

Pierre Guiscafré¹, Catherine Macombe²

Performance énergétique du machinisme agricole

Définition de la variable

La performance énergétique du machinisme agricole peut être définie comme le rapport entre la production de richesse par l'agriculture et la quantité d'énergie utilisée par les machines pour la réalisation des activités agricoles. L'énergie totale utilisée par le secteur agricole français est à 38 % **directe** (20 % gaz-oil, 15 % électricité, 3 % gaz) et à 62 % **indirecte**. Dans la plupart des pays européens, l'énergie directe utilisée dans le secteur agricole représente 2,5 % (en 2004) de l'ensemble de l'énergie directe consommée dans le pays, contre 2,1 % en France³. La moitié de cette énergie directe (soit près de 2 Mtep⁴) est consommée par les tracteurs et automoteurs agricoles. Dans la ferme France, l'énergie indirecte consommée provient d'abord des aliments du bétail (21 %), des fertilisants (19 %) puis de la fabrication des machines pour 9 %⁵. Il en résulte que **le machinisme agricole compte pour environ 27 % de l'énergie (directe et indirecte) consommée par le secteur agricole français**, ce qui justifie de s'intéresser à tous les progrès possibles. Ceux-ci sont à rechercher dans deux directions : l'amélioration des performances énergétiques elles-mêmes (quel que soit le carburant) et l'adoption de nouvelles sources d'énergie. Cette fiche porte essentiellement sur les progrès espérés par la première voie, mais fera aussi allusion à la seconde. L'achat annuel de machines agricoles par la ferme France représente environ 3,6 milliards d'euros (en 2004), à raison d'un tiers pour les tracteurs et de deux tiers pour le matériel agricole (outils attelés aux tracteurs)⁶. Si l'on tient compte des machines automotrices présentes sur l'exploitation à un moment donné, cinq sur six⁷ sont des tracteurs (données 2000).

La performance énergétique d'un tracteur varie suivant les types de production (arboriculture, viticulture, grandes cultures, maraîchage, etc.), qui déterminent en grande partie les types de machines utilisées (automoteur et outils). Elle dépend aussi des itinéraires (labour, techniques simplifiée, etc.) et des conditions environnementales (pratique du conducteur⁸, conditions pédo-climatiques, etc.). Les facteurs qui déterminent cette performance sont complexes car interdépendants. L'Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement (originellement Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts ou Cemagref) conduit actuellement des travaux⁹ visant à mieux décrire la demande de puissance dans le temps en fonction des différents travaux agricoles et des conditions environnementales. Les données acquises permettront d'optimiser le dimensionnement des machines, d'améliorer les dispositifs de conduite automatique et de concevoir des systèmes de récupération d'énergie sur les tracteurs du futur. Cette fiche est aussi l'occasion d'évoquer le progrès des techniques appliquées aux machines agricoles (nouveaux moteurs, électronique embarquée, nouvelles techniques culturales). Est-il source d'économie de carburant ? L'utilisation d'énergie renouvelable (biodiesel, éthanol, huile végétale) est-elle une voie d'amélioration de la performance énergétique ? Enfin, il est important de savoir quelle est la diffusion réelle des innovations, et comment évolue le parc des machines.

Indicateurs pertinents de la variable

À l'échelle d'une machine automotrice agricole donnée, il est possible de calculer la consommation

1. Chef du Service Agroéquipement Economie Environnement Energie, FNCUMA. Avec la contribution de Catherine Gaubert

2. Chercheur au Département Gestion des Territoires Ecotechnologies, Cemagref. Avec les contributions de Michel Berducat, Dominique Didelot, Stéphanie Lacour, Paul Barbe, Marily Pradel, Nicolas Tricot, Bruno Tisseyre, Philippe Roux.

3. MAP-ADEME-SOLAGRO, 2007, Energie dans les exploitations agricoles. Etat des lieux en Europe et éléments de réflexion pour la France, mai 2007, 35 pages.

4. Source SCEES 1992 et évaluation Solagro pour l'Ademe et Mies; étude 2005 réalisée par Solagro pour le MAP.

5. ADEME-SOLAGRO, 2007, Synthèse 2006 des bilans

PLANETE, consommation d'énergie et émissions de GES des exploitations agricoles ayant réalisé un bilan PLANETE, mars 2007, 28 pages.

