



HAL
open science

Évaluation fine des performances énergétiques des exploitations agricoles par l'utilisation des NTIC

Emilie Donnat, Daniel Boffety, Marilys Pradel, Aurélie Tailleur, Sandro Bimonte, Jean-Pierre Chanet

► To cite this version:

Emilie Donnat, Daniel Boffety, Marilys Pradel, Aurélie Tailleur, Sandro Bimonte, et al.. Évaluation fine des performances énergétiques des exploitations agricoles par l'utilisation des NTIC. *Innovations Agronomiques*, 2013, 30, pp.267-281. 10.17180/vdsw-t455 . hal-04652257

HAL Id: hal-04652257

<https://hal.inrae.fr/hal-04652257>

Submitted on 18 Jul 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Évaluation fine des performances énergétiques des exploitations agricoles par l'utilisation des NTIC

Donnat E.¹, Boffety D.², Pradel M.², Tailleur A.⁴, Bimonte S.³, Chanet J.-P.³

¹ ACTA, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12

² IRSTEA, centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF, Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre

³ IRSTEA, centre de Clermont-Ferrand, 24 avenue des Landais, BP 50085, 63172 Aubière Cedex

⁴ ARVALIS- Institut du végétal, La Jaillière, 44370 La Chapelle St Sauveur

Correspondance : emilie.donnat@acta.asso.fr

Résumé

Les données utiles au calcul d'indicateurs de performances énergétiques des exploitations agricoles à différentes échelles nécessitent une collecte fine et un stockage important d'informations auxquels seules les avancées technologiques peuvent répondre. Un travail de recensement des solutions technologiques existantes montre que de plus en plus de solutions sont aujourd'hui disponibles, notamment sur les nouveaux agroéquipements, pour fournir un grand nombre de données utiles au calcul de ces indicateurs. Un important travail reste cependant à réaliser pour proposer aux agriculteurs des solutions bas-coûts, faciles à mettre en œuvre et totalement adaptées à leurs besoins pour faciliter la mesure, la collecte et le stockage des informations de façon automatique et raisonnée.

En matière de systèmes d'informations, la technologie des entrepôts de données spatiales fait émerger de nouvelles solutions pour le recueil et l'utilisation décisionnelle des données. Ces technologies permettent d'établir, sur des données collectées et archivées, toutes sortes d'indicateurs résultant d'opérations agrégées en fonction de différents critères (périodes de temps, types de machines ou d'outils, types de travaux, etc.), ainsi que des découvertes de relations causales et de classification de données.

Les récentes avancées technologiques (capteurs embarqués, localisation GPS, communication et réseaux sans fil) et le déploiement de systèmes d'acquisition et d'information dans les entreprises agricoles permettent d'envisager aujourd'hui d'accéder en continu à des données de qualité, en quantité suffisante et à une échelle plus fine de gestion.

L'intégration de ces solutions technologiques dans l'exploitation agricole contribuera à améliorer les connaissances sur l'évaluation des dépenses énergétiques et le pilotage énergétique par une gestion raisonnée des informations collectées à une échelle plus fine de temps (jour, semaine, mois, année civile, année culturale, cycle de production, etc.), d'espace (parcelle/bâtiment, etc.) et d'analyse de la production (culture/lot d'animaux, chantier, tâche, outil, opérateur, etc.).

Mots-clés : Indicateurs de performances énergétiques, consommation d'énergie directe et indirecte, systèmes d'acquisition et d'information, bilan, échelles

Abstract: Precise evaluation of the energy performance of farms by the use of ICTs

Data needed for the calculation of energy performance indicators of the farms at different scales require a more precise collection and storage of more information to which only technological advances can answer. A census of the existing technological solutions shows that more and more solutions are now available, including on the new agricultural equipments, which provide a large number of data relevant to the calculation of these indicators. However, important work remains to offer farmers low-cost

solutions, easy to implement and fully adapted to their needs to facilitate measurement, collection and storage of information, in a automatic and sound way. In information systems, spatial data warehouse technology brought new solutions for collection and decision-making. These technologies enable to establish, on collected and archived data, all kinds of indicators resulting from operations aggregated according to different criteria (time periods, types of machines or tools, types of work, etc.), as well as discoveries of causal relationships and classification of data. The recent technological advances (on-board sensors, GPS tracking, communication and wireless networks) and the deployment of information in farms and acquisition systems enable us to envisage today non-stop access to quality data, in sufficient quantity and at a finer scale of management. The integration of these technological solutions in the farm will contribute to improving knowledge on the assessment of energy expenditure and energy control by a sound management information collected at a finer scale of time (day, week, month, year, crop year production cycle, etc.), space (plot/building, etc.) and production analysis (culture/lot of animals, construction, task, tool, operator, etc.).

Keywords: Indicators of energy performance, direct and indirect energy consumption, systems for acquisition and information, balance, scales

Introduction

Dans le contexte européen et mondial actuel, les enjeux de développement durable, de préservation des ressources naturelles et de lutte contre le changement climatique affectent directement le secteur agricole et plus particulièrement les exploitations agricoles. Concernées par chacun de ces enjeux, les dépenses énergétiques des exploitations agricoles sont ainsi au cœur des préoccupations actuelles. Que les dépenses énergétiques soient directes (consommation d'énergie fossile par les agroéquipements, consommation d'électricité pour les bâtiments, etc.) mais aussi indirectes (apport d'aliments, apport de fertilisants), il est aujourd'hui important d'évaluer et de quantifier ces postes de dépenses pour améliorer les performances énergétiques mais aussi économiques des entreprises agricoles. Cette évaluation passe notamment par l'élaboration de bilans énergie et matière qui constitue un enjeu fort pour la maîtrise des coûts d'exploitation et la maîtrise des impacts des activités agricoles sur l'environnement. Les bilans sont en général établis à l'échelle globale de l'exploitation agricole faute de données plus précises sur les flux d'énergies et de matières. Les récentes avancées technologiques issues des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) et le déploiement de systèmes d'acquisition et d'information dans les entreprises agricoles permettent d'envisager aujourd'hui d'accéder en continu à des données de qualité, en quantité suffisante et à une échelle plus fine de gestion (opération, parcelle, mois, semaine). Parmi les travaux en cours et permettant d'alimenter les choix techniques, technologiques et scientifiques, notons ceux sur l'évaluation des consommations d'énergie et les bilans énergétiques, les Analyses du Cycle de Vie (ACV) et les référentiels ACV, la modélisation des flux dans l'entreprise agricole, les systèmes d'acquisition et de communication de données et les entrepôts de données spatiales (Bimonte et al., 2012).

Dans ce contexte, le projet EnergéTIC (CasDAR 2008) avait pour objectif de montrer la faisabilité et l'intérêt de solutions technologiques s'appuyant sur les NTIC (capteurs embarqués, localisation GPS, communication et réseaux sans fil) associées aux systèmes d'information existants dans les exploitations agricoles, pour permettre d'acquérir en routine des données pour le pilotage opérationnel des performances énergétiques des exploitations agricoles et l'élaboration de bilans énergétiques plus fins à l'échelle de la parcelle, de l'atelier de production ou de l'opération.

