

Irriguer les prairies : entre un vrai potentiel agronomique et une ressource en baisse

J.L. Durand

INRAE, URP3F 86 600 Lusignan, jean-louis.durand@inrae.fr

Résumé

L'irrigation des prairies permet des gains de productivité qui ne sauraient être surestimés. En plein été, l'apport d'eau permet à la plante de maintenir sa morphogenèse aérienne et sa température dans des gammes optimales. En zone tempérée, les espèces dites résistantes à la sécheresse sont précisément celles qui peuvent mobiliser davantage de ressources en eau. En zone méditerranéenne, l'irrigation est la seule alternative au repos estival pour lequel les variétés adaptées à ce climat restreignent justement leur production. Là aussi, s'il est question d'irriguer, les variétés à considérer sont des variétés tempérées. En effet les variétés récentes de graminées en particulier sont particulièrement adaptées à la valorisation de ces irrigations. L'optimisation des systèmes d'irrigation est possible sur les prairies comme sur les grandes cultures, grâce aux capteurs (pluie et humidité du sol), à de bonnes évaluations de la réserve du sol et à des prévisions météorologiques à court termes fiables. Cela permet des irrigations performantes et bien suivies. Envisager l'irrigation à grande échelle n'est toutefois pas envisageable, malgré l'expansion des prairies semées et naturelles souhaitable pour permettre la transition agroécologique de l'agriculture. En effet, les projections climatiques et l'évaluation de leur impact sur la ressource en eaux de surface ou souterraines ne laissent guère espérer une amélioration des quantités disponibles. C'est pourquoi un grand nombre d'agriculteurs, éleveurs à l'herbe et autres, risquent fort de se trouver sans recours à l'eau possible malgré un accroissement du risque sécheresse. D'où la nécessité d'améliorer les systèmes pluviaux.

Introduction : contexte climatique et agronomique

La question de la consommation d'eau par les productions animales est délicate et parfois entachée de visions inappropriées. Par exemple, l'empreinte hydrique de la production de lait ou de viande est souvent calculée en rapportant la quantité d'eau consommée pour produire le fourrage à la quantité de produit animal. C'est une vision fallacieuse de la situation environnementale puisque à ce point de vue, c'est bien la **différence** entre la consommation d'eau de la culture et celle de la végétation naturelle qu'il convient de rapporter à la production. Et au contraire, il arrive alors assez souvent que la culture améliore la situation hydrologique par une consommation d'eau inférieure à celle de la végétation naturelle (Ferreres et *al.*, 2019). Or dans le cas des prairies, leur irrigation ne fait qu'aggraver la tension éventuelle sur l'eau puisque celles-ci couvrant le sol en permanence, consomment tout au long de l'année.



Figure 1. **Irrigation d'une prairie en vallée de Haute Maurienne.** (Association irrigation Sollières Sardières)

Après la nette augmentation enregistrée après 1970, les surfaces irriguées ont commencé à baisser dans certaines régions comme le Poitou Charentes où la tension sur les usages de l'eau s'est aggravée depuis le début XXI^e siècle. Au niveau national, elles restent à 6 % de la SAU environ, sur 1,6 Million d'ha. Les prairies sont très rarement irriguées alors que cette pratique pourrait contribuer à sécuriser les élevages et accroître leur autonomie. A part le maïs dont l'efficacité de l'eau en irrigué est particulièrement élevée, on constate que la plupart des cultures fourragères sont délaissées par cette technique réservée aux cultures de rente (Fig. 2).

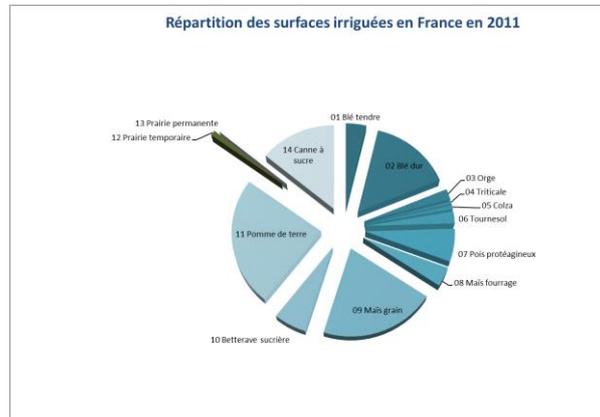
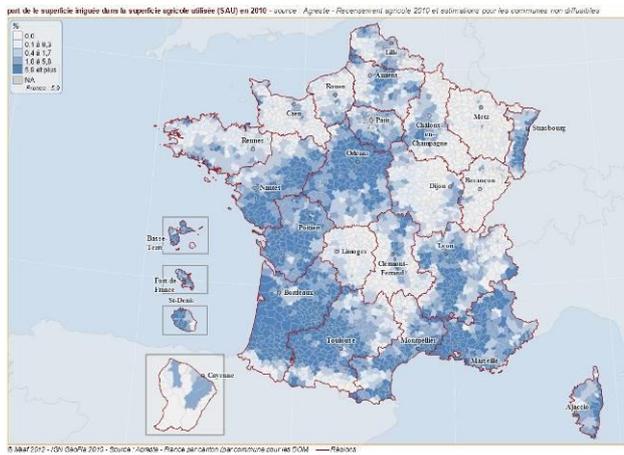


