situation de sécheresse. Selon Agnès Sourisseau, agricultrice et fondatrice d'Agrofile, les arbres, en créant de l'ombre, maintiennent un microclimat humide qui permet à la culture de mieux supporter la sécheresse. Il importe cependant de limiter la densité de la canopée pour limiter le retard de la végétation à proximité des arbres.

Il peut exister une compétition entre les arbres et la culture sur la ressource en eau, que certaines techniques permettent cependant de limiter en favorisant le développement des racines en profondeur, dont l'efficacité reste encore à étudier plus finement :

- La mise en place d'un couvert peut pousser l'arbre à développer ses racines en profondeur,
- La limitation du travail du sol permet d'éviter la semelle de labour qui empêche les racines de descendre en profondeur,
- La coupe des racines en surface pourrait aussi permettre un développement des racines en profondeur.

Enfin, des études évoquent la capacité de l'arbre à jouer le rôle d'une pompe à eau en profondeur. A l'inverse, les arbres peuvent aussi avoir un rôle de drainage en cas d'excès d'eau dans les sols (cf. Annexe 3).

- *1.3.2. Plantation ou maintien de haies en bordures de parcelles*

Les haies en bordures de parcelles contribuent à limiter le stress hydrique des cultures en jouant un rôle de coupe-vent, ce qui limite l'assèchement des sols et contribue à créer un microclimat humide sur la parcelle. Planter des bandes enherbées de part et d'autre des haies incite les arbres à développer leur système

racinaire en profondeur ce qui limite la compétition des arbres avec la culture en bordure de parcelle (cf. Annexe 3).

Autres intérêts de l'agroforesterie en système de grandes cultures :

- Limiter les produits phytosanitaires en hébergeant des auxiliaires des cultures
- Limiter l'érosion du sol
- Favoriser la biodiversité, notamment auxiliaires de culture
- Stocker du carbone
- Autre valorisation possible : arbre fruitier, bois de chauffage, ...
- Agrément paysager

Récapitulatif des stratégies améliorant la résilience des systèmes de grandes cultures

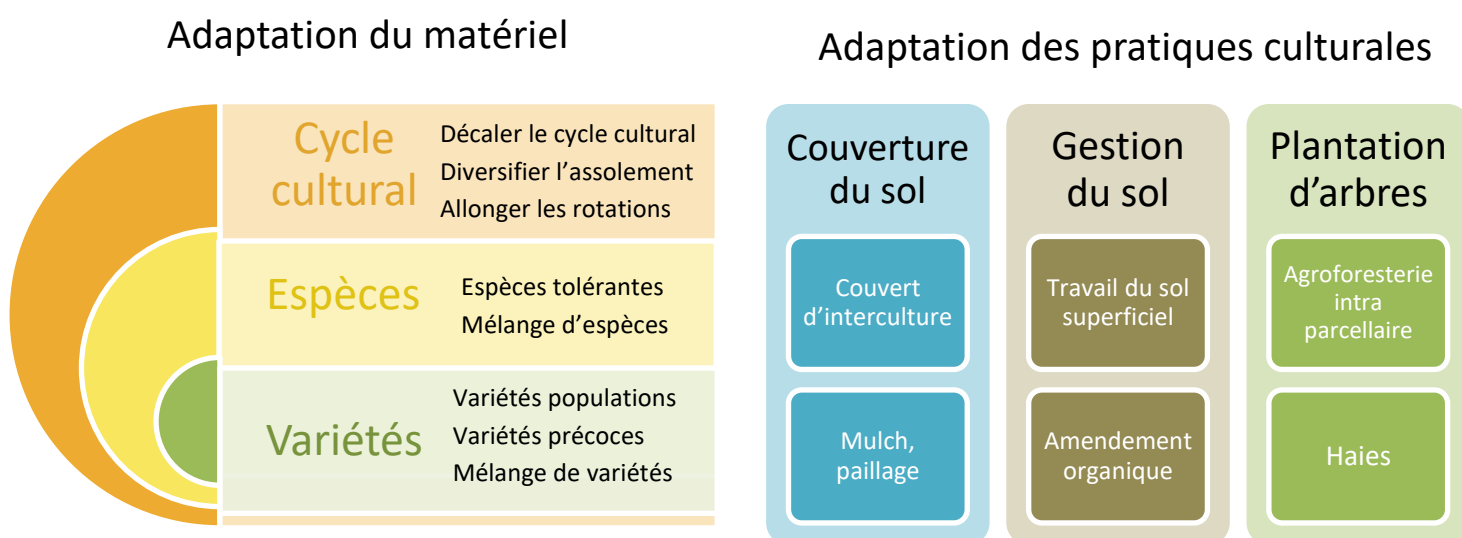


Figure 8 : Schéma synthétisant les stratégies permettant d'augmenter la résilience des systèmes de grandes cultures en condition de sécheresse

II. Quelles sont les stratégies d'amélioration de la résilience des systèmes d'élevage face aux épisodes de sécheresse ?

II.1. Améliorer la tolérance du troupeau et des cultures fourragères à la sécheresse

- *II.1.1. Adapter le troupeau pour ajuster ses besoins au risque de sécheresse*

Limiter les besoins du troupeau

De manière générale, la limitation des besoins du troupeau est le premier levier sur lequel peut jouer l'agriculteur pour être plus résilient face aux aléas climatiques. Pour cela, une première stratégie peut être de limiter le nombre d'animaux ou d'augmenter la surface pâturable. En effet, d'après le rapport de l'INRA sur la sécheresse (Amigues, et al., 2006), ce sont en réalité les systèmes les plus extensifs que ce soit au niveau des prairies ou des animaux, qui sont les plus résistants en conditions de sécheresse, et cela notamment pour les systèmes herbagers.

D'autres stratégies qui visent à réduire les besoins du troupeau sont évoquées dans le guide technique 2017 rédigé par le CIVAM (Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et Milieu rural) de Mayenne sur l'adaptation des exploitations laitières mayennaises aux aléas climatiques. Ce guide évoque notamment des stratégies à court terme telles que la diminution du troupeau par l'anticipation des réformes⁹ ou encore la pratique d'une seule traite estivale au lieu de deux.

Cependant, dans un contexte où les sécheresses sont de plus en plus fréquentes et dépassent le phénomène ponctuel, nous nous intéresserons en priorité aux stratégies de moyen ou long terme qui anticipent les phénomènes de sécheresse et constituent des adaptations structurelles du système.

Choisir les races résistantes à la sécheresse

Parmi les stratégies à long terme évoquées pour limiter les besoins du troupeau, on retrouve dans le guide technique 2017 du CIVAM de Mayenne le choix de la race. Selon ce guide, le choix de races rustiques peut permettre de gagner en résilience. En effet, les races d'élevage les plus répandues ont été sélectionnées, à l'image des variétés céréalieres, sur des critères de productivité et d'homogénéité. L'uniformisation de ces races tend à diminuer leur capacité d'adaptation à des environnements plus variables. Au contraire, les races rustiques se caractérisent par une capacité d'adaptation à des environnements plus contraignants. En ce qui concerne l'élevage bovin, la rusticité se traduit notamment par des besoins plus faibles en fourrage, une bonne valorisation des fourrages grossiers de faible qualité ou tout simplement une capacité d'adaptation à une ressource alimentaire aléatoire. Les races rustiques sont souvent moins productives mais peuvent permettre de réduire les coûts en intrants, soins et temps.

Pour illustrer son propos, le CIVAM de Mayenne prend notamment l'exemple de la Bretonne Pie Noire, une race bovine reconnue pour sa rusticité. En effet, cette race valorise bien les fourrages grossiers pour laquelle elle a une forte appétence, et sa petite taille lui permet de consommer une quantité relativement faible de fourrage (de 10 et 12kg de matière sèche par jour). D'autre part, cette race peut aussi bien produire du lait que de la viande, ce qui confère une certaine souplesse au système. Son lait est notamment reconnu pour sa richesse, et sa viande pour son goût persillé. Bien sûr, de nombreuses autres races existent et doivent être choisies en fonction de leur adéquation avec l'environnement local.

⁹ Réformer un animal consiste à l'engraisser puis à l'abattre pour produire de la viande lorsqu'on considère qu'il n'est plus apte à produire du lait ou des petits.

Cette stratégie est notamment mise en pratique dans le GAEC Ursule en Vendée (cf. Annexe 1). Les 110 vaches laitières du GAEC ne sont pas de la race Prim'Holstein, bien que celle-ci constitue plus de 60% du cheptel national de vaches laitières, mais de race Jersiaise. Selon Jacques Morineau, associé du GAEC Ursule, la race Jersiaise a besoin de moins d'énergie pour transformer le fourrage en lait que la Prim'Holstein. Moins massive, elle a des besoins alimentaires plus faibles ce qui permet au GAEC d'économiser 20% de fourrage pour la même quantité de matière utile produite. En effet, bien que la quantité de lait produite soit plus faible, le lait produit est beaucoup plus riche ce qui augmente le taux de matière utile et permet une meilleure résilience lorsque les fourrages viennent à manquer.

Adapter les périodes de mises bas pour limiter la demande sur les périodes à risque

En ce qui concerne les élevages bovins allaitants, on peut également limiter les besoins du troupeau dans les périodes à risques en répartissant les vêlages au cours de l'année. Cette stratégie est proposée dans le rapport AFClm (Vert, Schaller, & Villien, 2013). Afin d'adapter les systèmes bovins allaitants de la Creuse au changement climatique, et plus précisément à la baisse de rendement des prairies lié au déficit hydrique estival, l'équipe du projet AFClm propose de mettre en place deux périodes de vêlage. Une période de vêlage à la fin de l'automne pourrait permettre de valoriser l'herbe plus tôt dans la saison en hiver, et une seconde période à la fin de l'hiver pour valoriser l'herbe jusque tard dans la saison. Cela permettrait au système de gagner en souplesse et de le rendre plus résilient en conditions de sécheresse, en évitant notamment la complémentation des veaux lorsque leur besoin est trop important par rapport aux ressources alimentaires.

Pour l'élevage ovin, l'avancée des dates de mise bas est également envisagée par l'institut technique de l'élevage du Limousin afin d'éviter que les périodes où les besoins des jeunes agneaux sont importants ne coïncident avec les périodes de sécheresse estivales et le risque de déficits fourragers induit.

- II.1.2. Valoriser la diversité génétique et spécifique pour améliorer la résistance des prairies ou des cultures fourragères à la sécheresse

Privilégier les espèces prairiales plus tolérantes à la sécheresse (luzerne, lotier, dactyle, chicorée)

Certaines espèces comme la luzerne, le dactyle ou le lotier sont naturellement tolérantes à la sécheresse. Ceci s'explique par une phase de développement dans les périodes les plus humides et des besoins plus faibles en période sèche. De plus, leur système racinaire profond et diffus leur permet d'augmenter le volume de sol exploré lorsque celui-ci est adapté.

C'est un des leviers mobilisés par le GAEC Ursule qui cherche depuis longtemps à adapter son système de polyculture élevage aux aléas climatiques (cf. Annexe 1). D'après l'agriculteur, la mise en place d'une association luzerne-dactyle a permis de prolonger la période de production de fourrage de deux mois par rapport à l'association ray-grass anglais-trèfle blanc, du fait d'une moindre dégradation quand la sécheresse se prolonge et d'une repousse plus rapide lorsque les pluies reviennent à l'automne. En 2006, cette association a produit deux fois plus que l'association ray-grass-trèfle, dans le GAEC Ursule.

Cultiver des mélanges d'espèces en cultures fourragères

De même qu'en grandes cultures, la mise en culture d'un mélange d'espèces plutôt que d'une espèce fourragère pure permet de gagner en résilience, en augmentant les chances de résistance aux maladies et aux conditions climatiques difficiles. Quels que soient les aléas et le moment où ils surviennent, il y aura toujours une espèce qui parviendra à survivre dans le mélange.

C'est notamment le cas du méteil, mélange de céréales (triticale, blé, avoine, orge), de protéagineux (pois, féverole) et de légumineuse (vesce). La culture du méteil est notamment mise en avant dans le guide technique 2017 du CIVAM de Mayenne comme une source de fourrage aux rendements réguliers et élevés notamment en condition séchante. Outre une plus grande résistance à la sécheresse, l'utilisation d'un mélange permet de fournir un fourrage équilibré grâce à la complémentarité des espèces qui offrent à la fois un bon rendement (céréales) et une bonne valeur azotée (légumineuse). De plus, il est facilement adaptable puisqu'il peut être récolté en grain ou en ensilage. D'après ce guide, les mélanges complexes associant au moins deux céréales et deux protéagineux produiront plus à la récolte et subiront moins la verse que des cultures moins riches en espèces.

De la même façon que pour les mélanges en grandes cultures, les principaux freins résident dans la vente en grains aux coopératives qui ne sont pas habituées à acheter des mélanges. D'autre part, malgré sa richesse en protéines, certains agriculteurs lui préfèrent encore le maïs plus riche énergétiquement.

La culture du méteil a été testée et adoptée par Bruno et Christine Gobbe, éleveurs de vaches laitières en Mayenne (CIVAM Agriculture Durable de la Mayenne, 2017). Avant les sécheresses de 2010 et 2011, ces éleveurs cultivaient des céréales en monoculture comme le blé ou le triticale, mais suite à ces périodes de stress hydrique, ils ont décidé d'intégrer ce type de mélange à leur assolement notamment triticale - avoine ou avoine - trèfle - vesce. Selon eux, ce choix permet d'être plus autonome en fourrage, et d'apporter de la fibre à la ration avec des valeurs alimentaires plus que correctes.

Autres intérêts :

- Pas ou peu de fertilisation azotée grâce aux légumineuses
- Bonne compétitivité vis-à-vis des adventices grâce à une couverture rapide du sol
- Meilleure résistance aux maladies grâce aux mélanges d'espèces

Semer ou sursemer des prairies multi-espèces

Cette diversité spécifique peut aussi être mise en place au sein des prairies. L'intérêt de la diversité spécifique et génétique au sein des prairies semées a été étudié par des chercheurs de l'INRA de Lusignan dans le cadre du projet Climagie (Litrico, et al., 2015). Cette recherche a consisté à comparer :

- Des micropeuplements prairiaux en monoculture ou en mélange de cinq espèces différentes (dactyle, fétuque, ray-grass, trèfle blanc et luzerne) ;
- Des micropeuplements présentant un, cinq et dix génotypes différents par espèce.

Cette étude conclut qu'en conditions hydriques stressantes, la moyenne de la biomasse cumulée des prairies monospécifiques est plus faible que celle des prairies plurispécifiques. La diversité génétique tend à améliorer non pas la moyenne de la production cumulée, mais la stabilité de cette production au cours de l'année, quel que soit le régime hydrique. Ainsi, les résultats montrent que la diversité génétique et spécifique des prairies semées pourrait avoir un effet bénéfique sur l'optimisation de la production de fourrage en conditions de sécheresse.

Ces pratiques ont également été expérimentées par Marie-Agnès Decaux et Joël Guernot, éleveurs en agriculture biologique en Mayenne avec un troupeau de 40 vaches laitières (Fédération régionale des Civam Pays de Loire , 2012). A la suite de plusieurs années sèches et d'une baisse de rendement sur des prairies de type ray-grass anglais et trèfle blanc, ces agriculteurs décident d'implanter des prairies multi-espèces dans leur système. Dès leur premier essai, la prairie multi-espèces donne de très bons rendements. Au fil des années, la parcelle la moins bonne en prairie multi-espèces donne un rendement de 9 TMS/ha, alors que leurs meilleures parcelles en ray grass anglais et trèfle blanc n'excédaient pas 6-7 TMS/ha les meilleures années. Si la production de lait leur paraît un peu plus faible en prairies multi-espèces lors des périodes favorables à la pousse, cette dernière leur fournit une production fourragère plus importante sur l'année et améliore finalement l'autonomie de leur ferme.