Co-animé par l'ACTA et l'IRSTEA, ce projet s'est appuyé sur l'expertise métier de l'ACTA, de l'Institut de l'Elevage, d'ARVALIS-Institut du végétal, de la FNCUMA et de SOLAGRO dans le domaine du pilotage énergétique des exploitations agricoles, sur l'expertise scientifique et technique de l'IRSTEA, d'AgroSup Dijon, de Bordeaux Sciences Agro, de l'EPLEFPA Vesoul dans la conception de solutions

technologiques pour l'acquisition de données opérationnelles, en lien très étroit avec l'enseignement supérieur et technique (EPLEFPA Brioude, Marmilhat, Moulins, Vesoul).

Huit sites pilotes ont servi de support au projet. Ces sites ont permis d'aborder une grande diversité de situations en exploitations de grandes cultures, polyculture et élevage. Un bilan Planète®, à l'échelle de l'exploitation, avait déjà été réalisé sur la plupart des sites et avait 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. Sur certains sites, quelques solutions technologiques ont déjà été déployées pour améliorer le pilotage des activités (GPS, équipement embarqué sur tracteur, pinces ampérométriques, pèse-essieux, etc.) sans pour autant garantir une collecte systématique de données.

1. Outils, indicateurs, données et solutions technologiques existantes pour l'évaluation des performances énergétiques

Pour élaborer un diagnostic fin des performances énergétiques d'une exploitation agricole, il est nécessaire au préalable d'identifier les informations à collecter, la manière de les collecter et de les traiter et à quelle échelle les collecter. Pour cela, un état de l'art des méthodes de diagnostics à partir des indicateurs et des données existantes a été réalisé, ainsi qu'un état de l'art des solutions technologiques existantes qui peuvent être mises en œuvre à un coût raisonnable.

1.1 Quels sont les différents outils de diagnostic permettant d'évaluer les performances énergétiques des exploitations agricoles ?

L'objectif de cette étude a été avant tout de faire un recensement et une évaluation des indicateurs de performances énergétiques utilisés par les outils existants. Cet état de l'art des indicateurs et de l'échelle de collecte des informations nécessaires à leurs calculs devait permettre d'identifier des indicateurs plus détaillés et les solutions technologiques permettant de collecter les informations nécessaires afin de réaliser des bilans énergétiques à une échelle plus fine.

Pour chaque outil recensé, l'objectif a été d'identifier les indicateurs utilisés, de définir leur mode de calcul, de recenser les données nécessaires à la collecte et d'indiquer l'unité utilisée. Treize outils de diagnostic énergétique issus de l'état de l'art ont été retenus en fonction de leur pertinence et de leur accessibilité pour la suite des travaux.

1.2 Quel est l'ensemble des postes consommateurs d'énergie directe et indirecte ?

La seconde étape a consisté à faire un recensement le plus exhaustif possible des postes de consommation d'énergie directe et indirecte pouvant exister sur une exploitation agricole et d'identifier à quelles échelles une collecte d'information serait possible pour avoir des indicateurs de performances énergétiques détaillés. Pour cela, il a fallu définir le périmètre étudié pour la collecte des données au sein de l'exploitation.

Afin de bien déterminer les différents postes de consommations de l'exploitation agricole, le périmètre étudié a été limité à l'ensemble des opérations techniques réalisées pour les activités de production ou de fonctionnement général. Les activités liées à des prestations de services pour des tiers ou à l'utilisation d'entreprises de travaux agricoles n'ont pas été prises en considération.

Un état des lieux complet des différents postes de consommation d'énergie directe et indirecte d'une exploitation agricole a été réalisé. Il a été choisi de présenter les postes de consommation d'énergie directe et indirecte par opération afin de pouvoir identifier les futurs indicateurs de performances énergétiques à mettre en place pour réaliser un bilan fin des consommations énergétiques à différentes échelles (parcelle, culture, lot d'animaux, etc.) et d'identifier si des solutions technologiques peuvent être mises en place facilement pour collecter les informations nécessaires.

Trois types d'opérations liées au fonctionnement de l'exploitation agricole ont été déterminés : les opérations culturales, les opérations d'élevage et les opérations d'ordre général.

- **L'opération culturale** est décrite comme une division de l'itinéraire technique qui consiste à intervenir sur la culture.
- **L'opération d'élevage** est définie comme étant toute intervention liée 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 opérations d'ordre général** que l'on ne peut allouer à aucun atelier précis. Elles peuvent être effectuées pour le compte de plusieurs ateliers ou éléments du système opérant. C'est le cas pour le nettoyage, la logistique, la maintenance, les transports et déplacements, la surveillance et la gestion du système, les activités de transformation, conditionnement, conservation des produits et la commercialisation.

Ces trois grands types d'opérations sont composés de sous-opérations, regroupées selon leur degré de dépendance les unes par rapport aux autres. Pour chacune de ces sous-opérations, nous avons recensé les éléments du système opérant mobilisés pour la réalisation de ces sous-opérations (matériel, équipement et bâtiments), l'énergie indirecte liée à l'utilisation des intrants et fournitures et l'énergie directe consommée par le tracteur, l'automoteur et/ ou par les bâtiments (chauffage, ventilation, aération, climatisation, éclairage) dans certains cas.

1.3 Quelles sont les solutions technologiques actuelles ?

Le recensement des solutions technologiques identifiées lors du 73^{ème} SIMA (*Salon International du machinisme agricole*) en février 2009 à Paris Villepinte n'est pas exhaustif mais représentatif de l'état actuel des solutions proposées (Boffety, 2009). Globalement, s'il apparaît que les aspects relatifs aux écotecnologies, à la diminution des consommations d'énergie directe, à la réduction des pollutions et à la préservation des ressources naturelles commencent à être bien pris en compte par une majorité de constructeurs d'agroéquipements, peu de solutions technologiques sont encore proposées pour permettre de mesurer, collecter et stocker les informations utiles à l'évaluation des performances énergétiques et environnementales des exploitations agricoles de façon plus ou moins automatique.

Les besoins des nouveaux indicateurs de performances énergétiques des exploitations agricoles ont été exprimés en fonction des objectifs d'évaluation des dépenses et des performances énergétiques pour le suivi des consommations, le pilotage des pratiques agricoles et la réalisation de référentiels de consommations énergétiques. Les éléments actuellement recueillis permettent une approche des cahiers des charges des futures solutions technologiques à mettre en place pour que soient prises en compte les utilisations économiques et environnementales des équipements avec la collecte des données s'y rapportant.

Ce premier travail de recensement a été complété lors du 74^{ème} SIMA qui s'est tenu à Villepinte en février 2011 en faisant le point des évolutions et des tendances auprès des exposants, constructeurs et fournisseurs d'agroéquipements (Boffety, 2011).

