

Communication et équipements agricoles

Du réseau embarqué au réseau ad hoc sans fil pour l'intégration des équipements agricoles dans des systèmes d'information étendus

Jean Pierre Chanet ^a, Daniel Boffety ^a, Jean François Devaux ^a, Kun Mean Hou ^b et Smain Bouazdi ^c

Aujourd'hui, les exploitations agricoles sont soumises à davantage de contraintes techniques, économiques et environnementales. Pour répondre à ces exigences, un suivi plus rapproché des pratiques et des productions devient nécessaire et se met progressivement en place. Le développement de ce concept de traçabilité tout au long des filières de production nécessite d'acquérir et de communiquer les données relatives aux interventions culturales et aux pratiques des exploitations agricoles (Cuny, 1998). Les exploitations agricoles se trouvent donc dans l'obligation de gérer un grand nombre d'informations issues de systèmes d'acquisition multiples. Si jusqu'alors on pouvait envisager une collecte et une gestion manuelle des données, la complexité et le volume des échanges ainsi que le nombre d'acteurs intervenant dans les filières agricoles obligent les exploitants à s'orienter progressivement vers la mise en place de systèmes d'information (SI).

En agriculture, contrairement au secteur industriel, les SI intègrent complètement une dimension supplémentaire, la dimension spatiale qui est liée à la parcelle. Ce positionnement géographique de l'information dans la parcelle, associé à la diversité des échanges et au nombre d'acteurs précédemment évoqués, permet de définir la notion de systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) (Martin, 2001). Cette vision globale de la communication entre les différents acteurs des filières agricoles et de leur SI peut se décliner à l'échelle de l'exploitation elle-même. En effet, le SI de l'exploitation agricole est en fait

le résultat de la contribution de tout un ensemble de sous-systèmes permettant de faire l'acquisition des données au niveau de l'exploitation (Berducat *et al.*, 2000 ; Le Bars *et al.*, 1997 ; Thirion *et al.*, 2000 ; Vigier *et al.*, 2000) et de dialoguer entre eux (Charvat, 2001 ; Serodio *et al.*, 2001). Bien entendu, le SI doit lui-même être capable de communiquer vers l'amont de la filière et vers les partenaires de l'exploitation, *via* internet.

Cette vision intra-exploitation suppose une mise en œuvre des échanges d'informations, à différents niveaux, par l'intermédiaire d'un réseau de communication. Un réseau local sur les matériels agricoles rend l'acquisition des informations possible de manière automatique et prédispose l'information à une utilisation ultérieure sur un réseau plus vaste qui couvre l'ensemble de l'exploitation. L'information peut alors circuler en temps réel en accompagnant les produits avant d'être stockée au niveau du SI.

Le réseau local embarqué au niveau des équipements agricoles est plutôt de type filaire, intègre la technologie CAN (*Controller Area Network*) et fait actuellement l'objet de nombreux travaux de normalisation. Concernant les outils d'acquisition rencontrés, les solutions informatiques embarquées ou portables sont issues de matériels grand public déjà opérationnels sur le marché. Souvent ces outils d'acquisition ont été développés dans le cadre d'applications relatives à l'agriculture de précision et ont ouvert la voie de l'acquisition de données. Dans ce domaine, nos objectifs de recherche portent sur la conception

Les contacts

a. Cemagref, UR Technologies, systèmes d'information et procédés pour l'agriculture et l'agroalimentaire, BP 50085, 24, avenue des Landais, 63172 Aubière Cedex
b. Limos, université Blaise Pascal, BP 1025, 63173 Aubière
c. Cetim, 52, avenue Félix-Louat, BP 80067, 60304 Senlis

de réseaux agricoles ad hoc (RAHA) capables de faire communiquer les différents réseaux des exploitations agricoles entre eux, mais aussi avec l'environnement amont et aval des exploitations. Au préalable, l'étude de différentes architectures de réseaux existants ou en cours de développement sur le marché est nécessaire. Cet article propose en première partie une synthèse rappelant, sous forme d'un bref descriptif, quelques particularités liées au bus CAN. En seconde partie, nous rendrons compte du niveau d'équipement électronique des matériels agricoles et plus particulièrement sur le degré d'intégration du bus CAN avec les dernières avancées de la norme ISO 11783, à l'occasion du salon international de la machine agricole (SIMA 2003). Enfin, en dernière partie est abordée la mise en réseau de tous les équipements de l'exploitation dans la perspective de l'arrivée de solutions de communications filaire ou sans fil, Bluetooth™, WiFi, qui laissent entrevoir des applications intéressantes. L'automatisation de l'acquisition et de la communication des données dépend toujours des tendances technologiques industrielles et des offres du marché. Les différents enseignements qui découlent de ces expériences contribuent aussi au développement de solutions spécifiques plus adaptées. Avec l'augmentation récente des capacités de stockage et de traitement de l'information, l'adoption de ces systèmes s'accélère et offre des perspectives intéressantes.

Les machines agricoles de demain, des agroéquipements communicants

Historique et évolution

L'évolution de la mécanisation de l'agriculture est à rapprocher de celle de l'industrie de la mécanique automobile et poids lourd. Très vite associée à l'hydraulique, la mécanique classique s'est vu complétée par des commandes électriques puis électroniques pour apporter précision et confort supplémentaire à l'utilisateur. Le développement des systèmes électroniques embarqués a été complètement associé à l'évolution technologique des matériels agricoles. Au début des années 80, l'arrivée des premiers relevages électroniques, marque le point de départ de l'électronique sur les tracteurs agricole. Avec une électronique intégrée dès la conception des matériels, les performances et le confort sont très vite appréciés de l'utilisateur. Cette évolution simplificatrice pour les systèmes de commande et d'asservissement des matériels laissait déjà entrevoir les besoins d'une certaine

harmonisation prénormative. Ce n'est qu'une dizaine d'années plus tard que des solutions intégrant la gestion plus complète des équipements aboutirent. Ces développements d'électronique embarquée virent le jour en liaison directe avec les premiers outils informatiques de gestion de l'exploitation agricole. Le développement de la micro-informatique de bureau associé à celui des progiciels ou des logiciels de gestion dédiés à l'agriculture a très vite montré l'intérêt des dispositifs embarqués pour la saisie des informations aux champs, directement sur les matériels lors des travaux. Dotés de fonctions complémentaires, ces équipements ont été assez vite adoptés. Capteurs de contrôle, systèmes de commande, d'asservissement ou d'aide à la décision, autant de prédispositions techniques des matériels agricoles qui sont sources d'informations et qui facilitent l'adoption des solutions d'acquisition de données en agriculture. Aujourd'hui la présence d'électronique avec des liaisons de communication entre les outils agricoles contribue à rechercher et à adopter certaines compatibilités entre les systèmes utilisés. Les dernières avancées normatives DIN 9684 et ISO 11783 ou ISOBUS, relatives à la communication par bus CAN, apportent des réponses adaptées aux équipements mobiles et contribuent à l'essor de solutions d'acquisition et de communication de données embarquées ou portables. Dans une stratégie de développement d'une gestion en réseau des équipements agricoles, ces particularités de communication trouvent leur intérêt.