Outre une meilleure résistance aux aléas climatiques, l'introduction de mélanges d'espèces (graminées et légumineuses) permet à ces agriculteurs de limiter les trous dans les prairies, d'étaler la période de pâturage et de mieux s'adapter aux aléas en général.

Autres intérêts :

- Meilleure couverture du sol
- Meilleure résistance aux maladies

II.2. Augmenter l'autonomie fourragère

Adapter les besoins du troupeau et privilégier des fourrages résistants à la sécheresse peut ne pas suffire par rapport au risque sécheresse. En effet, en élevage, un objectif de rendement plus faible ne supprime pas la nécessité de subvenir aux besoins du troupeau si le fourrage vient à manquer. Les agriculteurs sont alors obligés d'acheter du fourrage, particulièrement cher en période de sécheresse. Développer l'autonomie fourragère en sécurisant la ressource avec des stocks mais aussi en diversifiant au maximum les sources de fourrages potentielles permet d'éviter le recours à l'achat de fourrages extérieurs. Les stratégies de sécurisation de la ressource fourragère et d'économies en eau (et en énergie fossile) sont notamment étudiées par Novak et al ? (2018).

- *II.2.1. Sécuriser la ressource fourragère avec des stocks*

La première stratégie pour augmenter l'autonomie fourragère des systèmes d'élevage est la mise en place de stocks. Foin, ensilage ou stocks sur pieds, différentes techniques existent pour conserver des ressources fourragères. Néanmoins les stocks coûtent cher et il peut être intéressant de rechercher de nouvelles sources de fourrage notamment en automne ou en hiver, quand la pousse de l'herbe est encore trop faible. En effet de nouvelles sources de pâturage sont possibles et permettent de conserver ces stocks en hiver pour les utiliser en été, notamment en périodes de sécheresse.

- *II.2.2. Diversifier les sources de fourrage*

Pâturage des couverts intermédiaires et des repousses

Afin de disposer d'autres sources de fourrage, les couverts intermédiaires plantés entre deux cultures de ventes peuvent représenter une ressource intéressante pour le pâturage. L'intérêt du pâturage des couverts par les élevages ovins est notamment étudié par l'association Agrofile dans le cadre du projet POSCIF – Pâturage ovin en système céréalier en Ile de France (Agrofile, 2017). Dans les cultures céréalières, on retrouve bien souvent des cultures intermédiaires pièges à nitrates qui répondent à une exigence

réglementaire. Des couverts peuvent également être plantés afin d'assurer un meilleur fonctionnement du sol (limitation de l'érosion, structuration, enrichissement, ...).

Les couverts végétaux intermédiaires représentent donc une ressource de biomasse importante en automne et hiver, auxquels s'ajoutent les repousses de cultures et adventices, que les troupeaux ovins parviennent très bien à valoriser par pâturage, permettant ainsi de réserver les stocks de fourrage pour les périodes plus défavorables. Cela peut donc contribuer à augmenter la résilience des systèmes d'élevage face aux aléas et notamment aux sécheresses.

Selon Bertrand Pâtenotre, polyculteur-éleveur dans l'Aube, ces pratiques présentent de nombreux atouts agronomiques (Agrof'île, 2017). Outre qu'elles permettent une réduction du coût alimentaire de ses 110 brebis grâce aux faibles coûts des couverts d'interculture, les brebis permettent de désherber les repousses de céréales sans herbicide ni travail du sol, et de détruire le couvert sans désherbage mécanique. De plus, les ovins contribuent à la fertilisation du sol en l'enrichissant en azote et en matière organique. Enfin, selon Bertrand Patenôte, le piétinement des ovins permet de diminuer les problèmes liés aux limaces et aux campagnols. Le pâturage des couverts est également possible en élevage bovin.

Autres intérêts :

- Permettre une couverture permanente du sol
- Remplacer le désherbage mécanique et limiter l'utilisation d'herbicide

Pâturage de cultures au stade végétatif

Dans le bassin Seine-Normandie, les cultures au stade végétatif peuvent également représenter une source de pâturage en hiver. Dans le cadre du projet POSCIF, l'association Agrof'île étudie les modes de coopération entre des éleveurs ovins et des céréaliers (Agrof'île, 2017). Les céréales ou le colza, qui dominent les assolements franciliens, possèdent une capacité de compensation physiologique qui leur permet d'être pâturés en hiver sans que cela ne compromette le rendement final.

En effet, une part des feuilles produites en hiver ne contribue pas au rendement de la plante, notamment celles qui tombent en hiver. 75% des nutriments ingérés grâce au pâturage sont restitués au sol. D'autre part, le broutage des parties aériennes des plantes au stade opportun stimule le développement du système racinaire des cultures, et le piétinement favorise le tallage. Ainsi, les plants pâturés redémarrent rapidement au printemps, et sont plus compétitifs envers les adventices. Enfin, le pâturage des feuilles par les ovins contribuerait à éliminer la charge infectieuse des feuilles et réduirait le risque de certaines maladies pour les cultures. Le pâturage des céréales ou du colza serait donc une coopération « gagnants-gagnants » pour les éleveurs et les céréaliers.

De la même manière que pour les couverts, le pâturage des cultures au stade végétatif peut permettre d'éviter le recours au stock de fourrages en hiver et contribue donc à augmenter la résilience des systèmes d'élevage face aux aléas et notamment aux sécheresses. Cette pratique peut facilement être mise en place au sein de systèmes en polyculture-élevage, mais ceux-ci sont rares. Agrof'île tente donc de favoriser la coopération entre bergers et céréaliers.

Si ce type de pratiques est encore peu développé, c'est notamment du fait de la crainte d'un surpâturage des brebis qui pourraient entraîner une perte de rendement. Cela nécessite notamment une surveillance quotidienne des brebis qu'il ne faut laisser que sur un temps court (24h maximum). Il faut également que le

sol ait une bonne portance pour accueillir le chargement de brebis, ce qui fait que ce type de pâturage est moins adapté à des animaux plus imposants (bovins).

Cette collaboration a notamment été expérimentée en 2017 par Thibault Desforges, céréalier en Seine-et-Marne et Alexandre Faucher, berger itinérant en Ile-de-France, tous les deux très satisfaits de l'expérience (Agrof'île, 2017). Voyant ses colzas très développés, Thibault Desforges a saisi l'opportunité de faire pâturer le colza et les résultats ont été concluants, avec les meilleurs rendements jamais obtenus sur la ferme sur cette parcelle. En 2018 les bergers d'Agrof'île comme Alexandre Faucher ont également été très satisfaits de leur expérience car les périodes de sécheresse estivales et automnales avaient réduit considérablement les biomasses disponibles, et conduit à une augmentation du coût du foin.

Autres intérêts :

- Permettre le tallage et donc une limitation des adventices
- Remplacer le désherbage mécanique
- Fertiliser
- Augmenter la matière organique des sols et donc le réservoir utile

Planter des cultures à double fin

Pour les systèmes en polyculture élevage, les cultures à double fin sont destinées soit à la vente soit au fourrage, selon les années, ce qui apporte de la souplesse au système. En année de sécheresse, le recours au fourrage extérieur est évité en basculant ses cultures de ventes vers la production de fourrage.

Selon Jacques Morineau, polyculteur éleveur dans le GAEC Ursule en Vendée, le fait de disposer de telles cultures permet d'augmenter considérablement la résilience du système à la sécheresse (cf. Annexe 1). Ainsi lorsque les conditions sont difficiles, il utilise le maïs grain destiné à la vente comme fourrage d'appoint pour ses vaches laitières. Mais de façon plus générale, le GAEC bascule les cultures qui ont moins bien fonctionné dans l'alimentation du troupeau, ce qui lui permet un gain important d'autonomie.

II.3. Limiter les impacts de la sécheresse sur les prairies et les troupeaux par l'agroforesterie

- II.3.1. Créer un microclimat humide grâce aux arbres

Agroforesterie dans les prairies

L'intérêt que peuvent représenter les systèmes d'élevage (notamment ovin) associant prairies et arbres a été étudié dans le projet PARASOL commandité par l'ADEME (Béral, et al., 2018). Cette étude montre que les arbres implantés dans les prairies tamponnent les extrêmes climatiques en limitant la hausse des températures aux périodes les plus chaudes des journées estivales et en augmentant l'humidité relative. En périodes caniculaires, la différence de température entre parcelles témoins et parcelles agroforestières peut ainsi atteindre 3 à 6°C à la période la plus chaude de la journée.

D'autre part, ces modifications microclimatiques permettraient une baisse du stress thermique des animaux au pâturage, et donc une amélioration de leur bien-être. Les animaux ont en effet montré un comportement de recherche active de l'ombrage pour leur activité de rumination ou leur repos.

Cependant, il est important de noter que les prairies en système agroforestier peuvent présenter un retard phénologique à proximité des arbres, d'autant plus important que la densité des arbres est élevée. Il peut ainsi y avoir une certaine baisse de productivité à proximité des arbres. Toutefois les parcelles en agroforesterie semblent permettre le développement de plantes de meilleure valeur alimentaire. La compétition lumineuse des arbres peut être limitée par la taille des arbres dont les branches peuvent ensuite être valorisées en fourrage par exemple.

Cette étude montre également que les feuilles d'arbres offrent des valeurs alimentaires à minima équivalentes aux meilleures espèces prairiales et peuvent donc représenter une ressource fourragère particulièrement intéressante lors des périodes sèches où le fourrage vient à manquer. L'équipe de recherche a recueilli des retours d'expériences auprès de 32 agriculteurs en agroforesterie répartis sur l'ensemble du territoire français, dont 16 possédaient des systèmes mêlant arboriculture (le plus souvent des pommiers) et élevage ovin. Quatre des exploitations enquêtées se situent sur le bassin Seine-Normandie. Certains éleveurs (20/31) observent un meilleur maintien de l'herbe en été, attribué aux arbres lors des épisodes de sécheresse importants. Certains observent aussi une plus grande pousse de l'herbe sous les arbres en période de chaleur ou sécheresse, ainsi que le fait que la prairie sèche moins que les prairies sans arbres. Par ailleurs, les ovins passent beaucoup de temps sous les arbres, ce qui permet aux éleveurs de laisser les moutons dehors en saison chaude, ou en saison venteuse ou pluvieuse. En effet 27 agriculteurs sur 32 ont rapporté que les animaux semblaient tirer parti des arbres comme protection vis-à-vis du soleil.

De plus, la plupart des agriculteurs ont dit percevoir les effets du changement climatique sous la forme, pour la moitié d'entre eux, d'une accentuation des sécheresses. Pour pallier les périodes de manque de fourrage, certains agriculteurs (3 sur 32) utilisent la stratégie de l'arbre fourrager. Dans ces retours d'expérience, l'agroforesterie était utilisée au sens large : les intérêts cités par les agriculteurs peuvent donc aussi bien s'appliquer à l'agroforesterie intra-parcellaire qu'aux haies.

Préserver ou implanter des haies en bordure de parcelle pour fournir des zones d'ombres

Pour Véronique et Philippe Guitton, éleveurs de bovins en Loire Atlantique, les haies sont un véritable atout pour lutter contre la sécheresse (Fédération régionale des Civam Pays de Loire , 2012). Leur premier intérêt est de fournir de l'ombre aux animaux afin que les bêtes souffrent moins des chaleurs estivales. Grâce à cet effet parasol, ils pâturent davantage ce qui se traduit par une augmentation des rendements laitiers et de la production de viande.

De plus, d'après eux les haies jouent un rôle de coupe-vent et créent un microclimat, limitant l'assèchement des sols et l'évapotranspiration des plantes. En couvrant le sol, les haies limitent également le ruissellement des eaux en surface et favorisent l'infiltration. Selon ces agriculteurs, l'herbe est toujours plus verte le long de la haie et leur prairie se démarque des autres en résistant particulièrement bien en conditions séchantes. Des cultures peuvent également être plantées dans les parcelles entourées de haies, comme du maïs. Si le rendement semble diminué en bordure des haies, selon le couple, cette perte est compensée par la production sur l'ensemble de la parcelle. Selon ces agriculteurs, la haie limite le dessèchement du maïs et les récoltes sont toujours bonnes.

Enfin, pour ces agriculteurs, la haie possède de nombreux autres intérêts environnementaux puisqu'elle permet de créer des corridors écologiques qui favorisent la présence des auxiliaires de culture (oiseaux, insectes, mammifères, ...), de limiter l'érosion des sols et d'améliorer la qualité de l'eau par sa fonction épurative.

Autres intérêts de l'agroforesterie dans les prairies :

- Favoriser la biodiversité, notamment auxiliaires de culture
- Stocker du carbone
- Autre valorisation possible : arbre fruitier, bois de chauffage, ...
- Agrément paysager
- Améliorer le confort des animaux
- Limiter les maladies des animaux

- *II.3.2. Fournir un pâturage complémentaire*

L'intérêt fourrager que représentent les feuilles d'arbres dans l'alimentation des animaux a également été étudié par le projet PARASOL (Béral, et al., 2018). Cette étude a notamment mis en évidence que les feuilles de frêne et de murier sont des ressources fourragères, d'excellente valeur alimentaire, comparable aux meilleures espèces prairiales traditionnelles (prairies, ray-grass) et bien supérieures à celle des fourrages récoltés comme le foin. De plus, les quantités de feuilles ingérées par les brebis sont supérieures de 45% par rapport au foin et leur conduite en têtard¹⁰ produit éventuellement plus de biomasse. Emile et al. (2017) confirment que plusieurs espèces présentent un excellent profil fourrager pour leur valeur protéique et énergétique : le mûrier blanc et le frêne, mais aussi le tilleul, l'aulne de Corse et un certain nombre de lianes et d'arbustes.

Cette pratique, bien que peu utilisée, a déjà été expérimentée sur le terrain pour des élevages bovins. Adrien et Jean-Paul Messean, agriculteurs dans l'Aisne, utilisent la technique de l'arbre fourrager dans leur système bovin allaitant en agriculture biologique (Messean & Messean, 2017). En effet, c'est en 2006, lors de l'abattage de rejets de frênes et d'aulnes qu'ils observent pour la première fois que les vaches ont une forte appétence pour les feuilles de branchage à terre, ce qui se traduit même par l'arrivée rapide du troupeau au bruit de démarrage de la tronçonneuse.

Figure 9 : Vache pâturant le feuillage d'ormes et d'érables (Messean & Messean, 2017)



Devant la récurrence d'étés secs, provoquant l'arrêt de la pousse de l'herbe, voire le dessèchement du couvert herbacé, l'idée leur est venue de compléter le pâturage par un affouragement issu d'arbres ligneux. Après quelques essais, ils constatent que le saule blanc et le frêne sont de bons candidats.

La sécheresse de 2017 coïncidant avec la nécessité de tailler des jeunes saules, ils profitent de l'occasion pour fournir les rameaux à leur élevage qui les consomme entièrement. Ils expérimentent l'affouragement en pâture, en frais à l'étable mais aussi sec à l'étable lors de la période hivernale. L'appétence des bêtes leur semble bonne pour ces différents types d'affouragement, notamment pour celui d'hiver, ce qui pousse les agriculteurs à vouloir réitérer l'expérience. Cette méthode d'affouragement peut donc servir de complément au pâturage lors des années sèches. La récolte des branchages reste cependant très chronophage et nécessite un matériel adapté, qui peut être partagé dans le cadre de CUMA.

¹⁰ Le têtard est un système de taille qui consiste à étêter régulièrement l'arbre pour limiter la croissance de l'arbre en hauteur et favoriser les repousses. Cela peut ainsi permettre d'augmenter la biomasse de l'arbre.

