HAL
open science

Quels indicateurs et solutions technologiques adaptés pour évaluer finement les performances énergétiques des exploitations agricoles ?

Marilys Pradel, D. Boffety

To cite this version:

Marilys Pradel, D. Boffety. Quels indicateurs et solutions technologiques adaptés pour évaluer finement les performances énergétiques des exploitations agricoles ?. Sciences Eaux & Territoires, 2012, 7, p. 16 - p. 28. 10.14758/SET-REVUE.2012.7.03 . hal-00681675

HAL Id: hal-00681675

https://hal.science/hal-00681675v1

Submitted on 22 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Quels indicateurs et solutions technologiques adaptés pour évaluer finement les performances énergétiques des exploitations agricoles ?

La performance énergétique des exploitations agricoles est un enjeu écologique et économique qui passe par la mise en place d'outils de diagnostics adaptés à l'agriculture. Cet article nous propose d'étudier des solutions méthodologiques et technologiques visant à quantifier finement les consommations d'énergie des exploitations agricoles par la mise en place de nouveaux indicateurs de performance énergétiques permettant d'évaluer à une échelle spatiale et temporelle plus fine (opération culturale, parcelle...).

L'agriculture consomme de l'énergie au travers des moyens de production mis en œuvre. La consommation d'énergie directe de l'agriculture était estimée à 28 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) sur une consommation globale de 1 142 Mtep soit 2,5 % de l'énergie directe consommée par l'Union européenne en 2004 (Solagro, 2007), cette énergie directe étant constituée à 55 % par du carburant agricole. Avec la réduction programmée des ressources pétrolières et l'augmentation des cours du pétrole difficilement maîtrisable à notre échelle (+ 17 % du prix de l'énergie en France entre janvier 2010 et janvier 2011 selon Agreste), l'agriculture doit réduire ses consommations énergétiques pour améliorer son bilan environnemental et économique.

La prise de conscience de l'importance de la préservation des ressources énergétiques non renouvelables est une certitude comme le témoigne la politique énergétique mise en place depuis quelques années par les pouvoirs publics (politique énergétique de 2005, Grenelle Environnement…). Appliquée au monde agricole, cette réalité passe par le plan de performance énergétique des exploitations agricoles qui vise, entre autre, à mieux évaluer le bilan énergétique des exploitations agricoles.

À l'heure actuelle, de nombreux outils existent pour évaluer les performances énergétiques des exploitations agricoles. Ces outils, principalement adaptés à une évaluation globale à l'échelle de l'exploitation agricole, ne sont pas forcément pertinents dès lors que l'on souhaite évaluer les performances énergétiques à une échelle plus fine (parcelle, opération culturale, atelier de production…).

L'objectif de cet article est de présenter, au travers du projet CASDAR Energé'TIC (2009-2011), les avancées méthodologiques visant à quantifier finement les consommations énergétiques des exploitations agricoles au travers de la mise en place de nouveaux indicateurs de performances énergétiques à une échelle fine (opération culturale, parcelle…) et les solutions technologiques développées pour les renseigner.

Bilans énergétiques à l'échelle de l'exploitation agricole : méthodes, indicateurs, atouts et limites

État de l'art des diagnostics énergétiques existants

Un certain nombre de travaux ont vu le jour ces dernières années sur l'évaluation des consommations d'énergie directe et indirecte à l'échelle de l'exploitation. Ces travaux ont donné lieu à la mise en place de méthodes d'évaluation des performances énergétiques et/ou à la création d'outils de diagnostic finalisés. Le terme de « diagnostic » sera retenu pour la suite de l'article afin de regrouper sous la même dénomination « outil » et « méthode ». Ces diagnostics, sur la base des consommations d'énergie de l'exploitation et la valeur énergétique des produits agricoles générés, permettent de calculer des bilans énergétiques (sorties – entrées) ou d'évaluer l'efficacité énergétique des exploitations agricoles (sorties/entrées). Pour la plupart, ces diagnostics permettent également de dégager un profil énergétique de l'exploitation agricole.

1 Parcelles agricoles dans vallée de la Truyère (Lozère).

Ils ont plusieurs objectifs :

• quantifier les consommations énergétiques poste par poste pour identifier les marges de progrès possibles en agissant sur le système de production, sur les pratiques et les équipements ou par la production d'énergie renouvelable sur site ;

• comparer les performances énergétiques des productions animales d'une part et végétales d'autre part, entre elles ;

• établir des valeurs de références pour un même type de production.

La réalisation d'un état de l'art des méthodes d'évaluation des performances énergétiques des exploitations agricoles a permis d'identifier 22 diagnostics dont 15 sont utilisés en France. Ces diagnostics sont dédiés en partie ou dans leur globalité à l'évaluation des performances énergétiques des exploitations.

Treize diagnostics ont été étudiés en détail (tableau 1), les outils non sélectionnés n'apportant pas de plus-value (outil combinant d'autres outils, outils trop qualitatifs, en cours de conception ou difficilement accessibles).

Ils sont regroupés en sept catégories :

• les **diagnostics agro-environnementaux globaux.** Ils considèrent l'exploitation dans sa globalité et évaluent les impacts de cette dernière sur son environnement (excès d'azote, pression polluante, consommations d'énergies, émissions de gaz à effet de serre…) ;

• les **diagnostics agro-environnementaux parcellaires**. Ils évaluent les performances environnementales des exploitations à l'échelle de la parcelle (photo 1) ;

• les **diagnostics de durabilité**. Ils évaluent les performances de l'exploitation selon les trois piliers de la durabilité (environnement, social et économique) ;

• Les **diagnostics énergétiques** : Ils permettent d'établir un bilan énergétique à l'échelle de l'exploitation en quantifiant les entrées et sorties d'énergie. Ces diagnostics prennent également en compte les émissions de gaz à effet de serre

• les **diagnostics basés sur des indicateurs indépendants**. Ce sont des indicateurs construits pour permettre d'évaluer de manière simple des systèmes complexes. Ces indicateurs peuvent être à différentes échelles (parcelle, exploitation) ;

• les **pré-diagnostics ou autodiagnostics**. Ils permettent d'évaluer grossièrement les consommations des divers équipements de l'exploitation et donnent une idée des principales pistes d'amélioration ;

• **l'analyse du cycle de vie (ACV)**. Elle permet d'évaluer l'impact environnemental d'un système en dressant l'inventaire des émissions polluantes, des matières premières et de l'énergie sur l'ensemble du cycle de vie de ce dernier.

