



LES ATOUTS DU MAÏS DANS LA PERSPECTIVE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE



// RECHERCHES // ÉCOLOGIE // CULTURE // PRATIQUES // IRRIGATION //

TROUES // ÉL FVAGE // BIODIVERSITÉ // TERRITOIRES // AGRICULTEURS // PAYSAGES / // RECHERCHES // ÉCOLOGIE // CULTURE // TERRITOIRES // IRRIGATION // CROISSANCE //

1/ LE RÉCHAUFFEMENT : UNE RÉALITÉ	P5
2/ L'AGRICULTURE, PROBLÈME OU SOLUTION ?	P7
3/ SOLUTION N°1: STOCKER DU CARBONE DANS LE SOL	P11
4/ SOLUTION N°2: SUBSTITUER LE CARBONE FOSSILE PAR DU CARBONE ORGANIQUE	P13
5/ SOLUTION N°3 : ÉCONOMISER L'ÉNERGIE	P17
S/ SOLUTION N°4 : SUBSTITUER L'AZOTE MINÉRAL PAR L'AZOTE ORGANIQUE	P20
7/ SOLUTION N°5 : LA GÉNÉTIQUE	P23
8/L'INTENSIFICATION: LA SOLUTION?	. P26

Le maïs est - par sa physiologie, son potentiel de production de biomasse, l'efficience de sa photosynthèse, son aptitude à recycler les effluents organiques, sa contribution dans l'économie de carburants fossiles par la méthanisation ou la production d'éthanol - un contributeur efficace à l'atténuation des émissions de Gaz à Effet de Serre.



Mais c'est surtout dans le « gisement » de carbone séquestrable constitué par le retour des résidus de culture au sol que réside le plus gros potentiel d'atténuation des émissions.

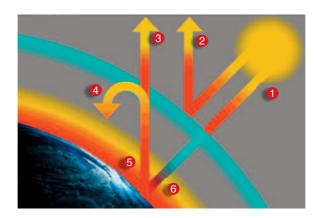




# /// LE RÉCHAUFFEMENT : UNE RÉALITÉ ///

Les Gaz à Effet de Serre (GES) jouent un rôle majeur dans la régulation du climat. Ils permettent de maintenir les températures aux alentours de 15°C en moyenne (au lieu de – 18°C s'ils étaient absents).

Effet de serre : • Rayonnement solaire • Rayonnement diffusé par l'atmosphère (nuages, gaz, poussières) • Infrarouges s'échappant dans l'espace • Infrarouges absorbés par les gaz à effet de serre et réémis vers le sol • Rayonnement réémis par le sol • Rayonnement absorbé par la surface du sol

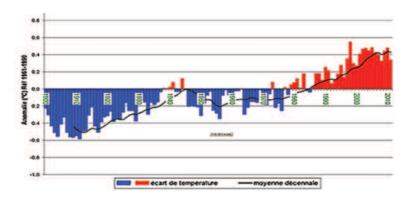


L'effet de serre est principalement dû à la vapeur d'eau et aux nuages (72%), le reste au  $CO_2$  (28%) et autres gaz. Parmi ces GES, on retrouve principalement le méthane ( $CH_4$ ), le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Chacun de ces GES a un effet différent sur le réchauffement. Le Pouvoir de Réchauffement Global\* du méthane est 25 fois supérieur à celui du  $CO_2$  quand celui du protoxyde d'azote est 298 fois supérieur.

<sup>\*</sup> Le PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) est mesuré par rapport au PRG du CO2 fixé à 1 par convention.

La plupart des scientifiques s'accordent pour dire que le réchauffement observé depuis un siècle commence à sortir des limites des fluctuations historiques déjà observées et se distingue par la vitesse d'évolution des températures. Même si on constate une légère « pause » depuis le début des années 2000, les années 2014 et 2015 sont les plus chaudes jamais enregistrées et les concentrations en GES, particulièrement en gaz carbonique ( $CO_2$ ) continuent à augmenter.

Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, sur le globe, en surface, par rapport à la normale de référence, (Données du Climatic Research Unit, University of East Anglia. Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0°C).



L'enjeu majeur de la 21 ème Conférence de la Convention - cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, dite COP 21 - est de limiter cette dérive à moins de 2°C par l'engagement des pays signataires à limiter leurs émissions.