Récapitulatif des stratégies améliorant la résilience des systèmes d'élevage

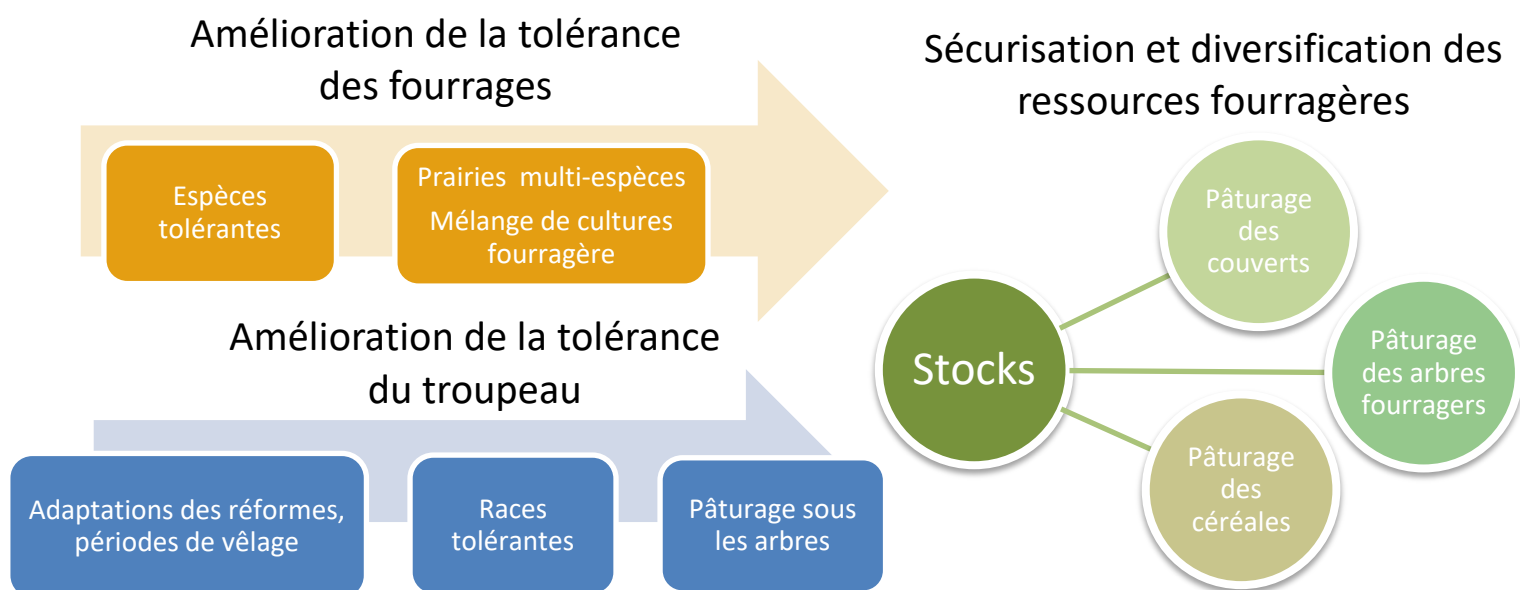


Figure 10 : Schéma synthétisant les stratégies permettant d'augmenter la résilience des systèmes d'élevage en condition de sécheresse

III. Quels sont les leviers d'amélioration de la résilience des systèmes viticoles en conditions de sécheresse ?

Les cultures permanentes représentent le troisième grand type d'orientation technico-économique des exploitations du bassin Seine-Normandie. Les vignes ne couvrent pas plus 2% de la SAU totale du bassin en 2016, mais représentent une forte valeur ajoutée. Le vignoble de Champagne, situé entre l'Aube et la Marne, ou encore le vignoble de l'Auxerrois sont célèbres pour leurs AOP et AOC. Bien que la vigne soit une culture réputée tolérante à la sécheresse, comme pour toutes les autres cultures, une augmentation de la contrainte hydrique de la vigne peut considérablement réduire le rendement. Toutefois, l'augmentation de la contrainte hydrique est généralement bénéfique pour la qualité des raisins en les rendant moins acides et plus riches en composés aromatiques. Cependant en cas de stress hydrique trop sévère, le potentiel qualitatif du raisin peut être pénalisé (Van Leeuwen & Darriet, 2018).

La question de l'adaptation au phénomène de sécheresse a notamment été étudiée dans le cadre du programme LACCAVE (Long term Adaptation to Climate Change in Viticulture and Enology). Ce projet mené de 2012 à 2016, a notamment permis de mieux caractériser les impacts à long terme du changement climatique et de construire de nouvelles stratégies d'adaptation pour la viticulture et l'œnologie. De nombreuses références seront donc issues de ce programme.

III. 1. Modifier les pratiques culturales pour ajuster l'eau disponible aux besoins de la vigne

- III.1.1. Adapter les systèmes de taille.

La taille en gobelet

La taille en gobelet, technique développée il y a plusieurs siècles dans le bassin méditerranéen, consiste à former trois ou quatre bras à partir du pied central afin de répartir et aérer les grappes. Les grappes ainsi disposées forment un parasol aéré qui protège les baies du soleil.

Selon un article issu du programme LACCAVE (Van Leeuwen & Darriet, 2018), ce système de taille serait très résistant à la sécheresse, tout en présentant d'excellentes performances qualitatives, comme le montrent les vins de Châteauneuf du Pape en France et du Priorat en Espagne. La résistance à la sécheresse des gobelets peut être expliquée par une surface foliaire par hectare relativement faible, qui limite les pertes d'eau par transpiration. Comme le rendement est également assez faible, le rapport feuille-fruit n'est pas dégradé. De plus, ce système de conduite nécessite peu de travail pour l'agriculteur, dans la mesure où il n'y a pas de système de palissage à installer ou à entretenir. Ainsi, même si les rendements sont relativement faibles, le coût de production par kg de raisin produit n'est pas trop élevé.

Malheureusement, ce système est en train d'être abandonné car difficile à vendanger avec des machines, favorisées par les aides européennes, alors qu'il pourrait rendre un grand service alors même que la fréquence et l'intensité de la sécheresse augmentent. Selon Van Leeuwen & Darriet, le développement d'une machine capable de vendanger des vignes en gobelet devrait être une priorité des instituts techniques dans le cadre du changement climatique.

La taille en gobelet est utilisée par Christophe Bousquet, viticulteur à Narbonne dans l'Aude. Avec ses 8 ha de vignes, il produit du vin AOC La Clape en agriculture biologique (Osaé, Osez l'agroécologie, 2017). Très sensibilisé au changement climatique, Christophe Bousquet a voulu mettre en place des pratiques plus résilientes. Il observe notamment une raréfaction voire une absence de pluie entre avril et octobre, alors qu'il y avait souvent un ou deux orages de 20 mm auparavant. En 2016 -2017, il a pu observer seulement 9 jours de pluie au-dessus de 10 mm (au-dessous de 10 mm les pluies sont considérées comme non-efficaces). En 2015-2016, le total des pluies n'a été que de 250 mm, ce qui classerait ce territoire en climat semi-aride. Afin de limiter le stress hydrique, les nouvelles vignes sont positionnées au mieux pour profiter de l'ombrage de la montagne ou des haies, et avec une orientation des rangs nord-sud pour plus d'ombre. Ce viticulteur pratique également la taille traditionnelle en gobelet, qu'il considère plus adaptée aux conditions climatiques locales sèches : elle respecte la forme du végétal en poussant vers le haut, offre un ombrage et une ombre portée qui limite l'évapotranspiration. Par ailleurs, la taille en gobelet offre moins de prise au vent, ce qui limite l'assèchement.

Limiter la biomasse aérienne pour limiter l'évapotranspiration

D'autres systèmes de taille peuvent également être mis en place afin de limiter les pertes d'eau, notamment les systèmes permettant une réduction de la biomasse aérienne, afin de limiter les pertes d'eau par évapotranspiration. Selon l'article sus-cité, la vigne résiste d'autant mieux à la sécheresse que la charge en fruits est faible. Si cela génère une baisse de rendement, celui-ci permet une meilleure aération des grappes et conduit à une meilleure qualité du vin qui peut être valorisable et compenser la baisse de rendement dans le cas de vins à haute valeur ajoutée (Van Leeuwen & Darriet, 2018).

L'effeuillage dans le but de limiter la biomasse aérienne doit cependant être limité car il faut conserver des feuilles en quantité suffisamment importante pour protéger les baies du soleil. En effet, une exposition à de trop fortes températures peut avoir un effet délétère sur le vin.

Palissage haut créant des zones d'ombre

L'aménagement de zones d'ombre par un palissage haut est également une stratégie citée dans le rapport AFClm (Vert, Schaller, & Villien, 2013) afin de limiter le stress hydrique des plantes, en limitant l'échauffement du sol et des plantes, ainsi qu'une trop forte évaporation.

- III.1.2. Adapter la gestion du sol

Enherbement de l'inter-rang ou enherbement sous le rang

L'enherbement de l'inter-rang ou du rang est une pratique qui consiste à maintenir un couvert végétal, naturel ou semé, entre ou sous les rangs d'une vigne. Cette pratique se développe de plus en plus en agriculture biologique, comme alternative au désherbage chimique et au travail du sol. D'après l'Institut français de la vigne et du vin (Institut Français de la Vigne et du Vin Occitanie, 2012), l'enherbement de la vigne est une source de matière organique pour les sols, ce qui permet d'augmenter sa capacité de rétention d'eau. D'autre part, elle fournit au sol une couverture qui favorise l'infiltration. Le système racinaire du couvert herbacé permet également d'augmenter la stabilité structurale du sol, sa porosité et sa perméabilité.

Cependant l'enjeu de la compétition entre la vigne et l'herbe pour la ressource en eau est important. D'après des chercheurs de l'INRA de Montpellier (Gary & Celette, 2009), la concurrence pour l'eau est dans les premiers temps du cycle de la vigne compensée par une meilleure infiltration de l'eau dans le sol et une

bonne recharge du réservoir utile du sol pendant l'hiver. Néanmoins, selon cet article, à partir de la floraison, la transpiration du couvert herbacé laisserait finalement une quantité d'eau disponible pour la vigne inférieure à celle d'une vigne désherbée. Le stress hydrique de la vigne augmenterait de façon plus rapide dans une vigne enherbée que désherbée entre la floraison et la véraison¹¹, c'est-à-dire dans les périodes où le risque de sécheresse est le plus élevé. La redistribution du système racinaire de la vigne peut éviter en partie ce phénomène de concurrence de l'enherbement pour la ressource en eau. Dans un sol profond, la plasticité du système racinaire de la vigne lui permet une croissance en profondeur. La vigne et le couvert enherbé n'explorent plus les mêmes horizons du sol ce qui limite fortement la compétition. Néanmoins, ce décalage vertical dépend à la fois du système racinaire des espèces du couvert, de la profondeur du sol et de l'apport d'eau à la plantation. Dans un sol superficiel, la limitation de l'eau disponible pour le système racinaire de la vigne ne pourra être compensée en profondeur. Selon cet article, une meilleure résilience en conditions de sécheresse pourrait donc être atteinte grâce à un enherbement semi-permanent. L'enherbement pourrait ainsi améliorer les propriétés du sol pendant la première partie du cycle de la vigne lorsque la compétition pour la ressource hydrique est faible. Cette compétition pourrait ensuite disparaître en été par la limitation du couvert.

Des expérimentations de viticulteurs semblent néanmoins montrer que l'enherbement de la vigne peut donner de bons résultats même dans des conditions de stress hydrique fort. C'est le cas de Christophe Bousquet, viticulteur et éleveur dans l'Aude en condition particulièrement sèche, qui pratique depuis 2008 l'enherbement total et naturel du vignoble durant l'hiver. Comme décrit précédemment, ce vignoble AOC se caractérise par des précipitations annuelles faibles autour de 500 mm par an et des vents asséchants qui entraînent un important stress hydrique. Selon Christophe Bousquet, l'herbe permet de limiter le ruissellement et facilite l'infiltration de l'eau lors des orages. De plus, les apports de matière organique dans le sol permettent aussi d'accroître dans une certaine limite la rétention de l'eau lors des pluies d'automne et concourent à l'équilibre biologique de la vigne en activant la vie biologique du sol. Pour ce viticulteur, l'herbe ne concurrence pas la vigne dans la mesure où elle pousse quand la vigne est en repos végétatif, et où elle ne pousse plus pendant la période estivale.

Afin de contrôler cet enherbement, Christophe Bousquet le valorise grâce au pâturage de brebis pendant l'hiver, qui quittent le vignoble avant le redémarrage de la vigne en mars. Tout en contrôlant mieux qu'avec un outil mécanique les plantes entre les plants (inule visqueuse, laurier tin, genêt ou garance), les brebis apportent de la matière organique. Ce système d'enherbement et de pâturage permet également de limiter le travail du sol, qui peut nuire à son aération et à son réservoir utilisable.

Mulch ou paillages

D'autres types de couverts peuvent également limiter l'assèchement du sol sans poser de problème de compétition hydrique. C'est notamment le cas de couverts secs tel que le mulch ou le paillage qui permettent de limiter les pertes d'eau par ruissellement ou évaporation du sol et d'augmenter la capacité de rétention de l'eau par le sol.

L'intérêt que peut représenter le paillage a notamment été étudié dans le cadre du projet SolAB de 2009 à 2011 (Goma-Fortin, Gontier, Gaviglio, Chovelon, & Malet, 2012). Ce projet mené par l'ITAB (Institut technique de l'Agriculture Biologique) avait pour objectif d'étudier l'effet sur la fertilité du sol de différents modes de gestion du sol en agriculture biologique. Grâce à des expérimentations menées sur trois sites

¹¹ La véraison est un stade phénologique de la vigne qui correspond au changement de couleur des grains de raisin qui passent du vert au rouge vif pour les raisins noirs et au jaune translucide pour les raisins blancs.

viticoles en Occitanie et Provence Alpes Côte d'Azur, l'équipe du projet SolAB a pu mettre en évidence des propriétés intéressantes du paillage. Les résultats de cette étude montrent notamment que par leur effet mulch et couvrant, les paillages ont tendance à conserver plus longtemps une humidité du sol en limitant l'évaporation. De plus, la dégradation rapide des paillages augmente en tendance les taux de matière organique du sol, ce qui peut permettre d'accroître sa capacité de rétention d'eau. D'autre part, la couverture du sol, en limitant l'impact des rayons solaires, a permis de baisser de 2°C la température sous les mulchs apportés dans l'essai paillage. Cet effet tampon du paillage permet de limiter les coups de chaleur et le stress de la plante en situation de sécheresse. Enfin, le paillage permet d'arrêter le travail du sol, ce qui induit une augmentation de la population de vers de terre, et par conséquent de la porosité du sol et de son réservoir utilisable.

Bois Raméal Fragmenté

La technique du Bois raméal fragmenté (BRF) consiste en l'apport d'un broyat de jeunes branches d'arbres issues de feuillus même si des branches de résineux peuvent parfois être intégrées au mélange. Ce broyage est enfoui ou appliqué au sol comme paillage et permet de se rapprocher du statut biologique d'un sol forestier. Cette technique permet de nombreux avantages, notamment en condition de stress hydrique.

Selon une étude de l'IRD (Barthès, Manlay, & Porte, 2010), l'apport de BRF améliore les propriétés physiques et hydriques du sol, en augmentant la capacité d'infiltration de l'eau, l'humidité, la porosité et la stabilité du sol. Le BRF permet par ailleurs de tamponner les excès de température lorsqu'il est épandu en mulch, et permet comme les paillages de limiter le ruissellement et l'érosion du sol. Néanmoins, l'intérêt supérieur du BRF par rapport à un paillage herbacé classique reste encore incertain.

Autres intérêts de la couverture du sol :

- Limiter la pression des adventices
- Limiter l'érosion du sol
- Réguler d'autres aléas tels que le gel particulièrement délétère avec le changement climatique

Apport de matière organique

De la même façon que pour les grandes cultures, les apports de matière organique peuvent contribuer à améliorer le réservoir utile du sol en augmentant sa capacité de rétention d'eau. Ces amendements organiques peuvent se présenter sous la forme de compost, mais aussi de fumier et contribuent ainsi à valoriser cette ressource.