Ces diagnostics mobilisent soit les principaux grands types d'énergies directes et indirectes, soit les activités consommatrices d'énergie. Les flux d'énergies directes systématiquement quantifiés sont l'électricité, les carburants (gasoil, fuel domestique, essence) et les gaz (ville-propane-butane). Les flux d'énergies indirectes concernent les énergies mobilisées lors de la fabrication des principaux intrants de l'exploitation agricole. Quelques méthodes utilisent de manière totale ou partielle l'opération technique ou l'activité comme porte d'entrée du diagnostic (irrigation, transport des marchandises, travaux par tiers…).

❶ Principaux diagnostics d'évaluation des performances énergétiques des exploitations agricoles.

Outil	Concepteur	Approche	Catégorie
PLANÈTE	ENESAD-CEIPAL-CEDAPAS-CETA-Solagro	Exploitation	Diagnostic énergétique
IDEA *Indicateur de durabilité des exploitations agricoles*	Bergerie nationale	Exploitation	Diagnostic de durabilité
DIALECTE *Diagnostic liant environnement et contrat territorial d'exploitation (CTE)*	Solagro	Exploitation	Diagnostic agro-environnemental global
DIALOGUE	Solagro	Parcelle Exploitation	Diagnostic agro-environnemental global/à la parcelle
INDIGO	INRA Colmar	Parcelle Exploitation	Diagnostic agro-environnemental à la parcelle/indicateurs indépendants
BILAN CARBONE®	ADEME	Activité économique	Analyse cycle de vie
AUTODIAGNOSTIC ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS D'ÉLEVAGE	Institut de l'élevage	Exploitation	Autodiagnostic
GESTIM	Institut de l'élevage-ARVALIS-CETIOM-ITAVI-ITB-IFIP	Exploitation Opération	Diagnostic énergétique
AUDIT ÉNERGÉTIQUE EN PRODUCTION LAITIÈRE (Québec)	Centre de références agricoles et agroalimentaire du Québec	Exploitation	Autodiagnostic
KUL (Allemagne)	Institut de recherche agronomique et de formation du Thuringe (Iéna)	Exploitation	Diagnostic agro-environnemental global
SALCA (Suisse) *Swiss Agricultural Life Cycle Assessment*	Agroscope ART	Exploitation	Analyse cycle de vie
IRENA (Europe) *Indicators Reporting on the interaction of Environmental concerns into Agriculture Policy*	*European Environment Agency*	Exploitation	Indicateurs indépendants
MOTIFS (Belgique) *Monitoring Tool for Integrated Farm Sustainability*	*Institute for Agricultural and Fisheries Research - Ghent University & Institute for the Promotion of Innovation by Science and Technology in Flanders*	Exploitation	Indicateurs indépendants

Atouts et limites des indicateurs de performances énergétiques existants

Parmi les treize diagnostics, dix prennent en compte des indicateurs quantitatifs répertoriés dans le tableau ❷. Les indicateurs des deux autodiagnostics étant qualitatifs, nous ne les présenterons pas ici, de même que les indicateurs de la méthode IRENA, développés pour une application à l'échelle européenne. Pour chaque indicateur sont mentionnés le type d'énergie mobilisée, le mode de calcul, l'unité et les diagnostics utilisant ces indicateurs.

Les indicateurs les plus récurrents sont des indicateurs simples ou des indicateurs composites (encadré ❶). Leurs calculs sont basés sur une agrégation des données de consommations d'énergies directes et indirectes établies à partir de données comptables, des enregistrements papier, des dires d'exploitants (caractéristiques des matériels et des bâtiments, quantités produites).

Les informations obtenues par ces diagnostics permettent d'avoir une bonne idée des performances globales des exploitations agricoles en identifiant les postes les plus énergivores ou en permettant de connaître la performance de la transformation de l'énergie des intrants au travers de l'indicateur « efficacité énergétique ». Le profil énergétique de l'exploitation agricole permet quant à lui de visualiser les performances énergétiques au regard des productions végétales d'une part et animales d'autre part. Le calcul de ces indicateurs se limite le plus souvent à l'échelle globale de l'entreprise agricole par manque de données fiables et un calcul à l'échelle de l'atelier de production, de la parcelle ou de l'opération nécessiterait une acquisition plus fréquente de données.

2 Indicateurs de performances énergétiques évalués par les diagnostics actuels.

Indicateurs	Unité*	Énergie mobilisée	Unité de l'énergie mobilisée	Mode de calcul	Diagnostics	Commentaires
Consommation d'énergie directe	MJ/an EQF/an	Fioul domestique, gazole Essence, lubrifiants Gaz naturel, Propane/butane Bois Charbon Électricité	Litre Litre M^3 Kg Stère Kilogramme KWh	Σ (quantité consommée x facteur de conversion)	Planète Dialecte Dialogue Gestim	Gestim évalue les consommations d'énergie directe en fonction des usages : • consommation gazole : l/ha, • consommation électricité ventilation ou séchage : kWh/tonne ou kWh/qx, • consommation gazole transport : l/km.
Consommation d'énergie indirecte	MJ/an EQF/an	Aliments du bétail Engrais/amendements Phytosanitaires Semences Jeunes animaux Matériels Bâtiments	Kg Tonne Kg de matière active Kg Nombre et kilo Nombre et heure Surface	Σ (quantité consommée x facteur de conversion)	Planète Dialecte Dialogue	
Énergie produite	MJ/an EQF/an	Lait Viande COP	Litre Kg vif Tonne	Σ (quantité produite x facteur de conversion)	Planète Dialecte Dialogue	
Efficacité énergétique		Σ Energie directe Σ Energie indirecte Σ Energie produite	MJ/an, EQF/an	Σ (énergies produites) / (Σ énergies directes + Σ énergies indirectes)	Planète	La méthode MOTIFS propose un indicateur efficacité énergétique en litre de lait/100 MJ (Σ lait produit / (Σ énergies directes + Σ énergies indirectes).
Bilan énergétique	GJ/an EQF/an	Σ Energie directe Σ Energie indirecte Σ Energie produite	MJ/an, EQF/an	Σ (énergies produites) – (Σ énergies directes + Σ énergies indirectes)	Planète	La méthode KUL propose un bilan énergétique en GJ/ha.
Profil énergétique	EQF/ha EQF/UGB	Σ Energie directe Σ Energie indirecte Σ Energie produite	MJ/an, EQF/an	Valeurs des différents types d'énergie ramenés au nombre total d'hectares ou d'unités gros bétail	Planète Dialecte Dialogue	
Consommation d'énergie globale	EQF/ha	Fioul, Gazole Gaz Electricité Azote	Litre Kg KWh Kg	Σ (quantité consommée x facteur de conversion) / (surface x coefficient de conversion fuel)	IDEA	
Énergie	MJ/ha	Machinisme Irrigation Fertilisants Phytosanitaires	MJ/ha MJ/ha MJ/ha MJ/ha	Σ énergies mobilisées	INDIGO	L'indicateur énergie se présente au final sous la forme d'une note de 0 à 10 avec une valeur de référence fixée à 7, correspondant à une mise en œuvre de recommandations minimales de la protection intégrée.
Consommation d'énergie primaire	MJ/unité fonctionnelle	Tous les postes de consommations d'énergie directe et indirecte du système étudié	Dépend du type d'énergie mobilisée	Σ (quantité consommée x facteur de conversion)	SALCA Bilan Carbone Gestim	L'unité fonctionnelle peut varier en fonction des systèmes agricoles étudiés (hectare, tonne, litre de lait…).