Figure 2 : Proportions de SAU irriguées en France en 2010 et part des différentes cultures dans ces surfaces à l'échelle nationale. Agreste

Pour autant, certains producteurs y recourent très régulièrement, quand ce n'est pas parfois une condition même à l'existence de l'élevage dans des zones d'AOP (GIDA Haute Maurienne, Fig. 1)

Le déficit hydrique estival peut s'exprimer par la différence entre l'évapotranspiration de référence (ET₀) qui est déterminée par la météorologie du lieu uniquement : ensoleillement, température, vent, humidité de l'air d'une part et les précipitations d'autre part sur une période allant de mai à septembre inclus (Fig. 3). C'est une indication parlante de la situation de déficit hydrique des prairies. Dans la première partie de l'été notamment, le déficit climatique est modéré par la contribution de l'eau mise en réserve dans le sol pendant l'hiver. La période durant laquelle cette eau peut être mobilisée dépend donc notamment de la réserve utile. Cette réserve fait d'ailleurs l'objet de calculs encore assez approximatifs et peut varier fortement au sein même des parcelles. Au bout de quelques semaines, très souvent au cours du mois de juin, l'eau disponible est réduite et les effets sur la production commencent à se faire sentir. Les sols ne contribuent plus guère et la production consomme surtout les précipitations jusqu'à la fin de l'hiver suivant. La carte de la figure 3 indique ainsi qu'une très large proportion des surfaces de prairie peut être soumise systématiquement, plus ou moins tôt dans la saison à un déficit hydrique estival plus ou moins important. La région méditerranéenne présente un cas particulier en France où le déficit hydrique est très marqué et la production prairiale quasiment stoppée. Pour la zone tempérée, on note une vaste région qui part du centre ouest et remonte vers le nord est qui présente des déficits estivaux plus intenses que dans les autres.

Décile 2 : P-ET₀ May-Sept 1980-2009, Aladin RCP4.5

Décile 2 : P-ET₀ May-Sept 2070-99, Aladin RCP4.5

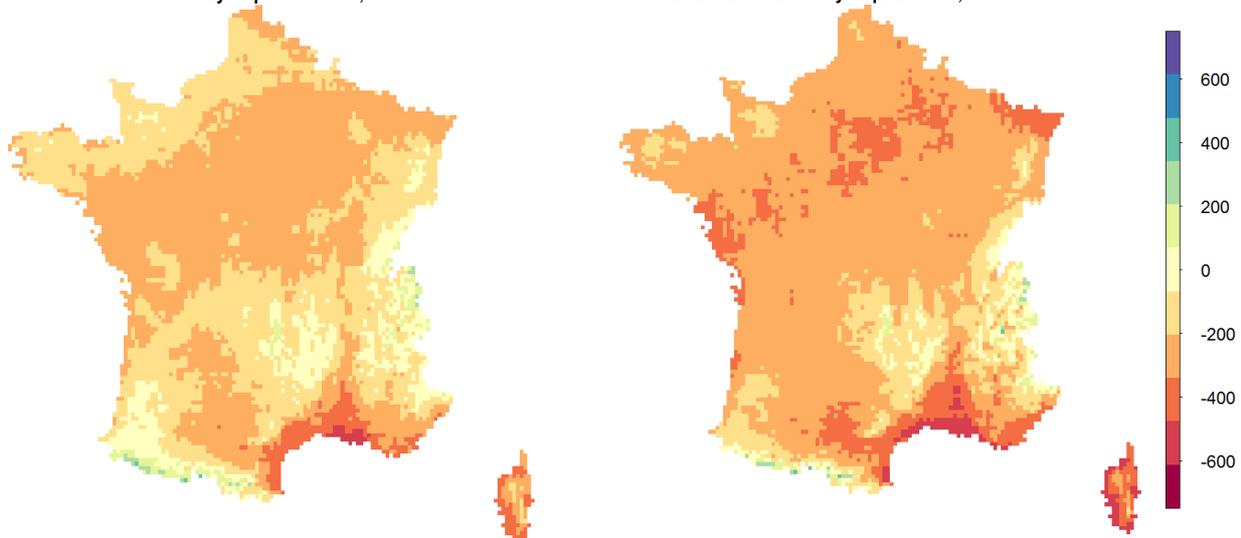


Figure 3 : A moyen terme (2050), pire bilan hydrique climatique P-ET₀ (une année sur cinq) actuel (à gauche) et dans un futur lointain (à droite) du scénario du GIEC RCP 4.5 et qui est équivalent au scénario 8.5 pour le futur proche, selon le modèle ALADIN Météo France. (D'après Déqué, 2015)

La ressemblance avec la carte de la figure 2 est d'ailleurs frappante. Selon les climatologues, le climat futur ne devrait qu'aggraver la situation estivale puisque l'accroissement de l'ET₀ ne s'accompagnera d'aucune augmentation des précipitations durant cette saison.