III. 2. Adapter la plantation des vignes

- *III.2.1. Réorganiser les plantations dans l'espace*

Réfléchir l'espacement et l'orientation des rangs

Le rapport AFCLim (Vert, Schaller, & Villien, 2013) préconise la réorganisation des plantations dans un objectif d'évitement du stress hydrique dans l'étude de cas des vignes du Beaujolais. En effet, l'espacement des plants de vigne peut offrir aux racines un volume de sol plus important à explorer, et donc une réserve en eau plus importante. Par ailleurs, des rangs orientés nord-sud subiront moins le rayonnement du soleil ce qui peut permettre de limiter, dans une certaine mesure, l'évapotranspiration de la vigne.

Relocaliser les vignobles dans des zones moins à risques

Plus généralement, la relocalisation des vignes est une alternative largement évoquée dans le projet LACCAVE, à l'échelle locale, mais aussi régionale (Ollat & Touzard, 2014). En effet, de grandes variations dans les conditions climatiques existent au sein d'une même région viticole, du fait de la géomorphologie, de l'occupation des sols, ou même de la proximité de plans d'eau. Les viticulteurs peuvent ainsi tenter de relocaliser leurs vignes dans les parcelles plus fraîches, plus abritées et dont les sols ont un réservoir utile plus important. Ces considérations guident déjà les choix des viticulteurs de la vallée de la Loire et du pourtour méditerranéen, qui déplacent par exemple leur vigne en altitude, parfois seulement de quelques dizaines de mètres sur un coteau. Cela peut également consister à déplacer ses vignes sur les coteaux exposés au nord.

- *III.2.2. S'appuyer sur la diversité génétique pour augmenter la résistance des vignes*

Choix de portes greffes plus adaptés à la sécheresse

Il existe une très large variabilité de la résistance à la sécheresse des porte-greffes. Parmi ceux homologués en France, le 110 Richter et le 140 Ruggeri sont les plus résistants. Le premier présente l'avantage d'être très bon en qualité. Il existe certainement des porte-greffes encore plus résistants parmi ceux qui sont utilisés dans d'autres pays. Ils sont actuellement testés dans le dispositif GrefAdapt à l'Institut des Sciences de la vigne et du vin de Bordeaux. La recherche doit se donner comme objectif d'en créer d'autres par des croisements, suivis de sélections précoces orientées par la connaissance des gènes impliqués dans la résistance à la sécheresse. Ce travail de longue haleine a été initié récemment. D'autre part, les porte-greffes doivent être davantage adaptés aux conditions du sol grâce à une meilleure connaissance des propriétés du sol et du sous-sol, là où existe une cartographie des terroirs viticoles. En effet plus de la moitié des porte-greffes en place en France n'est pas adaptée au type de sol (Barbeau, Neethling, Ollat, Quénot, & Touzard, 2015).

Tester de nouveaux cépages

Le changement de cépages consiste à introduire progressivement dans une région viticole des cépages étrangers ou provenant d'une autre région viticole, qui possèdent une sensibilité moins importante à la sécheresse. Cette stratégie est cependant fortement dépendante des aspects réglementaires liés aux signes de qualité des produits d'appellation d'origine. En 2018, le Comité national des IGP relatives aux vins et aux cidres a validé la possibilité d'introduire de nouveaux cépages dans les cahiers des charges afin de répondre aux préoccupations actuelles en matière de résistance et d'adaptation au changement climatique. En avril 2019, les premiers dossiers ont été approuvés pour 6 IGP (Gard, Pont du Gard, Cévennes, Pays d'Oc, Var, Alpes Maritimes).

Concernant les cépages cultivés en France, des différences de résistance à la sécheresse entre les cépages ont déjà pu être identifiées. La plupart des cépages blancs, mais aussi le Merlot et la Syrah sont sensibles à la sécheresse ; le Cabernet-Sauvignon, le Grenache et le Carignan sont en revanche résistants (Institut Français de la Vigne et du Vin, 2014) et devraient être privilégiés dans les zones à risques.

Concernant les cépages étrangers, l'INRA et l'Institut Français de la vigne et du vin (IFV) travaillent depuis 2005 sur un programme de recherche de sélections variétales en collaboration avec une pépinière grecque (Sepeau Ivaldi, 2016). En effet, la sélection de variétés résistantes à la sécheresse se révèle assez complexe

car les caractéristiques d'adaptation au changement climatique sont multifactorielles, et l'introduction de variétés grecques pourrait représenter une opportunité pour les vignerons notamment dans le sud de la France, avec des variétés plus adaptées au stress hydrique et aux températures élevées. Environ cinquante variétés grecques ont ainsi été introduites en France pour y être étudiées et cinq, particulièrement résistantes au stress hydrique et aux fortes températures, ont déjà été inscrites au catalogue officiel français.

- *III.2.3. Introduire des arbres pour créer un microclimat*

Comme pour les grandes cultures, la plantation d'arbres va modifier le microclimat de la vigne ce qui peut présenter un intérêt dans un contexte de sécheresse. Introduire des arbres au sein de rangs de vignes ou en bordure peut modifier le microclimat du fait de la combinaison de 3 mécanismes : l'ombrage et les réflexions lumineuses, la modification de la circulation de l'air, la modification locale du cycle de l'eau. Il en résulte des impacts potentiels sur le rendement mais aussi sur la qualité vinicole des raisins (Grimaldi, 2018).

Cependant, on manque encore de connaissances fines sur l'impact climatique d'arbres en viticulture, et aucune référence n'existe à ce jour dans le contexte climatique Normand. En contexte Méditerranéen et gersois, les quelques observations disponibles (Grimaldi, 2018 et IFV, 2019) mentionnent un impact des arbres sur les températures estivales qui n'est pas équivoque : l'ombrage d'arbres intraparcels isolés permet de tempérer des températures extrêmes et de garantir une maturation plus progressive des raisins. En revanche, des haies au feuillage très dense et contigu peuvent amplifier le risque d'échaudage en augmentant la réflexion lumineuse sur son côté sud et en faisant barrage à la circulation de l'air.

La hauteur des arbres, la densité de leur feuillage et l'agencement paysager de l'ensemble de la végétation moduleront fortement l'impact micro-climatique des arbres. Planter des allées d'arbres isolés, taillés en haut jet, et largement espacés des rangs de vignes favorise la circulation de l'air au sein d'un vignoble. Dans ce contexte, il a été observé lors des journées les plus chaudes de l'été un effet rafraîchissant sensible sur les rangs de vignes immédiatement voisins des arbres et un impact sensible sur la maturation des raisins (Grimaldi 2018).

La synthèse proposée par l'IFV (IFV, 2019) fait l'hypothèse d'une amélioration de l'efficacité hydrique de la vigne qui n'a cependant pas encore été clairement démontrée : les arbres pourraient valoriser les ressources hydriques disponibles dans des horizons de sol distincts de ceux explorés par la vigne et libérer dans l'air d'importantes quantités de vapeur par évapotranspiration. L'augmentation de l'humidité relative de l'air qui en résulte pourrait s'ajouter à l'ombrage des arbres et ensemble contribuer à diminuer la demande évapotranspiratoire, effet qui est recherché pour que la vigne supporte mieux les événements extrêmes tels que les épisodes de canicule et de sécheresse. Trambouze et al (2013 et 2017) ont observé en contexte Méditerranéen que les vignes conduites en agroforesterie maintiendraient une évapotranspiration prolongée par rapport aux vignes de plein soleil.

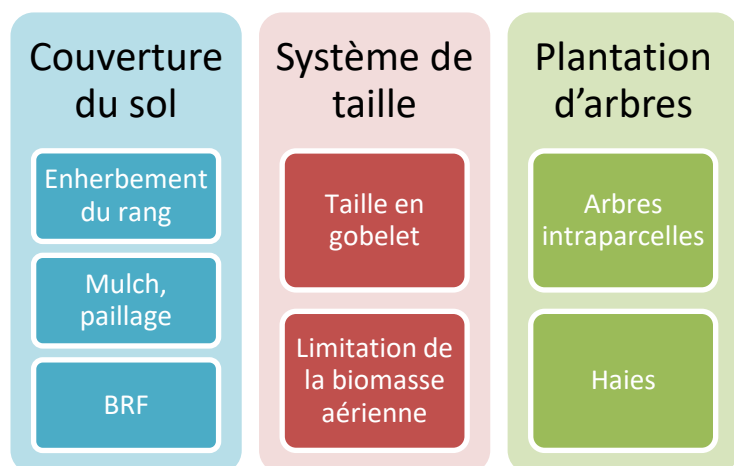
Il est toutefois important de prendre en compte le risque de compétition entre les arbres et la vigne. Celui-ci concerne principalement les ressources en eau et azote.

Autres intérêts de l'agroforesterie dans les vignes :

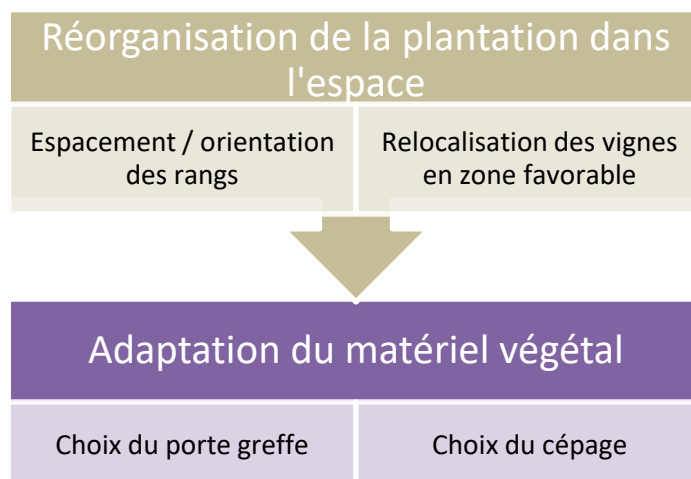
- Favoriser la biodiversité, notamment auxiliaires de culture
- Protéger la vigne contre les agresseurs
- Protéger la vigne contre les aléas climatiques tels que les gelées et le vent
- Attire paysager
- Image du produit auprès du consommateur
- Autre valorisation possible : arbre fruitier, bois de chauffage, ...

Récapitulatif des stratégies améliorant la résilience des systèmes viticoles

Adaptation des pratiques culturales



Adaptation de la plantation



Au-delà des pratiques présentées jusque-là, qui impliquent parfois des changements structurels sur l'exploitation, certains systèmes semblent particulièrement résilients face à la sécheresse, précisément du fait que leur mise en œuvre implique plusieurs des pratiques déjà évoquées, de manière coordonnée.

Figure 11 : Stratégie permettant d'améliorer la résilience des systèmes viticoles en conditions de sécheresse

IV. Des systèmes agroécologiques plus résilients face aux aléas climatiques

IV.1. L'agriculture biologique, en moyenne plus économe en eau et résistante aux sécheresses

Si le cahier des charges de l'agriculture biologique n'impose que la non-utilisation d'intrants de synthèse, sa mise en œuvre implique dans les faits un certain nombre de pratiques, et la mise en place d'éléments paysagers intéressants vis-à-vis de la sécheresse, dont la plupart ont été évoqués précédemment.

Un système plus économe en eau et plus résistant au stress hydrique

La Fédération Nationale d'Agriculture Biologique a comparé un échantillon de 151 exploitations en agriculture biologique à 281 exploitations en agriculture conventionnelle. Cette étude montre que 33 % de la SAU des exploitations en agriculture conventionnelle est irriguée contre seulement 8 % pour les exploitations en agriculture biologique (Sautereau N., Benoit M., 2016). Un rapport de l'INRA (Guyomard, 2013) explique cette différence principalement par des objectifs de rendement inférieurs et une proportion moins importante de maïs grain très exigeant en eau dans la SAU en agriculture biologique. Mais cette plus faible consommation d'eau pourrait également s'expliquer par une résilience plus importante des cultures biologiques en conditions de sécheresse mise en évidence dans certains travaux. En effet, au cours de périodes de fort déficit hydrique aux Etats-Unis, les cultures de maïs et de tomate de plein champ en agriculture biologique ont obtenu des rendements plus élevés, et plus réguliers que les cultures en agriculture conventionnelle (Sautereau N., Benoit M., 2016).

Des sols plus riches en matière organique avec une plus forte capacité de rétention d'eau

Un rapport de l'INRA (Guyomard, 2013) indique que la plupart des articles issus de la littérature internationale et analysés dans le cadre de cette étude concluent à des teneurs en matière organique plus importantes dans les sols cultivés en agriculture biologique que dans ceux en agriculture conventionnelle. Les auteurs expliquent ces résultats par une introduction plus fréquente de légumineuses dans les successions culturales, ainsi que par des apports plus importants de fertilisants organiques sur les parcelles en agriculture biologique. L'augmentation du taux de matière organique des sols observée en agriculture biologique contribue à améliorer la capacité de rétention en eau des sols (Sautereau N., Benoit M., 2016).

Une couverture du sol qui limite le risque d'érosion du sol et de ruissellement qui en découlent

Par ailleurs, en moyenne, les systèmes de grandes cultures biologiques présentent davantage de couvertures des sols que les systèmes de grande culture en agriculture conventionnelle auxquels ils ont été comparés dans le bassin parisien ; comme évoqué précédemment, cela permet une augmentation de la capacité de rétention d'eau des sols et une limitation du ruissellement. Il semblerait également que cela permette une stimulation des populations mycorhiziennes dans le sol (Sautereau N., Benoit M., 2016).

Une importante diversité des cultures

Les pratiques d'agriculture biologique ont recours à des rotations plus longues et plus diversifiées, avec davantage de prairies en moyenne. Par ailleurs, la diversité des ressources utilisées (en lien avec la diversité génétique) et la complexité des systèmes permettraient une meilleure adaptation aux évolutions du climat (Sautereau N., Benoit M., 2016).

Autres intérêts de l'Agriculture Biologique :

- Limiter l'érosion de la biodiversité liée à l'utilisation des phytosanitaires
- Préserver la qualité de l'eau (nitrates et pesticides)

IV.2. Les systèmes d'élevage laitier économes et autonomes du Réseau Agriculture Durable, des systèmes plus résilients sur le plan économique

Des systèmes plus résilients sur le plan économique quel que soit l'aléas

Les agriculteurs du CIVAM Basse-Normandie travaillent sur des systèmes d'élevage laitier autonomes économes basés sur l'herbe. Afin d'avoir une idée de la résilience de ces systèmes, c'est-à-dire la capacité d'assurer un revenu aux agriculteurs même en conditions d'aléas climatiques, le CIVAM a réalisé sur plusieurs années une comparaison du revenu disponible entre une vingtaine de fermes du CIVAM Basse-Normandie et des fermes du RICA¹² de Basse-Normandie (Fédération Régionale des CIVAM de Basse Normandie, 2013).

Cette comparaison met en évidence que, quel que soit l'aléa, les fermes en système herbager autonome et économe du CIVAM de Basse-Normandie ont un meilleur revenu que la moyenne des élevages de Basse-Normandie, et cela même lors des années 2010 et 2011, marquées par des sécheresses et par conséquent par une difficulté de la pousse de l'herbe. La différence de revenu entre les systèmes du CIVAM et du RICA semble même s'accroître en 2011, alors que la sécheresse a été particulièrement rude. Les systèmes autonomes et économes semblent donc assurer des revenus plus élevés et plus stables.

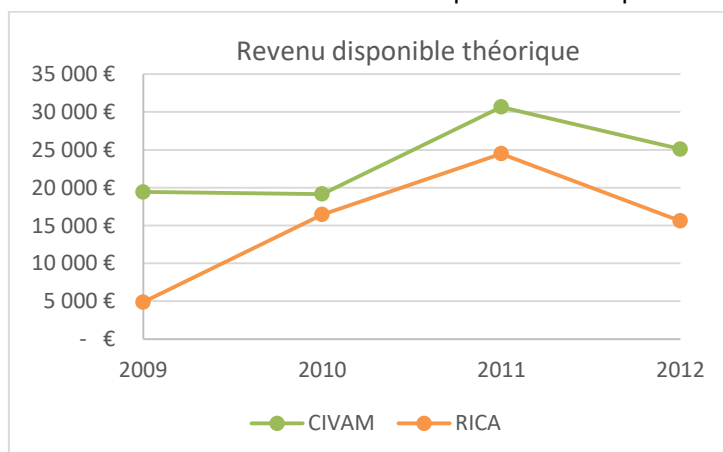


Figure 12 : Evolution comparée du revenu disponible des exploitations de Basse-Normandie en élevage bovin du CIVAM et du RICA, pour les années de 2009 à 2012

¹² Le Réseau d'Information Comptable Agricole du Ministère de l'agriculture qui alimente les statistiques nationales en agriculture.