* EQF = équivalent litre de fioul, MJ = mégajoule, GJ = gigajoule, ha = hectare, KWh = kilowatt heure.

❶ Types d'indicateurs pouvant être mobilisés pour évaluer les performances énergétiques des exploitations agricoles

Indicateurs composites

Ces indicateurs fournissent une information unique issue de la combinaison de différentes variables. Ils sont destinés à renseigner sur des systèmes complexes ou une réalité difficilement quantifiable par l'agrégation de données facilement accessibles. Ces indicateurs facilitent la compréhension et l'interprétation du destinataire, mais perdent en sensibilité et ne permettent pas d'identifier une modification des pratiques, ni d'identifier des pistes d'amélioration.

Indicateurs simples

Ces indicateurs sont élaborés à partir de données élémentaires non agrégées dont les valeurs référencées permettent d'analyser directement une situation. Ces indicateurs peuvent toutefois fournir une information globale sur les flux mobilisés sans les différencier (ex. : consommation d'électricité en KWh) et ne pas permettre une analyse fine (difficulté pour distinguer l'électricité liée au pompage de l'eau d'irrigation de celle liée à l'éclairage des bâtiments par exemple).

Indicateurs basés sur les moyens

Ils sont renseignés à partir des pratiques de l'exploitant et sont des indicateurs simples à mettre en œuvre et peu coûteux. Ils sont basés sur des références théoriques de consommation par type d'équipement, selon des factures ou à dires d'exploitants.

Indicateurs basés sur les effets

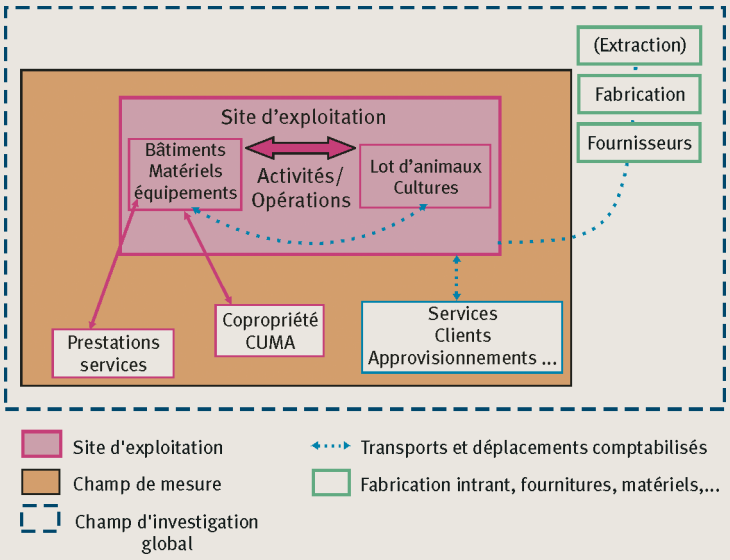
Ils permettent d'évaluer l'état du système de production, voire les émissions vers l'environnement. Ils sont renseignés à partir de mesures (utilisation d'énergie directe) et de calculs de modélisation simples (énergie indirecte). Ce sont des indicateurs pouvant être simples mais nécessitant une collecte de données plus importante que les indicateurs basés sur les moyens.

Indicateurs d'effets potentiels

Ils permettent de mesurer les effets potentiels des différentes pratiques sur les divers compartiments de l'environnement ou sur le fonctionnement de l'exploitation et prennent en compte à la fois les impacts directs et les impacts indirects de ces dernières. Ils sont basés sur l'analyse du cycle de vie et permettent d'identifier le niveau d'altération de l'écosystème, l'épuisement des ressources ou les consommations d'énergies induites par les activités agricoles.

(Capillon et al., 2005 ; Van der Werf et Petit, 2002)

❶ Périmètre de l'étude



❷ Énergies directes et indirectes – définition et choix pour l'étude

Les énergies directes sont les énergies directement mobilisées et consommées par le système étudié. Les énergies directes identifiées pour l'étude sont les carburants (essence, gasoil, fuel, fioul domestique, huile végétale pure...), les gaz (gaz de ville, propane, butane), l'énergie électrique, les énergies renouvelables (bois, solaire, géothermie).

Les énergies indirectes sont les énergies utilisées lors des processus de fabrication des intrants, matériels et bâtiments mobilisés par le système étudié. Les intrants identifiés pour l'étude sont les produits de maintenance, les produits de nettoyage, les produits et matériel vétérinaires, les aliments du bétail (hors fourrages), les fournitures et plastiques divers, les produits phytosanitaires, les fertilisants minéraux, les fertilisants organiques, les amendements, les semences, l'électricité liée à l'acheminement de l'eau potable et d'irrigation depuis le réseau vers l'exploitation.

D'autres indicateurs calculent un score (INDIGO, KUL), permettant d'avoir une valeur chiffrée entre 0 et 10 et de se positionner par rapport à une valeur de référence (7 pour INDIGO).

Toutefois, ces indicateurs trouvent leurs limites dès que l'on veut établir des bilans à une échelle plus fine. En effet, bien que les postes de consommations énergétiques soient identifiés, l'information n'est pas suffisamment précise pour mettre en place un meilleur système de pilotage énergétique des exploitations agricoles (pilotage au mois, à l'année, par opération technique, par culture, par atelier de production…).

Tel est l'un des objectifs du projet CASDAR Energé'TIC (2009-2011)[1]. Ce projet, coordonné par l'Association de coordination technique agricole (ACTA) et Irstea, avait pour ambition d'apporter une solution à la fois scientifique et technique à l'évaluation fine des dépenses énergétiques des exploitations agricoles par l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Installées directement sur les équipements agricoles, les solutions technologiques envisagées (capteurs bas-coûts, RFID…) permettront d'acquérir des informations fiables et en routine dans le but d'alimenter des indicateurs de performances énergétiques à une échelle fine (opération culturale, parcelle…).