Par ailleurs pour bien des régions cet excès hivernal qui certes est essentiel pour la recharge des aquifères, pourrait même être une contrainte avec des sols trop humides ou saturés.

Les principales solutions adoptées pour alimenter les troupeaux en été visent à éviter la sécheresse et à résister à cette saison, y compris celles où la production est essentiellement basée sur l'herbe (Cf. l'exposé de JC Moreau et al. de ce volume).

En zone méditerranéenne où la question est avant tout celle de la pérennité de la prairie, les variétés sélectionnées tendent à concentrer leur potentiel de production maximal en hiver au début du printemps et en automne, les plantes mettant en œuvre une dormance plus ou moins complète durant l'été et mêmes occasionnellement arrosées ne poussent pas.

Inversement en zone tempérée, les efforts des sélectionneurs ont abouti à un net accroissement de la production estivale des variétés récentes. Mais cette productivité est bien celle des prairies arrosées par les pluies qui tombent certes irrégulièrement mais suffisamment tout de même pour permettre des productions non négligeables lorsqu'elles surviennent. Dans cette zone climatique, le progrès génétique obtenu en été et en automne a produit un accroissement du potentiel de reprise de végétation au retour de pluies et non pas une augmentation de la production en sec ni une véritable résistance à la sécheresse (Sampoux et al., 2010). On peut en conclure qu'un apport d'eau systématique en été serait un moyen intéressant de fortement augmenter la production d'herbe.

J'essaierai dans ce texte de montrer comment et combien l'eau peut modifier la production d'herbe, aux plans qualitatifs et quantitatifs, comment en déduire les besoins en eau et en particulier à quels moments il est intéressant d'apporter l'eau supplémentaire possible par irrigation, comment se présentent les questions de réserve en eau du sol. Je présenterai des résultats illustrant l'intérêt de l'irrigation pour augmenter la production. Je donnerai enfin quelques éléments sur la ressource et les perspectives concernant la disponibilité en eau pour l'irrigation.

1. Les effets de la sécheresse sur la production

1.1 La circulation de l'eau du sol vers la plante et l'atmosphère et l'intensité du déficit

Au cours de l'année, l'eau est après le rayonnement solaire, le facteur de production variable le plus important. La phénologie des plantes s'est adaptée à sa disponibilité autant qu'à la variation annuelle des températures et la sélection a largement utilisé cette variabilité naturelle. Un apport d'eau entraîne une augmentation de la conversion de l'énergie solaire en évaporation qui provoque un rafraîchissement pouvant limiter la destruction des structures végétatives.

Dans les cavités sous-stomatique insérées dans l'épiderme des feuilles, l'évaporation de l'eau assèche la surface des cellules en contact avec l'atmosphère, et l'eau se retire au sein des parois cellulaires dans des pores très fins, ce qui engendrent des tensions capillaires très importantes de plusieurs bars. Cette tension provoque en conséquence un déplacement de l'eau du xylème vers les surfaces évaporantes, à travers le réseau de parois végétales qui entoure les cellules vivantes, lesquelles prélèvent au passage une fraction de cette eau en circulation. Ce mouvement d'eau à longue distance dans la plante est très efficace. La dernière feuille déployée d'une luzerne de trois ans peut se trouver à plus de trois mètres de certaines des racines qui l'alimentent. L'alimentation en eau de la plante compense approximativement les pertes transpiratoires par absorption dans les horizons du sol colonisés par les racines où se fait l'essentiel du prélèvement, c'est-à-dire un peu au-dessous de la surface, et sur une profondeur de 20 à 30 cm. Pour autant, des réserves non négligeables sont disponible bien en-dessous, et notamment pour les plantes qui possèdent un pivot et qui peuvent entretenir une certaine densité racinaire en profondeur (luzerne, chicorée...). A la fin de l'été le profil d'humidité reste stable au moment où la consommation d'eau devient très faible, notamment du fait de la sénescence des feuilles et du dessèchement du sol dans les horizons colonisés par les racines. Il existe ainsi des relations entre la teneur en eau du sol colonisé par les racines et les réactions de la plante (Sinclair, 2005). Ces relations sont modulées par la demande climatique, la plante réagissant à des teneurs en eau plus élevées si la demande en eau est plus importante (Vadez et al., 2014) : la plante demande un sol plus humide en atmosphère sèche pour assurer la même productivité.