Des systèmes avec une très bonne autonomie alimentaire

Ces résultats sont détaillés dans l'observatoire technico économique bovin-lait du Réseau Agriculture Durable (RAD), qui regroupe les fermes du CIVAM de Basse-Normandie mais également des fermes de Bretagne et des Pays de la Loire (Réseau de l'agriculture durable, 2015). Parmi les facteurs explicatifs de cette résilience, les fermes du RAD ont une surface alimentaire plus élevée comparée aux fermes du RICA, ce qui leur permet un gain important d'autonomie en cas d'aléas climatiques. Contrairement aux fermes du RICA qui utilisent, via l'achat d'aliments, des surfaces à l'extérieur de l'exploitation pour nourrir leurs animaux, les fermes du RAD ont une autonomie surfacique très élevée, autour de 93% en 2014.

Des revenus élevés malgré une plus faible productivité que les fermes du RICA.

On peut également noter que ces systèmes se caractérisent par une surface fourragère très importante notamment en termes de prairies d'association graminées-légumineuses, et sont moins basées sur le maïs que les fermes du RICA. En 2014 par exemple, les prairies représentent près de 80% de l'assolement des fermes du RAD contre 49% dans les fermes du RICA. Or les surfaces fourragères sont beaucoup moins coûteuses en intrants que les cultures. En 2014, les systèmes herbagers permettent en moyenne de diminuer de 91% le coût en phytosanitaires par hectare (Réseau de l'agriculture durable, 2015). Ainsi, bien que globalement ces fermes aient un produit plus faible, l'autonomie de ces systèmes ainsi que la faible utilisation d'intrants leur permet d'avoir de faibles charges, notamment en ce qui concerne l'alimentation du troupeau. La plus faible productivité de ces fermes autonomes et économes est donc compensée par leur faible utilisation d'intrants, ce qui se traduit par une valeur ajoutée plus élevée, une meilleure efficacité économique, et en définitive un revenu plus élevé (Réseau de l'agriculture durable, 2015).

Des systèmes avec des infrastructures agroécologiques qui augmentent la résilience

Enfin, on peut souligner que les fermes du réseau du RAD se caractérisent par une présence fréquente de haies dont nous avons déjà évoqué les intérêts, ainsi que par des prairies de longue durée et une diversité floristique qui limite les sols nus en hiver (Réseau de l'agriculture durable, 2015), et favorise donc le rechargement de la réserve utile en hiver.

Autres intérêts des systèmes autonomes et économes :

- Limiter les intrants (produits phytosanitaire, engrais)
- Augmenter la biodiversité dans les prairies

IV.3. Les systèmes de polyculture-élevage favorisant les couplages entre animaux/végétaux permettent de mieux résister aux aléas

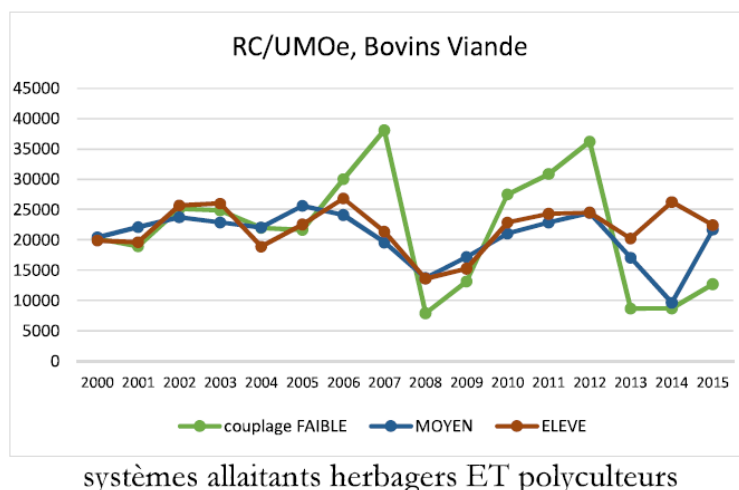
De manière plus générale, il semble que les systèmes favorisant les couplages entre animaux et végétaux soient plus résilients face aux aléas. C'est ce que montrent Novak et Emile (2014) en envisageant la mise en cohérence d'une nouvelle combinaison d'éléments et en recherchant des synergies entre cultures et élevage. Dans le cadre du projet CASDAR RED SPyCE, qui ambitionne de mieux caractériser les couplages entre animaux et végétaux au sein des systèmes de polyculture élevage, une étude a été menée sur les performances économiques des systèmes bovins (Institut de l'élevage, 2017). Cette étude a notamment recueilli des données sur 115 fermes en bovins lait et bovins viande sur 15 ans.

Parmi ces fermes, le couplage entre animaux et végétaux a été étudié selon 3 critères :

- L'utilisation de la surface pour l'alimentation des animaux
- L'autonomie alimentaire et en paille
- L'autonomie en fertilisation des cultures/prairies

Cette étude sur une période longue montre que les fermes qui présentent le plus grand nombre de couplages entre ateliers végétaux et animaux sont les plus résilientes, car plus efficaces et plus autonomes sur le long terme. En effet, le résultat courant par Unité de main d'œuvre est équivalent, mais moins variable avec un coefficient de variation de 18 % pour les systèmes couplés au lieu de 43%.

Figure 13 : Evolution du résultat courant par unité de main d'œuvre entre 2000 et 2015 pour des exploitations à couplage faible, moyen et élevé



D'autre part, le revenu courant par unité de main d'œuvre est beaucoup moins souvent négatif sur 16 ans : à peine 2% en couplage élevé contre 8 %. On peut donc en conclure que le couplage de l'élevage et des cultures semble augmenter la résilience face aux aléas par rapport à des systèmes plus exclusifs (l'élevage seul, la culture seule, sans interaction). Néanmoins, il s'agit d'une résilience globale et non uniquement par rapport à l'aléa sécheresse.

En effet, on peut noter que les systèmes présentant des couplages forts ont de meilleurs résultats lors des sécheresses de 2003 et 2005. En revanche, ce n'est pas forcément visible en 2011 où le revenu semble augmenter quel que soit le type de couplage alors que l'année a été particulièrement sèche. La fluctuation des prix aura donc certainement joué un plus grand rôle que la sécheresse cette année-là. Cela met en évidence que même s'il est important de prendre conscience de l'augmentation du risque d'aléas climatiques à venir, il ne faut pas négliger la part des autres aléas.

Dans un objectif d'adaptation à l'augmentation de la fréquence des sécheresses, il pourra donc être intéressant de réfléchir à la résilience aux aléas de manière plus globale.

V. Quelles sont les voies d'économies d'eau dans les systèmes irrigués ?

Bien que l'objectif principal de ce rapport soit de proposer des systèmes et des pratiques qui puissent améliorer la résilience à la sécheresse en absence d'irrigation, il paraît important de mettre en avant des leviers d'économie d'eau pour les systèmes ayant déjà mis en place l'irrigation ou pour les systèmes où toutes les stratégies exposées précédemment ne suffisent plus et où une irrigation s'impose en complément, afin de limiter celle-ci du fait des tensions prévisibles sur la ressource.

Il paraît pertinent de citer le cas du GAEC Ursule, exploitation de polyculture-élevage en agriculture biologique située en Vendée, déjà mentionné plusieurs fois pour les stratégies mises en place pour augmenter la résilience de l'exploitation en condition de sécheresse (cf. Annexe 1

Afin de s'adapter aux aléas climatiques, cette exploitation a mis en place de multiples stratégies qui portent leurs fruits :

- Augmenter la part de sorgho par rapport au maïs
- Sélectionner des variétés de maïs population adaptées à ses conditions pédoclimatiques locales
- Cultiver des mélanges d'espèces et de variétés
- Limiter le travail du sol en superficie et planter des couverts végétaux
- Planter des haies et des prairies agroforestières
- Diversifier les sources de fourrages via le pâturage des couverts végétaux et les cultures qui ont moins bien fonctionné
- Elever des races rustiques résistantes au déficit fourrager

Bien que ces stratégies aient pendant longtemps permis au GAEC d'assurer une certaine résilience sans irrigation, Jacques Morineau considère que le stress hydrique touche aujourd'hui son exploitation une année sur deux. C'est pourquoi il a décidé de mettre en place une irrigation ponctuelle afin de sécuriser certaines cultures lors de stades critiques, mais aussi pour conserver une diversité dans son assolement. Parmi les 30 cultures cultivées dans le GAEC, 50% sont des cultures de printemps plus ou moins sensibles à la sécheresse, dont certaines se passent difficilement d'irrigation à certains moments clé.

Cela illustre le fait que la mise en place de multiples pratiques agroécologiques peut ne pas suffire à atteindre les objectifs de résilience que se fixe un agriculteur. L'irrigation peut alors être envisagée, mais là encore des stratégies permettent d'économiser l'eau dans le sens d'une limitation des prélèvements sur la ressource, donc en évitant l'« effet rebond », comme on va le voir.

V. 1. Limiter les prélèvements d'eau d'irrigation

- V.1.1. Privilégier l'irrigation d'appoint

Il s'agit encore une fois de choisir des cultures ayant des besoins plus faibles et décalées vers le début de saison qui permettent de n'utiliser l'eau qu'occasionnellement. L'irrigation doit alors être privilégiée pendant les phases critiques où la plante est particulièrement sensible au stress hydrique.

On peut par exemple citer l'exemple du sorgho, évoqué précédemment. Malgré une importante tolérance à la sécheresse, le sorgho présente une période de sensibilité avant et pendant la floraison (Amigues, et al., 2006). Une irrigation d'appoint à cette période est donc bien valorisée. Notons que pour le sorgho les besoins en irrigation sont entre 40 et 140 mm d'eau par hectare, ce qui est bien inférieur au maïs dont les

besoins se situent plutôt autour de 110 et 270 mm d'eau par hectare. De même, le tournesol est une plante qui tolère bien la sécheresse mais qui peut avoir besoin d'irrigation notamment après la floraison. Les gains peuvent atteindre 5-10 kg par hectare pour une irrigation de l'ordre de seulement 100 mm.

Pour Jacques Morineau, responsable des cultures au GAEC Ursule, l'irrigation doit avant tout être utilisée de manière ponctuelle pour sécuriser certaines productions lors de stades phénologiques où les cultures sont particulièrement sensibles au stress hydrique. Dans ce GAEC, c'est notamment le cas lors de la levée des colzas en août ou du sorgho à la fin du printemps, mais également au moment de la fécondation des légumineuses (pois chiche, lentilles, haricots).

- *V.1.2. Reporter des volumes d'eau vers des cultures d'hiver (blé, orge, colza) plutôt que les cultures de printemps*

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les sécheresses risquent de devenir non seulement de plus en plus fréquentes mais également sur des périodes de plus en plus longues. Les sécheresses pourraient donc survenir de plus en plus tôt, notamment en mai et en juin avec des arrêts sécheresses de plus en plus fréquents. Dans ce contexte, une stratégie pourrait consister à reporter les volumes d'eau d'irrigation sur des cultures d'hiver comme le blé, l'orge ou le colza finissant leur cycle vers juin afin de sécuriser ces cultures qui pourraient être mises en péril, et utiliser les volumes d'eau non plus dans les mois à plus forts risques de sécheresse et donc de restriction et d'évaporation de l'eau d'irrigation, mais au contraire dans des périodes moins sensibles, afin de compenser les pertes sur les cultures de printemps par le gain sur les cultures d'hiver ainsi sécurisées.

V.2. Optimiser l'efficience de l'irrigation

- *V.2.1. Choix d'un dispositif d'irrigation économe en eau*

Selon Amigues et al., l'utilisation de techniques d'irrigation plus efficaces peut être une voie d'économie d'eau dans les exploitations agricoles. Parmi les différentes techniques utilisées, les plus fréquentes sont aussi les moins efficaces. On distingue notamment l'irrigation par aspersion qui était utilisée en 2006 sur 95% des surfaces irriguées (Amigues, et al., 2006), l'irrigation gravitaire qui se fait par ruissellement via des canaux ou rigoles, et la micro-irrigation beaucoup moins fréquente qui consiste à acheminer l'eau directement jusqu'aux racines des plantes. Ce dispositif est souvent préconisé car plus économe en eau (limitation du ruissellement, apport de la quantité nécessaire, etc.).

Des essais ont notamment été réalisés par les chercheurs de l'Irstea du centre de Montpellier sur les grandes cultures (maïs, sorgho, soja) en conditions de stress hydrique (Irstea, 2014) et révèlent que les systèmes de micro-irrigation, tels que le goutte-à-goutte enterré, pourraient permettre d'économiser jusqu'à 30% d'eau sans baisse de rendement des cultures par rapport à un système d'irrigation par aspersion. Dans certains cas cela pourrait même permettre d'augmenter le rendement des cultures.

Par ailleurs, cette technique est aussi particulièrement coûteuse pour une durée de vie qui dépend des pratiques de maintenance (Irstea, 2014). Une évolution vers une technique d'irrigation par aspersion moins coûteuse peut aussi être envisagée. Le passage d'un système d'aspersion par enrouleur à un système en pivot permettrait également d'économiser entre 5 et 10% d'eau.

Cependant, si les dispositifs d'irrigation plus efficaces permettent potentiellement une consommation d'eau plus faible pour un rendement équivalent, il est important de noter que l'amélioration de l'efficience en eau n'implique pas nécessairement une baisse des prélèvements sur la ressource au final. En effet, la

consommation d'eau peut augmenter si le dispositif n'est pas maîtrisé par l'agriculteur, ou s'il décide délibérément d'apporter plus d'eau à ses cultures. A l'échelle d'un bassin versant, la modernisation des systèmes peut accroître l'efficacité sans pour autant entraîner d'économies d'eau globalement. Dans le rapport de l'Irstea sur les économies d'eau réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation (Serra-Wittling & Molle, 2017), ce phénomène paradoxal est illustré l'exemple de la modernisation des systèmes d'irrigation à l'échelle d'un bassin versant au Moyen-Orient, destinée à améliorer l'efficacité de 40-50 % à 60-70 % dans le but d'économiser l'eau et d'étendre la surface de cultures irriguées. Au lieu de réduire la consommation en eau, cette modernisation a eu pour conséquences de réduire la recharge des aquifères et ont finalement accru l'épuisement de la ressource. Selon ce rapport, un tel « effet rebond » a également été observé en Espagne, suite au passage de l'irrigation gravitaire à l'aspersion et au goutte-à-goutte, ainsi qu'au Kansas suite à la conversion des pivots traditionnels en pivots plus efficaces.

Ainsi, l'efficacité du dispositif d'irrigation peut conduire au final à utiliser davantage d'eau. Dans le GAEC Ursule déjà évoqué, l'irrigation a une vocation plutôt ponctuelle, qui ne justifie pas un système d'irrigation coûteux ce qui a poussé le GAEC à s'orienter vers un système d'enrouleur pourtant peu efficace en eau. En effet, pour Jacques Morineau, l'investissement dans des systèmes d'irrigation plus efficaces ne va pas toujours dans le sens d'une économie d'eau, au contraire. Le surcoût généré par le système plus efficace va conduire les agriculteurs à vouloir à tout prix rentabiliser leur investissement. Il observe ainsi bien souvent que les agriculteurs vont pousser l'irrigation à son maximum afin d'augmenter le rendement jusqu'aux derniers quintaux de céréales. Malgré sa faible efficacité, son système d'irrigation lui permet d'atteindre des rendements acceptables en maïs lorsque le stress hydrique se fait sentir. Il se satisfait ainsi d'un rendement autour de 80 quintaux/ha avec seulement 3 tours d'eau, quand ses voisins vont chercher à atteindre 100 quintaux par hectares avec 5 tours d'eau.