L'évolution des normes antipollution et le développement de l'électronique embarquée, avec la présence confirmée du Bus CAN (Controller area network), contribuent à l'émergence de solutions de mesure de la consommation de carburant, d'analyse des performances des tracteurs et des automoteurs et à la réduction de la pollution (technologie SCR, filtre à particules associé à un catalyseur d'oxydation diesel et une vanne EGR).

Pour les tracteurs ou les automoteurs les plus sophistiqués et pourvus d'électronique embarquée, notamment équipés du Bus CAN, l'information de consommation de carburant est souvent disponible à titre informatif pour le conducteur sous forme de consommation instantanée, consommation horaire moyenne ou parfois rapportée à une durée de travail. Certains terminaux de bord plus évolués avec des fonctionnalités dédiées à des pratiques d'agriculture de précision proposent une analyse plus avancée

des performances du tracteur ou de l'automoteur en affichant des informations d'analyse de la consommation de carburant, quantité totale de fuel utilisée en litre, quantité moyenne de fuel consommée par hectare (l/ha) ou par heure de fonctionnement (l/h), distance parcourue par litre de fuel consommé (km/l) avec même parfois une approche de l'évaluation du rendement sous la forme d'une valorisation énergétique par litre de fuel consommé (kWh/l). Pour la plupart des machines, cette information de consommation est obtenue à partir des calculs effectués au niveau des boîtiers électroniques de gestion de l'injection du carburant qui tiennent compte des quantités de carburant injectées en fonction des paramètres de conception du moteur, régime de rotation, position de la commande d'accélérateur, charge du moteur, etc.

Les informations visuelles ne sont pas toujours mémorisées ni rendues disponibles ou restituées pour une utilisation ou une analyse ultérieure. Seuls les tracteurs ou les automoteurs les plus sophistiqués avec notamment certaines fonctionnalités liées à des pratiques d'agriculture de précision permettent de recueillir des données sur carte SD, PCMCIA ou clé USB, pour ensuite permettre d'éventuels transferts en vue d'analyses et d'exploitations ultérieures. Différents niveaux de précision et différents types de restitutions et de sorties sont donc possibles à des coûts variables, orientant ainsi le choix des solutions retenues en fonction de la précision désirée, des conditions d'utilisation et des amplitudes de consommations possibles.

2. Expression des besoins et informations à collecter pour le pilotage opérationnel des performances énergétiques et la réalisation des bilans énergétiques des entreprises agricoles à différentes échelles

2.1 Identifier et/ou concevoir des indicateurs pouvant évaluer les performances énergétiques des différents postes identifiés

Ce volet a consisté à identifier les différents flux énergétiques mis en œuvre par les activités consommatrices d'énergie identifiées et l'échelle de collecte de ces flux en vue de proposer un éventail d'indicateurs de performances énergétiques. Il s'agit d'un préalable à la définition des cahiers des charges de systèmes d'informations et de solutions technologiques à mettre en œuvre.

Les méthodes employées en France pour établir des diagnostics énergétiques utilisent pour la plupart différents types d'indicateurs qui sont, soit peu sensibles à des variations de pratiques car définis à l'échelle de l'exploitation agricole, soit de mauvais outils de pilotage par manque de distinction entre les énergies utilisées. Ces indicateurs ne sont donc pas adaptés à une évaluation fine des dépenses énergétiques d'une exploitation agricole. Une dizaine de nouveaux indicateurs a donc été proposée pour évaluer à une échelle plus fine les consommations énergétiques.

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;
- 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.

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 cultureux 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 avons utilisé une unité plus adaptée à ce type de surface : le m² ;

- 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 aux bâtiments (ex : chauffage), l'heure n'étant pas adaptée, l'année civile, l'année culturale et le cycle de production ont été privilégiés, 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 ou animale). L'unité de ce produit est celle couramment utilisée par l'agriculteur (tonne de matière sèche, litre de lait, UGB, etc.). 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 1 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, culture, exploitation) comme indiqué par exemple sur la figure 1.

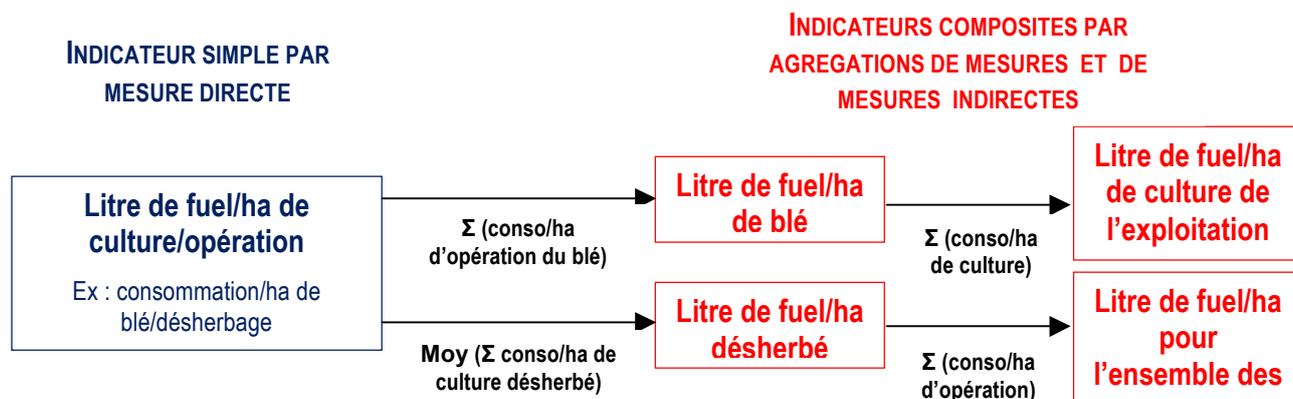


Figure 1 : Niveaux d'agrégation possibles des indicateurs à l'échelle spatiale.

| Flux d'énergie | | Indicateur | Exemple d'indicateur | Objectif de l'indicateur | Pertinence vis-à-vis de l'évaluation des performances énergétiques | |
|-------------------|--------------------|--|--|---|--|---|
| Energie directe | Echelle spatiale | Carburants | UF* /ha de culture/parcelle/ opération technique | Consommation pour désherber 1 ha de blé de la parcelle X | Evaluer les opérations les plus énergivores pour chaque itinéraire technique de chaque culture. Comparer les consommations d'une même opération pour différentes cultures. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Evaluer la rentabilité et l'efficacité énergétique par culture et/ou opération. ➔ Alimenter les bases de données. |
| | | Carburants, gaz de ville, énergies renouvelables | UF/m ² /type de bâtiment | Consommation pour chauffer à l'électricité 1 m ² de la salle de traite | Evaluer les bâtiments les plus énergivores. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Orienter les améliorations et modifications à effectuer. ➔ Alimenter les bases de données. |
| | Echelle temporelle | Carburants, gaz propane, butane, 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. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Orienter les choix pour remplacer le matériel. ➔ Alimenter les bases de données concernant la consommation du matériel. |
| Energie indirecte | Echelle spatiale | Tous intrants | UF/ha de culture/opération technique | Consommation pour désherber 1 ha de blé | Evaluer les opérations les plus consommatrices pour chaque itinéraire technique. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Evaluer la rentabilité et l'efficacité énergétique par culture et/ou opération. ➔ Orienter un changement d'assolement, de pratique, de produits. |
| | | Produits de nettoyage | UF/m ² /bâtiment | Consommation pour nettoyer 1 m ² de la salle de traite | | |
| | Echelle 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. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Evaluer la rentabilité des cultures. ➔ Orienter les changements de pratiques. |

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

Tableau 1 : Indicateurs proposés pour l'évaluation fine des performances énergétiques des exploitations agricoles

2.2 Expression des besoins en information et définition du cahier des charges générique du système d'acquisition et d'information

En fonction des activités exercées au niveau des exploitations agricoles, les besoins en informations sont différents. L'automatisation de la collecte des données serait-elle à privilégier pour s'affranchir de la variabilité due à l'opérateur ?