Le bilan entre l'absorption et la transpiration détermine par conservation de la masse la variation du volume d'eau dans la plante et ce sont les variations de ce volume par rapport au volume maximum que la plante peut contenir qui provoquent les variations d'état hydrique qui impactent la biologie de la plante. C'est cette teneur relative dans la plante que vise à conserver l'irrigation.

1.2 Les réponses de la production à l'irrigation

Les principes éco physiologiques à la base de l'action de l'irrigation sur la production estivale ont été synthétisés dans une publication précédente (Durand, 2007) et il ne s'agit ici que d'en rappeler les aspects les plus importants pour raisonner l'irrigation en vue d'une production abondante et de qualité.

1.2.1 Les réponses quantitatives

A la base de la production végétale, on trouve l'expansion cellulaire, laquelle n'est possible que si une quantité d'eau suffisante est présente pour assurer un gradient de potentiel hydrique entre et les vaisseaux qui les alimentent. Ces tissus en croissance sont extrêmement sensibles aux variations de potentiel hydrique. Cela fait de l'expansion des feuilles le phénomène le plus sensible à la sécheresse.

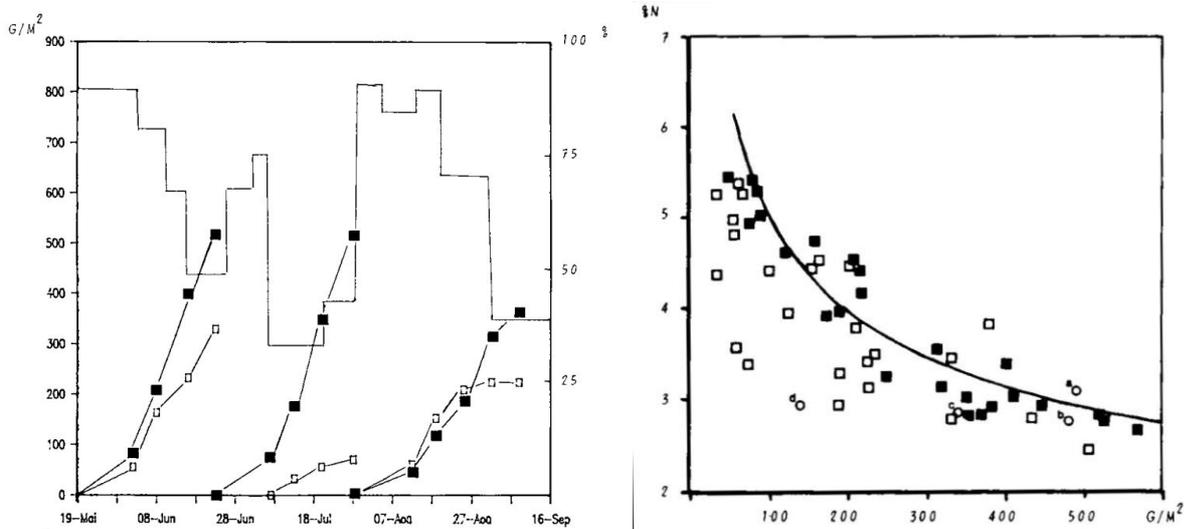


Figure 4 : Graphe de gauche : **Evolution de la masse de fourrage de luzerne en g/m² durant l'année 1982** pour trois repousses successives à Lusignan en conditions irriguée (carrés noirs) ou pluviale (carrés blancs). Le rapport ETR/ETO au cours de la repousse est indiqué en %. D'après Durand et *al.*, 1989. **Graphe de droite : relation entre le pourcentage en azote du fourrage et le rendement de la luzerne en G/m²**, mêmes expérience et figurés que pour le graphe de gauche. Les cercles sont reproduits de données tabulées de la littérature. La ligne indique la courbe du pourcentage d'azote critique pour la luzerne. D'après Lemaire et al 1989.