- *V.2.1. Pratiques de pilotage des apports d'eau d'irrigation*

Cet exemple permet de mettre en évidence qu'il est important de distinguer les économies d'eau liées aux systèmes d'irrigation et celles liées à la conduite de l'irrigation. Une bonne conduite de l'irrigation est celle qui consiste à apporter la bonne quantité d'eau au bon moment afin d'atteindre son objectif de rendement tout en limitant la surconsommation d'eau et les phénomènes de drainage. Avant l'efficacité de l'irrigation, l'amélioration des pratiques d'irrigation semble donc essentielle avec, entre autres, le pilotage de l'irrigation. Cependant la nécessité de rentabiliser les investissements liés aux infrastructures et équipements peuvent laisser craindre une systématisation de l'irrigation plutôt qu'un apport circonscrit aux besoins d'appoint ou aux années réellement sèches¹³. Par ailleurs les projections climatiques peuvent laisser supposer un étirement des besoins en eau¹⁴, qui pourrait être comblé avec un recours accru à l'eau d'irrigation, une fois le système d'irrigation en place, plutôt que de recourir à d'autres stratégies pour tenter de limiter ces besoins.

Le conseil en irrigation et les outils de pilotage de l'irrigation des cultures ont pour objectif d'apporter l'eau au moment où elle est nécessaire pour les plantes, compte tenu de leur cycle végétatif, de l'objectif de rendement, du type de sol et du climat. Le pilotage de l'irrigation permet notamment d'optimiser les dates de démarrage et d'arrêt de l'irrigation et la quantité d'eau à transmettre aux plantes. Ces dispositifs de pilotage et leurs potentialités en termes d'économies d'eau ont notamment été étudiés dans une étude sur le renforcement des actions d'économies d'eau en irrigation dans le bassin Adour-Garonne (AEAG, Solagro,

¹³ Patrice Garin, Irstea. Comm. Pers.

¹⁴ Patrice Garin, Irstea. Comm. Pers.

CEREG, Oreade Brèche , 2018). Parmi les dispositifs de pilotage de l'irrigation, on distingue notamment trois grands types de systèmes :

- Les bulletins collectifs d'irrigation :

Le bulletin collectif d'irrigation est un outil gratuit pour les agriculteurs diffusé notamment par les chambres d'agriculture qui l'établissent à partir de parcelles de référence équipées de capteurs et stations météorologique. Peu précis et pas toujours adapté au contexte pédologique de l'exploitation, ce bulletin constitue davantage un cadre général pour conforter les décisions des irrigants, qu'une indication de la bonne stratégie adaptée à chaque exploitation (Amigues, et al., 2006).

- Les outils de pilotage individuel par les irrigants à partir de capteurs d'eau dans le sol et de bilan hydrique

Les capteurs d'eau dans le sol (tensiomètres et sondes capacitives) employés en grandes cultures et arboriculture permettent de réaliser de 8 à 41% d'économies d'eau, la moyenne se situant autour de 20-25% (Serra-Wittling & Molle, 2017). Des cartes de réserve utile des sols peuvent également être employées afin d'apprécier l'hétérogénéité des parcelles en termes de capacité des sols à stocker l'eau et d'accroître les économies réalisées avec les logiciels de pilotage.

Cependant l'utilisation d'outil de pilotage individuel demande de la technicité pour l'installation et l'interprétation des résultats des sondes, ce qui explique que beaucoup d'agriculteurs préfèrent être accompagnés par un technicien spécialisé dont les services sont payants.

- Le conseil d'irrigation individuel et payant basé sur des outils d'aides à la décision, du matériel ou de l'accompagnement à la méthode du bilan hydrique

D'après AEAG, Solagro, CEREG, et Oreade Brèche , 2018, utiliser l'un de ces trois dispositifs de pilotage peut permettre d'économiser 10 à 15% d'eau en maïs grain irrigué.

Le pilotage de l'irrigation est présenté dans ce rapport comme l'une des solutions les plus prometteuses en termes d'économies d'eau. Les principaux freins à ce type de dispositif sont la maîtrise des compétences et connaissances techniques nécessaires, mais aussi le fait que beaucoup d'agriculteurs ne ressentent pas le besoin de piloter finement leur irrigation, tant qu'ils n'ont pas de problème de ressource en eau, et ce d'autant plus que les gains économiques sont faibles pour les économies d'eau réalisées. La sensibilisation des agriculteurs sur l'intérêt de ce type de dispositif dans un contexte où les sécheresses vont devenir de plus en plus fréquentes semble donc un levier important.

Notons qu'il est d'autant plus important de mobiliser en premier lieu les différentes stratégies d'amélioration de la résilience face aux sécheresses, avoir de recourir à l'irrigation, que les ressources en eau pourraient venir à manquer avec le changement climatique, y compris dans le cas de retenues, dont le remplissage pourrait être compromis lors de sécheresses pluriannuelles ou d'hivers secs susceptibles d'advenir comme le montrent des projections climatiques réalisées sur le bassin Seine-Normandie (Boé & Radojevic, 2018).

En conclusion, un bilan des différentes stratégies mobilisables

Pour les grandes cultures, une première stratégie d'adaptation du matériel végétal consiste à esquiver les périodes de stress hydrique en développant des variétés ou en avançant la date de semis des cultures de printemps. Introduire des espèces ou des variétés plus tolérantes en situation de sécheresse peut également être un levier d'action. Bien que la sélection des variétés classiques reste encore la voie majoritaire, la sélection de variétés populations via la sélection participative peut également être envisagée. Le principal facteur de résilience du matériel végétal reste cependant la diversité. Si la diversification de l'assolement et des rotations est un premier pas vers la résilience des systèmes agricoles, le recours aux mélanges d'espèces et de variétés, en jouant sur la complémentarité au sein d'une même parcelle, est également une piste intéressante à explorer. En ce qui concerne les pratiques culturales, celles favorisant l'infiltration et l'augmentation de la réserve utile devraient être privilégiées. La couverture du sol, via les couverts d'intercultures ou les couverts secs, peut permettre d'augmenter le réservoir utilisable des sols pauvres en matières organiques. La limitation du travail du sol via notamment des techniques de travail superficielles ou de semis sous couvert peut également favoriser le stock d'eau disponible pour les plantes. Ces pratiques doivent cependant veiller à ne pas entraîner une augmentation de l'usage des produits phytosanitaires qui serait particulièrement néfaste étant donné les enjeux forts sur les pesticides dans le bassin, aggravé par une baisse des débits et des niveaux piézométriques. Enfin, l'agroforesterie semble être une stratégie prometteuse pour limiter l'évapotranspiration des cultures en créant un climat humide, tout en limitant le stress hydrique des plantes.

En ce qui concerne les systèmes d'élevage, l'augmentation de la tolérance des ressources fourragères est un levier intéressant qui peut être mobilisé en recourant à des espèces et variétés plus tolérantes ou en jouant sur la diversité spécifique via les mélanges de cultures ou les prairies multi-espèces. Les besoins du troupeau et sa tolérance à la sécheresse peuvent également être adaptés par la taille du troupeau, le choix de la race ou des périodes de vêlages. L'agroforesterie peut jouer sur les deux leviers précédents en augmentant la tolérance des ressources fourragère grâce à la création d'un microclimat, et en augmentant le bien-être des espèces animales en leur fournissant des zones d'ombre. Enfin, la résilience des systèmes d'élevage en conditions de sécheresse nécessite d'augmenter l'autonomie alimentaire de l'exploitation pour éviter les achats extérieurs d'autant plus coûteux en conditions de sécheresse. Cela passe notamment par le développement de stocks mais aussi de nouvelles ressources fourragères pouvant être mobilisées tout au long de l'année telles que les repousses ou les couverts d'intercultures, la mise en lien avec des cultures céréalières au stade végétatif, ou encore les feuilles des arbres en systèmes agroforestiers.

L'amélioration de la résilience des vignes aux conditions de sécheresse passe tout d'abord par les pratiques culturales. Les systèmes de taille favorisant l'aération des grappes et limitant la biomasse aérienne, telle que la taille en gobelet, permettent d'augmenter la tolérance des vignes au stress hydrique. En limitant la biomasse, ces systèmes de taille pourraient néanmoins entraîner des baisses de rendement et seraient donc à privilégier en priorité sur des vignes à haute valeur ajoutée. La couverture du rang peut également être mobilisée pour augmenter la quantité d'eau disponible dans le sol. Si l'enherbement hivernal peut permettre d'améliorer la reconstitution du stock d'eau du sol en hiver, les couverts secs tel que le mulch, les paillages ou le bois raméal fragmenté constituent également un moyen d'augmenter le réservoir utilisable, sans entrer en compétition avec la vigne. A plus long terme, l'adaptation de la plantation est également une stratégie à envisager. La réorganisation de la plantation dans l'espace peut notamment contribuer à la résilience en conditions de sécheresse en privilégiant notamment les terrains avec des réserves utiles plus importantes, une orientation nord-sud et l'espacement des rangs. Enfin, l'adaptation du matériel végétal est également un levier important. Les porte-greffes notamment peuvent être facilement choisis pour leur

tolérance au stress hydrique. Bien que le changement de cépage soit plus complexe dans le cadre des appellations d'origines, des évolutions de la réglementation permettent aujourd'hui de tester de nouveaux cépages afin de mettre en place des vignes plus tolérantes à la sécheresse mais également aux maladies.

Bien que ces adaptations ne soient pas toujours mises en place pour lutter contre la sécheresse, certains systèmes mettent déjà en œuvre un certain nombre des pratiques agroécologiques citées précédemment et s'avèrent plutôt résilients en conditions de sécheresse mais également aux aléas en général. Dans cette étude nous avons notamment examiné le cas de l'agriculture biologique, et des systèmes économes et autonomes du Réseau de l'agriculture durable.

Enfin, lorsque l'irrigation ne peut être évitée, des stratégies sont également à mettre en place afin d'économiser l'eau. La limitation des prélèvements d'eau en été via le choix des espèces, et la relocalisation de l'eau des cultures de printemps vers les cultures d'été peut être envisagée. Enfin, l'augmentation de l'efficacité des systèmes d'irrigation pourrait également être une voie d'économie d'eau dans les systèmes irrigants. Néanmoins, elle doit être accompagnée par un pilotage de l'irrigation pour ne pas entraîner une surconsommation d'eau qui pourrait tout simplement annuler les économies d'eau liées au gain d'efficacité.

Notons qu'il est d'autant plus important de mobiliser en premier lieu les différentes stratégies d'amélioration de la résilience face aux sécheresses, avoir de recourir à l'irrigation, que les ressources en eau pourraient venir à manquer avec le changement climatique, y compris dans le cas de retenues, dont le remplissage pourrait être compromis lors de sécheresses pluriannuelles ou d'hivers secs.

Bibliographie

(s.d.).

AEAG, Solagro, CEREG, Oreade Brèche . (2018). *Etude pour l renforcement des actions d'économies d'eau en irrigation pour le bassin Adour-Garonne.*

Agence de l'eau Seine-Normandie. (2013). *Etat des lieux 2013 du Bassin de la Seine et des cours d'eau cotiers normands.*

Agence de l'eau Seine-Normandie. (à paraître). *Etat des lieux 2019 du Bassin Seine-Normandie.*

Agreste. (2014, Juillet). Enquête pratiques culturales de 2011. *Les dossiers*(21).

Agrofile. (2017). *Fiche technique : Pâturage en système céréalier.* Consulté le 23 Juillet, 2019, sur [agrofile.fr](http://www.agrofile.fr/wp-content/uploads/2018/12/Fiche-paturage-agrofile.pdf): <http://www.agrofile.fr/wp-content/uploads/2018/12/Fiche-paturage-agrofile.pdf>

Amigues, J., 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.* INRA.

Barbeau, G., Neethling, E., Ollat, N., Quénot, H., & Touzard, J.-M. (2015, Juin). Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Agronomie Environnement et Société*, pp. 67 - 75.

Barthès, B. G., Manlay, R. J., & Porte, O. (2010, Juillet - Août). Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une revue des résultats expérimentaux. *Cahiers Agricultures*, pp. 280-287.

Béral, C., Andueza, D., Ginane, C., Bernard, M., Liagre, F., & al. (2018). *PARASOL : Agroforesterie en système d'élevage ovin. Etude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.* INRA, ADEME.

Boé, J., & Radojevic, M. (2018). *Synthèse de l'étude « scénarios sécheresse » du bassin Seine-Normandie.* Cerfacs - CNR de Toulouse.

Bousquet, N. (2018). *Changement climatique : jouer sur la précocité et la tolérance des variétés.* Consulté le 24 Juillet, 2019, sur [Arvalis-info.fr](https://www.arvalis-infos.fr/jouer-sur-la-precocite-et-la-tolerance-des-varietes-@/view-19997-arvarticle.html): <https://www.arvalis-infos.fr/jouer-sur-la-precocite-et-la-tolerance-des-varietes-@/view-19997-arvarticle.html>

Carpentier, M. (2017). *Un vent favorable à la culture du sorgho en France et en Europe.* Récupéré sur [terre-net.fr](https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/un-vent-favorable-a-la-culture-du-sorgho-en-france-et-en-europe-217-125654.html): <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/un-vent-favorable-a-la-culture-du-sorgho-en-france-et-en-europe-217-125654.html>

CIVAM Agriculture Durable de la Mayenne. (2017). *Aléas climatique comment s'adapter et anticiper ? Evolution des exploitations laitières mayennaises en réponse aux aléas climatiques.*

CIVAM du Pays Châtelleraudais. (2018). *Associations de cultures en agro écologie dans le Châtelleraudais.* Consulté le 24 Juillet, 2019, sur http://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/synthese_CIVAM_Chatelleraudais_cle04627b.pdf

de Oliveira, L., Coroller, M., Perrin, A., & Martin, G. (2019). *Résilience des systèmes agricoles.* Consulté le 5 août, 2019, sur [dicoagroecologie.fr](https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/resilience-des-systemes-agricoles/): <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/resilience-des-systemes-agricoles/>

- Emile, J.-C., Barre, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., & Novak, S. (2017). Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour les bovins laitiers ? *Fourrages* (230), pp. 155-160.
- Fédération Régionale des CIVAM de Basse Normandie (2013). *Le systèmes herbagers pâturants de Basse Normandie s'adaptent-ils aux conditions climatiques difficiles ?*
- Fédération régionale des Civam Pays de Loire (2012). *Pourquoi/comment adapter son système herbager pâturant aux aléas climatiques.*
- Gary, C., & Celette, F. (2009). *Enherbement et gestion du stress hydro-azoté de la vigne*. INRA Montpellier.
- Goma-Fortin, N., Gontier, L., Gaviglio, C., Chovelon, M., & Malet, O. (2012). Paillage et enherbement sur le rang en viticulture : des premières observations à poursuivre. *Alter Agri*(116), 22-24.
- Grimaldi Juliette (2018). *Impacts microclimatiques de l'agroforesterie en viticulture : étude de cas dans le Sud de la France*. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier et Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse France. 2018. 307
- Guyomard, H. (2013). *Vers des agricultures à hautes performances. Volume 1. Analyse des performances de l'agriculture biologique*. INRA.
- INRA Versailles Grignon. (2017). *Wheatamix : diversité génétique des parcelles de blé, multifonctionnalité et durabilité de la production*. Consulté le 24 juillet, 2019, sur versailles-grignon.inra.fr: <http://www.versailles-grignon.inra.fr/Toutes-les-actualites/2017-Wheatamix>
- Institut de l'élevage. (2017). *Evaluation à long terme des performances de fermes associant culture/élevage : Exemple de résilience en système bovin viande*. Consulté le 25 Juillet, 2019, sur idele.fr: http://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/RMT_SPYCE/A11-RED-SPYCE-fiche-2_Analyse_long_terme_performance_des_fermes-BDD.pdf
- Institut Français de la Vigne et du Vin . (2014). Gestion du régime hydrique de la vigne. *Colloque Euroviti*. Angers.
- Institut Français de la Vigne et du Vin (2019). *Agroforesterie et viticulture*.
- Institut Français de la Vigne et du Vin Occitanie (2012). *Enherbement permanent de la vigne*. Consulté le 25 Juillet, 2019, sur vignevin-occitanie.com: <http://www.vignevin-occitanie.com/fiches-pratiques/enherbement-permanent/>
- Irstea. (2014). *Irrigation : Le goutte-à-goutte enterré, une solution innovante* . Récupéré sur irstea.fr: <http://www.actions-territoires.irstea.fr/eau/irrigation-goutte-a-goutte-entere>
- JT 20h de France 2. (2015). *Légumes et maïs sans irrigation*. Consulté le 2019, sur Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=s2cZKzy_XrM
- Kasler, G. (2006). Les semences paysannes : situation actuelle, difficultés techniques, besoin d'un cadre juridique . *Dossier de l'environnement de l'INRA : Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables ?*
- Labarthe, P., Coléno, F., Fugeray-Scarbel, A., Hannachi, M., & Lemarié, S. (2018). Freins et leviers socio-économiques à la diffusion de mélanges variétaux pour la production de blé. *Notes et études socio-*

économique, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Service de la statistiques et de la prospective(43), pp. 77-103.