Plusieurs niveaux d'acquisition de données peuvent être envisagés, soit dans le temps pour un même site pilote, soit d'un site pilote à l'autre. Par exemple, pour le relevé des consommations de carburants par équipement, nous pourrions définir trois niveaux de collecte de données :

- Niveau 1 : Carnet à la pompe permettant de noter les quantités de carburant apportées aux différents équipements,
- Niveau 2 : Carnet à la pompe et plein avant chaque chantier,
- Niveau 3 : Solutions technologiques (débitmètre/jauge) avec protocole de saisie.

Il est important d'identifier, pour chaque donnée collectée, sa qualité, sa fiabilité et sa précision.

Un travail approfondi a dû notamment être mené dans chacun des sites pour identifier comment sont produites chacune des données.

L'étude préalable des sites pilotes a permis :

- De connaître les systèmes de production des huit sites pilotes ;
- D'identifier des activités prioritaires à étudier pour chaque site ;
- De modéliser les principaux flux (énergie, matière) pour chaque activité prioritaire ;
- D'identifier les mesures disponibles et de formaliser le système d'acquisition.

Pour étudier les sites pilotes, la méthodologie d'étude employée a comporté les quatre étapes suivantes : 1) une collecte préalable d'informations (cartographie parcellaire, inventaire du matériel et des infrastructures, fiches de présentation de l'exploitation agricole, Bilan Planète®), 2) une visite du site (liste des activités principales, identification des priorités, liste des ressources, description des itinéraires techniques et des données collectées), 3) une modélisation/formalisation des informations recueillies, 4) une synthèse structurée pour chaque site visité.

Sur le plan méthodologique, le développement d'un système d'information est passé par :

- une étude préalable pour proposer une architecture globale et aboutir à un cahier des charges fonctionnel ;
- une étude détaillée pour obtenir une description complète de la solution à réaliser et aboutir à un cahier des charges technique ;
- une étape de réalisation et de tests ;
- une étape de mise en œuvre avec l'intégration des corrections demandées par les sites pilotes, la généralisation, la formation, la documentation, l'installation et l'exploitation ;
- une étape de maintenance prenant en compte les évolutions à apporter.

Le cahier des charges fonctionnel doit délimiter le périmètre du projet (contexte, objectifs, acteurs, etc.), formaliser l'expression des besoins, lister des fonctionnalités, évaluer les contraintes (techniques, économiques, humaines) et préciser le planning.

Quant au cahier des charges technique, il doit présenter une analyse technique détaillée de la solution à mettre en œuvre, les configurations matérielles et logicielles, les architectures fonctionnelles et techniques, les données, les maquettes d'écran et les contrôles de cohérence.

2.3 Collecte de données

Afin de pouvoir calculer autant d'indicateurs que possible, il a été nécessaire de multiplier les sources d'information.

Les données collectées sur les différents sites pilotes peuvent être classées en deux grandes catégories :

1. Les données relatives à la réalisation des différents travaux (consommation de carburant, durée, produits employés...),
2. Les données propres à chaque exploitation (cartographie, liste du matériel, liste des produits...).

Initialement, les données relatives à l'exécution des travaux devaient être collectées automatiquement via divers systèmes d'acquisition. Cependant, la mise en place de ces outils ayant été retardée et étant donné le besoin de données nécessaires à la bonne poursuite du projet, il a été décidé de réaliser des fiches de collecte dédiées aux divers sites pilotes. Trois fiches de collecte ont été mises en place afin d'homogénéiser la saisie, de s'assurer que toutes les informations nécessaires ont été correctement relevées et de faciliter la saisie ultérieure des informations.

La première fiche, a été conçue pour collecter les informations relatives à des travaux sur parcelle, la seconde vise le recueil de données des chantiers de distribution des aliments et la dernière les chantiers de transport.

Les données collectées devaient permettre de calculer de manière aussi fine que possible les dépenses énergétiques avec une appréciation de la qualité de la donnée recueillie.

Pour toutes les fiches de collecte, des données standard ont été récupérées.

D'autres sources de données ont été utilisées : des données cartographiques générées par des outils cartographiques propriétaires propres à chaque exploitation, des données issues d'enquêtes

centralisées dans les fiches de synthèse des sites pilotes et enfin, des données issues de fichiers Excel non standardisés (consommations du robot de traite et du tank à lait, ainsi que pour l'irrigation).

3. Développement de solutions technologiques et du système d'acquisition, de communication et d'information

Contrairement aux véhicules routiers (voiture, bus, camion), les agroéquipements mobiles (tracteurs, chargeurs, automoteurs) ont en général une certaine polyvalence. Ils peuvent en effet réaliser de nombreuses opérations techniques de production en fonction des outils auxquels ils sont attelés. Un tracteur peut ainsi effectuer un travail du sol profond avec une charrue, ou superficiel avec une herse, une implantation de culture avec un semoir, un pressage de foin ou de paille avec une ramasseuse presse, un transport de produits avec une remorque, une distribution d'aliments ou de fourrage avec une remorque distributrice, etc.

Afin d'évaluer les consommations de carburants des agroéquipements par opération réalisée, la simple mesure de la consommation de carburant d'un tracteur ne suffit pas. Elle doit notamment s'accompagner d'une identification des attelages, véritables ensembles fonctionnels regroupant un tracteur et un ou plusieurs outils voire avec un ou plusieurs opérateurs. Par ailleurs, il est également important de distinguer les dépenses énergétiques qui relèvent de tâches directement liées à une unité de gestion (travail dans une parcelle ou pour un lot d'animaux) de celles qui relèvent de tâches de préparations diverses, de déplacements, d'activités de logistique non directement affectables à une unité de gestion et relevant plutôt de l'organisation du travail au sein de l'entreprise agricole.

Les travaux ont porté sur la mise en place d'une chaîne d'acquisition complète depuis les capteurs jusqu'aux indicateurs. La Figure 2 présente le flux d'informations mis en œuvre.