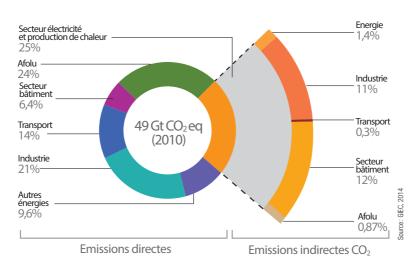


## /// L'AGRICULTURE, PROBLÈME OU SOLUTION ? ///

#### Part de l'agriculture dans les émissions de GES

Le bilan des émissions totales du monde était estimé en 2012 à 49 000 millions de tonnes d'équivalent  $\mathrm{CO}_2$ , soit des émissions moyennes par habitant et par an de 6 tonnes (éq. $\mathrm{CO}_2$ ). Les émissions du « secteur des terres » sous la dénomination « AFOLU » (Agriculture, Forestry and Other Land Use), qui regroupe les activités agricoles et les effets dus aux changements d'affectation des sols (surtout la déforestation), pèsent un quart du total (schéma ci-dessous).

### → BILAN DES ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR DANS LE MONDE



L'agriculture proprement dite, avec 11% des émissions, est surtout concernée par des émissions de  $N_2O$  (par les engrais azotés pour les cultures) et de  $CH_4$  (par la fermentation entérique des ruminants). Pour les émissions de  $CO_2$ , le bilan des cultures est largement positif car l'énergie nécessaire aux consommations intermédiaires (carburants, fabrication des engrais) est largement contrebalancée par le « pompage » de carbone exercé par les plantes et la séquestration d'une partie de ce carbone dans le sol avec les résidus de cultures.

En France, les émissions globales du « compartiment » agriculture proprement dit sont chiffrées en 2012 à 89,7 Mt d'éq.CO $_2$ /an (CITEPA 2014), dont 58% d'émissions de N $_2$ O et 42% de CH $_4$ . L'agriculture représenterait ainsi 18,1% du total des émissions nationales (490 Mt d'éq.CO $_2$ /an). Ces émissions ont baissé de 11,4 % depuis 1990, en particulier du fait de la diminution du cheptel bovin et de la baisse de la consommation d'engrais azotés.

#### Potentiel d'atténuation de l'agriculture

L'agriculture doit, et, a les moyens de contribuer à répondre aux défis climatiques et alimentaires. Elle doit le faire sans mettre en péril son potentiel de production mais également en intégrant largement les enjeux environnementaux. Cela nécessitera de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation mais aussi d'adaptation, en utilisant tous les moyens et leviers disponibles.

Le dernier rapport du GIEC (2014) rappelle - et c'est nouveau - le rôle que l'agriculture (et la forêt) peuvent jouer dans la captation du  ${\rm CO_2}$  par la séquestration temporaire du carbone dans les sols ou les biomatériaux et par la substitution du carbone fossile par le carbone issu de la biomasse. Le GIEC a analysé pour la première fois l'ensemble du secteur d'émission agricole, forestier et pédologique. Avec l'apport des filières aval de transformation, le « secteur des terres » pourrait contribuer de 20 à 60% au potentiel d'atténuation planétaire de toutes les émissions de GES d'ici 2030. Pour l'Europe la contribution de ce secteur pourrait s'élever à un quart de l'engagement pris par l'Europe de réduire de 40% ses émissions de GES d'ici à 2030.

### Le constat : le maïs est l'une des plus puissantes machines à fixer le carbone

Les grandes cultures constituent de véritables aspirateurs de carbone grâce au mécanisme de « pompage » de la photosynthèse. Elle leur permet de prélever le CO<sub>2</sub> atmosphérique, de le stocker sous forme de carbone organique et de rejeter de l'oxygène dans l'air. Ce carbone organique, c'est à dire la biomasse, peut ensuite être exportée du champ (productions agricoles), décomposée dans le sol (minéralisation) ou encore stabilisée et stockée dans le sol (humification). Ce stockage peut être plus ou moins long selon les conditions du milieu.

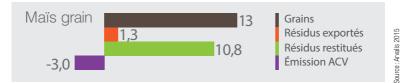
Le maïs, comme le sorgho et la canne à sucre, dispose d'un métabolisme (dit en «  $C_4$  ») qui fixe plus de  $CO_2$  et produit plus de biomasse carbonée à l'hectare que les autres plantes. Elles « économisent » une part importante de l'énergie issue de la photosynthèse, car elles n'ont pas de photorespiration, ce qui est une forme d'adaptation aux températures élevées. C'est ce qui explique aussi la meilleure efficience dans l'utilisation des intrants que sont l'eau et l'azote. De même, comme le suggère l'équation de base de la photosynthèse, la fixation du carbone et la production d'oxygène vont de pair : pour un rendement de 10 tonnes de grain, un hectare de maïs produit 10 tonnes d' $O_2$  par an :