Élaboration de nouveaux indicateurs en vue d'une évaluation fine des performances énergétiques des exploitations

Un des objectifs du projet Energé'TIC était de pouvoir proposer un ensemble de nouveaux indicateurs permettant une évaluation fine des consommations énergétiques. Pour mettre en place ces indicateurs, plusieurs étapes méthodologiques sont nécessaires :

• définir le périmètre à étudier pour calibrer le type de données à collecter ;

• définir les activités consommatrices d'énergie à prendre en compte pour identifier les solutions technologiques à mobiliser pour collecter les données ;

• définir le type d'énergie et l'échelle de collecte (spatiale, temporelle…) pour calibrer le choix des indicateurs.

Périmètre étudié pour l'élaboration d'un bilan énergétique à une échelle fine

La réalisation d'un bilan énergétique d'une exploitation agricole, qu'il soit réalisé à une échelle fine ou à l'échelle de l'exploitation agricole, nécessite de définir au préalable les limites physiques du champ d'investigation.

L'objectif de notre étude étant de quantifier de manière précise, à l'aide des NTIC, les dépenses énergétiques des exploitations, nous avons limité le périmètre de notre étude et donc la collecte de données d'énergies directe et indirecte au site de l'exploitation agricole et à son environnement proche (figure ❶, encadré ❷).

Cet environnement proche comprend les activités indissociables du processus de production et de son bon fonctionnement (prestations de services, achat/vente auprès des fournisseurs directs). Le périmètre de collecte des données à l'aide des NTIC n'a pas été étendu au-delà (énergies indirectes liées à la fabrication des intrants, énergies mobilisées par les fournisseurs…) car ces activités sont trop difficiles à mesurer ou trop complexes à évaluer avec la mise en place par des NTIC. Lorsqu'elles sont prises en compte, les données seront collectées sur la base de références bibliographiques.

Quelles activités consommatrices prendre en compte pour l'élaboration d'un bilan énergétique à une échelle fine ?

La seconde étape de la méthodologie mise en place a consisté à identifier l'ensemble des postes consommateurs d'énergie directe et indirecte inclus dans le périmètre de l'étude, c'est-à-dire les postes mobilisés par les activités de production (ensemble des processus nécessaires à la production des denrées agricoles jusqu'à leur sortie de l'exploitation) et les activités indissociables au fonctionnement de l'exploitation en lien avec son environnement proche (prestations de services, travaux réalisés par des tiers…).

Une partie de ce travail a donc consisté à définir les relations de l'exploitation agricole avec son environnement et à analyser la question des transports liés aux livraisons des fournisseurs et/ou des clients. Le choix a été fait de collecter les informations relatives aux distances de transport entre l'exploitation et les fournisseurs et/ou clients directs, soit par recueil de l'information si celle-ci est disponible, soit en considérant une distance fixe entre le siège de l'exploitation et le siège du fournisseur et/ou du client. Le tableau ❸ présente les postes et flux énergétiques considérés.

Nous avons ensuite réalisé une typologie des activités liées au fonctionnement de l'exploitation agricole mobilisant ces postes. Elles sont au nombre de trois :

• les **activités culturales**, qui regroupent l'ensemble des interventions liées aux cultures (mise en place, traitement, récolte…) ;

• les **activités d'élevage**, qui regroupent l'ensemble des interventions liées au troupeau, soit directement par les soins, soit indirectement par l'alimentation ou les produits et coproduits tels que le lait, la viande ou les déjections ;

• les **activités d'ordre général** que l'on ne peut allouer à un atelier précis. Elles peuvent être effectuées pour le compte de plusieurs ateliers ou éléments de l'exploitation agricole (nettoyage, logistique, maintenance, transports et déplacements, surveillance et gestion du système…).

Ces activités consommatrices sont composées d'opérations techniques, regroupées selon leur degré de dépendance les unes envers les autres. Le recensement de ces activités et de ces opérations techniques a été le plus exhaustif possible et validé par les exploitations

1. Ce projet regroupe 14 partenaires : ACTA – ARVALIS-Institut du Végétal – Irstea – Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique – Chambre régionale d'agriculture de Bretagne – ENESAD – ENITAB – EPLEFPA Brioude – EPLEFPA Marmilhat – EPLEFPA Moulins – EPLEFPA Vesoul – FNCUMA – Institut de l'Élevage - SOLAGRO

❸ Choix des activités consommatrices d'énergies à évaluer dans le cadre de l'étude.

Postes et énergies pris en compte	Types d'énergies mobilisées
Utilisation du matériel agricole ou des divers équipements	
Utilisation des bâtiments	Directe et indirecte
Utilisation des équipements fixes	
Utilisation des équipements mobiles	
Utilisation du matériel de CUMA ou en copropriété	Directe
Transports de personnes effectués avec les véhicules d'exploitation	
Déplacements des personnes extérieures (clients, services…) vers l'exploitation	
Transports des marchandises et fournitures ayant lieu en amont et aval de la production dans le cas où l'exploitant se déplace vers son fournisseur	
Prestations de service réalisées par des tiers	
Prestations de service réalisées pour des tiers	
Énergies liées à la fabrication des intrants et fournitures	
Intrants et fournitures utilisés par l'exploitation	Indirecte
Eau potable et d'irrigation	

Postes et énergies non pris en compte
Activités non agricoles
Infrastructures de l'habitation ou activités non agricoles (touristiques…)
Activités en aval de l'exploitation
Devenir et utilisation des produits à la sortie de l'exploitation
Retraitement de l'eau et le recyclage des déchets
Production d'énergies renouvelables
Énergies produites sur l'exploitation, par le biais de panneaux solaires ou autres

des lycées agricoles partenaires du projet Energé'TIC. Chaque opération a ensuite été décortiquée afin d'identifier les éléments du système opérant[2] mobilisés (matériel, équipement et bâtiments), les énergies directes consommées par les équipements mobiles et fixes et les énergies indirectes liées à l'utilisation des intrants.

Deux exemples d'activités consommatrices d'énergie sont présentés sur le tableau ❹, respectivement pour une activité culturale (fertilisation) et une activité d'élevage (gestion de la traite).

Mise en place des indicateurs énergétiques à une échelle fine et choix de l'échelle d'expression des résultats

L'évaluation des performances énergétiques des exploitations agricoles à une échelle plus fine que celle du contexte de l'exploitation pose inévitablement, d'une part la question du type d'indicateur à mobiliser, mais également la question de l'échelle à laquelle il sera évalué.