Plusieurs solutions technologiques ont initialement été identifiées pour la collecte des données sur les sites pilotes concernés :

- Une solution d'acquisition des consommations en carburant en place à la station de Kerguéhennec (Morbihan),
- Une solution développée par AgroSup Dijon et mise en place sur l'EPL Vesoul (Haute-Saône)
- Une solution d'acquisition automatique de données embarquées sur tracteur développée par IRSTEA,
- Une solution commerciale compteur horaire multi-utilisateurs,
- Des solutions à partir de pinces ampérométriques et compteurs pour la mesure de la consommation électrique.

En prenant en compte à la fois l'état de l'art réalisé, les disponibilités et les besoins des sites pilotes du projet, les solutions finalement retenues pour développement et/ou mise en œuvre sur les sites pilotes en complément des fiches de collecte standardisées sont :

- Une solution de visualisation avec enregistrement manuel et une solution d'acquisition automatique de la consommation de carburant à partir d'une jauge à carburant numérique (développées par IRSTEA),
- Des compteurs électriques, des pinces ampérométriques et un automate industriel pour le suivi de la consommation électrique,
- Une base de données permettant de stocker les données brutes,
- Un entrepôt de données spatiales permettant le calcul d'indicateurs,
- Différentes briques logicielles permettant l'intégration des données,
- Un outil de visualisation cartographique des indicateurs (i.e. système SOLAP).

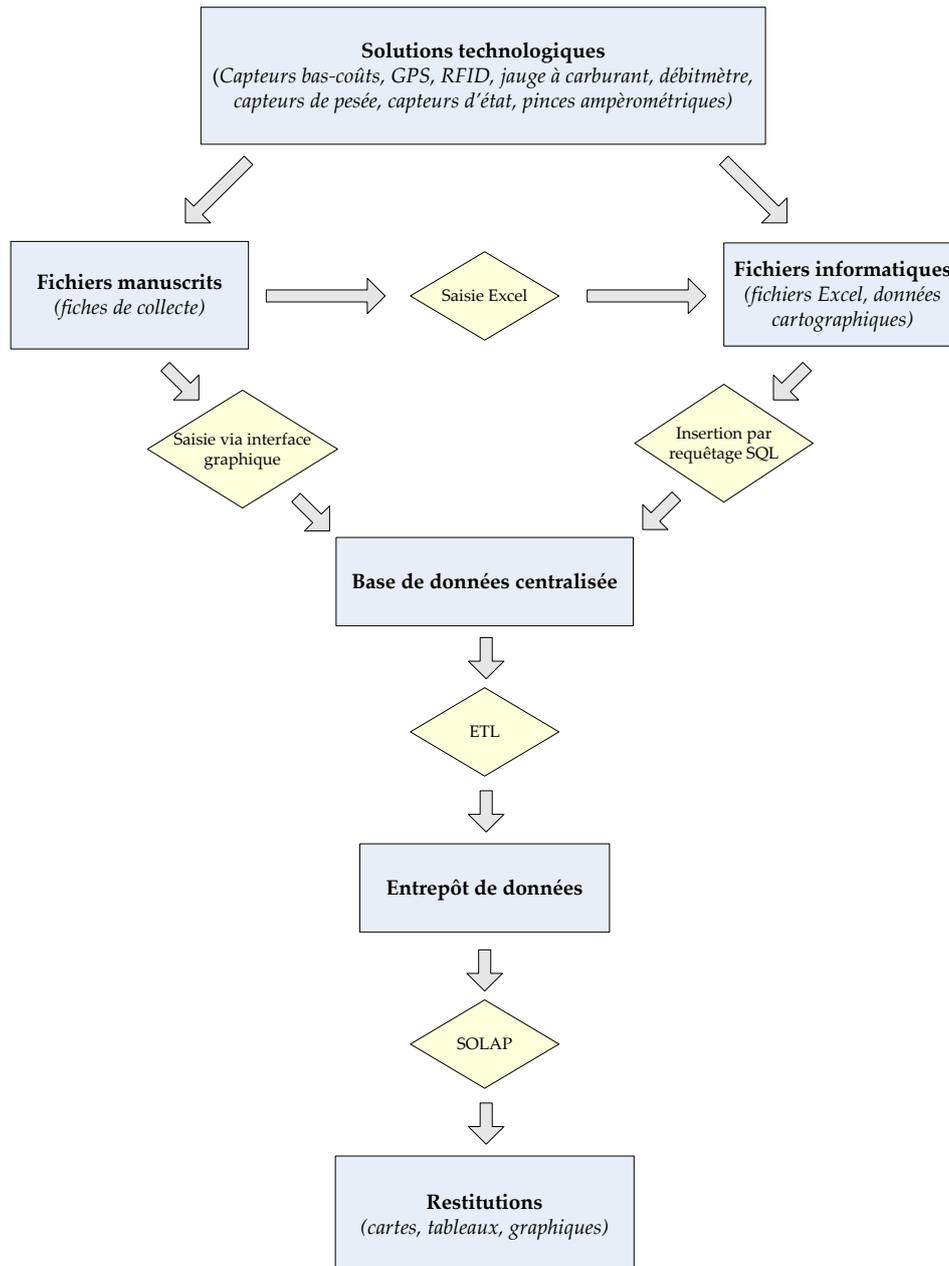


Figure 2 : Flux d'information du capteur à l'indicateur

3.1. Les solutions d'acquisition développées

Un système d'acquisition automatique de la consommation énergétique des équipements mobiles a été développé par l'équipe d'IRSTEA (Figure 3). Ce dispositif permet de suivre précisément l'activité des chantiers avec une mesure de la quantité de carburant dans le réservoir à chaque changement d'état de différents capteurs installés sur le tracteur. Ces différents capteurs "tout ou rien" placés sur les principaux éléments du tracteur permettent de qualifier la nature des tâches réalisées en identifiant les états de fonctionnement des outils. Pour cela, sont donc pris en compte sur le tracteur, l'état de la commande de la prise de force, l'état de la commande d'un distributeur hydraulique auxiliaire, l'état du relevage arrière, l'état du bras du troisième point, l'état du piton d'attelage. Un système GPS directement intégré au boîtier d'acquisition permet la localisation du tracteur. Un système d'identification automatique à partir de badges RFID (Radio Frequency Identification) permet d'identifier les outils attelés au tracteur et donc indirectement les opérations techniques qui y sont associées. Cette

identification porte avant tout sur l'outil principal mais peut également être étendue à l'association d'outils ou d'équipements, aux opérateurs, aux installations fixes ou mobiles et à tout autre équipement associé à un attelage dès l'instant qu'il est muni d'un badge. Les informations d'identification RFID délivrées sont collectées sur le boîtier d'acquisition.

Afin de limiter la quantité de données enregistrées, l'acquisition se fait seulement lorsqu'un changement d'état est détecté sur un des capteurs "tout ou rien", ou sur demande de l'opérateur. Le transfert des fichiers de données de la mémoire interne du boîtier d'acquisition vers la clé USB est exécuté lors de la coupure du contact du tracteur. Les données brutes recueillies et assemblées constituent des fichiers textes organisés avec les informations des différents capteurs : date, temps, données GPS, état des capteurs utilisés, informations concernant le relevé de la consommation de carburant et identification RFID. Ces fichiers chronologiquement sauvegardés sur une clé USB peuvent ensuite être transférés vers une base de données pour envisager leurs exploitations ultérieures.