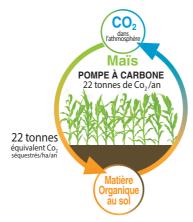
$$CO_2 + H_2O --> sucres + O_2$$



A partir du rendement, il est possible de chiffrer l'effet « pompe à carbone » net d'une culture à l'échelle française. Ainsi, pour le maïs grain, avec un rendement moyen calculé sur les années récentes de 9.57 t/ha, le bilan de la fixation de carbone présente un solde net de 22 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par hectare et par an. C'est la différence entre les quantités de CO<sub>2</sub> fixées par la biomasse aérienne (grains, résidus de culture exportés ou restitués) et le CO<sub>2</sub> nécessaire aux consommations intermédiaires (consommation de carburant et fabrication des engrais).

1 hectare de grain = 22 tonnes de CO<sub>2</sub> captés chaque année.





Ainsi, en France, l'ensemble des grandes cultures captent au total deux fois plus de carbone que les forêts (271 Mt CO<sub>2</sub> contre 134 Mt CO<sub>2</sub> pompés) annuellement. Pour être plus précis, si l'on tient compte du carbone pompé par la biomasse racinaire (en plus) et du carbone réémis par l'humification des résidus de récolte (en moins), le bilan net de cette « pompe » est encore de 200 Mt CO<sub>2</sub>.



### SOLUTION Nº1

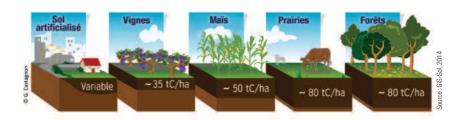
### /// STOCKER DU CARBONE DANS LE SOL ///

Le maïs par sa production de biomasse et la restitution au sol des résidus de culture constitue un potentiel de séguestration énorme de carbone.

L'horizon superficiel des sols mondiaux stocke entre 1500 et 2400 milliards de tonnes de carbone organique (source : ADEME). Aussi, une augmentation de ce stock, même minime, pourrait avoir un rôle pour limiter le flux de GES vers l'atmosphère. Par exemple, une augmentation annuelle (théorique, car elle n'est pas possible partout) de 4 pour 1000 du stock de carbone des sols, compenserait l'ensemble des émissions mondiales annuelles de GES provenant de l'utilisation de carbone fossile!

Ainsi la situation actuelle du stock de carbone dans les sols français n'est pas alarmante. Si on estime le carbone stocké, les grandes cultures séquestrent autant de carbone que les forêts françaises (d'après Arvalis), soit environ 65 Mt CO<sub>2</sub> annuellement.

> Les valeurs de stocks estimées dans les premiers 30 cm de sol vont de 20 à 35 t/ha pour les iachères ou les vignobles. 50 t/ha pour les sols cultivés, 60 à 80t/ha pour les prairies et forêts.



[11]

Il y a un lien entre le rendement biomasse d'une culture et l'augmentation du stock de carbone organique dans le sol. Le maïs grain produit une biomasse élevée : pour une tonne de grain exportée, quasiment une tonne de biomasse est restituée, sous forme de résidus de culture aériens et racinaires. Ce potentiel constitue un gisement brut annuel de 100 millions de tonnes de résidus carbonés à l'échelle européenne. De plus, les résidus de récolte du maïs sont ligno-cellulosiques avec un rapport C/N (carbone/azote) élevé, voisin de 50. Ces propriétés favorisent la formation d'humus stable tout en assurant l'alimentation microbienne nécessaire à la décomposition de ces résidus et sont donc propices au stock de carbone dans les sols.

La transformation de ce gisement en carbone séquestré à long terme dépend aussi de la façon dont les résidus sont traités et sont donc propices au stockage du carbone dans les sols. Des bonnes pratiques de gestion de ces résidus permettent d'augmenter ce « rendement » comme leur broyage précoce après la récolte et leur incorporation superficielle (mulching). En revanche des travaux récents montrent que le stockage de carbone et le bilan GES sont peu affectés par les pratiques de travail du sol, et comptetenu de la diversité des situations, on s'en tiendra donc aux pratiques les plus adaptées aux conditions locales.

Au final, on estime que la plante ma $\ddot{}$ s permet de stocker à long terme dans le sol 2,2 tonnes équivalent  ${\rm CO_2}$  par hectare et par an.