6. Brocard P et de Guyenro T., 2005, Le machinisme agricole en France: Au cœur de la mondialisation, l'innovation au service du développement durable, Le 4 pages Sessi, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, n° 202.

7. Source Agreste-recensements agricoles 1988-2000.

8. «Chasse au gaspi: pour les engins agricoles aussi», article de la France agricole, n° 3192, du 6 juillet 2007.

9. Équipements agricoles, la performance énergétique au banc d'essai, Info médias n° 90, février 2009.

d'énergie pour délivrer un certain travail, appelée consommation spécifique, exprimée en g de carburant par kWh.

- La consommation nationale d'énergie associée au machinisme agricole est le produit de trois variables : la consommation spécifique moyenne des machines (g/kWh), qui est une caractéristique intrinsèque du matériel,

- le nombre moyen d'heures ou de kWh réalisés des machines (kWh/tracteur/an), qui est une donnée où intervient l'usage, donc par exemple les pratiques culturelles,

- le nombre total de tracteurs utilisés par an, qui fait intervenir la notion de parc de machines.

Le produit des trois indicateurs donne la **consommation annuelle nationale de carburant en agriculture**. Il est à mettre en regard de la **production totale de la ferme France** pour calculer la performance énergétique (directe)¹⁰.

À l'échelle du pays, on s'intéressera aussi à l'**évolution du parc des machines**, à partir des indicateurs suivants :

- proportion de tracteurs par rapport aux automoteurs,

- rapport entre les achats de machines neuves et d'occasion, dans chaque catégorie,

- âge moyen des machines utilisées.

En fait, il y a quatre classes de machines à prendre en compte parce qu'elles ont des âges moyens très différents : tracteurs, automoteurs, machines tractées et machines d'intérieur de ferme.

Le suivi de la part de la **consommation des tracteurs** et automoteurs agricoles dans la consommation d'énergie fossile directe en agriculture donnerait un bon indicateur synthétique des progrès accomplis. Pour la **diffusion des innovations**, il est possible de suivre l'indicateur de pénétration de l'agriculture de précision¹¹.

Acteurs concernés par la variable

Les principaux acteurs qui agissent sur la performance énergétique du matériel agricole sont les constructeurs de machines agricoles, les utilisateurs, les centres de recherche (Cemagref, INRA, etc.), les prescripteurs (conseillers de développement, ingénieurs des instituts) dont l'enseignement agricole, et

les pouvoirs publics.

Le marché français est le premier marché européen, lui-même premier marché mondial pour les agro-équipements. Les constructeurs font des choix technologiques pour optimiser la production et réduire les coûts de construction et de réparation des machines. Or, les centres de décisions sont tous à l'étranger¹². Trois grands *leaders* dominent le marché des tracteurs et des gros matériels automoteurs (John Deere, Agco et *Case New Holland*). Ils vont orienter le progrès technique des machines, mais pas forcément pour le marché français. Les pouvoirs publics, à travers la réglementation (par exemple sur les émissions polluantes et demain pour la classification énergétique des tracteurs agricoles neufs¹³) orientent l'offre. La recherche publique et/ou privée (constructeur) va répondre à l'évolution de la réglementation et à la demande de gros clients (Coopératives d'utilisation de matériel - CUMA, Entreprises de travaux agricoles - ETA, etc.) particulièrement soucieux de limiter leur consommation de carburant.

L'utilisateur (agriculteurs, ETA, CUMA, etc.) est l'acteur majeur. En effet, c'est à travers la synthèse des différents éléments cités ci-dessus et de ses besoins qu'il va choisir et acheter son matériel. Cependant son choix se fera dans les gammes de matériels des **constructeurs**.

Rétrospective de la variable

Tendance lourde : Motorisation et désélimation

Suite à la très mauvaise récolte de 1947, l'industrie du machinisme agricole a été placée parmi les six secteurs prioritaires de l'économie française. Le plan Marshall renforce en 1948 l'orientation productiviste (amélioration de la production par travailleur) du plan Jean Monnet¹⁴. Un recensement effectué en 1955 signale qu'à cette date, près des trois quarts des exploitations agricoles ne possédaient encore aucun tracteur : on comptait alors 335 000 tracteurs en France dont 60 % fonctionnant à l'essence, 29 % au diesel et 11 % au semi-diesel¹⁵. C'est entre les années 1950 et 1980 que l'agriculture française s'est totalement motorisée, tout au moins dans le domaine des grandes cultures. Au cours de la même période, le moteur diesel a partout remplacé les moteurs à essence¹⁶.