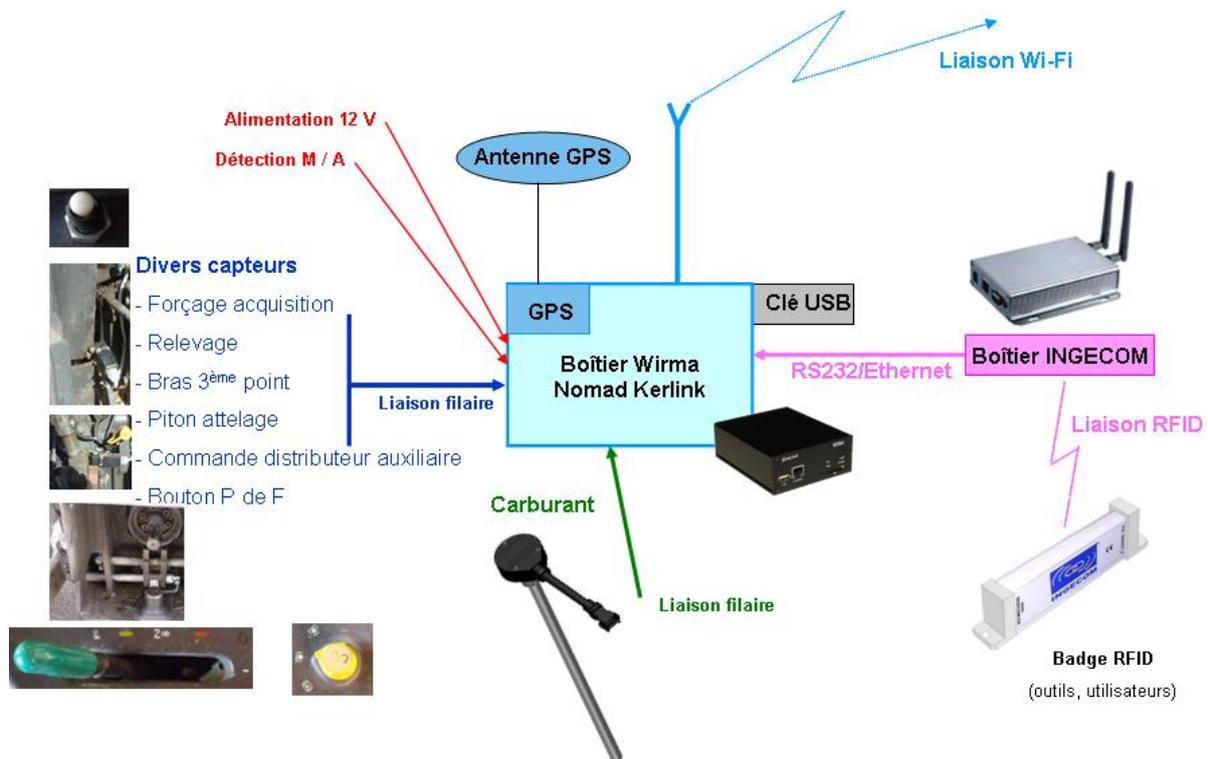


Figure 3 : Schéma de principe de la solution d'acquisition automatique développée (IRSTEA)

Le dispositif développé par AgroSup Dijon est constitué de deux parties dont la première se compose de deux débitmètres à roues ovales générant 400 impulsions par litre de gazole consommé et la seconde abrite une carte électronique comptant les impulsions envoyées par les débitmètres à chaque seconde et transmettant cette information au PDA via la liaison Bluetooth. Ce dispositif est complété par un PDA avec GPS intégré présentant une bonne résistance aux conditions de travail (PDA « durci ») et une précision de localisation acceptable. Au niveau logiciel, l'interface développée permet l'affichage des données en temps réel. En plus de l'affichage de la consommation en litre par heure, il est possible de disposer simultanément de la consommation en litre par hectare. La conversion prend en compte la vitesse d'avancement du tracteur (renseignée par l'utilisateur ou fournie par le GPS) et la largeur de l'outil (renseignée par l'utilisateur). Le PDA enregistre la position GPS du tracteur et la consommation mesurée en L/h et L/ha toutes les secondes. L'utilisateur peut s'il le souhaite définir un temps d'intégration (une moyenne glissante sur les n dernières mesures).

Les tests ont eu lieu sur le site pilote du lycée agricole de Vesoul à régimes constants, avec deux régimes moteurs différents (188 tr/min et 2400 tr/min). La valeur fournie par le débitmètre massique a

été prise comme référence. La différence entre les valeurs fournies par les deux systèmes de mesure demeure inférieure à 2% de cette référence sur l'ensemble des tests.

On a pu constater que très peu, voire pas encore de solutions sont adaptées aux matériels existants et qu'elles restent plus ou moins complètes sur les nouveaux. Par ailleurs, équiper certaines machines avec des dispositifs anciens s'avère difficile. La solution d'affichage de la quantité de carburant du réservoir a nécessité une programmation laborieuse ainsi qu'une calibration jauge/réservoir.

La question du coût d'équipement n'a pas pu être facilement intégrée dans le projet.

3.2. La base de données centralisée

Pour permettre la centralisation des données, une base de données a été créée pour le stockage des informations issues des différents sites. Le chargement de la base peut être réalisé par deux méthodes : la saisie directe via l'interface développée ou une insertion par requête SQL.

Les données issues des pockets pc ou encore transmises par les sites sont généralement dans le format Excel. De la même manière, les données manuscrites sont généralement informatisées dans ce même format.

La base a été réalisée dans le système de gestion de base de données relationnelle et objet (SGBDRO) PostgreSQL 8.4.4.

3.3. La conception de l'entrepôt de données et de l'interface de visualisation

Un schéma global de l'entrepôt a été défini en lien avec les indicateurs souhaités. Ce schéma multidimensionnel permet de calculer des indicateurs à différentes échelles spatiales et temporelles, mais également suivant différentes dimensions thématiques (types de cultures, types de matériels, etc.). L'entrepôt a été réalisé avec les mêmes technologies logicielles que la base de données. Un outil de chargement des données (Extract Transform Load - ETL) a été développé pour partie avec le logiciel Talend Open Studio, spécialisé dans l'intégration et la gestion des données. Ce qui n'a pu être fait via Talend a été réalisé par une macro Excel.

Le cube de données et les restitutions sont générés par JMAP-SOLAP, plateforme visuelle supportant l'exploration et l'analyse spatio-temporelle des données selon une approche multidimensionnelle à plusieurs niveaux d'agrégation via un affichage cartographique ou en diagramme statistique. Un exemple de visualisation tabulaire et cartographique des indicateurs agrégés en utilisant l'interface graphique de JMAP-SOLAP est montré en Figure 4.

4. Calcul d'indicateurs de performances et élaboration de bilans énergétiques fins

Pour calculer les différents indicateurs de performances énergétiques, il faut chiffrer les consommations des postes de l'exploitation. Pour ceci, il y a deux moyens de récupérer des chiffres :

1. Manuellement : grâce aux informations récupérées par les exploitants sur les fiches de collecte,
2. Automatiquement : l'objectif est d'enregistrer les consommations de carburants et d'intrants, bien plus précisément que manuellement, et en limitant le travail de notation pour les agents techniques. Le système d'acquisition des données mis en place grâce aux NTIC dans le projet a permis d'identifier précisément les consommations sur chaque parcelle, tout en identifiant le matériel attelé au tracteur, et sans passer à la pompe à la fin de chaque parcelle travaillée.

Les indicateurs de performances énergétiques proposés dans le Tableau 1 peuvent être calculés de différentes manières. Par exemple, lorsqu'on a des valeurs de consommations d'une opération technique sur un type de culture précis, si on possède trois valeurs de consommations sur des parcelles différentes, on peut faire le calcul de l'indicateur directement pour chacune des parcelles, puis

calculer la moyenne de tous les indicateurs. Le principal avantage de cette méthode de calcul est la possibilité d'analyser les résultats sous forme statistique, notamment la variabilité autour de la moyenne. On peut aussi effectuer le calcul, en agrégeant les informations, avant de les diviser entre elles. La solution serait alors de faire la somme des consommations des parcelles enregistrées, puis de diviser par la somme de leurs surfaces enregistrées. Le principal avantage de cette méthode de calcul est la possibilité d'obtenir une seule valeur pouvant servir de référence à partir du moment où le nombre de données d'entrées est suffisant et représentatif pour chaque opération technique. On peut aussi calculer les rendements de chantier en h/ha pour chaque opération technique pour le volet ACV (utilisés pour amortir l'impact environnemental de la production du matériel en fonction du nombre d'heures d'utilisation) : $(\sum \text{minutes}/60) / (\sum \text{ha})$.

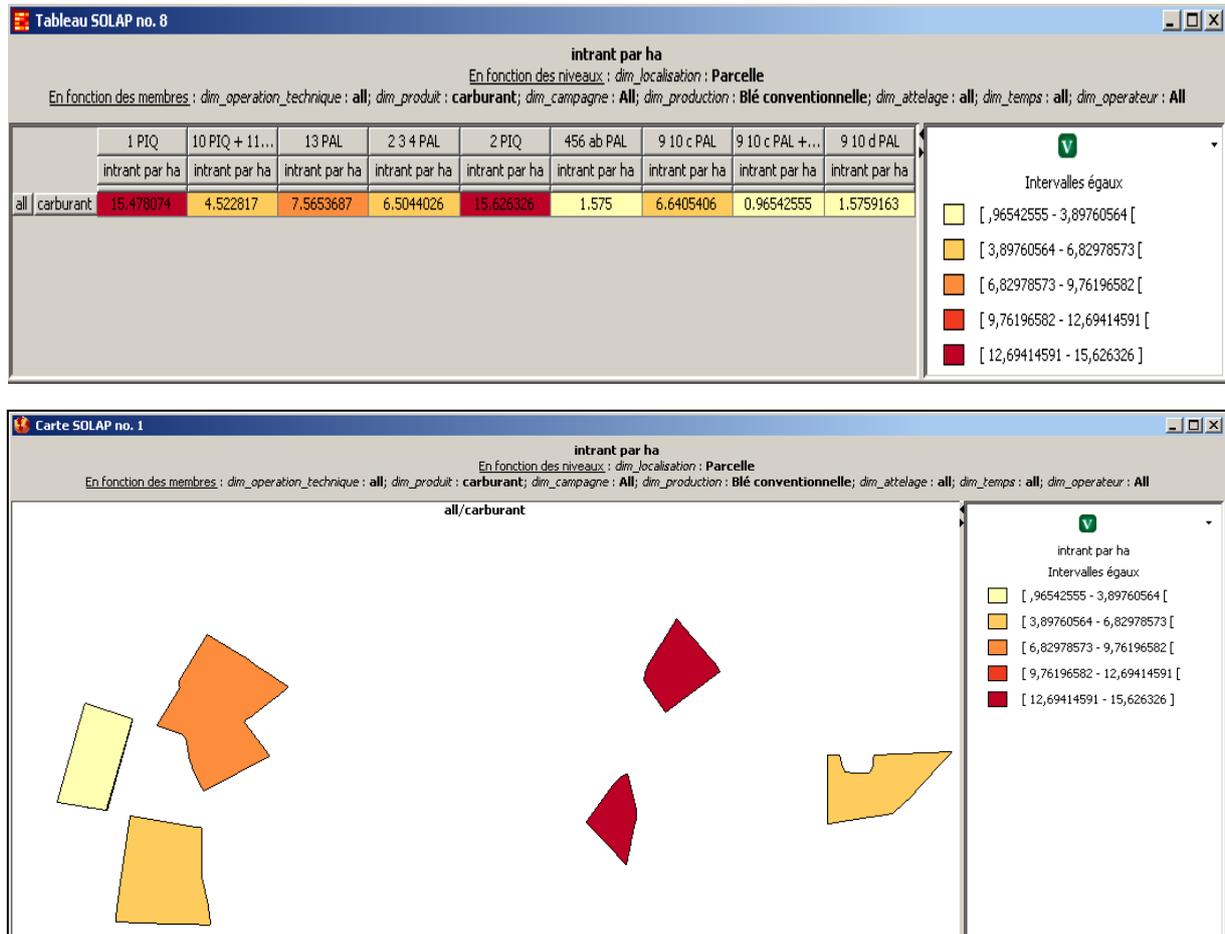


Figure 4 : Requetes SOLAP avec JMAP-SOLAP (Bimonte et al.,2012)

Les unités retenues pour le calcul des indicateurs sont le mégajoule et le litre ramenés à l'hectare ou à l'heure.

Les coefficients d'équivalence choisis sont ceux de l'outil Dia'Terre®.

Pour chaque opération technique prise en compte, sont calculés :

- Les caractéristiques moyennes de l'opération,
- Les indicateurs moyens (ha et h),
- La moyenne des indicateurs (ha, h chantier et h opération),
- Les rendements de chantiers.