Léveillé, P. (2016). *Sècheresse et changement climatique : la recherche révèle le potentiel du tournesol*. Consulté le Juillet 29, 2019, sur [inra.fr](http://www.inra.fr/Grand-public/Genetique/Tous-les-magazines/Tournesol-changement-climatique-secheresse): <http://www.inra.fr/Grand-public/Genetique/Tous-les-magazines/Tournesol-changement-climatique-secheresse>

Litrico, I., Barre, P., Durand, J., Guesquière, M., Prieto, I., & al. (2015). Colloque présentant les méthodes et résultats du projet Climagie. *Diversité spécifique et génétique dans les prairies semées : une plus-value complémentaire*.

Marguerie, M., Latraye, N., Jézéquel, S., & Meloux, G. (2016). *Influence du stress hydrique et comportement variétal en blé Bio*. Consulté le 24 Juillet, 2019, sur [produire-bio.fr](https://www.produire-bio.fr): <https://www.produire-bio.fr/articles-pratiques/influence-stress-hydrique-comportement-varietal-ble-bio/>

Messean, J.-P., & Messean, A. (2017). *Retour d'expérience sur l'utilisation de l'arbre fourrager en élevage bovin*.

Météo France. (2014). *Changement climatique et sécheresses*. Récupéré sur [meteofrance.fr](http://www.meteofrance.fr): <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-secheresses>

Mollier, P. (2014). *Variété population : privilégier l'adaptabilité*. Récupéré sur [inra.fr](http://www.inra.fr): [http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Systemes-agricoles/Tous-les-dossiers/Selection-classique-ou-participative-plusieurs-strategies-pour-les-bles-bios/Varietes-populations-privilegier-l-adaptabilite/\(key\)/1](http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Systemes-agricoles/Tous-les-dossiers/Selection-classique-ou-participative-plusieurs-strategies-pour-les-bles-bios/Varietes-populations-privilegier-l-adaptabilite/(key)/1)

Noël, V. (2016, Juillet - Août). Les mélanges de blé à la recherche de références. *Réussir Grandes Cultures*(304), pp. 30-32.

Novak, S., & Emile, J.-C. (2014). Associer des approches analytiques et systémique pour concevoir un système laitier innovant : de la Fée à l'OasYs. *Fourrages*(217), pp. 47-56.

Novak, S., Audebert, G., Chargelègue, F., & Emile, J.-C. (2018). Sécuriser un système laitier avec des fourrages économes en eau et en énergies fossiles. *Fourrages*(233), pp. 27-34.

Ollat, N., & Touzard, J.-M. (2014). Stress hydrique et adaptation au changement climatique pour la viticulture et l'oenologie : Le projet LACCAGE. *Innovations Agronomiques*(38), pp. 131 - 141.

Osaé, Osez l'agroécologie. (2015). *L'agroécologie*. Récupéré sur osez-agroecologie.org: <https://osez-agroecologie.org/l-agroecologie>

Osaé, Osez l'agroécologie. (2014). *Témoignages d'agriculteurs : Roger et Denis BEZIAT*. Consulté le 5 août, 2019, sur osez-agroecologie.org: <https://osez-agroecologie.org/temoignage-pdf-beziat.pdf>

Osaé, Osez l'agroécologie. (2016). *Synthèse technique : le tri des cultures associées*. Consulté le 5 Août, 2019, sur osez-agroecologie.org: https://osez-agroecologie.org/images/imagesCK/files/syntheses/f621_tri-cultures-associees.pdf

Osaé, Osez l'agroécologie. (2017). *Témoignages d'agriculteurs : Christophe BOUSQUET*. Consulté le 23 Juillet, 2019, sur osez-agroecologie.org: <https://osez-agroecologie.org/temoignage-pdf-bousquet.pdf>

- Peigne, J. (2014). *Comment calculer la réserve utile du sol ?* Consulté le 31 Juillet, 2019, sur supagro.fr: <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/CALculRU.html>
- Réseau de l'agriculture durable. (2015). *Résultats de l'observatoire technico économique du RAD - Synthèse 2015*. Récupéré sur agriculture-durable.org: <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2016/06/essentiels-obseco-2015-web.pdf>
- Sautereau N., Benoit M. (2016). *Quantification et chiffrage des externalités de l'agriculture biologique*. ITAB.
- Sepeau Ivaldi, M. (2016). *Des variétés grecques pour s'adapter au changement climatique*. Consulté le 1 août, 2019, sur vitisphère.com.
- Serra-Wittling, C., & Molle, B. (2017). *Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation*. Irstea.
- Trambouze W, Goma-Fortin N (2013). Agroforestry and viticulture: results of a 11-years study on the production and vigour of the vines. Portugal, pp 514–517
- Trambouze W, Gouttesoulard C, Saubion C (2017) *Agroforesterie viticole : 20 ans de complantation arbres/vignes, pour quels résultats agronomiques ?* In: Actes de la journée Croisons les regards #2. RMT agrofoesteries, Paris, p 28
- Van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2018). *Le changement climatique en viticulture : les leviers d'adaptation au vignoble*. Consulté le 24 Juillet, 2019, sur Institut français de la vign et du vin Occitanie: <http://www.vignevin-occitanie.com/wp-content/uploads/2018/11/Leviers-dadaptation-au-changement-climatique-Van-Leeuwen.pdf>
- Vert, J., Schaller, N., & Villien, C. (2013). *Agriculture Forêt Climat : vers des stratégies d'adaptation*. Centre d'études et de prospective Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

Liste des personnes contactées ayant fourni des éléments pour ce rapport

Organisme/expert	Prénom	Nom
INRA	Isabelle	Goldringer
INRA	Véronique	Chable
INRA	Marc	Benoit
Réseau Action climat	Cyrielle	Denhartigh
Solagro	Sylvain	Doublet
Solagro	Nicolas	Metayer
expert agronome	Jacques	Caplat
AESN	Jérôme	Ratiarson
Agrof'île	Agnes	Sourisseau
Afac	Baptiste	Sanson
APCA	Mikael	Naitlho
CRA Aquitaine	Frederic	Lavrault
FNAB	Antoine	Villar
INRA / ITAB	Natacha	Soutereau
INRA Lusignan (HB)	Sandra	Novak
INRA + CRA Occitanie	Lionel	Alleto
INRA	Arnaud	Gauffreteau
IRSTEA	Patrice	Garin
Afac	Juliette	Grimaldi
Afac	Delphine	Mézière
INRA	Guillaume	Blanchet
CRA Oise	Eric	Demazeau
CRA Haut de France	Graziella	Haudry
CRA Haute Marne	Bertrand	Dufresnoy
CRA Loir et Cher	Christophe	Beaujouan
CRA Grand Est	Hervé	Clinkspeer
GAB Loire et Cher	Ronald	Charrier
Agro Campus Ouest	Olivier	Godinot
AgroParisTech	Viviane	Pasteau
FRCIVAM basse normandie	Clémentine	Schmidt
Agrof'île	Valentin	verret
CIVAM défis ruraux	Celine	Depres
CIVAM ile de France	site	
Civam Champagne - Ardenne	site	
IDELE	Laurence	Sagot
Agriculteur	Bertrand	Cailly
Agriculteur	Jacques	Morineau
Agriculteur	Adrien	Messean

Annexes

Annexe 1 : Entretien avec Jacques Morineau	57
Annexe 2 : Entretien avec Lionel Alleto.....	60
Annexe 3 : Entretien avec Agnès Sourisseau.....	62
Annexe 4 : Entretien avec Guillaume Blanchet	64

Annexe 1 : Entretien avec Jacques Morineau

Responsable des cultures et de la gestion du GAEC Ursule

Vendredi 19 juillet

Quel aléa sécheresse sur l'exploitation ?

Les événements de sécheresse les plus marquants remontent aux années 89 et 90, l'année 2003 a été davantage marquée. Depuis 4 ou 5 ans, on observe également des années sèches avec un déficit hydrique beaucoup plus prononcé notamment en 2016 La sécheresse impacte notamment les prairies, le maïs mais aussi le tournesol.

Quelles adaptations ont été mises en place ?

Esquiver le stress hydrique

Une de leur stratégie a été d'augmenter la proportion de cultures d'hiver par rapport aux cultures de printemps jusqu'à 70% de cultures d'hiver afin d'esquiver le stress hydrique. Néanmoins cette stratégie ne s'est pas révélée satisfaisante sur le plan de la gestion des adventices. En effet, pour Jacques Morineau, le meilleur moyen de limiter les adventices est d'avoir le plus de date de semis différentes.

Utiliser des espèces qui tolèrent mieux la sécheresse

Le GAEC a également choisi d'augmenter la proportion de sorgho par rapport au maïs car celui résiste mieux aux conditions sèches mais également parce qu'il est moins sensible aux ravageurs. Dans les prairies le choix d'espèces comme des associations luzerne dactyle plus tolérantes que le Ray Grass à la sécheresse s'est également révélé très pertinent.

Utiliser des mélanges

Le GAEC a également misé sur les mélanges d'espèces et de variétés pour améliorer sa résilience notamment de légumineuses et céréales comme l'orge et les pois, le tournesol et le sarrasin, la triticale pois et la féverole, etc.

Une autre stratégie est de conserver une diversité de variétés pour chaque culture. Le GAEC met notamment des mélanges de 3 à 7 variétés différentes avec des précocités différentes, ce qui permet à ces dernières d'être plus résistantes au stress hydrique et à l'échaudage qui peut être fatal suivant le moment du cycle pour une variété ou pour une espèce. Cultiver des mélanges permet d'avoir toujours une espèce ou variété du mélange qui survit.

Utiliser des variétés populations plus adaptées aux conditions pédoclimatiques locales

D'autre part le GAEC expérimente également le maïs populations qui peut être très intéressant dans la résistance à la sécheresse. Selon Jacques Morineau, leur maïs population est mieux adapté à leur type de sol mais aussi aux conditions climatiques locales et résiste davantage aux aléas climatiques. Pour le maïs ensilage, les variétés populations ont de meilleurs résultats que des variétés hybrides classiques. Pour le maïs grain, les résultats ne dépassent pas encore ceux des variétés industrielles du fait d'une variabilité de précocité encore trop importante. Mais selon Jacques Morineau ce sera le cas d'ici cinq ans.

Travail du sol superficiel et couverture du sol

Concernant le sol, le GAEC essaie de limiter son impact sur le sol avec un travail superficiel. Certains types d'outils tels que la fraise rotative permet de faciliter la levée sans dessécher le sol comme peuvent le faire les outils à dents ou le labour. Cela permet notamment d'assurer la levée même dans des conditions sèches.

Afin de limiter le travail su sol, le GAEC pratique également le semis sous couvert de luzerne et dactyle dans le blé qui donne de très bons résultats. En effet, cela permet d'avoir un sol encore humide pour la levée, ce qui est très rarement le cas sans le recours au semis sous couvert en automne. Le sol ainsi couvert limite l'érosion du sol, mais les agriculteurs se laissent également la possibilité de ne pas couvrir un sol pour la gestion des adventices.

Plantation de haie et prairies agroforestière.

Pour Jacques Morineau, les haies peuvent également jouer un rôle dans la résilience à la sécheresse en limitant le vent desséchant à la surface du sol. D'autre part, elle crée une ombre pour les animaux, particulièrement importante dans des périodes de chaleur et de sécheresse. Les arbres permettent d'avoir une prairie qui reste plus longtemps verte lors d'épisodes de sécheresse. Le GAEC possède également des prairies en agroforesterie dans lequel on observe autant voire davantage d'herbes que dans les prairies non agroforestières.

Diversification des sources de fourrage.

Les animaux sont nourris majoritairement avec des prairies mais la grande diversité de cultures présentes sur l'exploitation permet de disposer également de sources de fourrage supplémentaires en cas de sécheresse. Le troupeau peut notamment pâturer les couverts d'Intercultures mais également toutes les cultures qui ont un peu moins bien fonctionné. Pour Jacques Morineau, le gros avantage d'être en système de polyculture élevage et qu'en cas d'aléas climatiques, les cultures comme le maïs destinées à la vente peuvent toujours être finalement utilisées pour les fourrages. Le pâturage des céréales immature a également été testé sur la ferme. Pour Jacques Morineau, il s'agit d'une pratique intéressante car elle offre une ressource fourragère à un moment où il n'y a pas encore assez d'herbe pour pâturer. Mais cette pratique n'a pas été poursuivie dans le GAEC car il n'y en avait pas réellement besoin, et pour des raisons de portance du sol, cette pratique reste mieux adaptée à l'élevage ovin.

Une race résistante au manque de fourrage

Pour Jacques Morineau, un autre facteur de résilience de son exploitation est aussi le choix de la race Jersiaise qui possède des besoins moins importants en fourrage que l'habituelle Prime Holstein. Moins massive, la race Jersiaise a besoin de moins d'énergie pour transformer le fourrage en lait. Le GAEC à faire des économies de 20% de fourrage pour la même quantité de matière utile. En effet, la quantité de lait produite est un peu moins importante mais celui-ci est de meilleure qualité.

- La question de l'irrigation

Pourquoi l'irrigation ?

Bien que de nombreuses adaptations aient été mises en place pour mieux résister à la sécheresse, le GAEC envisage toutefois d'adopter un système d'irrigation.

En effet, le GAEC a pour objectif de garder une importante biodiversité dans sa ferme et cela grâce à une forte diversité de cultures et notamment davantage de cultures de printemps, et davantage de cultures destinées à la consommation alimentaire telle que le colza pour l'huile. L'élevage est aussi un élément important à conserver pour permettre de conserver la qualité de cultures.

Ils observent néanmoins que pour certaines espèces telles que le colza bio, les légumineuses ou encore le maïs ou le tournesol, certains stades sont critiques et nécessiteraient une irrigation ponctuelle pour obtenir des rendements raisonnables.

A cela s'ajoute, l'augmentation de la fréquence des sécheresses qui surviennent aujourd'hui presque une année sur deux.

Quel système d'irrigation ?

Dans le GAEC Ursule, l'irrigation a donc une vocation plutôt ponctuelle, c'est pourquoi Jacques Morineau ne souhaite pas investir dans un système d'irrigation coûteux, mais dans un système d'irrigation plutôt basique comme un enrouleur. En effet, selon lui, l'investissement dans des systèmes d'irrigation certes plus efficaces et avec moins de pertes d'eau, entraîne un surcoût que les agriculteurs vont vouloir rentabiliser. Ainsi l'irrigation est poussée à son maximum afin d'obtenir les derniers quintaux de céréales car il faut pouvoir rentabiliser l'investissement.

Or l'irrigation dans le GAEC Ursule est plutôt destinée à sécuriser certaines productions face au risque accru de stress hydrique ou d'échaudage à des moments clés tels que :

- La levée des colzas en août
- La levée du sorgho à la fin du printemps
- Le stade de fécondation des légumineuses (pois chiches, lentilles, haricots)

En effet, l'irrigation peut permettre de diminuer la température au sol de 3 ou 4°C ce qui limite les pertes d'eau par évapotranspiration, et le risque d'échaudage.