Ces principes sont bien illustrés pour la luzerne dans une expérimentation de 1982 (fig. 4, Durand et *al.*, 1989) et s'appliquent quelle que soit l'espèce, pour l'ensemble de la production végétative. L'effet de l'irrigation a varié de 50 % à la troisième coupe à 500 % environ pour la deuxième. Si l'impact de la sécheresse se manifeste juste après une coupe, comme lors de la deuxième repousse, la végétation redémarre lentement, l'interception du rayonnement est limitée et ainsi la quantité d'énergie solaire absorbée est réduite. Si en revanche cet impact se manifeste avec une intensité de même ampleur mais tardivement dans la repousse et après que l'indice foliaire ait atteint des valeurs voisines de celles permettant l'absorption de l'essentiel de l'énergie incidente, alors le principal effet sera une réduction de la production, mais avec un moindre impact sur le rendement final. C'est ce qu'illustre la troisième repousse de l'exemple de cette étude, malgré une sécheresse de même intensité que lors de la deuxième repousse. La réduction de l'efficacité de rayonnement ne s'observera que pour des intensités de déficit considérablement plus fortes que celles qui déclenchent l'arrêt de l'expansion du feuillage (Boyer, 1970). Ainsi l'impact du rendement sera-t-il beaucoup moins important (Durand et *al.*, 1989, Durand, 2007). L'excès d'assimilats par rapport à la demande en croissance des parties végétatives ralenties par la sécheresse est alloué aux parties souterraines si elles possèdent les organes capables de stocker des sucres non structuraux, comme les pivots de luzerne par exemple ou bien les gaines capables d'accumuler des fructanes chez les graminées. Cette allocation favorisée par la sécheresse est un facteur de survie durant la période de vie ralentie que subissent les plantes soumises à la sécheresse estivales et les aide à récupérer au retour des pluies.

1.2.2 Les réponses de la qualité du fourrage

Le manque d'eau est susceptible d'entraîner une sensible modification de la qualité du fourrage du fait d'une part de la modification des proportions des différentes parties de la plante et d'autre part de la composition de chacune de ces parties. En général, la sécheresse n'affecte pas fortement la relation entre les diverses parties des plantes fourragères, relations qui prennent la forme de loi d'allométrie. Ainsi le rapport feuille/tige chez la luzerne décroît avec le développement de la culture, de la même façon sur la culture pluviale ou irriguée (Lemaire et *al.*, 1989). Mais comme l'irrigation augmente considérablement la production, elle contribue à dégrader la valeur du fourrage pour ce qui est de la digestibilité et de la teneur en azote, dont les teneurs sont bien plus élevées dans les feuilles que dans les tiges. En revanche, comme la sécheresse affecte la fixation symbiotique de façon équivalente à son impact sur la croissance des tiges, on constate à même biomasse produite, une forte amélioration de la teneur en protéines des tissus produits en conditions irriguées. Dans le cas présenté (Figure 4) cet effet positif compense approximativement l'effet négatif de la dilution de l'azote par la croissance en biomasse ce qui aboutit à une absence d'impact négatif de l'irrigation sur la teneur en azote chez la luzerne. Le même phénomène peut se manifester mais moins systématiquement chez les graminées (Gonzalez Dugo et *al.*, 2012).

Dans ce cas, il peut arriver en effet que l'irrigation permette de mobiliser de l'azote minéral en surface, dans la mesure où en conditions irriguées, les horizons pauvres en azote sont très peu mobilisés pour satisfaire les besoins en eau de la culture. Ainsi, l'alimentation en azote des cultures irriguées est meilleur en général, sous réserve que les excès d'eau soient évités, soit parce qu'ils provoqueraient des lessivages, soit parce que le fonctionnement des nodosités des légumineuses en serait affecté. Autrement dit, l'irrigation améliore la teneur en protéines des fourrages produit par les prairies.

1.2.3 Réponse de la pérennité

Il a été observé assez souvent que l'irrigation qui « pousse » la production estivale à son maximum provoque parfois de la mortalité de plantes. C'est ce qu'ont observé par exemple Gosse et al. (1988) sur la luzerne dans l'expérience déjà étudiée sur la figure 4. En zone tempérée la luzerne perd bien plus d'individus durant la belle saison en irrigué que dans n'importe quelle autre situation climatique. Il est généralement observé que la principale cause de mortalité de plantes est la compétition pour la lumière plutôt que pour l'eau. Il en est d'ailleurs de même pour les graminées dont la densité de talle évolue bien moins en conditions sèches, pour autant que les variétés soient adaptées (Onillon, 1993, Poirier et al., 2014). L'irrigation des prairies devrait donc tenir compte de cette tendance, obtenir le maximum de rendement sur les repousses estivales n'étant pas un objectif à atteindre au détriment de la pérennité.

2. Techniques d'irrigation

2.1 Quand irriguer ?

Le maximum d'énergie disponible se situant sur les mois de juin et juillet, il serait idéal d'apporter les ressources en eau manquantes à cette période puisque c'est à ce moment d'une part que l'évapotranspiration aura un effet maximum de réduction de la température du couvert, et que la conversion du rayonnement solaire en biomasse sera la plus efficace. Après les coupes de printemps, l'irrigation sera d'autant plus efficace qu'elle sera plus précoce. Si les besoins en eau quantitatifs juste après la coupe ne sont pas les plus importants puisqu'à ce stade l'indice foliaire et le coefficient cultural d'évapotranspiration sont minimaux, il s'agit d'assurer la reprise la plus rapide possible et de ne jamais limiter la morphogenèse des parties aériennes à ce moment critique dont le rendement final dépend au premier ordre. On peut noter que lorsqu'une surface de luzerne est implantée en concurrence avec le maïs pour l'irrigation; il serait tout de même parfois intéressant d'organiser un ou deux passage d'irrigation sur la légumineuse en début de repousse sans provoquer de stress à la période de floraison du maïs, un peu plus tardive.