10. Actuellement, établir le rapport consommation d'énergie par les machines / production n'est faisable qu'en ajoutant l'énergie indirecte et seulement sur des cas bien précis.

11. L'agriculture de précision est un concept de gestion des parcelles agricoles, fondé sur le

constat de l'existence de variabilités intra-parcellaires. Elle requiert l'utilisation de nouvelles technologies, telles que la localisation par satellite et l'informatique (définition Wikipedia)

12. Brocard P et de Guyenro T. opus cité.

13. Lacour S. et al., 2009, Classification énergétique des tracteurs agricoles neufs, Mise au point d'une méthodologie de classification des tracteurs, Antony, Cemagref:22.

14. A l'ombre des machines - Denis Lefèvre Editions Entraid' et compte rendu du colloque sur

« Mécanisation de l'agriculture et innovation sociale » organisé par la FNCUMA le 17 février 1986.

15. Bienfait J. (1959) L'industrie du tracteur agricole en France, revue de géographie de Lyon, volume 34, n° 34-3, p 193-216.

Les tendances à l'œuvre depuis 50 ans

Amélioration des machines

De 1960 à nos jours, trois évolutions majeures ont marqué la conception des machines agricoles.

Améliorations techniques vers une agriculture de précision

1) Des **améliorations majeures se sont développées** sur les machines automotrices spécialisées pour les grandes cultures : nouveaux systèmes de battage, système de détection des pertes de grain, etc.

2) Des **machines automotrices** sont apparues pour effectuer certains travaux tels que les traitements phytosanitaires, l'épandage d'effluents agricoles ou industriels, les récoltes, etc.

3) Pour l'agriculture, le **développement de l'électronique embarquée** a démarré à la fin des années 1980 simultanément en Europe de l'Ouest et aux États-Unis. C'est l'émergence de « l'agriculture de précision », qui représente un potentiel de croissance pour les entreprises du secteur, mais exige aussi l'apprentissage¹⁷ de compétences nouvelles. L'électronique permet la gestion complète de certains matériels d'intérieur de ferme pour l'élevage, le réglage des outils (par exemple profondeur de travail d'une charrue) et l'enregistrement des travaux réalisés. Depuis une dizaine d'années, les matériels agricoles neufs peuvent être équipés d'ordinateurs de bord qui permettent de « tracer » les opérations culturales, pour répondre à un double objectif : optimiser les chantiers et rendre compte à la société (quantité d'engrais épandus par exemple). L'électronique a entraîné la réduction des coûts de fabrication des machines, ainsi que la réduction des émissions polluantes des moteurs, voire la réduction de la consommation d'énergie directe¹⁸.

Cependant, ces innovations ne sont pas généralisées. Une étude représentative des agriculteurs allemands¹⁹ a montré en 2001 que 55,4 % d'entre eux avaient entendu parler d'agriculture de précision, mais que seulement 7,4 % utilisaient ces technologies et 3,4 % la cartographie des parcelles. La même année, des chercheurs danois²⁰ considéraient qu'il y avait 400 praticiens danois de l'agriculture de précision.

Amélioration des conditions d'utilisation des machines

Ces trois évolutions ont cohabité avec l'amélioration continue des conditions de confort, d'hygiène et de sécurité des utilisateurs, qui constitue un autre enjeu important du machinisme agricole.

Évolutions technologiques liées aux normes environnementales, pas toujours synonymes de performance énergétique ?

La prise en compte des normes environnementales sur les machines agricoles concerne non seulement la précision des réglages mais aussi les rejets de gaz polluants des moteurs. Les nouvelles réglementations sur les normes des émissions polluantes ont contribué au développement de nouvelles technologies, mais aussi à rendre certains moteurs plus encombrants et moins économes en carburant. À puissance égale, la consommation spécifique des automoteurs augmente au fur et à mesure de l'introduction de normes plus sévères pour les émissions de polluants²¹. En revanche²², les moteurs avec gestion électronique de l'injection qui se généralisent pour les moyennes et fortes puissances, sont plus économes en carburant.

Couplée avec le système de positionnement GPS, le développement de l'électronique embarquée permettrait d'automatiser le fonctionnement (déplacement, réglage) des machines agricoles dans les champs, ce qui représente une étape d'automatisation supplémentaire, quoiqu'encore à l'état de travaux de recherche.

L'évolution du parc de machines

Augmentation de la puissance, de la largeur et alourdissement des machines

Les années 2000 ont vu la poursuite de l'augmentation du poids et de la puissance moyenne des automoteurs (tracteurs, récolteuses) avec un accroissement de la largeur de travail (récolte, travail du sol et traitements phytosanitaires par exemple) et l'utilisation croissante de l'électronique. Le phénomène le plus remarquable est l'**augmentation de la puissance moyenne des tracteurs immatriculés**, avec la prédominance des tracteurs à quatre roues motrices et la possibilité d'utiliser effectivement cette puissance.

16. Source: enquêtes structures 1985 et enquêtes sur le consommation d'énergie dans les exploitations agricoles en 1993 du MAP.

17. Robert P.C. and Iremonger C.J. (2003) The critical challenge of learning precision agriculture new skills: grower learning groups and on-farm trials, in Stafford J.

and Werner A. (Eds) Precision agriculture, Wageningen Academics Publisher, p 591-595.

18. Rapport de M. Bourras, chargé de mission au Cemagref (février 1986).

19. Grumpertsberger E. and Jürgens C. (2003) Acceptance of precision agriculture in

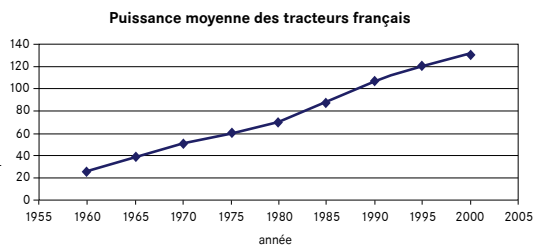
Germany- results of a survey in 2001, in Stafford J. and Werner A. (Eds) Precision agriculture, Wageningen Academics Publisher, p 259-264

20. Pedersen S.M. et al. Adoption of precision farming in Denmark, in Stafford J. and Werner A. (Eds) Precision agriculture, Wageningen Academics

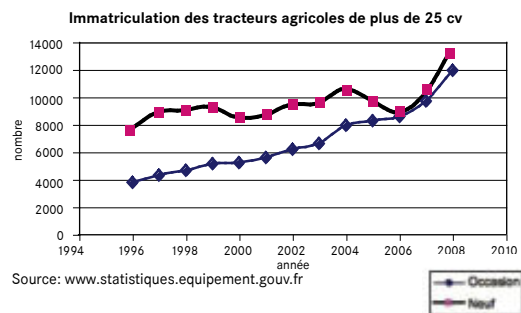
Publisher, pages 533-538

21. Lacour S. et al., 2009, opus cité.

22. Communication personnelle, Paul Barbe, du 9 novembre 2009.



Source : L'avenir du machinisme agricole : amélioration de la situation générale du secteur (Ministères de l'Agriculture, de la Recherche et de l'Industrie, juillet 1982) et conférence de presse de la filière des agro-équipements (automne 2008).



Source : www.statistiques.equipement.gouv.fr

Renouvellement du parc et diffusion technologique

Les besoins de renouvellement du matériel agricole fixent la durée des cycles d'endettement des agriculteurs, qui sont compris entre cinq et sept ans. Les agriculteurs renouvellent leur matériel quand la conjoncture leur paraît favorable²³. De plus, le renouvellement du parc français de machines agricoles se fait surtout en achetant des machines d'occasion. En 2008, moins d'un tracteur sur trois immatriculés dans l'année était neuf²⁴. On peut donc en conclure que **l'essentiel du parc des tracteurs suit un rythme de renouvellement d'une dizaine d'années**. L'âge moyen du matériel automoteur sur les exploitations est élevé et retarde d'autant la pénétration des dernières innovations. D'autre part, il existe environ 13 300 CUMA²⁵ qui investissent dans des tracteurs et machines de récolte de forte puissance.

Les tendances les plus récentes

Un retour à des moteurs moins puissants ?

Il est intéressant de noter que les achats (connus par les immatriculations) de tracteurs de plus de 25 cv étaient plus importants pour les tracteurs neufs que pour les tracteurs d'occasion jusqu'en 2006. Les experts estiment que le parc des tracteurs achetés neufs était notoirement surpuissant par rapport aux besoins de l'exploitation. La tendance récente semble traduire une relative désaffection pour les dernières innovations dont sont équipés les tracteurs neufs, et/ou une satisfaction croissante procurée par les tracteurs d'occasion (puissances et équipements actuels jugés suffisants). Il est normal que cette course à la puissance s'essouffle sans que les performances en pâtissent, grâce à l'électronique embarquée.

23. Neuveu A., Eclairages, Problèmes Economiques, n°2 519, 7 mai 1997, pages 1-2.

24. Source Ministère de l'écologie et du développement durable www.statistiques.equipement.gouv.fr

25. Brocard P et de Guyenro T., opus cité.

26. Berducat M. et al., 2009, Evolution of agricultural machinery: The third way, in the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen.

Vers des machines plus autonomes ?

Du côté de la recherche, des alternatives aux machines actuelles sont en élaboration. Le Cemagref défend une approche qui emprunte aux techniques robotiques pour proposer des dispositifs de production utilisant des **machines de taille moyenne associées**²⁶ par deux ou trois. Elles œuvreraient de façon **autonome et coordonnée**, sous la surveillance d'un opérateur. Celui-ci peut se trouver soit sur l'une des machines, soit à distance (réalisation de travaux dangereux pour la santé de l'opérateur de type pulvérisation par exemple).

Éco-technologie : les enjeux environnementaux pris en compte dans la conception des machines (impacts des machines, matériels)

Du côté des constructeurs, des tendances plus récentes prennent en compte les impacts potentiels des machines sur l'environnement naturel. La notion d'écotechnologie²⁷ a fait son apparition depuis une dizaine d'années. Elle témoigne de l'importance grandissante des enjeux environnementaux à la fois pour l'évaluation des impacts liés à la machine, mais aussi pour la conception de ces matériels. Cependant, les impacts des machines agricoles ne représentent qu'une faible partie des impacts environnementaux calculés par évaluation environnementale du cycle de vie, parmi les impacts totaux des itinéraires culturaux²⁸ classiques en grandes cultures. L'épandage d'engrais en particulier est beaucoup plus impactant. D'autres aspirations des utilisateurs s'imposent progressivement aux constructeurs, comme celle d'éviter la compaction des sols, la pollution des eaux ou la nécessité de respecter un parcellaire découpé. Ces nouvelles exigences sont contradictoires avec l'alourdissement et l'augmentation de la largeur des machines.

27. Roux P., Patingre J.F., Giroux F. et Naud O. (2005) Ecotechnologies et Eco conception, revue Ingénierie EAT, n° 42, pages 55-70.

28. Publications ECODEFI en cours, 2009

Vers d'autres sources d'énergies : moteurs électriques, huiles végétales pures (HVP)

Avec l'élévation du prix des carburants agricoles traditionnels, les constructeurs s'intéressent aux énergies alternatives. Dans ce domaine, les évolutions pourraient suivre celles des véhicules automobiles destinés aux particuliers, à condition que le marché des machines agricoles soit suffisamment attractif. Si les voitures à moteur électrique se développent, il est probable que les **tracteurs agricoles électriques** feront de même. Cependant, des choix politiques pourraient peser pour découpler le choix de l'énergie du machinisme agricole de celle utilisée dans les transports²⁹. Toutes les possibilités sont envisageables. Un démonstrateur de tracteur électrique équipé d'une **pile à combustible** fonctionnant à l'hydrogène a été présenté par New Holland au Salon International du Machinisme Agricole (SIMA) 2009. La société Deutz développe un tracteur *flex fuel* fonctionnant à l'**huile pure de colza**, très apprécié sur le marché allemand.

Du côté des utilisateurs, les récentes crises du prix des énergies ont vu de multiples initiatives³⁰ individuelles ou collectives pour découvrir et utiliser de nouveaux carburants. L'utilisation d'énergie renouvelable (biodiesel, huile végétale³¹, éthanol³²) **n'est pas nécessairement une voie d'amélioration de la performance énergétique**, mais elle a le mérite de ne pas dépendre des ressources fossiles. Pour le moment, les essais se bornent surtout à mettre au point et utiliser des substituts des carburants fossiles, mais on peut imaginer l'utilisation de sources d'énergie primaire beaucoup plus variées à l'avenir³³ (électricité d'origine solaire, éolienne, méthanisation, pile à hydrogène, etc.).