### SOLUTION Nº2

### /// SUBSTITUER LE CARBONE FOSSILE

### PAR DU CARBONE ORGANIQUE ///

Les équivalences énergétiques montrent qu'une tonne de biomasse végétale (paille ou grain) a une valeur énergétique comparable à une tonne de bois et à environ la moitié d'une tonne de combustible fossile. Les possibilités de substitution des sources énergétiques par la biomasse issue des grandes cultures sont nombreuses et déjà à l'œuvre. Dans l'Union Européenne, 500 000 hectares (soit 3.5% du maïs européen) sont transformés en éthanol, 1 100 000 hectares (7% des surfaces) servent à la méthanisation ce qui représente 5 millions de tonnes de substitution d'équivalent pétrole, 1 million d'hectares de maïs est transformé par l'industrie amidonnière européenne dont 40% sont destinés à des utilisations non alimentaires. Demain, les cannes de maïs pourront être aussi une ressource carbonée utilisable à des fins énergétiques, à condition de l'arbitrer avec le choix de la séquestration dans le sol selon les besoins et les contextes pédo-climatiques. Les premières réalisations d'usines de ces biocarburants dits « de seconde génération » sont en cours.

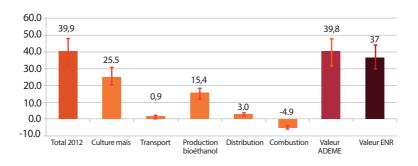
L'usine de bioéthanol d'Abengoa de Lacq (Pyrénées Atlantiques) transforme 525 000 tonnes de maïs par an, soit 13% de la production du sud-ouest, en 250 millions de litres. Elle produit aussi 160 000 tonnes de drèches, source de protéines pour l'alimentation animale. Une usine de cogénération à partir de biomasse (pailles de maïs et de blé) voisine est en cours de réalisation.



La substitution des carburants d'origine fossile par les biocarburants améliore les bilans environnementaux. Tous les biocarburants incorporés respectent les critères de durabilité imposés par la directive européenne « énergies renouvelables » (2009/28/CE) adoptée en 2009. L'ADEME s'est livré en 2010 à une étude complète des Analyses de Cycle de Vie des carburants de première génération consommés en France. Les biocarburants (biodiésel et bioéthanol) affichent des bilans énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre plus favorables que les carburants d'origine fossile (gazole et essence).

Ces bilans sont calculés sans prise en compte de changement d'affectation des sols, c'est-à-dire en supposant que les surfaces dédiées aux biocarburants ne se font pas au détriment (par substitution) de zones humides ou de forêts. Dans ces conditions, les bioéthanols issus de betterave, de blé ou de maïs et les biodiésels de colza ou de tournesol permettent de diminuer les émissions de GES de 50 à 80%. Les biocarburants français permettent d'éviter l'émission d'environ 5 millions de tonnes (1 million de tonnes pour le seul bioéthanol) d'équivalent  $\mathrm{CO}_2$  par le secteur des transports.

Concernant le maïs, les estimations les plus récentes (PWC, 2014) montrent que les émissions de GES liées à 1 MJ de bioéthanol de maïs sont de 39.9 g éq. $CO_2$  soit 44.2% de l'impact lié à la consommation d'essence (90.1 g éq. $CO_2$  /MJ). La contribution de l'étape culture représente 25.5 g du total (fabrication des engrais, pertes de  $N_2O$ ) et la production d'éthanol proprement dite 15 g éq. $CO_2$ . Les valeurs sont cohérentes avec les autres études ADEME et ENR.

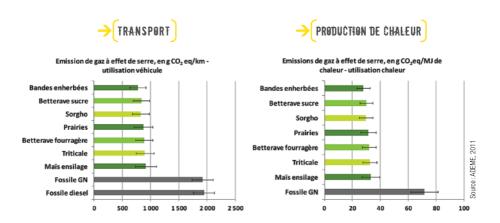


### Développer une filière de méthanisation à base de maïs comme en Allemagne est un facteur d'atténuation des émissions GES.

L'Allemagne a fait le choix d'une filière de méthanisation agricole qui répond à des enjeux multiples : lutte contre les GES, substitution énergétique, valorisation des effluents, compétitivité des entreprises agricoles.

Des travaux menés par l'ADEME en France confirment les réductions d'émissions de GES de la filière de méthanisation par rapport aux filières fossiles, comprises entre 50% et 70% selon les cultures et leur taux d'incorporation, hors effet de changement d'usage des sols. Ils montrent surtout que l'introduction de cultures énergétiques n'est pas de nature à annuler les réductions intéressantes d'émissions de GES d'une filière de méthanisation par rapport à des équivalents fossiles. Avec un substrat à base de lisier, l'augmentation du taux d'incorporation des cultures énergétiques dans les méthaniseurs va même jusqu'à réduire les émissions de GES par MJ de biométhane obtenu du fait de la réduction des étapes de transport et au potentiel méthanogène supérieur des cultures énergétiques par rapport au lisier.