2.2 Combien apporter ?

L'irrigant fait intervenir dans son calcul l'objectif de la production sur le court et moyen terme et qui dépend des besoins du troupeau en fourrage de qualité, le besoin en eau pour les jours à venir et donc le bilan de la situation pédoclimatique de la parcelle ainsi que des prévisions météorologiques, de l'état de la réserve utile de son sol de son équipement et de son temps de travail. A cela s'ajoute de plus en plus régulièrement des contraintes réglementaires qui visent à assurer la disponibilité en eau pour l'ensemble des utilisateurs du bassin.

Si on se place dans une situation où l'eau d'irrigation est disponible, il faut prendre en compte les réserves du sol. Celles-ci dépendent de la réserve utile et du bilan entre l'irrigation, les pluies et l'évapotranspiration réelle (I+P-ETR). Un écart à ce bilan peut provenir du ruissellement, toutefois généralement limité en prairies, notamment si l'irrigation est réglée pour ne pas saturer les horizons superficiels trop vite, ce qui est plus que recommandé évidemment. Mais c'est une contrainte et cela suppose de segmenter parfois les apports hebdomadaires. Comme l'ensemble de la biomasse est récoltée, la quantité à apporter pour obtenir le maximum de production est proche de l'ET₀, sur quoi on peut donc piloter l'irrigation. En effet, l'allongement des feuilles pour les graminées ou des tiges pour les légumineuses, ainsi que la fixation symbiotique sont immédiatement réduits dès que la teneur en eau du sol dans les zones colonisées par les racine est inférieure à 100%, contrairement à l'évapotranspiration qui peut continuer sans réduction tant que la réserve du sol n'est pas inférieure à 50 ou 40 %. Toutefois, cette situation est surtout importante au début de la repousse. De plus, il est évidemment généralement difficile et très peu recommandé d'irriguer un couvert développé vers la fin de la période de repousse.

Les techniques d'irrigation en France ainsi que les doses ont été très largement optimisées dans les 20 dernières années, que ce soit par abandon de l'irrigation en planche, l'installation de capteur d'humidité ou de tension du sol, des bilans renseignés en ligne par des services de météorologie. Les fuites restent un sujet de préoccupation et l'entretien des lignes et engins d'irrigation est important.

D'ailleurs, dans la mesure où irriguer en plein jour ne change quasiment pas les quantités nécessaires, il serait recommander d'effectuer les opérations pendant la journée plutôt que la nuit comme l'y obligent certains arrêtés qui surestiment très largement les économies que cette disposition permettrait (Huber et Dubois de la Sablonnière, 1992).

2.3 Les ressources en eau et leur avenir sous changement climatique

Il est important de prendre en compte la ressource en eau d'irrigation. La situation est évidemment très différente dans la région Poitou-Charentes, où les rivières sont alimentées par des nappes superficielles qui ne peuvent être sollicitées par des forages sans impact sur le débit des rivières en été, et au contraire dans certaines vallées alpines où l'eau abonde, ou comme dans les zones de Provence desservies par les aménagements de la Compagnie du Bas-Rhône-Languedoc. Les nappes souterraines sont maintenant bien surveillées et présentent des taux de renouvellement plus ou moins compatibles avec leur usage pour l'irrigation. Des modèles de circulation de l'eau dans ces aquifères à la maille 1 km et à l'échelle du bassin versant existent aujourd'hui et ont été calibrés grâce à des réseaux de piézomètres assez denses. Les résultats de ces calculs et mesures sont disponibles quasiment en temps réel sur des portails internet dédiés ou inclus dans des services sur l'état de l'environnement comme par exemple celui mis en place par la Région Poitou-Charentes et aujourd'hui la région Nouvelle Aquitaine: <http://www.biodiversite-nouvelle-aquitaine.fr/bulletins-mensuels-de-situation-hydrologique-bsh/>. On y trouve l'état des nappes et les débits de rivières en de nombreux points d'irrigation mis à jour quotidiennement. Chacun est ainsi en mesure de trouver une information fiable pour relier un éventuel forage ou captage de rivière au débit mesurer. Rappelons que le débit d'un canon d'irrigation, de l'ordre de $60 \text{ M}^3\text{h}^{-1}$ soit $0,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, c'est-à-dire le dixième tout de même de certaines petites rivières en été. C'est pourquoi les règles de restrictions ou d'arrêt d'irrigation en été sont généralement bien comprises même si dans certaines régions, elles ont dû être édictées après que de lourds investissements d'irrigation aient été consentis par les agriculteurs et les agences publiques. Aujourd'hui, le débat s'est donc reporté sur la possibilité ou non de reporter les précipitations hivernales sur l'été en utilisant des retenues, bassines, ou bien en prenant en compte la recharge de nappes profondes, et en limitant l'écoulement vers l'océan.