Les quatre tableaux suivants présentent, dans le cas du labour, les valeurs des indicateurs calculés :

| opération technique | Labour |
|--|----------|
| Caractéristiques de l'opération | |
| Vitesse moyenne de travail (km/h) | 6,92 |
| <i>Nombre de valeurs</i> | 26 |
| Largeur moyenne de travail (m) | 1,54 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 23 |
| Somme de l'énergie directe consommée (L ou m3) | 1851,61 |
| Somme de l'énergie directe consommée (MJ) | 84433,42 |
| Somme de l'énergie indirecte consommée (MJ) | 0,00 |
| Somme de l'énergie totale consommée (MJ) | 84433,42 |
| <i>Nombre de valeurs</i> | 27 |
| Somme des surfaces travaillées (ha) | 87,21 |
| Temps total passé au chantier (minutes) | 5268 |

| opération technique | Labour |
|--|--------|
| Indicateurs moyens | |
| Σ Energie directe / Σ Surfaces (L ou m3/Ha) | 21,23 |
| Σ Energie directe / Σ Surfaces (MJ/Ha) | 968,16 |
| Σ Energie indirecte / Σ Surfaces (MJ/Ha) | 0,00 |
| Σ Energie Totale / Σ Surfaces (MJ/Ha) | 968,16 |
| Σ Energie directe / Σ Temps passé (L ou m3/h chantier) | 21,09 |
| Σ Energie directe / Σ Temps passé (MJ/h chantier) | 961,66 |
| Σ Energie indirecte / Σ Temps passé (MJ/h chantier) | 0,00 |
| Σ Energie Totale / Σ Temps passé (MJ/h chantier) | 961,66 |
| Σ Energie directe / Σ Temps passé (L ou m3/h opération) | 14,49 |
| Σ Energie directe / Σ Temps passé (MJ/h opération) | 660,75 |
| Σ Energie indirecte / Σ Temps passé (MJ/h opération) | 0,00 |
| Σ Energie Totale / Σ Temps passé (MJ/h opération) | 660,75 |

| opération technique | Labour |
|--|---------|
| Moyenne des indicateurs | |
| Echelle spatiale | |
| Moyennes indicateurs Energie directe | |
| Moyenne de Conso directe en L ou m3/ha | 22,25 |
| <i>Écartype de Conso directe en L ou m3/ha</i> | 11,29 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 27,00 |
| Moyenne de Energie directe en MJ /ha | 1014,42 |
| <i>Écartype de Energie directe en MJ /ha</i> | 514,85 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 27,00 |
| Moyennes indicateurs Energie Indirecte | |
| Moyenne de Energie indirecte en MJ /ha | 0,00 |
| <i>Écartype de Energie indirecte en MJ /ha</i> | 0,00 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 27,00 |
| Qté moy de pdts consommés (unité varie selon le produit) | |
| <i>Nombre valeurs</i> | 0,00 |
| Moyennes indicateurs Energie Totale | |
| Moyenne de Energie totale en MJ/ha | 1014,42 |
| <i>Écartype de Energie totale en MJ/ha</i> | 514,85 |

| opération technique | Labour |
|--|--------|
| Moyenne des indicateurs | |
| Echelle Temporelle | |
| Moyenne des indicateurs /h chantier | |
| Moyenne de Conso directe en L ou m3/h chantier | 11,20 |
| <i>Écartype de Conso directe en L ou m3/h chantier</i> | 4,14 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 14,00 |
| Moyenne de Energie directe en MJ /h chantier | 510,71 |
| <i>Écartype de Energie directe en MJ /h chantier</i> | 188,99 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 14,00 |
| Moyenne de Energie indirecte en MJ /h chantier | 0,00 |
| <i>Écartype de Energie indirecte en MJ /h chantier</i> | 0,00 |
| <i>Nombre valeurs</i> | 14,00 |
| Moyenne de Energie totale en MJ/h chantier | 510,71 |
| <i>Écartype de Energie totale en MJ/h chantier</i> | 188,99 |

5. Conclusion

La faisabilité d'un système d'acquisition d'information pour le pilotage tactique et opérationnel des exploitations agricoles et l'alimentation de référentiels a été montrée au travers de ce projet. La démonstration a également été faite qu'une chaîne d'intégration logicielle depuis la donnée jusqu'à l'indicateur était envisageable permettant grâce à la technologie des entrepôts de données une étude fine et spécifique pour chaque exploitation agricole de ses consommations énergétiques, mais également une approche plus globale suivant différentes thématiques. Par exemple, quelle est la moyenne des consommations énergétiques pour la production de blé dans l'ensemble des exploitations ?

Mais faisabilité ne veut pas dire opérationnalité immédiate. En effet, chaque module (acquisition, mise en base de données, intégration dans l'entrepôt) fonctionne de manière satisfaisante, avec bien entendu des marges de progrès, mais le passage à une réelle opérationnalité de cette solution devra passer par une automatisation du processus d'intégration des données. A ce stade de la faisabilité, il a fallu valider les processus de manière manuelle pour s'assurer de la validité et de la pertinence des informations, il faudra donc développer un flux de données délivré automatiquement des dispositifs embarqués vers l'entrepôt de données tout en s'assurant de la qualité des données intégrées. Pour cela, il faudra déployer les modules logiciels sur des serveurs accessibles via Internet depuis les exploitations agricoles. Les données pourront ainsi directement alimenter l'entrepôt de données et la navigation en ligne dans l'entrepôt sera possible par tous. Ceci sera l'objet des tâches du projet CasDAR EDEN qui a débuté en 2012.

Cette étude montre également que la diversité des données n'est pas une fin en soi dans ce type d'approche. Il vaut mieux privilégier la qualité à la quantité de données, il est plus pertinent (et plus facile) d'avoir de gros volumes de bonne qualité d'un jeu restreint de données qu'un ensemble de données éparses qui sont peu exploitables.

Nous avons également constaté au travers de cette étude, que la mise en place d'une solution d'acquisition embarquée bas-coût est une opération délicate à mettre en œuvre et demande beaucoup de travail de mise au point. Ceci explique en partie l'absence d'une offre industrielle fiable et facilement utilisable.

Références bibliographiques

Bimonte S., Bouilil K., Chanet J-P., Pradel M., 2012. Definition and Analysis of New Agricultural Farm Energetic Indicators Using Spatial OLAP. ICCSA (2) 2012, 373-385

Boffety D., 2009. Solutions constructeurs pour collecter les informations énergétiques et réduire la consommation : 1. Machines mobiles. Note de Veille Machinisme Agricole CETIM NV-M0911, 4 p.

Boffety D., 2009. Solutions constructeurs pour collecter les informations énergétiques et réduire la consommation : 2. Traite, fourrage, épandage, pulvérisation, irrigation. Note de Veille Machinisme Agricole CETIM NV-M0912, 5 p.

Boffety D., 2011. SIMA 2011 : des solutions technologiques pour collecter les informations énergétiques et contribuer à la réduction de la consommation de carburant des tracteurs et automoteurs. Note de Veille Machinisme Agricole CETIM, 6 p.

Pradel M., Boffety D., Abt V., 2009. Vers une évaluation plus fine des performances énergétiques des exploitations agricoles : quels indicateurs et quelles solutions technologiques pour les renseigner? Colloque Ecotechs'09 "Maîtrise de l'énergie à l'échelle de l'exploitation agricole : quelles perspectives technologiques ?", 22/10/2009 - 23/10/2009, Montoldre, FRA. Maîtrise de l'énergie à l'échelle de l'exploitation agricole : quelles perspectives technologiques? pp 133 – 141

Pradel M., Boffety D., 2012. Quels indicateurs et solutions technologiques adaptés pour évaluer finement les performances énergétiques des exploitations agricoles ? Sciences, Eaux et Territoires 7, 16-28.