Comparaison des émissions de gaz à effet de serre de filières de méthanisation à partir de différents substrats comparés avec l'utilisation de carburants fossiles



L'exemple allemand montre aussi qu'après avoir essayé plusieurs solutions, l'ensilage de maïs s'est révélé de loin le substrat le plus efficace et donc le plus utilisé dans les processus de méthanisation en Allemagne, car outre sa facilité de récolte et de stockage (avec une bonne conservation) c'est celui qui fournit le plus d'énergie à l'hectare en raison de sa productivité biomasse : 22 à 26 000 KWh contre 10 à 15 000 KWh pour l'ensilage d'herbe, 12 à 15 000 KWh pour les céréales.

Une tonne de maïs ensilé produit  $100~\text{m}^3$  de méthane. Le  $\text{CH}_4$  a un pouvoir calorifique de 9.89~KWh par  $\text{m}^3$ , une tonne de maïs dégage donc une énergie potentielle de 989~KWh. Avec un rendement moyen des méthaniseurs et selon la destination, une tonne de maïs dégage 365~KWh d'énergie sous forme de chaleur ou 490~kWh sous forme d'électricité.

#### INSTALLATION DE MÉTHANISATION EN ALLEMAGNE



Source: Jean-Paul Renoux

Tout le carbone du substrat maïs n'est pas transformé en méthane. La partie restante se retrouve dans le digestat qui peut être réutilisé au champ sous forme d'engrais. On retrouve aussi dans ce digestat la quasi-totalité des minéraux contenus dans le substrat : phosphore, potasse et aussi azote qui, s'ils sont épandus sous une forme solide, limitent les émissions dues aux pertes par volatilisation.



#### Concilier compétitivité et amélioration du bilan énergétique du mais grain.

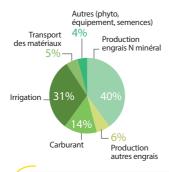
Le programme « AGRIBALYSE » réalisé sous l'égide de l'ADEME a permis des bilans complets des Analyses de Cycle de Vie (ACV) de nombreux produits dont le maïs grain. Ce calcul, basé sur des itinéraires techniques moyens, recense les émissions directes au champ et les consommations d'énergie nécessaires à la production qui lui sont liées. L'analyse montre les postes sur lesquels doivent porter les économies. Pour le bilan énergie et surtout celui des émissions (N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>), c'est le poste des engrais qui est le premier concerné. Pour l'énergie, c'est aussi l'irrigation, mais seulement un quart des surfaces de maïs français y ont recours et, de plus, la majorité des pompes utilisent l'électricité, source largement décarbonée en France. Compte-tenu de la productivité du maïs, les résultats calculés à la tonne sont parmi les meilleurs des grandes cultures. Cela est encore plus vrai pour le maïs fourrage cultivé sans irrigation et utilisant largement les engrais organiques.

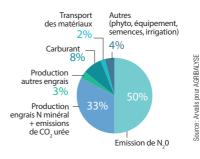


#### → POIDS DES DIVERSES ÉTAPES DE LA PRODUCTION DE MAÏS GRAIN :

#### SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

#### SUR LES ÉMISSIONS DE GES





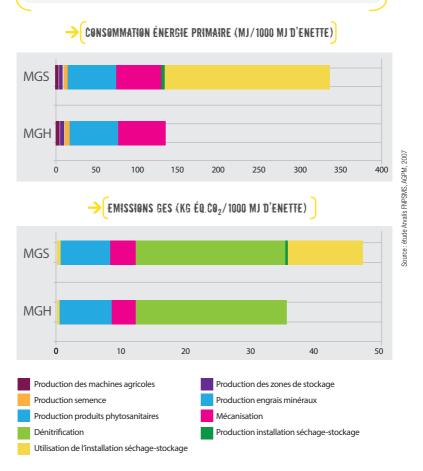
Résultat des ACV du maïs grain et du maïs fourrage en France et répartition par poste. L'énergie primaire non renouvelable utilisée (en MJ) est de 4157 MJ pour le maïs grain et de 1202 MJ pour le maïs fourrage et les émissions de respectivement de 317 kg éq. $\rm CO_2$  et de 192 kg éq. $\rm CO_2$  par tonne.