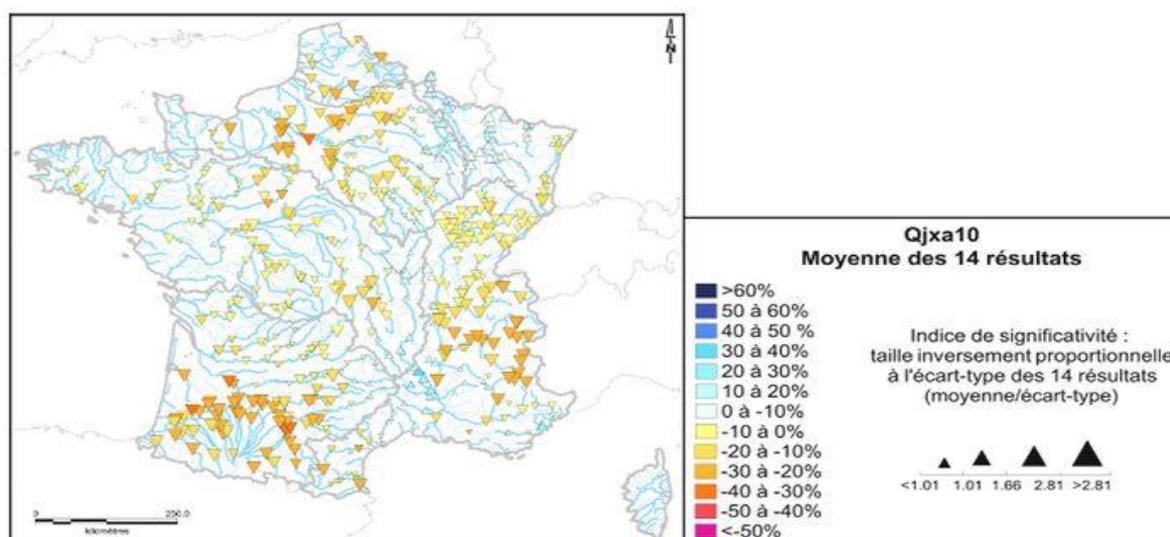


Figure 5 : Evolution pour 2045-2065 des débits de rivière en pourcentage de variation par rapport au débit moyen annuel simulé pour la période 1961-1990, établis pour 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques globaux). D'après le projet EXPLORE, Chauveau et al., 2013

L'avenir de cette ressource ne se présente pas sous les meilleurs auspices alors que les besoins en irrigation ne feront que croître. En effet, l'accroissement des températures, et malgré celle du CO₂ qui tend à réduire l'ET₀, entrainera une dégradation générale du bilan hydrique d'à peu près tous les bassins versant. Dans le bassin de Seine par exemple, un modèle hydrologique, de calcul d'évapotranspiration prenant en compte l'usage des sols et de débits de rivières a permis de préciser l'impact des changements climatiques résultant d'un scénario probable (si rien de sérieux n'est entrepris). Les hydrologues et climatologues anticipent ainsi une réduction générale des écoulements tout au long de l'année, avec des débits minimaux en forte baisse (Ducharne et al., 2003). Cela pourrait conduire à des baisses de recharge des nappes souterraines de l'ordre de 20 % et à des sols fréquemment plus secs qu'aujourd'hui. Pour les débits de rivière (Figure 5), dans l'étude EXPLORE commandée par le Ministère de l'Ecologie du Développement durable et de l'Energie, le groupement BRGM/ARMINE évoque des baisses de 10 à 40 % au nord et de 30 à 50 % au sud de la France (Chauveau et al., 2013) ! Dans le détail, la répartition temporelle de ces variations est diverse selon les régions mais la situation requerra une ouverture d'esprit de tous les acteurs économiques et sociaux bien plus marquée que celle révélée par les combats locaux plus ou moins rationnels.