Le choix a été fait d'élaborer deux types d'indicateurs :

• des indicateurs renseignés à partir de factures, dires d'exploitants ou autres documents d'exploitation **pour évaluer les consommations d'énergie indirecte**. Ces données seront ensuite converties grâce à des facteurs de conversion énergétique adaptés aux caractéristiques des produits, comme c'est actuellement le cas dans certains diagnostics énergétiques ;

• des indicateurs basés sur des mesures directes à l'aide des solutions technologiques mises en place sur les équipements **pour évaluer les consommations d'énergie directe**.

2. Ensemble d'éléments matériels ou immatériels en interaction, transformant par un processus des éléments (les entrées) en d'autres éléments (les sorties).

Ces indicateurs doivent être les plus simples possibles pour fournir des informations sur les consommations d'énergie à la parcelle, à la culture, au lot d'animaux, à l'opération technique. Ainsi, ils ont été construits selon la plus petite échelle d'analyse pertinente identifiée et selon plusieurs échelles d'expression des résultats :

• **l'échelle spatiale.** L'hectare est l'unité spatiale de référence pour exprimer des résultats technico-économiques au sein d'une exploitation. Nous l'utiliserons pour exprimer tous les flux d'énergie directe liés aux activités culturales tels que les carburants et les gaz dans le cas du fonctionnement des équipements motorisés, ou pour exprimer les consommations d'intrants culturaux comme les produits phytosanitaires, les fertilisants minéraux et organiques, les amendements, l'eau et tous les autres intrants. Pour les consommations liées aux bâtiments, nous utiliserons une unité plus adaptée à ce type de surface : le m^2 ;

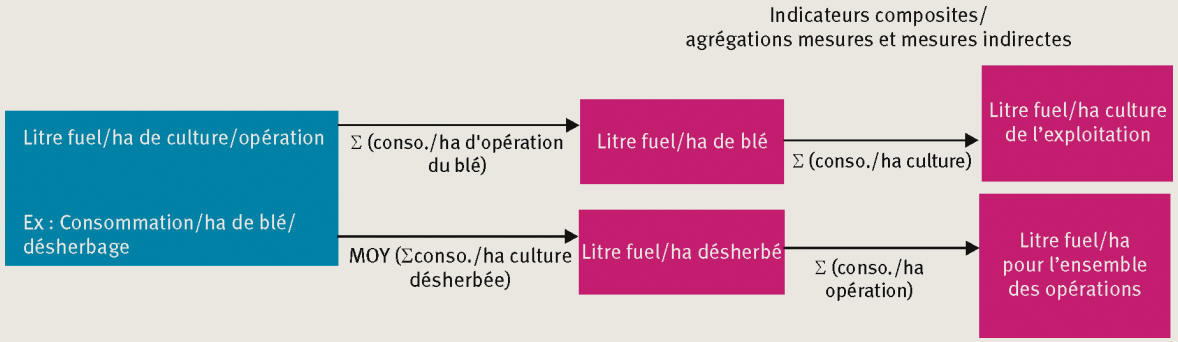
• **l'échelle temporelle.** L'heure est une unité de référence pour les exploitants, elle est fréquemment utilisée pour exprimer les consommations de carburant des équipements motorisés, mais également les consommations des équipements électriques et ceux fonctionnant au gaz. Concernant les flux liés au « confort intérieur des bâtiments » (chauffage…), l'heure n'étant pas adaptée, nous avons privilégié l'année civile, l'année culturale et le cycle de production, de façon à pouvoir suivre de manière significative l'évolution des dépenses au fil de l'année en cours et des années suivantes. Les intrants associés à des opérations techniques très précises seront mesurés à l'échelle de l'année culturale ou du cycle de production ;

• **l'échelle de la production**. Tous les flux mis en œuvre lors des activités culturales, d'élevage ou d'ordre général pourront être rapportés à l'unité produite (végétale

4 Détail des activités consommatrices « Fertilisation » et « Gestion de la traite ».

OPÉRATIONS	MATÉRIEL				BÂTIMENT		Échelle de l'indicateur
	Tracteur (T) et/ou automoteur (A)	Type matériel et/ou équipement	Énergie directe	Énergie indirecte	Type de bâtiment	Énergie directe*	
ACTIVITÉ CULTURALE – FERTILISATION							
Épandage minéral	*T*	*Épandeur minéral*	*Fuel* *Huile*	*N, P, K, Ca…*	*Non concerné*		*Culture* *Parcelle* *Matériel*
Épandage organique		*Épandeur organique*		*Matières organiques*			
		Tonne lisier					
		Télescopique…					
ACTIVITE D'ELEVAGE - GESTION de la TRAITE							
Traite		Bloc de traite (robot, épis, par l'arrière…)	Électricité		Bâtiment de traite	Électricité Fioul Gaz Solaire Bois Géothermie	Lots d'animaux Bâtiment
	A	Pompe à vide					
Pompage lait	A	Pompe à lait					
Refroidissement lait		Refroidisseur					
Stockage lait		Tank à lait					
Nettoyage matériel / bâtiment		Chauffe eau	Électricité	Produits de nettoyage/ désinfection			Bâtiment
Stockage eaux blanches					Fosse		Lots d'animaux

❷ **Niveaux d'agrégation possibles des indicateurs à l'échelle spatiale.**



ou animale). L'unité de ce produit sera celle couramment utilisée par l'agriculteur (tonne de matière sèche, litre de lait, UGB…). Toutefois, cette échelle nécessitera de déterminer des règles d'allocation dans le cas où un même processus de production aboutit à plusieurs produits différents.

Le tableau ❺ récapitule les indicateurs proposés pour l'évaluation des performances énergétiques des exploitations agricoles à une échelle fine. Ces indicateurs, par agrégation, pourront servir à évaluer les performances énergétiques des exploitations à différents niveaux de pilotage (parcelle, atelier de production, culture, exploitation) comme indiqué par un exemple sur la figure ❷.

Exemples d'indicateurs mis en place et associés à une des solutions technologiques mise en œuvre pour la collecte des données

Solution d'acquisition de données géo-référencées mise en place : l'alliance entre capteurs et dispositif d'enregistrement des données

La solution d'acquisition envisagée doit permettre de réaliser l'acquisition automatique des données à l'aide de capteurs bas-coûts et doit permettre le calcul des indicateurs proposés. Le dispositif d'enregistrement doit donc assurer la collecte minimale de données utiles à la définition des indicateurs identifiés :

• les **composantes d'un attelage** (et donc indirectement les opérations techniques concernées) seront identifiées par un système d'identification automatique à partir de badges RFID. Cette identification portera avant tout sur l'outil principal, mais il sera possible d'identifier d'autres outils, le ou les opérateurs, le tracteur/automoteur, l'installation fixe ou mobile, et tout autre équipement qui peut être associé à un attelage (tasses avant, pneus, etc.) ;

• les **consommations de carburant** seront mesurées pour une durée de fonctionnement déterminée en intégrant les mesures de consommations instantanées de carburant d'un compteur de consommation ou en mesurant le niveau d'une simple jauge placée sur le réservoir à carburant du tracteur/automoteur ;

• les **états de fonctionnement des outils**, pour qualifier la nature des tâches réalisées, seront identifiés à l'aide de capteurs « tout ou rien » placés sur la prise de force, le relevage arrière, le bras du troisième point du tracteur/automoteur…

• la **localisation de l'attelage** (et ses changements de localisation) sera obtenue avec un système GPS/DGPS qui permettra de connaître la localisation de l'attelage de manière absolue sous forme de coordonnées géographiques ;

• **l'identification des temps** se fera par une horloge intégrée au dispositif d'acquisition. Les distances parcourues et les surfaces travaillées pourront dans un premier temps être obtenues en post traitement.