La performance énergétique des machines devient une préoccupation partagée

Le suivi de la performance énergétique devient une préoccupation plus commune. Le nombre des bancs d'essai moteur et de réalisation de diagnostics d'automoteurs est en croissance³⁴. Début octobre 2009³⁵, le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche a lancé deux appels à candidature nationaux pour des projets d'investissement en matière de méthanisation et de bancs d'essai des moteurs d'engins agricoles.

28. Publications ECODEFI en cours, 2009

29. Agier et Vaitilingom, 2009, L'agriculture française autonome en carburant demain, et pourquoi pas ? Ecotech Montoldre, 22-23 octobre 2009.

30. Voir les essais de moteurs agricoles relatés dans l'article

de Luc Meinrad (2004) «L'huile de tournesol, un carburant faisable et compétitif», revue Travaux & innovations, n° 105 février, TRAME ainsi que les nombreux témoignages recueillis dans le cadre des groupes de développement agricoles soutenus par TRAME depuis 1999 et présentés dans le n° 111 d'octobre 2004 page 19.

Prospective de la variable

L'hypothèse la plus probable semble la poursuite de la tendance actuelle (hypothèse 1). Mais d'autres hypothèses sont possibles, sous l'effet de conjonctions d'autres facteurs. En effet, la variable « performance énergétique du machinisme agricole » est très sensible à l'évolution d'autres facteurs (par exemple la stabilité des prix agricoles).

Hypothèse 1

Dispersion des modes de mécanisation, des performances énergétiques et des sources d'énergie

La dispersion actuelle des performances énergétiques s'amplifie au gré de plusieurs modèles de mécanisation agricole. Elle actualise en les exagérant les tendances à l'œuvre actuellement. Une minorité de grandes fermes (par exemple les fermes de plus de 100 hectares, soit 1/3 de la surface agricole utile (SAU) tenue par environ un quart des exploitants) travaille pour les marchés internationaux et dispose des bases financières et de la visibilité (*via* les marchés à terme) nécessaires pour acheter des machines automotrices puissantes et de l'électronique embarquée ou pour louer à long terme les machines les plus onéreuses, qui sont aussi les plus performantes. Les autres exploitations se tournent vers d'autres solutions, si bien que globalement, la performance énergétique stagne. Elles utilisent des machines d'occasion moins puissantes, et développent des énergies de substitution à partir des déchets des activités agricoles, combinées avec d'autres formes de production d'énergie à la ferme (méthanisation, électricité solaire ou éolienne, etc.). Dans les terres à faible potentiel agronomique, ou suite à une pénurie d'énergie et de moyens financiers, on peut voir apparaître vers 2015 des pratiques qui limitent l'usage des tracteurs et des machines automotrices, pouvant aller vers 2020 au portage et à la traction animale, localisés dans les montagnes, ainsi qu'en maraîchage et viticulture. Cette pratique existe encore aujourd'hui en viticulture et débardage forestier³⁶ en France.

Hypothèse 2 *Technologies propres généralisées.*

La deuxième hypothèse conjugue productivité horaire et respect de l'environnement, dans un parc matériel renouvelé. Les nouvelles machines sont

31. Bailly M.-L. et Guiscafré P., 2009, Evaluation de l'utilisation de l'huile végétale pure (HPV) de colza dans des tracteurs agricoles, Ecotech Montoldre, 22-23 octobre 2009.

32. À noter que l'éthanol n'est pas compatible avec une motorisation «diesel».