Un réseau de communication local sur les équipements agricoles : le bus CAN (*Controller Area Network*)

Depuis le début des années 80, les nombreux systèmes électroniques intégrés dans l'automobile et la nécessité de communication entre ces équipements a conduit au développement d'une solution de communication série. C'est donc dans cet esprit, qu'en 1983, le leader allemand de l'équipement automobile, Robert Bosch GmbH, pris la décision de développer un protocole de communication orienté vers des systèmes distribués, fonctionnant en temps réel et satisfaisant à toutes ses propres exigences, le bus CAN (*Controller Area Network*). Dans le même temps, d'autres constructeurs développèrent leur propre système de liaison électronique. Le GIE Renault-PSA en partenariat avec Sagem et Valeo développa le bus VAN (*Vehicle Area Network*).

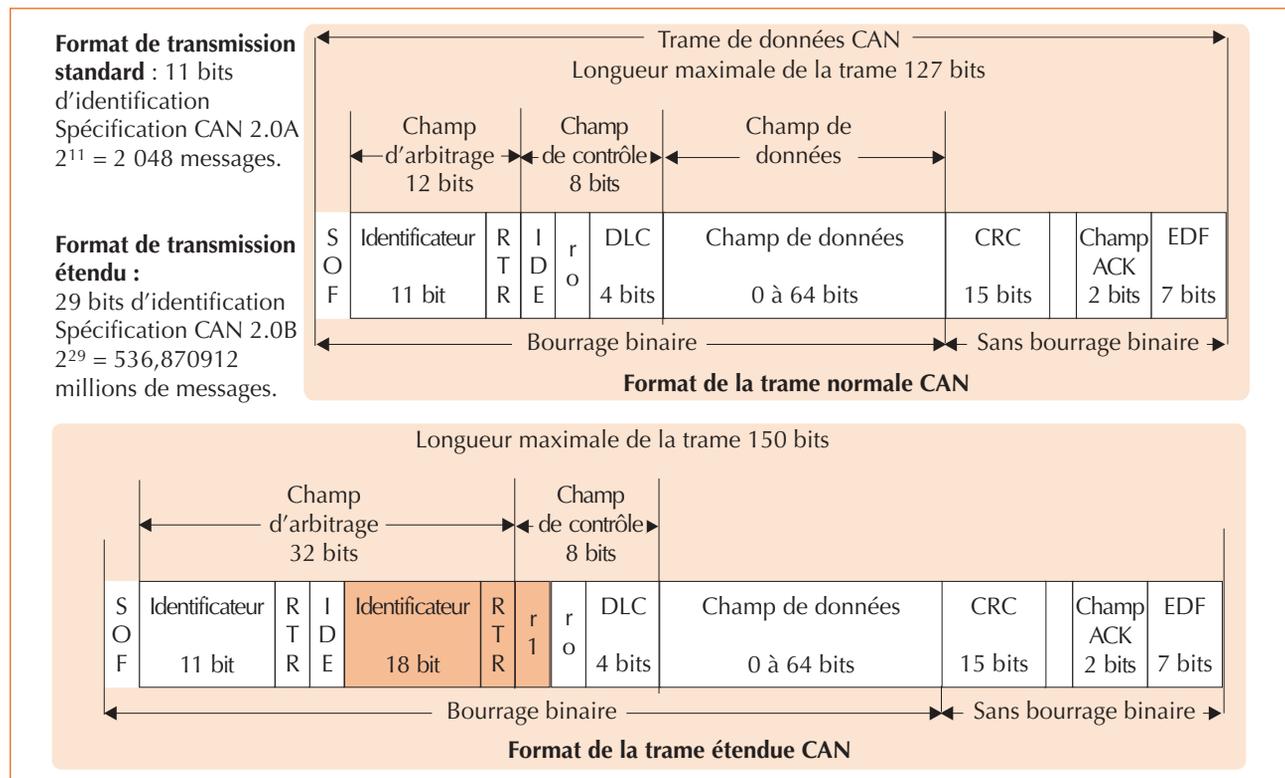
Actuellement pour une automobile moyenne, l'ensemble des câblages représente plus de 2 kilomètres de fils et plus de 1 500 points de connexion. Pour un tracteur ou un automate de récolte, l'ensemble des câblages est encore plus important du fait de lignes spécialisées et parfois du besoin de communication avec des équipements externes. Un tel câblage est coûteux à industrialiser et doit être soigneusement testé. De tels circuits sont sensibles aux perturbations électromagnétiques, sont sources de pannes notamment au niveau des connexions et leur dépannage est complexe à mettre en œuvre. Avec la solution CAN, les informations sont transmises de façon série sous forme numérique. Les informations analogiques des capteurs sont transformées en un signal numérique qui est véhiculé et disponible sur le bus CAN. Sur un tracteur, par exemple, une vitesse mesurée par le radar est codée sous forme numérique, transmise sur le bus CAN puis réceptionnée à la fois pour la gestion de la transmission, l'affichage du tableau de bord et l'unité de contrôle de l'outil. Avec un tel système, il devient possible de multiplier les quantités d'informations que s'échangent les sous-ensembles et de les gérer par des logiciels

informatiques. Des tâches complexes affectées à la commande précise d'une transmission, à l'injection de carburant voire à l'automatisation de certaines actions ou à l'application du positionnement par satellites GPS (*Global Positioning System*) se gèrent en toute transparence pour le conducteur.

LES PROTOCOLES CAN 2.0A ET 2.0B

Le protocole de communication série CAN (*Controller Area Network*), basé sur la norme américaine SAE J1939, supporte des systèmes temps réel avec un haut niveau de fiabilité. Les propriétés principales du bus CAN permettent une hiérarchisation des messages, une souplesse de configuration, une réception de multiples sources avec synchronisation temporelle, un fonctionnement multimaître, une détection et signalisation d'erreurs, une retransmission automatique des messages altérés dès que le bus est de nouveau au repos et une déconnexion automatique des nœuds défectueux. Le bus CAN est composé d'un réseau filaire ou optique connectant les différentes unités de contrôle électronique (ECU) ou nœuds. Tous les capteurs ou dispositifs électroniques d'un équipement sont donc connectés à un nœud

▼ Figure 1 – Les formats comparés de transmission CAN 2.0A et 2.0B.



CAN. Chaque message CAN est constitué d'une partie identification et d'une partie contenu de la donnée (figure 1, page 179).

Le protocole CAN 2.0 se décline en deux versions spécifiques qui diffèrent essentiellement au niveau de la longueur de l'identificateur des messages. La version 2.0A définit des identificateurs de message de 11 bits et la version 2.0B des identificateurs de message de 29 bits. Ces trames sont nommées respectivement, trames standards (*Standard Frames*) et trames étendues (*Extended Frames*).