Pour réduire le nombre de données enregistrées, l'acquisition pourra se faire à chaque changement d'état de capteurs « tout ou rien », et sur demande de l'opérateur, la sauvegarde des fichiers constitués étant obtenu à la coupure du contact de l'arrêt du tracteur.

Afin de satisfaire ce cahier des charges, l'application a été développée à partir d'un boitier Kerlink Wirma Nomad basé sur un processeur ARM920T pouvant traiter jusqu'à 200 MIPS à 180 MHz. Ce boitier comporte une mémoire SDRAM de 32 Mo et une mémoire flash de 32 Mo ainsi qu'un récepteur GPS 16 canaux utilisant la norme NMEA 2.0. Le programme de lecture et d'enregistrement des données provenant des capteurs a été élaboré à partir de développements en langage C et de script Linux. L'état de fonctionnement de la prise de force, du relevage arrière et du bras de troisième point est détecté par le changement d'état des entrées numériques du boîtier correspondantes. La mesure du niveau de carburant du réservoir est obtenue avec une jauge à carburant capacitive Vepamon connectée sur un port série RS232 du boîtier.

La photo ❷ montre les différents capteurs utilisés. Les informations d'identification RFID délivrées par le système Ingecom sont collectées par le second port série RS232 du boîtier. Les données recueillies et assemblées constituent des fichiers textes qui sont sauvegardés sur une clé USB en vue d'un transfert vers une base de données pour une exploitation ultérieure. Le schéma de principe du système d'acquisition de données est représenté sur la figure ❸.

5 Indicateurs proposés pour l'évaluation fine des performances énergétiques des exploitations agricoles.

Flux d'énergie			Indicateur	Exemple d'indicateur	Objectif de l'indicateur	Pertinence vis-à-vis de l'évaluation des performances énergétiques
Énergie directe	Échelle spatiale	Carburants	UF*/ha de culture/parcelle/ opération technique	Consommation pour désherber 1 ha de blé de la parcelle X	Évaluer les opérations les plus énergivores pour chaque itinéraire technique de chaque culture. Comparer les consommations d'une même opération pour différentes cultures.	➔ Évaluer la rentabilité et l'efficacité énergétique par culture et/ou opération. ➔ Alimenter les bases de données.
Énergie directe	Échelle spatiale	Carburants, gaz de ville, énergies renouvelables	UF/m²/type de bâtiment	Consommation pour chauffer à l'électricité 1 m² de la salle de traite.	Évaluer les bâtiments les plus énergivores.	➔ Orienter les améliorations et modifications à effectuer. ➔ Alimenter les bases de données.
Énergie directe	Échelle temporelle	Carburants, gaz propane, butane, HVP (huile végétale pure)	UF/h d'opération technique/ équipement/ culture	Consommation pour 1 h de désherbage d'un blé avec la herse XY	Identifier les outils les plus énergivores pour chaque opération de chaque itinéraire technique.	➔ Orienter les choix pour remplacer le matériel. ➔ Alimenter les bases de données concernant la consommation du matériel.
Énergie indirecte	Échelle spatiale	Tous intrants	UF/ha culture/ opération technique	Consommation pour désherber 1 ha de blé	Évaluer les opérations les plus consommatrices pour chaque itinéraire technique.	➔ Évaluer la rentabilité et l'efficacité énergétique par culture et ou opération. ➔ Orienter un changement d'assolement, de pratique, de produits.
Énergie indirecte	Échelle spatiale	Produit de nettoyage	UF/m²/bâtiment	Consommation pour nettoyer 1 m² de la salle de traite		
Énergie indirecte	Échelle temporelle	Tous intrants	UF/année culturale ou cycle de production/ opération technique/culture	Consommation annuelle (ou cycle de production) pour le désherbage du blé	Identifier les opérations les plus énergivores de chaque itinéraire technique.	➔ Évaluer la rentabilité des cultures. ➔ Orienter les changements de pratiques.

* UF = unité de flux évalué (litre, kWh, kg…).

Après le démarrage du tracteur, le changement d'état d'un capteur, ou la demande de l'opérateur provoquera une acquisition constituée d'un message ou d'une trame regroupant les informations suivantes : date, temps, données GPS, état des capteurs utilisés, informations concernant le relevé de la consommation de carburant et identification RFID. Ces trames sont regroupées dans des fichiers texte directement exploitables sous un tableur de type Excel. Pour l'intégration de ces données dans une base de données, un premier traitement des données est nécessaire, au moyen notamment d'une table de vérité, afin de connaître les différentes phases de fonctionnement, y attribuer les valeurs de niveaux de carburant mesurées et l'identification RFID correspondante. Ce traitement permet de convertir les valeurs brutes obtenues par les capteurs en valeurs directement exploitables pour le calcul des indicateurs de performances énergétiques proposés.

Exemple de calcul d'indicateurs sur la base des informations collectées à l'aide de la solution d'acquisition développée

Huit sites pilotes servent de support au projet Energé'TIC (station expérimentale de La Jaillière, Loire Atlantique – Arvalis Institut du Végétal ; station expérimentale de Kerguéhennec, Morbihan – CRAB ; station expérimentale de Derval, Loire Atlantique – Institut de l'élevage ; site de recherche et d'expérimentation de Montoldre, Allier – Irstea ; exploitation du lycée agricole de Vesoul, Haute-Saône ; exploitation du lycée agricole de Moulins, Allier ; exploitation du lycée agricole de Brioude, Haute-Loire ; exploitation du lycée agricole de Marmilhat, Puy-de-Dôme).