La filière maïs française recourt au séchage du grain pour le ramener à 15% d'humidité pour sa mise en marché. Cette pratique a l'avantage d'utiliser au maximum le potentiel climatique du pays et aussi de mieux contrôler la qualité sanitaire des grains. En pratiquant le séchage sur pied, qu'il soit partiel (USA, Italie) ou total (Roumanie, Ukraine), ces pays se privent d'un potentiel important en utilisant des variétés suffisamment précoces pour pouvoir être séchées sur pied avant l'hiver, mais économisent les frais liés au séchage et limitent le recours à l'énergie fossile nécessaire au fonctionnement des séchoirs.

Depuis 25 ans cependant, la France s'est attachée à réduire cette dépendance énergétique. D'abord par l'amélioration des séchoirs (dryération, recyclage de l'air chaud), ensuite par l'utilisation d'autres sources d'énergie non fossiles, notamment issues de la biomasse (four à paille, rafles de maïs, plaquette de bois), enfin et surtout, par l'utilisation bien comprise du réchauffement climatique avec des semis plus précoces, et avec l'aide du progrès génétique (des vitesses de dessiccation plus rapides), le taux d'humidité à la récolte a baissé de 3 à 5 points en moyenne depuis 15 ans. Mais la baisse parallèle du prix du grain ces dernières années, maintient le poids relatif du séchage dans les coûts de production à un niveau élevé. La diminution du recours au séchage artificiel n'est donc pas qu'un enjeu climatique pour la filière, c'est aussi un enjeu économique.

Mais dans ce domaine d'autres voies sont possibles comme le développement des filières en voie humide. Des « trains complets » destinés aux amidonneries (où les maïs sont retrempés) transportent désormais des maïs humides. De même, le développement rapide du maïs humide en grain ensilé ou inerté (CCM-Corn Cob Mix) pour les porcs et, plus récemment, pour les taurillons supprime le coût économique et environnemental du séchage. En France, les surfaces dépassent aujourd'hui 150 000 hectares et sont en constante progression.

La comparaison des bilans environnementaux du maïs grain humide (MGH) par rapport au maïs grain séché (MGS) affichent des gains de l'ordre de 40 à 60% pour l'énergie et de 30% pour les émissions GES.





La substitution de la fertilisation azotée minérale par la fertilisation azotée organique et l'efficience de l'azote dans la plante maïs contribuent à l'atténuation des émissions  $N_2$ 0.

Nous avons vu que l'agriculture est mise en cause aussi pour les émissions d'azote ( $N_2O$ ). Concernant les cultures, la part de protoxyde d'azote émise par le secteur agricole est corrélée forfaitairement à la quantité d'azote minéral épandue. Le maïs par sa place importante et ancienne dans les systèmes de polyculture-élevage contribue déjà à l'autonomie des exploitations (souvent de taille moyenne ou en monoculture) et à ce qu'on appelle désormais « l'économie circulaire ». La plante maïs a une aptitude particulière à bien valoriser l'azote organique. C'est ce que confirme un rapport du Commissariat au Développement Durable de septembre 2013, la fertilisation de 57% des maïs fourrage et 22% des maïs grain est d'origine organique. C'est le taux le plus élevé des grandes cultures.

D'autres facteurs d'atténuation des émissions de N<sub>2</sub>O sont déjà à l'œuvre :

- Par l'efficacité de sa photosynthèse (plante en C<sub>4</sub>), le maïs possède une efficience dans l'utilisation de l'azote supérieure à la plupart des plantes cultivées : 2 kg d'azote à apporter sous forme d'engrais par quintal produit, chiffre qui peut même baisser dans les rendements élevés.
- Son cycle se déroulant en été, le maïs profite pleinement de l'azote issu de la minéralisation du sol qui contribue en moyenne à un tiers de ses besoins.
- La pratique du fractionnement des apports est quasiment généralisée, ce qui augmente le coefficient d'utilisation des engrais.

Et d'autres pratiques vertueuses doivent être encouragées :

- L'agriculture de précision, les capteurs sur les plantes, permettent d'apporter la juste dose pour satisfaire les stricts besoins des plantes au bon moment. Dans cet esprit, la fertigation dans les sols légers doit être encouragée.
- L'enfouissement des engrais au moment de l'apport, et notamment de l'épandage des engrais organiques, doit se généraliser pour limiter les fuites dans l'atmosphère.
- La pratique du mulching des résidus de culture permet aussi de réduire la libération de N<sub>2</sub>O dans l'atmosphère en limitant la minéralisation directe à l'automne.
- La substitution des graminées fourragères par des légumineuses comme la luzerne dans les assolements avec maïs fourrage limite encore plus le recours aux engrais minéraux.
- La couverture des fosses de stockage à lisier et leur utilisation rapide dans des filières de méthanisation limitent aussi les fuites.