UNE LIAISON ENTRE TRACTEUR ET OUTILS AVEC LE CAN ISOBUS

Actuellement parmi toutes les applications CAN présentes sur les agroéquipements, certaines intègrent les spécificités de la norme DIN 9684 ou celles très proches de la norme Allemande LBS en version LBS+ ou LBS++ (*Landwirtschaftlichen Bus System*), d'autres celles de la norme ISO 11783. Au niveau international, les différents travaux entrepris en matière de normalisation convergent vers l'aboutissement de la norme ISO 11783 en une version dite ISOBUS. Celle-ci est organisée en différentes parties ou couches :

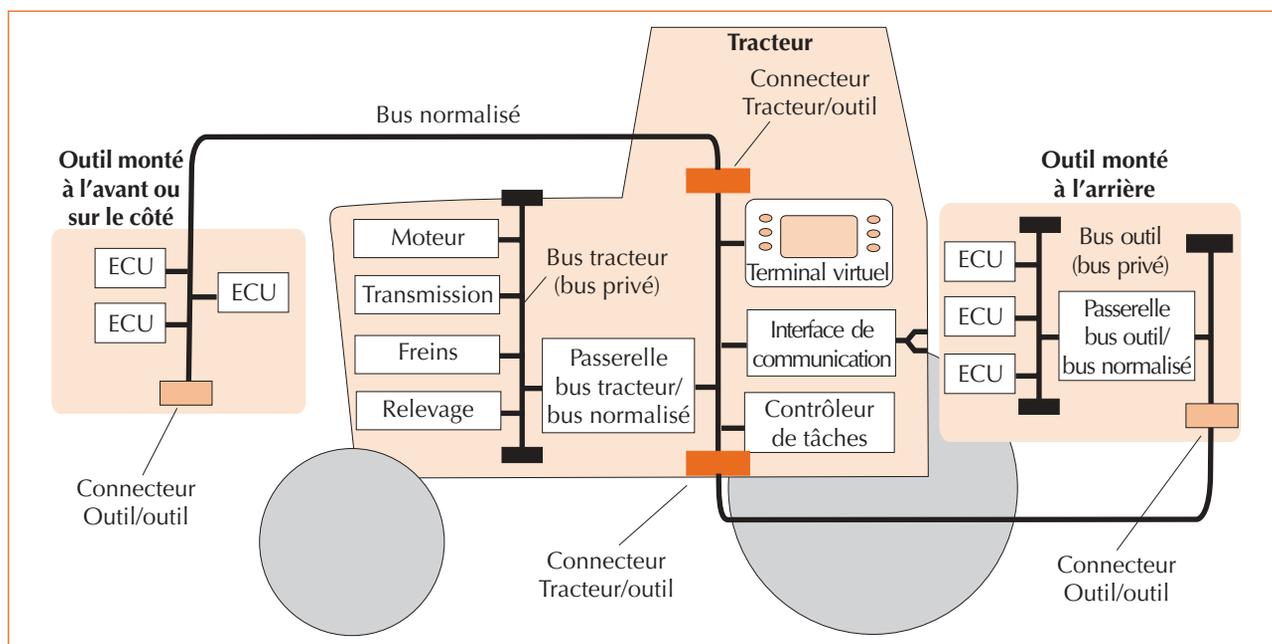
– partie 1 : système normalisé général pour les communications de données avec équipement mobile (11783-1),

- partie 2 : couche physique (11783-2),
- partie 3 : couche liaison de données (11783-3),
- partie 4 : couche réseau (11783-4),
- partie 5 : gestion de réseau (11783-5),
- partie 6 : terminal virtuel (11783-6),
- partie 7 : mise en œuvre de la couche d'application de messages (11783-7),
- partie 8 : message du groupe motopropulseur (11783-8),
- partie 9 : interface de contrôle-commande tracteur (11783-9),
- partie 10 : contrôleur de tâches et système de gestion pour échange de données (11783-10),
- partie 11 : dictionnaire de données (11783-11).

La norme ISO 11783 qui adopte le format de trame de message CAN étendu demeure compatible en lecture avec le format de trame de message standard CAN. En période de transition où différentes versions existent, cette spécificité favorise la compatibilité entre les équipements et le développement du concept CAN ISOBUS.

Si la liaison entre les fonctionnalités électroniques au sein d'un même agroéquipement, par exemple sur un tracteur, peut être considérée comme propriétaire, la liaison entre différents outils et

▼ Figure 2 – Principe de l'architecture ISO 11783-1 (d'après document Cetim).



un tracteur soulève de multiples questions en matière de compatibilité. Les réponses passent nécessairement par la normalisation.

La norme ISO 11783 propose une architecture de bus CAN dans laquelle le bus interne au tracteur ainsi que celui de la liaison tracteur avec l'outil sont bien distincts et reliés par une passerelle (figure 2). C'est sur le bus constituant la liaison du tracteur avec l'outil que vient se connecter le terminal virtuel. Cette architecture garantit l'intégrité du bus tracteur.

Cette liaison entre le tracteur et les outils est le siège d'échanges d'informations entre les électroniques du tracteur, le terminal virtuel et les électroniques des divers outils, au travers d'une passerelle assurant l'intégrité du fonctionnement du tracteur. Elle constitue la colonne vertébrale à partir de laquelle les applications de l'agronomie moderne peuvent s'exercer.

Niveau d'implémentation CAN ISOBus sur les agroéquipements

Le SIMA 2003, salon international de la machine agricole, qui s'est déroulé au Parc des expositions de Villepinte, a été l'occasion de faire le point sur le niveau d'équipement en électronique des matériels agricoles présentés et plus particulièrement sur le degré d'intégration du bus CAN avec les dernières avancées de l'ISO 11783.

D'une manière générale, l'électronique est présente sur tous les matériels utilisant des fonctions d'informations, de surveillance, de commande, de réglage, d'asservissement, de régulation ou d'automatisation de fonctions ou de procédés. Ce développement est évidemment davantage marqué sur les matériels où les besoins de précision et de simplification s'expriment le plus. Les tracteurs, les automoteurs de récoltes et de traitement des cultures, les pulvérisateurs et les distributeurs d'engrais illustrent parfaitement ce domaine d'application.

Cette tendance est aussi constatée avec l'offre des différents équipementiers pour équiper des matériels non dotés d'électronique afin d'en améliorer les performances ou de les faire évoluer pour les rendre conformes aux prérogatives sécuritaires et agroenvironnementales en vigueur. En ce qui concerne plus particulièrement le bus CAN et la norme ISO11783 ou ISOBus, il est à noter en tout premier lieu, que l'utilisation de la technologie CAN apparaît chaque fois qu'un réel

souci de simplification du câblage s'exprime en relation directe avec la multitude des informations à transmettre et la complexité des commandes ou des transmissions à réaliser. Ces aspects sont aussi clairement identifiés dans le domaine des agroéquipements dédiés au secteur de l'élevage. Différentes spécificités et différents niveaux d'équipement ont cependant pu être notés en fonction des fabricants et des catégories de matériels concernés.

La motorisation diesel

Pour les principaux constructeurs de moteurs thermiques diesel, les récentes contraintes de respect de l'environnement ont contribué au développement de la technologie d'injection directe à haute pression ou à rampe commune *Common rail*. Ces principes intègrent une gestion électronique de l'injection du carburant sur les moteurs afin de mieux gérer les besoins réels en relation directe avec des conditions de fonctionnement, de température, de charge et de régime de rotation, afin de réduire les émanations polluantes. Certains moteurs à injection directe sont issus de fabrications déjà dédiées aux matériels de travaux publics. Leurs particularités de conception se retrouvent donc chez les fabricants de matériels agricoles qui les ont adoptés. Tous les capteurs utilisés sur les moteurs sont connectés à une unité centrale de contrôle électronique. Les différentes informations sont échangées avec divers modules utilisateurs pour gérer le fonctionnement et la régulation du moteur. Cette communication d'informations est réalisée par un bus CAN adoptant un protocole de fonctionnement issu de la norme américaine SAE J1939. Cette solution CAN normalisée reste toutefois utilisée comme un bus de communication propriétaire, mais offre la possibilité, sur une machine équipée de cette motorisation, d'utiliser toutes ces informations spécifiques au moteur pour en contrôler son fonctionnement. Comme exemple, citons le boîtier électronique principal d'un moteur Caterpillar qui permet au constructeur CLAAS, du fait d'une compatibilité CAN, de reprendre les informations utiles à la gestion du fonctionnement de ses moissonneuses-batteuses équipées d'un bus CAN au protocole DIN 9684 (LBS).