33. Guide Choisir et utiliser les tracteurs (2009) - Editions Entraid'.

34. RMT Agroéquipement Energie et FNCUMA - Printemps 2009

35. Site de la France Agricole, consulté le 5 novembre 2009.

.disponibles entre 2015 et 2020. Elles augmentent la productivité (vitesse de travail, automatismes, etc.), répondent aux normes environnementales (émissions polluantes), de sécurité et de confort des utilisateurs. Leur performance énergétique est améliorée. De plus, elles sont conçues pour être faciles à recycler, et sans métaux rares ni émanation de substances toxiques. L'utilisation de l'électronique et des systèmes de localisation se développe énormément et se généralise à quasiment toutes les exploitations françaises, au rythme de l'apprentissage des utilisateurs. La volonté politique de l'Union européenne conforte des prix agricoles corrects et stables. Ainsi encouragés, les agriculteurs achètent (individuellement ou en commun) ou louent ces nouvelles machines, si bien que le parc devient plus performant en matière d'énergie (-10% en 2030), essentiellement par remplacement accéléré des vieux tracteurs. L'achat en commun par les CUMA est un vecteur de diffusion des nouvelles technologies. En plus de la réduction des coûts d'utilisation de ces nouvelles machines, la CUMA est aussi un moyen d'apprentissage des nouvelles technologies par les agriculteurs. D'importants travaux de recherche technologique développent la motorisation électrique et la pile à combustible. On voit apparaître dans les champs des tracteurs neufs fonctionnant avec des sources d'énergie nouvelles, telles que la pile à combustible, mais ils restent marginaux à l'horizon 2030.

Hypothèse 3 *Priorité à la diversité des paysages*

La troisième hypothèse est la diffusion massive des machines légères et polyvalentes (qui existent déjà) pour ménager la biodiversité liée à la variété des paysages et des espèces (elle-même dépendante de la variété des milieux agricoles). Les constructeurs observent une pause dans l'accroissement de la puissance, de la largeur de travail et de la vitesse d'avancement des machines (donc de l'augmentation de la productivité horaire du travail), pour inventer des engins plus légers et polyvalents, capables de mener des travaux plus complexes. Ces engins sont équipés d'électronique embarquée, pour assister le conducteur dans toutes ses décisions. Il s'agit d'abord d'éviter la dégradation des sols par tassement. Mais l'adoption généralisée de ces machines est déclenchée en 2015 par les incitations financières liées à la relance de la « mécanisation alternative », dans l'objectif de maintenir ou de restaurer la biodiversité spécifique des milieux agricoles. Devant les pertes

irrémediables de biodiversité en milieux ordinaires constatées en 2010, l'État français impose en effet dès 2015 aux agriculteurs des mesures (suivies en 2020 d'une directive européenne) soit pour conserver, soit modifier le parcellaire agricole, en ajoutant des haies, des mares, des fossés et en variant les espèces ou les variétés emblavées au sein d'une même parcelle. L'électronique embarquée facilite les suivis des itinéraires techniques associés très complexes. Les performances énergétiques ne sont pas nettement modifiées par rapport à l'état actuel.

Hypothèse 4 *Trains de machine à énergie alternative.*

La main-d'œuvre agricole qualifiée est devenue rare à partir de 2010³⁷. L'impératif est de faire tous les travaux en un minimum de temps, malgré cette pénurie. Les servitudes fonctionnelles connexes sont assurées par des entreprises spécialisées, parmi lesquelles les CUMA. Les innovations technologiques et l'amélioration des performances énergétiques s'exercent sur des ensembles ou trains de machines plus petites (voire des petits robots) téléguidées ou automatisées et co-opérantes. La maîtrise de ces machines demande des compétences très pointues, exercées par des ouvriers spécialisés rares et bien payés. Les agriculteurs qui ont suffisamment d'assise financière, de surface et de visibilité acquièrent ces engins et font former leurs salariés. Les autres utilisent les trains de machines pour quelques gros travaux complexes ou dangereux, en adhérant à des CUMA ou en faisant appel aux entrepreneurs de travaux agricoles. Ces agriculteurs « moins aisés » continuent à utiliser leur parc machines habituel pour les travaux quotidiens.

Cette hypothèse aboutit à une légère dégradation de la performance énergétique mais elle peut épargner des énergies fossiles si, par exemple, ces trains de machines automotrices sont équipés en moteurs à énergies nouvelles (électricité solaire, pile à hydrogène, etc.).

Les variables liées

Population agricole, évolution des structures et rapport capital/travail, prix du baril de pétrole, politique énergétique, prix agricoles, politique d'aménagement du territoire, politique environnementale, modes d'organisation collective des agriculteurs, accompagnement technique et économique, production de bioénergies, développement d'énergies renouvelables sur les exploitations.

36. Actuellement, l'ONF impose ce type de débardage sur certains sites très sensibles aux dégâts des machines, mais ce n'est pas une pratique courante.

37. Voir le dernier paragraphe de Brocard P et de Guyenro T., opus cité.