Conclusions

Toutes les stratégies de transitions agro écologiques mettent en exergue la nécessité d'étendre les surfaces de prairies avec légumineuses pour alimenter les troupeaux de ruminants sur des territoires actuellement trop spécialisés. Si la vaste majorité de ces surfaces devront être gérées en pluvial, la ressource en eau étant trop rare ou l'investissement hors de proportion avec les besoins, il reste que de nombreuses régions pourraient recourir à l'irrigation de prairies pour sécuriser l'affouragement des troupeaux. Le potentiel productif d'une telle pratique ne saurait être sur estimé. Il s'agit de gains de productivité de 50% en année normale et bien plus élevés en année sèche, quelle que soit l'espèce ou le mélange considéré. Les impacts sur la qualité protéique seraient positifs notamment pour ce qui concerne les légumineuses mais aussi pour la valorisation de la minéralisation des matières organiques. Pour autant, les perspectives sur les ressources en eau invitent les acteurs à la plus grande prudence dans les investissements afin que les politiques de développement soient cohérentes avec la préservation de la ressource et ne créent pas davantage de conflits d'usages.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOYER J.S. (1970): Leaf enlargement and metabolic rates in corn, bean and sunflower at various leaf water potential", *Plant Physiology*, 46, 233-235.
- CHAUVEAU M., CHAZOT S., PERRIN C., BOURGIN P.Y., SAUQUET E., VIDAL J.P., ROUCHY N., MARTIN E., DAVID J., NOROTTE T. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 5-15.
- DEQUE M. (2015). Le changement climatique en France et en Europe atlantique: les domaines méditerranéens et tempérés. In Durand JL (ed), *Adaptation des Prairies Semées au Changement Climatique*. INRA. 223 .
- DUCHARNE, A., THERY, S., VIENNOT, P., LEDOUX, E., GOMEZ, E., & DEQUE, M. (2003). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *Vertigo*-la revue électronique en sciences de l'environnement, 4(3). <https://journals.openedition.org/vertigo/3845>
- DURAND J.L., LEMAIRE G., GOSSE G., CHARTIER M. (1989). Analyse de la conversion de l'énergie solaire en matière sèche par un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.) soumis à un déficit hydrique. *Agronomie* 9, 599-607.
- DURAND, J. L. (2007). Les effets du déficit hydrique sur la plante: aspects physiologiques. *Revue Fourrages*, n°190, 181-195.
- DURAND, J. L., LORGEU, J., PICON-COCHARD, C., & VOLAIRE, F. (2013). Ecophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique. *Revue Fourrages*, n° 214, 111-118.
- FERERES, E., VILLALOBOS, F. J., ORGAZ, F., MINGUEZ, M. I., VAN HALSEMA, G., & PERRY, C. J. (2017). Commentary: On the water footprint as an indicator of water use in food production. *Irrig Sci* (2017) 35: 83.
- GONZALEZ-DUGO, V., DURAND, J. L., & GASTAL, F. (2010). Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 529-544.
- GOSSE, G., LEMAIRE, G., CHARTIER, M., & BALFOURIER, F. (1988). Structure of a lucerne population (*Medicago sativa* L.) and dynamics of stem competition for light during regrowth. *Journal of Applied Ecology*, 609-617.
- HABETS, F., BOÉ, J., DÉQUÉ, M., DUCHARNE, A., GASCOIN, S., HACHOUR, A., THIÉRY, D. (2013). Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France. *Climatic Change* 121, 771-785.
- HUBER L., DUBOIS DE LA SABLONIERE F. (1992). L'aspersion est-elle synonyme de fortes pertes par évaporation pendant les heures chaudes de journées estivales ? *Perspectives Agricoles* 170, 59-64.
- LEMAIRE, G., DURAND, J. L., LILA, M. (1989). Effet de la sécheresse sur la digestibilité in vitro, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne (*Medicago sativa* L.). *Agronomie* 9, 841-848.
- ONILLON, B. (1993). Effets d'une contrainte hydrique édaphique sur la croissance de la fétuque élevée soumise à différents niveaux de nutrition azotée: étude à l'échelle foliaire et à celle du couvert végétal (Doctoral dissertation, Poitiers).
- POIRIER, M., DURAND, J. L., & VOLAIRE, F. (2012). Inter-and intra-specific variability in persistence of perennial grass production under water deficits and heat waves. *Global Change biology*, 18(12), 3632-3646.
- Sinclair, T. R. (2005). Theoretical analysis of soil and plant traits influencing daily plant water flux on drying soils. *Agron. J.* 97, 1148-1152.
- SAMPOUX, J. P., BAUDOUIN, P., BAYLE, B., BEGUIER, V., BOURDON, P., CHOSSON, J. F., PIETRASZEK, W. (2011). Breeding perennial grasses for forage usage: an experimental assessment of trait changes in diploid perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars released in the last four decades. *Field Crops Research*, 123(2), 117-129.
- VADEZ, V., KHOLOVA, J., MEDINA, S., KAKKERA, A., & ANDERBERG, H. (2014). Transpiration efficiency: new insights into an old story. *Journal of Experimental Botany*, 65(21), 6141-6153