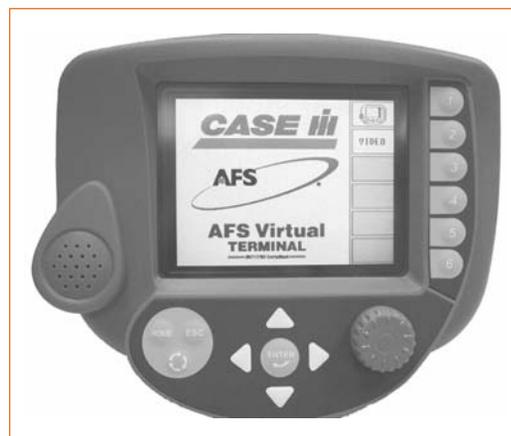
Le tracteur

Les constructeurs de tracteurs proposent des modèles avec de plus en plus de fonctions réalisées électroniquement, depuis la gestion de l'injection des moteurs en passant par le relevage et

la transmission. Certains constructeurs développent même des fonctions d'aide ou d'assistance à la conduite du tracteur basées sur l'utilisation du système de positionnement global par satellite (GPS) déjà intégré dans des fonctions relatives à des opérations d'agriculture de précision. Pour les constructeurs qui, jusqu'à présent, n'avaient pas encore beaucoup adopté d'électronique, cette tendance s'exprime surtout sur les nouveaux modèles « haut de gamme ». Le développement sur les autres modèles de tracteurs devrait voir le jour dès leur renouvellement. Actuellement, les grands groupes tractoristes AGCO, ARGO, CNH, SDF disposent de capacités de développement électronique, soit globalement en interne, soit plus spécifiquement au niveau de chacune des marques. Plus que jamais, la prise en compte de facteurs économiques incite à des opérations de sous-traitance ou à la réalisation par des équipementiers électroniques de certaines parties bien précises des matériels (ex. : relevage Bosch, radar Dickey John, etc.). Le bus CAN est souvent rencontré sur les tracteurs au niveau des moteurs et des transmissions, là où il y a nécessité de communiquer et d'échanger avec une multitude de capteurs de nombreuses informations. Plusieurs bus CAN peuvent se côtoyer sur un même tracteur, indépendamment ou en réseau, c'est le cas par exemple sur certains modèles d'un constructeur tel que FENDT. Ces bus de communication internes à un équipement sont souvent des solutions propriétaires développées sur la base de la norme SAE J1939. D'autres aussi adoptent en partie le standard DIN 9684, sous la forme LBS+ ou LBS++ mais aussi ISO 11783, notamment pour les parties affichage des informations et communication avec les différents outils. Naturellement, en fonction des modèles communs à plusieurs marques d'un même groupe, certaines particularités électroniques se retrouvent sous des couleurs différentes.

La présence au SIMA d'un terminal appelé AFS Virtual Terminal, conforme à l'ISO 11783, au sein des différentes marques du groupe CNH dédié à la marque Case IH semble déjà dévoiler les prémices d'une volonté d'adoption de ce standard (figure 3).

Pour les marques Case, New Holland ou Steyr, ce petit terminal avec les fonctions minimum requises par le standard ISOBus (écran plat, 6 touches de fonction, molette de sélection, etc.) était présenté comme terminal virtuel ISOBus sur chacun des stands des différents



▲ Figure 3 – Terminal AFS Virtual Terminal pour la marque CASE IH de CNH.

constructeurs du groupe. Toutefois, aucun tracteur de ce groupe ne correspondait vraiment à l'application concrète et complète du standard ISOBus, pour preuve, la présence d'une simple prise DIN cylindrique à 7 broches installée à l'arrière de certains modèles, uniquement pour ce salon, en lieu et place de la prise CAN ISO normalisée. Chez certains constructeurs, la présence de la prise de liaison tracteur-outil normalisée était limitée à des tracteurs intégrant déjà une électronique à base de bus CAN LBS. La partie communication tracteur-outils reste donc encore très évolutive. D'un point de vue économique, chez les constructeurs de tracteurs disposant d'une gamme de matériels dite longue, le développement d'outils équipés d'une électronique compatible bus CAN, ISO ou DIN, devrait les inciter assez rapidement à adopter une liaison tracteur-outils normalisée. Le terminal, aujourd'hui dédié spécifiquement à l'outil, devrait se voir alors remplacé par le terminal virtuel ISOBus du tracteur sans grande difficulté. Avec l'arrivée de ce terminal ISOBus, de nouvelles fonctionnalités apparaissent. Il est désormais possible de connecter par une liaison sans fil une petite caméra vidéo destinée à la surveillance des outils et pouvant donc communiquer simultanément avec plusieurs terminaux embarqués (ex. : surveillance de la vidange de grain sur une moissonneuse depuis le terminal virtuel moissonneuse, mais aussi depuis le tracteur qui tracte la remorque benne). Cet aspect communication sans fil est même déjà envisagé avec une solution du type Bluetooth™¹.

1. Un article CETIM- Informations fera le point sur cette technologie et en particulier sur la liaison entre objets communicants.

Les automoteurs de récolte et de traitement des cultures

Parmi les automoteurs agricoles, les moissonneuses-batteuses et les pulvérisateurs sont les matériels sur lesquels l'équipement électronique est le plus conséquent. Cette présence d'électronique est justifiée par les nombreuses fonctionnalités de contrôles et de commandes réalisées. Le développement du concept d'agriculture de précision et les dernières réglementations agroenvironnementales ont contribué au développement sur ces matériels de solutions électroniques évoluées. Les principaux constructeurs de moissonneuses-batteuses utilisent le bus CAN pour faire communiquer les différents capteurs utilisés sur les machines avec l'ordinateur de bord. Lorsque la machine est équipée d'un dispositif destiné à la cartographie des rendements, l'ensemble des informations transite par le bus de communication depuis des boîtiers électroniques de contrôle. Le terminal d'affichage en cabine, qu'il soit indépendant ou intégré au tableau de bord de la machine, tend à respecter certaines spécificités requises au terminal virtuel conformément à l'ISO 11783 pour les constructeurs d'origine américaine, ou plutôt DIN 9684 ou LBS du côté des constructeurs européens. Les réseaux CAN développés peuvent utiliser des moyens de communication filaires ou optiques. Chez certains constructeurs, le fait d'intégrer des motorisations diesel dont la gestion est déjà conçue autour d'un protocole d'échange CAN facilite par la suite l'intégration des informations utiles au contrôle du fonctionnement et évite les redondances de capteurs. De plus, la présence d'un réseau de communication CAN simplifie le câblage des machines et permet de mieux structurer les équipements, en séparant chacune des parties électriques, électroniques, mécanique et hydraulique. Les opérations de maintenance et le cas échéant de diagnostic et de dépannage utilisent le bus CAN avec des parties de protocoles normalisés ISO ou DIN. Ces solutions propriétaires à chacun des constructeurs sont sans incidence majeure en l'absence de communication avec d'autres outils.

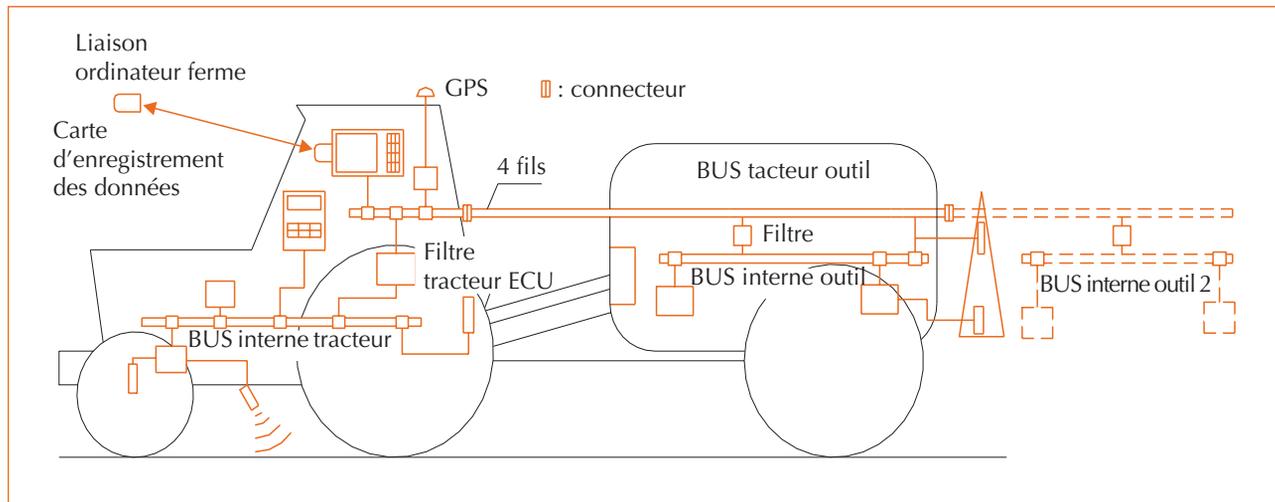
Les matériels d'épandage, de pulvérisation, de semis, de travail du sol et de récolte des fourrages

En ce qui concerne le développement des applications électroniques en général et plus particulièrement celles concernant le bus CAN,

les constructeurs d'équipements agricoles, épandeurs d'engrais, pulvérisateurs, n'ont pas souvent la capacité et les compétences de développement en interne et font plutôt appel à des entreprises de sous-traitance. Certaines comme RDS, Agtronix, Müller Electronik, LH agro ou Dickey John développent des applications pour plusieurs marques d'outils. D'un point de vue purement commercial, la similitude entre les différents boîtiers électroniques de chacune des marques d'outils concurrentes est perçue comme un handicap. Certains constructeurs choisissent d'ailleurs d'intégrer de l'électronique bien spécifique pour conserver une véritable identité et, de ce fait, ne souhaitent pas révéler le nom de leur sous-traitant. La technologie CAN est encore peu présente sur les matériels agricoles d'épandage, de pulvérisation, de récolte des fourrages ou de travail du sol. Lorsque des développements CAN sont rencontrés sur des épandeurs d'engrais, des pulvérisateurs, des semoirs, des charrues ou des presses à balles rondes ou parallélépipédiques, comme pour les autres matériels automoteurs cités auparavant, ils sont avant tout conçus dans un souci d'optimisation et de simplification technologique, pour faire face à des besoins spécifiques de commande ou d'automatisation d'opérations liées à des pratiques qui nécessitent plus de précision (figure 4, page 184).

Ces solutions CAN développées, tout en utilisant des spécificités normatives DIN ou ISO, demeurent des solutions CAN propriétaires à chaque constructeur. Pour les matériels où le développement d'une solution bus CAN complète sur la base ISO ou DIN est réalisé entre la machine et son boîtier de commande, une prédisposition à communiquer avec des tracteurs répondant au même protocole d'échange CAN existe. Certains constructeurs d'outils ont d'ailleurs franchi un pas important en proposant déjà un boîtier électronique ISOBus unique et commun à l'ensemble de leur gamme d'outils. Cette prédisposition CAN ISOBus sur un ensemble d'outils présage d'un développement plus aisé de la standardisation de la communication de l'outil avec le tracteur. Aujourd'hui, certaines collaborations entre constructeurs d'outils et de tracteurs ont abouti à des solutions fonctionnelles. Souvent, ces « démonstrateurs » présentés lors de salons, comme à ce dernier SIMA, ne représentent en réalité qu'une vitrine des différentes entreprises associées.

Concrètement, les solutions communicantes et fonctionnant réellement chez des utilisateurs ne



▲ Figure 4 – Liaison tracteur-outil CAN IsoBus (Cemagref).

représentent que quelques unités. Ces solutions proposées utilisent pour la plupart le bus CAN LBS mais peuvent facilement et rapidement évoluer vers des solutions bus CAN ISO 11783, ce qui présage aussi de leur adoption et de leur développement à moyen terme.

Les équipementiers en électronique pour l'agriculture

Des équipements électroniques sont disponibles à la fois pour les constructeurs de matériels agricoles neufs, mais aussi pour équiper des matériels plus anciens déjà dotés d'une électronique ou au contraire complètement dépourvus d'électronique, en vue de les faire évoluer et de les adapter aux nouveaux besoins en vigueur. Beaucoup de fabricants d'électronique disposent de capteurs ou de boîtiers destinés aux petits constructeurs de matériels de semis, d'épandage et de pulvérisation, par conséquent l'offre en systèmes est très variée. En ce qui concerne l'utilisation du bus CAN, d'une façon générale il est encore peu utilisé. Suivant l'origine des développements, des solutions bus CAN LBS ou ISO sont proposées chez certains équipementiers, notamment pour permettre des applications issues du développement du concept d'agriculture de précision telle que la cartographie des rendements ou la modulation intra-parcellaire des doses d'intrants et des densités de semis. Même si les systèmes complets et opérationnels sont peu nombreux, la tendance des équipementiers était de présenter des boîtiers électroniques permettant d'interfacer des équipements électroniques classiques avec les terminaux électroniques de type terminal virtuel ISOBus ou

LBS proposés par les principaux constructeurs de tracteur. On pouvait noter à ce titre des exemples concrets de cet interfaçage d'équipements pour des solutions de terminaux virtuels ISOBus du groupe CNH chez RDS, Müller Electronik ou Agrotronix. Certains équipementiers comme RDS, Agrotronix, Müller Electronik, LH agro ou Dickey John, développent les mêmes applications pour plusieurs marques d'outils et par conséquent pour des constructeurs qui sont concurrents sur le marché. Différentes conceptions à partir du bus CAN sont réalisées avec des tendances DIN LBS ou ISO, mais demeurent tout de même à ce jour encore des solutions propriétaires. De plus en plus d'outils agricoles attelés au tracteur ont des fonctions réalisées électriquement. Les consommations de courant électrique sont donc importantes et la prise normalisée ISO de liaison tracteur avec les outils apparaît comme une partie limitant la possibilité de transmettre des puissances électriques élevées aux différents outils.