Cela pourra également permettre d'atteindre des rendements plus acceptables lors des périodes difficiles pour certaines cultures. Selon lui, un tour d'eau sur les tournesols ou trois tours d'eau sur les maïs peut permettre de gagner une dizaine de quintaux par hectare pour le tournesol et 30 à 40 quintaux pour le maïs.

Pour lui, l'objectif n'est pas d'atteindre le rendement maximal à l'image de ses voisins qui atteignent 100 quintaux par hectares pour 5 tours d'eau sur le maïs mais d'atteindre des rendements acceptables autour de 80 quintaux lorsque le stress hydrique se fait sentir.

Annexe 2 : Entretien avec Lionel Alletto

*Chargé de mission Agronomie - Environnement à la chambre d'agriculture d'Occitanie
Chercheur associé INRA (unité AGroécologies, Innovations et teRritoires)*

Mardi 24 juin 2019

Le projet BAG'AGES (Bassin Adour-Garonne : quelles performances des pratiques AGroécologiquES ?) est un programme de recherche commandité par l'Agence de l'Eau Adour Garonne et coordonné par l'UMR AGIR INRA de Toulouse. Lancé en 2016, il vise à évaluer les intérêts et les limites de pratiques agroécologiques pour la préservation de la ressource en eau sur le plan quantitatif et qualitatif.

En quoi consistent les expérimentations ?

Les expérimentations sont menées en systèmes de grandes cultures et se focalisent sur des pratiques agroécologiques telles que l'allongement des rotations, la réduction du travail du sol, et la couverture du sol par des cultures intermédiaires, qui sont caractéristiques de l'agriculture de conservation des sols. L'agroforesterie fait également partie des pratiques étudiées mais de manière plus anecdotique (du fait d'un faible nombre de situations à l'équilibre, ie, arbres développés, sur le territoire étudié).

Le projet s'articule en différents groupes de tâche. Lionel Alletto est notamment impliqué dans le premier groupe de tâche : expérimenter, observer, quantifier le fonctionnement hydrique du sol. Bien que des expérimentations sont prévues jusqu'en automne 2019, et que les résultats nécessitent encore un grand travail d'interprétation, Lionel Alletto a pu donner quelques résultats intermédiaires.

Quels premiers résultats ?

Ainsi, dans les systèmes agricoles où les pratiques de conservation des sols sont maîtrisées et mises en place depuis un certain temps, on observe que l'infiltration de l'eau est souvent équivalente voire supérieure à celle dans les systèmes avec labour. De plus cette infiltration est plus stable dans le temps et moins fluctuante dans les systèmes étudiés. En effet le labour, peut augmenter de façon importante la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols, mais cela pendant une durée limitée et avec un retour systématique à une capacité d'infiltration plus faible. De plus, on observe qu'en système labouré, le système racinaire des plantes se développe moins en profondeur. En effet, le labour peut créer une rupture dans les horizons du sol qui limite le développement des racines et donc le volume du sol prospecté.

D'autre part, on observe que ces pratiques permettent une augmentation sensible du RU (réservoir utilisable) dans certains types de sol. En effet, sur des sols limoneux, battants et hydromorphes, comme on peut en trouver en Normandie et Picardie dans le bassin Seine Normandie, on observe une augmentation du RU de 5 à 10 % dans les horizons superficiels. Cette augmentation du RU peut être attribuée à l'augmentation du taux de matière organique en lien avec la présence de couverts intermédiaires. Cette augmentation est également corrélée à une augmentation de la porosité du milieu, qui peut s'expliquer par le développement racinaire des couverts. Cependant, il faut noter que dans les sols très riches en matière organique ou dans les sols sableux, les méthodes et outils utilisés ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative entre les systèmes intégrant ces pratiques et les autres.

Enfin on a également pu relever que ces systèmes semblent favoriser l'activité biologique des sols ainsi que le développement de mycorhize. Cette présence accrue de mycorhize en augmentant le volume de sol exploré peut favoriser l'absorption de l'eau par les plantes.

Cependant, la grande faiblesse de ce système demeure la dépendance aux herbicides. En effet, la limitation du travail du sol entraîne bien souvent une augmentation du risque de développement des adventices. Bien que ce ne soit pas systématique, certains de ces systèmes utilisent davantage d'herbicides qu'en système conventionnel ce qui peut être un vrai problème au regard de la qualité de l'eau. De plus, si certains suggèrent que ces pratiques permettraient une meilleure dégradation des substances chimiques, cela semble pour l'instant négligeable.

Pour conclure, ces pratiques sont intéressantes en termes de gestion quantitative de l'eau, du fait de la stabilisation de la capacité d'infiltration de l'eau, l'augmentation du taux de matière organique dans le sol et le développement facilité des mycorhizes et des racines en profondeur. Cependant, la question de l'utilisation des herbicides reste un problème majeur du point de vue de la qualité de l'eau.

Annexe 3 : Entretien avec Agnès Sourisseau

Paysagiste - Agricultrice - Fondatrice d'AGROF'ILE, association qui œuvre pour l'intégration des arbres au sein des systèmes de productions agricoles franciliens

Vendredi 14 juin

L'association Agrof'ile est une association fondée en 2016 qui suit une soixantaine d'exploitations agricoles qui valorisent les arbres et la couverture du sol dans leurs systèmes. Il s'agit à la fois de systèmes en grandes cultures, élevage, et maraîchage, en agriculture biologique ou non. Au cours des trois derniers étés, le déficit hydrique a poussé de nombreux agriculteurs à rejoindre le réseau.

En quoi les sols vivants peuvent permettre une résilience face aux sécheresses ?

L'absence de travail du sol augmente la disponibilité en eau

Un des principaux leviers pour améliorer la disponibilité de la ressource en eau par les plantes est la limitation du travail du sol. En effet, le travail du sol est un vrai problème puisqu'il va éliminer les vers de terre qui entretiennent les réseaux de galeries du sol. Cette diminution de la porosité nuit à la rétention de l'eau par les sols et la présence d'une semelle de labour peut limiter la pénétration des racines dans le sol, ce qui limite encore la disponibilité de l'eau pour la culture.

La couverture du sol permet d'augmenter la réserve utile

La couverture du sol, au contraire, est plutôt favorable à la ressource en eau puisqu'elle peut limiter l'évaporation du sol et l'enrichir en matière organique qui a un fort pouvoir de rétention d'eau, ce qui contribue à augmenter la réserve utile. Parmi les couvertures du sol, les couverts morts comme le mulch ou le paillage peuvent être mis en place. Ils ont l'avantage de ne pas entraîner de perte d'eau par évapotranspiration, mais sont peut-être plus complexes à disposer sur une parcelle qu'un semis. Les couverts vivants, ont également l'avantage d'améliorer la structure du sol grâce à leur système racinaire, mais perdent de l'eau par évapotranspiration.

Une dépendance aux herbicides encore importante

Ces pratiques de conservation des sols se déclinent tant en système conventionnel qu'en bio. Néanmoins, l'absence du travail du sol, entraîne souvent des problèmes d'adventices ce qui fait qu'aujourd'hui, les systèmes sans travail du sol sont très dépendants des herbicides. Certaines techniques tentent de se développer à Agrof'ile pour limiter les adventices avec des pratiques non chimiques.

Le semis sous couvert est une technique de semis sans travail du sol dans laquelle le couvert va limiter la montaison des adventices. Cependant le semis sous couvert est techniquement très compliqué car il faut que la culture parvienne à prendre le pas sur le couvert.

Le pâturage des cultures peut aussi permettre de limiter cela. En effet, le pâturage hivernal du blé ou du colza va permettre le tallage, c'est-à-dire que le blé va être davantage ramifié, ce qui va permettre de raccourcir les pailles, de limiter la verse, mais aussi de densifier le couvert. Cette densification en augmentant l'ombre portée permet de limiter l'évaporation du sol tout en limitant les adventices qui disposent de moins de ressource lumineuse.

Quel est le rôle de l'arbre dans la résilience à la sécheresse ?

Les arbres permettent de maintenir un microclimat

Les arbres en créant de l'ombre permettent de maintenir un microclimat plus humide qui permet à la culture de mieux supporter la sécheresse. La densité de la canopée est cependant très importante pour éviter un retard de la végétation importante à proximité de la canopée.

La concurrence pour la ressource hydrique peut être limitée

Si les arbres ne sont pas habitués à cohabiter avec des cultures, il peut exister une compétition entre les arbres et la culture sur la ressource en eau. Certaines techniques permettent cependant de favoriser le développement des racines en profondeurs afin de limiter cette compétition tel que la couverture du sol, dont les racines vont ainsi pousser l'arbre à développer ses racines davantage en profondeur, l'absence de travail du sol pour éviter la semelle de labour qui empêche les racines de descendre en profondeur, la coupe des racines de surface.

Les arbres peuvent jouer le rôle de pompe à eau

D'autre part, des études évoquent la capacité de l'arbre à jouer le rôle d'une pompe à eau en profondeur. Mais les arbres peuvent aussi avoir un rôle très intéressant de drainage en cas d'excès d'eau dans les sols.

Les arbres peuvent être une ressource fourragère

Les arbres peuvent également représenter un fourrage complémentaire pour l'élevage, notamment les ligneux. Ce pâturage permet également de valoriser l'entretien des haies qui ont parfois tendance à empiéter sur la parcelle.

La diversification et l'association des cultures restent un fondement de la résilience.

Les cultures associées

L'association des cultures joue un rôle à ne pas négliger dans la résilience des systèmes agricoles en répartissant le risque sur différentes cultures. Des associations de céréales et de légumineuses comme le méteil sont ainsi mises en place.

Annexe 4 : Entretien avec Guillaume Blanchet

Thésard au sein de l'UMR System de l'INRA sur les mécanismes de résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique.

Mardi 11 juin 2019

Guillaume Blanchet mène actuellement une thèse sur les mécanismes de résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique. Il étudie plus précisément l'impact des arbres sur les rendements des cultures en condition de stress hydrique. Son étude se concentre notamment sur la comparaison de systèmes où sont associés des noyers et des rotations de céréales (blé dur, orge d'hiver, pois) avec des systèmes non agroforestiers. Les expérimentations sont réalisées à la fois au champ (Domaine de Restinclières, Hérault) et virtuellement (modèle Hi-sAFe, Dupraz et al. 2019¹⁵).

En quoi consistent les expérimentations ?

Les sécheresses sont reproduites expérimentalement grâce à des dispositifs d'exclusion de pluie dont il existe plusieurs modèles. Le but est de créer des contrastes hydriques au sein de la même parcelle. Il est important de noter qu'on ne reproduit pas l'effet augmentation de la température, qui peut également avoir lieu lors de conditions de sécheresse.

Deux types de dispositifs ont été mis au point. Le premier est un grand dispositif (> 800 m², couvrant deux allées agroforestières afin d'exclure symétriquement 3 arbres centraux), ce qui permet de limiter le risque d'artéfact de type « split-root », à savoir l'acquisition différenciée des ressources souterraines par l'arbre lorsque celles-ci sont distribuées de façon non homogène. Si le dispositif est de taille insuffisante (i.e. il ne couvre pas toute la surface couverte par le système racinaire de l'arbre), les réponses obtenues pourraient être biaisées. Malheureusement, ce grand dispositif est très difficile à gérer d'un point de vue logistique (vent/pluie intense en climat méditerranéen) et n'est pas répliqué au sein de la parcelle (faible robustesse des méthodes statistiques appliquées).



Photographie du grand dispositif d'exclusion de pluie ©Guillaume Blanchet



Photographie du petit dispositif d'exclusion de pluie ©Guillaume Blanchet

Le second type de dispositif, plus petit, mais agencé de façon astucieuse pour limiter l'artéfact de split-root (4 dispositifs de 15 m² autour d'un arbre), a également été mis en place. Ces dispositifs, bien que plus petits, présentent l'avantage d'être plus faciles à gérer et sont répliqués au sein de la parcelle expérimentale (20 dispositifs ont été utilisés au cours de la saison 2018-2019).

¹⁵ Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., et al. (2019). *Hi-sAFe : A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. Sustainability.*

Quels sont les hypothèses de départ ?

Différentes hypothèses de départ ont été émises, notamment deux grandes hypothèses :

- Le stress hydrique des cultures intercalaires est diminué en système agroforestier.
- Face à des situations de déficit hydrique, les rendements sont plus stables en système agroforestier.

D'autres sous hypothèses qui explicitent les mécanismes en jeu dans la résilience des systèmes agroforestiers ont également été faites :

Mécanismes liés à la disponibilité en eau

Une des hypothèses qui s'oppose à la limitation du stress hydrique par les arbres est qu'en système agroforestier, la disponibilité en eau peut être réduite par rapport aux systèmes en monoculture, en début de saison et en fin de saison, car l'arbre a tendance à prélever l'eau dans les horizons de surface. Une autre hypothèse, cette fois-ci en accord avec limitation du stress hydrique par les arbres, est que l'évaporation du sol est diminuée en système agroforestier ce qui permettrait d'accroître la quantité d'eau disponible pour la plante. Cet effet lié à l'ombre de l'arbre serait néanmoins très variable selon le type d'arbre étudié.

Mécanismes liés aux besoins en eau de la plante

Une des hypothèses est que la demande en évapotranspiration de la plante est diminuée en système agroforestier ce qui peut être mis en évidence grâce à des mesures microclimatiques. La seconde hypothèse est que les indicateurs de stress hydrique sont plus faibles en système agroforestier. Il peut s'agir d'indicateurs de stress momentané tels que la température de la culture ou la conductance stomatique. Il peut également s'agir d'indicateurs de stress intégrés comme les composantes du rendement.

Quels premiers résultats ?

Les résultats issus de ce travail de thèse sont encore en cours d'analyses et seront publiés prochainement. Cependant, quelques pistes semblent se dégager.

Pour la première sous hypothèse qui concerne la diminution de l'eau disponible en système agroforestier, en lien avec la compétition racinaire, il semble qu'elle se vérifie assez peu dans le cas particulier des expérimentations de Guillaume. Au contraire, il semble y avoir une bonne complémentarité entre les horizons explorés par les arbres et la culture. Ce mécanisme est toutefois très dépendant du sol. Le domaine étudié au cours de la thèse a un sol assez profond qui explique que les systèmes racinaires des arbres aillent puiser l'eau directement dans la nappe et non pas dans les horizons de surface. Il y a donc une compétition quasi nulle et mais cela pourrait être très différent dans d'autres conditions pédologiques.

Pour ce qui est des indicateurs de stress hydrique, on a pu observer que le système agroforestier semblait diminuer certains facteurs de stress hydrique tel que la durée de la floraison. On observe en effet des durées de floraison plus longues pour le pois lorsqu'il est à l'ombre des arbres. Comme le pois est une plante indéterminée cela se traduit notamment par un nombre de fleurs plus élevé et donc potentiellement par un rendement plus élevé. Les composantes de rendement à la récolte permettront d'analyser finement ces mécanismes.

Il semble qu'on observe également qu'en système agroforestier, la culture est soumise à une plus faible amplitude de température, et l'ouverture des stomates est plus importante. Or l'ouverture stomatique est

corrélée aux besoins en eau de la plante, puisque plus le besoin en eau est important plus la plante doit fermer ses stomates pour conserver son eau (ce qui va entraîner une diminution de la photosynthèse).

Ce qu'il faut surtout retenir c'est que les résultats et les mécanismes observables en condition de sécheresse, notamment au sein de peuplements plurispécifiques à base pérennes, sont très dépendants du sol, et des spécificités locales. C'est à la fois la force et la faiblesse de l'agroécologie. Il n'y a pas de solution générale toute faite, mais il faut au contraire s'adapter aux spécificités locales et disposer de connaissances assez précises sur les conditions pédoclimatiques de sa parcelle.