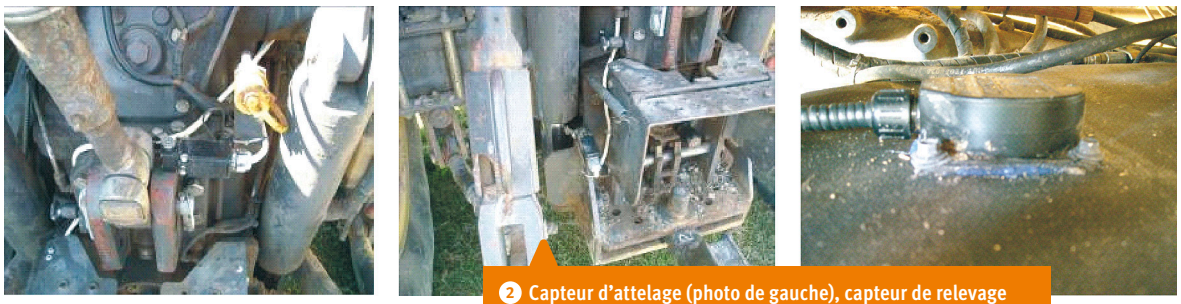
Ces sites ont été choisis pour prendre en compte la grande diversité de situations en exploitations de grandes

6 Indicateur de performance énergétique le plus fin obtenu pour le travail du sol (Montoldre – Campagne 2010).

Date	Attelage	Opérateur	Culture	Parcelle	Opération technique	Quantité intrant (l)	Durée du travail (min)	Durée de non travail (min)	Surface travaillée (ha)	Distance parcourue (m)	Indicateur calculé (l/ha)
18/08/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Triticale conventionnelle	5 PIQ	Labour	102	450		4,16	21 894,7	24,52
26/08/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Blé conventionnelle	12 PIQ	Labour	40	120		0,89	6 357,14	**44,94**
09/06/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Blé conventionnelle	1 PIQ	Labour	117	480	1	1,87	13 357,1	**62,57**
15/03/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Blé conventionnelle	2 PIQ	Labour	143	480	1	2,83	26 698,1	**50,53**
22/05/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Blé conventionnelle	2 3 4 PAL	Labour	96	405	15	6,36	45 428,6	**15,09**
20/05/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Blé conventionnelle	13 PAL	Labour	101	495	45	5,19	37 071,4	**19,46**
22/05/2010	Tracteur Renault 640 + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Orge conventionnelle	567 a PAL	Labour	78	345	15	4,6	32 857,1	16,96
23/03/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Desnoyer	Maïs conventionnelle	3 PIQ	Déchaumage céréales	26,56	118,81		4,34		6,12
23/03/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Desnoyer	Maïs conventionnelle	4 PIQ	Déchaumage céréales	10,65	47,63		1,74		6,12
23/03/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Desnoyer	Maïs conventionnelle	8 PAL	Déchaumage céréales	20,81	93,08		3,4		6,12
23/03/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Desnoyer	Soja conventionnelle	10 PAL	Déchaumage céréales	7,34	32,85		1,2		6,12
20/07/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Beurrier	Orge conventionnelle	14 a PAL	Déchaumage céréales	23	90	75	2	5 882,35	11,50
29/07/2010	Tracteur Renault 640 + déchaumeur Kongskilde Vibroflex	Beurrier	Orge conventionnelle	567 a PAL	Déchaumage céréales	27	100	45	4,6	10 000	5,87
09/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + charrue Kuhn Multimaster 121	Desnoyer	Maïs conventionnelle	8 PAL	Labour	78	390	9	3,4	24 285,7	22,94
16/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + chisel bourbonnais	Desnoyer	Maïs conventionnelle	3 PIQ	Déchaumage céréales	29,84	95	6,26	4,34	8 680	6,88
16/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + chisel bourbonnais	Desnoyer	Maïs conventionnelle	4 PIQ	Déchaumage céréales	11,96	30	24,14	1,74	3 480	6,87
16/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + chisel bourbonnais	Desnoyer	Maïs conventionnelle	6 PIQ b	Déchaumage céréales	14,51	50	29,27	2,11	4 220	6,88
16/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + chisel bourbonnais	Desnoyer	Maïs conventionnelle	8 PAL	Déchaumage céréales	0,69	10	1,39	0,1	200	6,90
17/03/2010	tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	1 PAL	Hersage	18,95	66,32		5,4	9 000	3,51
17/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	11 PAL	Hersage	3,33	11,67		0,95		3,51
17/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	20 PAL + 21 PAL	Hersage	14,84	51,95		4,23	7 050	3,51
17/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	23 PAL + 24 PAL	Hersage	20,63	72,21		5,88	9 800	3,51
17/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	26 PAL	Hersage	21,05	73,68		6	10 000	3,51
17/03/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Foucher	Desnoyer	Prairie conventionnelle	30 PAL	Hersage	11,19	39,18		3,19	5 316,67	3,51
20/08/2010	Tracteur Renault Ares 610 RZ + herse Kuhn HR 3002	Beurrier	Triticale conventionnelle	5 PIQ	Hersage	5,1	220	2	4,16	13 866,7	12,26

❼ Indicateur de performance énergétique le plus agrégé obtenu pour le travail du sol (Montoldre – Campagne 2010).

Date	Attelage	Opérateur	Production	Parcelle	Opération technique	Quantité intrant	Durée du travail	Durée de non travail	Surface travaillée	Distance parcourue	Indicateur calculé (l/ha)
Tout type de date	Tout type d'attelage	Tout type d'opérateur	Tout type de culture	Tout type de parcelle	Travail du sol (toutes sous-opérations confondues)	1 068,35			84,56		12,63



❷ Capteur d'attelage (photo de gauche), capteur de relevage (photo centrale), jauge à carburant (photo de droite).

cultures et de polyculture et élevage. Un bilan Planète, à l'échelle de l'exploitation, a déjà été réalisé sur la plupart des sites et a permis d'identifier globalement les postes les plus consommateurs en énergie. Tous les sites étudiés sont équipés de logiciels de gestion qui recueillent les informations consignées sur papier, agenda ou Pocket PC. Des enregistrements ont régulièrement été réalisés au cours de l'année 2010 pour les opérations suivantes : travail du sol, distribution des aliments, entretien paysager, fertilisations organique et minérale, irrigation, protection des cultures, récolte, semis.

Parmi les huit sites, le site de Montoldre a été choisi pour expérimenter la solution d'acquisition présentée dans cet article. Un exemple de résultat d'indicateur est fourni pour l'opération technique travail du sol. Cette opération technique a fait l'objet d'une collecte de données à l'aide de la solution technologique développée (25 enregistrements). Elle est composée de plusieurs sous-opérations (labour, déchaumage, hersage).