Vers une mise en réseau de tous les équipements

La mise en réseau des équipements agricoles est une question complexe : en effet, ils sont divers, mobiles, et évoluent dans un environnement rural où végétation et relief sont présents. Les solutions sans fil semblent être les plus adaptées pour réaliser ce type de réseau. De plus le développement du standard 802.11x (Trezentos, 2002) a permis de réduire de manière très importante les coûts. Si jusqu'à présent le transfert de données par les réseaux sans fil était peu envisageable pour de

gros volumes d'informations, il est maintenant possible d'avoir des liaisons avec une bande passante proche des technologies filaires : le standard IEEE 802.11b atteint 11 Mb/s, ce qui est comparable à Ethernet dans sa version 10 Mb/s. La portée des équipements est très variable et dépend de nombreux facteurs tels que la puissance d'émission, le choix d'antenne, l'environnement. Elle peut varier de quelques mètres à plusieurs kilomètres. On constate que ces technologies sont envisageables pour le monde agricole (McKinion et al., 2003).

L'organisation d'un réseau sans fil

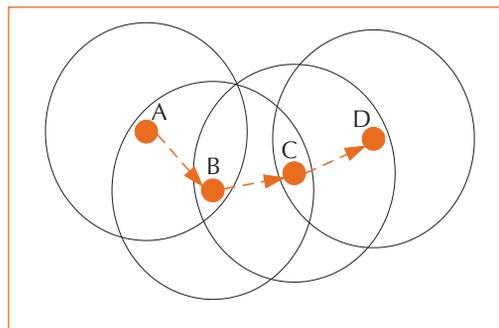
Il existe deux modes d'organisation pour les réseaux sans fil : avec ou sans point d'accès (Trezentos, 2002).

Le mode avec point d'accès est à rapprocher de la structuration des réseaux cellulaires (GSM ou UMTS) (Tabbane, 1997). Dans ce mode de fonctionnement, toutes les communications passent par le point d'accès qui gère ainsi le routage à l'intérieur de sa cellule. Chaque point d'accès administre une zone géographique correspondant à sa couverture radio, il doit gérer la liaison avec les autres zones géographiques lorsque qu'un mobile quitte sa zone de couverture.

Dans le second mode, chaque mobile ou nœud du réseau communique directement avec ces voisins présents dans sa zone de couverture radio. Si chaque nœud a des possibilités de routage, on peut relayer l'information de proche en proche jusqu'au destinataire final : on parle alors de réseaux ad hoc ou MANET (Mobile Ad hoc Network). La question du routage dans ce type de réseau est complexe, car chaque nœud est mobile et peut disparaître, ce qui rend les routes éphémères contrairement aux réseaux filaires ou dans le cas de point d'accès. De nombreux travaux de recherche sont actuellement en cours sur cette thématique (Royer et al., 1999) et de nombreux protocoles sont candidats à la normalisation à l'*Internet Engineering Task Force* (<http://www.ietf.org>).

Le routage dans les réseaux ad hoc

Le routage dans les réseaux ad hoc est une thématique de recherche importante. En effet, le fait que les nœuds bougent en permanence produit des changements dans la topologie des réseaux, ce qui impose de redéfinir en permanence de nouvelles routes pour acheminer l'information.



◀ Figure 5 – Principe de routage dans les réseaux ad hoc.

La figure 5 montre le principe du routage dans les réseaux ad hoc. Le nœud A veut envoyer un message au nœud D, mais le nœud D est hors de portée du nœud A. En revanche le nœud B est visible de A et de C, et C est visible de B et de D, donc le message sera relayé par les nœuds B et C : la route est alors A, B, C, D. Si l'on augmente le nombre de nœuds on constate rapidement que le choix d'une route devient très complexe, il convient donc d'avoir des stratégies prenant en compte les spécificités des réseaux ad hoc : les algorithmes de routage des réseaux filaires sont inadaptés.

Il existe 3 catégories de protocole de routage : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs et les protocoles hybrides.

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE PROACTIFS

Les routages proactifs (ou *table driven*), sont directement issus des routages des réseaux filaires. Chaque nœud stocke une table de routage lui permettant d'atteindre les différents nœuds du réseau. Lorsqu'un nœud décide d'envoyer un message, il consulte sa table et choisit la route correspondant au destinataire du message. La topologie des réseaux ad hoc étant dynamique, il faut maintenir à jour les tables de manière périodique. Pour cela chaque nœud envoie à ces voisins des messages de signalisation afin de signaler sa présence. Dans cette catégorie, on peut citer les protocoles de routage suivants : le *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing protocol* (DSDV) (Royer et al., 1999), l'*Optimized Link State Routing Protocol* (OLSR) (Clausen et al., 2002), le *Wireless Routing Protocol* (WRP) (Royer et al., 1999), le *Fisheye State Routing Protocol* (FSR) (Gerla et al., 2002)... L'avantage de ces protocoles est qu'ils peuvent transmettre immédiatement les messages sans avoir à définir une route. En revanche, la maintenance des

tables au niveau de tous les nœuds engendre un trafic important sur le réseau, dû aux messages de signalisation, ce qui peut être un inconvénient dans le cas des WLAN où la bande passante est comptée.

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE RÉACTIF

Les protocoles de routages réactifs (ou *on demand driven*) ne fonctionnent pas sur le principe des tables de routage. Les routes sont déterminées par le nœud qui désire envoyer des données. Avant d'envoyer les données utiles, la source envoie un message de signalisation à tous les nœuds qui peuvent l'entendre. Le message est ainsi diffusé dans le réseau jusqu'à atteindre le destinataire final. Au fur et à mesure que le message se propage dans le réseau, il accumule des informations sur les nœuds le relayant. Lorsque le destinataire reçoit le message, il répond en suivant le chemin inverse (ou en calculant une nouvelle route sur le même principe que la source), indiquant ainsi la route permettant à la source de l'atteindre. On peut citer notamment comme exemple de ce type de protocoles les travaux suivants : le *Ad hoc On-Demand Distance Vector routing protocol (AODV)* (Perkins *et al.*, 2003), le *Dynamic Source Routing Protocol (DSR)* (Johnson *et al.*, 2002)...

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE HYBRIDE

Cette catégorie de protocoles de routage rassemble un grand nombre de solutions. Ces protocoles ajoutent aux techniques proactives ou réactives d'autres paramètres afin d'optimiser le routage. Les paramètres pris en compte au niveau de ces algorithmes peuvent être :

- une organisation hiérarchique du réseau sous forme de clusters ou de zones (Haas *et al.*, 2002 ; Hwang *et al.*, 2002 ; Lin *et al.*, 1997 ; Ramathan *et al.*, 1998),
- la position des nœuds provenant d'un GPS pour au moins une partie d'entre eux (Ergen *et al.*, 2002 ; Ermel *et al.*, 2002 ; Karimi *et al.*, 2001 ; Ko *et al.*, 1998 ; Stojmenovic, 2002), voir sans GPS (Bulusu *et al.*, 2000 ; Capkun *et al.*, 2001).

Le but de ces protocoles est de limiter la quantité d'information à diffuser sur le réseau afin d'assurer le routage. Dans le cas des réseaux hiérarchiques, seuls certains nœuds contribuent au routage de l'information. Quand on utilise la position des mobiles, les informations sont acheminées entre la source et le destinataire en tenant compte de leur position relative : le flux ne concerne qu'un nombre restreint de nœuds.

Les particularités d'un réseau ad hoc agricole

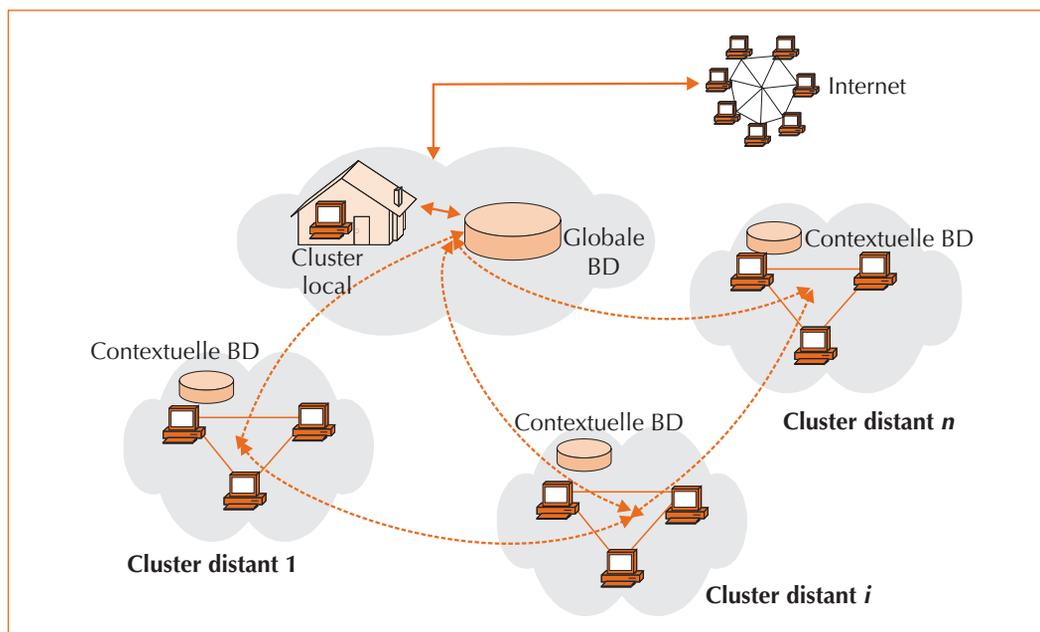
Le déploiement de réseaux ad hoc agricole (RAHA) au niveau d'une exploitation doit tenir compte des particularités de celle-ci. En effet, l'utilisation des réseaux sans fil est principalement pensée actuellement dans un cadre urbain présentant une forte densité de nœuds. Dans le cadre de l'exploitation agricole, la densité de nœuds est faible et leur dispersion géographique est grande. On constate donc que la recherche des différents nœuds du réseau peut s'avérer difficile et qu'il convient d'envisager des protocoles de routage prenant en compte ces particularités (Chanet *et al.*, 2003).

Un RAHA a une architecture hiérarchique : il se compose de 2 types de cluster (figure 6). Le premier est un cluster local centré sur les bâtiments principaux de l'exploitation. Le second type est constitué des différents chantiers en cours sur l'exploitation.

L'exploitation agricole possède un système d'information rassemblant de nombreuses informations, notamment géographiques, qui peuvent être pertinentes pour réaliser le routage du réseau (Krishnamurthy *et al.*, 2000). Ces informations peuvent être stockées dans des bases données contextuelles au niveau des différents clusters sur un ou plusieurs mobiles. Le SI possède des données sur le relief de l'exploitation, la présence de forêt, la nature des cultures. Toutes ces données peuvent permettre d'améliorer la qualité de service du réseau en optimisant les transmissions. On peut en outre disposer sur le terrain des relais temporaires pour pouvoir améliorer la transmission pour un chantier donné (champ dans une cuvette par exemple). La position de ces relais étant déterminé en fonction de la topologie de l'exploitation.

La création, et l'évolution dans le temps des clusters peuvent être planifiées. En effet, les découpages correspondent à des chantiers bien particulier connu a priori (Chanet *et al.*, 2003). On peut donc prévoir les trajectoires des mobiles et prédire la qualité de la transmission en fonction de la position des mobiles sur leur trajectoire. De plus on accumule de l'expertise, les chantiers se répétant dans le temps à intervalle régulier.

Dans le cas de l'exploitation agricole, bon nombre de mobiles possèdent des GPS, il est donc pertinent d'envisager un protocole de routage prenant en compte la localisation des nœuds, ou du moins du cluster.



◀ Figure 6 – Architecture d'un RAHA.

Nos travaux de recherche ont donc pour objectif de réaliser un RAHA prenant en compte toutes ces particularités.

Conclusion

Le développement de l'électronique de communication à partir de réseaux multiplexés CAN sur les matériels agricoles progresse. Les constructeurs de matériels agricoles qui ont adopté depuis déjà plusieurs années ce bus de communication, l'utilisent encore sous différentes formes, DIN LBS, LBS+, LBS++ ou ISO avec des versions qui restent toutefois propriétaires et spécifiques à une marque. Ceci étant, les regroupements de constructeurs de tracteurs ou de matériels agricoles favorisent le développement de ces technologies de communication qui trouvent tout leur intérêt technique et économique. Le développement de la liaison tracteur-outils normalisée ISO 11783 s'en trouvera donc grandement facilitée. Beaucoup de constructeurs reconnaissent que les diverses présentations de solutions CAN ISOBus ne sont encore que des vitrines de leurs travaux de développements en cours, mais que l'objectif est bien à terme d'avoir une solution complète et normalisée ISOBus sur leurs matériels. La disponibilité de ces solutions de communication CAN sur l'ensemble des matériels est liée aux coûts de développement importants qu'elles représentent

et dépend donc du renouvellement des modèles. Pour les matériels plus récents, les nombreux équipements électroniques déjà installés les prédisposent à l'adoption de ce type de réseaux de communication CAN. Un délai de 2 à 3 ans est aujourd'hui avancé. Ces tendances ont été confirmées au salon allemand AGRITECHNICA qui s'est tenu à Hanovre en novembre 2003. L'arrivée des technologies sans fil devrait être l'étape suivante du développement de cette automatisation de la collecte des données. De nouvelles applications en temps réel telles que la télémaintenance des équipements, la coordination des flottes de véhicules, l'asservissement récolteur-collecteur seront permises.

Nos travaux visent à développer une plateforme de démonstration sur le site expérimental de Montoldre (Allier) permettant de valider ces différents principes de communication étendue à l'ensemble de l'exploitation agricole. Cette plateforme s'intègre dans le projet régional Auver-Fiabilys portant sur les véhicules et infrastructures innovantes (V2I) et qui comporte un volet sur les engins agricoles. De plus, nous développons des méthodes permettant de mettre en œuvre des bases de données mobiles distribuées s'appuyant sur ces technologies. La qualité de service dans de tels réseaux est aussi une voie de recherche explorée. □

Résumé

Dans un contexte agroenvironnemental et économique en pleine évolution, de nouveaux enjeux agricoles liés au suivi des pratiques et des productions se présentent. De plus en plus d'informations relatives aux pratiques et aux productions sont nécessaires. L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication permet de répondre à ces besoins. Avec le développement de réseaux de communications filaire ou sans fil, (ISObus sur les agroéquipements, Bluetooth™, WiFi,...) pour les liaisons entre équipements, l'acquisition et la communication des données s'automatisent. La gestion et l'utilisation des données recueillies dans des systèmes d'information à référence spatiale peuvent se mettre progressivement en place. Après un historique rappelant l'évolution de l'électronique embarquée sur les agroéquipements et l'arrivée de réseaux de communication aux spécifications CAN ISO 11783 ou ISObus, ce document rend compte du niveau d'implémentation CAN ISOBus sur les agroéquipements présentés au salon international de la machine agricole de Paris-Villepinte (SIMA 2003) et des opportunités d'une mise en réseau de tous les équipements agricoles

Abstract

In an agricultural, environmental and economical context in full evolution, new agricultural stakes related to the follow-up of the practices and productions arise. More and more of information relating to the practices and the productions are necessary. The use of new communication and information technologies makes it possible to answer to these needs. With the development of the communication networks wire or wireless (ISObus on the agricultural equipments, Bluetooth™, IEEE 802.11x...) for the connections between equipments, the acquisition and the communication of the data become easy and automatic. Thus, the management and the use of the data collected in space reference information systems can be set up gradually. After an history recalling the evolution of the embedded electronic on the agricultural equipments and the communication area network starting with ISO11783 or ISOBus specifications, this paper accounts the CAN ISOBus implementation level on the agricultural equipments shown at SIMA 2003 (Paris) and the opportunities about a network realisation with the agricultural equipments.

Bibliographie

- BERDUCAT, M. ; BOFFETY D., 2000, Gestion de l'information parcellaire – Cartographie du rendement à la récolte, *Ingénieries*, vol. 24, p. 53-62.
- BULUSU, N. ; HEIDEMANN, J. ; ESTRIN, D., 2000, GPS-less LowCost Outdoor Localization for Very Small Devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, p. 28-34.
- CAPKUN, S. ; HAMDY, M. ; HUBAUX, J.-P., 2001, GPS-free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks, in the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii.
- CHANET, J.-P. ; BOFFETY, D. ; LI, J. ; PINET, F. ; GERBE, P. ; SCHNEIDER, M. ; VIGIER, F. ; HOU, K.M., 2003, Ad hoc network for agriculture, 4th EFITA, vol. 2, Debrecen-Budapest (Hungary), p. 899.
- CHARVAT, K., 2001, Next step in precision farming and GIS, *GEOEurope*, vol. 10, p. 44-46.
- CLAUSEN, T. ; JACQUET, P. ; LANOUITI, A. ; MINET, P. ; MÜHLETHALER, P. ; QAYYUM, A. ; VIENNOT, L., 2002, *Optimized Link State Routing Protocol.*, Rap. n° 07, INRIA, Rocquencourt, France, 55 p.
- CUNY, A.-S., 1998, Traçabilité : Guide pratique pour l'agriculture et l'industrie alimentaire, ACTA-ACTIA, Paris, 80 p.
- ERGEN, M. ; COLERI, S. ; DUNDAR, B. ; JAIN, R. ; PURI, A. ; VARAIYA, P., 2002, Application of GPS to Mobile Ip Routing in Wireless Network, *IEEE 56th Vehicular Technology Conference*, p. 1-5.
- ERMEL, E. ; FLADENMULLER, A. ; PUJOLLE, G., 2002, Geographical Routing for Heterogeneous Wireless Systems, in *IFIP Med-Hoc-Net*, Sardaigna (Italy), 5 p.
- GERLA, M. ; HONG, X. ; PEI, G., 2002, *Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad Hoc Networks*, Rap. n°draft-ietf-manet-fsr-03.txt, UCLA, 17 p.
- HAAS, Z.J. ; PEARLMAN, M.-R. ; SAMAR, P., 2002, *The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks*, Rap. n° draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt, Cornell University, 11 p.
- HWANG, I.-S. ; LIU, C.-C. ; WANG, C.-Y., 2002, Link Stability-Based Clustering and Routing in Ad-Hoc Wireless Networks Using Fuzzy Set Theory, *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 9, n° 3, p. 201-212.
- JOHNSON, D.-B. ; MALTZ, D.-A. ; HU, Y.-C. ; JETCHEVA, J., 2002, *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)*, Rap. n° draft-ietf-manet-dsr-07.txt, Rice University, 81 p.
- KARIMI, H.-A. ; KRISHNAMURTHY, P., 2001, Real-Time Routing in Mobile Networks Using GPS and GIS Techniques, 34th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, Hawaii, p. 11.
- KO, Y.-B. ; VAIDYA, N.-H., 1998, Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks, *Mobile Computing and Networking*, p. 66-75.
- KRISHNAMURTHY, P. ; KARIMI, H.-A. ; LIANGSUTTHISAKON, 2000, Telegeoinformatics: A Novel Approach Towards Efficient Resource Allocation and Protocol Development for Wireless Communication, *PDPTA'2000*, Las Vegas, USA.
- LE BARS, J.-M. ; BOFFETY, D., 1997, Gestion modulée des apports d'engrais – Contrôle d'un épandeur par réseau distribué, *Journées Automatique Agriculture et Agro-alimentaire*, Cemagref, Clermont-Ferrand (France), p. 225-230.
- LIN, C.-R. ; GERLA, M., 1997, Adaptive clustering for mobile wireless networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, n° 7, p. 1265-1275.

MARTIN, C., 2001, La mise en place de système d'information dédiés au management de la qualité et de l'environnement de la production agricole : une opération pilote appliquée au secteur des grandes cultures, *Ingénieries*, vol. 26, p. 27-35.

MCKINION, J.-M. ; TURNER, S.-B. ; WILLERS, J.-L. ; READ, J.-J. ; JENKINS, J.-N., 2003, High speed wireless local area network for farming applications, *ASAE Annual International Meeting*, Las Vegas (USA), p. 033057.

PERKINS C.E. ; ROYER E.M. ; DAS B. (2003) *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*. Rap. n° RFC 3561. ietf : Network Working Group, 37 p.

RAMANATHAN, R. ; STEENSTRUP, M., 1998, Hierarchically-organized, Multihop Mobile Wireless Networks for Quality-of-Service Support, *Mobile Networks and Applications*, vol. 3, n° 2, p. 101-119.

ROYER, E.-M. ; TOH, C.-K., 1999, A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, n° 2, p. 46-55.

SERODIO, C. ; B.CUNHA, J. ; MORAIS, R. ; COUTO, C. ; MONTEIRO, J., 2001, A networked platform for agricultural management systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 31, p. 75-90.

STOJMENOVIC, I., 2002, Position based routing in ad hoc networks, *IEEE Communications*, vol. 40, p. 128-134.

TABBANE, S., ed., 1997, *Réseaux Mobile*, Hermès, Paris, 620 p.

THIRION, F. ; SOULIGNAC, V., 2000, Suivi des épandages de boues en agriculture utilisant un GPS et un SIG, *1st world water congress of the International Water Association*, Paris, France, p. 258-265.

TREZENTOS, D., 2002, Standard pour réseaux sans fil : IEEE 802.11, *Traité Télécoms*, vol. TE 7 375, Techniques de l'ingénieur, p. 1-12.

VIGIER, F. ; BOFFETY, D. ; MARIONNEAU, A. ; OLLIVIER, E., 2000, Automated on board system for geo-referenced grain sampling on combine harvester, *11 th International Conference and Exhibition on Mechanization of Field Experiments*, Chelmsford, UK, p. 133-138.

ISO 11783 – Documents d'état de la norme ISO 11783 – Tracteurs et matériels agricoles et forestiers – Réseaux de commande et de communication de données en série – parties 1 à 11.