### L'adaptation et la sécurisation des itinéraires techniques au service de l'adaptation aux changements climatiques.

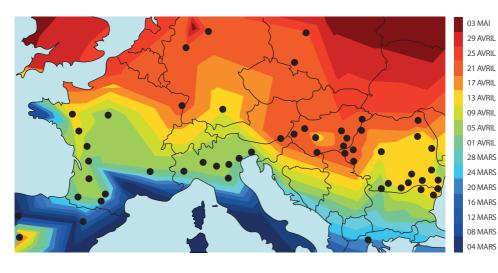
En ce qui concerne les cultures, et particulièrement le maïs, des stratégies d'adaptation sont déjà à l'œuvre, comme l'esquive grâce à des semis de plus en plus précoces, l'augmentation de l'efficience dans l'utilisation de l'eau et de l'azote. D'autres comme la création de réserves en eau pour l'irrigation, l'agriculture de précision, vont prendre le relais. Mais les progrès les plus attendus pour adapter les cultures aux changements climatiques vont provenir de la génétique.

### La génétique au service de l'adaptation aux changements climatiques.

Le progrès génétique sur la plante maïs est une constante de sa longue histoire, mais depuis un siècle, avec l'introduction du phénomène de l'hybridation, il s'est accéléré et maintient depuis une vitesse constante de plus de 1% par an. Axé principalement sur le rendement, il a permis une amélioration constante de l'efficience de la plante jusqu'à en faire la plus efficace des grandes cultures. La tentation d'en faire une plante plus riche en azote ne peut se faire qu'au détriment de l'efficacité photosynthétique de la plante dans la fabrication de biomasse. L'utilisation bien comprise des qualités de chaque culture au bénéfice de l'atténuation des émissions de GES (et particulièrement du  $\mathrm{CO}_2$ ) conduit à privilégier le maintien d'un progrès génétique élevé dans la production de biomasse à partir du maïs.

Mais l'axe principal des gigantesques moyens publics et privés mis au service de l'amélioration variétale concerne bien l'adaptation aux changements climatiques car la culture du maïs est pratiquée sur tous les continents et sous toutes les latitudes. L'amélioration des performances sous stress hydrique, la tolérance au froid pour faciliter les semis précoces et les stratégies d'esquive, l'accélération de la vitesse de remplissage finale (« dry down ») pour faciliter le séchage naturel sur pied, la tolérance aux maladies du feuillage pour maintenir l'activité photosynthétique quelque soit l'aléa climatique, sont stratégiques pour la production mondiale. L'ensemble des techniques modernes de sélection végétale, regroupées sous le terme générique de sélection génomique, nous promet la multiplication par 3 du progrès génétique maïs dans les années qui viennent. Cela se fera aussi au bénéfice de l'environnement.

Simulation des dates de semis possibles en Europe à partir d'un modèle de croissance du maïs (APSIM) à partir d'un réseau européen de stations d'observation.



ource: (Harrison et al, APSIM, 2012)

### L'irrigation raisonnée et le stockage de l'eau au service de l'efficience des cultures et à l'atténuation des émissions

Le changement climatique doit conduire à réviser la vision du grand public à l'égard de l'irrigation et du stockage de l'eau comme le souligne fortement le rapport 2014 du GIEC. Assurer le fonctionnement normal des plantes permet d'augmenter l'efficience de tous les intrants et notamment de l'azote. L'irrigation stimule la minéralisation estivale des sols, libérant de l'azote organique directement utilisable par les racines. La sécurité des rendements permet d'ajuster exactement les besoins en engrais en limitant les gaspillages et les fuites vers le milieu.

Le GIEC souligne aussi l'importance nouvelle du stockage de l'eau, y compris en Europe, afin de pouvoir satisfaire les nouveaux besoins agricoles en eau en prévenant les conflits d'usages. Le stockage doit être considéré comme un moyen de l'adaptation, un outil de gestion des risques pour la France. Cette vision est confortée par des études comme Garonne 2050, élaborée par l'Agence de l'eau Adour-Garonne, qui a montré que la mise en œuvre d'un scénario « sobriété » (réduction de 20% de l'allocation en eau pour l'agriculture) aboutirait à un effondrement du nombre d'exploitations agricoles (-80 à -90%), de la surface irriguée (-50%) et de la production agricole et que le scénario « stockage de l'eau » permettrait au contraire de maintenir le nombre d'exploitations, tout en soutenant les étiages en été au profit du milieu aquatique et de ses usages. « Il convient par conséquent de sortir de la vision actuelle centrée sur la seule « sobriété » et de mettre en œuvre une politique active et pertinente d'infrastructures et d'aménagements hydroagricoles sur tout le territoire. » (Rapport N° 14056 du CGAER, sept 2014).

La France a la chance de disposer d'une ressource en eau globalement très abondante et qui le restera malgré le changement climatique. Or, cette ressource est encore très peu stockée et mobilisée comparée à d'autres pays (de 2 à 3% des écoulements annuels, contre par exemple 50% sur l'Ebre en Espagne). En réduisant ainsi son exposition aux risques climatiques, l'agriculture française pourra apporter sa contribution à l'effort d'atténuation en même temps qu'à la sécurité alimentaire mondiale.



### L'intensification raisonnée est favorable à la séquestration du carbone et à la limitation des GES.

Le débat de l'intensification est en train de ressurgir devant la double nécessité d'assurer la sécurité alimentaire mondiale tout en limitant les effets sur l'environnement et ce, malgré la raréfaction des terres arables. Comme le souligne l'approche agroécologique, l'intensification améliore l'efficience de tous les intrants et est finalement la meilleure alliée de l'atténuation des émissions. Le maïs grain comme le maïs fourrage sont les champions des faibles émissions à la tonne produite. L'augmentation et la sécurisation des rendements par le soutien de l'irrigation et le progrès génétique, vont dans le sens d'une atténuation des émissions des GES par tonne produite et de la durabilité économique et environnementale des exploitations agricoles.



## Les atouts du mais dans la perspective du réchauffement climatique

### ATTÉNUATION

#### CO<sub>2</sub>: POTENTIEL BIOMASSE ET DE FIXATION DU CARBONE

Plante en C4

## CO<sub>2</sub> : SÉQUESTRATION DES RÉSIDUS DE CULTURE

Mulching

## CO<sub>2</sub>: SUBSTITUTION CARBONE FOSSILE

- Biocarburants
- Méthanisation
- Biomatériaux
- Économies de séchage
- · Maïs grain humide

### N<sub>2</sub>0 : SUBSTITUTION ENGRAIS MINÉRAUX

- Engrais organiques
- Minéralisation estivale de la matière organique

#### GES : EFFICIENCE DES INTRANTS ET INTENSIFICATION

### ADAPTATION

### PROGRÈS GÉNÉTIQUE

- Tolérance au stress hydrique
- Tolérance au froid
- « Dry down » : tolérance à l'humidité en fin de cycle

#### ITINÉRAIRES TECHNIQUES INNOVANTS

- Accroître le taux de matière organique des sols
- Stratégies d'esquive
- Architecture de peuplement

#### IRRIGATION

- Stockage de l'eau
- Réutilisation de l'eau

### AGRICULTURE DE PRÉCISION

Outils de pilotage

#### AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE DES EXPLOITATIONS

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

### LES ATOUTS DU MAÏS DANS LA PERSPECTIVE DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

CE SONT LES QUALITÉS MÊMES QUI FONT DU MAÏS UNE CULTURE PERFORMANTE QUI VONT LE PLUS CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION DES GAZ À EFFET DE SERRE. SA PRODUCTIVITÉ EN BIOMASSE ET DONC L'EFFET DE POMPE DE CARBONE, L'EFFICIENCE DE SON FONCTIONNEMENT PHOTOSYNTHÉTIQUE, SON APTITUDE À VALORISER LES ENGRAIS ORGANIQUES, SON IMPLICATION DANS DE NOMBREUSES FILIÈRES DE TRANSFORMATION (ANIMALES, ÉNERGÉTIQUES) PERMETTENT À LA PLANTE MAÏS DE JOUER SUR TOUS LES TABLEAUX : ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS, SÉQUESTRATION DU CARBONE, ADAPTATION DES PRATIQUES ET EFFICIENCE DES INTRANTS, SUBSTITUTION AUX ÉNERGIES FOSSILES. ADAPTÉ NATURELLEMENT AUX CONSÉQUENCES LES PLUS PROBABLES DU RÉCHAUFFEMENT (HAUSSE DES TEMPÉRATURES, CONCENTRATION EN CO<sub>2</sub>), LE MAÏS VA POURSUIVRE LA PROGRESSION DE SON RENDEMENT ET SON ADAPTATION À DES STRESS HYDRIQUES PLUS LONGS GRÂCE AU PROGRÈS GÉNÉTIQUE.



PRODUCTION

Association Générale des Producteurs de Maïs 21 Chemin de Pau 64121 MONTARDON 23-25 Av de Neuilly 75116 PARIS Auteur: Jean-Paul Renoux Réalisation: maiz'EUROP'