À partir de ces données, nous avons calculé les indicateurs de l'échelle spatiale suivants du niveau le plus fin au niveau le plus agrégé :

- litres de carburant utilisés pour réaliser une sous-opération de travail du sol pour une parcelle, une culture, un opérateur, un équipement donné pour l'année 2010 (niveau le plus fin) ;
- litres de carburant utilisés pour l'opération de travail du sol par parcelle ;
- litres de carburant utilisés pour l'opération de travail du sol par culture ;
- litres de carburant utilisés pour l'opération de travail du sol (niveau le plus agrégé pour l'opération culturale étudiée).

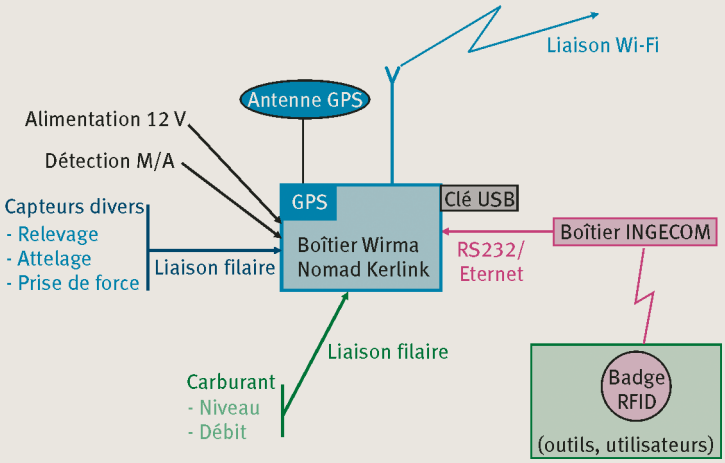
Les tableaux ❻ et ❼ présentent les résultats de calcul respectivement pour l'indicateur au niveau le plus fin et celui au niveau le plus agrégé pour l'opération technique travail du sol. Le passage de l'indicateur le plus fin à l'indicateur le plus agrégé pour l'opération technique se fait en réalisant le rapport de la somme des litres de carburant pour l'ensemble des sous-opérations par la somme de l'ensemble des surfaces travaillées.

Dans notre cas, la consommation de carburant pour le labour varie de 15,09 à 62,57 l/ha, soit une variation du simple au quadruple (415 %) d'une parcelle à l'autre.

Après analyse, il s'avère que les résultats obtenus pour les parcelles PIQ (variant de 44,94 à 62,57 l/ha) reflètent bien la réalité d'un travail réalisé sur des sols fortement argileux (40 % d'argile en moyenne sur les parcelles PIQ) dans des conditions humides. Le travail du sol pour les parcelles PAL est moins énergivore (15,09 à 19,46 l/ha) du fait de la texture plus facile à travailler de ces dernières (sols sablo-limoneux).

On constate que la mise au point de ces indicateurs permet d'identifier la variabilité parcellaire rencontrée pour une même sous-opération (encadré orange – tableau ❻)

❸ Schéma de principe du système d'acquisition.



et permet un pilotage fin des performances énergétiques par l'identification notamment des parcelles « à risque ».

L'indicateur agrégé (tableau ❼) nous donne la valeur moyenne de l'ensemble des opérations de travail du sol pour l'exploitation de Montoldre (12,63 l/ha pour la campagne 2010). Cet indicateur peut servir pour comparer les résultats des exploitations entre elles ou servir de référence de base en vue d'une amélioration future des pratiques.

Conclusion et perspectives

Le but de cette étude n'était pas de révolutionner le monde du diagnostic énergétique, mais de s'inspirer des diagnostics existants pour fournir des indicateurs de pilotage pour l'évaluation des performances énergétiques à une échelle infra-exploitation.

Ce travail, s'inscrivant dans le cadre d'un projet sur l'utilisation des NTIC pour l'évaluation des performances énergétiques des exploitations agricoles, a permis d'évaluer les besoins en informations, les modalités de collecte et de traitement des données nécessaires au calcul des indicateurs proposés. L'étude donne ainsi les bases « idéales » pour réaliser un diagnostic fin.

La solution d'acquisition présentée est un des exemples des solutions proposées dans le cadre du projet Energé'TIC. Les solutions développées dans les autres sites pilotes (compteurs électriques divisionnaires, pinces ampéremétriques) permettront d'analyser les indicateurs proposés pour d'autres types d'énergies directes et d'autres équipements (bâtiments, équipements fixes). Le panel d'outils de mesures disponibles et existants conditionnera et formalisera davantage le choix final des indicateurs.

L'application de ces indicateurs sur les huit exploitations partenaires du projet a été réalisée courant 2011. Elle a permis de renseigner les sites pilotes sur leurs performances et avoir un premier aperçu des ordres de grandeurs de certaines consommations, en calculant les indicateurs définis aux différentes échelles d'analyse à l'aide de l'entrepôt de données développé dans le cadre du projet.

Nous avons montré par l'exemple du travail du sol l'intérêt de ces indicateurs pour le pilotage fin des performances énergétiques des exploitations agricoles. À terme, ces indicateurs et les informations recueillies *via* les NTIC permettront d'élaborer des références de consommations énergétiques et de compléter les référentiels et bases de données utilisés dans les inventaires d'analyses du cycle de vie afin de les adapter au contexte français. ■

Remerciements

Les auteurs remercient Julie BUISSON, stagiaire de licence professionnelle « Gestion durable des ressources en agriculture » ; Vincent ABT, Jean-Pierre CHANET, Mylène ESCALLIER, Géraldine ANDRÉ, unité de recherche Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes (Irstea), pour leurs contributions à l'étude présentée dans cet article. Ce travail a bénéficié du soutien financier du projet CASDAR Energé'TIC (2009-2011).

Les auteurs

Marilys PRADEL et Daniel BOFFETY
Irstea, centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF, Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre
marilys.pradel@irstea.fr
daniel.boffety@irstea.fr

Quelques références clés...

- **Agreste Infos rapides – moyens de production,** mars 2011, accessible en ligne à l'adresse suivante : http ://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_moyen1103note.pdf
- **CAPILLON, A., GABRIELLE, B., GIRARDIN, P., GUICHARD, L., GUILLAUME, B., HUBERT, A., LEISER, H., SOULAS, G., VAN DER WERF, H.,** 2005, *Méthodologies d'évaluation des impacts environnementaux des pratiques agricoles*, INRA, Rapport pour le département Environnement et Agronomie, 50 p.
- **SOLAGRO,** 2007, *Énergie dans les exploitations agricoles : état des lieux en Europe et éléments de réflexion pour la France*, Étude ADEME/MAP n° 0671C0036, mai 2007, 35 p.
- **VAN DER WERF, H.M.G., PETIT, J.,** 2002, Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : A comparison and analysis of 12 indicator-based methods, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 93, 1-3, p. 131-145.

▶ Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr